



روشی جدید برای تست ترانسفورماتور جریان حفاظتی

سیروس صالحی مهر

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، قزوین، ایران.
sirus.salehi@yahoo.com

علی اکبر نظری

دانشکده مهندسی برق، پزشکی و مکترونیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.
anazari@qiau.ac.ir

فرزاد رضوی

دانشکده مهندسی برق، پزشکی و مکترونیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.
farzad.razavi@qiau.ac.ir

بهروز طاهری

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، قزوین، ایران.
behrooztaheri1372@gmail.com

محمد پرپایی

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
parpaei@aut.ac.ir

چکیده

ترانسفورماتورها یک جزء خیلی مهم در حفاظت سیستم‌های قدرت می‌باشند. آن‌ها با کاهش سیگنال‌های ولتاژ و جریان شبکه مقدار دلخواه سیستم‌های حفاظتی را تامین می‌کنند. CT ها نیز در شبکه قدرت وظیفه تبدیل جریان به سطوح پایین‌تر را دارند. عملکرد CT ها و خطاهای آن در طول رخداد اتصال کوتاه با توجه به دستگاه‌های حفاظتی شبکه امری بسیار مهم هست. اشباع ترانس جریان ناشی از خطا می‌تواند عملکرد اشتباه تجهیزات حفاظتی به خصوص رله‌های حفاظتی را در پی داشته باشد. در نتیجه CT ها مانند هر تجهیز حفاظتی دیگری نیاز به تست‌های دوره‌ای دارند. در این مقاله یک روش جدید برای تست ترانسفورماتور جریان بیان شده است که ضمن بالا بردن دقت در تست، روشی نیز برای تست ترانسفورماتورهای جریان با ولتاژ اشباع بالا ارائه کرده است. روش بیان شده بر روی دستگاه تستر رله AMT-105 ساخت شرکت دانش‌بنیان وبکو امیرکبیر پیاده‌سازی شده و نتایج تست نیز بیان شده است.

واژگان کلیدی: ترانسفورماتور جریان، جریان اشباع، تست ترانسفورماتور، حفاظت سیستم‌های قدرت.



مقدمه

ترانسفورماتور جریان (CT) یک وسیله بسیار مهم اندازه‌گیری در سیستم‌های قدرت به شمار می‌رود و وجود آن در شبکه برای رله‌های حفاظتی ضروری می‌باشد. وظیفه اصلی CT تبدیل جریان اولیه به سطوح تعیین‌شده در طرف ثانویه با شکل موج دقیق می‌باشد. اساس CT ها بر کولپینگ بین سیم‌پیچ اولیه و ثانویه می‌باشد. به دلیل هیستریزیس هسته و مشخصه غیرخطی آن جریان ثانویه در طول خطا ممکن است دارای هارمونیک شده و این ممکن است باعث عملکرد اشتباه تجهیزات حفاظتی از جمله رله‌ها شود.

جریان‌های اولیه CT می‌تواند از جریان‌های بار تا جریان‌های خطا تغییر کند. برای جلوگیری از اشباع CT، آن‌ها برای عملکرد در جریان‌های بار در ناحیه خطی مشخصه $V-I$ طراحی می‌شوند. در حالت مطلوب، CT ها در ناحیه خطی و بدون تجاوز ولتاژ اشباع حتی برای جریان‌های خطا عمل می‌کنند [۱]. اشباع CT باعث انحراف جریان ثانویه و در نتیجه منجر به تاخیر در عملکرد یا عملکرد اشتباه رله‌های حفاظتی می‌شود [۲]. CT برای اندازه‌گیری جریان‌های متناوب الکتریکی استفاده می‌شود. وقتی که جریان در یک سیستم برای اعمال مستقیم به وسایل اندازه‌گیری بسیار بالا باشد یک CT، جریان را به نسبت تعیین‌شده کاهش می‌دهد که می‌تواند به راحتی به ابزار اندازه‌گیری وصل شود [۳]. CT تجهیزات حفاظتی را از آنچه که ممکن است یک ولتاژ بالا در مدار تحت نظارت باشد جدا می‌کند. CT ها معمولاً برای اندازه‌گیری و حفاظت رله‌ها در سیستم قدرت استفاده می‌شوند [۴]. در طول سال‌ها روش‌های متعددی برای تشخیص و یافتن نقص‌های داخلی ترانس‌های توزیع و قدرت معرفی شده‌اند [۵]. در طول یک اتصال کوتاه در سیستم قدرت، اشباع CT باعث ناهموار شدن شکل موج جریان در ثانویه ترانسفورماتور می‌شود. این ناهمواری می‌تواند با تاخیر در زمان عملکرد رله‌های حفاظتی همراه باشد یا ممکن است باعث عملکرد اشتباه رله شود. برای محدود کردن این تأثیرات، برای مقابله با اشباع معمولاً CT ها در اندازه‌های بزرگ ساخته می‌شوند که در آن‌ها الگوریتم‌هایی استفاده می‌شود که نسبت به اشباع CT بی‌تفاوت می‌باشند. زمانی که هسته یک CT اشباع می‌شود، القای مغناطیسی به یک مقدار خیلی کوچک کاهش می‌یابد، جریان مغناطیس‌کنندگی بالا رفته و شکل موج جریان ثانویه به هم می‌ریزد [۶]. دستگاه‌های اندازه‌گیری به‌عنوان یک تجهیز حیاتی برای مصرف‌کننده و هم شرکت‌های انتقال برق به شمار می‌روند و آن‌ها با برنامه تست کامل به جای تست نمونه‌برداری سازگار هستند [۷]. همان‌طور که گفته شد CT یک عنصر غیرخطی می‌باشد و زمانی اشباع می‌شود که شار داخل هسته CT از سطح اشباع تجاوز کند که در نتیجه جریان ثانویه کاهش یافته و از حالت سینوسی خارج می‌شود و در نهایت باعث عملکرد اشتباه رله حفاظتی می‌شود. با این حال CT ها نمی‌توانند بلافاصله و در آغاز خطا اشباع شوند. مدت زمانی که طول می‌کشد تا اشباع شروع شود به زمان اشباع (time-to-saturation) معروف است. سازندگان رله‌های حفاظتی الگوریتم‌های مختلفی را برای عملکرد درست رله‌ها در طول اشباع CT ارائه کرده‌اند. آن‌ها همچنین استفاده از طرح‌هایی را پیشنهاد کرده‌اند که رله‌ها قبل از اشباع عمل کنند [۸]. به صورت کلی مهم‌ترین مسئله برای رله‌های حفاظتی عکس‌العمل آن‌ها زمانی که هسته CT اشباع شده می‌باشد. رفتار واقعی CT نیز در چنین مواقعی به عوامل مختلفی مانند اندازه هسته، نسبت CT، مقدار جریان اولیه، پوش dc، مقاومت اهمی، ولت-آمپر ثانویه و شار باقی‌مانده دارد [۹].

با توجه به مطالب بیان‌شده عملکرد CT ها در حالات مختلف شبکه بسیار مهم می‌باشد. در بسیاری از موارد ممکن است نواقص داخلی CT ها تا زمانی که در شبکه اختلالی ایجاد نشود، آشکار نشوند و در زمان ایجاد اختلال در شبکه سیستم دچار مشکل شود. بنابراین CT ها نیز مانند دیگر تجهیزات سیستم قدرت نیاز به تست‌های دوره‌ای دارند. در این مقاله یک روش جدید برای تست CT بیان‌شده است که ضمن بالا بردن دقت در تست روشی نیز برای تست CT های با ولتاژ اشباع بالا ارائه کرده است. روش بیان‌شده بر روی دستگاه تستر رله AMT-105 ساخت شرکت دانش‌بنیان وبکو امیرکبیر پیاده‌سازی شده و نتایج تست نیز بیان‌شده است.



انواع ترانسفورماتورهای جریان

CT ها نقشی حیاتی در بحث حفاظت و اندازه‌گیری سیستم‌های قدرت ایفا می‌کنند. انتخاب درست CT ها باعث عملکرد درست تجهیزات اندازه‌گیری و حفاظتی خواهد شد [۱۰]. به‌طور کلی CT ها در شبکه قدرت در دو نوع حفاظتی و اندازه‌گیری استفاده می‌شوند. این دو نوع ترانسفورماتور چند تفاوت اساسی که مربوط به نوع کاربرد آن‌ها می‌شود باهم دارند. ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری دارای مشخصاتی به شرح زیر می‌باشند.

۱. دقت بالایی در رنج‌های پایین دارد.

۲. هسته کوچک‌تری موردنیاز است.

۳. باعث پایین آمدن ولتاژ اشباع می‌شود.

۴. رله‌ها نیاز به عملکرد در اشباع‌های نوع جریان خطادارند.

CT های نوع حفاظتی برای تبدیل سیگنال بدون انحراف در شکل موج طراحی شده‌اند. این نوع طراحی کمک می‌کند تا رله‌های حفاظتی مقدار جریان خطا را حتی در جریان‌های بالا با دقت بیشتری اندازه‌گیری کنند. مشخصات این رله‌ها نیز به‌صورت زیر بیان می‌شود.

۱. رله‌ها نیاز به عملکرد در اشباع‌های نوع جریان خطادارند.

۲. دقت متوسط در رنج‌های وسیع.

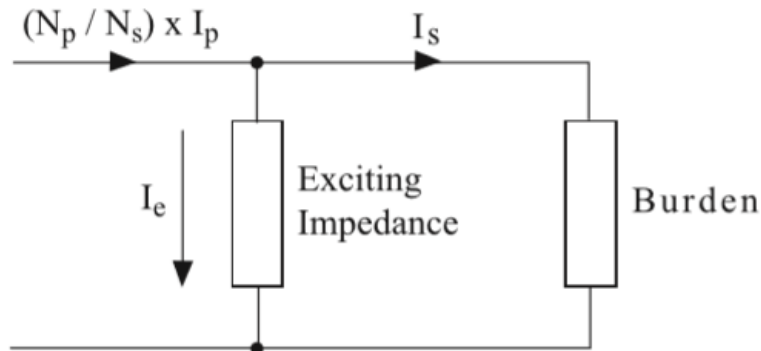
۳. هسته بزرگ‌تری موردنیاز است.

اصول عملکرد ترانسفورماتورهای جریان

CT ها به دلایل متعددی متفاوت از ترانس‌های دیگر می‌باشند. طرف اولیه CT به‌صورت سری به شبکه وصل می‌شود و به این معنی است که جریان‌های اولیه و ثانویه کاملاً تاثیر ناپذیر از ولت-آمپر ثانویه هستند. جریان‌ها مقادیر اولیه می‌باشند و افت ولتاژها فقط به خاطر جریان اشباع و هسته‌های اندازه‌گیری هستند. به‌طور کلی اگر از جریان مغناطیس‌کنندگی صرف‌نظر کنیم ترانسفورماتور باید جریان اولیه را دوباره بدون هیچ خطایی تولید کند و معادله ۱ برای جریان اولیه و ثانویه باید اعمال شود.

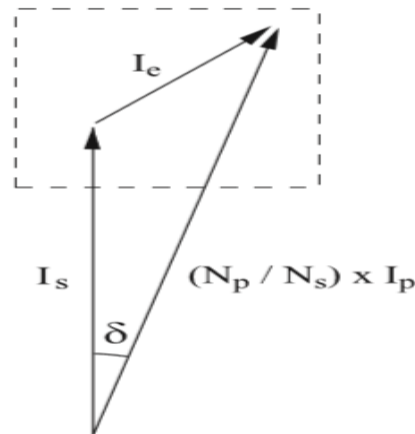
$$I_s = \frac{N_p}{N_s} \times I_p \quad (1)$$

در واقعیت البته صرف‌نظر کردن از جریان مغناطیس‌کنندگی غیرممکن است. شکل ۱ مدار معادل یک CT که به سمت ثانویه منتقل شده است را نشان می‌دهد.

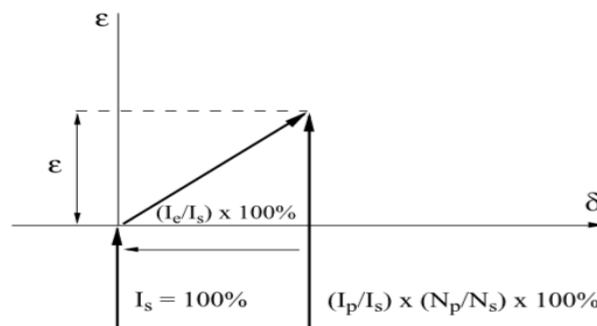


شکل ۱- مدار معادل CT [۱۱].

با توجه به مدار معادل می‌توان دریافت که تمام جریان اولیه از ثانویه نمی‌گذرد. قسمتی از این جریان توسط هسته ترانس مصرف می‌شود که به این معنی است که جریان اولیه دقیقاً با همان مقدار دوباره تولید نمی‌شود. خطای موجود در این مقدار با عنوان نرخ یا جریان خطا شناخته می‌شود و این خطا در فاز بانام خطای فاز یا خطای جابجایی معرفی شده است. در ادامه شکل ۲ نمایش برداری از مدار معادل CT و شکل ۳ نیز قسمت داخل خط‌چین از شکل ۲ را در مقیاس بزرگ‌تر نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمایش برداری جریان‌های سه فاز در مدار معادل [۱۱].



شکل ۳- ناحیه داخل خط‌چین از شکل بالا در مقیاس بزرگ‌تر [۱۱].



در شکل ۲، جریان ثانویه به عنوان یک بردار مرجع انتخاب شده و با ابعاد 100% داده شده است. به علاوه یک سیستم مختصات با محورهای تقسیم شده به درصد با منشاء مختصات در بالای بردار مرجع ساخته شده است. از آنجایی که مقدار زاویه ناچیز است خطای جریان و خطای فاز می تواند مستقیماً به صورت درصد روی محور خوانده شود ($\delta = 1\% = 1 \text{ cent radian} = 34.4 \text{ minutes}$).

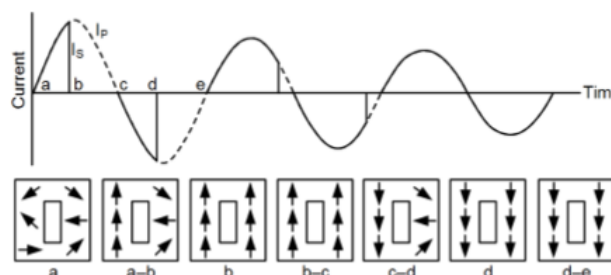
با توجه به تعاریف اگر جریان ثانویه بالا باشد خطای جریان مثبت می باشد و خطای فاز مثبت است اگر جریان ثانویه منجر به جریان اولیه شود. در نتیجه در شکل ۳ جهت مثبت روی محور ϵ به سمت پایین و به سمت راست روی محور δ خواهد بود [۱۱].

انواع مختلف اشباع در ترانس جریان

اشباع CT ها به دو شکل اشباع متقارن و اشباع نامتقارن می تواند رخ دهد. این دو نوع اشباع CT در ادامه شرح داده خواهد شد. برای رسیدن به اطلاعات دقیق تر می توان از [۱۲] استفاده کرد.

اشباع متقارن

اشباع متقارن نتیجه یک جریان اولیه متقارن است که به CT اعمال می شود و برای هسته CT برای اندازه گیری ولت-آمپر مورد نظر بسیار بزرگ است. شکل ۴ یک نمونه از جریان اولیه (IP) و جریان ثانویه CT (IS) را در طول اشباع متقارن نشان می دهد. در حالت ایده آل، قبل از اینکه جریان در نقطه a اعمال شود، مغناطیس ها در جهت های تصادفی ردیف می شوند. بین نقاط a و b، به محض جاری شدن جریان در نیم سیکل مثبت اول مغناطیس ها شروع به گرفتن نظم در جهت مثبت می کنند. به دلیل وجود تغییر در شار در طول این زمان، جریان ثانویه دقیقاً با جریان اولیه مطابقت می شود (با فرض نسبت ۱:۱ CT). قبل از اینکه نیم سیکل مثبت به پایان برسد، تمام مغناطیس های موجود در جهت مستقیم ردیف شده و هسته به بیشترین چگالی شار (اشباع) رسیده است. در این نقطه با وجود ادامه جاری بودن جریان IP تغییری در شار ایجاد نمی شود، VS صفر شده و IS نیز صفر می شود. IS تا زمان جاری شدن جریان در جهت منفی صفر می ماند. این جریان منفی، در نقطه c شروع شده و باعث می شود مغناطیس ها در جهت منفی ردیف شوند. این تغییر شار باعث تولید دوباره ولتاژ VS و جاری شدن جریان IS شده و تا زمانی که مغناطیس ها در جهت منفی در نقطه d ردیف شده اند باقی می ماند. به دلیل اینکه چگالی شار (اشباع) دوباره اتفاق می افتد، پس VS و IS دوباره صفر می شوند. نکته قابل توجه در شکل ۱ این است که اگر دامنه جریان اولیه کاهش یابد CT برای مدت کوتاه تری به اشباع می رود [۱۳].

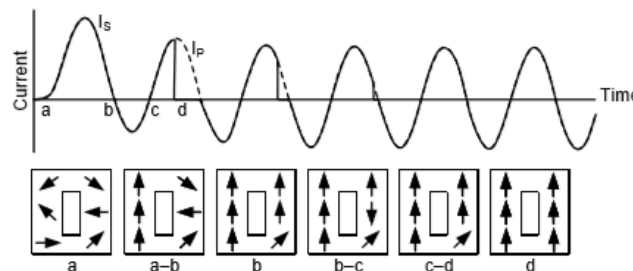


شکل ۴- جریان اولیه، جریان ثانویه و دوقطبی های مغناطیسی در طول اشباع متقارن [۱۳].



اشباع نامتقارن

همان طور که در مقالات متعددی مانند [۱۴، ۱۵] بیان شده است، جریان dc موجود در جریان ورودی باعث اشباع هسته در نیم سیکل می شود و باعث می شود تا یک جریان مغناطیس کنندگی نامتقارن به وجود آید. با توجه به این موضوع شکل دیگر اشباع، اشباع نامتقارن هست که از مقدار بالای پوش dc در جریان سینوسی اولیه اعمال شده به CT، به وجود می آید. پیکهای جریانی در حدود صفر متقارن نیستند. پوش dc زمانی به وجود می آید که محدوده تحت منحنی بالای گذر از صفر بیشتر از محدوده تحت منحنی پایین گذر از صفر باشد. از شکل ۵ می توان مشاهده کرد که چگونه پوش dc بالا باعث تسریع در اشباع CT می شود. از نقطه a تا b مغناطیس ها همه در جهت مثبت ردیف شده اند و CT اشباع نشده است. وقتی جریان اولیه منفی می شود، از نقطه b تا c، مغناطیس ها شروع به تغییر جهت کرده و در جهت منفی ردیف می شوند. به دلیل اینکه محدوده کمتری زیر منحنی بین نقاط b و c وجود دارد، مغناطیس های زیادی در جهت منفی ردیف نمی شوند. زمانی که جریان اولیه به بالای خط گذر از صفر بازمی گردد (نقطه c) مغناطیس ها دوباره شروع به ردیف شدن در جهت مثبت می کنند. در نهایت در نقطه d همه مغناطیس های موجود در جهت مستقیم ردیف می شوند و هسته اشباع می شود. پوش dc به خودی خود دامنه ای به اندازه جریان خطا ندارد و عاملی که باعث اشباع می شود این است که جریان اولیه زیر خط گذر از صفر به اندازه ای نیست که مغناطیس ها در جهت مخالف ردیف شوند [۱۳].



شکل ۵- جریان اولیه، و دو قطبی های مغناطیسی در هسته در طول خطای نامتقارن [۱۳].

بیان مسئله

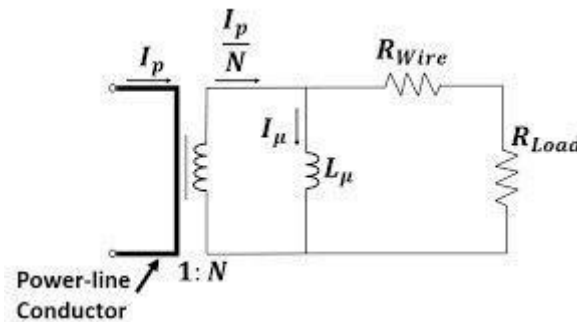
با توجه به مسائل بیان شده، CT ها به دو نوع حفاظتی و اندازه گیری تقسیم می شوند. از نظر ساختار CT های جریان حفاظتی نقطه اشباع بالاتری نسبت به ترانس های اندازه گیری دارند. اگر ترانس های حفاظتی موجود در شبکه قدرت دچار نقص باشند در صورت بروز اختلال و بالا رفتن جریان شبکه می توانند عملکرد اشتباه رله های حفاظتی را در پی داشته باشند. برای پی بردن به این نقص ها، CT ها نیز مانند دیگر تجهیزات سیستم قدرت نیاز به تست های دوره ای دارند که یکی از مهم ترین تست هایی که باید بر روی این تجهیز انجام شود تست اشباع می باشد. برای انجام تست اشباع CT ابتدا باید ولتاژ نقطه زانویی از رابطه زیر محاسبه شود.

$$\text{Knee point} = \text{Class} \times \left(\frac{\text{Burden}}{I_n} + \text{Resistance} \times I_n \right) \quad (2)$$

مقداری که از این رابطه به دست می آید ولتاژ تقریبی اشباع می باشد. همان طور که از معادله فوق مشخص است نقطه زانویی بستگی به مشخصات CT که توسط سازنده اعلام می شود دارد. پس از به دست آوردن ولتاژ نقطه زانویی از معادله فوق آن را به

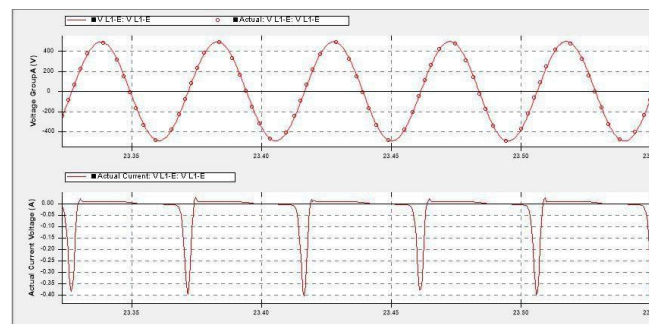


CT اعمال می‌کنیم و با پله‌های ۱۰٪ آن را افزایش می‌دهیم و هم‌زمان جریان را اندازه‌گیری می‌کنیم. زمانی که اختلاف بین دو نقطه بر روی منحنی اشباع ۵۰٪ شد نقطه دوم را به‌عنوان نقطه زانویی در نظر می‌گیریم. در مقاله [۱۶] نویسندگان روشی را ارائه کرده‌اند که بر اساس آن می‌توان CT را با استفاده از دستگاه تستر رله مورد تست قرارداد. دستگاه‌های تست رله عموماً برای ایجاد ولتاژ دلخواه در خروجی از روش‌های سوئیچینگ به‌وسیله ماسفت استفاده می‌کنند. ولتاژ ایجادشده به‌وسیله ماسفت‌ها به دلیل وجود انحرافات بسیار جزئی در سوئیچینگ، باعث به وجود آمدن یک مولفه DC در شکل موج ولتاژ می‌شود. مولفه DC موجود در شکل موج خروجی تستر بر نتایج تست تأثیرگذار خواهد بود. برای رسیدن به یک استنباط کامل از تأثیر این موضوع در تست CT، مدار شکل ۶ را در نظر می‌گیریم.



شکل ۶- مدار معادل ترانسفورماتور جریان.

روش‌های تست CT در دستگاه تست رله به این صورت است که یک ولتاژ افزایشی متناسب با ولتاژ محاسبه‌شده در معادله ۲ را به CT اعمال می‌کنیم. همان‌طور که گفته شد نقطه‌ای روی منحنی اشباع که با افزایش ۱۰٪ ولتاژ، افزایش ۵۰٪ در جریان ایجاد شد را به‌عنوان ولتاژ و جریان اشباع در نظر می‌گیریم. با توجه به مدار شکل ۶ فرض می‌کنیم ولتاژی به دو سر CT اعمال شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد یک مؤلفه dc بسیار کوچک در ولتاژ خروجی دستگاه تستر وجود دارد (تقریباً ۱۰ mV). زمانی که ولتاژ اعمال می‌شود مؤلفه dc موجود در ولتاژ خروجی باعث می‌شود تا راکتانس مربوط به X_m صفر شده و یک جریان dc در مدار ایجاد شود. در این صورت دو مؤلفه جریان در مدار وجود خواهد داشت. یک مؤلفه ac که توسط شکل موج اصلی در مدار جاری می‌شود و یک جریان dc که توسط مؤلفه dc ولتاژ در مدار به وجود می‌آید. در نهایت هر دو جریان با هم جمع شده و باعث ایجاد عدم تقارن در شکل موج جریان اشباع‌شده و نتایج تست با خطا همراه خواهد بود. شکل ۷ شکل موج ولتاژ و جریان در ثانویه CT را در روش قدیمی نشان می‌دهد.



شکل ۷- شکل موج ولتاژ و جریان در ثانویه CT با روش بیان‌شده در [۱۵].

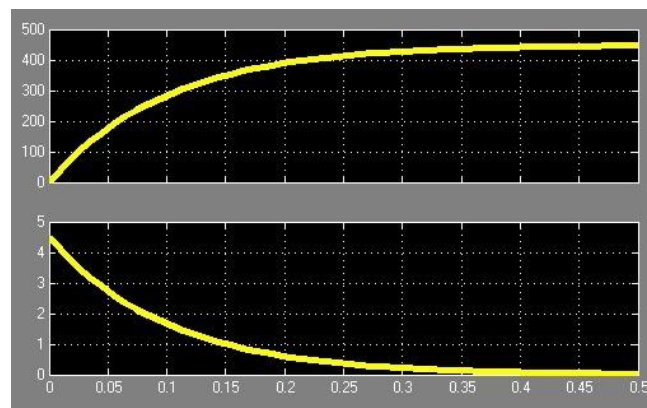


روش جدید

وقتی یک خازن به منبع ولتاژ جریان مستقیم وصل می‌شود، ابتدا جریان نسبتاً بزرگی در مدار جریان می‌یابد و خازن رفته‌رفته شارژ می‌شود تا ولتاژ دو سر آن به اندازه ولتاژ منبع برسد. در همین حالت، جریان مدار هم به تدریج کوچک می‌شود تا وقتی که خازن کاملاً شارژ شده و جریان مدار به صفر می‌رسد. پس از این فرآیند که ۵ ثابت زمانی طول می‌کشد، خازن در مدار مانند یک کلید باز عمل می‌کند. وقتی ۵ ثابت زمانی سپری می‌شود، در اصطلاح می‌گویند مدار به حالت پایدار یا ماندگار خود رسیده است. معادله ۳ این موضوع را به روشنی بیان می‌کند.

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt} \quad (3)$$

همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است عبور جریان dc از خازن تا زمانی ادامه می‌یابد که ولتاژ دو سر آن مساوی ولتاژ منبع شود. در این حالت خازن در مقابل جریان dc به عنوان یک کلید باز عمل کرده و آن را عبور نمی‌دهد.



شکل ۸- شکل موج ولتاژ و جریان dc در حالت گذرای خازن.

با توجه به مطالب بیان شده بالا و عملکرد خازن در مدار، می‌توان مؤلفه dc موجود در ولتاژ اعمال شده به ثانویه CT را حذف نمود. روش کار به این صورت است که یک خازن الکتrolیتی را به صورت سری با ولتاژ ورودی به CT قرار می‌دهیم. در این حالت جریان dc توسط خازن فیلتر شده و فقط جریان ac در ثانویه CT برقرار می‌شود و نتایجی که با این روش تست به دست می‌آید بسیار دقیق‌تر از روش قدیمی است.

روش تست CTهای ولتاژ اشباع بالا

دستگاه‌های تست رله به دلیل ساختار داخلی و محدودیت‌های مداری قادر به تأمین ولتاژ در رنج‌های بالا نمی‌باشند. از این رو با توجه به تأثیرپذیری CT ها از فرکانس، می‌توان از این ویژگی برای شبیه سازی ولتاژ در سطوح بالا استفاده کرد. با توجه به

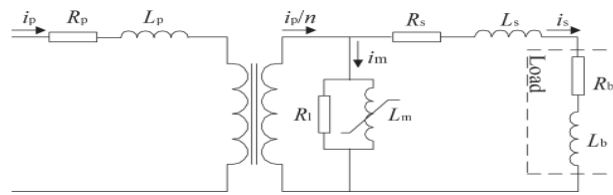
طبیعت عملکرد سلف‌های مغناطیسی، فرکانس با عکس ولتاژ متناسب است $(V \propto \frac{1}{F})$. بر همین اساس، برای تست اشباع CT های ولتاژ بالا می‌توان از این تئوری استفاده نمود و با دقتی خوب آن‌ها را مورد تست قرار داد.



بر همین اساس رابطه معکوس ولتاژ و فرکانس باعث می شود تا جریان سلف با تغییر فرکانس همواره ثابت بماند. معادله ۴ نیز نشان می دهد که ولتاژ دقیقاً به نسبت کاهش فرکانس، افزایش می یابد و بنابراین تغییری در جریان سلف ایجاد نمی شود.

$$I_{L=} = \frac{V_L}{X_L} = \frac{V_L}{2PFL} \quad (4)$$

برای بررسی دقیق تر شکل زیر که یک مدار واقعی از CT را نشان می دهد را در نظر می گیریم.



شکل ۹- مدار معادل واقعی CT [۱۷].

شکل ۹ مدار معادل واقعی CT را نشان می دهد. در این مدار L_m اندوکتانس غیرخطی مغناطیس کننده، R_1 مقاومت معادل تلفات هسته، i_m جریان مغناطیس کننده، L_s اندوکتانس نشتی ثانویه، R_s مقاومت سیم پیچ، i_s جریان ثانویه و همچنین L_p ، R_p و L_m نیز پارامترهای مربوط به طرف اولیه می باشند. با توجه به مدار بالا L_s و R_s مقدار بسیار ناچیزی نسبت به R_1 و L_m دارند که در عمل می توان از آن ها صرف نظر کرد. پس جریان اشباع توسط شاخه موازی (L_m و R_1) مصرف خواهد شد. بنابراین اگر در زمان تست از فرکانس عادی شبکه (50Hz) استفاده شود مشکلی وجود نخواهد داشت. و نتایجی که از تست به دست می آید دقیق و بدون خطا خواهد بود. مشکل زمانی در مدار و تحلیل نتایج ظاهر می شود که فرکانس را در زمان تست تغییر دهیم.

همان طور که بیان شد با نصف شدن فرکانس ولتاژ دو برابر برای تست CT های ولتاژ بالا شبیه سازی می شود، که با اعمال این روش و تغییر فرکانس، i_m تغییری نمی کند. در این حالت مسئله اصلی محاسبه جریان شاخه R_1 است. برای محاسبه جریان R_1 باید در نظر داشت که مقدار مقاومت معادل تلفات هسته باید از قبل حساب شده باشد. برای رسیدن به این منظور پس از بررسی های بسیار، معلوم شد که شکل موج جریان در ناحیه خطی از منحنی اشباع سینوسی است و با توجه به این تئوری که در جریان سینوسی می توان مقدار مؤثر موج را به دست آورد، در ادامه می توان مقدار R_1 را محاسبه کرد. همچنین باید توجه داشت که برای محاسبه دقیق تر R_1 در قسمت خطی منحنی اشباع می توان از معادله خط استفاده کرد. در این مرحله با داشتن R_1 می توان جریان i_R در ولتاژ دو برابر را محاسبه کرده و با استفاده از معادله ۵ جریان اشباع را به درستی به دست آورد.

$$I_{2v(f)} = \sqrt{\left(I_{v(\frac{f}{2})}\right)^2 - \left(\frac{V(\frac{f}{2})}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{2V_f}{R_1}\right)^2} \quad (5)$$



با توجه به معادله فوق، برای محاسبه جریان در فرکانس اصلی و با ولتاژ دو برابر، ابتدا جریان شاخه مربوط به R_1 را در فرکانس نصف محاسبه کرده و از جریان کل ثانویه در همین فرکانس کم می‌کنیم که جریان شاخه L_m را در این فرکانس به ما می‌دهد. حال این جریان را با جریان شاخه R_1 در فرکانس اصلی و ولتاژ دو برابر جمع می‌کنیم که در نهایت جریان در ولتاژ دو برابر با دقت بسیار خوبی به دست خواهد آمد.

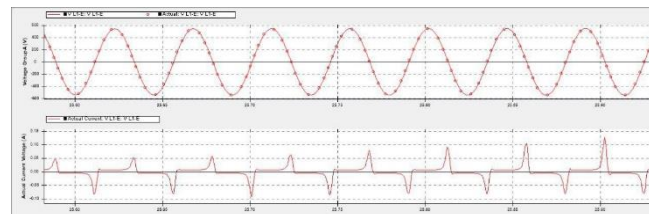
تست روش بیان شده

برای تست روش بیان شده از یک CT حفاظتی با مشخصات زیر استفاده شده است.

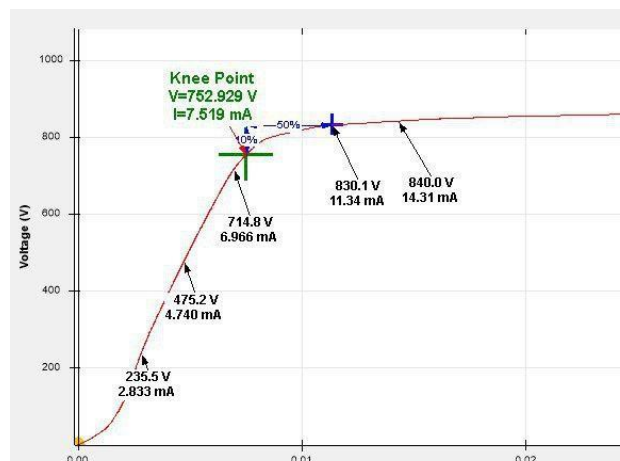
جدول ۱- مشخصات CT

ولتاژ اولیه	۶۳ کیلوولت
کلاس	5P20
نسبت تبدیل	۲۵۰۰:۱
ولت آمپر نامی	۳۰ ولت آمپر
مقاومت اهمی	۹/۲ اهم

در این مقاله به منظور تست روش جدید از دستگاه تستر رله ساخت شرکت دانش بنیان وبکو امیرکبیر استفاده شده است. همان طور که در بخش روش جدید بیان شد، یک خازن به صورت سری با ولتاژ قرار می‌گیرد تا مؤلفه dc در شکل موج را حذف کند. همچنین تست بر روی یک CT ولتاژ بالا انجام شده است که نتایج در ادامه و در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۰- شکل موج ولتاژ و جریان ثانویه CT



شکل ۱۱- منحنی اشباع CT با استفاده از روش جدید.



با توجه به شکل ۱۰ می توان مشاهده کرد که با استفاده از خازن شکل موج جریان کاملا متقارن بوده و هیچ گونه خطایی در نتایج دیده نمی شود. همچنین شکل ۱۱ منحنی اشباع CT مورد نظر را نشان می دهد.

نتیجه

CT های حفاظتی نقشی حیاتی در رساندن اطلاعات درست از شبکه قدرت به رله های حفاظتی را ایفا می کنند. CT ها نیز مانند هر تجهیز دیگر در سیستم قدرت نیاز به انجام تست های دوره ای برای اطمینان از عملکرد درست آن ها دارند. در این مقاله یک روش جدید برای تست CT بیان شده است که ضمن رفع نواقص روش بیان شده در [۱۶]، روشی نیز برای تست CT های ولتاژ بالا ارائه کرده است. روش بیان شده بر روی دستگاه تستر رله AMT-105 ساخت شرکت دانش بنیان وبکو امیرکبیر پیاده سازی شده و نتایج تست نیز بیان شده است.

منابع

- [1] L. A. Kojovic, "Comparison of different current transformer modeling techniques for protection system studies," in Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, 2002, vol. 3, pp. 1084-1089: IEEE.
- [2] W. Rebizant and D. Bejmert, "Current transformer saturation detection with genetically optimized neural networks," in Power Tech, 2005 IEEE Russia, 2005, pp. 1-6: IEEE.
- [3] M. Wagh, P. Gite, and B. Kakade, "A Review on Various Transformer Testing Systems " International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET),, vol. 3, no. 9, pp. 1297-1300, 2014.
- [4] E. E. Lesniewska and R. Rajchert, "Application of the field-circuit method for the computation of measurement properties of current transformers with cores consisting of different magnetic materials," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 10, pp. 3778-3782, 2010.
- [5] M. Bagheri, M. S. Naderi, and T. Blackburn, "Advanced transformer winding deformation diagnosis: moving from off-line to on-line," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 19, no. 6, 2012.
- [6] Y. Kang, S. Ok, S. Kang, and P. Crossley, "Design and evaluation of an algorithm for detecting current transformer saturation," IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol. 151, no. 1, pp. 27-35, 2004.
- [7] G. Kong, M. Zhang, B. An, and J. Yang, "Design and application of a compatible clamping fixture for current transformers auto-testing line," in Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), 2017 2nd International Conference on, 2017, pp. 43-46: IEEE.
- [8] S. Patnaik et al., "Design of Differential Protection Scheme Using Rogowski Coil," in National Conference on Advances in Engineering and Applied Science (NCAEAS), 2017.
- [9] Y. Ma and P. Crossley, "Impact of CT saturation on overcurrent relays," The Journal of Engineering, 2018.
- [10] W. Wijayapala, J. Karunanayake, and R. Madawala, "Current Transformer Performance during Transient Conditions and the Development of a Current Transformer Selection Criterion for Protection Applications," Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka, vol. 49, no. 3, 2016.
- [11] "Outdoor Instrument Transformers," S. ABB Power Technologies AB Department: PTHV/HV/MT SE-771 80 LUDVIKA, Ed., ed, 2004, p. 124.
- [12] S. E. Zocholl, Analyzing and applying current transformers. Schweitzer Engineering Laboratories, 2004.
- [13] A. Hargrave, M. Thompson, and B. Heilman, "Beyond the Knee Point: A Practical Guide to CT Saturation," in proceedings of the 44th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, 2017.
- [14] R. Girgis and K. Vedante, "Methodology for evaluating the impact of GIC and GIC capability of power transformer designs," in Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE, 2013, pp. 1-5: IEEE.
- [15] A. Rezaei-Zare, "Behavior of single-phase transformers under geomagnetically induced current conditions," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 2, pp. 916-925, 2014.
- [16] س. صالحی مهر، ف. رضوی، ب. طاهری، م. پرپایی، و م. م. قلعه سفیدی، "تست عملی اشباع و نسبت تبدیل ترانسفورماتور جریان حفاظتی"، ارائه شده در: سومین کنفرانس بین المللی مهندسی برق، ۱۳۹۷.
- [17] B. Ge, A. T. de Almeida, and F. J. Ferreira, "Estimation of primary current in saturated current transformer using flexible neural network," Transactions of the Institute of Measurement and Control, vol. 28, no. 1, pp. 81-91, 2006.