

تست عملی اشباع و نسبت تبدیل ترانسفورماتور جریان حفاظتی

سیروس صالحی مهر^۱، فرزاد رضوی^{*۲}، بهروز طاهری^۱، محمد پریائی^۲، مهدی محمدی قلعه سفیدی^۳

۱- دانشکده مهندسی برق، پزشکی و مکترونیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

۲- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

۳- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

خلاصه

در زمان ایجاد خطا در سیستم قدرت این وظیفه رله‌های حفاظتی است که در کوتاه‌ترین زمان ممکن خطاها را تشخیص داده و نسبت به رفع خطا اقدام کنند. رله‌های حفاظتی برای انجام درست وظیفه خود نیاز به سیگنال‌های خطوط انتقال دارند، این سیگنال‌ها توسط ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ کاهش داده شده و سپس به رله اعمال می‌شوند. ترانسفورماتورهای جریان نیز مانند هر تجهیز دیگری نیاز به انجام تست‌های دوره ای متفاوت دارد. در این مقاله به بررسی نحوه تست اشباع و نسبت تبدیل ترانسفورماتور جریان پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: ترانسفورماتور جریان، حفاظت سیستم‌های قدرت، رله‌های حفاظتی، تست تجهیزات.

۱. مقدمه

گسترش سیستم‌های قدرت به علت تقاضای رو به رشد انرژی موجب افزایش سطح وقوع خطا در این سیستم‌ها شده است. برای رفع سریع خطاهای ایجاد شده در خطوط انتقال انرژی از رله‌های حفاظتی استفاده می‌شود [۱]. توجه به نیازهای رله‌های حفاظتی برای اطمینان از عملکرد مناسب این نوع از دستگاه‌ها بسیار ضروری است. رله‌های حفاظتی نیاز به اندازه‌گیری دقیق از مقادیر فعلی در سیستم قدرت دارند [۲]. ارسال مقادیر اصلی سیستم قدرت به رله‌ها نه به صرفه هست و نه ممکن به همین دلیل برای تبدیل ولتاژ به سطح پایین تر از ترانسفورماتور ولتاژ خازنی و برای تبدیل مقادیر جریان از ترانسفورماتور جریان استفاده می‌شود.

ترانسفورماتورهای جریان (CT) یکی از اجزای کلیدی سیستم‌های حفاظتی هستند. زیرا رله‌های حفاظتی با استفاده از این ترانسفورماتورها از طریق کاهش جریان فعلی در طرف ثانویه به جریان‌های اولیه دسترسی می‌یابند تا عملکردی به موقع، بدون مشکل و بر اساس زیرساخت‌های تعیین شده انجام دهند [۳، ۴].

همانطور که بیان شد عملکرد صحیح سیستم حفاظتی به CT بستگی دارد. در مقابل این ویژگی مطلوب، هسته CT دارای خصوصیات تحریک غیر خطی است. هنگامی که در معرض جریان خطای بالا قرار می‌گیرد، هسته CT سطح بالای

* Corresponding author

Email: farzad.razavi@qiau.ac.ir

چگالی شار را حفظ می کند و در ادامه به اشباع می رود [۲-۵]. در نتیجه، جریان های ثانویه تغذیه کننده رله های حفاظتی می تواند کاهش یابد، تحریف شود و باعث عملکرد اشتباه رله های حفاظتی شود.

در این مقاله ابتدا به بررسی مدل CT و روابط حاکم بر آن می پردازیم. در قسمت بعد اقدام به تست عملی اشباع CT و به دست آوردن نقطه زانویی با استفاده از دستگاه تست رله AMT-105 ساخت شرکت وبکو امیرکبیر شده است.

۲. مدل CT

در این بخش CT بر اساس استاندارد IEEE PSRC [۶] که در مقاله [۲] بیان شده مدل شده است. هنگامی که جریان تحریک به منطقه اشباع می رسد، بخشی از شکل موج در ناحیه زیر نقطه زانویی اثرات ناچیزی دارد بنابراین در این مدل می توان از تلفات جریان هیستریزس و جریان گردابی صرف نظر کرد. شکل ۱ مدار معادل CT را نشان می دهد. با استفاده از قانون ولتاژ کیر شریف می توان مدار معادل CT نشان داده شده در شکل ۱ را توسط معادله زیر شرح داد:

$$V_e - \left(\frac{i_p}{CTR} - i_e \right) R_t - L_b \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{i_p}{CTR} - i_e \right) = 0 \quad (1)$$

i_p : مقادیر لحظه ای جریان های اولیه، ثانویه و تحریک.

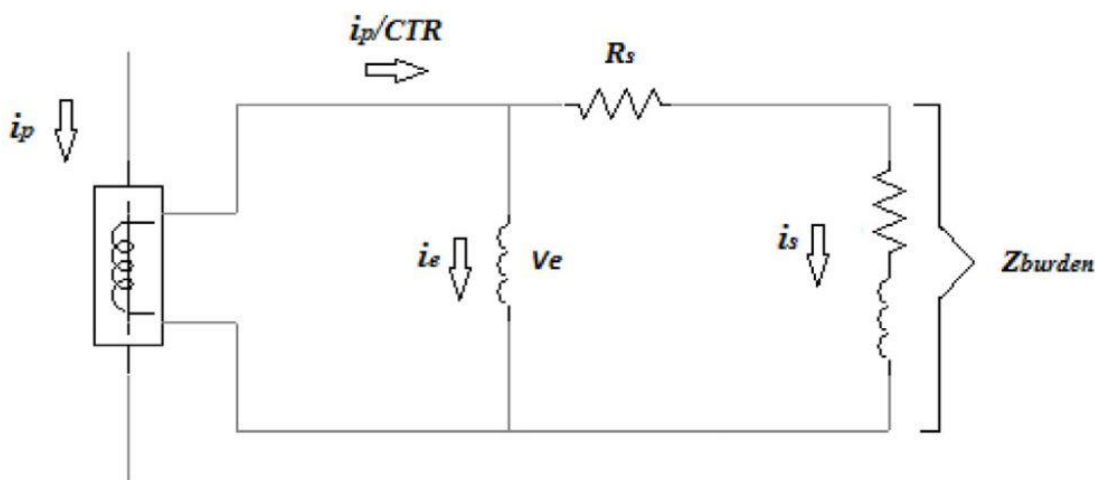
V_e : ولتاژ تحریک لحظه ای.

CTR : نسبت جریان ترانسفورماتور.

R : مقاومت سیم پیچ ثانویه.

Z_b : امپدانس بار.

R_t : مقاومت کل برابر با مجموع مقاومت بار و مقاومت سیم پیچ ثانویه.



شکل ۱ - مدار معادل CT [۲].

با توجه به مدار معادل شکل ۱ تحت شرایط خطا، جریان ایده آل ثانویه ($i_e = 0$) با معادله زیر بیان می شود:

$$i_s = \frac{i_p}{CTR} \sqrt{2} \left[k.e^{-\frac{t}{\tau}} - \cos(\omega t - \cos^{-1} k) \right] \quad (2)$$

k : مقداری است که مشخصه های شکل موج جریان ثانویه را مشخص می کند.

اگر $k = 1$ باشد مولفه نامتقارن در جریان خطا وجود دارد.

اگر $k = 0$ باشد تنها یک مولفه متقارن در جریان خطا وجود دارد.

در عمل، جریان تحریک غیر صفر است و مقدار آن تعریف می کند که چقدر جریان اصلی با اعوجاج در طرف ثانویه منعکس می شود. بنابراین، جریان واقعی در طرف ثانویه CT برابر است با:

$$i_s(t) = \frac{i_p(t)}{CTR} - i_e(t) \quad (3)$$

بنابراین لازم است پارامترهای تحریک سیگنال را که می توان از ولتاژ تحریک در مقابل منحنی فعلی تحریک پذیر بدست آورد (شکل ۲). همواره می توان دو پارامتر را از منحنی تحریک استخراج کرد.

۱. شیب بخش اشباع منحنی تحریک.

۲. RMS ولتاژ اشباع زمانی که جریان تحریک برابر ۱۰ آمپر است.

منحنی خط مستقیم با شیب $1/S$ نشان داده شده در شکل ۲ به صورت زیر تعریف می شود:

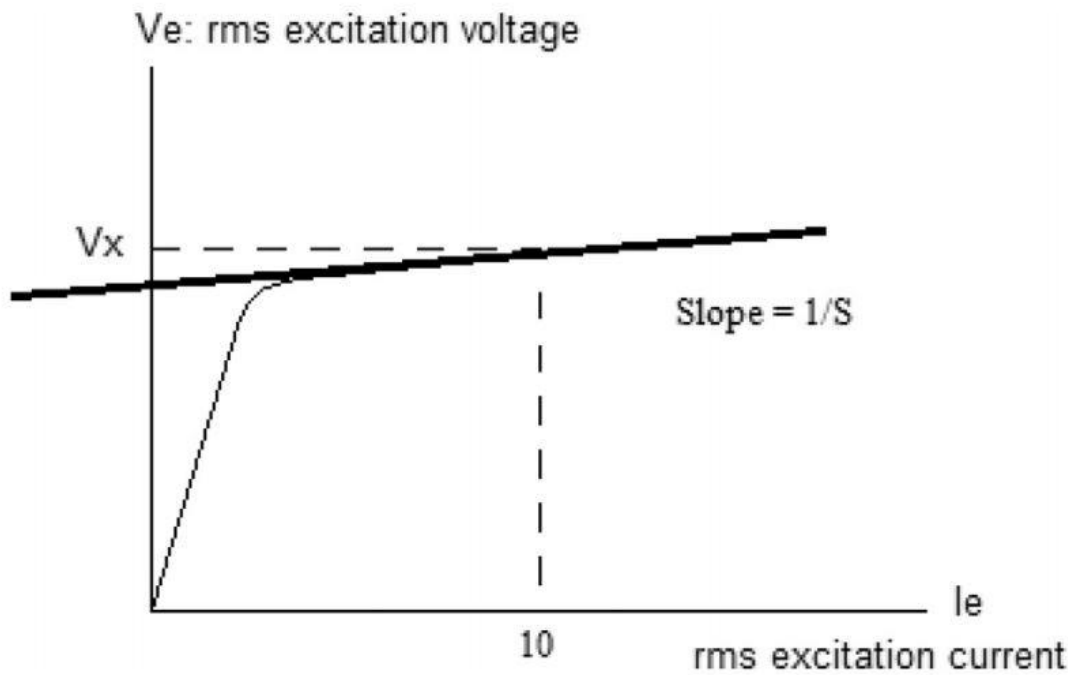
$$\log V_e = \frac{1}{S} \log I_e + \log V_i \quad (4)$$

V_i مقدار RMS V_e برای $i_e = 1$ است. بنابراین $\log I_e = 0$ حذف می شود و معادله زیر بدست می آید:

$$V_e = V_i L_e^{1/S} \quad (5)$$

معادلات دیفرانسیل بدست آمده از شکل ۱ را می توان با یک منحنی شار در مقابل جریان تحریک به صورت زیر تعریف کرد:

$$i_e = A |\lambda|^2 \quad (6)$$



شکل ۲ - منحنی اشباع CT [۲].

A ثابت تعریف شده توسط پارامترهای شناخته شده است. بر اساس قانون فارادی، ولتاژ تحریک لحظه‌ای مربوط به تغییرات شار در معادله ۷ بیان شده است. علاوه بر این منحنی تحریک از یک ولتاژ تحریک سینوسی در معادله ۸ بدست می‌آید که شار سینوسی بر اساس معادله ۹ بیان می‌شود:

$$V_e = \frac{d\lambda}{dt} = \sqrt{2}V_e \cos(\omega t) \quad (7)$$

$$V_e = \sqrt{2}V_e \cos(\omega t) \quad (8)$$

$$\lambda = \int V_e dt \quad (9)$$

با قرار دادن معادله ۸ در معادله ۹ رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\lambda = \int \sqrt{2}V_e \cos(\omega t) dt = \frac{\sqrt{2}V_e}{\omega} \sin(\omega t) \quad (10)$$

جریان تحریک می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$i_e = A|\lambda|^S = A \left[\sqrt{2} \frac{V_e}{\omega} \sin(\omega t) \right]^S = A \left[\sqrt{2} \frac{V_e}{\omega} \right]^S \sin^S(\omega t) \quad (11)$$

مقدار RMS جریان تحریک از رابطه زیر بدست می آید:

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_e^2 dt} = A \left[\sqrt{2} \frac{V_e}{\omega} \right]^S \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^{2S}(\omega t) dt} \quad (12)$$

در این مدل، جریان تحریک به صورت سینوسی نیست، در نتیجه نسبت بین RMS و مقادیر پیک به عنوان RP نامیده می شود و توسط معادله زیر بیان می شود:

$$RP = \frac{I_e}{i_{epeak}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (i_{epeak})^2 \sin^{2S}(\omega t) dt}}{i_{epeak}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^{2S}(\omega t) dt} \quad (13)$$

به این ترتیب مقدار RMS جریان تحریک به صورت زیر بیان می شود:

$$I_e = A \left[\frac{\sqrt{2} V_e}{\omega} \right]^S \cdot RP \quad (14)$$

ثابت A از رابطه زیر بدست می آید:

$$A = \frac{10\omega^2}{(\sqrt{2}V_e)^S} \cdot \frac{1}{RP} \quad (15)$$

ترکیب کردن تمامی معادلات فوق الذکر باعث می شود رفتار CT در شرایط مختلف شبیه سازی شود. مدلسازی کلی این الگوریتم را می توان با جزئیات بیشتر در منبع [۷] پیدا کرد.

۳. تست اشباع CT

CT ها با توجه به نوع کاربرد خود به دونوع زیر تقسیم بندی می شوند.

۱. CT های اندازه گیری.

۲. CT های حفاظتی.

CT های حفاظتی نقطه اشباع بالاتری نسبت به CT های اندازه گیری دارند. برای تست اشباع CT ابتدا لازم است تا حدود نقطه زانویی را با استفاده از معادله زیر بدست آوریم:

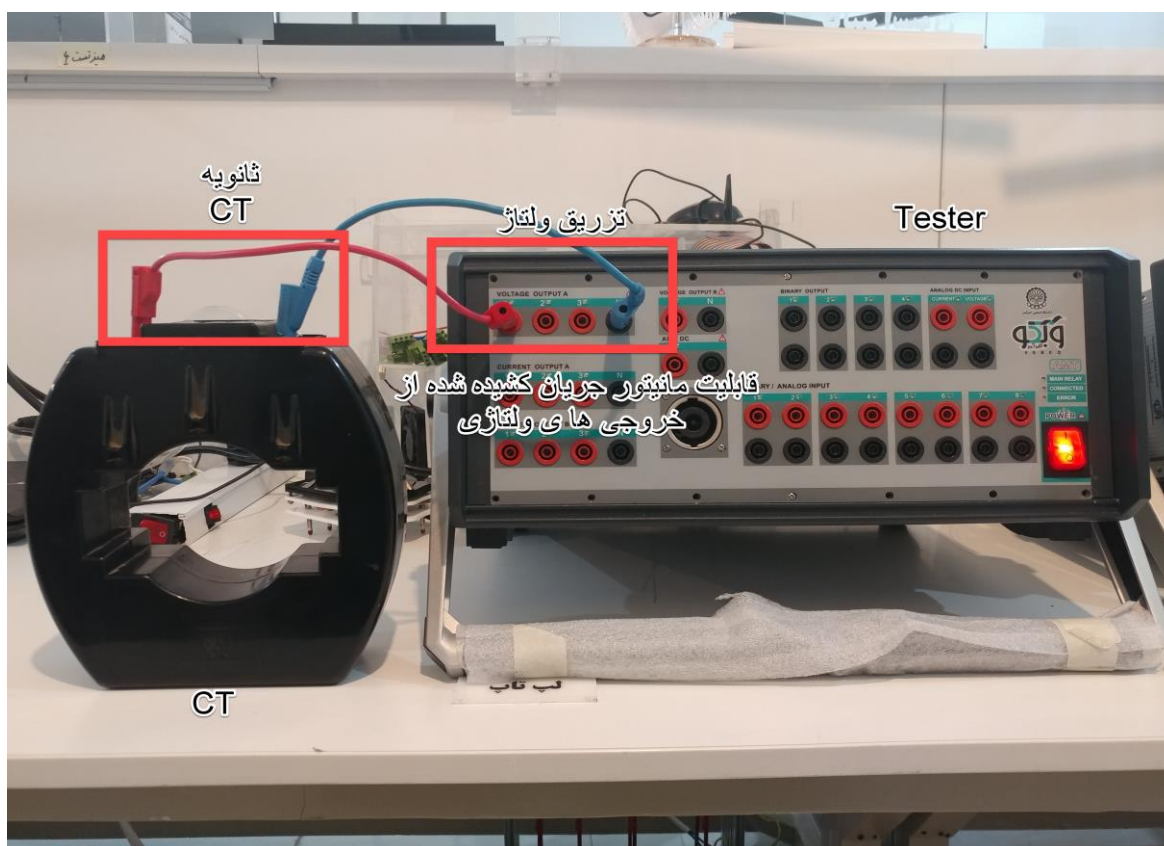
$$\text{Knee Point} = \text{Class} \times \left(\frac{\text{Burden}}{I_n} + \text{Resistance} \times I_n \right) \quad (16)$$

در مرحله بعد از حدود نقطه بدست آمده ده درصد - ده درصد ولتاژ را بالا می‌بریم و جریان را اندازه‌گیری می‌کنیم. زمانی که اختلاف بین دو نقطه جریان ۵۰ درصد شد نقطه دومی را به عنوان نقطه زانویی (Knee Point) در نظر می‌گیریم. شکل ۳ بلوک دیاگرام تست CT دستگاه تست رله وبکو امیرکبیر را نشان می‌دهد.



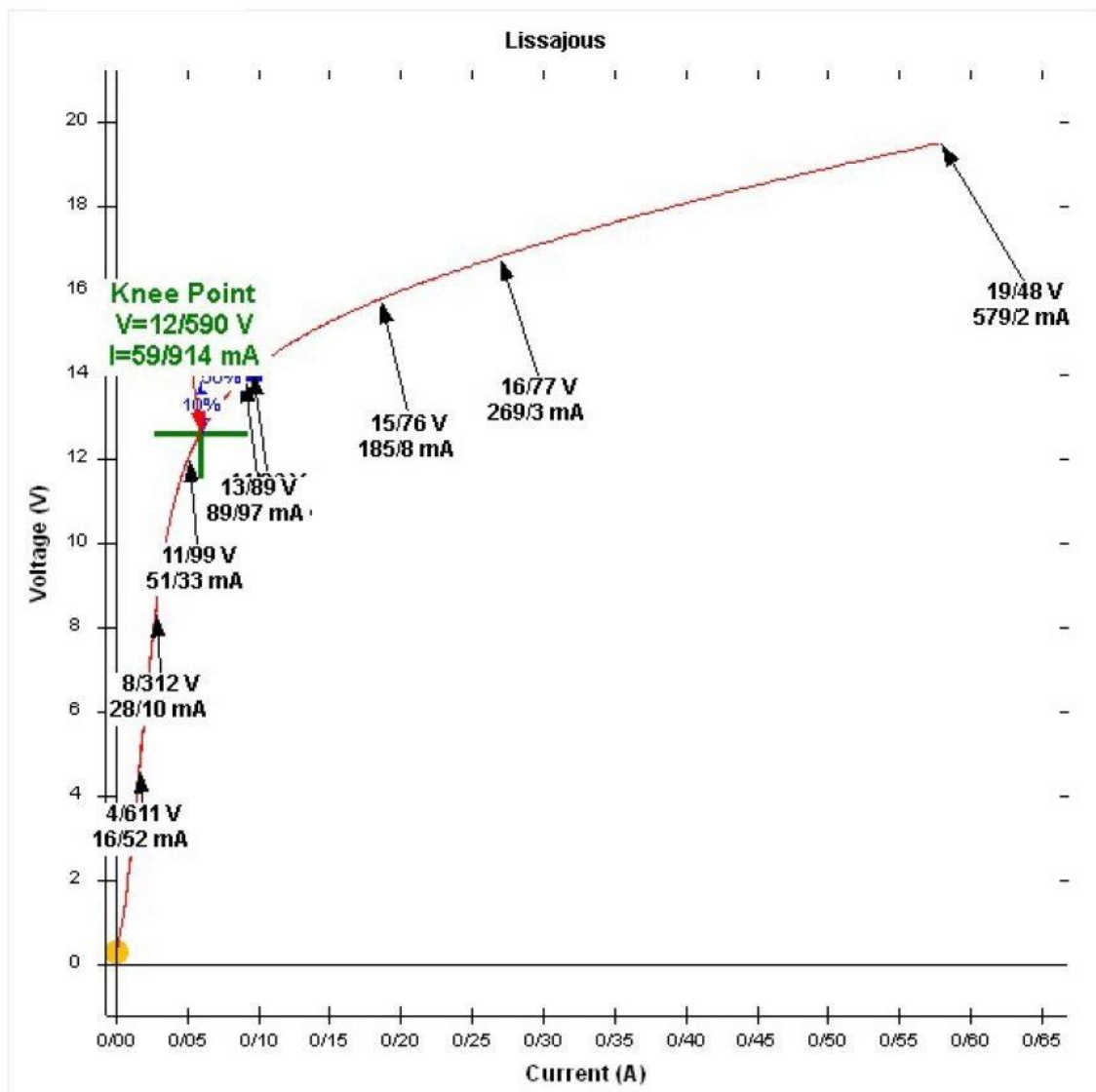
شکل ۳ - بلوک دیاگرام تست CT

برای انجام تست در این مقاله از یک عدد CT حفاظتی استفاده می‌شود. ابتدا ثانویه CT را به محل تزریق ولتاژ متصل می‌کنیم. خروجی های ولتاژ دستگاه تست رله AMT-105 قابلیت مانیتور جریان کشیده شده از خروجی ولتاژی را دارد. شکل ۴ تست اشباع CT را نشان می‌دهد.



شکل ۴ - تست اشباع CT

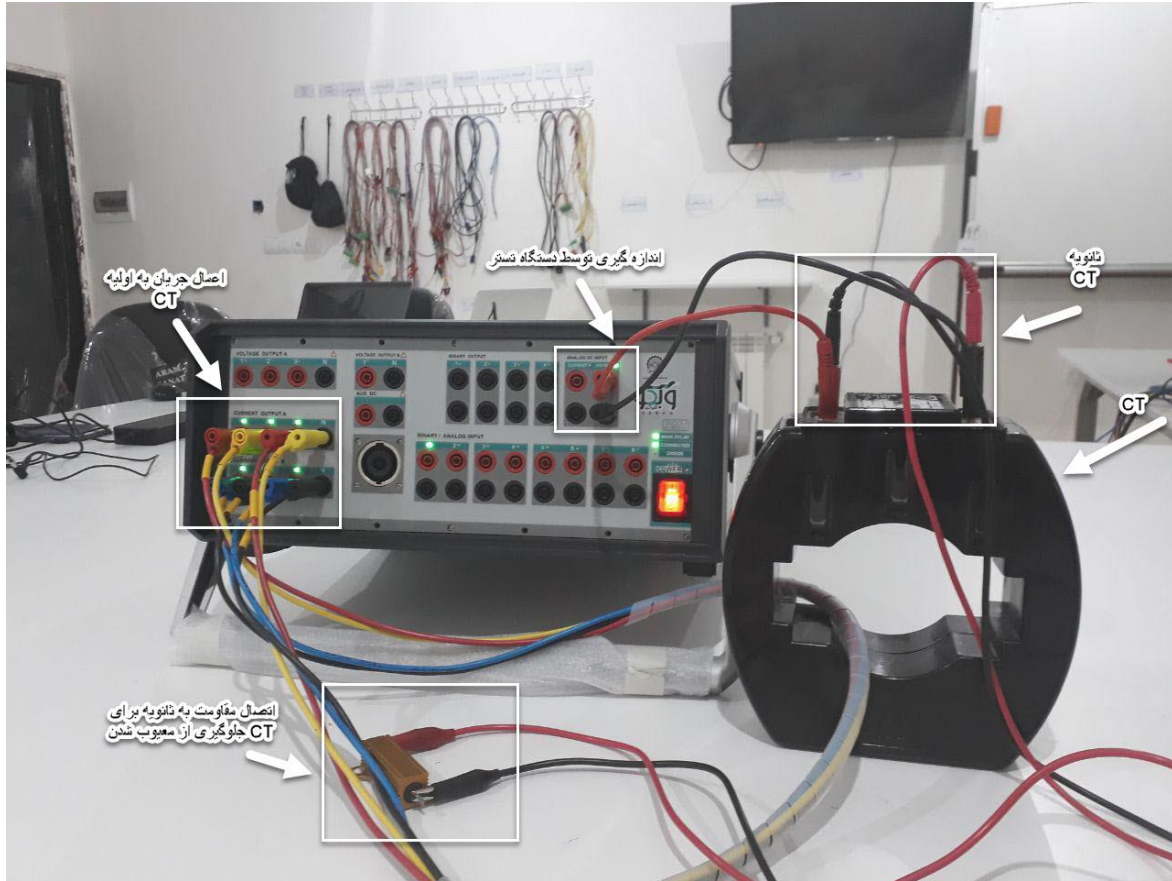
شکل ۵ نتایج تست اشباع CT در دستگاه تست رله AMT-105 را نمایش می دهد.



شکل ۵ - نتایج تست اشباع CT

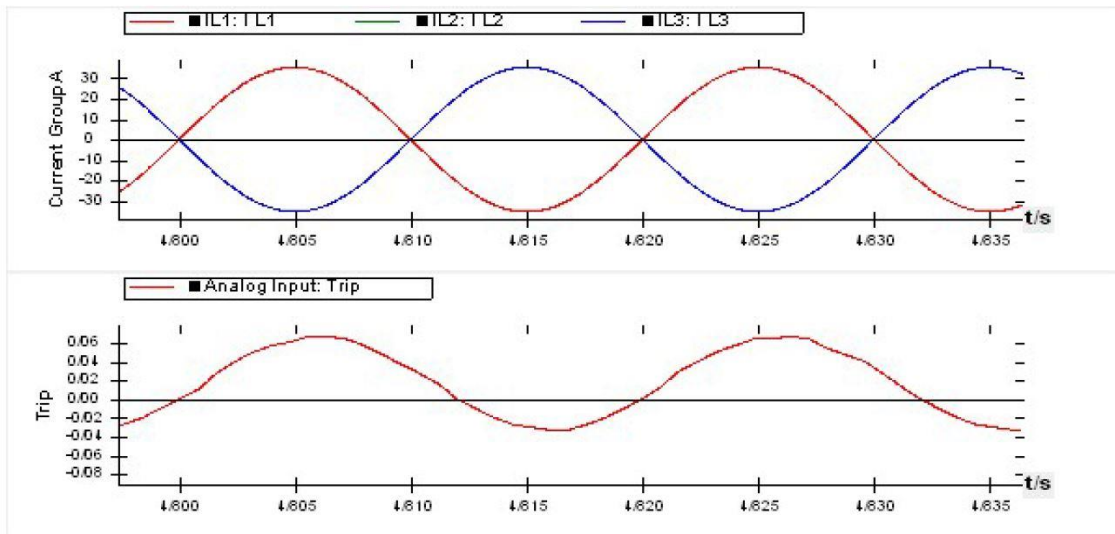
۴. تست نسبت تبدیل CT

تست بعدی مورد نیاز CT تست نسبت تبدیل می باشد. برای انجام این تست مانند شکل ۶ ابتدا سیم های جریانی از سمت اولیه CT عبور می دهیم. در این تست باید دقت شود که حتما ثانویه CT برای جلوگیری از معیوب شدن اتصال کوتاه شود، اما به دلیل آنکه در این تست دستگاه توانایی نمونه برداری از جریان را ندارد ثانویه را به یک مقاومت متصل کرده و افت ولتاژ در مقاومت را اندازه گیری می کنیم. دستگاه خود محاسبات را انجام داده و در نهایت شکل موج جریان بدست آمده را در خروجی نمایش می دهد. در مرحله بعد از جریان ثانویه CT مانند شکل ۶ نمونه برداری می کنیم.



شکل ۶ - تست نسبت تبدیل CT

شکل ۷ نتیجه تست نسبت تبدیل را نمایش می دهد.



شکل ۶ - نتیجه تست نسبت تبدیل

۵. نتیجه گیری

رله‌های حفاظتی نقش بسیار مهمی را در پایداری سیستم‌های قدرت ایفا می‌کند. رله‌ها برای انجام مناسب کار خود نیاز به داشتن اطلاعات درست از شبکه قدرت دارند. به دلیل بالا بودن ولتاژ و جریان در شبکه‌های قدرت انتقال مستقیم این اطلاعات به رله‌ها نه به صرفه است و نه عقلانی به همین دلیل برای انتقال این سیگنال‌ها از ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ استفاده می‌شود.

ترانسفورماتورهای ولتاژ نیز مانند هر تجهیز دیگری بعد از مدت زمان معینی نیاز به تست‌های متفاوتی برای اطمینان از عملکرد درست آن دارد. در این مقاله ابتدا به بررسی یک مدل ریاضی از CT پرداخته شده است. در مرحله بعد یک نمونه CT حفاظتی تست شده و نتایج آن بیان شده است.

۶. مراجع

- [۱] B. Taheri, F. Razavi, and M. M. Ghalesefidi, "Transient Fault Analysis in 63/20 KV Substation," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 10, no. 21, 2017.
- [۲] G. Macieira and A. Coelho, "Evaluation of numerical time overcurrent relay performance for current transformer saturation compensation methods," *Electric Power Systems Research*, vol. 149, pp. 55-64, 2017.
- [۳] E. Segatto and D. V. Coury, "A power transformer protection with recurrent ANN saturation correction," in *Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE*, 2005, pp. 1341-1346: IEEE.
- [۴] A. L. M. Coelho and P. M. Silveira, "CT saturation effects on performance of digital overcurrent relays," in *Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on*, 2011, vol. 1, pp. 637-642: IEEE.

- [۵] I. M. El-Amin and N. H. Al-Abbas, "Saturation of current transformers and its impact on digital overcurrent relays," in *Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC'06. IEEE/PES*, ۲۰۰۶, pp. 1-6: IEEE.
- [۶] J. Cummins, D. Yu, and L. A. Kojovic, "Simplified artificial neural network structure with the current transformer saturation detector provides a good estimate of primary currents," in *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*, 2000, vol. 3, pp. 1373-1378: IEEE.
- [۷] A. L. Coelho, C. E. Carrer, C. A. Guerrero, and P. M. Silveira, "Loss-of-excitation protection and underexcitation controls correlation for synchronous generators in a real time digital simulator," in *Industry Applications Society Annual Meeting, 2014 IEEE*, 2014, pp. 1-10: IEEE.