

تشخیص و مکان‌یابی خطای حلقه‌به‌حلقه در ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از حسگرهای شار هسته

محسن مصطفائی، فرهاد حق‌جو

دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی مهندسی شهید عباسپور، دانشکده مهندسی برق

خرابی‌ها ناشی از خطاهای حلقه‌به‌حلقه می‌باشد [۱]. خطای حلقه‌به‌حلقه در مراحل اولیه تاثیر کمی بر عملکرد ترانسفورماتور دارد در حالی که این خطاها به سرعت گسترش پیدا می‌کنند و تبدیل به خطای فاز به فاز یا فاز به زمین می‌گردند [۲]. خطای حلقه‌به‌حلقه درون ترانسفورماتور بر اثر عواملی همچون نیروهای الکترومکانیکی وارده به سیم‌پیچ ناشی از اتصال کوتاه خارجی، زوال حرارتی عایقی ناشی از اضافه بارهای شدید، کاهش خواص عایقی روغن بر اثر نفوذ رطوبت، و اعمال اضافه‌ولتاژ به سیم‌پیچ ناشی از صاعقه یا کلیدزنی حادث می‌گردد [۳-۵].

اگرچه در زمان وقوع خطای حلقه‌به‌حلقه جزئی، جریان خطای گردشی بسیار زیادی از ناحیه اتصال کوتاه عبور می‌کند، ولی جریان ترمینال‌ها تغییرات کمی را نشان می‌دهند زیرا نسبت تبدیل ترانسفورماتور بین تمام سیم‌پیچ و ناحیه اتصال کوتاه شده بسیار بزرگ خواهد بود [۵]. این موضوع به خوبی در شکل ۱ نشان داده شده است. بنابراین، رله‌های دیفرانسیل مرسوم قادر به تشخیص این نوع خطا نیستند. علاوه بر این، رله دیفرانسیل از جریان ترمینال‌ها برای حفاظت استفاده می‌کند به همین دلیل کارایی و تنظیمات آن‌ها به عواملی مانند جریان مغناطیس‌کنندگی، خطای نسبت تبدیل ترانسفورماتور جریان، اشباع آن در زمان بروز خطای شدید در خارج از ناحیه حفاظتی و عملکرد تپ‌چنجر بستگی دارد که تمامی موارد باعث کاهش حساسیت سیستم حفاظتی می‌شود. مشخصه‌ی عملکردی رله [۵-۶] نیز باعث کاهش حساسیت و ایجاد محدودیت در زمان بروز خطا درون ترانسفورماتور گردید.

جریان هجومی در زمان برقرار کردن باعث کاهش حساسیت رله‌های دیفرانسیل می‌شود که عملکرد کاذب آن را به‌همراه دارد. به منظور تشخیص

چکیده — خطای حلقه‌به‌حلقه (TTF: Turn-Turn Fault) جزئی درون ترانسفورماتورهای قدرت تاثیر بسیار کمی بر جریان و ولتاژ ترمینال‌ها برجای می‌گذارد، به‌همین جهت تشخیص این نوع خطا دشوار خواهد بود. در این مقاله، یک روش ساده، حساس و مقاوم مبتنی بر شار پیوندی ارائه شده است که از سیم‌پیچ‌هایی با تعداد دور مشخص به صورت جداگانه (SC: Search Coil) در فواصل معین بر روی هسته ترانسفورماتور پیچانده شده‌اند که شار درون هسته را اندازه‌گیری می‌کنند. در حالت سالم، عبور شار یکسان از درون حسگرهای هر فاز، ولتاژ یکسانی را در آن‌ها القا می‌کند و هرگونه تغییرات در ولتاژهای القایی نشانگر وجود خطا در آن فاز خواهد بود.

برای اثبات این ویژگی‌ها، حسگرهایی بر روی یک ترانسفورماتور سه فاز ۵۰ کیلوولت آمپر، ۲۰/۰،۴ کیلوولت نصب شده و در وضعیت‌های گوناگون مورد تست و آزمایش قرار گرفته شده است.

واژه‌های کلیدی — ترانسفورماتور قدرت؛ حسگر شار هسته؛ شار پیوندی؛ خطای حلقه‌به‌حلقه؛ عیب‌یابی؛ حفاظت؛ مکان‌یابی.

۱. مقدمه

ترانسفورماتور قدرت از جمله مهمترین تجهیزات شبکه قدرت بوده که حفاظت آن امری واجب و ضروری است. خطای حلقه‌به‌حلقه یکی از خطاهای رایج و اجتناب‌ناپذیر درون ترانسفورماتور است که غالباً قبل از گسترش، با ادوات حفاظتی موجود قابل تشخیص نیست. مطالعه آماری بر روی ترانسفورماتورهای جدید نشان می‌دهد که در حدود ۷۰-۸۰ درصد

در جدول ۳ ارائه شده است. از میان روش‌های ذکر شده تنها روش پیشنهادی در این مقاله قادر به تشخیص فاز معیوب و ناحیه خطا در فاز معیوب است. این روش با اندازه‌گیری شار پیوندی درون هسته در نقاط مختلف ساق‌های ترانسفورماتور و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، یکنواختی شار درون هسته را مشخص می‌کند. روش شار پیوندی از تعدادی حسگر توزیع شده برای اندازه‌گیری شار در نقاط مختلف استفاده می‌کند. این حسگرها سیم‌پیچ‌های نازکی هستند که به دور هسته پیچانده شده‌اند. الگوریتم پیشنهادی علاوه بر شناسایی فاز خطادار، قادر به مکان‌یابی خطا در فاز خطادار در حین تعمیرات بوده که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مبانی روش شار پیوندی

روش ارائه‌شده در این مقاله بر اساس قانون پیوستگی شار مغناطیسی بنا شده است [۳۰]. این قانون بیان می‌کند که شارهای مغناطیسی به شکل مسیرهای پیوسته و بسته بوده که از هر نقطه شروع شوند به همان نقطه نیز خاتمه می‌یابند. هم‌چنین، با توجه به ارتباط فیزیکی شار مغناطیسی با ولتاژ القایی یا اعمالی به سیم‌پیچ، با اتصال کوتاه‌شدن حلقه‌ها و کاهش شدید ولتاژ آنها، شار عبوری (پیوندی) شدیداً کاهش یافته و بخش زیادی از آن با خروج از هسته، تبدیل به شار نشتی می‌شود. علاوه بر این، شار درون هسته توسط ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچ تعیین می‌شود و در شرایط عادی به صورت متقارن و یکنواخت درون ساق‌های ترانسفورماتور توزیع می‌شود. با بروز خطای حلقه‌به‌حلقه، یکنواختی شار از بین می‌رود و شار پیوندی در ناحیه خطادار کاهش پیدا می‌کند. برای درک بهتر، یک ترانسفورماتور در نرم افزار MAXWELL در دو حالت سالم و معیوب شبیه‌سازی شده است. در حالت معیوب، خطای ۴۰ حلقه ای بر روی دیسک ۱ فاز V ایجاد و خطوط شار در هر دو حالت در شکل ۲ نشان داده شده است. در این حالت، بخشی از خطوط شار درون هسته تمایل دارند تا در ناحیه خطادار، مسیر خود را از محیط غیرمغناطیسی (هوا، روغن، تانک ترانسفورماتور) ببندند.

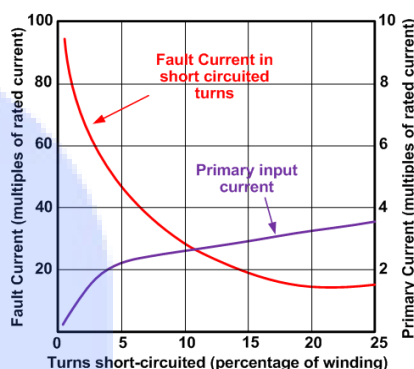
یک ترانسفورماتور سه‌فاز نمونه به‌منظور تست عملی الگوریتم همانند شکل ۳ در نظر گرفته شده است. شش عدد حسگر شار پیوندی در فاصله میان دیسک‌های فشارقوی نصب شده است. مشخصات این ترانسفورماتور نیز در جدول ۴ ارائه گردیده است.

در حالت سالم و عادی، حسگرهای هر ساق، شار پیوندی یکسانی را احساس می‌کنند که شار عبوری از هر ساق به میزان ۱۲۰ درجه با ساق‌های دیگر اختلاف فاز دارد. بر این اساس، ولتاژ خروجی حسگرهای متقابل (مثلاً SC1U و SC6U، SC2U و SC5U، SC3U و SC4U در فاز U که در شکل ۳ نشان داده شده است) در هر فاز دقیقاً برابر هستند پس:

$$E_{SC1x} = E_{SC6x}, E_{SC2x} = E_{SC5x}, E_{SC3x} = E_{SC4x} \quad |x = U, V, W.$$

و متمایز کردن جریان هجومی از جریان خطا، جریان دیفرانسیلی از یک فیلتر هارمونیک دوم عبور می‌کند. از مولفه هارمونیک دوم به عنوان بازدارنده استفاده می‌گردد تا از عملکرد رله در زمان راه‌اندازی جلوگیری نماید [۵]. امروزه الگوریتم‌های مختلفی مانند بازدارنده‌های هارمونیک [۷-۸]، تشخیص شکل‌موج [۹-۱۰] و روش‌های پردازش سیگنال [۱۱] از عملکرد کاذب رله دیفرانسیل در زمان بروز جریان هجومی جلوگیری می‌کند.

پدیده اضافه‌شار یکی دیگر از چالش‌های رله‌ی دیفرانسیل است که باعث عملکرد کاذب آن می‌شود. در زمان بروز پدیده اضافه‌شار، میزان هارمونیک پنجم در جریان دیفرانسیلی افزایش می‌یابد و به همین جهت از هارمونیک پنجم برای تشخیص این پدیده استفاده می‌شود [۵].



شکل ۱ جریان خطای حلقه‌به‌حلقه بر حسب تعداد حلقه اتصال کوتاه شده [۵]

روش‌های گوناگونی برای تشخیص خطای حلقه‌به‌حلقه [۱۲-۱۹] شناخته شده است، اما بعضی از آن‌ها قادر به تشخیص خطاهای جزئی حلقه‌به‌حلقه نیستند و یا در مقابل جریان هجومی، اضافه‌شار، اشباع ترانسفورماتور جریان، عملکرد تپ‌چنجر یا بار/ولتاژ نامتعادل عملکرد نامطلوبی را از خود نشان می‌دهند. از آن‌جا که اطلاعات دریافتی از ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری دارای خطای اندازه‌گیری هستند، پس حساسیت روش‌ها کاهش پیدا خواهد کرد. هم‌چنین، اکثر روش‌های ارائه شده قادر به تعیین فاز خطادیده و یا محل خطا درون آن فاز نمی‌باشند. در جدول ۱ اساس عملکرد روش‌ها، مزایا، معایب و ابهامات آن‌ها ارائه شده است.

در سال‌های اخیر، روش‌هایی مبتنی بر شار به منظور تشخیص خطای حلقه‌به‌حلقه ارائه شده است [۲۰-۲۴] روش عملکرد، مزایا، معایب و ابهامات آن‌ها در جدول ۲ توضیح داده شده است. روش پیشنهادی در این مقاله یک الگوریتم جامع مبتنی بر شار پیوندی برای تشخیص و مکان‌یابی خطای حلقه‌به‌حلقه است.

هم‌چنین، روش‌هایی برای تست ترانسفورماتور [۲۳-۲۷] (به صورت آفلاین) به منظور تشخیص فاز خطادار و پیدا کردن مکان خطا درون سیم‌پیچ

تشخیص و مکان‌یابی خطای حلقه‌به‌حلقه در ترانسفورماتورهای قدرت با استفاده از حسگرهای شار هسته

دومین کنفرانس بین‌المللی ترانسفورماتور ۱۳۹۴ - تهران، ایران

جدول ۱ بررسی روش‌های مختلف تشخیص خطای حلقه‌به‌حلقه در ترانسفورماتور مبتنی بر جریان/ولتاژ ترمینال‌ها [۱۲-۱۹]

روش	مراجع	عملکرد	مزایا	معایب	ابهامات
روش توالی منفی	[۱۵-۱۲]	با اندازه‌گیری دامنه و فاز مولفه توالی منفی جریان در سمت اولیه و ثانویه عمل می‌کند.	- تشخیص خطای حلقه‌به‌حلقه جزئی	- عملکرد نامطلوب در بار نامتعادل. - عدم تشخیص خطا در حالت بی‌باری [۲۸-۲۹]. - تأثیرپذیری از خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری. - عدم تشخیص محل خطا در فاز معیوب.	- عدم بررسی تأثیر عملکرد تپ‌چنجر، اضافه‌شار و جریان هجومی در عملکرد این الگوریتم
	[۱۶]	با مقایسه نسبت توالی منفی جریان خط اولیه و ثانویه با نسبت تبدیل ترانسفورماتور عمل می‌کند.	- عملکرد مناسب در ولتاژ و بار نامتعادل	- نیازمند اطلاعات محل قرارگیری تپ‌چنجر. - تأثیرپذیری از خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری. - عدم تشخیص محل خطا در فاز معیوب.	
روش توالی صفر	[۱۷]	با اندازه‌گیری جریان توالی صفر جریان و ولتاژ در اتصالات ستاره/مثلث عمل می‌کند.	- پایدار در برابر جریان هجومی	- مورد استفاده برای بانک ترانسفورماتور - عدم مکان‌یابی خطا - تأثیرپذیری از خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری	- عدم بررسی تأثیر اضافه‌شار و بار/ولتاژ نامتعادل در عملکرد این الگوریتم
مکان هندسی V-I	[۱۸]	با مقایسه مکان‌هندسی جریان ورودی برحسب ولتاژ تفاضلی ورودی و خروجی در یک فاز در حالت سالم و معیوب مشخص عمل می‌کند.	- تشخیص خطای حلقه‌به‌حلقه و خطاهای مکانیکی	- نیازمند اطلاعات وضعیت سالم ترانسفورماتور - تأثیرپذیری از خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری - عدم مکان‌یابی خطا	- عدم بررسی تأثیر عملکرد تپ‌چنجر، اضافه‌شار، جریان هجومی و بار/ولتاژ نامتعادل در عملکرد این الگوریتم
تبدیل Park و جریان تحریک	[۱۹]	با مقایسه بین جریان تحریک سه فاز در حالت سالم و معیوب با استفاده از تبدیل Park عمل می‌کند.	- عملکرد مناسب در بار نامتعادل - عدم تأثیر پذیری از بار	- نیازمند اطلاعات وضعیت سالم ترانسفورماتور - تأثیرپذیری از خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری - عدم مکان‌یابی خطا	

جدول ۲ بررسی روش‌های مختلف تشخیص خطای حلقه‌به‌حلقه در ترانسفورماتور مبتنی بر شار مغناطیسی [۲۰-۲۴]

روش	مراجع	عملکرد	مزایا	معایب	ابهامات
شار نشتی	[۲۰]	شار نشتی در زمان بروز خطا توسط حسگرهایی که در مجاورت سیم‌پیچ فشارقوی نصب شده‌اند، اندازه‌گیری می‌شود.	- تشخیص خطای حلقه‌به‌حلقه و دفورمگی سیم‌پیچ	- نیازمند تغییرات در ساختار ترانسفورماتور و افزایش ابعاد تانک برای نصب و قرارگیری حسگرها در مجاورت سیم‌پیچ فشارقوی - عدم توانایی در مکان‌یابی خطا - عدم توانایی در تشخیص خطا در نقطه میانی هر سیم‌پیچ	- تأثیر اضافه‌شار، جریان هجومی و بار/ولتاژ نامتعادل در عملکرد الگوریتم بررسی نشده است.
شار پیوندی	[۲۱-۲۲]	با استفاده از معادلات حاکم بر ترانسفورماتور، تغییرات شار پیوندی محاسبه می‌شود	- پایدار در برابر جریان هجومی و اضافه‌شار. - تشخیص خطای حلقه‌به‌حلقه درون سیم‌پیچ. - تشخیص فاز خطادار	- عدم تشخیص خطاهای کوچک‌تر از ۱۰٪ سیم‌پیچ - نیازمند اطلاعات درباره‌ی وضعیت تپ‌چنجر	
	[۲۳-۲۴]	شار پیوندی درون هسته به وسیله حسگرهای نصب شده بر روی ساق‌های ترانسفورماتور اندازه‌گیری، و خطای حلقه‌به‌حلقه از طریق اندازه‌گیری مقدار تفاضلی ولتاژ القایی درون حسگرها تشخیص داده می‌شود.	- ساده و دقیق - تشخیص فاز خطادار - تعیین محل خطا در فاز خطادار. - پایدار و مقاوم در برابر جریان هجومی، اضافه‌شار، عملکرد تپ‌چنجر و بار نامتعادل.	- نیاز به نصب حسگرها در زمان ساخت - تمامی ابهامات در این مقاله بررسی می‌شود.	

جدول ۳ بررسی روش‌های مختلف تست ترانسفورماتور برای تشخیص خطای حلقه‌به‌حلقه به صورت آفلاین [۲۳-۲۷]

روش	مراجع	عملکرد	مزایا	معایب
تحلیل پاسخ فرکانسی (FRA)	[۲۵-۲۶]	بر اساس تغییرات مقاومت، اندوکتانس و ظرفیت خازنی ترانسفورماتور و اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی آن در باند فرکانس پایین، عمل می‌کند.	- تشخیص بسیاری از خطاهای الکتریکی و مکانیکی در سیم‌پیچ و هسته ترانسفورماتور	- پر هزینه - نیازمند اطلاعات وضعیت سالم ترانسفورماتور - نیازمند وجود یک فرد متخصص برای تحلیل نتایج
تست تقسیم شار مغناطیسی	[۲۷]	با اعمال ولتاژ تست به یک فاز مشخص و اندازه‌گیری ولتاژ القایی در سیم‌پیچ فازهای مختلف عمل می‌کند.	- تشخیص خطای حلقه‌به‌حلقه جزئی - تشخیص فاز خطادار	- مناسب برای ترانسفورماتور با اتصال ستاره [۲۷] - عدم عملکرد مناسب در ترانسفورماتور با هسته زرهی [۲۷] - بروز خطای اندازه‌گیری بعثت وجود شار پسماند [۲۷]
شار پیوندی	[۲۳-۲۴]	با اندازه‌گیری شار پیوندی در هسته ترانسفورماتور و مقایسه ولتاژهای القایی درون حسگرهای نصب شده عمل می‌کند.	- ساده و دقیق - تشخیص خطای حلقه‌به‌حلقه با اعمال ولتاژ تست - تشخیص فاز خطادار و مکان‌یابی ناحیه خطا - ولتاژ تست، درصدی از ولتاژ نامی	- نیاز به نصب حسگرها در زمان ساخت

بنابراین، در حالت سالم و عادی می‌توان نتیجه گرفت:

$$\Delta E_x = (E_{SC1x} + E_{SC2x} + E_{SC3x}) - (E_{SC4x} + E_{SC5x} + E_{SC6x})$$

ولتاژ القایی ولتاژ القایی
حسگرهای پایینی حسگرهای بالایی

$$= \widehat{\sum E_{ux}} - \widehat{\sum E_{lx}} = 0 \quad (1)$$

معادله (۱) بیان می‌کند که مجموع ولتاژهای القایی در حسگرهای بالایی ($\sum E_{ux}$) و مجموع ولتاژهای القایی در حسگرهای پایینی ($\sum E_{lx}$) در هر فاز در حالت سالم با یکدیگر برابر هستند و در نتیجه تفاضل آن‌ها $\Delta E_x \triangleq \sum E_{ux} - \sum E_{lx}$ برابر صفر خواهد بود.

طبق معادله (۲) مجموع ΔE_x در هر سه ساق یک ضابطه تجمعی بنام Crt_DIFF را نشان می‌دهد که در حالت سالم و عادی برابر صفر و در حالت خطا مقادیر بالاتری را تجربه می‌کند.

$$Crt_DIFF \triangleq \Delta E_U + \Delta E_V + \Delta E_W \quad (2)$$

هر دو ضابطه Crt_DIFF و ΔE_x ($\Delta E_U, \Delta E_V, \Delta E_W$) قادر به حفاظت ترانسفورماتور می‌باشند با این تفاوت که Crt_DIFF توانایی تشخیص فاز خطادار را ندارد.

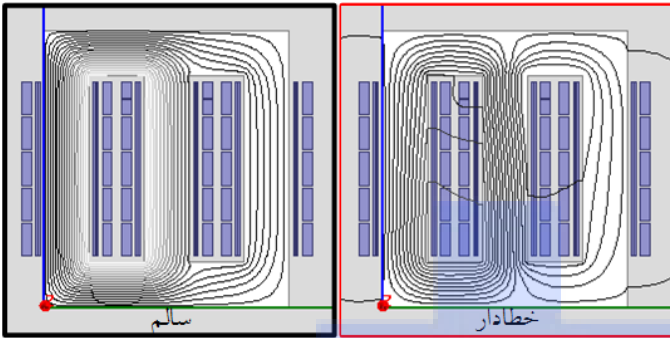
جدول ۴ مشخصات ترانسفورماتور توزیع مورد بررسی

ظرفیت نامی	۵۰ ک.و.ا.
گروه برداری	Yz5
نسبت تبدیل	۲۰۰۰/۴۰۰ ولت
امپدانس اتصال کوتاه	۴٫۱٪
فرکانس نامی	۵۰ هرتز
تعداد دور فشارقوی	۴۳۵۰
تعداد دور فشارضعیف	۲×۵۳
جریان نامی فشارقوی	۱٫۴۴ آمپر
جریان نامی فشارضعیف	۷۲ آمپر

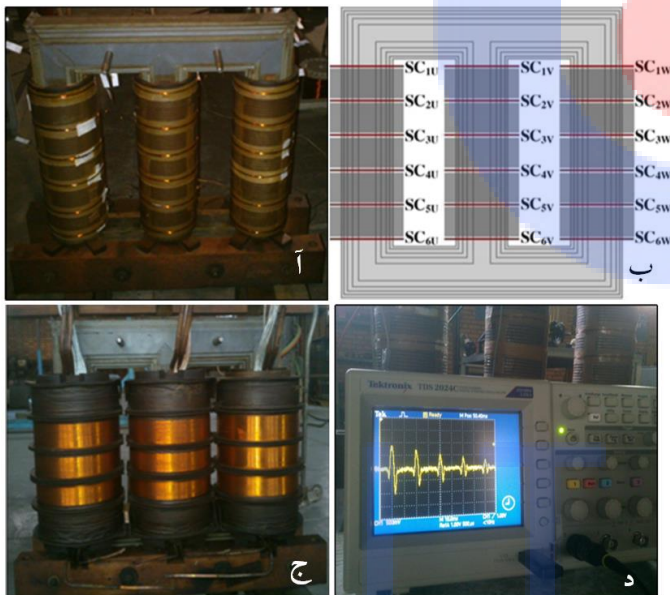
۳. نتایج عملی و ارتقا الگوریتم

به منظور تایید تئوری بیان شده در بخش قبل، الگوریتم پیشنهادی بر روی یک ترانسفورماتور نمونه پیاده‌سازی شده است (شکل ۳). حسگرها بر روی سیم‌پیچ فشارضعیف (بجای هسته) برای اندازه‌گیری شار هسته نصب شده‌اند. برای نصب این حسگرها هیچ تغییر محسوسی در ساختار ترانسفورماتور ایجاد نمی‌کند زیرا از چند دور سیم نازک تشکیل شده است.

- به منظور بررسی الگوریتم پیشنهادی، دو دسته خطای حلقه‌به‌حلقه در ولتاژی معادل ۶٫۵٪ ولتاژ نامی مورد تست قرار گرفته است که عبارتند از:
- خطای حلقه‌به‌حلقه با تعداد حلقه‌های مختلف در محلی مشخص.
 - خطای حلقه‌به‌حلقه در محل‌های مختلف با تعداد حلقه مشخص.



شکل ۲ خطوط شار در حالت سالم (چپ) و خطا (راست) در زمان بروز خطای ۴۰ حلقه در دیسک ۱ فشارقوی در فاز V (فاز وسط) در محیط نرم‌افزار ماکسول.



شکل ۳ (آ) حسگرهای نصب شده بر روی سیم‌پیچ فشارضعیف (ب) و مدل شماتیک آن، (ج) ترانسفورماتور تست شده، (د) و سیگنال Crt_DIFF ناشی از جریان هجومی.

۳.۱. خطای حلقه‌به‌حلقه با تعداد حلقه‌های مختلف

به منظور بررسی تاثیر تعداد حلقه‌های اتصال کوتاه شده در دامنه سیگنال‌های Crt_DIFF و ΔE در هر سه فاز، سه نوع خطای حلقه‌به‌حلقه با تعداد حلقه‌های ۴۰، ۱۰۰ و ۴۰۰ بر روی دیسک ۱ فاز V به صورت

۴. اصلاح الگوریتم پیشنهادی

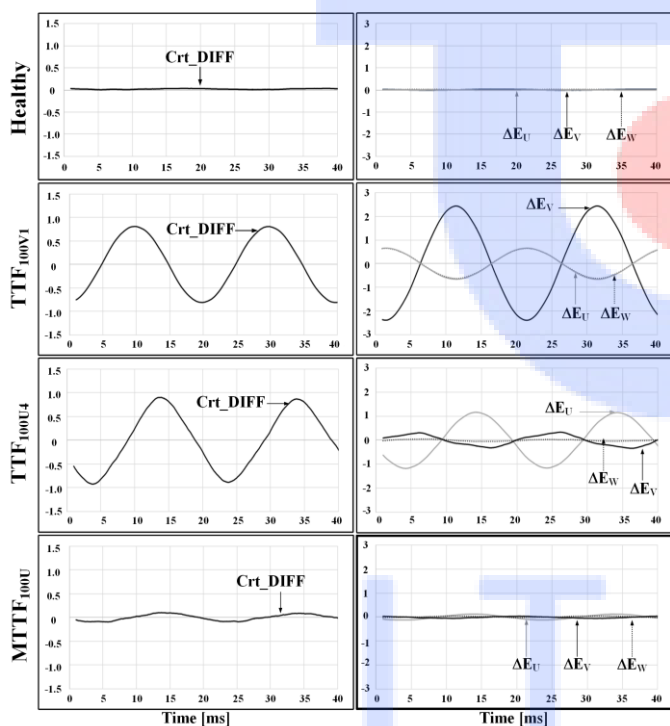
به منظور بهبود و اصلاح الگوریتم پیشنهادی، نیاز است تا یک عضو نامتقارن مانند $\Delta E_x^{1,4}$ یا $\Delta E_x^{3,6}$ به ΔE_x در معادله ۲ اضافه شود و خواهیم داشت:

$$\Delta E_x = \Delta E_x^{1,6} + \Delta E_x^{2,5} + \Delta E_x^{3,4} + \Delta E_x^{1,4} \quad (3)$$

و یا

$$\Delta E_x = (2E_{SC1x} + E_{SC2x} + E_{SC3x}) - (2E_{SC4x} + E_{SC5x} + E_{SC6x}) \quad (4)$$

این تغییر الگوریتم به صورت عملی (با دو برابر کردن تعداد دور حسگر اول و چهارم) و یا عددی و دیجیتالی (در ۲ ضرب کردن سیگنال ولتاژ القایی SC_4 و SC_1) قابل انجام است. نتایج حاصله از اصلاح الگوریتم در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که خطای میانی در این الگوریتم قابل تشخیص خواهد بود.



شکل ۵ تاثیر محل وقوع خطا دامنه Crt_DIFF (ستون سمت چپ) و ΔE_x در فازهای مختلف (ستون سمت راست) با استفاده از مدل متقارن.

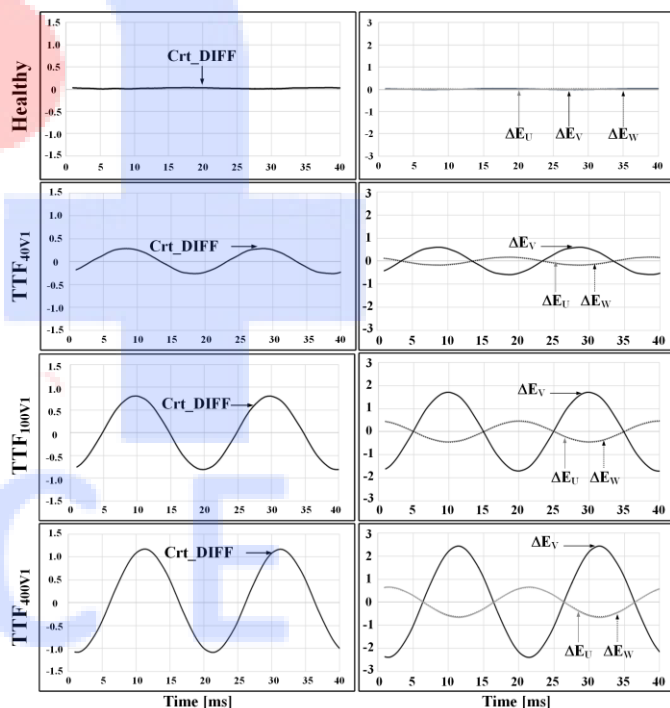
۵. نتایج تست عملی در ولتاژ نامی

به عنوان تست نهایی، یک خطای ۱۰ حلقه برای مدت کوتاهی بر روی ترانسفورماتور ایجاد و شکل موج دریافتی آن در شکل ۷ نشان داده شده است. دامنه فرکانس اصلی سیگنال Crt_DIFF برابر با ۱,۴ ولت است در

مصنوعی قرار داده شده است که بترتیب با TTF_{40V1} ، TTF_{100V1} و TTF_{400V1} نمایش داده شده‌اند. شکل ۴ نتایج تست را در خطاهای ذکر شده نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، خطا با تعداد دورهای اتصال کوتاه شده بیشتر، دامنه Crt_DIFF بزرگتری ایجاد می‌کند و بزرگتر بیان‌گر فاز خطا دار است.

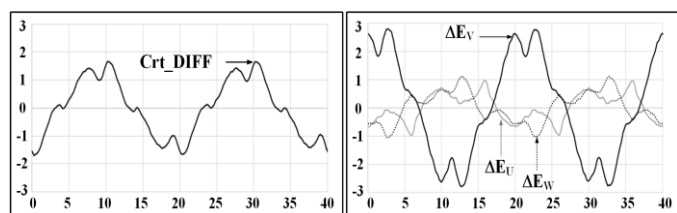
۳,۲. خطای حلقه‌به‌حلقه در محل‌های مختلف

به منظور بررسی تاثیر محل خطا در دامنه سیگنال ΔE و Crt_DIFF سه خطای ۱۰۰ حلقه‌ای به صورت مصنوعی در دیسک ۱ فاز V (TTF_{100V1})، دیسک ۴ فاز U (TTF_{100U4}) و دیسک میانی فاز U ($MTTF_{100U}$) سیم‌پیچ فشارقوی قرار داده شده است. نتایج تست عملی برای خطاهای فوق‌الذکر در شکل ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که خطای میانی ($MTTF$) در این الگوریتم قابل تشخیص نخواهد بود و دامنه Crt_DIFF به علت وجود تقارن در الگوریتم (صفر بودن $\Delta E_x^{1,6}$ و $\Delta E_x^{2,5}$ برابر صفر است).



شکل ۴ تاثیر شدت خطا (تعداد حلقه‌های اتصال) بر دامنه Crt_DIFF (ستون سمت چپ) و ΔE_x (ستون سمت راست).

جریان همی فازها و سیگنال Crt_DIFF در زمان برقرار کردن ترانسفورماتور توسط اسیلوسکوپ ثبت و نتایج بدست آمده از آن در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۷ دامنه Crt_DIFF (چپ) و ΔE_x در هر سه فاز (راست) در ولتاژ نامی برای خطای ۱۰ حلقه بر روی دیسک ۱ فاز V.

همانطور که مشاهده می‌شود، جریان‌ها و سیگنال Crt_DIFF غیر سینوسی هستند و به همین جهت، دو روش برای تحلیل آن‌ها وجود دارد:

۱) تحلیل Crt_DIFF مبتنی بر پیک دامنه

همانطور که در شکل ۸ (ب) مشاهده می‌شود، ماکزیمم دامنه Crt_DIFF در حدود ۳٫۱۲ ولت است و می‌توان مقدار ۴ ولت را به عنوان حد آستانه برای جلوگیری از عملکرد کاذب سیستم حفاظتی تعیین کرد. با در نظر گرفتن یک تخمین خطی، مقدار پیک سیگنال Crt_DIFF در بدترین حالت خطا (خطا در نقطه میانی) از مقدار آستانه بیش‌تر است پس در این صورت خطا به سادگی قابل تشخیص خواهد بود.

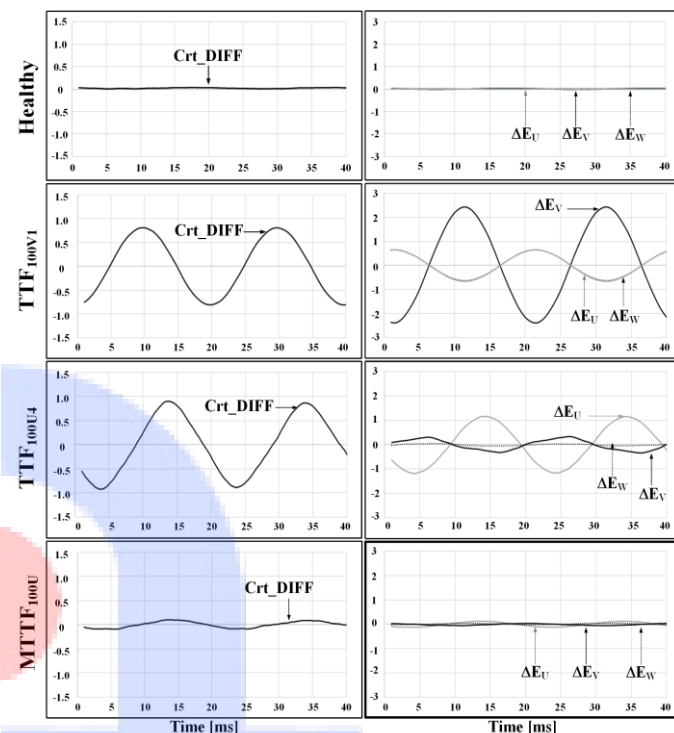
۲) تحلیل Crt_DIFF مبتنی بر دامنه مولفه فرکانس اصلی

با استفاده از یک فیلتر دیجیتال یا آنالوگ، هارمونیک‌های فرکانس بالا از سیگنال حذف خواهد شد که تجزیه هارمونیکی جریان‌ها و Crt_DIFF در شکل ۸ (ج) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار پیک مولفه فرکانس اصلی Crt_DIFF از ۱٫۳۲ ولت فراتر نمی‌رود و می‌توان مقدار ۱٫۳۵ ولت را بعنوان حد آستانه الگوریتم در نظر گرفت.

۶٫۲. اضافه‌شار

اگرچه پدیده اضافه‌شار معمولاً در ترانسفورماتورهایی که مستقیماً به ژنراتور متصل هستند اتفاق می‌افتد، ولی یک سیستم حفاظتی مناسب باید در مقابل این پدیده پایدار و مقاوم باشد. برای نشان‌دادن عملکرد الگوریتم و روش پیشنهادی در حالت اضافه‌شار، ولتاژی معادل ۱۱۰٪ ولتاژ نامی (۴۴۰ ولت) به سیم‌پیچ فشارضعیف ترانسفورماتور نمونه اعمال گردید. جریان‌های بی‌باری، Crt_DIFF و مقدار پیک مولفه فرکانس اصلی و هارمونیک‌های دیگر جریان ترمینال‌ها و Crt_DIFF در شکل ۹ نشان داده شده است.

حالی که پیک دامنه عدد ۱٫۶۳ ولت را نشان می‌دهد. با استفاده از این نتایج می‌توان مشاهده کرد که الگوریتم پیشنهادی قادر به تشخیص خطای حلقه‌به‌حلقه جزئی (در حدود ۰٫۲۵٪ سیم‌پیچ) است که حساسیت بسیار بالای این الگوریتم را نشان می‌دهد.



شکل ۶ تاثیر محل وقوع خطا دامنه Crt_DIFF (ستون سمت چپ) و ΔE_x در فازهای مختلف (ستون سمت راست) با استفاده از مدل اصلاح شده.

۶٫۱. عملکرد الگوریتم در شرایط غیرعادی

یکی از ویژگی‌های الگوریتم‌های حفاظتی، عملکرد مناسب آن‌ها در شرایط غیرعادی است. به همین دلیل، عملکرد الگوریتم در زمان برقرار شدن ترانسفورماتور و اضافه‌شار مورد بررسی و تست قرار گرفته شده است.

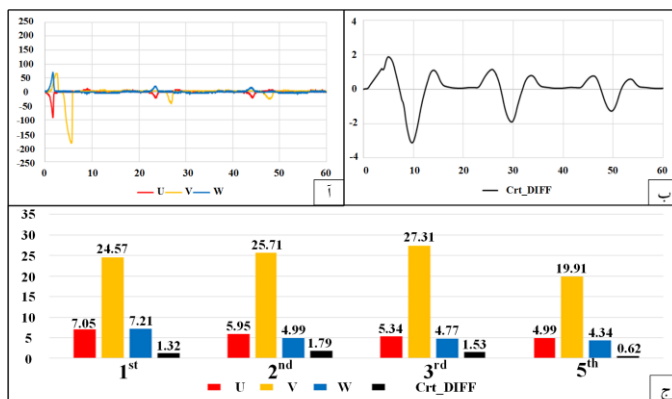
۶٫۱. برقرار کردن ترانسفورماتور

از آنجا که جریان هجومی یک خطا به شمار نمی‌آید، سیستم حفاظتی می‌بایست در مقابل این حالت گذرا پایدار و مقاوم باشد. جریان هجومی دارای هارمونیک‌های بسیار زیادی است که بارزترین آن‌ها هارمونیک دوم، سوم و پنجم می‌باشد [۵].

شار درون ساق‌های هسته ندارد و این الگوریتم در مقابل این پدیده نیز مقاوم و پایدار خواهد بود.

۳. الگوریتم ارائه شده قادر به تشخیص خطای خارجی از خطای داخلی است. زمانی که یک خطای خارجی اتفاق می‌افتد، یک سیم‌پیچ ترانسفورماتور به طور کامل اتصال کوتاه می‌گردد. بنابراین، تمامی حسگرهای آن فاز کاهش شار یکسانی را اندازه‌گیری می‌کنند و در نتیجه ΔE_x و Crt_DIFF در این حالت تقریباً برابر صفر می‌باشند و سیستم حفاظتی عمل نخواهد کرد این تحلیل برای بار نامتعادل نیز برقرار است و بار نامتعادل نیز تاثیری در عملکرد سیستم حفاظتی نخواهد داشت.

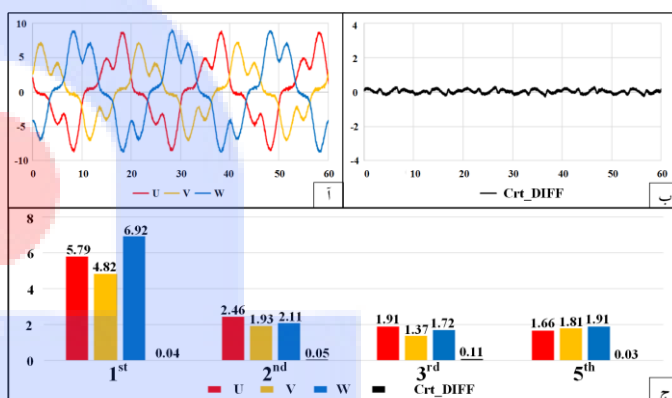
همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار دامنه Crt_DIFF تقریباً برابر صفر است و این پدیده تاثیری بر عملکرد الگوریتم نخواهد داشت.



شکل ۸ (آ) شکل موج جریان سه‌فاز، (ب) Crt_DIFF ، (ج) دامنه فرکانس اصلی و هامونیک‌های جریان هجومی و Crt_DIFF در بدترین حالت.

۸. شناسایی فاز خطادار و محل خطا

همانطور که در شکل‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، خطای حلقه‌به‌حلقه باعث افزایش ΔE در فاز مربوطه نسبت به دوفاز دیگر می‌گردد. از این ویژگی می‌توان برای شناسایی فاز خطادار استفاده نمود. برای مکان‌یابی خطا در فاز خطادار، نیاز به مقایسه ولتاژ القایی حسگرها در ولتاژ تست می‌باشد. کمترین ولتاژ مربوط به نزدیک‌ترین حسگر به ناحیه خطا است. برای مثال، ولتاژ القایی در حسگرهای نصب شده در فاز خطادار برای سه خطای مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این تست، ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچ فقط ۰.۶۵٪ ولتاژ نامی بوده است.



شکل ۹ (آ) شکل موج جریان سه‌فاز، (ب) Crt_DIFF ، (ج) مقدار پیک فرکانس اصلی و هامونیک‌های جریان و Crt_DIFF در حالت اضافه‌شار.

مشاهده می‌شود که ولتاژ القایی در SC_{1V} و SC_{2V} کمترین مقدار را به خطای ۱۰۰ حلقه در دیسک ۱ فاز V (TTF_{100V1}) به خود اختصاص داده‌اند و به همین ترتیب SC_{4U} و SC_{5U} کمترین ولتاژ القایی را در خطای ۱۰۰ حلقه در دیسک ۴ فاز U نشان می‌دهند. نتایج مشابهی برای خطای میانی در فاز U آورده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، بدیهی است که تشخیص خطا در نزدیکی نقطه میانی سیم‌پیچ هر فاز دشوارتر از نقاط دیگر می‌باشد و نیازمند اندازه‌گیری‌های دقیق‌تری است.

۹. نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی نوین مبتنی بر شار پیوندی برای حفاظت ترانسفورماتور در مقابل خطای حلقه‌به‌حلقه درون سیم‌پیچ ارائه شده است که با استفاده از حسگرهای توزیع شده بر روی ساق‌های ترانسفورماتور برای اندازه‌گیری شار پیوندی و مقایسه آن‌ها بر اساس مدل تفاضلی حفاظت

۷. نکاتی پیرامون الگوریتم

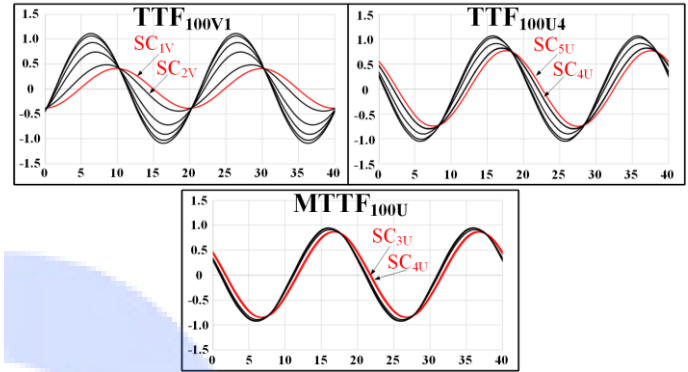
چند نکته پیرامون الگوریتم ارائه شده ضروری است که عبارتند از:

۱. الگوریتم حفاظتی ارائه شده علاوه بر خطای حلقه‌به‌حلقه، قادر به تشخیص خطای حلقه‌به‌زمین نیز خواهد بود. در این حالت در صورت زمین بودن نقطه ستاره ترانسفورماتور با یک اмпدانس بزرگ، حساسیت الگوریتم کاهش پیدا می‌کند.

۲. عملکرد تپ‌چنجر یکی دیگر از چالش‌های مهم در عملکرد سیستم‌های حفاظتی به‌شمار می‌آید. از آنجا که تپ‌چنجر فقط نسبت تبدیل ترانسفورماتور را تغییر می‌دهد، تاثیری در یکنواختی

- [14] M. Abi, and M. Mohammad, "Detection and Localization of Internal Turn-to-Turn Short Circuits in Transformer Windings by Means of Negative Sequence Analysis," in *Proc. 29th International Power System Conference (PSC)*, Tehran, Iran, 2014.
- [15] P. A. Venikar, M. S. Ballai, and B. S. Umre, "Negative Sequence Based Relay Operate Area Approach to Detect Transformer Inter-Turn Fault," *Industrial Electronics Society*, pp. 749-754, 2014.
- [16] A. Vahedi, and V. Behjat, "Online Monitoring of Power Transformers for Detection of Internal Winding Short Circuit Faults Using Negative Sequence Analysis," *European Trans. on Electrical Power*, Vol. 21, pp. 196-211, 2011.
- [17] A. Wiszniewski, W. Rebizant, and L. Schiel, "New Algorithms for Power Transformer Inter-Turn Fault Protection," *Electric Power Systems Research*, Vol. 79, pp. 1454-1461, 2009.
- [18] A. Abu-Siada, and S. Islam, "A Novel Online Technique to Detect Power Transformer Winding Faults," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 27, No. 2, pp. 849-857, 2012.
- [19] L. Oliveira, A. J. Cardoso, and M. A. Cruz, "Power Transformers Winding Fault Diagnosis by the On-Load Exciting Current Extended Park's Vector Approach," *Electric Power Systems Research*, Vol. 81, No. 6, pp. 1206-1214, 2011.
- [20] M. F. Cabanas, M. G. Meler, F. Pedrayes, and *et al.*, "A New Online Method Based on Leakage Flux Analysis for the Early Detection and Location of Insulating Failures in Power Transformers: Application to Remote Condition Monitoring," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 22, No. 3, pp. 1591-1602, 2007.
- [21] Y. C. Kang, B. E. Lee, Y.G. Kim, and *et al.*, "A Transformer Protective Relaying Algorithm Using the Ratio of Induced Voltages," in *Power Engineering Society Summer Meeting*, 2001.
- [22] Y. C. Kang, B. E. Lee, T. Y. Zheng, and *et al.*, "Protection, Faulted Phase and Winding Identification for the Three-Winding Transformer Using the Increments of Flux Linkages," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 4, No. 9, pp. 1060-1068, 2010.
- [23] F. Haghjoo, M. Mostafaei, and M. Mohammadzadeh, "A Novel Flux-based Protection Scheme for Power Transformers," in *Proc. The 9th Power Systems Protection and Control Conference (PSPC)*, Tehran, 2015.
- [24] F. Haghjoo, and M. Mostafaei, "A Novel Flux-Based Method to Diagnose and Identify the Location of Turn-Turn Faults in Transformers," Submitted.
- [25] A. Kraetge, M. Krüger, J. L. Velásquez, and *et al.*, "Experiences with the Practical Application of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) on Power Transformers," in *Proc. of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering*, Johannesburg, 2009.
- [26] S. A. Ryder, "Diagnosing Transformer Faults Using Frequency Response Analysis," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 19, No. 2, pp. 16-22, 2003.
- [۲۷] محمد آقاشعبانی، حمید جوادی و ابراهیم افجه ای، "تبیین اصول تشخیص اتصال حلقه در ترانسفورماتورهای قدرت توسط تست تقسیم شار مغناطیسی همراه با انجام آزمایش و مدل‌سازی به روش عناصر محدود"، کنفرانس و نمایشگاه بین‌المللی ترانسفورماتور، ۱۳۹۳.
- [28] N. C. Joshi, Y. R. Sood, R. K. Jarial, and *et al.*, "Transformer Internal Winding Faults Diagnosis Methods: A Review," *MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 77-81, 2012.
- [29] R. S. Bhide, M. S. S. Srinivas, A. Banerjee, and *et al.* "Analysis of Winding Inter-turn Fault in Transformer: A Review and Transformer Models," *IEEE ICSET*, Kandy, Sri Lanka, 2010.
- [30] G. Lehner, "Electromagnetic Field Theory for Engineers and Physicists", Springer, 2010.

صورت می‌گیرد. الگوریتم ارائه شده، قادر به تشخیص خطای خارجی از داخلی می‌باشد و علاوه بر آن در مقابل حالت‌های غیرعادی مانند جریان هجومی، اضافه‌شار، بار نامتعادل و عملکرد تپ‌چنجر پایدار و مقاوم است. همچنین، الگوریتم پیشنهادی علاوه بر حفاظت ترانسفورماتور قادر به تشخیص فاز خطادار و تعیین محل خطا درون آن فاز می‌باشد که برای تعمیرات بسیار حیاتی خواهد بود.



شکل ۱۰ ولتاژهای القایی حسگرهای نصب شده در فاز خطادار.

منابع

- [1] H. Wang, and K. L. Butler, "Modeling Transformer with Internal Winding Faults by Calculating Leakage Factors," in *Proc. of the 31th North American power symposium*, San Luis Obispo, CA, USA, 1999.
- [2] V. Behjat, and A. Vahedi, "An Experimental Approach for Investigating Low-Level Interturn Winding Faults in Power Transformers," *Electrical Engineering*, Vol. 95, No. 2, pp. 135-145, 2013.
- [3] A. Guzmán, S. Zocholl, G. Benmouyal, and *et al.*, "A Current-Based Solution for Transformer Differential Protection. Part I: Problem Statement," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 16, No. 4, pp. 485-491, 2001.
- [4] M. Wang, A. J. Vandermaar, and K. D. Srivastava, "Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service," *Electrical Insulation Magazine*, Vol. 18, No. 6, pp. 12-25, 2002.
- [5] ALSTOM, "Network Protection & Automation Guide," 1st ed., France, 2002.
- [6] G. Ziegler, "Numerical Differential Relay," Berlin, Erlangen, 2005.
- [7] R. Hamilton, "Analysis of Transformer Inrush Current and Comparison of Harmonic Restraint Methods in Transformer Protection," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 49, No. 4, 2013.
- [8] M. E. Hamedani Golshan, M. Saghajian-nejad, A. Saha, and *et al.*, "A New Method for Recognizing Internal Faults from Inrush Current Conditions in Digital Differential Protection of Power Transformers," *Electric Power Systems Research*, Vol. 71, pp. 61-71, 2004.
- [9] A. M. Alomar, and B. E. Shamseldin, "Alternative Approaches for Distinguishing between Faults and Inrush Current in Power Transformers," *Energy and Power Engineering*, 2014.
- [10] X. Lin, P. Liu, and O. P. Malik, "Studies for Identification of the Inrush Based on Improved Correlation Algorithm," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 17, No. 4, pp. 901-907, 2002.
- [11] K. Ramesh, M. Sushama, "Power Transformer Protection Using Wavelet Packet Transform," in *Proc. International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, pp. 1-7, 2014.
- [12] M. Babiy, R. Gokaraju, and J. C. Garcia, "Turn-to-Turn Fault Detection in Transformers Using Negative Sequence Currents," in *Proc. IEEE Electrical Power and Energy Conf.*, CANADA, 2011.
- [13] Z. Gajić, I. Brnčić, B. Hillström, and *et al.*, "Sensitive Turn-to-Turn Fault Protection for Power Transformers," *CIGRÉ Study Committee B5 Colloquium*, Calgary, CANADA, 2005.