

# تشخیص جریان هجومی و جریان خطا در ترانسفورماتورهای قدرت با ترکیب روش‌های مبتنی بر ویژگی‌های شکل موج و هارمونیک دوم

احسان شالوئی، میثم محمدی لندی

شرکت توزیع نیروی برق خوزستان، شرکت توزیع نیروی برق خوزستان

## ۱. مقدمه

ترانسفورماتورهای قدرت از عناصر اصلی در سیستم‌های قدرت هستند. از آنجایی که خرابی ترانس‌ها ممکن است به تعمیرات پر هزینه و زمانبری منجر شود، بدین منظور از رله‌های حفاظتی جهت جلوگیری از خرابی غیرمنتظره آنها استفاده می‌شود. یکی از دلایل عملکرد نامناسب سیستم‌های حفاظتی، جریان هجومی مغناطیس کننده است. پدیده جریان هجومی مغناطیس کننده، حالت گذرای بزرگی است که به هنگام برقرار شدن ترانسفورماتور روی می‌دهد. اندازه جریان هجومی ممکن است تا ۱۰ برابر جریان نامی ترانسفورماتور باشد که به عملکرد نامناسب سیستم‌های حفاظتی منجر می‌گردد. اخیراً، روش‌های زیادی برای حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت پیشنهاد شده است تا از عملکرد اشتباه رله‌های دیفرانسیلی جلوگیری شود. مرجع [۲] به مرور اثر جریان هجومی، وقوع خطاهای داخلی و خارجی و وقوع عیب مکانیکی در سیم‌پیچی ترانسفورماتور روی عملکرد رله‌های حفاظتی دیفرانسیل ترانسفورماتور پرداخته است. در روش پیشنهادی مرجع [۳] از ویژگی‌های داخلی جریان هجومی و با تعریف شاخص‌های مبتنی بر شکل موج جریان به منظور تمایز جریان خطا و جریان هجومی شدید استفاده شده است. اگر چه روش پیشنهادی در جریان هجومی بالا با وجود اشباع CT ها قابل استفاده بوده، ولی نسبت به تشخیص جریان‌های هجومی با دامنه پایین دارای ضعف می‌باشد.

چکیده — رله‌های دیفرانسیلی حفاظت اصلی برای ترانسفورماتورهای قدرت به منظور تشخیص خطاهای مختلف هستند. از آنجاییکه جریان هجومی و خطای داخلی ترانسفورماتورها دارای مشخصات نزدیک به یکدیگر هستند این رله‌ها در تمایز بین این دو جریان دچار خطا میشوند و باعث برهم خوردن عملکرد سیستم قدرت میشوند. یکی از نگرانی‌های اساسی در حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتورهای قدرت مربوط به لحظه کلید زنی میباشد. در این مقاله روشی به منظور تشخیص خطای داخلی ترانسفورماتورها و جریان هجومی پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی از ترکیب روش‌های هارمونیک دوم و روش‌های مبتنی بر مشخصات داخلی شکل موج جریان خطا تشکیل شده است. در همین راستا شاخص‌های جدید که نشان دهنده ویژگی‌های داخلی شکل موج جریان هجومی هستند، ارائه شده اند همچنین به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی، سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی جریان هجومی و جریان خطا را با اطمینان و سرعت کافی تشخیص می‌دهد.

واژه‌های کلیدی — تقارن شکل موج؛ جریان هجومی؛ جریان خطای داخلی ترانسفورماتور؛ حفاظت ترانسفورماتور قدرت.

## عنوان مقاله

هفتمین کنفرانس بین المللی ترانسفورماتور ۱۳۹۹ - تهران، ایران

اگرچه تا کنون روش های زیادی به منظور تشخیص جریان هجومی از جریان خطا پیشنهاد شده اند، ولی تاکنون روشی عملی برای این هدف ارائه نشده است. این روش ها یا نسبت به اشباع CT دارای خطا بوده یا دارای محاسبات پیچیده بوده و یا نسبت به حالات خاصی از جریان هجومی و جریان خطا قابلیت عملکرد دارند.

روش های مبتنی بر ویژگی های شکل موج جریان برخلاف روش های هارمونیک دوم، برای تمایز جریان های هجومی بالا عملکرد مناسبی دارند. در این مقاله الگوریتمی با ترکیب روش های مبتنی بر ویژگی های شکل موج جریان اولیه ترانسفورماتورها و روش هارمونیک دوم، جهت تشخیص صحیح خطا و تمایز آن از جریان هجومی پیشنهاد شده است. بر خلاف روش های پیشین، روش پیشنهادی در برابر نویز و اشباع CT های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور تأثیر پذیر نمی باشد. به منظور استفاده از ویژگی های شکل موج ورودی به ترانسفورمر یک تابع که اصطلاحاً تابع تفاضلی نامیده می شود (DF)، تعریف شده است. تابع تفاضلی نشان دهنده ی فاصله ی عمودی نمونه های برداشتی جریان ورودی به ترانسفور می باشد که در فاصله افقی برابری نسبت به پیک جریان ورودی قرار دارند. سه شاخص بر اساس دامنه تابع تفاضلی، سطح زیر نمودار تابع تفاضلی و مجموع مربعات تابع تفاضلی به منظور آشکار سازی جریان هجومی از سایر اغتشاشات و نویز موجود در سیگنال و همچنین عدم تأثیر پذیری از اشباع CT ها تعریف شده اند. علاوه بر این در جریان های هجومی مقدار پائین، روش هارمونیک دوم با ترکیب روش تابع تفاضلی جریان خطا را از جریان هجومی تشخیص می دهد.

به صورت خلاصه، نو آوری های مقاله به صورت زیر قابل بیان هستند:

عدم تأثیر پذیری از اشباع CT و نویز موجود در سیگنال ورودی به ترانسفورماتور.

تلفیق روش های هارمونیک دوم و شاخص های مبتنی بر تابع تفاضلی به منظور افزایش قابلیت اطمینان.

اصلاح و بهینه سازی شاخص های مراجع [۳] جهت تمایز بهتر و مطمئن تر بیشتر روش های پیشنهادی، بر مبنای اندازه ی مولفه دوم جریان های هارمونیک بنا شده اند [5]. این روش ها در جریان های هجومی مقدار پایین عملکرد مناسبی دارند در حالیکه در حین وقوع جریان هجومی شدید به علت اشباع CT ممکن است عملکردی درستی نداشته باشند. نویسندگان در [12] از تغییرات شدید اندوکتانس لحظه ای معادل، به عنوان

## ۲. الگوریتم پیشنهادی

ترانسفورماتورهای قدرت کاهنده معمولاً از اتصال (Ynd) بهره می برند که اغلب از سیم پیچ سمت ستاره زمین شده تغذیه می شوند. جریان هجومی در چنین اتصال سیم پیچی، دارای عدم تقارن های زیادی است که به کمک تئوری اثر کمکی [۲۰]، قابل توجیح است. این عدم تقارن ها می تواند برای تشخیص مطمئن جریان هجومی بکار گرفته شود.

در الگوریتم پیشنهادی که در شکل شماره ۳ نمایش داده شده است ابتدا جریان ورودی به ترانسفورماتور نمونه برداری می شود، سپس با استفاده از نمونه های برداشتی تابع تفاضلی (difference function) یا به اختصار (DF) تعریف می شود. در مرحله ی بعد به وسیله ی شاخص های مرتبط با تابع تفاضلی و روش هارمونیک دوم جریان خطا از جریان هجومی تمییز داده می شود.

الف) تابع تفاضلی و شاخص های تابع تفاضلی

در این الگوریتم پس از استخراج اطلاعات شبکه بر اساس نمونه گیری های انجام شده تابع تفاضلی مطابق (۱) به صورت زیر تعریف می شود:

$$DF[j] = ix\_diff [np - j] - ix\_diff [np + j], j = 1, \dots, np \quad (1)$$

در نمونه برداری np، akسترم جریان می رسمیم و آن را با ix\_diff [np] نشان می دهیم که x بیانگر فاز A یا B یا C است. شکل ۱ محاسبه جریان تفاضلی برای یک جریان هجومی نمونه نشان می دهد.

عنوان مقاله

هفتمین کنفرانس بین المللی ترانسفورماتور ۱۳۹۹ - تهران، ایران

معیار دوم در تشخیص جریان هجومی با خطاهای داخلی در ترانسفورماتور می‌تواند شامل سطح زیر منحنی NDF از لحظه عبور از صفر آن تا نقطه پیک باشد. با توجه به گسسته بودن منحنی NDF، می‌توان سطح زیر منحنی را با شاخص رابطه زیر تعریف نمود.

$$\text{Criterion2} = \sum_{j=1}^{np} \{NDF[j]\} \quad (4)$$

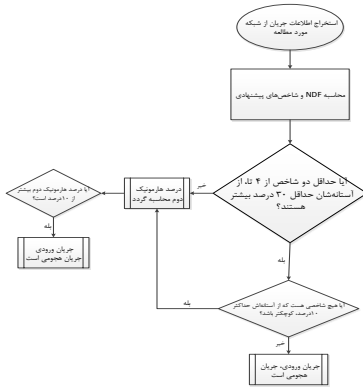
شاخص سوم نیز به صورت رابطه زیر تعریف می‌گردد. در این شاخص، حاصل جمع مربعات NDF بعنوان شاخص متمایزکننده جریان هجومی و جریان خطا بکارگرفته می‌شود. ویژگی این شاخص این است که بر اساس خاصیت توان دوم اختلافات فاحش (خطاهای بزرگ) را خیلی بزرگتر نشان می‌دهد و در مقابل اختلافات ناچیز که ممکن است بر اثر نویز ایجاد شده باشد را وقتی به توان دوم میرساند دامنه آنها بسیار ناچیز می‌شود.

$$\text{Criterion3} = \sum_{j=1}^{np} (NDF[j])^2 \quad (5)$$

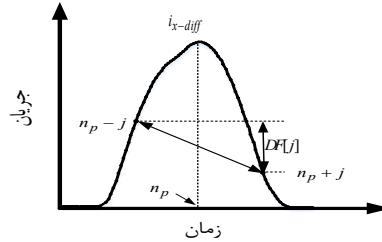
ب) روش هارمونیک

در این روش اگر دامنه جریان ورودی نسبت به دامنه جریان نامی بیشتر از ۲۰ تا ۱۲ درصد باشد جریان هجومی تشخیص داده میشود [۳].

شماتیک الگوریتم پیشنهادی به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق این الگوریتم، اگر حداقل دوشاخص از چهار شاخص بررسی شده از مقدار آستانه بیشتر باشند در این صورت جریان هجومی خواهد بود. در غیر اینصورت، روش هارمونیک تعیین کننده خواهد بود.



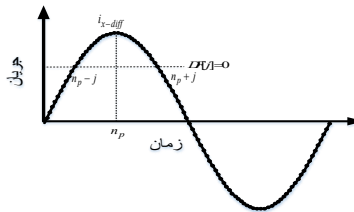
شکل ۳: الگوریتم پیشنهادی نهایی



شکل ۱: محاسبه تابع تفاضلی برای یک جریان هجومی

همانطور که در شکل ۲ نمایش داده شده است، شکل موج جریان خطا صرفنظر از مولفه dc میراثونده، نسبت به نقطه اکسترمم دارای تقارن است و مقدار تابع تفاضلی برای تمام نمونه‌ها برابر صفر می‌باشد.

برای محاسبه جریان تفاضلی برای یک موج با دامنه زیاد می‌توان شاخص تعریف شده را نرمالیزه کرد و آنرا تابع تفاضلی نرمالیزه شده (NDF) می‌نامید که از تقسیم DF یا تابع تفاضلی بر اکسترمم جریان تفاضلی مطابق رابطه زیر بدست می‌آید:



شکل ۲: محاسبه تابع تفاضلی برای یک جریان خطا

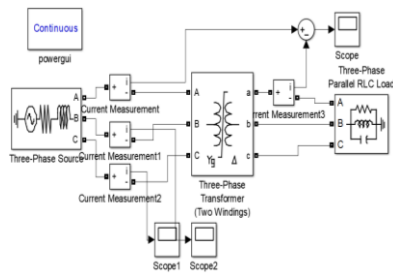
$$NDF = DF / \max(ix\_diff), j = 1, \dots, np \quad (2)$$

برای آشکارسازی بهتر اختلافات شکل موج NDF در پدیده جریان هجومی بزرگ در مقایسه با سایر اغتشاشات، سه شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود. اولین معیار، ماکزیمم یا دامنه منحنی NDF است که از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\text{Criterion 1} = \max_{j=1}^{np} \{ |NDF[j]| \} \quad (3)$$

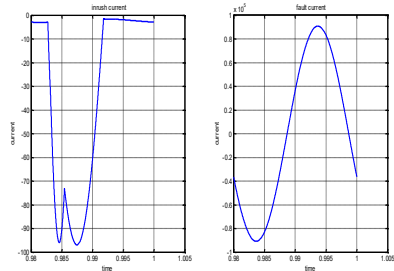
مطابق این معیار، دامنه منحنی NDF می‌تواند بعنوان یک ویژگی متمایز کننده جریان هجومی با پدیده‌های دیگر مثل خطای داخلی ترانسفورماتور انتخاب شود.

در این سناریو، ابتدا ترانسفورماتور با اتصال سیم پیچی  $Ygd$  مورد مطالعه قرار گرفته است. میزان شار پسماند در سه فاز  $a$  و  $b$  و  $c$  به ترتیب برابر با  $0.8$ ،  $-0.7$  و  $0.8$  در نظر گرفته شده است. سپس از جریان فاز  $b$  برای ارزیابی عملکرد راهکار پیشنهادی استفاده شد. مقدار فاز منبع ولتاژ از صفر تا  $45$  درجه و با گام‌های  $5$  تایی تغییر داده شد. از این رو،  $10$  حالت مختلف و  $10$  جریان هجومی با شکل موج‌های مختلف در این تحقیق مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. همچنین تنظیمات مشابهی در مدار شکل ۶ که بیانگر وقوع خطا در شبکه است، شبیه سازی شده است.



شکل ۶: مدار مورد مطالعه در سناریو اول

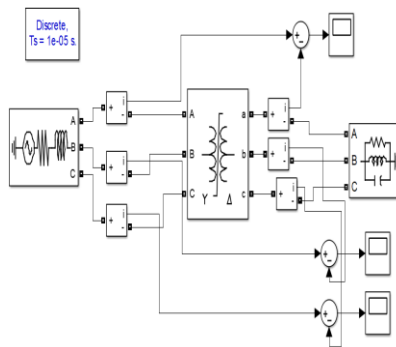
شکل‌های ۷ و ۸ دو نمونه از  $10$  نمونه شکل موج جریان خطا و جریان هجومی مورد مطالعه در این سناریو را نشان می‌دهد.



شکل ۷: شکل جریان هجومی و جریان خطا در فاز  $45$  درجه ولتاژ

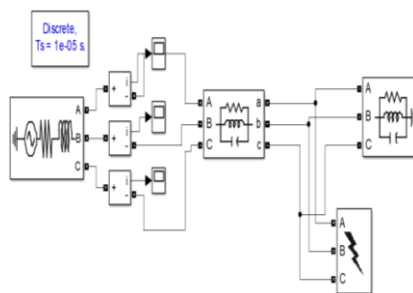
به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، سیستم قدرت زیردر نرم افزار متلب شبیه سازی شده است. شکل‌های ۴ و ۵ سیستم تحت مطالعه را نشان می‌دهد. در مدار شکل‌های ۴ و ۵ دو نوع ترانسفورماتور مختلف شبیه‌سازی خواهد شد و همچنین میزان شار پسماند در هر مدل اتصال متفاوت تعیین خواهد شد. همچنین فازهای متفاوتی برای شروع خطا در نظر گرفته خواهد شد.

نتایج شبیه سازی برای سناریوهای مختلف، شامل اتصال‌های مختلف ترانسفورمر، مقادیر مختلف شار پسماند، فازهای مختلف برای منبع ولتاژ، با در نظر گرفتن جریان هجومی و خطای داخلی ترانسفورمر محاسبه شده‌اند.



شکل ۴: مدار مورد مطالعه در یک حالت خاص با ترانسفورماتور با اتصال

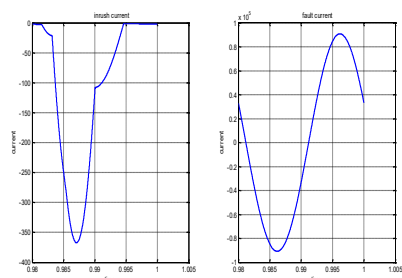
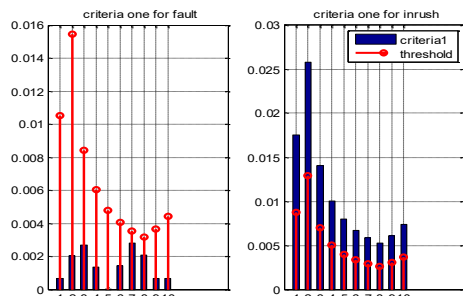
$Yd$



شکل ۵: مدار مورد مطالعه در یک حالت خاص برای مطالعه خطا

## عنوان مقاله

هفتمین کنفرانس بین المللی ترانسفورماتور ۱۳۹۹ - تهران، ایران



شکل ۸: شکل جریان هجومی و جریان خطا در فاز ۰ درجه ولتاژ

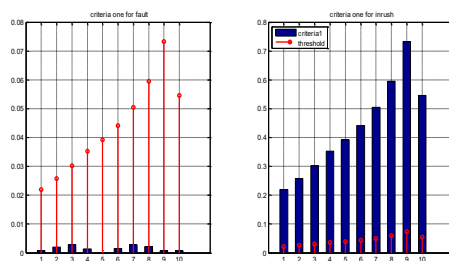
### شکل ۱۰: مقدار شاخص اول در شرایط وقوع خطا و جریان هجومی در اتصال نوع دوم

خطوط قرمز رنگ و دارای انتهای کروی شکل، مقدار آستانه ها برای شاخص اول را نشان می دهد. این معیار به میزان ۱۰ درصد دامنه هر شاخص در هر حالت در نظر گرفته شده است. مشاهده می شود که در شکل سمت راست در شکل ۹ که از عنوان آن مشخص است که مقدار شاخص اول برای جریان هجومی را نشان می دهد، مقدار معیارها از مقدار آستانه فراتر رفته و از این رو، وقوع جریان هجومی را تشخیص می دهد. در حالیکه در شکل سمت چپ که مطابق عنوان آن، مقدار شاخص را در حالت اعمال جریان خطا به آن نشان می دهد، مقدار آستانه ها اصلا تحریک نشده و از این رو، این شاخص با قابلیت اطمینان بالایی در این اتصال از ترانسفورماتور برای تشخیص جریان هجومی و خطا عمل می نماید.

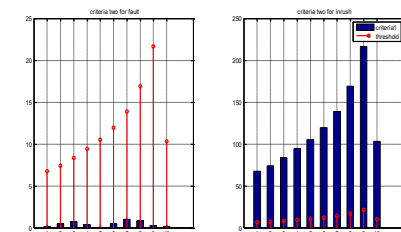
### ۳/۲ سناریو دوم

در این سناریو، مطالعات مشابه سناریو اول و برای دو اتصال مختلف از ترانسفورماتور در نظر گرفته شده است و این بار مقدار شاخص دوم مورد محاسبه و ارزیابی قرار گرفته است. از مقدار آستانه مشخص است که این شاخص نیز می تواند در تشخیص جریان هجومی و جریان خطا در حالت های مختلف مورد مطالعه، مفید واقع شود. البته باید توجه داشت که در اتصال نوع دوم، در مورد هفتم که فاز شروع ولتاژ در آن برابر با ۳۰ درجه است، مقدار شاخص دوم برای خطا و جریان هجومی تا حدودی نزدیک بهم شده است و با این حال، با انتخاب آستانه معینی که برای همه حالت ها یکسان و برابر با ۸۰ درصد دامنه هر شاخص در نظر گرفته شده است، از یکدیگر تشخیص داده شده اند.

اینک در این سناریو، کارایی شاخص اول برای تمایز جریان خطا و جریان هجومی مورد بررسی قرار می گیرد. شکل ۹ نتایج بکارگیری شاخص اول را برای ۱۰ سناریو مورد مطالعه نشان می دهد. جریان های هجومی در هر سناریو با سناریو دیگر متفاوت است. چراکه در هر سناریو، لحظه بر مقدار کردن ترانسفورماتور که از مهمترین عوامل اثرگذار در جریان هجومی است، متفاوت است.

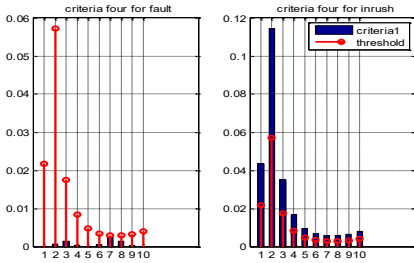


شکل ۹: مقدار شاخص اول در شرایط وقوع خطا و جریان هجومی در اتصال نوع اول



## عنوان مقاله

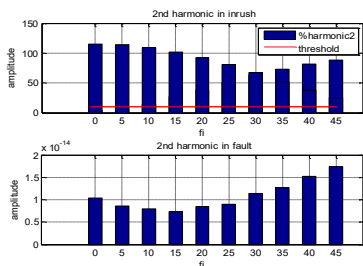
هفتمین کنفرانس بین المللی ترانسفورماتور ۱۳۹۹ - تهران، ایران



شکل ۱۴: مقدار شاخص سوم در شرایط وقوع خطا و جریان هجومی در زوایای مختلف ولتاژ فاز در اتصال ستاره-مثلث نوع دوم

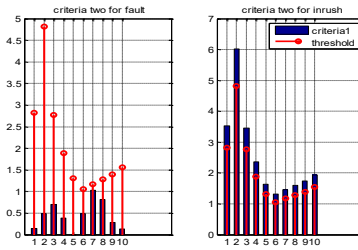
### سناریو چهارم ۳/۴

تا کنون با اجرای راهکارها فوق مشاهده گردید که هرچند روش NDF و شاخص های منتجه از آن، قدرت تفکیک بالایی در جریان هجومی و خطا دارند. اما با این حال مشخص شد که روش NDF در برخی از حالت ها، خصوصا در مواقعی که فاز منبع ولتاژ در حدود ۲۰ تا ۴۵ درجه قرار دارد، قدرت تفکیک خود را تا حدودی از دست می دهد و شاخص های مختلف منتجه از NDF در هر دو حالت وقوع جریان خطا و جریان هجومی، به مقدار آستانه نزدیک می شوند. در این مواقع به نظر می رسد که باید شاخص دیگری را جایگزین این روش نمود. دو شکل زیر، میزان شاخص هارمونیک دوم را در هر دو حالت وقوع جریان خطا و جریان هجومی و برای دو مدار مورد مطالعه که در سناریو یک معرفی شدند، نشان می دهد. همانطور که مشخص است، این دو شاخص تفکیک بسیار مطلوبی را برای جریان خطا و جریان هجومی در همه زوایا ایجاد کرده اند.



شکل ۱۵: درصد هارمونیک دوم در وقوع جریان هجومی و جریان خطا در اتصال ستاره-مثلث نوع اول

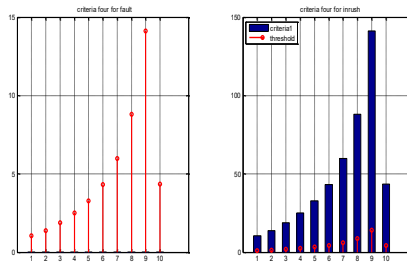
شکل ۲۱: مقدار شاخص دوم در شرایط وقوع خطا و جریان هجومی در زوایای مختلف ولتاژ فاز در اتصال ستاره-مثلث نوع دوم



شکل ۱۲: مقدار شاخص دوم در شرایط وقوع خطا و جریان هجومی در زوایای مختلف ولتاژ فاز در اتصال ستاره-مثلث نوع دوم

### سناریو سوم ۳/۳

تا این مرحله، عملکرد دو شاخص اول و دوم معرفی شده مقدار آستانه ها در اتصال نوع اول، ده درصد مقدار هر آستانه در جریان هجومی و در اتصال نوع دوم، برابر با ۵۰ درصد مقدار هر شاخص در وقوع جریان هجومی در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۳: مقدار شاخص سوم در شرایط وقوع خطا و جریان هجومی در زوایای مختلف ولتاژ فاز در اتصال ستاره-مثلث نوع اول

## عنوان مقاله

هفتمین کنفرانس بین المللی ترانسفورماتور ۱۳۹۹ - تهران، ایران

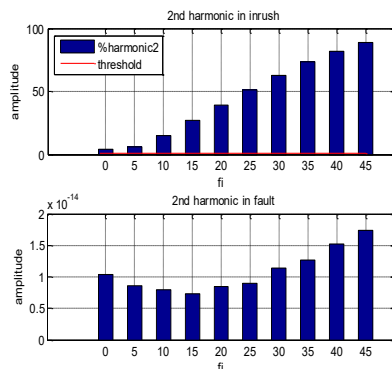
برای نمایش کارایی راهکار پیشنهادی، از اتصالات مختلف ترانسفورماتور با شارهای پسماند مختلف بهره گرفته شد و شکل موج های متنوعی از جریان هجومی شکل گرفت. نتایج تحقیق.

تلفیق روش هارمونیک دوم با روش شاخصهای مبتنی بر تابع تفاضلی باعث عملکرد مطمئن تر و و دقت بالاتر در تمایز بین جریان خطا و جریان هجومی می شود.

نشان دهنده کارایی بالای راهکار پیشنهادی در تشخیص جریان هجومی نسبت به جریان خطا داشت.

## منابع

- [1] Anderson, P. M. (1998). *Power system protection*. Wiley.
- [2] Bagheri, S., Moravej, Z., & Gharehpetian, G. B. (2017). Effect of transformer winding mechanical defects, internal and external electrical faults and inrush currents on performance of differential protection. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11(10), 2508-2520.
- [3] Dashti, H., Davarpanah, M., Sanaye-Pasand, M., & Lesani, H. (2016). Discriminating transformer large inrush currents from fault currents. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 75, 74-82.
- [4] Krstivojevic, J., & Djuric, M. (2016). A new algorithm for avoiding maloperation of transformer restricted earth fault protection caused by the transformer magnetizing inrush current and current transformer saturation. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 24(6), 5025-5042.
- [5] Hong, C., Haifeng, L., Hua, L., Jiran, Z., Haiguo, T., & Zhidan, Z. (2017, January). Waveform Complexity Analysis of Differential Current Signal to Detect Magnetizing Inrush in Power Transformer. In *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2017 9th International Conference on* (pp. 120-123). IEEE.
- [6] Eskandari, R., Legha, M. M., & Legha, M. M. (2016). A New Technique for Discrimination between Inrush Current and Fault Current in a Power Transformers. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS)*, 2(11).
- [7] Nagdewate, A. B., & Paraskar, S. R. (2016, December). Discrimination between magnetizing inrush and Interturn fault current in transformer: Hilbert transform-ANN approach. In *Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC), 2016 International Conference on* (pp. 466-469). IEEE.
- [8] Kazemi, Z., Arefi, M. M., & Farjah, E. (2017). Fast Discrimination of Transformer Magnetizing Current from Internal Faults: an Extended Kalman Filter-Based Approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*.
- [9] Norouzi, P., & Dashti, N. (2017, June). Inrush and fault current discrimination using wavelet transform and autoregressive modeling. In *Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC/ICPS Europe), 2017 IEEE International Conference on* (pp. 1-7). IEEE.
- [10] Sahebi, A., & Samet, H. (2016). Discrimination between internal fault and magnetising inrush currents of power transformers in the presence of a superconducting fault current limiter applied to the neutral point. *IET Science, Measurement & Technology*, 10(5), 537-544.
- [11] Sahebi, A., Samet, H., & Ghanbari, T. (2017). Evaluation of power transformer inrush currents and internal faults discrimination methods in



شکل ۱۶: درصد هارمونیک دوم در وقوع جریان هجومی و جریان خطا در اتصال ستاره-مثلث نوع دوم

## ۴. نتیجه گیری

حفاظت در سیستم های قدرت یکی از مهمترین تکنیک ها در جهت افزایش قابلیت اطمینان و امنیت در این رله ها است. مهمترین ویژگی رله های حفاظتی شامل قابلیت اطمینان بالا در تشخیص خطا و امنیت بالا در عدم تشخیص خطاها است. منظور از خطاها، پدیده هایی با ویژگی هایی نظیر خطا است که ناشی از عملکرد عادی در سیستم های قدرت بوده و با خطا متفاوت است. نتایج شبیه سازی ها به صورت زیر قابل بیان هستند:

- در این مقاله، از مقایسه عدم تقارن شکل موج جریان، برای تفکیک خطا و یا وقوع جریان هجومی استفاده شده است.
- برای استخراج عدم تقارن از شکل موج جریان، از محاسبات مبتنی بر رله های دیجیتال استفاده گردید.
- شاخص NDF یا حاصل نرمالیزاسیون مجموعه اختلافات نمونه های جریان از مولفه پیک شکل موج در این تحقیق برای استخراج عدم تقارن شکل موج پیشنهاد داده شد.
- سه تابع یا شاخص مختلف وابسته به NDF تشریح گردید که هر شاخص عملکرد بسیار خوبی در تشخیص جریان خطا و جریان هجومی داشت.

پیشنهاد می کنم به صورت زیر تغییرشون  
Commented [WU1]:  
بدیم:

### عنوان مقاله

هفتمین کنفرانس بین المللی ترانسفورماتور ۱۳۹۹ - تهران، ایران

presence of fault current limiter. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 102-112.

[12] Sahebi, A., & Samet, H. (2017). Efficient method for discrimination between inrush current and internal faults in power transformers based on the non-saturation zone. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11(6), 1486-1493.

[13] Zhang, L., Li, M., Ji, T., & Zeng, J. (2017). Identifying magnetizing inrush in power transformers based on symmetry of current waveforms. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 12(6), 959-960.

[14] Moravej, Z., & Gharehpetian, G. B. (2017). Classification and Discrimination among Winding Mechanical Defects, Internal and External Electrical Faults and Inrush Current of Transformer. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*.

[15] Yadav, A., Johri, S., & Sharma, J. (2017). Mathematical Modeling of Inrush Current in Power Transformers. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, 3(4).

[16] Song, Y., Jia, H., Xu, X., & Yu, L. (2017, May). Simulation analysis of inrush current of three phase transformer based on MATLAB. In *Control And Decision Conference (CCDC), 2017 29th Chinese* (pp. 3983-3985). IEEE.

[17] Peng, F., Gao, H., & Liu, Y. (2018). Transformer Sympathetic Inrush Characteristics and Identification Based on Substation-Area Information. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(1), 218-228.

[18] Johns, A. T., & Salman, S. K. (1997). *Digital protection for power systems* (No. 15). IET.

[19] Hosny, A., & Sood, V. K. (2014). Transformer differential protection with phase angle difference based inrush restraint. *Electric power systems research*, 115, 57-64.

[20] Wang, Q., Tang, Z., Knezevic, I., Yu, J., & Karady, G. (2016, September). Power system protection education and digital relay training based on a physical platform. In *North American Power Symposium (NAPS), 2016* (pp. 1-5). IEEE .