

تست عملی ترانسفورماتورهای جریان با چند هسته مغناطیسی

- سیروس صالحی مهر^۱، بهروز طاهری^۲، فرزاد رضوی^{۳*}، علی اکبر نظری^۱، امیر باژدار^۱.
۱- دانشکده مهندسی برق، پزشکی و مکاترونیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.
۲- گروه مهندسی برق، شرکت دانش بنیان وبکو امیرکبیر، قزوین، ایران.

خلاصه

در سیستم‌های قدرت، مقدار جریان به‌اندازه‌ای بزرگ می‌باشد که از نظر فنی و اقتصادی اتصال مستقیم به تجهیزات اندازه‌گیری و حفاظتی امکان‌پذیر نمی‌باشد. لذا برای حل این مشکل باید از ترانسفورماتورهای جریان استفاده کرد. ترانسفورماتور جریان، جریان اولیه را به‌اندازه‌ای کاهش می‌دهد تا بتوان از آن در تجهیزات حفاظتی و اندازه‌گیری استفاده کرد تا اطلاعات دقیقی از سیستم در اختیار باشد. بنابراین وجود نقص در این ترانس‌ها می‌تواند موجب دریافت اطلاعات نادرست از سیستم شده و نتایج زیان باری در پی داشته باشد. از این‌رو، ترانس‌های جریان مانند هر تجهیز دیگری در سیستم قدرت نیازمند تست‌های دوره‌ای می‌باشند تا از عملکرد درست آن‌ها اطمینان حاصل شود. این مقاله، تست ترانسفورماتور جریان چند هسته را مورد تحلیل قرار داده و روش تست دقیق آن را بیان می‌دارد. همچنین تست ترانس جریان چند هسته به‌طور عملی با دستگاه تست وبکو امیرکبیر انجام‌شده و نتایج در حالت‌های مختلف نشان داده‌شده است.

کلمات کلیدی: ترانسفورماتور جریان، تست ترانسفورماتور جریان، ترانسفورماتورهای جریان چند هسته، حفاظت سیستم‌های قدرت.

۱. مقدمه

ترانس جریان (CT) برای نمونه‌گیری از شکل موج جریان به نسبت عبور جریان از اولیه خود و القای آن در ثانویه استفاده می‌شود. این ترانس‌ها به‌منظور حفاظت و اندازه‌گیری در ابتدای خطوط ورودی به پست‌ها و همچنین در ورودی ترانس قدرت و ورودی ثانویه ترانس و همچنین در خروجی‌های پست و نقاط کلیدی دیگر که احتیاج است جریان در آن نقطه تحت نظر باشد استفاده می‌شود که هرکدام از این نقاط با ترانس مخصوص به خود چه از نظر عایقی و ساختمان و چه از نظر قدرت و دقت، نصب و استفاده می‌گردند. از دو سیم‌پیچ اولیه و ثانویه تشکیل شده که جریان واقعی در پست از اولیه عبور نموده و در اثر عبور این جریان و متناسب با آن، جریان کمی (در حدود آمپر) در ثانویه به وجود می‌آید. جریان اولیه می‌تواند از جریان‌های بار تا جریان‌های بالای ناشی از خطا متغیر باشد. برای ممانعت از اشباع CT ها برای عملکرد در جریان‌های برابر روی قسمت خطی از منحنی اشباع V-I طراحی می‌شوند. باید در نظر داشت که CT ها

* Corresponding author
Email: farzad.razavi@qiau.ac.ir

در منطقه خطی از منحنی V-I بدون تجاوز ولتاژ اشباع حتی برای جریان‌های خطا عمل می‌کنند. بنابراین تحت برخی شرایط CT ها اشباع می‌شوند [۱].

مشخصه عملکرد CT ها توسط استاندارد ANSI/IEEE مشخص می‌شوند [۲]. با این حال این استاندارد فقط رفتار سیستم تحت حالت ماندگار و خطای متقارن را پوشش می‌دهد. در یک شبکه قدرت واقعی جریان‌های اتصال کوتاه ممکن است یک پوش DC قابل توجهی داشته باشند که ممکن است باعث اشباع CT شود که در شرایط خطای متقارن شاید این اتفاق رخ ندهد. اشباع CT باعث انحراف جریان ثانویه و در نتیجه منجر به تاخیر در عملکرد یا عملکرد اشتباه رله‌های حفاظتی می‌شود [۳].

در این میان و با توجه به نیاز صنعت برق CT هایی با چند هسته مغناطیسی طراحی شد تا علاوه بر صرفه اقتصادی بتوان با استفاده از طراحی مداراتی خاص دقت اندازه‌گیری را نیز بهبود بخشید. در مقاله [۴]، از یک تکنیک الکترونیکی برای استفاده از CT های چند هسته برای بالا بردن دقت در اندازه‌گیری جریان با مقدار پایین استفاده شده است. نویسندگان در این مقاله بیان داشته‌اند که با استفاده از این روش مقادیر جریان را از 1 A تا 200 A ، در فرکانس بین 50 و 50 kHz ، با خطای نسبت تبدیل کمتر از 50×10^{-6} می‌توان اندازه‌گیری کرد. طرحی بر مبنای CT های با دو هسته مغناطیسی در [۵] ارائه شده است. این روش به‌طور قابل توجهی دقت CT را برای ولت‌آمپر مورد نظر بهبود می‌بخشد.

ترانس‌های جریان، از جمله ترانس‌های با چند هسته مغناطیسی مانند هر تجهیز دیگری در سیستم قدرت نیازمند تست‌های دوره‌ای می‌باشند تا از عملکرد درست آن‌ها اطمینان حاصل شود. این مقاله، تست ترانسفورماتور جریان چند هسته را مورد تحلیل قرار داده و روش درست تست آن را بیان می‌دارد. همچنین تست ترانس جریان چند هسته به‌طور عملی با دستگاه تست وبکو امیرکبیر انجام شده و نتایج در حالت‌های مختلف نشان داده شده است.

۲. تشریح عملکرد ترانسفورماتور جریان

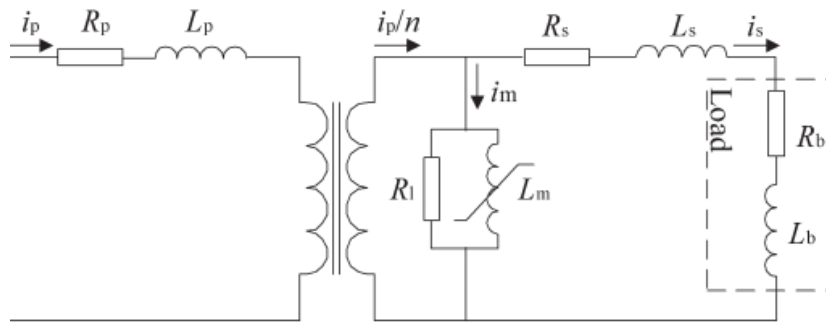
در حالت عملکرد عادی سیستم یک جریان با مقدار بالا از اولیه CT عبور می‌کند و این مقدار جریان با یک نسبتی که قابل مدیریت باشد به ثانویه منتقل می‌شود. این تبدیل جریان توسط سیم‌پیچ‌های مسی پیچیده شده به دور هسته آهنی با یک نسبت مشخص بین جریان‌های اولیه و ثانویه، که توسط نسبت بین تعداد دور سیم‌پیچ اولیه و ثانویه مشخص می‌شود، به دست می‌آید. CT های نوع قالبی و پوشینگی به‌طور فیزیکی داری سیم‌پیچ اولیه نمی‌باشند و یک دور سیم‌پیچی برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. عبور جریان از سیم‌پیچی اولیه باعث به وجود آمدن اتفاقات زیر می‌شود:

۱. هسته آهنی موجود در ترانسفورماتور مغناطیسی می‌شود.

۲. هسته آهنی مغناطیسی شده یک ولتاژ در سیم‌پیچی‌های ثانویه القا می‌کند.

۳. اگر مدار ثانویه بسته باشد، جریانی متناسب با نسبت CT در ثانویه به گردش خواهد درآمد.

انتقال جریان از اولیه به ثانویه CT نیازمند مقدار کمی انرژی برای مغناطیسی کردن هسته آهنی می‌باشد و مقدار کمی تلفات انرژی در نتیجه جریان‌های گردابی و حرارت ناشی از عبور جریان از سیم‌پیچ‌ها ایجاد خواهد شد. بنابراین جریان ثانویه یک نمایش کامل از جریان اولیه نمی‌باشد. مدار معادل CT با یک هسته مغناطیسی در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل ۱ - مدار معادل CT تک هسته [۶].

شکل ۱ مدار معادل واقعی CT را نشان می‌دهد. در این مدار L_m اندوکتانس غیرخطی مغناطیس کننده، R_l مقاومت معادل تلفات هسته، i_m جریان مغناطیس کننده، L_s اندوکتانس نشتی ثانویه، R_s مقاومت سیم‌پیچ، i_s جریان ثانویه و همچنین R_p ، L_p و L_m نیز پارامترهای مربوط به طرف اولیه می‌باشند. همچنین معادله مربوط به محاسبه خطا در تبدیل جریان اولیه به ثانویه را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$f_i = \frac{I_2 - I_1'}{I_1'} * 100\% \quad (1)$$

که در آن f_i درصد خطا، I_2 جریان ثانویه و I_1' جریان اولیه کاهش یافته در ثانویه می‌باشد. همه CT ها بر اساس استاندارد ANSI ساخته می‌شوند و یک کلاس دقت برای نشان دادن تأثیرات تلفات CT بر روی جریان ثانویه CT در حالت عملکرد عادی سیستم دارند. کلاس دقت، حداقل دقت تضمین شده توسط سازنده آن است و CT ممکن است دقتی بالاتر از کلاس دقت داشته باشد. مانند همه ترانسفورماتورهای دیگر، CT ها فقط می‌توانند یک مقدار محدودی از انرژی را فراهم آورند. این ویژگی معمولاً به عنوان درجه ولت-آمپر (Burden) برای ترانس‌های عادی شناخته می‌شود. محدودیت‌های انرژی CT همچنین شامل کلاس دقت نیز می‌شود که با عنوان حداکثر ولت-آمپر نشان داده می‌شود.

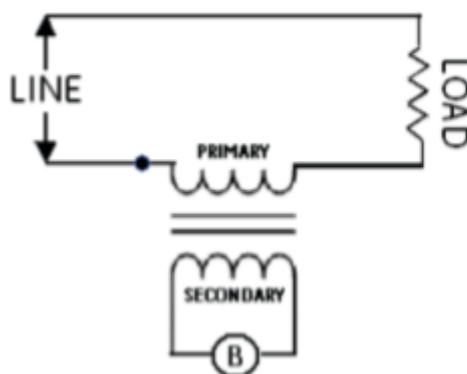
۳. مدل ترانسفورماتورهای جریان

ترانسفورماتور جریان یا همان CT ها، ادوات مبدل هستند که به طور معمول جریان اولیه I_p که مقدار بالایی دارد را به مقدار خیلی کمتر در ثانویه I_s تبدیل می‌کنند، که بعد از تبدیل می‌توان این جریان را به دستگاه‌های اندازه‌گیری یا حفاظتی استاندارد وصل کرد.

مهم‌ترین ویژگی ترانسفورماتورهای جریان، نسبت بین دوره‌های اولیه و ثانویه می‌باشد. ویژگی‌های مهم دیگر عبارتند از سطح جریان اولیه، سطح جریان ثانویه، کلاس دقت، ضریب محدودیت دقت یا ضریب ایمنی تجهیز (مشخصه مغناطیسی)، مقاومت ثانویه و سطح ولت-آمپر. ترانسفورماتورهای جریان می‌توانند به صورت تک هسته و یا چند هسته مورد استفاده قرار گیرند.

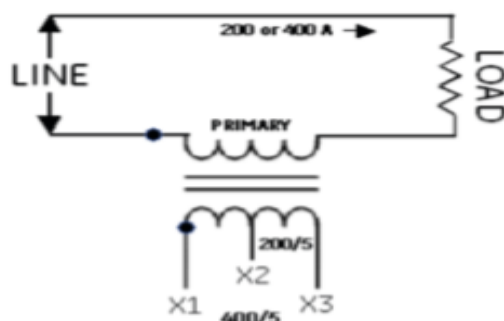
۱-۳. ترانسفورماتور جریان تک هسته

CT ها نقش حیاتی در بحث حفاظت و اندازه گیری سیستم های قدرت ایفا می کنند. انتخاب درست CT ها باعث عملکرد درست تجهیزات اندازه گیری و حفاظتی خواهد شد [۷]. CT ها معمولا در انواع مختلف Bar, Toroidal و Wound ساخته می شوند. این ترانسفورماتورها با اولیه Wound همیشه به صورت سری با خط قرار می گیرند. در این حالت، بار و سیم پیچ ثانویه آن ها همانند شکل زیر به ولت آمپر متصل می شوند.



شکل ۲ - مدار CT تک هسته

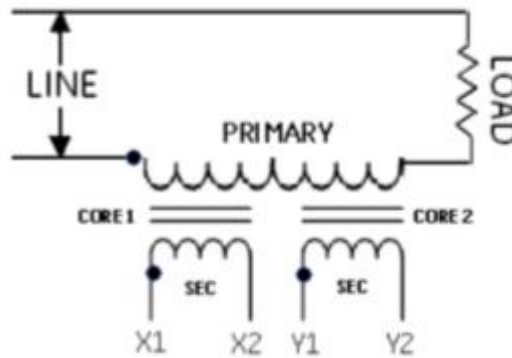
همچنین در برخی موارد نیاز به چند سیم پیچی متفاوت در خروجی برای تأمین جریان در نسبت های مختلف احساس می شود. برای حل این مشکل می توان از CT های دارای ثانویه با چند نسبت تبدیل استفاده کرد. بر همین اساس و با توجه به شکل ۳ می توان در ثانویه CT که دارای سر وسط می باشد از سیم پیچی با دو نسبت تبدیل استفاده کرد. این CT ها در کاربردهایی استفاده می شوند که دو خروجی با نسبت تبدیل های متفاوت نسبت به اولیه مورد نیاز باشد. این کار می تواند با اضافه کردن یک سر در سیم پیچ ثانویه انجام شود. نسبت تبدیل به دست آمده با استفاده از سر وسط معمولا نصف نسبت تبدیل حاصل شده از کل سیم پیچ می باشد. شکل زیر یک نمونه مدار CT با دو نسبت تبدیل مختلف را نشان می دهد.



شکل ۳ - مدار CT تک هسته با دو نسبت تبدیل مختلف در ثانویه

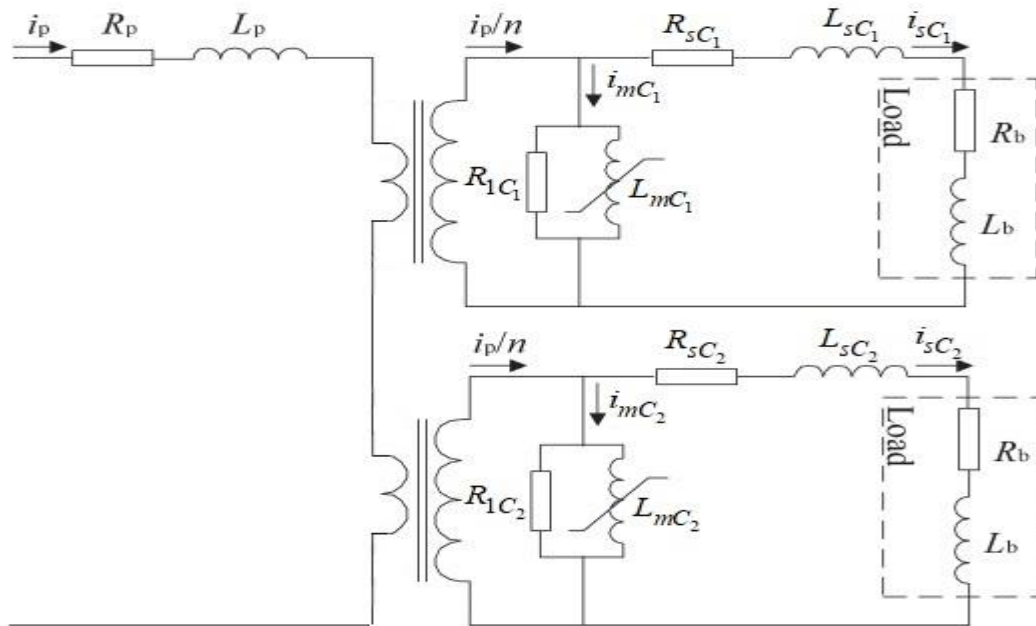
۲-۳. ترانسفورماتورهای جریان با چند هسته مغناطیسی

طرح دیگری از CT های مورد استفاده در سیستم های قدرت CT های با چند هسته مغناطیسی می باشد. یک CT چند هسته دارای حداقل دو هسته مغناطیسی با بازه های مرکزی می باشد که در طرف مخالف یک حفاظ الکترواستاتیکی نصب می شود. هسته های مورد نظر و سیم پیچ های مربوط به آن ها، توسط یک حلقه اتصال عضو که از مرکز هسته CT ها عبور می کند کوپل می شوند [۸]. در این نوع از کاربری و با توجه به شکل ۴، CT مورد نظر دارای ۲ هسته مغناطیسی، دو سیم پیچی ثانویه و یک سیم پیچی اولیه مشترک می باشد. این نوع از CT ها برای هر دو کاربرد حفاظتی و اندازه گیری استفاده می شوند که باید مدار مورد استفاده برای کاربر حفاظتی از مدار مورد استفاده برای کاربرد اندازه گیری ایزوله شود.



شکل ۴ - مدار CT با دو هسته مغناطیسی

باید توجه داشت که در این طرح اگر از هر دو CT به صورت هم زمان استفاده نمی شود باید ثانویه CT که استفاده نشده اتصال کوتاه گردد. این به این دلیل است که در حالت مدار باز ولتاژ بسیار بالایی در ثانویه CT مغناطیس شده ایجاد خواهد شد. این مسئله همچنین در زمان تست های دوره ای این CT ها مشکل ساز خواهد بود. در ادامه این مسئله به صورت کامل مورد بررسی و تحلیل قرار خواهد گرفت. همچنین مدار معادل CT با دو هسته مغناطیسی در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵ - مدار معادل CT با دو هسته مغناطیسی در ثانویه

۴. بررسی روش تست نسبت تبدیل در ترانسفورماتور جریان

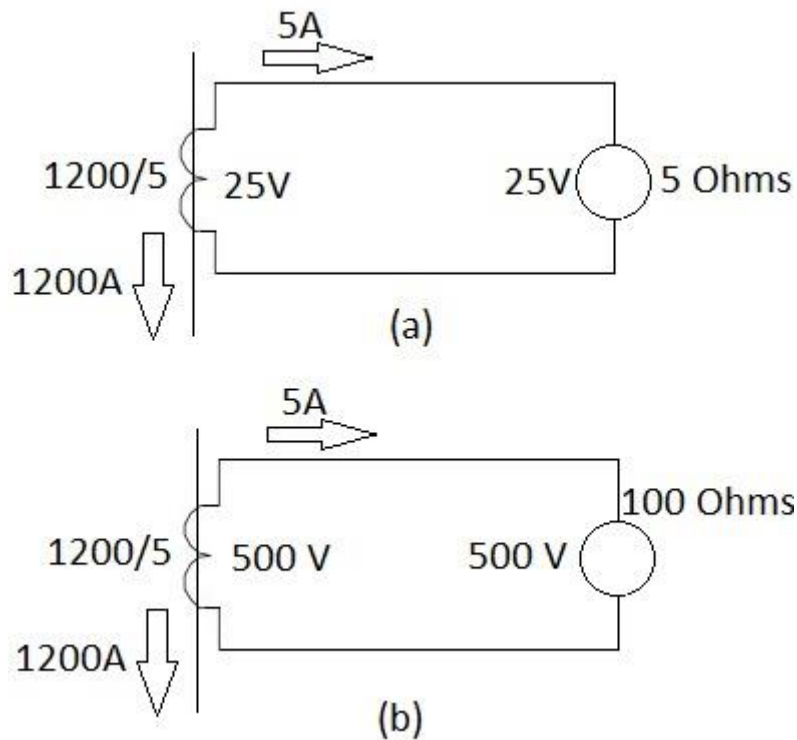
بیشتر CT ها دارای یک سطح جریان ثانویه استاندارد با اندازه 5A و 1A می باشند. برای مثال زمانی که سازندگان CT نسبت ۱۰۰/۵ را بر روی پلاک CT ثبت می کنند بدین معنی می باشد که جریان اولیه ۲۰ برابر جریان ثانویه می باشد. بنابراین اگر جریان 100A را از هادی اولیه عبور دهیم، جریان 5A در ثانویه حاصل خواهد شد. این نسبت بین جریان اولیه و جریان ثانویه باید همیشه یک عدد ثابت بوده و نباید با گذشت زمان تغییر کند. CT ها به دلیل نمایش جریان از شبکه قدرت می توانند با ارائه اطلاعات نادرست باعث به وجود آمدن اتفاقات ناگوار مانند عملکرد نایجای رله های حفاظتی را در پی داشته باشند. بر همین اساس این تجهیزات باید به صورت دوره ای مورد تست قرار گیرند تا در زمان وقوع اختلال در شبکه بتوانند اطلاعات درستی در اختیار ادوات اندازه گیری و حفاظتی قرار دهند.

یکی از تست های بسیار مهم برای CT تست نسبت تبدیل می باشد. این تست جهت بررسی صحت نسبت تبدیل جریان ورودی به جریان خروجی انجام می شود. بدین منظور از طریق دستگاه تست به اولیه CT (Busbar) جریان اعمال می کنیم و در ثانویه CT جریان را اندازه گیری می کنیم. در این مرحله و با استفاده از معادله زیر مقدار خطای نسبت تبدیل CT را محاسبه می کنیم. مقداری که از این معادله حاصل می شود نباید بیشتر از ۵ درصد برای CT اندازه گیری و ۱ درصد برای CT حفاظتی باشد.

$$Error = \left[\left(\frac{I \text{ inject}}{I \text{ measured in sec}} - Ratio \right) \div Ratio \right] * 100 \quad (2)$$

CT های با چند هسته مغناطیسی به دلیل صرفه اقتصادی و همچنین حجم کمتر نسبت به کارایی آن ها به طور گسترده ای در شبکه قدرت امروزی مورد استفاده قرار می گیرند. این CT ها نیز مانند CT های تک هسته و با روش بیان شده باید مورد تست قرار گیرند. نکته قابل توجه در تست CT های چند هسته این است که در این حالت یک سیم پیچی اولیه با چند سیم پیچی ثانویه بر روی هسته های مجزا وجود دارد که این هسته ها هر کدام می توانند از نوع حفاظتی یا اندازه گیری

باشند. این CTها وقتی تحت تست قرار می‌گیرند و زمانی که یکی از هسته‌ها مورد تست قرار می‌گیرد، بنابر ویژگی ذاتی CT جریان اولیه با نسبت تبدیل مربوطه در همه هسته‌ها در سمت ثانویه به گردش درمی‌آید. در این حال اگر دو سر سیم‌پیچی هسته‌هایی که تحت تست نیستند باز باشد یک مقاومت بسیار بالا به وجود آمده و ولتاژ بزرگی را در دو سر سیم‌پیچی ایجاد خواهد کرد. شکل ۶ تغییرات ولتاژ دو سر سیم‌پیچی ثانویه با تغییر مقاومت دو سر آن را به‌وضوح نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۶ (b) مشخص است با افزایش مقاومت دو سر ثانویه CT ولتاژ دو سر آن به‌شدت افزایش می‌یابد.



شکل ۶ - تاثیر افزایش مقاومت دو سر ثانویه بر ولتاژ آن

در این حالت، این ولتاژ بالا می‌تواند باعث ایجاد نویز در داخل CT شده و بر نتایج تست هسته‌ای که در حال تست آن هستیم تأثیر بگذارد. همچنین باید توجه داشت که اگر این ولتاژ مقدار بسیار بالایی داشته باشد می‌تواند باعث از بین رفتن عایقی سیم‌پیچی و رخ دادن حوادث ناگوار شود. بنابراین نکته قابل توجه در تست CT های چند هسته است که باید در هنگام تست دو سر سیم‌پیچی هسته‌هایی که تحت تست نیستند اتصال کوتاه گردند.

در ادامه یک CT دو هسته برای نمایش تأثیر نویز بر نسبت تبدیل تحت تست عملی قرار گرفته است. این CT دارای یک هسته حفاظتی و یک هسته اندازه‌گیری می‌باشد. شکل ۷ تست عملی یک CT دو هسته را نشان می‌دهد. همچنین مشخصات CT در جدول یک ارائه شده است.

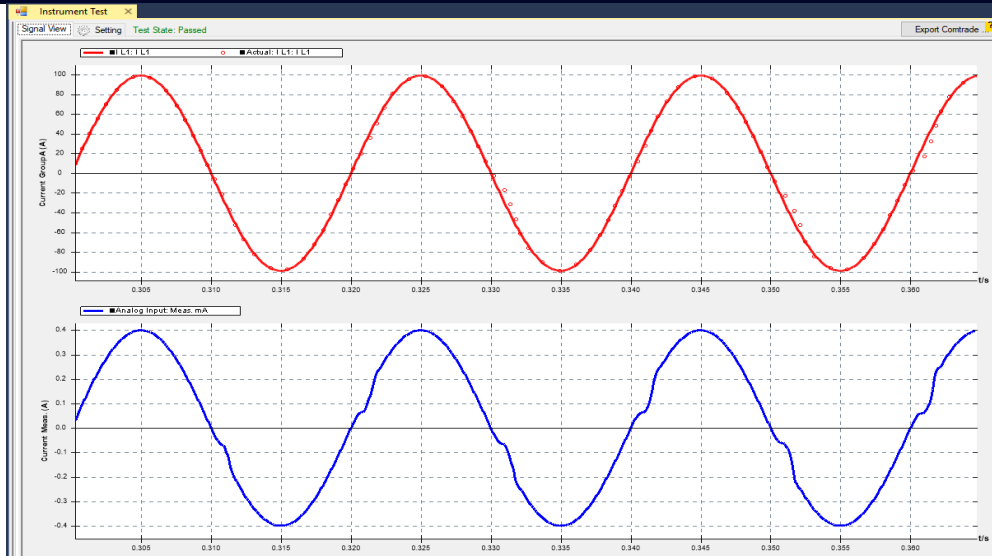


شکل ۷ - تست عملی CT دو هسته

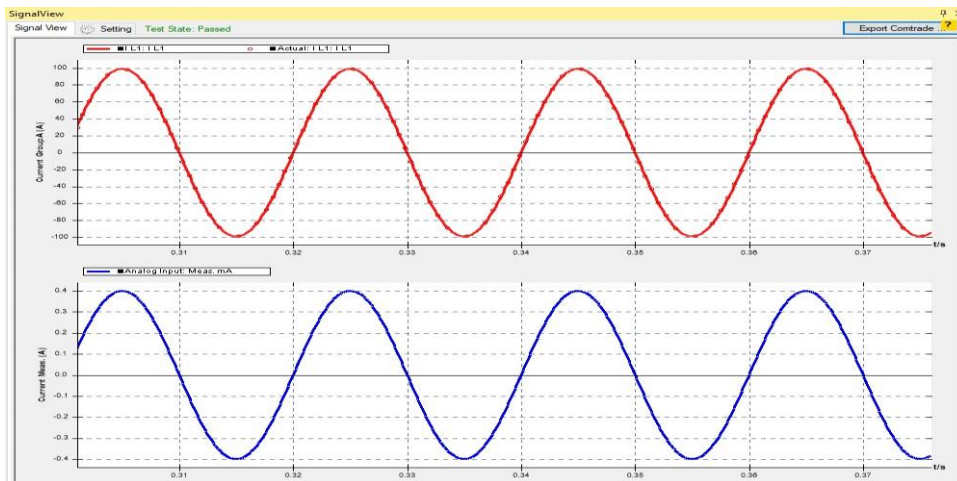
جدول ۱- مشخصات CT تحت تست

| | |
|-------|------------------|
| 24kV | ولتاژ اولیه |
| 250:1 | نسبت تبدیل |
| 2.4Ω | هسته حفاظتی |
| 1.85Ω | هسته اندازه گیری |
| 10P10 | هسته حفاظتی |
| 0.2 | هسته اندازه گیری |
| 15VA | هسته حفاظتی |
| 7.5VA | هسته اندازه گیری |

این تست در دو مرحله و با دستگاه تست وبکو امیرکبیر انجام گرفته است. در مرحله اول تست نسبت تبدیل بر روی هسته اندازه گیری انجام شده و دو سر سیم پیچی هسته حفاظتی باز می باشد. در مرحله دوم نیز با اتصال کوتاه کردن دو سر سیم پیچی دوباره تست مشابه ای انجام شده است. شکل ۸ تاثیر باز بودن دو سر سیم پیچی هسته غیر تست بر روی نتایج هسته تحت تست را نشان می دهند. شکل ۹ نیز شکل موج حاصل از تست CT مورد نظر با اتصال کوتاه کردن دو سر سیم پیچی هسته غیر تست را نشان می دهد.



شکل ۸ - نسبت تبدیل با باز بودن دو سر سیم پیچی



شکل ۹ - نسبت تبدیل با اتصال کوتاه کردن دو سر سیم پیچی

۵. نتیجه گیری

ترانسفورماتورهای جریان نقشی حیاتی در رساندن اطلاعات درست از شبکه قدرت به تجهیزات حفاظتی و اندازه گیری را ایفا می کنند. وجود نقص در این تجهیزات می تواند باعث بروز مشکلات و ناپایداری در شبکه شود. در نتیجه 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 میان در تست CT های جریان چند هسته به دلیل تأثیر هسته های مغناطیسی بر هم دیگر، نیاز به رعایت نکاتی خاص می باشد. این مقاله، تست ترانسفورماتور جریان چند هسته را مورد تحلیل قرار داده و روش تست دقیق آن را بیان می دارد. همچنین تست ترانس جریان چند هسته به طور عملی با دستگاه تست وبکو امیرکبیر انجام شده و نتایج در حالت های مختلف نشان داده شده است.

۶. مراجع

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. I. Team, "IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers," IEEE Std C, vol. 57.
3. 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.
4. E. So and D. A. Bennett, "A low-current multistage clamp-on current transformer with ratio errors below 50/spl times/10/sup-6," IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol. 46, no. 2, pp. 454-458, 1997.
5. J. L. West and P. N. Miljanic, "An improved two-stage current transformer," IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol. 40, no. 3, pp. 633-635, 1991.
6. 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.
7. 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.
8. F. G. Hibbits, "Multicore transformer including integral mounting assembly," ed: Google Patents, 1967.