

یک راه کار جدید برای کاهش جریان هجومی با تثبیت شار پسماند در ترانسفورماتورهای قدرت

سید رضا موسوی اقدم، استادیار

دانشکده مهندسی - دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل - ایران - R.mousaviaghdam@uma.ac.ir

چکیده: در این مقاله، کاهش جریان هجومی در ترانسفورماتورهای قدرت، مورد تحلیل قرار گرفته و راه کار جدید برای کاهش مؤثر این جریان ارائه شده است. شار پسماند در ترانسفورماتورهای قدرت نقش مهم در مقدار جریان هجومی ایفا می کند. بنابراین، ابتدا روش محاسباتی برای تخمین شار پسماند با استفاده از داده های حین قطع ترانسفورماتور بیان شده است. در ادامه، روش دیگر با استفاده از مفهوم اندوکتانس پسماند برای تخمین شار در حالتی که دسترسی به این داده ها وجود نداشته باشد، پیشنهاد شده است. با توجه به برخی محدودیت ها در این روش و نیز در اختیار بودن داده ها و نحوه قطع ترانسفورماتورها در اکثر موارد، یک راه کار جدید برای کاهش جریان هجومی معرفی شده است. در راه کار پیشنهادی، به جای تخمین شار پسماند، مقدار آن تثبیت شده و در موقع وصل مجدد ترانسفورماتور برای کاهش جریان هجومی مورد استفاده قرار می گیرد. هم چنین راه کار ارائه شده در انواع مختلف ترانسفورماتورها و اتصالات آن (ستاره و مثلث) بدون نیاز به نقطه خنثی قابل اعمال است. نتایج شبیه سازی ها کاهش مؤثر جریان هجومی با استفاده از روش پیشنهادی را نشان می دهد.

واژه های کلیدی: ترانسفورماتورهای قدرت، جریان هجومی، شار پسماند، منحنی هیستریزس.

A New Strategy to Reduce Inrush Current Fixing Residual Flux in Power Transformers

Seyed-Reza Mousavi-Aghdam, Assistant professor

Faculty of Electrical and Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: R.mousaviaghdam@uma.ac.ir

Abstract: In this paper, inrush current reduction in power transformers has been analyzed and a new strategy is proposed for effective reduction of this current. Residual flux has an important role in the amplitude of inrush current in power transformers. Therefore, first, analytical method has been introduced for estimating residual flux using the information during deenergizing. In the next step, another method has been introduced using residual inductance concept for estimating residual flux when there is no access to the information during deenergizing. Considering some limitations in this method and also possessing the required information and the way of deenergizing in most cases, a new strategy is proposed to mitigate the inrush current. In the proposed strategy, instead of estimating the residual flux, its value is fixed and used in energizing process to reduce inrush current. Additionally, the proposed strategy can be used in different types of power transformers and connections with no need to the neutral point. Simulation results exhibit effective reduction in inrush current using the proposed strategy.

Keywords: Power transformers, Inrush current, Residual flux, Hysteresis curve.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۹/۲۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۲۳ و ۱۳۹۷/۳/۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۴/۳

نام نویسنده مسئول: سید رضا موسوی اقدم

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اردبیل - خیابان دانشگاه - دانشگاه محقق اردبیلی - دانشکده مهندسی برق و مکانیک.

۱- مقدمه

گذرا در موتورها و حتی همانند جریان خطا در سیستم‌های قدرت در نظر داشته و به تحلیل و کاهش آن پرداخته‌اند [۱۸].

در میان روش‌های کاهش جریان هجومی، سادگی راه کار پیشنهادی و استفاده از کم‌ترین تجهیزات کلید زنی و نیز کاربرد فراگیر روش موردنظر از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. به طور مثال، استفاده از مقاومت دینامیکی هرچند نیاز به داده‌های حین قطع ترانسفورماتور ندارد اما باعث افزایش تجهیزات واسط برای راه‌اندازی ترانسفورماتور شده و پیچیدگی را افزایش می‌دهد. همچنین استفاده از محدودکننده‌های مختلف جریان شامل جبران‌سازها، راکتورها و مبدل‌ها نه تنها پیچیدگی را افزایش می‌دهند بلکه ممکن است در کاهش تمام مؤلفه‌های جریان هجومی موفق نباشند. از طرف دیگر، تغییر سایر مشخصات اثرگذار بر جریان هجومی مانند اندوکتانس اشباع، گرچه پیچیدگی در کاهش جریان را افزایش نمی‌دهد اما نیاز به تغییر طراحی ترانسفورماتور دارد و لذا برای ترانسفورماتورهای موجود در شبکه قدرت کارساز نیست.

برخی دیگر از مراجع به بررسی جریان هجومی در حالت عیب ترانسفورماتور پرداخته‌اند [۱۹]. در صورت وقوع خطا، تشخیص افزایش جریان ناشی از عیب و یا جریان هجومی چالش دیگری در بررسی جریان‌های غیرعادی ترانسفورماتور است [۲۰]. این تحلیل‌ها و دسته‌بندی آن‌ها به تفصیل در مرجع [۲۱] آورده شده است. گفتنی است که تمرکز اصلی در مقاله حاضر بر روی جریان هجومی ترانسفورماتورهای سالم است.

روش‌های ارائه شده برای کاهش جریان هجومی اغلب برای اتصال خاص قابل استفاده هستند درحالی که سیستم قدرت شامل تعداد بسیار زیادی از ترانسفورماتورها با انواع مختلف اتصالات آن است. از طرف دیگر، روش‌هایی که سعی در کاهش پیچیدگی دارند اغلب به تخمین شار پسماند و لذا تنظیم فاز ولتاژ اعمالی در لحظه وصل ترانسفورماتور پرداخته‌اند. تخمین شار پسماند گرچه روش سراسر محسوب می‌شود اما کوچک‌ترین خطا ممکن است جریان زیادی را در راه‌اندازی موجب شود. در این مقاله، ابتدا روش تخمین شار که یک روش محاسباتی محسوب می‌شود بیان شده سپس در ادامه آن، یک روش دیگر بر اساس مفهوم اندوکتانس پسماند بدون در نظر گرفتن داده‌های حین قطع ترانسفورماتور مطرح شده است. با توجه به سهولت دسترسی به داده‌های حین قطع ترانسفورماتور و نیز نحوه قطع آن، و با در نظر داشتن خطای احتمالی در روش تخمین شار و روش مبنی بر مفهوم اندوکتانس پسماند، یک راه کار جدید برای کاهش جریان هجومی ترانسفورماتورها ارائه شده است. در این روش، شار پسماند تخمین زده نشده بلکه مقدار آن در حین قطع ترانسفورماتور تثبیت می‌شود. این روش نه تنها دارای خطای احتمالی کم‌تری در مقایسه با روش تخمین شار هست بلکه در انواع مختلف ترانسفورماتورها و اتصالات آن و بدون نیاز به نقطه خنثی ترانسفورماتور قابل استفاده است.

جریان هجومی ترانسفورماتورهای قدرت به هنگام وصل آن‌ها در سیستم‌های قدرت، به دلیل توسعه این سیستم‌ها، از اهمیت بسیاری برخوردار است. این جریان زیاد که در حالت بی‌باری به طور معمول بین ۳ الی ۸ درصد جریان نامی است، در هنگام وصل ترانسفورماتور ممکن است به ۱۰ الی ۳۰ برابر جریان نامی هم برسد. مقدار جریان هجومی به عوامل مختلف چون زاویه کلید زنی، دامنه و پلاریته ولتاژ، شار پسماند در هسته، اندوکتانس اشباع سیم‌پیچ‌ها، مقاومت سیم‌پیچ‌ها، امپدانس منبع، مشخصات هندسی هسته ترانسفورماتور و مواد آن بستگی دارد [۱]. در میان این عوامل، برخی از آن‌ها قابل بررسی و کنترل پذیر بوده و برخی غیرقابل تغییر بوده و لذا در فرآیند کاهش جریان هجومی مطرح نیستند. گفتنی است جریان هجومی باعث عدم کارکرد صحیح عناصر حفاظتی شده و اثرات نامطلوبی از خود در شبکه به جای می‌گذارد.

برای کاهش اثر جریان هجومی تا حد امکان بر روی شبکه قدرت، بایستی راه کارهای کلید زنی مناسب، که برای اتصالات مختلف ترانسفورماتورها ممکن است متفاوت باشد، استفاده شود. از سوی دیگر، اکثر تحقیقات در این زمینه به ترانسفورماتور با اتصال ستاره زمین شده در حالت بی‌باری پرداخته‌اند. مرجع [۲] به بررسی کاهش جریان هجومی در اتصال ستاره زمین نشده با استفاده از پل دیود می‌پردازد. مرجع [۳] با ارائه یک روش محاسباتی، کاهش جریان هجومی را برای ترانسفورماتور با اتصال زمین نشده و به صورت ستاره بررسی کرده است. باین حال، دقت کم در محاسبات و تقریب خطی در این روش ممکن است به نتایج نامطلوبی بیانجامد. علاوه بر راه کارهای کلید زنی، بررسی مدل ترانسفورماتور و پیش‌بینی جریان هجومی نیز می‌تواند در تشخیص و کاهش این جریان مخرب کارساز باشد [۴-۷]. برای پیش‌بینی دقیق‌تر واکنش ترانسفورماتور در لحظه وصل آن به شبکه، در نظر داشتن مشخصات غیرخطی و هیستریزس ضروری است [۸].

باید توجه داشت که شرایط پس از و حین قطع ترانسفورماتور می‌تواند ترانسفورماتور را برای راه‌اندازی‌های بعدی با جریان هجومی کاهش یافته‌تر آماده کند. مرجع [۹] به بررسی راه کار ایجاد شار مغناطیسی مطلوب می‌پردازد که در راه‌اندازی بعدی باعث کاهش جریان هجومی می‌شود. مرجع دیگری [۱۰] به مدل‌سازی ترانسفورماتور در حالت اشباع پرداخته و سعی در تخمین شار پسماند دارد تا از این طریق، راه‌اندازی مجدد بدون جریان هجومی اتفاق افتد. به هر حال، هرگونه خطای جزئی در تخمین شار پسماند، ممکن است به جریان هجومی مخرب منجر شود. مرجع [۱۱] تعریف خاص از حالت مینیمم جریان هجومی ارائه می‌دهد و بر اساس آن، با راه کار کلید زنی سعی در کاهش جریان هجومی برای ساختارهای مختلف سیم‌پیچی‌ها دارد. برخی منابع دیگر هم بدون ارائه راه کار کاهش جریان هجومی، صرفاً به محاسبه این جریان [۱۲، ۱۳] و روش‌های تشخیص آن [۱۷-۱۴] پرداخته‌اند. برخی منابع هم جریان هجومی را همانند سایر حالات

مشخصات مغناطیسی هسته بوده و در حالت پایدار مقدار شار را تا نقطه زانوی منحنی بالا می برد. بنابراین، می توان در ابتدا فرض کرد که:

$$\lambda = L_{eq} i \quad (2)$$

که در آن L_{eq} اندوکتانس معادل تا نقطه کار هسته ترانسفورماتور است. با این فرض، رابطه (۱) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{d\lambda}{dt} + (R / L_{eq})\lambda = V_m \sin(\omega t + \theta) \quad (3)$$

در حل معادله (۳)، شار پسماند به عنوان پارامتر مهم دیگری مطرح می شود که در حالت دینامیکی بسیار تأثیرگذار است. با حل این معادله دیفرانسیل، مقدار شار به صورت زیر به دست می آید:

$$\lambda(t) = \frac{V_m}{\sqrt{\omega^2 + (R / L_{eq})^2}} \sin(\omega t + \theta - \tan^{-1}(L_{eq}\omega / R)) + G_{inrush} e^{-(R/L_{eq})t} \quad (4)$$

در معادله (۴)، G_{inrush} بهره جریان هجومی بوده و از رابطه زیر محاسبه می شود:

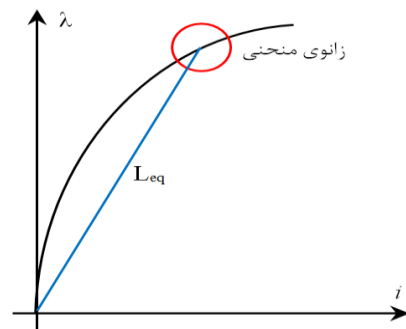
$$G_{inrush} = \lambda_{res} + \frac{V_m}{\sqrt{\omega^2 + (R / L_{eq})^2}} \sin(\tan^{-1}(L_{eq}\omega / R) - \theta) \quad (5)$$

که در آن λ_{res} شار پسماند مغناطیسی در لحظه وصل کلید است. با توجه به روابط ذکر شده و نیز اشباع هسته می توان دریافت که جریان هجومی در لحظه اتصال به دو عامل مهم زاویه ولتاژ اعمالی و مقدار شار پسماند مغناطیسی بستگی دارد. از طرف دیگر، مقدار جریان هجومی وابسته به بهره G_{inrush} بوده و در حالت ایده آل بایستی برابر صفر باشد. شکل (۲) جریان ترانسفورماتور به هنگام وصل کلید برای بهره های مختلف جریان هجومی را نشان می دهد. در این شکل، با افزایش بهره G_{inrush} مقدار جریان هجومی نیز افزایش یافته و در بهره صفر حالت گذرا وجود ندارد.

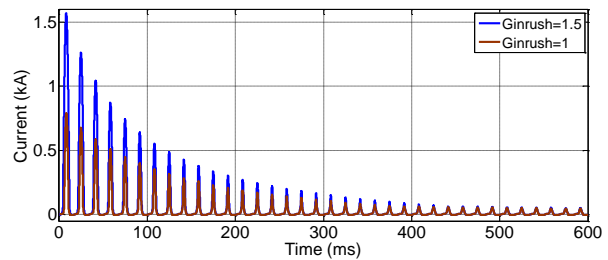
در بین دو عامل مهم بهره جریان هجومی، زاویه ولتاژ اعمالی توسط الگوریتم های مناسب کلید زنی با فاز کنترل شده قابل تثبیت است [۲۲، ۲۳]. بنابراین، برای صفر شدن بهره جریان هجومی عامل دوم یعنی تعیین شار پسماند مغناطیسی حیاتی است. از طرف دیگر، مقدار شار پسماند به نحوه قطع کلید در مرحله قبل وابسته است. به این دلیل است که عملیات قطع انرژی ترانسفورماتورهای قدرت در جریان هجومی آن ها در مرحله بعد قویاً اثرگذار بوده و در بخش بعد بیشتر به آن پرداخته می شود.

۳- روش های تخمین شار پسماند

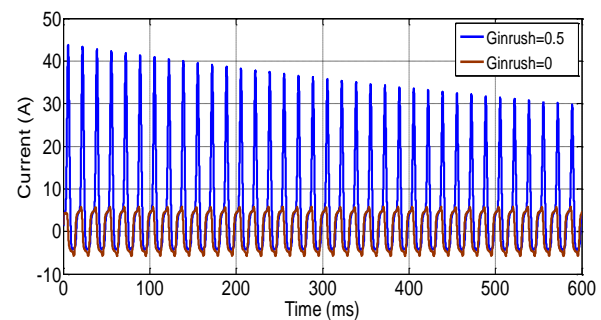
همان طور که در بخش قبل اشاره شد، برای مقابله مؤثر با جریان هجومی اطلاع از مقدار شار پسماند در فرآیند وصل کلید ضروری است. در این میان، روش های مختلف برای تخمین شار تاکنون مورد بررسی قرار گرفته اند که اغلب آن ها از شرایط حین قطع کلید برای تخمین شار پسماند در مرحله بعد استفاده می کنند. این روش ها در قسمت بعدی با عنوان روش های محاسباتی تخمین شار توضیح داده می شوند. از طرف



شکل ۱: اندوکتانس خطی معادل سیم پیچ ترانسفورماتور



(الف)



(ب)

شکل ۲: جریان گذرای ترانسفورماتور با بهره های مختلف جریان هجومی

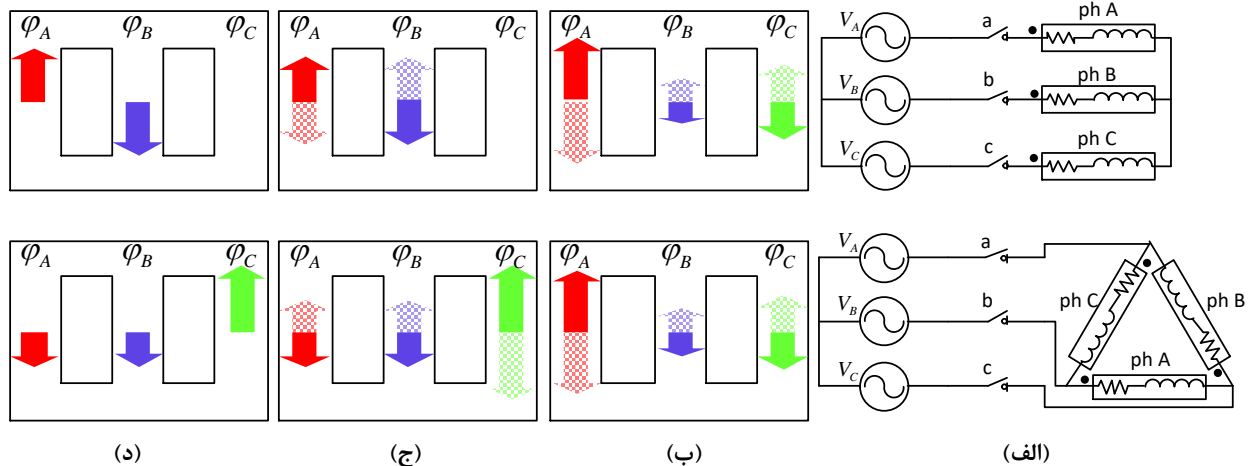
۲- جریان هجومی در ترانسفورماتورها

جریان هجومی در ترانسفورماتورهای قدرت به وابستگی شار مغناطیسی پیوندی سیم پیچ ترانسفورماتور و ولتاژ اعمالی بر آن از یک سو و غیرخطی بودن منحنی مشخصه مغناطیسی از سوی دیگر برمی گردد. مطابق قانون فارادی و قانون ولتاژ برای سیم پیچ ترانسفورماتور می توان نوشت:

$$Ri + \frac{d\lambda}{dt} = V_m \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

که در آن R مقاومت سیم پیچ، λ شار پیوندی سیم پیچ و V_m دامنه ولتاژ سینوسی اعمالی است. θ به زاویه این ولتاژ در زمان وصل کلید اشاره دارد. معادله (۱) به دلیل ارتباط غیرخطی شار و جریان، یک رابطه غیرخطی و تعیین کننده حالت دینامیکی موقع وصل کلید است. به طور معمول، دامنه ولتاژ اعمالی و نیز فرکانس نامی مطابق با

دیگر، در برخی موارد ممکن است اطلاع از شرایط حین قطع کلید در دسترس نباشد. بنابراین، تخمین شار پسماند در این حالت باید توسط معرفی و تشریح شده است.



شکل ۳: (الف) اتصالات مختلف سیم پیچ های اولیه ترانسفورماتور سه ستونه به همراه کلیدهای قطع فازهای منبع و نمایش شارهای فازها در حالت های (ب) اتصال هر سه کلید (مرحله اول)، (ج) قطع کلید c (مرحله دوم) و (د) قطع تمام کلیدها (مرحله سوم)

۳-۱- روش های محاسباتی تخمین شار

برای کاهش جریان هجومی در ترانسفورماتورهای قدرت، استفاده از روش های فیزیکی قدیمی همانند قرار دادن مقاومت دینامیکی یا حتی اصلاح ساختار ترانسفورماتورها راه کار چندان مناسب و به صرفه به نظر نمی رسد. در مقابل، استفاده از روش های محاسباتی دارای توجیه فنی و اقتصادی است. تخمین شار با استفاده از روش محاسباتی به این صورت است که در حین قطع کلید در مرحله قبل، برخی شرایط و اطلاعات لازم ثبت شده و در هنگام وصل مجدد کلید در مرحله بعد، این اطلاعات برای صفر کردن بهره جریان هجومی به کار گرفته می شود. شکل (۳-الف) اتصال ستاره و مثلث در اولیه ترانسفورماتورهای قدرت را نشان می دهد. قابل ذکر است که در بررسی جریان هجومی، ترانسفورماتور بی بار فرض شده و لذا سیم پیچ های ثانویه نشان داده نشده است. هسته ترانسفورماتورها به صورت سه ستونه فرض شده و در مرحله اول تمام کلیدهای قدرت متصل فرض می شوند. شکل (۳-ب) طرح واره تغییرات شار فازهای مختلف ترانسفورماتور در یک لحظه از زمان را در مرحله اول نشان می دهد. نمایش دو جهته شارهای فاز نشان دهنده سینوسی بودن شارهای فازها بر حسب زمان هست. بنابراین، شار فازهای مختلف در مرحله اول برای هر دو اتصال ستاره و مثلث را می توان به صورت زیر فرض کرد:

$$\begin{aligned} \varphi_A &= \varphi_{\max} \sin(\omega t) \\ \varphi_B &= \varphi_{\max} \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \varphi_C &= \varphi_{\max} \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (6)$$

در مرحله دوم، هنگام صفر شدن جریان کلید c، این کلید قطع می شود. شکل (۳-ج) طرح واره تغییرات شار فازهای مختلف را بعد از قطع این کلید نشان می دهد. در اتصال ستاره، شارهای فازهای مختلف به صورت زیر است:

$$\varphi_A = \pm \varphi_m \sin(\omega t - 2\pi/3)$$

$$\varphi_B = -\varphi_A \quad (7)$$

$$\varphi_C = 0$$

و در اتصال مثلث این شارها به صورت زیر است:

$$\varphi_A = \pm \varphi_m \sin(\omega t - \pi/6)$$

$$\varphi_B = \varphi_A \quad (8)$$

$$\varphi_C = -(1/2)\varphi_A$$

در روابط (۶) و (۷)، شارهای فازها در حالت پایدار نوشته شده است. به عبارت دیگر، می توان فرض نمود که حالات گذرا بعد از قطع کلید c سپری شده است. علامت منفی و یا مثبت شار هم به علامت مشتق جریان (صعودی یا نزولی بودن آن) در لحظه صفر شدن آن بستگی دارد. همچنین از مقاومت سیم پیچ ها در برابر اندوکتانس فازها صرف نظر شده است.

در مرحله سوم، برای هر دو اتصال ستاره و مثلث، هنگامی که جریان کلیدهای a و b توأمان به صفر رسیدند، این کلیدها نیز قطع می شوند. بعد از قطع این دو کلید در اتصال ستاره می توان نوشت:

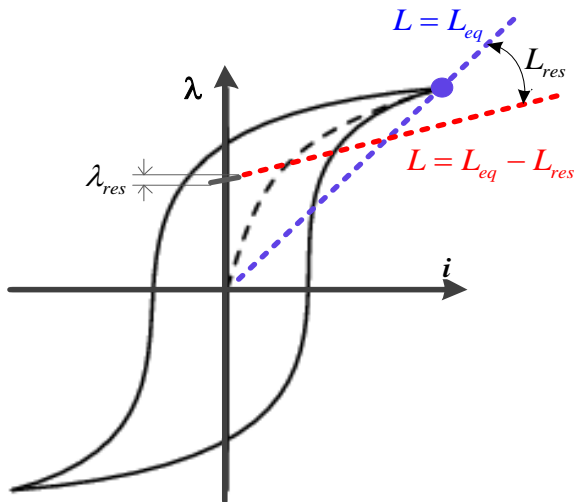
$$\begin{aligned} \varphi_A &= \varphi_{res} \\ \varphi_B &= -\varphi_{res} \\ \varphi_C &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

و برای اتصال مثلث می توان نوشت:

$$\begin{aligned} \varphi_A &= \varphi_{res} \\ \varphi_B &= -\varphi_{res} \\ \varphi_C &= 2\varphi_{res} \end{aligned} \quad (10)$$

در اتصال مثلث، در هنگام صفر شدن جریان کلیدها، جریان فازها از نقطه صفر خود می گذرند و لذا جریان آن ها بلافاصله بعد از قطع کلیدهای a و b صفر می شود. باید توجه داشت که در این مرحله هنگام

است اما جریان و ولتاژ اعمالی برای تخمین شار در حدی است که مقدار شار پسماند تغییر نکند. بنابراین، جریان و ولتاژ اعمالی در برابر شار پسماند به صورت سیگنال کوچک در نظر گرفته می شود. تغییرات شار با جریان در این بررسی سیگنال کوچک، به اندوکتانس کلی معادل گفته شده در قسمت دوم و مؤلفه دیگری از اندوکتانس به اسم اندوکتانس پسماند نسبت داده می شود. شکل (۴) این مفاهیم را در یک پسماند مشخص نشان می دهد.



شکل ۴: نمایش مفهوم اندوکتانس پسماند در یک نقطه معین از شار پسماند

اگر تغییرات حول شار پسماند بسیار کم فرض شود (سیگنال کوچک) در آن صورت برای شار می توان نوشت:

$$\lambda = (L_{eq} - L_{res})i + \lambda_{res} \quad (11)$$

در این روش، بایستی ابتدا مقدار اندوکتانس پسماند تخمین زده شود و سپس با مراجعه به اطلاعات حلقه های هیستریزس هسته ترانسفورماتور مفروض مقدار شار پسماند متناسب استخراج شود و در نهایت توسط معادله (۵) شرایط مطلوب برای صفر کردن بهره جریان هجومی اتخاذ شود. از اندوکتانس نشتی هم در این آزمایش صرف نظر می شود. جهت به دست آوردن اندوکتانس پسماند، جریان توسط ولتاژ آزمایش سینوسی با دامنه A_v و فرکانس ω به سیم پیچ اعمال می شود. در این حالت، مقدار شار از رابطه زیر به دست می آید:

$$\lambda(t) = \lambda_{res} + A_\lambda \sin(\omega t + \theta) + A_G e^{-(R/L_{eq} - L_{res})t} \quad (12)$$

که در آن

$$\begin{aligned} A_\lambda &= \frac{A_v}{\sqrt{\omega^2 + (R/L_{eq} - L_{res})^2}} \\ A_G &= \frac{A_v \omega}{\omega^2 + (R/L_{eq} - L_{res})^2} \\ \theta &= \tan^{-1}(\omega(L_{eq} - L_{res})/R) \end{aligned} \quad (13)$$

در روابط (۱۲) و (۱۳) شار بایستی تغییرات بسیار کوچک حول شار پسماند داشته باشد. بنابراین، مقدار دامنه ولتاژ آزمایش V_s و

قطع کلیدها، زاویه ولتاژ فازها ثابت می شود. با فرض اندوکتانس معادل همانند قسمت دوم و لذا تبدیل شار به جریان فاز، و نیز اعمال قانون ولتاژ در حلقه ها می توان مقدار شار را برحسب زاویه ولتاژ نوشت. به عنوان مثال، در حالت اتصال ستاره، اگر در هنگام وصل مجدد کلیدها زاویه ولتاژ اعمالی برابر با همان زاویه ولتاژ ثبت شده در مرحله آخر باشد، در آن صورت شار دیماند برابر شار فاز به هنگام قطع کلید شده و در نتیجه، جریان هجومی ممکن است کاهش یابد.

در روش محاسباتی، از زاویه ولتاژ فازها به هنگام قطع کلیدها برای محاسبه زاویه ولتاژ اعمالی به هنگام انرژی دار کردن ترانسفورماتور بهره می بریم. اما این روش دارای ایرادات متعددی است. اول این که شار فازها دارای رابطه خطی با جریان فرض شده و مقدار آن هنگام قطع کلیدها به عنوان شار پسماند در نظر گرفته می شود. این بدان معنی است که حلقه هیستریزس ترانسفورماتور لحاظ نشده است. دوم آن که از مقدار مقاومت های سیم پیچها صرف نظر شده است. سوم آن که ممکن است بعد از قطع کلیدها و قبل از انرژی دار کردن مجدد ترانسفورماتور مقدار شار پسماند دچار تغییراتی شود. به طور خلاصه، محاسبه زاویه ولتاژ اعمالی از طریق داده های ثبت شده به هنگام قطع کلید، با فرضیات متعددی همراه است و تخمین دقیق شار توسط این روش محاسباتی محل تأمل جدی است.

۳-۲- روش پیشنهادی تخمین شار با تزریق جریان

در قسمت قبل، با ثبت شرایط حین قطع کلید و با توجه به محاسبات شار و برخی فرضیات در محاسبات، زاویه ولتاژ اعمالی مطلوب برای کاهش جریان هجومی در مرحله بعدی به دست آمد. با این وجود، در برخی موارد ممکن است که داده های زمان قطع کلید برای استفاده در مرحله بعد در دسترس نباشد و یا این که در شار پسماند به هر دلیلی تغییراتی روی دهد. در این مواقع، روش محاسباتی کارساز نخواهد بود. در این قسمت، راه کار تزریق جریان در فاز ترانسفورماتور و تخمین شار پسماند بدون دسترسی داشتن به داده های حین قطع کلید توضیح داده می شود.

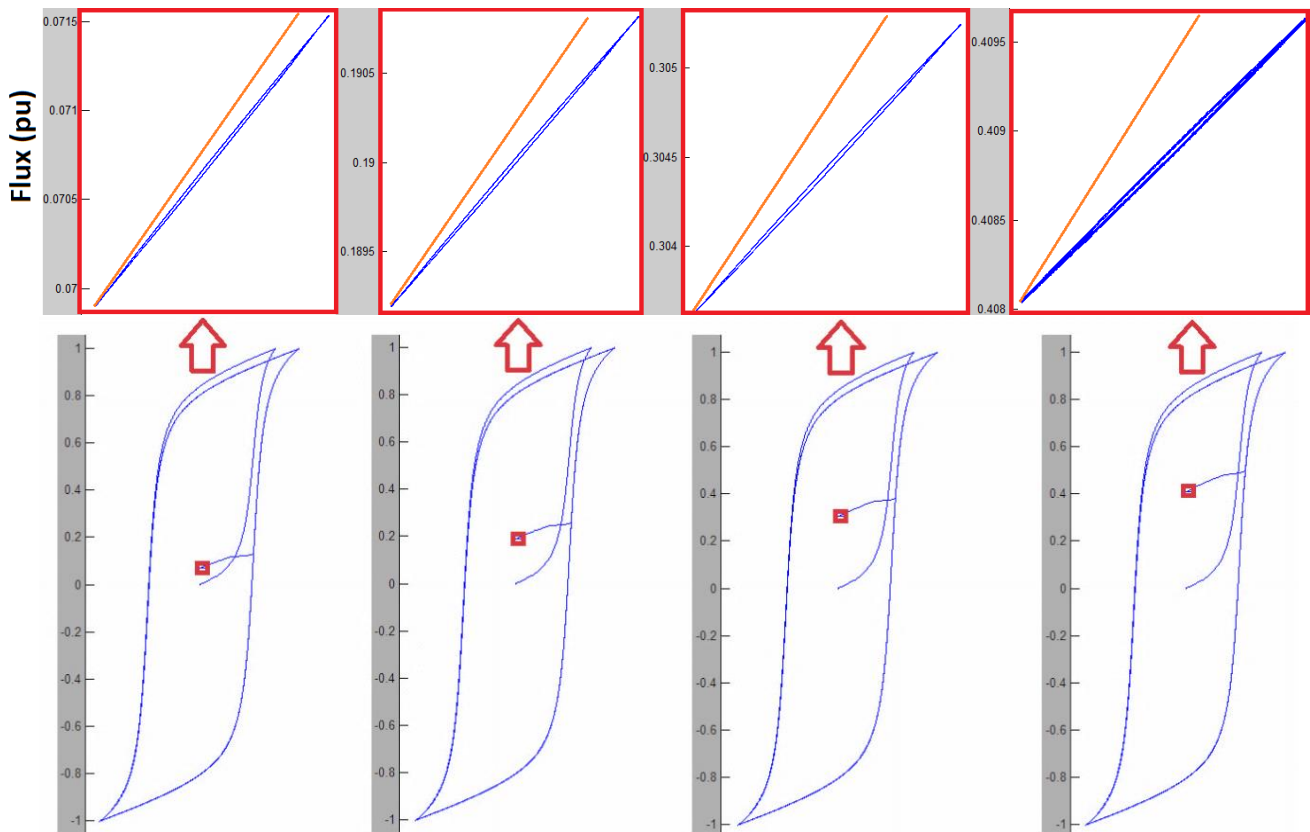
در طراحی ترانسفورماتورهای قدرت معمولاً از موادی در هسته استفاده می کنند که به راحتی مغناطیسی شده و لذا جریان مغناطیس کننده آن کم باشد. بنابراین، ترانسفورماتورهای قدرت عموماً دارای شار باقی مانده قابل توجهی هستند و در نتیجه مقدار شار پسماند می تواند از صفر تا مقدار شار باقی مانده تغییر کند. با این توضیح، حلقه هیستریزس هسته ترانسفورماتورهای قدرت، کم عرض بوده ولی شار پسماند مقادیر بزرگتری را می تواند داشته باشد. تاکنون مطالعات مختلف برای بررسی حلقه های داخلی هیستریزس و مدل سازی استاتیکی (SHM) و دینامیکی (DHM) آن انجام شده است [۲۶-۲۴]. این مدل سازی ها قابلیت انطباق با انواع مختلف هسته ها بر اساس داده های کاتالوگ آن ها را دارند. در این قسمت، صرفاً رفتار مغناطیسی هسته ترانسفورماتور در نزدیکی شار پسماند مهم است. بنابراین، در ادامه فرض می شود که هسته ترانسفورماتور دارای شار پسماند نامعلوم

در هنگام وصل کلیدهای فاز مربوطه بدون جریان هجومی معین می‌شود. شکل (۵) حلقه‌های هیستریزس محلی ناشی از تزریق جریان را در چند شار پسماند مختلف نمایش می‌دهد. برای نمایش بهتر، این حلقه‌ها بزرگ‌نمایی شده و برای مقایسه بهتر، خط مرجع نارنجی‌رنگ (اندوکتانس معادل) نیز برای نشان دادن زاویه انحراف (اندوکتانس پسماند) استفاده شده است. (به شکل (۴) رجوع شود). در این روش، با توجه به مشخصات هیستریزس هسته و با محاسبه اندوکتانس پسماند از معادله (۱۴) مقدار شار پسماند قابل تخمین است. یکی از معایب مهم این روش تغییرات نامتناسب مقدار اندوکتانس پسماند در نقطه قبل از شار باقی‌مانده است. بنابراین، کاربرد این روش تنها برای مواردی محدود می‌شود که راه کار کلید زنی مورد استفاده، منجر به افزایش بیش از شار باقی‌مانده نگردد. از دیگر معایب این روش، حساسیت و دقت بالای مورد نیاز برای پیاده‌سازی سخت‌افزاری است.

فرکانس آن ω باید به طور مطلوب انتخاب شود. هم‌چنین مقاومت اضافی در مسیر اعمال ولتاژ قرار می‌گیرد تا مقاومت کل R تا حد مناسبی افزایش یافته و ثابت زمانی حالت گذرا را کاهش دهد. اگر دامنه جریان عبوری بعد از سپری شدن حالت گذرا برابر A_i باشد، آنگاه مقدار اندوکتانس پسماند را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$L_{res} = L_{eq} - \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{A_v}{A_i}\right)^2 - R^2} \quad (14)$$

باید توجه داشت که در این روش، اندوکتانس پسماند برای یک فاز به دست می‌آید. بنابراین، اگر به نقطه نول دسترسی نباشد ولتاژ آزمایش به صورت ولتاژ خط به دو فاز اعمال می‌شود و اندوکتانس به دست آمده در این حالت، اندوکتانس پسماند برآیند دو فاز خواهد بود. این اندوکتانس پسماند برآیند، مقدار شار پسماند برآیند دو فاز را مشخص کرده و لذا در این حالت، مقدار مناسب فاز ولتاژ خط اعمالی به فازها



شکل ۵: نمایش حالت‌های مختلف زاویه انحراف (اندوکتانس پسماند) در شارهای پسماند متفاوت

کنترل کلیدها با توجه به ولتاژ اعمالی و نیز جریان فازها، مقدار شار پسماند در مرحله بی‌انرژی کردن ترانسفورماتور تثبیت می‌شود. تثبیت شار پسماند در این روش در نقطه شار باقی‌مانده اتفاق می‌افتد. با توجه به این که روش پیشنهادی تثبیت شار، در اتصالات مختلف، متفاوت است لذا در ادامه، این روش در حالت اتصال ستاره و اتصال مثلث به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴- روش پیشنهادی تثبیت شار پسماند به جای تخمین آن

تخمین شار پسماند در کاهش جریان هجومی به روش تحلیلی مؤثر است [۳] اما دقت ناکافی در محاسبات و تغییرات پارامترها از قابلیت اطمینان این روش می‌کاهد. در روش پیشنهادی، با توجه به این که تغییرات شار هسته ارتباط تنگاتنگی با تغییرات مقدار ولتاژ دارد، لذا با

۴-۱- تثبیت شار در اتصال ستاره

در اتصال ستاره، برای تثبیت شار پسماند در مرحله بی‌انرژی کردن ترانسفورماتور، سه مرحله متفاوت طی می‌شود. در مرحله اول، بدون توجه به نوع اتصال ثانویه، ترانسفورماتور در سمت ثانویه خود بی‌بار می‌شود تا جریان در اولیه، فقط به مقدار جریان مغناطیس کننده محدود شود. در مرحله دوم، یکی از فازهای ترانسفورماتور موقعی که جریان آن برابر صفر شد، قطع می‌شود (شکل ۳- اتصال ستاره- فاز c). در این صورت، شار فاز متناظر صفر شده و دو فاز دیگر دارای شار مخالف و برابر خواهند بود. مقدار ولتاژ اعمالی به دو فاز دیگر به صورت زیر تغییر می‌کند.

$$V_{ph-new} = 1 / 2 V_L \cong 0.86 V_{ph-rated} \quad (15)$$

معادله (۱۵) نشان می‌دهد که مقدار ولتاژ جدید دو فاز دیگر به اندازه ۱۴ درصد کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، ولتاژ نامی فاز ترانسفورماتور هماهنگ با نقطه زانوی منحنی انتخاب می‌شود و در نتیجه کاهش ۱۴ درصدی ولتاژ، شار باقی‌مانده متفاوتی را به دست نخواهد داد. در مرحله سوم، هر دو کلید فازهای دیگر (فاز a و b) هم‌زمان باهم قطع می‌شوند. در این مرحله، برخلاف مرحله دوم، قطع کلیدها موقع صفر شدن ولتاژ جدید (یا ولتاژ خط) انجام می‌شود. با انجام مراحل بالا، مقدار شار پسماند یک‌فاز برابر صفر، و مقدار شار پسماند دو فاز دیگر نزدیک مقدار شار باقی‌مانده تثبیت می‌شود.

در اتصال ستاره، برای انرژی‌دار کردن مجدد ترانسفورماتور بدون جریان هجومی، دو مرحله دنبال می‌شود. در مرحله اول، کلیدهای فاز a و b بسته می‌شوند. با توجه به مراحل بی‌انرژی‌دار کردن ترانسفورماتور و معادلات (۵) و (۱۵)، زاویه ولتاژ مطلوب به هنگام وصل این کلیدها برای حذف جریان هجومی به صورت زیر است:

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{B_r \sqrt{\omega^2 + (R / L_{eq})^2}}{B_{max} 5.4 f} \right) + \tan^{-1} (L_{eq} \omega / R) \quad (16)$$

که در آن، B_r چگالی شار باقی‌مانده و B_{max} چگالی شار ماکزیمم نامی هسته ترانسفورماتور است. در مرحله دوم، کلید سوم بهتر است موقع صفر شدن جریان دو فاز قبلی وصل شود (فاز a و b).

۴-۲- تثبیت شار در اتصال مثلث

برای تثبیت شار پسماند در اتصال مثلث، همانند اتصال ستاره، بی‌انرژی کردن ترانسفورماتور در چند مرحله انجام می‌گیرد. در مرحله اول، ترانسفورماتور در سمت ثانویه بی‌بار می‌شود تا جریان در سمت اولیه در حد جریان مغناطیس کننده کاهش یابد. سپس یکی از کلیدهای قرارگرفته بر خطوط سه فاز اولیه، هنگامی که جریان آن صفر شد، قطع می‌شود (شکل ۳- اتصال مثلث- فاز c). برخلاف اتصال ستاره، در این مرحله جریان هیچ‌کدام از فازها صفر نمی‌شود و ولتاژ روی دو فاز از ترانسفورماتور به مقدار نصف ولتاژ نامی کاهش یافته و ولتاژ فاز دیگر بدون تغییر در مقدار نامی خود می‌ماند (ولتاژ فاز c). در این مرحله، به

دلیل کاهش ۵۰ درصدی ولتاژ در دو فاز، تثبیت شار برای فاز دیگر انجام می‌گیرد. بنابراین، در مرحله سوم دو کلید دیگر روی خطوط سه فاز ورودی زمانی که مقدار ولتاژ فاز c به صفر رسید، قطع می‌شوند. با انجام گام‌های گفته‌شده در مرحله بی‌انرژی کردن ترانسفورماتور، مقدار شار پسماند در یک‌فاز (فاز c) دقیقاً برابر شار باقی‌مانده شده و در دو فاز دیگر، برابر نصف این مقدار خواهد بود.

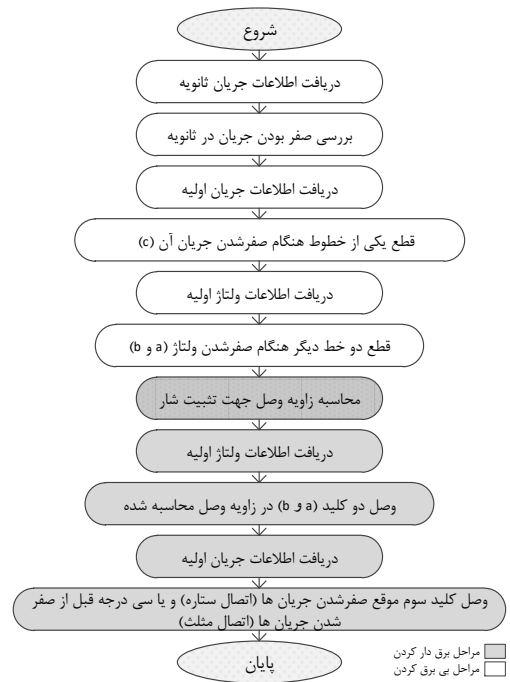
در اتصال مثلث، انرژی‌دار کردن مجدد ترانسفورماتور بدون جریان هجومی، با توجه به تثبیت شار پسماند در مرحله قبل، در دو گام انجام می‌شود. در گام اول، دو کلید هم‌زمان باهم ولتاژ را روی فازی که دارای شار باقی‌مانده تثبیت شده است (فاز c)، اعمال می‌کند. وصل هم‌زمان این دو کلید در زاویه‌ای از ولتاژ خط اعمالی انجام می‌گیرد که در قسمت (۴-۱) با معادله (۱۶) مشخص شده است. با یک تقریب مناسب، می‌توان از عبارت دوم در معادله (۱۶) نیز صرف‌نظر نمود. در گام دوم، کلید بعدی بهتر است ۳۰ درجه قبل از زمانی که جریان خطوط دیگر برابر صفر شد، متصل گردد. در روش پیشنهادی تثبیت شار، هم در اتصال ستاره و هم در اتصال مثلث، جهت شار پسماند به این بستگی خواهد داشت که در مرحله سوم بی‌انرژی کردن ترانسفورماتور، کلیدها در کدامین گذر از صفر ولتاژ قطع می‌شوند. به عبارت دقیق‌تر، جهت شار پسماند به علامت مشتق ولتاژ در نقطه گذر از صفر خود بستگی دارد. همچنین گفتنی است در اتصال ستاره، به دلیل کاهش ۱۴ درصدی ولتاژ در مرحله دوم، مقدار شار پسماند با یک تقریب مناسب برابر شار باقی‌مانده فرض می‌شود اما در اتصال مثلث، این مقدار دقیقاً برابر شار باقی‌مانده است.

در روش پیشنهادی تثبیت شار، مرحله اول بی‌انرژی کردن ترانسفورماتور، در هر دو اتصال ستاره و مثلث از اهمیت زیادی برخوردار است چراکه در این صورت، جریان در اولیه به مقدار خیلی کم یعنی جریان مغناطیس کننده محدود می‌شود و چون در این روش، در مرحله دوم بی‌انرژی کردن ترانسفورماتور، کلید در جریان غیر صفر قطع می‌شود لذا از ایجاد ولتاژهای بزرگ و آسیب‌زننده جلوگیری می‌شود. فلوجارت روش پیشنهادی تثبیت شار در شکل (۶) آورده شده است.

در روش پیشنهادی تثبیت شار، برای تمامی اتصالات ابتدا ترانسفورماتور بی‌بار شده و سپس فرآیند بی‌برق کردن آن با تثبیت شار آغاز می‌شود. بنابراین، در مواردی که خطایی در سیستم قدرت تغذیه شده توسط ترانسفورماتور مورد بحث صورت گیرد، ترانسفورماتور می‌تواند بدون هیچ مشکلی توسط عناصر حفاظتی بی‌بار شده و سپس فرآیند تثبیت شار انجام گیرد.

بررسی شد، روش تثبیت شار هم در اتصال ستاره و هم در اتصال مثلث برای مقابله با جریان هجومی به طور جداگانه تحلیل و در این قسمت، شبیه سازی می شود. اتصال سمت ثانویه ترانسفورماتور به دلیل بی بار بودن ترانسفورماتور هم در مرحله انرژی دار کردن و هم در مرحله بی انرژی کردن، اهمیت ندارد.

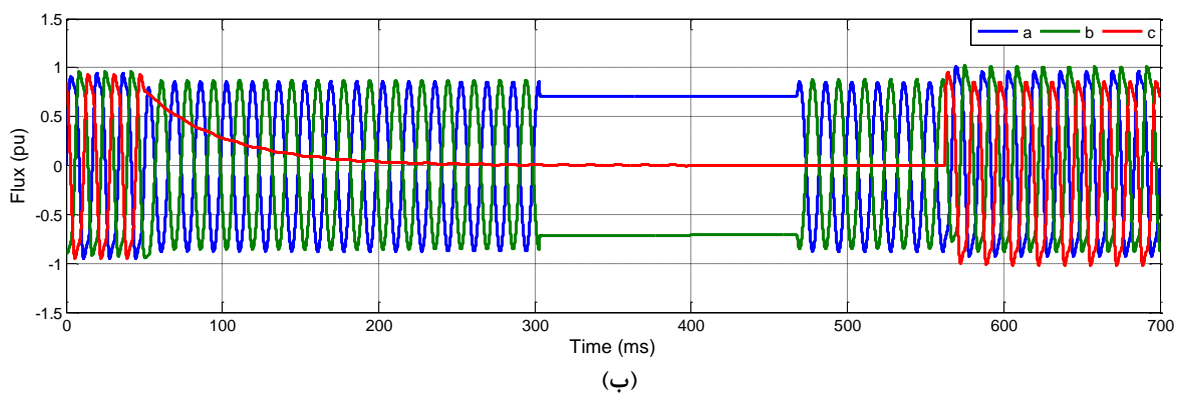
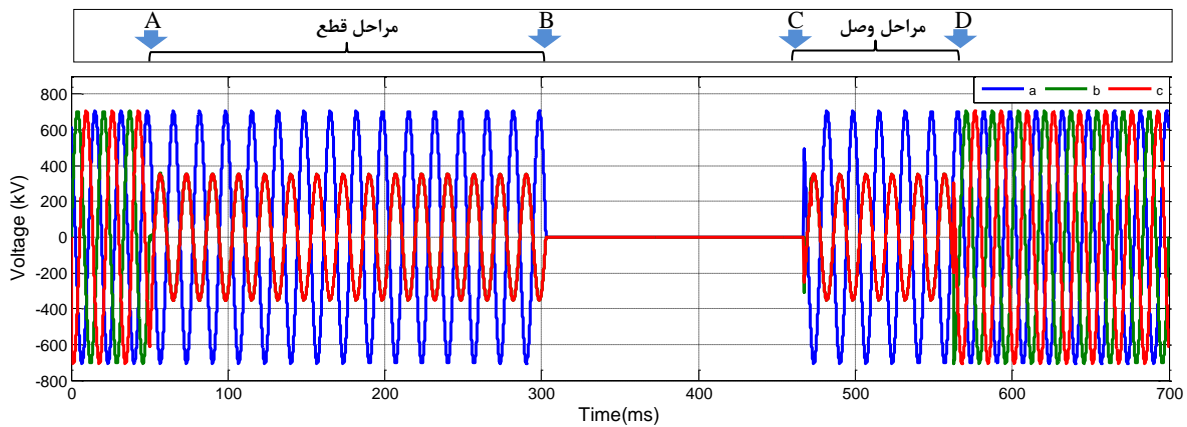
شکل (۷) نتایج شبیه سازی با اعمال روش تثبیت شار را در اتصال ستاره نشان می دهد. نقطه A در شکل (۷) مربوط به زمانی هست که جریان فاز c صفر شده و کلید خط سوم قطع شده است (به شکل (۳) رجوع شود). در این نقطه، ولتاژ خط a-b ثابت مانده و ولتاژ خطوط بعدی به مقدار $(1/\sqrt{3})$ کاهش یافته است. هم چنین مقدار شار فاز c به سمت صفر تقلیل می یابد و شار دو فاز دیگر، معکوس هم است. مقدار کاهش شار در این مرحله به دلیل افت ۱۴ درصدی ولتاژ فاز اعمالی است. در نقطه B، بعد از گذشتن چند دوره تناوب، زمانی که ولتاژ خط a-b به صفر رسید، دو کلید دیگر نیز قطع می شوند. مقدار شار پسماند دو فاز در این حالت در اندازه شار باقی مانده تثبیت می شود. با توجه به مقدار شار باقی مانده و سایر پارامترها و نیز زاویه مطلوب ولتاژ اعمالی (معادله (۱۶))، در نقطه c دو کلید خط a و b وصل می شوند. همان گونه که در شکل (۷-ج) نمایش داده شده است، جریان هجومی وجود ندارد. بعد از گذشتن چند دوره تناوب، کلید سوم در لحظه صفر شدن جریان خطوط متصل می شود.

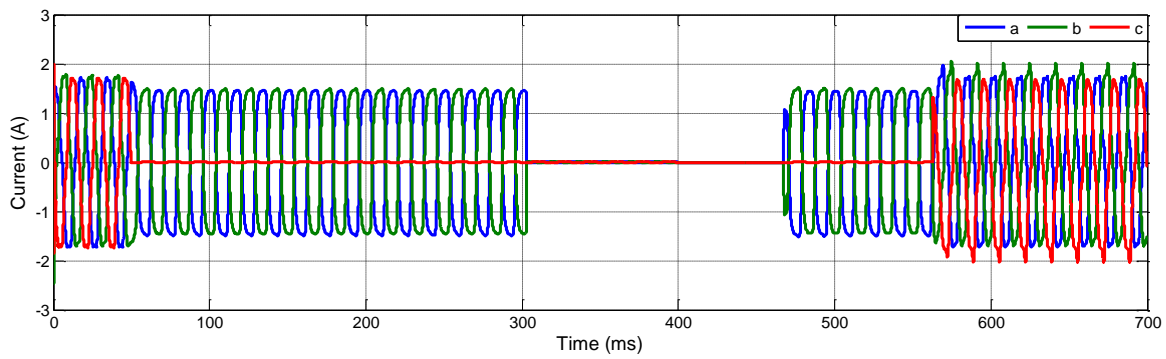


شکل ۶: فلوچارت اعمال روش پیشنهادی تثبیت شار و مراحل آن

۵- نتایج و بحث

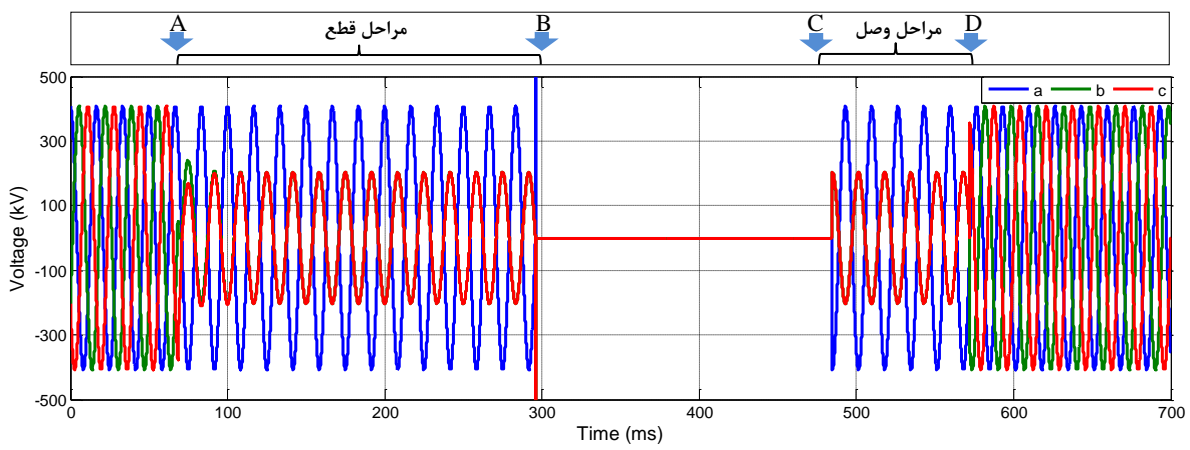
در این قسمت، یک ترانسفورماتور قدرت ۱۵۰ مگاوات-آمپر و با ولتاژ ۵۰۰ کیلوولت برای بررسی نتایج روش پیشنهادی انتخاب و توسط نرم افزار MATLAB شبیه سازی می شود. همان طور که در قسمت قبل



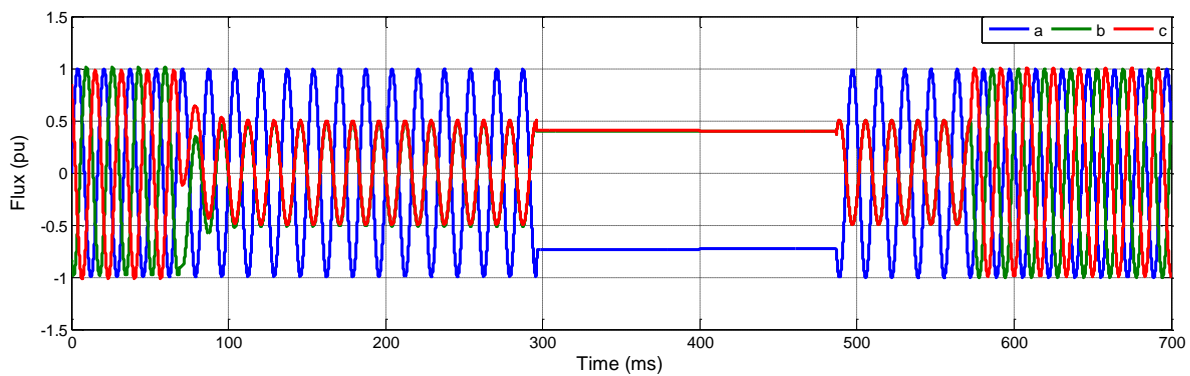


(ج)

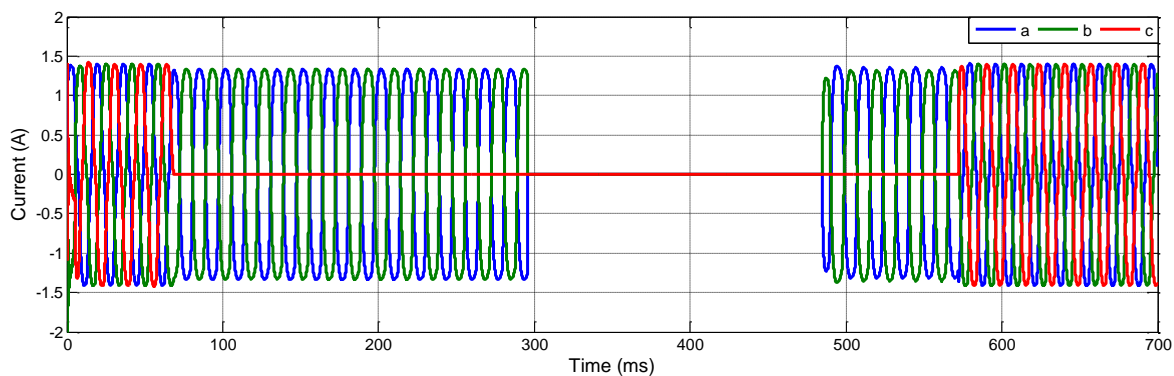
شکل ۷: نمایش (الف) ولتاژ، (ب) شار و (ج) جریان سمت اولیه (اتصال ستاره) در مراحل مختلف قطع و وصل ترانسفورماتور



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸: نمایش (الف) ولتاژ، (ب) شار و (ج) جریان سمت اولیه (اتصال مثلث) در مراحل مختلف قطع و وصل ترانسفورماتور

جریان هجومی عدم پیچیدگی، قابلیت استفاده در انواع مختلف ترانسفورماتورها و اتصالات آن و نیز مؤثر بودن و قابلیت اطمینان روش اعمالی از پارامترهای مهم در این زمینه محسوب می‌شوند. در این مقاله، ابتدا روش محاسباتی معرفی شده و چگونگی حذف حالات گذرا که منجر به جریان هجومی می‌شود، بیان شده است. در این روش‌ها از اطلاعات حین قطع ترانسفورماتور استفاده می‌شود. در ادامه، روش دیگر برای حالتی که اطلاعات حین ترانسفورماتور در دسترس نیست، پیشنهاد شده است. این روش بر مبنای اندوکتانس پسماند بیان شده است. به‌طور کلی زمانی که دسترسی به اطلاعات حین قطع ترانسفورماتور مقدور نباشد، استفاده از روش پیشنهاد شده مفید بوده لکن به دقت زیادی برای پیاده‌سازی نیاز دارد.

با توجه به این که در اکثر موارد می‌توان ترانسفورماتورها را بعد از بی‌باری به‌طور مناسب قطع و داده‌های مربوطه را ثبت کرد، لذا روش پیشنهادی تثبیت شار در این مقاله معرفی شده است. در این روش، ترانسفورماتور طوری قطع می‌شود که شار پسماند در فازهای آن تثبیت و مقدار آن در اختیار باشد. بنابراین، در هنگام وصل مجدد ترانسفورماتور، زاویه مطلوب ولتاژ اعمالی و نحوه کلید زنی مشخص می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها حذف جریان هجومی در روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. این روش در اتصالات مختلف ترانسفورماتورها و بدون دسترسی به نقطه نول ترانسفورماتور نیز می‌تواند مورداستفاده قرار گیرد. در این مقاله ترانسفورماتور با هسته سه ستونه در نظر گرفته شده ولی روش پیشنهادی برای ترانسفورماتور با هسته‌های مجزا هم قابل اعمال است.

مراجع

- [1] R. Doğan, S. Jazeb and F. de León, "Investigation of transformer-based solutions for the reduction of inrush and phase currents," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 5, 2015.
- [2] S. M. Madani, M. Rostami, G. B. Gharehpetian and L. E. Pope, "Inrush current limiting of transformer primary winding with grounded or nongrounded Y-connection using diode bridges," in *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 40, no. 3, 2017.
- [3] S. Fang, H. Ni, H. Lin and S. L. Ho, "Novel strategy for reducing inrush current of three phase transformer considering residual flux," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 7, 2016.
- [4] E. Cardelli, A. Faba and F. Tissi, "Prediction and control of transformer inrush currents," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 3, 2015.
- [5] A. Bartel, T. Hülsmann, J. Kühn, R. Pulch and S. Schöps, "Influence of measurement errors on transformer inrush currents using different material models," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 2, 2015.
- [6] S. Jazebi, F. d. León and N. Wu, "Enhanced analytical method for the calculation of the maximum inrush currents of single-phase power transformer," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 6, 2015.
- [7] F. d. León, A. Farazmand and P. Joseph, "Comparing the T and π equivalent circuits for the calculation of transformer inrush currents," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 4, 2012.

شکل (۸) نتایج شبیه‌سازی با اعمال روش تثبیت شار را در حالت اتصال اولیه به‌صورت مثلث نشان می‌دهد. در زمان‌های قبل از نقطه A ترانسفورماتور بی‌بار شده و در این نقطه، زمانی که جریان فاز c برابر صفر شد، کلید خط مربوط به آن قطع می‌شود (به شکل ۳ رجوع شود). همان‌طور که در شکل (۸-ب) نشان داده شده، شار دو فاز باهم برابر و شار فاز سوم برابر مجموع آن‌ها است. بعد از سپری شدن چند دوره تناوب، و زمانی که ولتاژ فاز c برابر صفر شد، دو کلید بعدی نیز قطع می‌شود (نقطه B). مقدار شار فاز c در این مرحله در مقدار شار باقی‌مانده تثبیت شده، و شار دو فاز دیگر برابر حدود نصف این مقدار است. در مرحله وصل، با اعمال زاویه ولتاژ مناسب برای فاز c (ولتاژ خط a-b) که در قسمت قبل محاسبه شد، دو کلید روی خط a و b وصل می‌شود (نقطه C). همان‌گونه که در شکل (۷-ج) نشان داده شده است، ترانسفورماتور با اتصال مثلث نیز، با استفاده از روش تثبیت شار، بدون جریان هجومی است. بعد از گذشتن چند دوره تناوب، کلید سوم ۳۰ درجه قبل از صفر شدن جریان خطوط متصل می‌شود.

روش تثبیت شار، هم در اتصال ستاره و هم در اتصال مثلث با در نظر گرفتن مراحل قطع مناسب ترانسفورماتور به‌طور کاملاً مؤثر باعث از بین رفتن جریان هجومی در ترانسفورماتورهای قدرت می‌شود. هم‌چنین در استفاده از این روش، دسترسی به نقطه نول ترانسفورماتور موردنیاز نیست. باید توجه داشت گفتنی است که در استفاده از این روش، کلید روی خطوط a و b از نوع کلید قطع زیر بار کنترل شده انتخاب شده و کلید روی خط c یک کلید کنترل شونده است.

در استفاده از روش پیشنهادی فرض بر آن است که ترانسفورماتور سالم و در سیستم قدرت در حال استفاده است و لذا بعد از قطعی موقت دوباره به سیستم بازمی‌گردد. باین‌حال، برای کامل شدن بررسی روش پیشنهادی، با فرض مدت‌زمان طولانی بین قطعی و وصل مجدد ترانسفورماتور، بعد از تثبیت شار مقدار شار پسماند به‌طور متقارن تغییر داده شده و نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است. هم‌چنین برای اعتبارسنجی تحلیل یادشده در نرم‌افزار MATLAB، نتایج آن با خروجی حاصل از نرم‌افزار PSCAD و با پارامترهای کاملاً مشابه مقایسه شده است.

جدول ۱: بررسی افزایش جریان هجومی با کاهش متقارن

| پسماند شار | | |
|----------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| درصد کاهش شار پسماند | درصد افزایش جریان هجومی با MATLAB | درصد افزایش جریان هجومی با PSCAD |
| بدون تغییر | ۰/۰۲ | ۰/۰۴ |
| ۵ | ۴/۶۳ | ۵/۰۱ |
| ۱۰ | ۷/۳۲ | ۶/۴۴ |
| ۱۵ | ۱۴/۱۵ | ۱۵/۶۶ |

۶- نتیجه‌گیری

کاهش جریان هجومی در ترانسفورماتورهای قدرت از گذشته یکی از موضوع‌های مهم در بهره‌برداری از آن‌ها بوده است. در روش‌های کاهش

- [18] P. Amiri and M. Akhbari, "Transient current limiter for suppressing transformer inrush, motor starting and fault currents in power system, in IET Electric Power Applications," vol. 11, no. 3, 2017.
- [19] S. Bagheri, Z. Moravej and G. B. Gharehpetian, "Effect of transformer winding mechanical defects, internal and external electrical faults and inrush currents on performance of differential protection," in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, no. 10, 2017.
- [20] A. Sahebi and H. Samet, "Efficient method for discrimination between inrush current and internal faults in power transformers based on the non-saturation zone," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, no. 6, 2017.
- [21] S. Bagheri, Z. Moravej and G. B. Gharehpetian, "Classification and Discrimination Among Winding Mechanical Defects, Internal and External Electrical Faults, and Inrush Current of Transformer," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 14, no. 2, 2018.
- [22] J. A. Jardini, R. P. Casolari, G. Y. Saiki, M. Masuda, L. C. Magrini and R. M. Jacobsen, "Point-on-wave controller developed for circuit breaker switching," IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago, 2008.
- [23] L. Zhang, W. Chen, J. Liu and C. Wen, "A robust adaptive iterative learning control for trajectory tracking of permanent-magnet spherical actuator," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 1, 2016.
- [24] S. E. Zirka, Y. I. Moroz, N. Chiesa, R. G. Harrison and H. K. Hoidalén, "Implementation of inverse hysteresis model into EMTP-part I: static model," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 5, 2015.
- [25] S. E. Zirka, Y. I. Moroz, N. Chiesa, R. G. Harrison and H. K. Hoidalén, "Implementation of inverse hysteresis model into EMTP-part II: Dynamic model IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 5, 2015.
- [26] C. H. Alonso, S. Jazebi and F. de León, "Experimental parameter determination and laboratory verification of the inverse hysteresis model for single-phase toroidal transformers," Transactions on Magnetics, vol. 52, no. 11, 2016.
- [8] J. V. Leite, A. Benabou and N. Sadowski, "Transformer inrush currents taking into account vector hysteresis," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 8, 2010.
- [9] D. I. Taylor, J. D. Law, B. K. Johnson and N. Fischer, "Single-phase transformer inrush current reduction using prefluxing," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, no. 1, 2012.
- [10] N. Chiesa, B. A. Mork and H. K. Hoidalén, "Transformer model for inrush current calculations: simulations, measurements and sensitivity analysis," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 4, 2010.
- [11] N. Chiesa and H. Kristian, "Novel approach for reducing transformer inrush currents: laboratory measurements, analytical interpretation and simulation studies," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 4, Jan. 2010.
- [12] J. Faiz, B. M. Ebrahimi and T. Noori, "Three- and two-dimensional finite-element computation of inrush current and short-circuit electromagnetic forces on windings of a three-phase core-type power transformer," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 5, 2008.
- [13] L. Sáinz, F. Córcoles, J. Pedra and L. Guasch, "Theoretical calculation of inrush currents in three- and five-legged core transformers," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 2, 2007.
- [14] J. Ma, Z. Wang, Q. Yang and Y. Liu, "Identifying transformer inrush current based on normalized grille curve," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 2, 2011.
- [15] A. M. Gaouda and M. M. A. Salama, "DSP wavelet-based tool for monitoring transformer inrush currents and internal faults," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 3, 2010.
- [16] سجاد باقری، زهرا مروج، گئورگ قره‌پتیان، «تمایز میان عیوب مکانیکی سیم‌پیچ، خطاهای الکتریکی داخلی و خارجی و جریان هجومی در ترانسفورماتورها با استفاده از روش ترکیبی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، در دست انتشار.
- [17] بهرام نوشاد، مرتضی رزاز و سید قدرت‌اله سیف‌السادات، «تعیین یک مدل دقیق ترانسفورماتور جریان برای آنالیز حالت‌های گذرای الکترومغناطیسی در طی خطاهای الکتریکی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، شماره ۲، صفحه ۷۷-۸۷، ۱۳۹۰.

زیر نویس‌ها

- ¹ Steady state
- ² Remanent flux
- ³ Static hysteresis model
- ⁴ Dynamic hysteresis model