



Semnan University

# Journal of Modeling in Engineering


Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



## Research Article

# A New Protective Scheme for Discrimination of Internal Fault from Inrush Currents Considering CTs Saturation

Zahra Hasanzadeh-Kami<sup>a,\*</sup>, Ali Akbar Abdoos<sup>a,\*</sup> 

<sup>a</sup> Department of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

## PAPER INFO

### Paper history:

Received: 2023-11-28

Revised: 2024-04-28

Accepted: 2024-05-10

### Keywords:

Power transformer;  
Current transformer;  
Differential protection;  
Fault current;  
Inrush current;  
Current transformer saturation.

## ABSTRACT

Differential protection is one of the most important and basic protections for power transformers. In normal conditions, the differential current is almost zero, but it increases during internal faults. Since the increase in the differential current can have other reasons than the occurrence of an internal fault, the existence of a differential current is not necessarily a good sign of the internal fault occurrence. Some phenomena, such as the inrush current, saturation of current transformers, and over-excitation, also result in the appearance of the differential current. In the presented protection scheme, the differential current signal is analyzed by the discrete Fourier transform. In the first stage, based on the point that the rate of changes in the magnitude of the second harmonic of the differential current in the internal fault with current transformer saturation is much greater than the inrush current, these two events can be distinguished. In the second stage, based on the fact that the ratio of the second harmonic to the fundamental component of the differential current drops rapidly after the occurrence of internal faults without current transformer saturation and reaches almost zero, it can be easily discriminated from other conditions. Various simulations have been performed for proper threshold settings for the above-mentioned criteria to achieve maximum separability. The results obtained from simulation studies on a real 230/63 kV, 160 MVA power transformer reveal that the proposed algorithm remains stable for external faults and transformer energization conditions even during current transformer saturation.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32377.2563>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

\* Corresponding Author.

E-mail address: [a.abdoos@nit.ac.ir](mailto:a.abdoos@nit.ac.ir)

## How to cite this article:

Hasanzadeh Kami, Z. and Abdoos, A. A. (2025). A New Protective Scheme for Discrimination of Internal Fault from Inrush Currents Considering CTs Saturation. Journal of Modeling in Engineering, 23(80), 31-45. doi: 10.22075/jme.2024.32377.2563

## ارائه یک طرح حفاظتی جدید به منظور تمایز خطای داخلی از جریان هجومی با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتورهای جریان

زهرا حسن زاده کامی<sup>۱</sup>، علی اکبر عبدوس<sup>۱\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۷	حفاظت دیفرانسیل یکی از مهمترین طرح‌های حفاظتی ترانسفورماتورهای قدرت می‌باشد. در شرایط عادی، جریان تفاضلی تقریباً صفر است، اما در هنگام وقوع خطای داخلی جریان تفاضلی افزایش می‌یابد. افزایش جریان تفاضلی می‌تواند دلایل دیگری غیر از وقوع خطای داخلی داشته باشد، لذا وجود جریان تفاضلی لزوماً نشانه رخداد خطای داخلی نیست. پدیده‌هایی مانند جریان هجومی، اشباع ترانسفورماتورهای جریان و اضافه تحریک نیز موجب ظهور جریان تفاضلی می‌گردند. بنابراین، تمایز بین جریان هجومی و خطای داخلی برای عملکرد صحیح رله دیفرانسیل ضروری است. در طرح حفاظتی ارائه شده، سیگنال جریان تفاضلی با استفاده از تبدیل فوریه گسسته تحلیل می‌شود. در مرحله اول با استفاده از این ویژگی که شدت تغییرات اندازه هارمونیک دوم جریان دیفرانسیل در خطای داخلی با اشباع ترانسفورماتور جریان، بسیار بیشتر از جریان هجومی می‌باشد، دو حالت ذکر شده از هم متمایز می‌شوند. در مرحله دوم با استفاده از این نکته که نسبت اندازه هارمونیک دوم به مولفه اصلی جریان دیفرانسیل، پس از رخداد خطای داخلی بدون اشباع ترانسفورماتور جریان، به سرعت افت می‌کند و تقریباً به صفر می‌رسد، می‌توان آن را از دیگر شرایط کاری ترانسفورماتور قدرت تفکیک نمود. به منظور دستیابی به حداکثر قدرت تفکیک‌پذیری، شبیه‌سازی‌های مختلفی جهت تعیین دو مقدار آستانه برای شاخص‌های ذکر شده انجام شده است. نتایج به دست آمده بر روی یک ترانسفورماتور واقعی ۲۳۰/۶۳ کیلو ولت با ظرفیت ۱۶۰ مگا ولت آمپر نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در شرایط خطای خارجی و برق‌دار کردن ترانسفورماتور قدرت حتی در زمان اشباع ترانسفورماتور جریان پایدار باقی می‌ماند.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۹	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۱	
<b>واژگان کلیدی:</b> ترانسفورماتور قدرت، ترانسفورماتور جریان، حفاظت دیفرانسیل، جریان خطا، جریان هجومی، اشباع ترانسفورماتور جریان.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32377.2563>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

### ۱- مقدمه

قدرت، تشخیص صحیح جریان هجومی مغناطیس‌کننده از خطای داخلی می‌باشد. روش‌های گوناگونی برای تمایز بین جریان هجومی مغناطیس‌کنندگی و خطای داخلی ارائه شده است، اما این روش‌ها همچنان با محدودیت‌ها و نواقصی مخصوصاً در سطح کاربرد عملی مواجه هستند [۱].

ترانسفورماتورهای قدرت یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین تجهیزات پست‌های فشارقوی در سیستم‌های قدرت می‌باشند. بنابراین حفاظت از آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از چالش‌های اساسی در حفاظت ترانسفورماتورهای

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: a.abdoon@nit.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

استناد به این مقاله:

## ۱-۱- مروری بر ادبیات تحقیق

رله‌های حفاظتی ترانسفورماتورهای قدرت بر پایه طرح حفاظت دیفرانسیل در صدی به همراه نگهدارنده هارمونیک بنا نهاده شده‌اند که تا حدودی برای خطاهای خارجی و جریان‌های هجومی مقاوم می‌باشند. اما اشباع ترانسفورماتورهای جریان می‌تواند تاثیر نامطلوبی بر روی این طرح حفاظتی داشته باشد. از این رو روش‌های مختلفی به منظور حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت ارائه شده است. در مرجع [۲] یک مدل فضای حالت به منظور شبیه‌سازی رفتار غیرخطی و اشباع هسته مغناطیسی ترانسفورماتور قدرت تکفاز ارائه شده است. براساس این مدل یک فیلتر کالمن توسعه یافته برای تخمین جریان سیم پیچ اولیه ارائه شده است. براساس محاسبه جریان باقیمانده که از تفاضل جریان زده شده و جریان اندازه‌گیری شده به دست می‌آید، جریان هجومی از خطای داخلی تفکیک می‌گردد. در برخی از روش‌های ارائه شده، تشخیص خطای داخلی بر اساس آنالیز سیگنال جریان دیفرانسیل در حوزه زمان-فرکانس [۳-۶] می‌باشد. ابزارهای پردازش سیگنال با آنالیز شکل موج‌های جریان دیفرانسیل در حوزه زمان و فرکانس، ویژگی‌های بارز سیگنال را استخراج و سپس به تشخیص شرایط کاری مختلف ترانسفورماتور قدرت می‌پردازند. این

روش‌ها حساسیت زیادی به نویز دارند و به واسطه محاسبات زیاد دارای تاخیر زمانی زیادی می‌باشند. همچنین روش‌های مختلفی مبتنی بر آنالیز شکل موج جریان دیفرانسیل در حوزه زمان جهت استخراج ویژگی‌های بارز ارائه شده است [۷-۱۳].

علاوه بر این، روش‌های هوشمند نیز برای تشخیص خطای داخلی از جریان هجومی مغناطیس‌کنندگی ارائه شده است [۱۴-۲۳]. در الگوریتم‌های هوشمند، ابتدا با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال، ویژگی‌های بارز از شکل موج-های جریان استخراج می‌گردد و سپس با به کارگیری ابزارهای مبتنی بر یادگیری ماشین<sup>۲</sup> و ویژگی‌های استخراج شده از یکدیگر تفکیک می‌شوند. در این روش‌ها از طبقه-کننده‌های مختلفی از جمله شبکه عصبی مصنوعی<sup>۳</sup> [۱۴-۱۶] و شبکه عصبی احتمالاتی<sup>۴</sup> [۱۷، ۱۸]، ماشین یادگیری بینهایت<sup>۵</sup> [۱۹]، شبکه عصبی با یادگیری عمیق<sup>۶</sup> [۲۰، ۲۱]، ماشین بردار پشتیبان<sup>۷</sup> [۲۲، ۲۳]، درخت تصمیم‌گیری<sup>۸</sup> [۲۴]، سیستم‌های فازی-عصبی<sup>۹</sup> استفاده شده است [۲۵، ۲۶]. روش‌های هوشمند، نیاز به حجم بالایی از داده‌های شبیه‌سازی در حالات مختلف کاری ترانسفورماتور قدرت دارند. در جدول ۱ مقایسه کیفی بین روش‌های بررسی شده، انجام شده است.

جدول ۱- مقایسه کیفی بین روش‌های ارائه شده

مرجع	روش تشخیص	حجم محاسبات	حساسیت به نویز	حساسیت به اشباع	قابلیت اتکا	امنیت	سرعت تشخیص	معایب
[۱]	نگهدارنده هارمونیک	کم	خیر	بله	متوسط	بالا	بالا	کاهش دقت با اشباع ترانسفورماتور-های جریان
[۲-۶]	آنالیز فرکانس زمانی	زیاد	بله	بله	متوسط	متوسط	متوسط	نیاز به حجم محاسبات زیاد
[۷-۱۳]	آنالیز در حوزه زمان	متوسط	خیر	بله	متوسط	متوسط	بالا	عدم دقت مناسب در شرایط اشباع ترانسفورماتور جریان
[۱۴-۲۳]	هوشمند	زیاد	خیر	بله	متوسط	متوسط	کم	عدم تعمیم و قابلیت به کارگیری برای ترانسفورماتورهای مختلف

<sup>6</sup> Deep Learning<sup>7</sup> Support Vector Machine<sup>8</sup> Decision Tree<sup>9</sup> Neuro-Fuzzy Systems<sup>2</sup> Machine Learning<sup>3</sup> Artificial Neural Network<sup>4</sup> Probabilistic Neural Network<sup>5</sup> Extreme Learning Machine (ELM)

## ۱-۲- انگیزه‌ها و نوآوری تحقیق

هرچند روش‌های متعددی به منظور تشخیص خطای داخلی از جریان هجومی مغناطیس کننده برای حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت ارائه شده است اما در بسیاری از آن‌ها اشباع ترانسفورماتورهای جریان در نظر گرفته نشده است. اشباع ترانسفورماتورهای جریان می‌تواند هم در زمان عبور جریان خطاهای داخلی و هم در زمان عبور جریان هجومی رخ دهد و روش‌های مبتنی بر نگهدارنده هارمونیک را با چالش جدی مواجه نماید. اشباع ترانسفورماتورهای جریان در حین خطای داخلی باعث ظاهر شدن هارمونیک دوم می‌گردد و از طرف دیگر در زمان عبور جریان هجومی، اشباع ترانسفورماتورهای جریان می‌تواند باعث کاهش دامنه مولفه هارمونیک دوم جریان دیفرانسیل گردد. بنابراین طرح حفاظت دیفرانسیل درصدی مجهز به نگهدارنده هارمونیک در برخی از شرایط فوق‌الذکر عملکرد درستی نخواهند داشت.

لذا در این مقاله، روشی جدیدی به منظور تشخیص خطای داخلی از جریان هجومی مغناطیس کننده برای ترانسفورماتورهای قدرت ارائه می‌گردد. شرط فعال شدن الگوریتم پیشنهادی، عملکرد طرح حفاظت دیفرانسیل درصدی می‌باشد. الگوریتم جدید ارائه شده شامل دو مرحله مهم می‌باشد. در مرحله اول تشخیص خطای داخلی به همراه اشباع ترانسفورماتور جریان از جریان هجومی صورت می‌گیرد که مبتنی بر تغییرات اندازه هارمونیک دوم می‌باشد. سیگنال‌های جریان دیفرانسیل توسط تبدیل فوریه آنالیز می‌شوند و مولفه‌های اصلی و هارمونیک‌های دوم استخراج می‌گردد و سپس تغییرات اندازه هارمونیک دوم محاسبه می‌گردد و با توجه به آستانه در نظر گرفته شده، خطای داخلی به همراه اشباع ترانسفورماتور جریان از جریان هجومی مغناطیس کننده تشخیص داده می‌شود. در مرحله دوم تشخیص خطای داخلی بدون اشباع ترانسفورماتورهای جریان از دیگر حالات کاری ترانسفورماتور قدرت صورت می‌گیرد. در این مرحله با استفاده از این نکته که نسبت اندازه هارمونیک دوم به مولفه اصلی جریان دیفرانسیل در خطای داخلی و بدون اشباع ترانسفورماتور جریان، به سرعت دچار افت زیادی می‌شود، می‌توان رخداد فوق را به درستی از دیگر شرایط کاری ترانسفورماتور قدرت با انتخاب یک آستانه مناسب تفکیک نمود.

## ۱-۳- بخش‌بندی مقاله

در فصل دوم سیستم تست با ذکر جزئیات شبیه‌سازی معرفی می‌گردد. در بخش سوم الگوریتم پیشنهادی به منظور تفکیک خطای داخلی از جریان هجومی ارائه می‌گردد و سپس نتایج به دست آمده در شرایط مختلف با در نظر گرفتن پارامترهای موثر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و سرانجام در فصل چهارم مقاله با نتیجه‌گیری پایان می‌یابد.

## ۲- سیستم مورد مطالعه

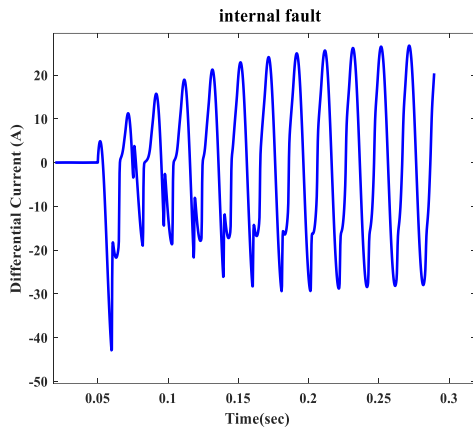
به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم ارائه شده، یک ترانسفورماتور قدرت سه فاز با نسبت تبدیل ۲۳۰/۶۳ کیلوولت با اتصال ستاره/ مثلث و ظرفیت ۱۶۰ مگاوات آمپر در محیط نرم افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی شده است. با استفاده از اطلاعات ولتاژ و جریان مربوط به آزمایش بی‌باری و با محاسبه نقطه زانویی و مقدار هسته هوایی، منحنی مغناطیس‌شوندگی هسته ترانسفورماتور قدرت شبیه‌سازی می‌گردد [۲۷]. نسبت ترانسفورماتورهای جریان در سمت فشار قوی و فشار ضعیف به ترتیب برابر با ۶۰۰/۱ و ۲۰۰/۱ می‌باشد که مطابق با مدل جیلز استرتون شبیه‌سازی شده‌اند. پارامترهای مربوط به منحنی مغناطیس‌شوندگی هسته‌ی ترانسفورماتورهای جریان با توجه به مدل جیلز استرتون استخراج شده است [۲۸]. تمامی ترانسفورماتورهای جریان دارای کلاس دقت 5P20 بوده و بردن نامی آن‌ها ۳۰ ولت آمپر می‌باشند. مشخصات ترانسفورماتورهای جریان در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- ساختار ترانسفورماتورهای جریان

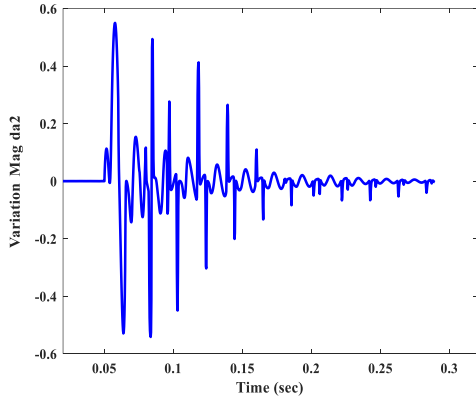
ترانسفورماتور جریان	فشار قوی	فشار ضعیف
نسبت تبدیل	۶۰۰/۱	۲۰۰/۱
سطح مقطع هسته (متر مربع)	$۳۲/۹ \times ۱۰^{-۴}$	$۱۰/۳۶ \times ۱۰^{-۴}$
طول مسیر هسته (متر)	۰/۸۴۸	۰/۵۴۸
سطح ولتاژ (کیلوولت)	۲۳۰	۶۳
مقاومت سیم‌پیچ ثانویه (اهم)	۴/۳	۷/۷۷

انواع خطاهای داخلی و خارجی و همچنین برق‌دار شدن ترانسفورماتور قدرت در شرایط مختلف شبیه‌سازی شده است. انواع مختلف خطا در لحظات متفاوت با فاصله زمانی ۰/۵ میلی ثانیه و برای مقاومت‌های متنوع، تحت شرایط

ترانسفورماتور افزایش می‌یابد. در شکل (۱) جریان دیفرانسیل خطای داخلی با در نظر گرفتن اشباع برای ترانسفورماتور قدرت شبیه‌سازی شده نشان داده شده‌است. شکل (۲) تغییرات اندازه هارمونیک دوم را در این حالت نمایش می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، شاخص ارائه‌شده در لحظه وقوع خطا تا مقدار  $0.5$  افزایش می‌یابد و سپس مقدار آن کاهش می‌یابد و با نوساناتی همراه می‌شود و نهایتاً به صفر میل می‌کند.



شکل ۱- جریان دیفرانسیل خطای داخلی با اشباع ترانسفورماتور جریان



شکل ۲- تغییرات اندازه هارمونیک دوم در حالت خطای داخلی با اشباع ترانسفورماتور جریان

### ۳-۱-۲- جریان هجومی مغناطیس‌کنندگی

در زمان برق‌دار شدن ترانسفورماتور قدرت، جریان هجومی مغناطیس‌کننده از منبع به سمت سیم پیچی که برق‌دار می‌شود، کشیده می‌شود. این جریان گذرا بوده و می‌تواند تا چند ثانیه تداوم داشته‌باشد. دامنه جریان هجومی ممکن است تا  $10$  برابر مقدار نامی افزایش یابد. دامنه جریان‌های هجومی مغناطیس‌کننده به عواملی مانند شار پسماند، لحظه وصل کلید و منحنی مغناطیس‌شوندگی هسته ترانسفورماتور وابسته می‌باشد که باید در شبیه‌سازی‌ها

بارگذاری گوناگون شبیه‌سازی شده است. علاوه‌براین، جریان هجومی مغناطیس‌کننده برای لحظات مختلف کلیدزنی با در نظر گرفتن شار پسماند بین  $-80$  تا  $+80$  درصد پیک شار پیوندی شبیه‌سازی می‌گردد. به منظور مدل کردن شار پسماند، منابع جریان DC در سمت اولیه قرار گرفته شده است.

فرکانس سیستم قدرت  $50$  هرتز و فرکانس نمونه‌برداری  $4$  کیلو هرتز در نظر گرفته شده است. لذا با توجه به قانون نایکوئیست تا فرکانس‌های  $2000$  هرتز قابل استخراج می‌باشد. هر چه فرکانس نمونه‌برداری افزایش یابد تعداد نمونه‌ها افزایش می‌یابد و می‌توان فرکانس‌های بالاتری را استخراج نمود اما در سیستم‌های قدرت معمولاً تا هارمونیک پنجم ظاهر می‌گردد. بنابراین افزایش بیش از حد فرکانس نمونه‌برداری باعث افزایش حجم محاسبات می‌گردد و تاثیر چشمگیری بر افزایش دقت روش پیشنهادی ندارد.

### ۳- الگوریتم پیشنهادی

#### ۳-۱- شاخص ارائه‌شده جهت تشخیص خطای داخلی

به همراه اشباع ترانسفورماتور جریان از جریان هجومی مغناطیس‌کننده

در این بخش یک شاخص مناسب مبتنی بر تغییرات اندازه هارمونیک دوم جهت تشخیص خطای داخلی به همراه اشباع ترانسفورماتور جریان از جریان هجومی مغناطیس‌کننده ارائه شده است که از رابطه زیر به دست می‌آید.

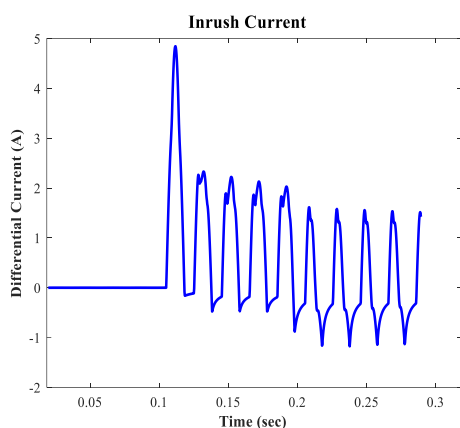
$$\Delta I_2(t) = |I_2(t+1)| - |I_2(t)| \quad (1)$$

$I_2$  هارمونیک دوم جریان دیفرانسیل در زمان  $t$  می‌باشد. در این روش پس از استخراج سیگنال‌های جریان دیفرانسیل و اعمال تبدیل فوریه بر روی داده‌های یک سیکل، تغییرات اندازه هارمونیک دوم محاسبه می‌گردد. سپس با در نظر گرفتن یک آستانه مناسب، دو حالت فوق از یکدیگر تفکیک می‌گردند.

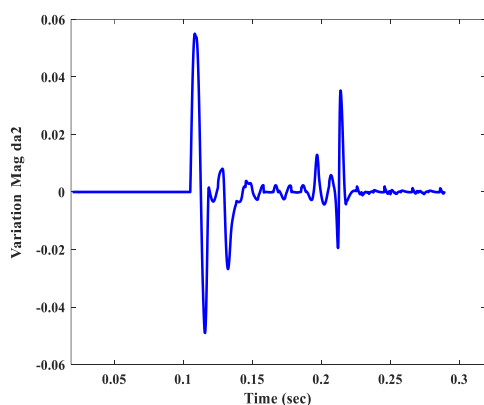
#### ۳-۱-۱- خطای داخلی با اشباع ترانسفورماتور جریان

طرح حفاظت دیفرانسیل باید در هنگام رخداد خطای داخلی، در کمترین زمان ممکن فرمان قطع را صادر کند. عواملی مانند نوع خطا (خطای تک‌فاز، دو فاز، دو فاز به هم به زمین، سه فاز)، لحظه‌ی وقوع خطا، شرایط باری مختلف و امپدانس خطا بر روی شکل موج جریان دیفرانسیل تاثیر دارند. همچنین به واسطه‌ی افزایش دامنه‌ی جریان و گاهی به دلیل ظاهر شدن مؤلفه‌ی DC، احتمال اشباع

نوساناتی همراه می‌گردد و پس از مدتی مقدار آن تقریباً صفر می‌شود.



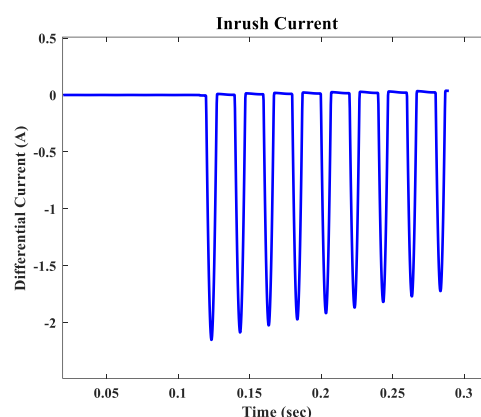
شکل ۵- جریان دیفرانسیل ناشی از جریان هجومی با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان



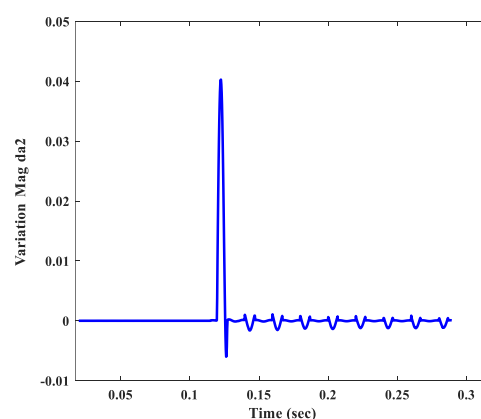
شکل ۶- تغییرات اندازه هارمونیک دوم ناشی از جریان هجومی با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان

۳-۱-۳- تعیین مقدار آستانه مناسب برای شاخص اول به منظور تشخیص خطای داخلی با اشباع ترانسفورماتور جریان از جریان هجومی مغناطیس‌کنندگی، باید یک مقدار آستانه مناسب برای شاخص ارائه شده تعیین گردد. با توجه به شکل (۲)، بعد از رخداد خطای داخلی با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان، شاخص ارائه شده در لحظه وقوع خطا از صفر تا مقدار  $0/5$  افزایش می‌یابد و پس از آن به صورت نوسانی کاهش می‌یابد و نهایتاً به صفر همگرا می‌شود. شکل (۳) جریان دیفرانسیل ناشی از جریان هجومی بدون در نظر گرفتن اشباع را نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است، شاخص محاسبه شده برای جریان هجومی بدون اشباع در لحظه برق‌دار شدن دارای مقدار  $0/04$  می‌باشد. با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود، با به اشباع رفتن ترانسفورماتور جریان، شاخص محاسبه شده

لحاظ گردد. در شکل (۳) جریان دیفرانسیل ناشی از جریان هجومی بدون اشباع ترانسفورماتور جریان نمایش داده شده است و در شکل (۴) تغییرات اندازه هارمونیک دوم متناظر با آن مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌گردد، تغییرات اندازه هارمونیک دوم در لحظه برق‌دار شدن از مقدار صفر تا  $0/04$  افزایش می‌یابد و سپس مقدار آن کاهش می‌یابد و به مقدار صفر می‌رسد.



شکل ۳- جریان دیفرانسیل ناشی از جریان هجومی بدون در نظر گرفتن اشباع

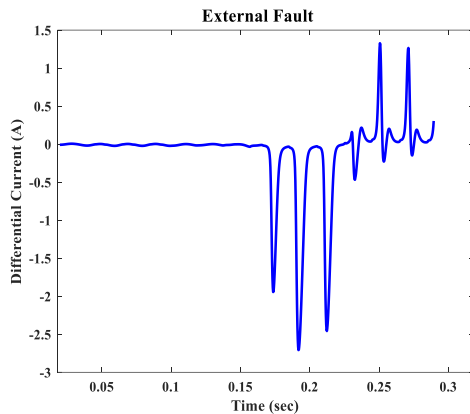


شکل ۴- تغییرات اندازه هارمونیک دوم برای جریان هجومی بدون اشباع ترانسفورماتور جریان

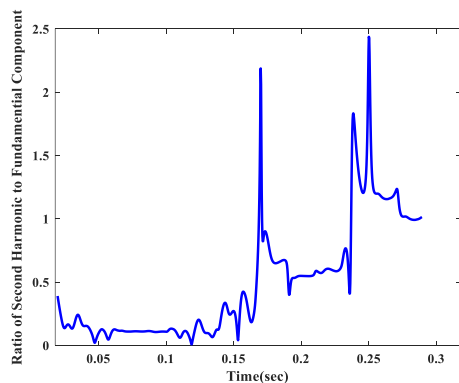
در شکل (۵) نمونه‌ای از جریان دیفرانسیل ناشی از جریان هجومی مغناطیس‌کننده با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان نمایش داده شده است. به دلیل وجود مولفه DC در جریان هجومی، هسته ترانسفورماتور جریان اشباع می‌شود و جریان ظاهر شده در ثانویه بعد از  $0/1$  ثانیه دچار اعوجاج می‌گردد. شکل (۶) تغییرات اندازه هارمونیک دوم را در این حالت نمایش می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، شاخص ارائه شده در لحظه  $0/1$  ثانیه تا مقدار  $0/05$  افزایش می‌یابد و سپس مقدار آن کاهش می‌یابد و با

داخلی بدون اشباع ترانسفورماتور جریان مشاهده می‌گردد. همانگونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، نسبت اندازه هارمونیک دوم به مولفه اصلی در خطای داخلی بدون در نظر گرفتن اشباع پس از رخداد خطا تا ۱/۴ افزایش و سپس به شدت کاهش می‌یابد و تقریباً به صفر می‌رسد.

**۳-۲-۲- خطای خارجی با اشباع ترانسفورماتور جریان**  
در هنگام وقوع خطای خارجی ممکن است به دلیل وجود اشباع ترانسفورماتور جریان، جریان ثانویه با توجه به سطح اشباع، موج گردد. لذا ممکن است در هنگام رخداد خطای خارجی، جریان دیفرانسیل به اندازه‌ای افزایش یابد که رله فرمان قطع را صادر کند. بنابراین لازم است تا از عملکرد اشتباه رله در شرایط خطای خارجی جلوگیری گردد. در شکل (۹) جریان دیفرانسیل ناشی از خطای خارجی با اشباع ترانسفورماتور جریان نمایش داده شده است. همانگونه که در شکل (۱۰) نمایش داده شده است در خطای خارجی با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان، نسبت اندازه هارمونیک دوم به مولفه اصلی از مقدار ۰/۴ تا ۲/۴ افزایش می‌یابد و سپس به مقدار ۱/۲ می‌رسد.



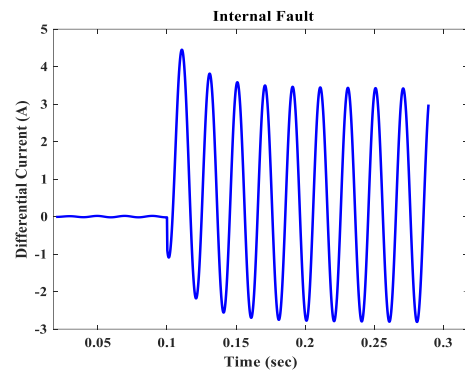
شکل ۹- جریان دیفرانسیل ناشی از خطای خارجی با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان



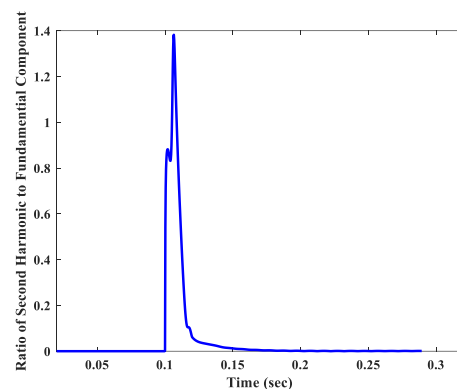
شکل ۱۰- نسبت هارمونیک دوم به مولفه اصلی ناشی از خطای خارجی با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان

تا ۰/۰۵ افزایش می‌یابد. با توجه به مشاهدات و شبیه سازی‌های متعدد انجام شده، با تعیین مقدار ۰/۲ به عنوان آستانه شاخص مذکور، حاشیه مطلوبی برای تشخیص و عملکرد صحیح رله به دست خواهد آمد.

**۳-۲- شاخص ارائه شده جهت تشخیص خطای داخلی بدون در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان از دیگر شرایط کاری ترانسفورماتور قدرت**  
در این مرحله، تشخیص خطای داخلی بدون اشباع ترانسفورماتور جریان از دیگر حالات کاری ترانسفورماتور قدرت با استفاده از نسبت اندازه هارمونیک دوم به مولفه اصلی  $\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$  صورت می‌گیرد. در این روش با استفاده از این نکته که شاخص فوق، در خطای داخلی بدون اشباع ترانسفورماتور جریان پس از رخداد خطا دچار افت بسیار زیادی شده، می‌توان با انتخاب یک آستانه مناسب خطای داخلی بدون اشباع را از دیگر شرایط کاری ترانسفورماتور قدرت به درستی تفکیک نمود.

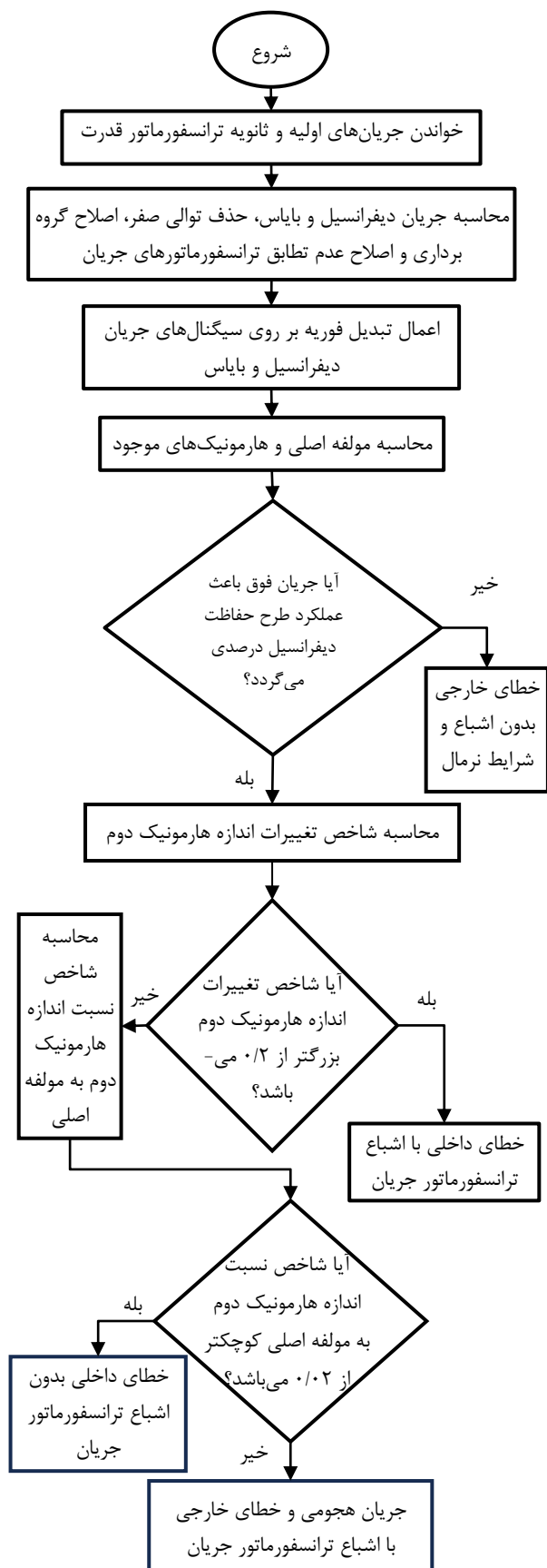


شکل ۷- جریان دیفرانسیل ناشی از خطای داخلی بدون در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان



شکل ۸- نسبت اندازه هارمونیک دوم به مولفه اصلی ناشی از خطای داخلی بدون اشباع ترانسفورماتور جریان

**۳-۲-۱- خطای داخلی بدون اشباع ترانسفورماتور جریان**  
در شکل (۷) نمونه‌ای از جریان دیفرانسیل ناشی از خطای



شکل ۱۱- طرح الگوریتم حفاظتی پیشنهادی

۳-۲-۳- تعیین مقدار آستانه مناسب برای شاخص دوم به منظور تشخیص خطای داخلی بدون اشباع ترانسفورماتور جریان از دیگر شرایط کاری ترانسفورماتور قدرت، باید یک مقدار آستانه مناسب برای دومین شاخص ارائه شده، تعیین گردد. همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، پس از رخداد خطای داخلی بدون در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان، نسبت اندازه هارمونیک دوم به مولفه اصلی در ابتدای رخداد خطا افزایش و سپس پس از طی یک سیکل کاهش شدیدی می‌یابد و به صفر میل می‌کند. از طرف دیگر بررسی نسبت اندازه هارمونیک دوم به مولفه اصلی در هنگام وقوع خطای خارجی با اشباع ترانسفورماتور جریان در شکل (۱۰) نشان می‌دهد که با به اشباع رفتن ترانسفورماتور جریان در هنگام خطای خارجی، شاخص ارائه شده افزایش و مقدار آن به حدود  $2/5$  نیز می‌رسد. بنابراین با تعیین مقدار آستانه  $0.2$  برای این شاخص، حاشیه مطلوبی برای تشخیص خطای داخلی بدون اشباع ترانسفورماتور جریان از جریان هجومی و خطای خارجی با اشباع ترانسفورماتور جریان به دست خواهد آمد.

### ۳-۳- بررسی عملکرد الگوریتم ارائه شده در شرایط کاری مختلف

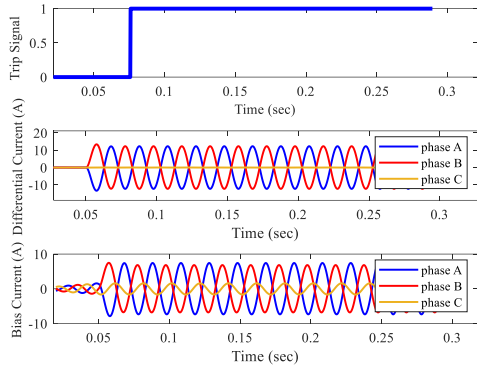
#### ۳-۳-۱- بررسی عملکرد الگوریتم ارائه شده برای انواع خطا و جریان هجومی مغناطیس کننده با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان

در شکل (۱۱) نحوه پیاده سازی الگوریتم ارائه شده، نشان داده شده است. به منظور ارزیابی عملکرد روش ارائه شده، سیگنال جریان دیفرانسیل برای شرایط کاری مختلف ترانسفورماتور قدرت از جمله خطای داخلی و شرایط برق دار شدن ترانسفورماتور قدرت مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور ارزیابی صحت الگوریتم ارائه شده، شدیدترین جریان هجومی و خطای داخلی با در نظر گرفتن اشباع هسته ترانسفورماتور جریان انتخاب شده‌اند.

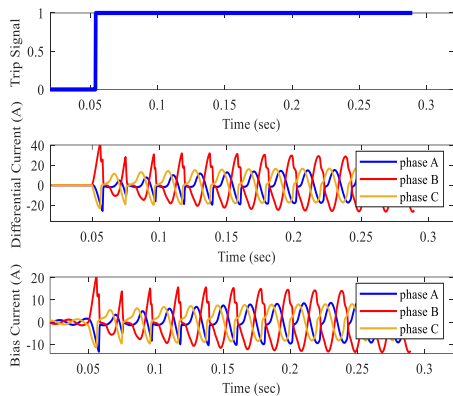
در شکل (۱۲) جریان‌های دیفرانسیل و بایاس سه فاز برای جریان هجومی به همراه اشباع ترانسفورماتورهای جریان نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۱۲) مشاهده می‌گردد، الگوریتم ارائه شده تحت شدیدترین جریان هجومی فرمان قطع را صادر نمی‌کند. در شکل (۱۳) نیز جریان‌های دیفرانسیل و بایاس سه فاز برای خطای داخلی AG به همراه اشباع ترانسفورماتورهای جریان نشان داده شده است.



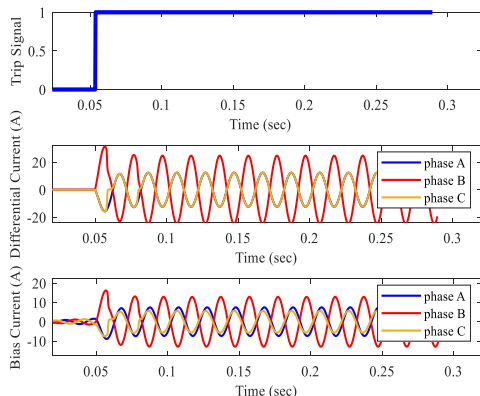
می‌باشد. شکل (۱۷) جریان‌های دیفرانسیل سه فاز مربوط به خطای سه فاز داخلی را نمایش می‌دهد. لحظه وقوع خطا ۰/۰۵ ثانیه و لحظه صدور فرمان قطع ۰/۰۵۵۳ ثانیه است که حدود ۵/۳ میلی ثانیه نیاز است تا تشخیص خطا توسط الگوریتم انجام شود.



شکل ۱۴- جریان دیفرانسیل و بایاس به همراه سیگنال قطع برای خطای AG بدون در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان

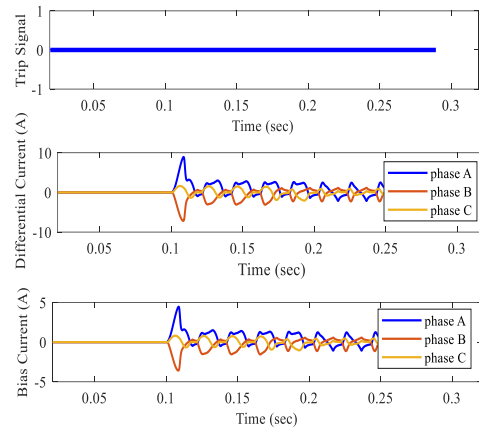


شکل ۱۵- جریان‌های دیفرانسیل و بایاس سه فاز خطای ABG به همراه سیگنال قطع با اشباع ترانسفورماتور جریان

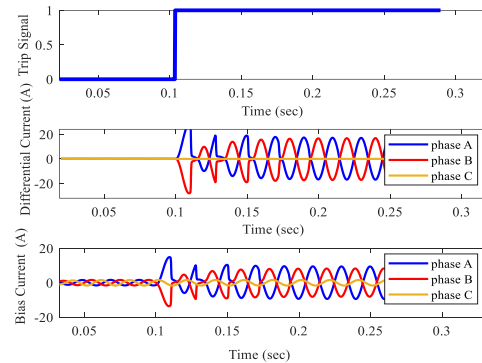


شکل ۱۶- جریان‌های دیفرانسیل و بایاس سه فاز خطای AB به همراه سیگنال قطع با اشباع ترانسفورماتور جریان

لحظه رخداد خطا ۰/۱ ثانیه و لحظه صدور فرمان قطع ۰/۱۰۶۸ ثانیه است که حدود ۶/۸ میلی ثانیه نیاز است تا تشخیص خطای داخلی توسط الگوریتم انجام شود. لذا روش پیشنهادی قادر است برای خطای تکفاز نشان داده شده در شکل (۱۳) در کمتر از یک سیکل فرمان قطع را صادر نماید.



شکل ۱۲- جریان‌های دیفرانسیل و بایاس به همراه سیگنال قطع ناشی از جریان هجومی با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان

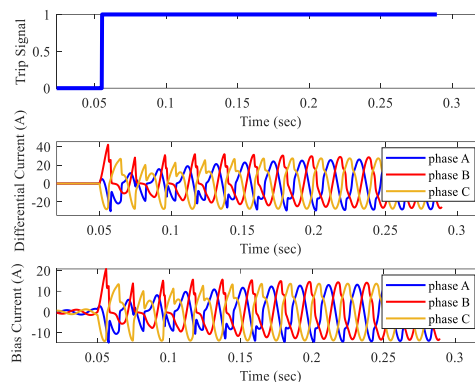


شکل ۱۳- جریان دیفرانسیل و بایاس به همراه سیگنال قطع ناشی از خطای AG با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان

شکل (۱۴) سیگنال‌های جریان دیفرانسیل برای خطای داخلی تکفاز به زمین بدون در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان به همراه سیگنال قطع الگوریتم ارائه شده را نشان می‌دهد. لحظه رخداد خطا ۰/۰۵ ثانیه و لحظه صدور فرمان قطع ۰/۰۷۶ ثانیه می‌باشد. همچنین در شکل-های (۱۵) و (۱۶) جریان‌های دیفرانسیل و بایاس خطاهای داخلی دو فاز به زمین و دو فاز بهم نمایش داده شده است. در هر دو حالت لحظه اعمال خطا ۰/۰۵ ثانیه می‌باشد اما لحظه صدور فرمان قطع در حالت خطای دو فاز به زمین ۰/۰۵۴ ثانیه و در حالت خطای دو فاز بهم ۰/۰۵۳۷ ثانیه

۲۳۰/۶۳ کیلو ولت با و بدون در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان به ترتیب برابر با ۹۸/۵۰ و ۹۹/۵۰ درصد می‌باشد. همچنین خطاهای خارجی با دقت ۱۰۰ درصد تفکیک می‌شود. دقت تشخیص جریان‌های هجومی با و بدون اشباع ترانسفورماتورهای جریان به ترتیب برابر با ۹۸ و ۹۸/۵۰ درصد می‌باشد.

برای ترانسفورماتور واحد ۱۵.۷۵/۴۰۰ کیلو ولت، دقت تشخیص خطای داخلی با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان برابر با ۹۸/۵۰ درصد و بدون اشباع ترانسفورماتور جریان برابر با ۹۹ درصد می‌باشد. همچنین تمامی خطاهای خارجی به درستی تشخیص داده می‌شود. این الگوریتم قادر است که در شرایط اشباع و بدون اشباع ترانسفورماتورهای جریان، جریان‌های هجومی را با دقت ۹۷/۵ درصد تشخیص دهد. نتایج به دست آمده تایید می‌نماید که طرح حفاظتی پیشنهادی را می‌توان برای تشخیص خطاهای داخلی از جریان هجومی مغناطیس کننده و خطاهای خارجی در ترانسفورماتورهای قدرت با نسبت تبدیل و ظرفیت‌های مختلفی به کار گرفت.



شکل ۱۷- جریان‌های دیفرانسیل و بایاس سه فاز خطای ABC به همراه سیگنال قطع با اشباع ترانسفورماتور جریان

در انتها صحت روش ارائه شده بر روی ترانسفورماتور واحد مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج شبیه‌سازی‌ها و دقت الگوریتم پیشنهادی برای ۲۰۰ نمونه در هر حالت در جدول ارائه شده‌است. همانگونه که مشاهده می‌شود، الگوریتم فوق قادر است شرایط کاری مختلف ترانسفورماتور قدرت را با دقت خوبی از یکدیگر تفکیک نماید.

دقت تشخیص خطاهای داخلی برای ترانسفورماتور قدرت

جدول ۳- دقت به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی در شرایط کاری مختلف ترانسفورماتور قدرت (بر حسب درصد)

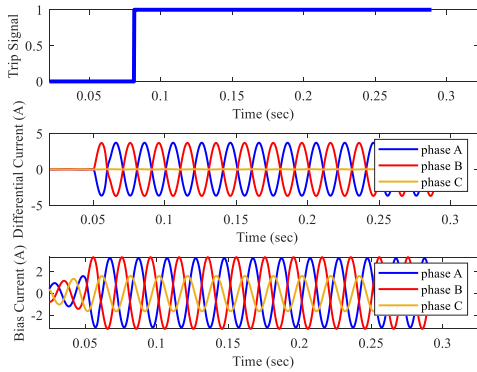
شرایط کاری	خطای داخلی		خطای خارجی		جریان هجومی		دقت نهایی
	بدون اشباع	با اشباع	بدون اشباع	با اشباع	بدون اشباع	با اشباع	
مشخصات ترانسفورماتور قدرت							
ترانسفورماتور ۲۳۰/۶۳ کیلو ولت با اتصال ستاره/ مثلث و ظرفیت ۱۶۰ مگاوات آمپر	۹۸/۵۰	۹۹/۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۸	۹۸/۵۰	۹۹/۰۸
ترانسفورماتور واحد ۱۵.۷۵/۴۰۰ کیلو ولت با اتصال مثلث/ستاره و ظرفیت ۲۰۰ مگاوات آمپر	۹۸/۵۰	۹۹	۱۰۰	۱۰۰	۹۷/۵۰	۹۷/۵	۹۸/۷۵

۰/۰۵ ثانیه رخ می‌دهد و روش پیشنهادی قادر است که خطای داخلی با اشباع ترانسفورماتور جریان را در لحظه ۰/۰۵۵ ثانیه و خطای داخلی بدون اشباع ترانسفورماتور جریان را در لحظه ۰/۰۶۹۵ ثانیه تشخیص دهد. همچنین با توجه به شکل‌های (۲۰) و (۲۱) مشاهده می‌گردد که برای جریان هجومی با و بدون وجود اشباع ترانسفورماتورهای جریان، حتی در شرایط نویزی، هیچ‌گونه فرمان قطعی صادر نمی‌شود. بنابراین طرح حفاظتی فوق در شرایط نویزی مقاوم بوده و دقت آن تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد.

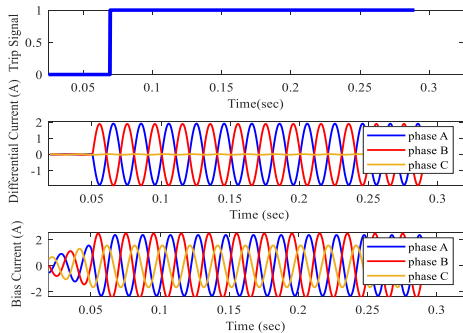
### ۳-۳-۲- بررسی عملکرد الگوریتم ارائه شده در شرایط نویزی

در سیستم‌های قدرت وجود نویز به دلیل مجاورت هادی‌های ارتباطی بین تجهیزات اندازه‌گیری و رله‌های حفاظتی امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. لذا در این بخش عملکرد الگوریتم ارائه شده در شرایط نویزی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور به سیگنال‌های جریان دیفرانسیل نویز سفید گوسی با نسبت سیگنال به نویز ۲۵ دسیبل اضافه می‌شود. همانگونه که در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) دیده می‌شود، خطا در لحظه

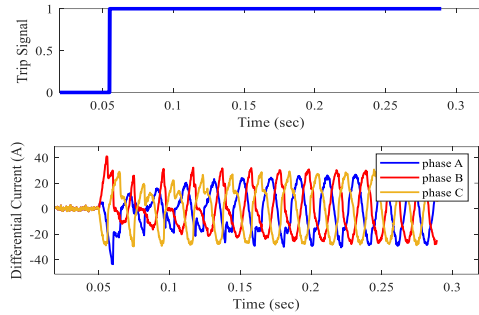
۳-۳-۳- بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن امیدانس‌های بزرگ برای خطاهای داخلی و خارجی در این بخش به آنالیز عملکرد الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن خطای داخلی و خطای خارجی امیدانس بالا با مقاومت‌های ۵۰ و ۱۰۰ اهم پرداخته می‌شود. در شکل‌های (۲۲) و (۲۳) جریان‌های دیفرانسیل و بایاس و سیگنال قطع برای خطای داخلی با در نظر گرفتن مقاومت ۵۰ و ۱۰۰ اهم نمایش داده شده است. در شکل‌های (۲۴) و (۲۵) جریان‌های دیفرانسیل و بایاس و سیگنال قطع برای خطای خارجی با در نظر گرفتن مقاومت ۵۰ و ۱۰۰ اهم نمایش داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد الگوریتم پیشنهادی خطای داخلی را به درستی تشخیص می‌دهد و فرمان قطع را در کمتر از یک سیکل صادر می‌کند. برای خطای خارجی امیدانس بالا نیز هیچ‌گونه فرمان قطعی صادر نمی‌شود. نتایج به دست آمده عدم حساسیت روش ارائه شده به خطاهای امیدانس بالا را تصدیق می‌نماید.



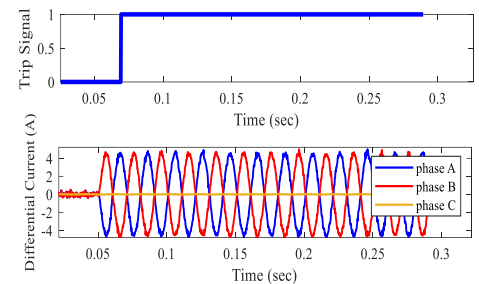
شکل ۱۸- جریان‌های دیفرانسیل خطای داخلی بدون اشباع ترانسفورماتور جریان به همراه سیگنال قطع با در نظر گرفتن نويز ۲۵ دسیبل



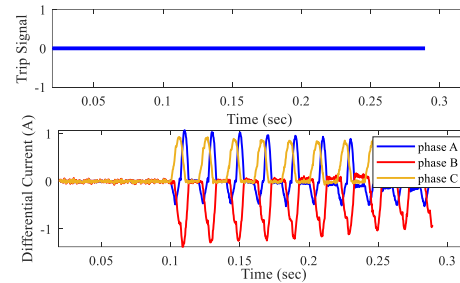
شکل ۱۹- جریان‌های دیفرانسیل خطای داخلی بدون اشباع ترانسفورماتور جریان به همراه سیگنال قطع با در نظر گرفتن نويز ۲۵ دسیبل



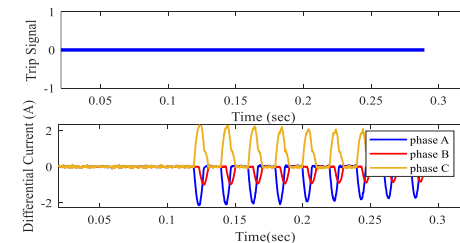
شکل ۲۰- جریان‌های دیفرانسیل خطای خارجی بدون اشباع ترانسفورماتور جریان به همراه سیگنال قطع با در نظر گرفتن نويز ۲۵ دسیبل



شکل ۲۱- جریان‌های دیفرانسیل خطای خارجی بدون اشباع ترانسفورماتور جریان به همراه سیگنال قطع با در نظر گرفتن نويز ۲۵ دسیبل



شکل ۲۲- جریان‌های دیفرانسیل خطای خارجی بدون اشباع ترانسفورماتور جریان به همراه سیگنال قطع با در نظر گرفتن نويز ۲۵ دسیبل

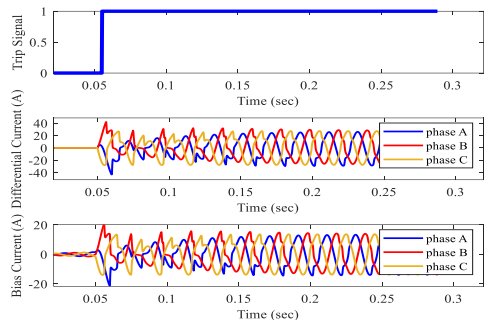


شکل ۲۳- جریان‌های دیفرانسیل خطای خارجی بدون اشباع ترانسفورماتور جریان به همراه سیگنال قطع با در نظر گرفتن نويز ۲۵ دسیبل

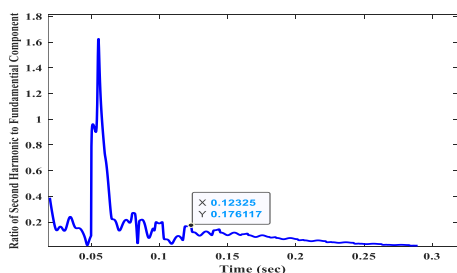
دقت ۹۳/۶ درصد می‌باشد. همچنین روش هوشمند ترکیبی که با به کارگیری ماشین بردار پشتیبان و تبدیل موجک در مرجع [۲۲] ارائه شده، دارای دقت ۸۳/۷ درصد می‌باشد. مقایسه نتایج دلالت بر برتری روش ارائه شده از لحاظ دقت تشخیص می‌باشد.

### ۳-۴-۲- مقایسه الگوریتم ارائه شده با طرح حفاظت دیفرانسیل درصدی با نگهدارنده هارمونیک

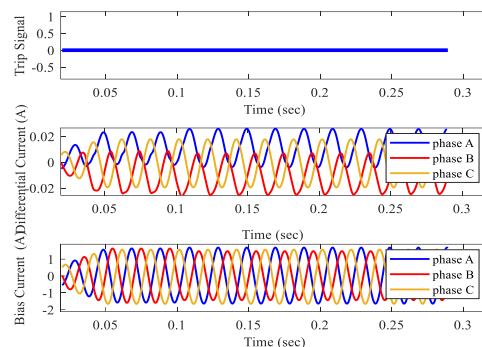
در این بخش عملکرد طرح پیشنهادی با طرح حفاظت دیفرانسیل درصدی با نگهدارنده هارمونیک که در بسیاری از رله‌های دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد، ارائه شده است. شکل (۲۶) جریان دیفرانسیل سه فاز ترانسفورماتور قدرت را در حین خطای داخلی تکفاز به زمین با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان نمایش می‌دهد که در آن خطا در لحظه ۰/۰۵ ثانیه رخ داده و فرمان قطع با اعمال الگوریتم پیشنهادی در لحظه ۰/۰۵۵۳ ثانیه صادر می‌گردد. همانگونه که مشاهده می‌شود الگوریتم پیشنهادی پیش از اشباع ترانسفورماتور جریان فرمان قطع را صادر می‌کند. شکل (۲۷) نسبت هارمونیک دوم به مولفه اصلی را در این حالت نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار این نسبت در برخی لحظات بیشتر از ۰/۱۵ می‌باشد که مانع عملکرد رله‌های دیفرانسیل درصدی مبتنی بر نگهدارنده هارمونیک می‌گردد.



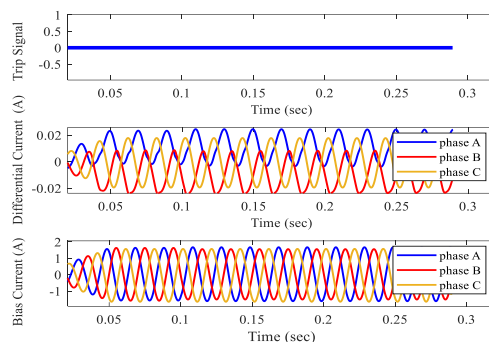
شکل ۲۶- جریان‌های دیفرانسیل و بایاس خطای تکفاز به زمین به همراه نمایش سیگنال قطع



شکل ۲۷- نسبت هارمونیک دوم به مولفه اصلی برای خطای تکفاز به زمین با اشباع ترانسفورماتور جریان



شکل ۲۴- جریان‌های دیفرانسیل و بایاس خطای خارجی به همراه نمایش سیگنال قطع با مقاومت ۵۰ اهم



شکل ۲۵- جریان‌های دیفرانسیل و بایاس خطای خارجی به همراه نمایش سیگنال قطع با مقاومت ۱۰۰ اهم

### ۳-۴-۳- نتایج مقایسه‌ای با سایر روش‌های ارائه شده روش‌های ارائه شده

۳-۴-۳-۱- مقایسه عملکرد الگوریتم پیشنهادی با برخی روش‌های ارائه شده به منظور نشان دادن برتری عملکرد الگوریتم ارائه شده، نتایج مقایسه‌ای با برخی مقالات در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- مقایسه دقت الگوریتم ارائه شده با برخی روش‌های ارائه شده

روش به کار گرفته شده	دقت نهایی الگوریتم (بر حسب درصد)
الگوریتم پیشنهادی	۹۹/۰۸
روش مبتنی بر فیلتر کالمن گسترده [۲]	۹۶/۳
روش مبتنی بر شبکه عصبی احتمالی [۱۸]	۹۳/۶
ترکیبی از ماشین بردار پشتیبان و تبدیل موجک [۲۲]	۸۳/۷

همانطور که مشاهده می‌شود الگوریتم ارائه شده در این پژوهش دارای دقت ۹۹/۰۸ درصد (برای ترانسفورماتور قدرت ۲۳۰/۶۳ کیلو ولت) می‌باشد. روش ارائه شده مبتنی بر فیلتر کالمن گسترده در مرجع [۲]، دارای دقت ۹۶/۳ درصد می‌باشد و روش هوشمند ارائه شده در مرجع [۱۸]، دارای

ویژگی که شدت تغییرات اندازه هارمونیک دوم جریان دیفرانسیل در خطای داخلی به همراه اشباع ترانسفورماتور جریان بسیار بیشتر از جریان هجومی مغناطیس کننده می باشد، دو حالت مختلف از یکدیگر تمایز داده می شوند. در مرحله دوم تشخیص خطای داخلی بدون در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان از دیگر حالات کاری ترانسفورماتور قدرت صورت می گیرد. از آنجاییکه نسبت اندازه هارمونیک دوم به مولفه اصلی جریان دیفرانسیل، در خطای داخلی بدون اشباع پس از خطا دچار افت بسیار زیادی شده (تقریباً صفر)، می توان این حالت را از جریان هجومی مغناطیس کننده و خطاهای خارجی به همراه اشباع ترانسفورماتور جریان، تشخیص داد. با انتخاب دو آستانه مناسب برای شاخص های معرفی شده می توان با دقت بالایی خطاهای داخلی را از دیگر شرایط کاری ترانسفورماتور قدرت تفکیک نمود. نتایج به دست آمده برتری روش پیشنهادی را از لحاظ دقت و سرعت تشخیص نسبت به طرح حفاظت دیفرانسیل درصدی مجهز به نگهدارنده هارمونیک و برخی روش های ارائه شده در سالیان اخیر نشان می دهد.

#### تعارض منافع

نویسندگان اعلام می کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

#### تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده اند.

#### مشارکت های نویسندگان

زهرا حسن زاده کامی: روش شناسی، نگارش پیش نویس اصلی، نرم افزار.

علی اکبر عبدوس: روش شناسی، اعتبارسنجی، بررسی و ویرایش.

#### منابع مالی

نویسندگان از حمایت مالی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل با شماره گرنت BNUT/390066/1403 تشکر می کنند

در جدول ۵ و ۶ نتایج مقایسه ای بین الگوریتم ارائه شده و روش دیفرانسیل درصدی با بایاس هارمونیک، برای ترانسفورماتور قدرت ۲۳۰/۶۳ کیلو ولت با و بدون در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتورهای جریان ارائه شده است. همانطور که در جدول ۵ مشاهده می شود، روش نگهدارنده هارمونیک بدون در نظر گرفتن اشباع (با دقت کلی ۸۳/۴۸ درصد) عملکرد ضعیفی در مقابل الگوریتم پیشنهادی (با دقت کلی ۹۹ درصد) ارائه می دهد. همچنین با اشاره به جدول (۶) مشاهده می شود که روش دیفرانسیل درصدی با بایاس هارمونیک، در شرایط اشباع ترانسفورماتور جریان دارای دقت کلی ۶۵/۷۱ درصد می باشد، در حالیکه الگوریتم پیشنهادی دارای دقت کلی ۹۸/۲۵ درصد می باشد.

جدول ۵- مقایسه الگوریتم ارائه شده با طرح حفاظت دیفرانسیل درصدی با نگهدارنده هارمونیک بدون در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان

طرح نگهدارنده هارمونیک	روش پیشنهادی	شرایط کاری
۹۶/۲	۹۹/۵	خطا داخلی
۷۰/۷۶	۹۸/۵	جریان هجومی
۸۳/۴۸	۹۹	دقت کلی

جدول ۶- مقایسه الگوریتم ارائه شده با طرح حفاظت دیفرانسیل درصدی با نگهدارنده هارمونیک با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان

طرح نگهدارنده هارمونیک	روش پیشنهادی	شرایط کاری
۴۹/۹۶	۹۸/۵	خطا داخلی
۸۱/۴۶	۹۸	جریان هجومی
۶۵/۷۱	۹۸/۲۵	دقت کلی

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، یک روش موثر به منظور تشخیص خطای داخلی از دیگر شرایط کاری در ترانسفورماتور قدرت با در نظر گرفتن اشباع ترانسفورماتور جریان ارائه شده است. در طرح حفاظتی ارائه شده سیگنال جریان دیفرانسیل توسط تبدیل فوریه آنالیز می شود. در مرحله اول، تشخیص خطای داخلی به همراه اشباع ترانسفورماتور جریان از جریان هجومی انجام می شود. در این مرحله با استفاده از این

## مراجع

- [1] Z. Moravej, and S. Bagheri. "Condition monitoring techniques of power transformers: A review." *Journal of Operation and Automation in power Engineering* 3, no. 1 (2015): 71-82.
- [2] F. Naseri, Z. Kazemi, M.M. Arefi, and E. Farjah. "Fast discrimination of transformer magnetizing current from internal faults: An extended Kalman filter-based approach." *IEEE Transactions on Power Delivery* 33, no. 1 (2017): 110-118.
- [3] M. Eissa. "A novel digital directional transformer protection technique based on wavelet packet." *IEEE Transactions on Power Delivery* 20, no. 3 (2005): 1830-1836.
- [4] Z. Moravej, A.A. Abdoos, and M. Sanaye-Pasand. "Power transformer protection using improved S-transform." *Electric Power Components and Systems* 39, no. 11 (2011): 1151-1174.
- [5] M.F. Abbas, L. Zhiyuan, H. Zhiguo, and Z. Guanjun. "Inrush current discrimination in power transformer differential protection using wavelet packet transform based technique." *In 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, pp. 944-948. IEEE, 2016.
- [6] Z. Moravej, and A.A. Abdoos. "An improved fault detection scheme for power transformer protection." *Electric Power Components and Systems* 40, no. 10 (2012): 1183-1207.
- [7] A. Hooshyar, M. Sanaye-Pasand, 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* 27, no. 3 (2012): 1394-1404.
- [8] A. Sahebi, and H. Samet. "Efficient method for discrimination between inrush current and internal faults in power transformers based on the non-saturation zone." *IET Generation, Transmission & Distribution* 11, no. 6 (2017): 1486-1493.
- [9] D.D. Patel, N.G. Chothani, and K.D. Mistry. "Sequence component of currents based differential protection of power transformer." *In 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, pp. 1-6. IEEE, 2015.
- [10] L.L. Zhang, Q.H. Wu, T.Y. Ji, and A.Q. Zhang. "Identification of inrush currents in power transformers based on higher-order statistics." *Electric Power Systems Research* 146 (2017): 161-169.
- [11] E. Ali, A. Helal, H. Desouki, K. Shebl, S. Abdelkader, and O.P. Malik. "Power transformer differential protection using current and voltage ratios." *Electric Power Systems Research* 154 (2018): 140-150.
- [12] Z. Moravej, A. Ebrahimi, M. Pazoki, and M. Barati. "Time domain differential protection scheme applied to power transformers." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 154 (2023): 109465.
- [13] C. Mo, T.Y. Ji, L.L. Zhang, and Q.H. Wu. "Equivalent statistics based inrush identification method for differential protection of power transformer." *Electric Power Systems Research* 203 (2022): 107664.
- [14] Z. Moravej, and D.N. Vishwakarma. "ANN-based harmonic restraint differential protection of power transformer." *Journal-Institution of Engineers India Part EL Electrical Engineering Division* (2003): 1-6.
- [15] Z. Li, Z. Jiao, and A. He. "Knowledge-based artificial neural network for power transformer protection." *IET Generation, Transmission & Distribution* 14, no. 24 (2020): 5782-5791.
- [16] R.A. Naghizadeh, B. Vahidi, and S.H. Hosseinian. "An adaptive approach for simulation of inrush current in three-phase transformers considering hysteresis effects." *Electric Power Components and Systems* 44, no. 6 (2016): 673-682.
- [17] Z. Moravej, A.A. Abdoos, and M. Sanaye-Pasand. "A new approach based on S-transform for discrimination and classification of inrush current from internal fault currents using probabilistic neural network." *Electric Power Components and Systems* 38, no. 10 (2010): 1194-1210.
- [18] M. Tripathy, R.P. Maheshwari, and H.K. Verma. "Power transformer differential protection based on optimal probabilistic neural network." *IEEE Transactions on Power Delivery* 25, no. 1 (2009): 102-112.

- [19] M.B. Raichura, N.G. Chothani, and D.D. Patel. "Identification of internal fault against external abnormalities in power transformer using hierarchical ensemble extreme learning machine technique." *IET Science, Measurement & Technology* 14, no. 1 (2020): 111-121.
- [20] S. Afrasiabi, M. Afrasiabi, B. Parang, and M. Mohammadi. "Designing a composite deep learning based differential protection scheme of power transformers." *Applied Soft Computing* 87 (2020): 105975.
- [21] A. He, Z. Jiao, Z. Li, and Y. Liang. "Discrimination between internal faults and inrush currents in power transformers based on the discriminative-feature-focused CNN." *Electric Power Systems Research* 223 (2023): 109701.
- [22] S. Jazebi, B. Vahidi, and M. Jannati. "A novel application of wavelet based SVM to transient phenomena identification of power transformers." *Energy Conversion and Management* 52, no. 2 (2011): 1354-1363.
- [23] D.D. Patel, N.G. Chothani, Khyati D. Mistry, and M. Raichura. "Design and development of fault classification algorithm based on relevance vector machine for power transformer." *IET Electric Power Applications* 12, no. 4 (2018): 557-565.
- [24] N. Shrivastava. "Power transformer differential protection based on DWT and EDT." *International Journal of Research in Engineering, Science and Management* 5, no. 2 (2022): 154-158.
- [25] M. Tripathy, R.P. Maheshwari, and H.K. Verma. "Neuro-fuzzy technique for power transformer protection." *Electric Power Components and Systems* 36, no. 3 (2008): 299-316.
- [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* 38, no. 6 (2010): 675-694.
- [27] D. Woodford. "Introduction to pscad/emtdc v3." Manitoba HVDC research center Inc (2000).
- [28] U. Annakkage, P.G. McLaren, E. Dirks, R.P. Jayasinghe, and A.D. Parker. "A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis." *IEEE Transactions on Power Delivery* 15, no. 1 (2000): 57-61.