

Electromagnetic Force Analysis of Transformer on the Ferroresonance due to Consecutive 3-Phase Short-Circuit Faults Using Finite Element Method (FEM)

Ali Ahmadpour, *PhD Candidate*, SeyedJalal Seyed Shenava, *Associate Professor*, Abdolmajid Dejamkhooy, *Assistant Professor*, Elham Mokaramian, *PhD Candidate*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
a.ahmadpour@uma.ac.ir
seyedshenava@uma.ac.ir
majiddejam@uma.ac.ir
e.mokaramian@uma.ac.ir

Abstract:

In this paper, Finite Element Method (FEM) is used to study the ferroresonance phenomenon from the perspective of the electromagnetic forces introduced on the transformer windings. In order to simulate this phenomenon, a consecutive 3-phase short-circuit fault is considered to be on the primary side at a relatively distant from the transformer. Then, due to the capacitance of the line, between the error point and transformer, the single-phase short-circuit faults are generated, one-by-one. Because of the switching, for isolation feeder from the fault point, the ferroresonance appears in power system. Then, voltages and currents of the primary and secondary windings will be changed. The effect of current changes on the forces that transformer coils withstand, when the ferroresonance happens, is an interesting topic to this paper. With modeling of the transformer and feeder switching in the FLUX 12.2 software, the ferroresonance condition is simulated. Due to the dependence of the ferroresonance on the non-linearity of the magnetic characteristic of the transformer core, Jiles-Atherton vector hysteresis model is used to modeling the core hysteresis loops for enhancement the results accurate.

Keywords: Ferroresonance, transformer, electromagnetic force analysis, finite element method, short-circuit

Received: 21 October 2019

Revised: 11 February 2020

Accepted: 5 April 2020

Corresponding Author: Ali Ahmadpour

Citation: A. Ahmadpour, S. Seyed-Shenava, A. Dejamkhooy, E. Mokaramian, "Electromagnetic force analysis of transformer on the ferroresonance due to consecutive 3-phase short-circuit faults using finite element method (FEM)", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 11, no. 41, pp. 47-60, Spring 2020 (in Persian).

تحلیل نیروهای الکترومغناطیسی ترانسفورماتور تحت شرایط فرورزونانس در اثر اتصال کوتاه سه فاز متوالی با استفاده از روش اجزای محدود

علی احمدپور، دانشجوی دکتری، سیدجلال سیدشنوا، دانشیار، عبدالمجید دژمخوی، استادیار، الهام مکرمیان،
دانشجوی دکتری

گروه مهندسی برق قدرت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

a.ahmadpour@uma.ac.ir
seyedshenava@uma.ac.ir
majiddejam@uma.ac.ir
e.mokaramian@uma.ac.ir

چکیده: در این مقاله، از روش تحلیلی اجزای محدود برای مطالعه پدیده فرورزونانس از دیدگاه نیروهای الکترومغناطیسی وارد بر سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور استفاده شده است. به منظور مدل‌سازی این پدیده، یک خطای اتصال کوتاه سه فاز متوالی در سمت اولیه و در فاصله نسبتاً دور از ترانسفورماتور در نظر گرفته شده است. سپس با توجه به ظرفیت خازنی معادل خط، بین محل خطا تا محل نصب ترانسفورماتور، خطاهای اتصال کوتاه تک فاز به صورت متوالی تولید می‌شوند. به علت کلیدزنی، برای قطع خط در محل خطا، پدیده فرورزونانس در سیستم قدرت به وجود می‌آید. در نتیجه، اندازه ولتاژ و جریان‌های سمت اولیه و ثانویه ترانسفورماتورها به صورت محسوس تغییر پیدا می‌کنند. تأثیر تغییرات جریان بر اندازه نیروهایی که سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور در طول پدیده فرورزونانس تحمل می‌کنند، موضوع مورد مطالعه این مقاله است. با شبیه‌سازی ترانسفورماتور توزیع در محیط اجزای محدود نرم‌افزار FLUX 12.2 و استفاده از کلیدزنی در شبکه، پدیده فرورزونانس مدل‌سازی می‌شود. با توجه به وابستگی فرورزونانس به غیرخطی بودن مشخصه مغناطیسی هسته آهنی ترانسفورماتور، از مدل هیستریزیس برداری Jiles-Atherton برای تولید حلقه‌های هیستریزیس هسته فولادی بهره گرفته شده است تا دقت نتایج افزایش یابد

کلمات کلیدی: اتصال کوتاه، ترانسفورماتور، روش اجزای محدود، سیستم قدرت، فرورزونانس، مدل هیستریزیس، نیروهای الکترومغناطیسی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۷/۲۹

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۲۲

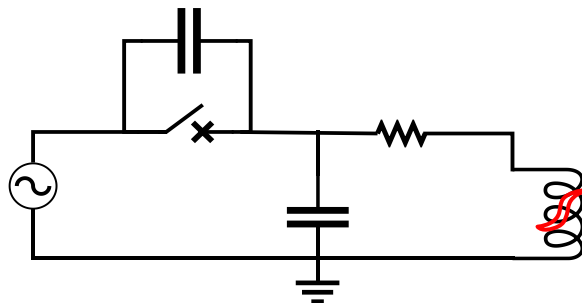
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱/۱۷

نام نویسنده‌ی مسئول: علی احمدپور

نشانی نویسنده‌ی مسئول: اردبیل - بلوار دانشگاه - دانشگاه محقق اردبیلی - دانشکده فنی و مهندسی - طبقه اول - گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

کلیدزنی^۱ در مدار قدرت به صورت مداوم انجام می‌شود. یکی از علت‌های اصلی کلیدزنی، خطاهای اتصال کوتاه^۲ است که در شبکه برق به صورت معمول رخ می‌دهند. در اکثر موارد ثابت شده است که کلیدزنی می‌تواند منجر به تغییرات گذرا در دامنه و زاویه ولتاژ و جریان‌ها در سیستم قدرت شوند [۱]. اگر خازن معادل مدار یا کلید قطع‌کننده مدار به اندازه‌ای باشد که نتوان از آن صرف‌نظر کرد، تغییرات گذرای به‌وجود آمده در اثر کلیدزنی را می‌توان به صورت پدیده فرورزونانس^۳ تعریف کرد. در حالت کلی، فرورزونانس زمانی رخ می‌دهد که یک منبع ولتاژ متناوب سینوسی و یک خازن به‌همراه یک سلف با مشخصه مغناطیسی غیرخطی، یک مدار الکتریکی را شکل دهند. مدار ساده برای توضیح پدیده فرورزونانس در شکل (۱) رسم شده است. در حقیقت، فرورزونانس را می‌توان تبادل پیچیده انرژی بین خازن‌های خطوط سیستم قدرت و هسته‌های آهنی ترانسفورماتور، با مشخصه غیرخطی، در نظر گرفت [۲]. فرورزونانس که یک پدیده غیرخطی و غیرقابل پیش‌بینی است، می‌تواند اثرات نامطلوبی بر روی انواع تجهیزات نصب شده داشته باشد [۳].



شکل (۱): مدار کلی برای توصیف پدیده فرورزونانس
Fig. (1): The model for ferroresonance description

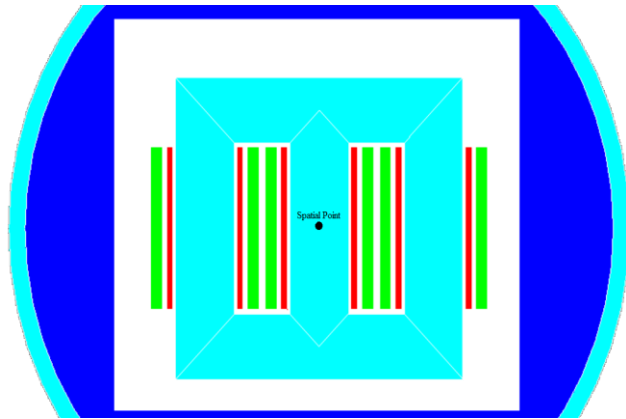
در تحقیقات پیشین، فرورزونانس از دیدگاه‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. پژوهش‌های اولیه، بیشتر روی اصول مدل‌سازی ریاضی و مبانی مداری فرورزونانس تمرکز داشتند [۴-۹]. در مرحله بعدی، مدل‌سازی ریاضی با شبیه‌سازی‌های کامپیوتری همراه بود. مرجع [۱۰] پدیده فرورزونانس را از طریق معادلات ریاضی دینامیکی حل کرده است و نقش اصلی تلفات ترانسفورماتور در تعیین نوع فرورزونانس را اثبات کرده است. علاوه بر آن، شرایط اولیه و تغییرات پارامترهای سیستم نیز در پاسخ سیستم به پدیده فرورزونانس بسیار موثر هستند [۱۱]. یکی از عوامل تولید اضافه ولتاژهای ناشی از فرورزونانس در سیستم‌های قدرت، واحدهای تولید پراکنده^۴ هستند، و افزایش ولتاژ به اندازه خازن وابسته است [۱۲]. به همین دلیل، بررسی پدیده فرورزونانس در این مورد می‌تواند به انتخاب کنترل‌کننده‌های مناسب کمک کند [۱۳]. بررسی پدیده فرورزونانس به صورت الکتریکی برای به‌دست آوردن جریان‌ها و ولتاژهای سه فاز ترانسفورماتور در شرایط مختلف برق‌دار کردن و بی‌برق کردن آن در [۱۴] انجام شده است. یک روش جدید برای حل مسأله فرورزونانس در [۱۵] ارائه شده که کلیدزنی در حالات مختلف را برای انواع هسته‌های آهنی بدون در نظر گرفتن حلقه‌های هیستریزیس^۵ حل شده است. در نظر گرفتن مشخصه مغناطیسی واقعی هسته‌های آهنی، که شامل نمودارهایی با حلقه‌های هیستریزیس است، می‌تواند دقت نتایج را بهبود ببخشد. از طرف دیگر، انتخاب مدار معادل مناسب ترانسفورماتور برای بررسی پدیده فرورزونانس، نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی کامپیوتری را به نتایج عملی نزدیک می‌کند [۱۶]. یک روش جدید برای تحلیل فرورزونانس در [۱۷] بر مبنای اثرات مغناطیسی ستون‌های هسته آهنی بر یکدیگر و مدل‌های حلقه‌های هیستریزیس در هسته‌های فریت^۶ ارائه شده است، و درصد بالای شباهت نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی به نتایج ثبت شده از مدل واقعی و آزمایشگاهی نشان داده شده است. یک روش دیگر برای مدل‌سازی سلف قابل اشباع با حلقه‌های هیستریزیس، بر اساس در نظر گرفتن جریان و ولتاژ سلف به ترتیب به‌عنوان ورودی و خروجی یک تابع ریاضی، به صورت یک منبع ولتاژ کنترل شده با جریان توصیف شده است [۱۸].

روش‌های متعددی نیز برای کنترل و یا تضعیف پدیده فرورزونانس پیشنهاد شده است [۱۹-۲۲]. یکی از روش‌های دقیق و به‌روز در زمینه بررسی پدیده فرورزونانس، روش اجزای محدود^۷ است. از این روش در بررسی تغییرات الکتریکی (جریان‌ها و ولتاژها) و مغناطیسی (چگالی شار مغناطیسی) برای هسته‌های فرومغناطیسی تحت شرایط فرورزونانسی استفاده شده است [۲۳]. تغییرات چگالی شار در نزدیکی محل اتصال یوغ^۸ و ستون‌های هسته ترانسفورماتور با استفاده از روش اجزای محدود و آزمایشات عملی تحت شرایط فرورزونانسی در مقاله [۲۴] بررسی شده است؛ نویسندگان با مقایسه نتایج، دقت قابل قبولی را برای روش خود محاسبه کرده‌اند. تغییرات چگالی شار الکترومغناطیسی برای یک اتوترانسفورماتور فوق توزیع در حضور پدیده فرورزونانس با استفاده از روش اجزای محدود در مقاله [۲۵] بررسی شده است؛ بعد از تحلیل، تلفات به‌دست آمده در حالت خطای سیستم بیشتر از حالت عادی است که باعث افزایش دمای ترانسفورماتور خواهد شد. در مرجع [۲۶] یک روش جدید بر اساس تحلیل لرزش برای شناسایی پدیده فرورزونانس انجام گرفته است. در این مقاله، فرورزونانس حالت ماندگار به‌دست آمده از خطای اتصال کوتاه بررسی شده است. در مقاله [۲۷] یک تحلیل جامع برای کلاس‌بندی انواع مختلف فرورزونانس انجام شده است و در آن، مواردی که تأثیر عمده‌ای بر روی سیستم قدرت دارد را انتخاب و بررسی شده‌اند. به‌علت خاصیت غیرخطی پدیده فرورزونانس، معادلات غیرخطی و حل این معادلات، به پاسخ دقیق آن کمک خواهد کرد. به همین منظور، در مقاله [۲۸]، با در نظر گرفتن ضریب جریان گردابی ترانسفورماتور، یک تحلیل مناسب برای پدیده فرورزونانس انجام شده است. در نتایج این مقاله مشاهده شده است که حلقه‌های هیستریزس و پاسخ فرورزونانس در حالتی که ضریب جریان گردابی اعمال شده است، بسیار دقیق است. در مقاله [۲۹]، تأثیرات جریان هجومی ایجاد شده توسط پدیده فرورزونانس بر روی سیم‌پیچی‌های سه فاز ترانسفورماتور مطالعه شده است. در مقاله [۳۰]، مطالعه‌ای بر روی یک سیستم واقعی کشور کانادا انجام شده است و در آن، تأثیر انواع مختلف اتصالات سیم‌پیچی‌های سه فاز ترانسفورماتور بر روی شدت فرورزونانس بررسی شده است. برای جلوگیری از اثرات نامطلوب پدیده فرورزونانس بر روی تجهیزات سیستم قدرت، استفاده از مدارات بازدارنده الکترونیک قدرت بسیار مفید خواهد بود. در [۳۱]، استفاده از این مدارها توصیه شده است و مقاومت‌های معادل مختلف این مدارها بررسی شده است. همچنین، در [۳۱] نشان داده شده است که مقاومت‌های خیلی بالا و خیلی کم نمی‌توانند مدارات بازدارنده مناسبی باشند. به این منظور، اندازه بهینه مقاومت در این مقاله تعیین و پیشنهاد شده است.

در این مقاله یک ترانسفورماتور سه فاز در محیط اجزای محدود نرم‌افزار FLUX 12.2 با استفاده از مدل هیستریزس برای هسته آهنی مدل‌سازی می‌شود. با شبیه‌سازی مدل فرورزونانس در سیستم قدرت، تحلیل‌های الکتریکی، شامل جریان و ولتاژهای سه فاز، و تحلیل مغناطیسی، شامل توزیع چگالی شار، نمایش خطوط شار، نیروهای مکانیکی وارد بر سیم‌پیچی‌ها، نشان داده خواهد شد. ادامه مقاله به‌صورت زیر است؛ در بخش دوم مدل هیستریزس شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار FLUX 12.2 توضیح داده خواهد شد. در بخش سوم، مدل‌سازی فرورزونانسی انجام شده است. در بخش چهارم، نحوه تولید نیروهای مکانیکی وارد بر سیم‌پیچی‌ها بررسی شده است. بخش پنجم و ششم به‌ترتیب نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری هستند.

۲- مدل‌سازی هیستریزس ترانسفورماتور

دو مدل مرسوم برای توصیف رفتار هیستریزس ترانسفورماتور در مطالعات فرورزونانسی وجود دارد: مدل هیستریزس Preisach [۱۸، ۳۲، ۳۳] و مدل برداری هیستریزس Jiles-Atherton (J-A) [۲۳، ۳۴-۳۸]. در این مقاله از مدل J-A برای مدل‌سازی مغناطیسی هسته ترانسفورماتور بهره گرفته شده است. علت گستردگی این روش نسبت به سایر روش‌ها، استفاده از پارامترهای کمتر، انطباق راحت‌تر با نرم‌افزارهای اجزای محدود، و هزینه محاسباتی کمتر است [۳۹]. مدل اجزای محدود ترانسفورماتور توزیع مورد بررسی در این مقاله در شکل (۲) رسم شده است. اطلاعات ترانسفورماتور و سیستم قدرت مورد بررسی در جدول (۱) آورده شده است. فلز به‌کار رفته در سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور، مس است. همچنین نوع فولاد سیلیکون‌دار^۹ مورد استفاده برای هسته آهنی، M330-50A است که پارامترهای مربوط به مدل برداری J-A و حلقه هیستریزس در فرکانس ۵۰ Hz در [۳۹] مشخص شده‌اند. با توجه به غیرخطی بودن مسأله، تخمین صحیح رفتار مغناطیسی هسته، به افزایش دقت نتایج نیز کمک خواهد کرد.



شکل (۲): مدل اجزای محدود دو بعدی ترانسفورماتور توزیع

Fig. (2): The 2D finite element model of distribution transformer

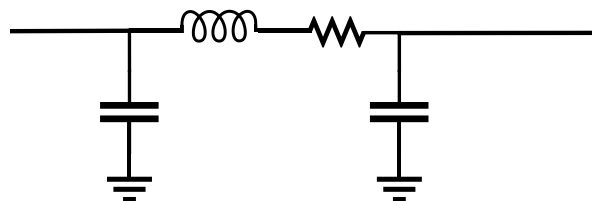
Table (1): The characteristic of desired transformer

جدول (۱): مشخصات کلی ترانسفورماتور

اندازه	تعریف پارامتر (واحد اندازه گیری)
۶۳۰	ظرفیت نامی (kVA)
۲۰ / ۰/۴	ولتاژ اولیه / ثانویه (kV)
۹۰۹/۳۲ / ۱۸/۱۸	جریان اولیه / ثانویه (A)
مثلث / ستاره زمین شده	نوع آرایش بندی: اولیه / ثانویه

۳- مدل سازی پدیده فرورزونانس

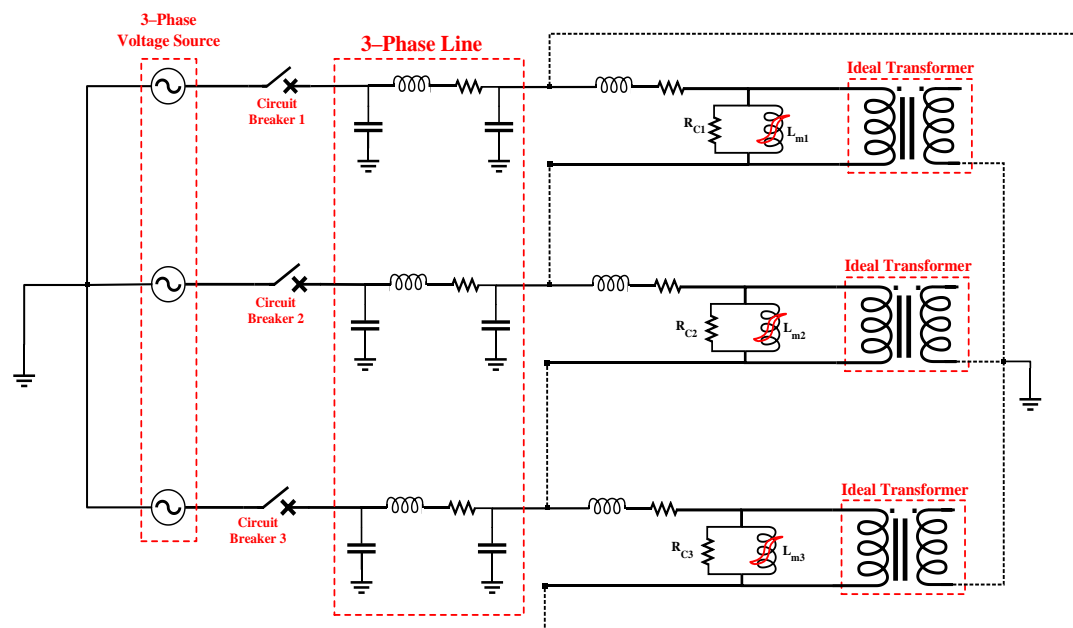
در سیستم های قدرت اکثر تجهیزات با هسته های آهنی، دارای مشخصه های غیرخطی هستند. بیشترین سهم تجهیزات با مشخصه غیرخطی به ترانسفورماتورهای قدرت مربوط می شوند [۲۱]. هسته های آهنی با جنس فولاد سیلیکون دار، که حلقه های هیستریزیس باریکی دارند، آشفتگی بیشتری در پدیده فرورزونانس تولید می کنند [۱۸]. اگر این هسته های آهنی، به عنوان سلف های قابل اشباع، به همراه یک خازن در مدار قدرت قرار بگیرند، پدیده فرورزونانس به وجود می آید. زمانی که جریان از خازن و سلف عبور کند، در این حالت هارمونیک های جریان تولید می شوند. هر اندازه مشخصه سلف غیرخطی باشد، تعداد هارمونیک ها و تأثیر آنها نیز بیشتر خواهد شد. در حالت کلی، چهار نوع پدیده فرورزونانسی با توجه به اندازه پارامترهای مدار در پژوهش های قبلی به اثبات رسیده است: مد اساسی^۱، مد زیرهارمونیک^۱، مد نیمه متناوب^{۱۲}، و مد آشفته^{۱۳} [۱۱]. خاصیت خازنی در اکثر سیستم های قدرت وجود دارد؛ ظرفیت خازنی معادل خطوط با طول متوسط و بیشتر، کلیدزنی بانک های خازنی، و کابل های زیر زمینی، هرکدام یک ظرفیت خازنی به حساب می آیند. یک سیستم توزیع با خط متوسط را در نظر بگیرید. در این حالت، خط انتقال اتصالی از نقطه شروع تزریق جریان تا نقطه اتصال آن به ترانسفورماتور، خاصیت خازنی را می توان برای فیدر مورد نظر اعمال کرد. در شکل (۳)، مدل خط اتصالی مورد بررسی سیستم توزیع رسم شده است که مدل π برای آن در نظر گرفته شده است.



شکل (۳): مدل π خط انتقال متوسط

Fig. (3): The π model of medium voltage transmission network

مدار معادل خط و ترانسفورماتور برای مطالعات فرورزونانس در شکل (۴) رسم شده است. در این مدار، اتصال سیم‌پیچی‌های اولیه و ثانویه به ترتیب به صورت مثلث (D) و ستاره زمین شده (Yn) در نظر گرفته شده است. منبع ولتاژ سینوسی کامل مورد استفاده دارای فرکانس ۵۰ هرتز است. در ابتدا فرض می‌شود که ترانسفورماتور توزیع تحت بار کامل قرار دارد. سپس با خطای اتصال کوتاه در سمت اولیه و در کنار منبع، خطوط فازهای اول تا سوم به ترتیب و با فاصله زمانی ۰/۱ ثانیه توسط کلیدهای قدرت قطع می‌شوند. در این صورت، شبکه‌ای به خازن معادل طول خط و نیز یک سلف غیرخطی باعث تولید ولتاژها و جریان‌های نامتقارن خواهند شد.



شکل (۴): مدار معادل خط و ترانسفورماتور سه‌فاز برای بررسی پدیده فرورزونانس

Fig. (4): The equivalent circuit model of 3-phase power system and transformer for ferroresonance study

۴- نیروهای الکترومغناطیسی

در اکثر پژوهش‌هایی که مطالعه شد، پدیده فرورزونانس، با حالت‌های مختلف، تنها از دید مداری (یعنی اندازه ولتاژها و جریان‌ها) تحلیل شده بود. بررسی اثرات این اضافه ولتاژ یا جریان‌های تهاجمی حاصل از پدیده‌های گذرا بر عملکرد مغناطیسی و مکانیکی تجهیزات، روش جدیدی است که در این مقاله به آنها پرداخته شده است. نیروهای مکانیکی وارد بر سیم‌پیچی‌ها یکی از رفتارهای الکترومغناطیسی ترانسفورماتور در زمان وقوع پدیده فرورزونانس است. عامل به‌وجود آورنده نیروهای الکترومغناطیسی، تقابل جریان الکتریکی عبوری از سیم‌پیچی‌ها و میدان مغناطیسی اطراف سیم‌پیچی‌ها است. این نیرو، به نیروی لورنتس^{۱۴} معروف بوده و چگالی آن، به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (1)$$

که در آن، \vec{J} بردار چگالی جریان بر حسب آمپر بر مترمربع (A/m^2)، \vec{B} بردار چگالی شار مغناطیسی بر حسب تسلا (T)، و \vec{F} بردار چگالی نیروهای لورنتس کل در واحد نیوتن بر مترمکعب (N/m^3) و شامل دو مولفه برداری در جهت شعاعی (\vec{F}_x) و محوری (\vec{F}_y) است که به ترتیب توسط مولفه برداری محوری چگالی شار (\vec{B}_y) و مولفه شعاعی چگالی شار (\vec{B}_x) به‌وجود می‌آیند. این دو مولفه نیرو توسط معادلات زیر محاسبه می‌شوند.

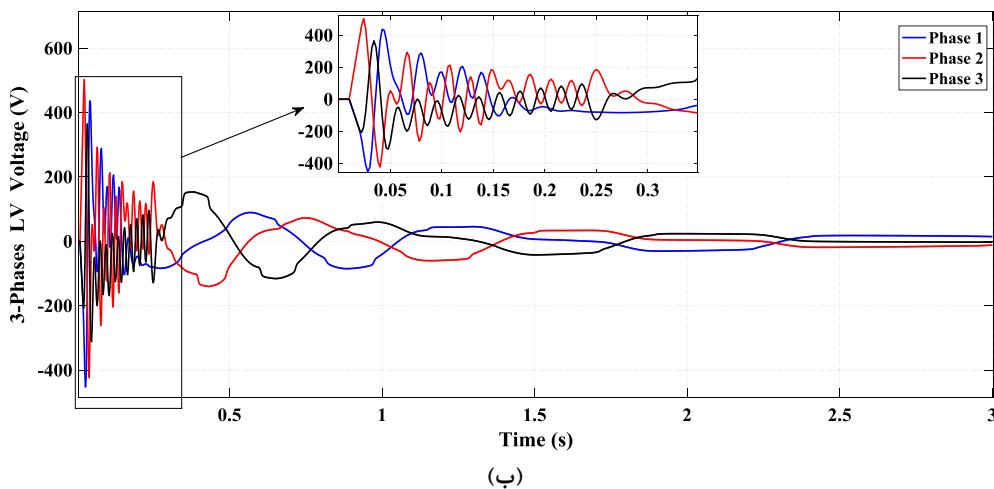
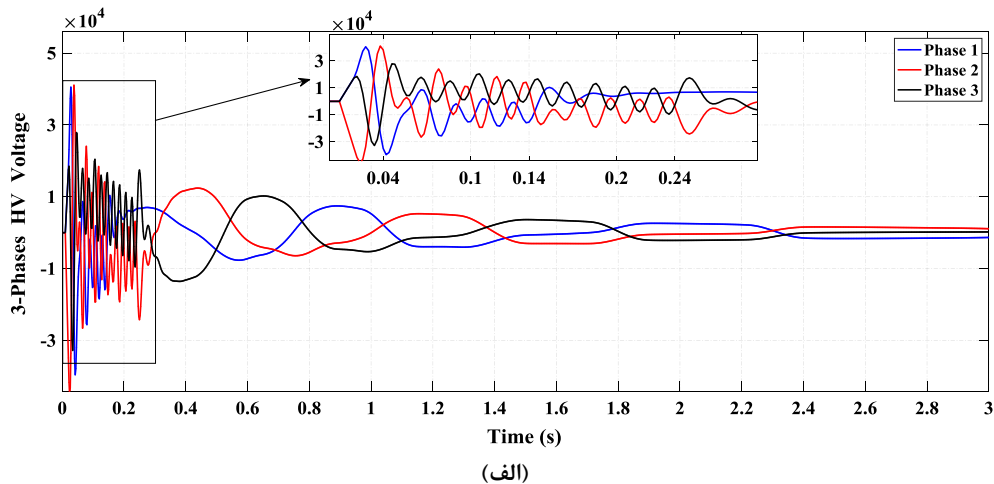
$$F_x = \iint (J \times B_y) \times h \cdot dx \cdot dy \quad (2)$$

$$F_y = \iint (J \times B_x) \times h \cdot dx \cdot dy \quad (3)$$

که در این معادلات، h ارتفاع سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور است، و F_x و F_y در واحد نیوتن (N) هستند. جهت نیروهای محوری به سمت مرکز سیم‌پیچی، و جهت نیروهای شعاعی به سمت خارج از مرکز آن است. اندازه نیروهای شعاعی را می‌توان تقریباً با اندازه نیرو کل، F ، برابر گرفت. نیروهای لورنتس به علت وابستگی به جریان، در شرایط فرورزونانس با توجه به افزایش جریان، مقدار بزرگی خواهند داشت. بنابراین، بررسی نیروهای لورنتس در حضور این پدیده ضروری است. در بخش بعدی، نتایج بدست آمده از تحلیل الکترومغناطیسی ترانسفورماتور ارائه می‌شود.

۵- نتایج شبیه‌سازی

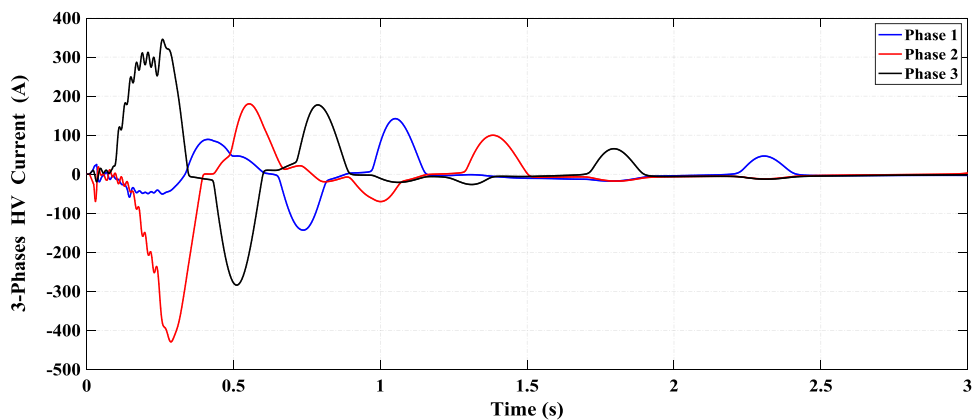
با در نظر گرفتن مشخصات ترانسفورماتور تشریح شده در جدول (۱)، شبیه‌سازی‌های فرورزونانسی برای سیستم قدرت با یک خطای اتصال کوتاه سه فاز، با استفاده از نرم افزار FLUX 12.2 صورت گرفته است. زمان قطع برای فاز اول در 0.04 ثانیه، برای فاز دوم 0.14 ثانیه و برای فاز سوم برابر 0.24 ثانیه توسط مدارشکن‌های سه فاز^{۱۵} در نظر گرفته شده است. شکل موج‌های ولتاژ اولیه و ثانویه برای یک شبیه‌سازی با زمان 3 ثانیه در شکل (۵) رسم شده‌اند. در این شکل، بعد از وقوع خطا و قطع مدار از نقطه خطادار، شکل موج‌های ولتاژ در تمام فازها به صورت هارمونیک‌دار ظاهر شده‌اند. در شکل (۶)، شکل موج‌های جریان‌های اولیه و ثانویه نشان داده شده است. مطابق این شکل‌ها، جریان‌ها در سیم‌پیچی‌های اولیه به صورت قابل توجهی افزایش یافته است، ولی در ثانویه اندازه جریان‌ها کاهش یافته است. این کاهش جریان باعث کاهش توانی ترانسفورماتور به صورت تدریجی خواهد شد.



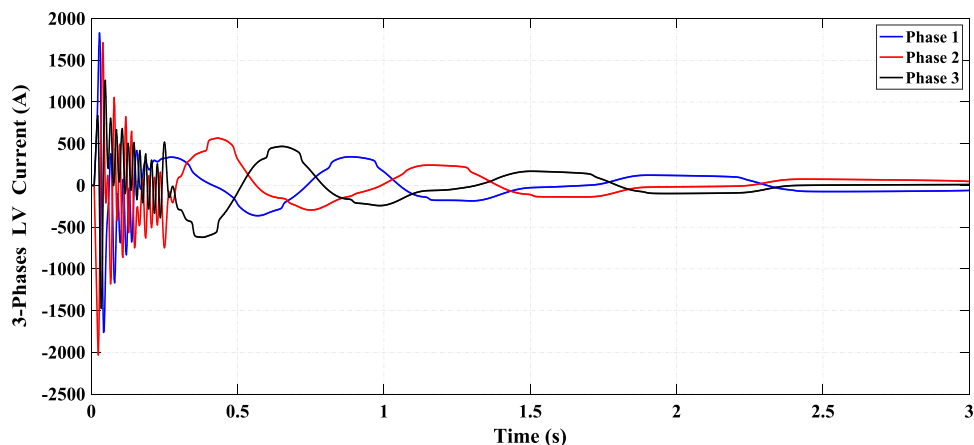
شکل (۵): شکل موج‌های ولتاژ: الف) اولیه، ب) ثانویه

Fig. (5): Voltage curves of transformer: a) Primary side, b) Secondary side

تأثیر جریان‌های اضافی بر عملکرد الکترومغناطیسی سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتورها از چند روش قابل بررسی و مطالعه است. اولین تحلیل مربوط به تلفات اهمی سیم‌پیچی‌ها است. در شکل (۷) اندازه تلفات اهمی برای سیم‌پیچی‌های هر سه فاز سمت فشار قوی رسم شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود، با توجه به رابطه مستقیم توان تلفاتی با توان دوم جریان عبوری از سیم‌رسانا، تلفات اهمی افزایش چشم‌گیری خواهد داشت.



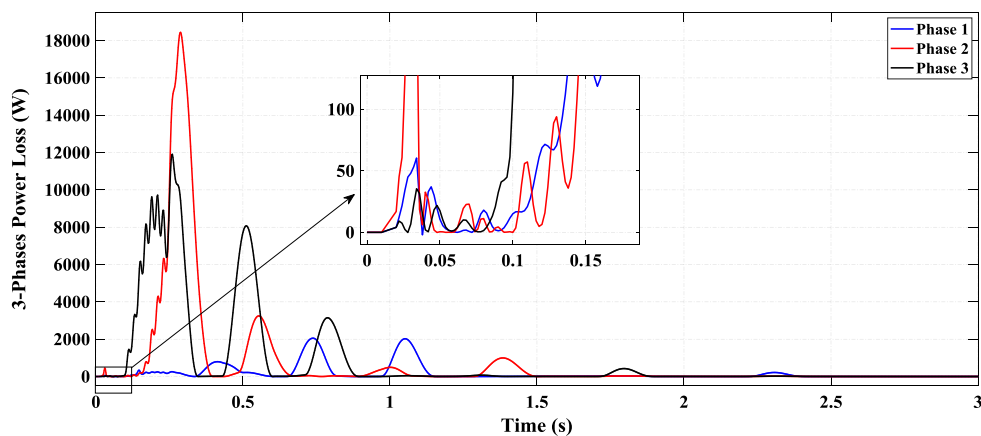
(الف)



(ب)

شکل (۶): شکل موج‌های جریان: الف) اولیه، ب) ثانویه

Fig. (6): Current curves of transformer: a) Primary side, b) Secondary side



شکل (۷): تغییرات تلفات اهمی سیم‌پیچی‌های اولیه

Fig. (7): The copper loss of primary windings

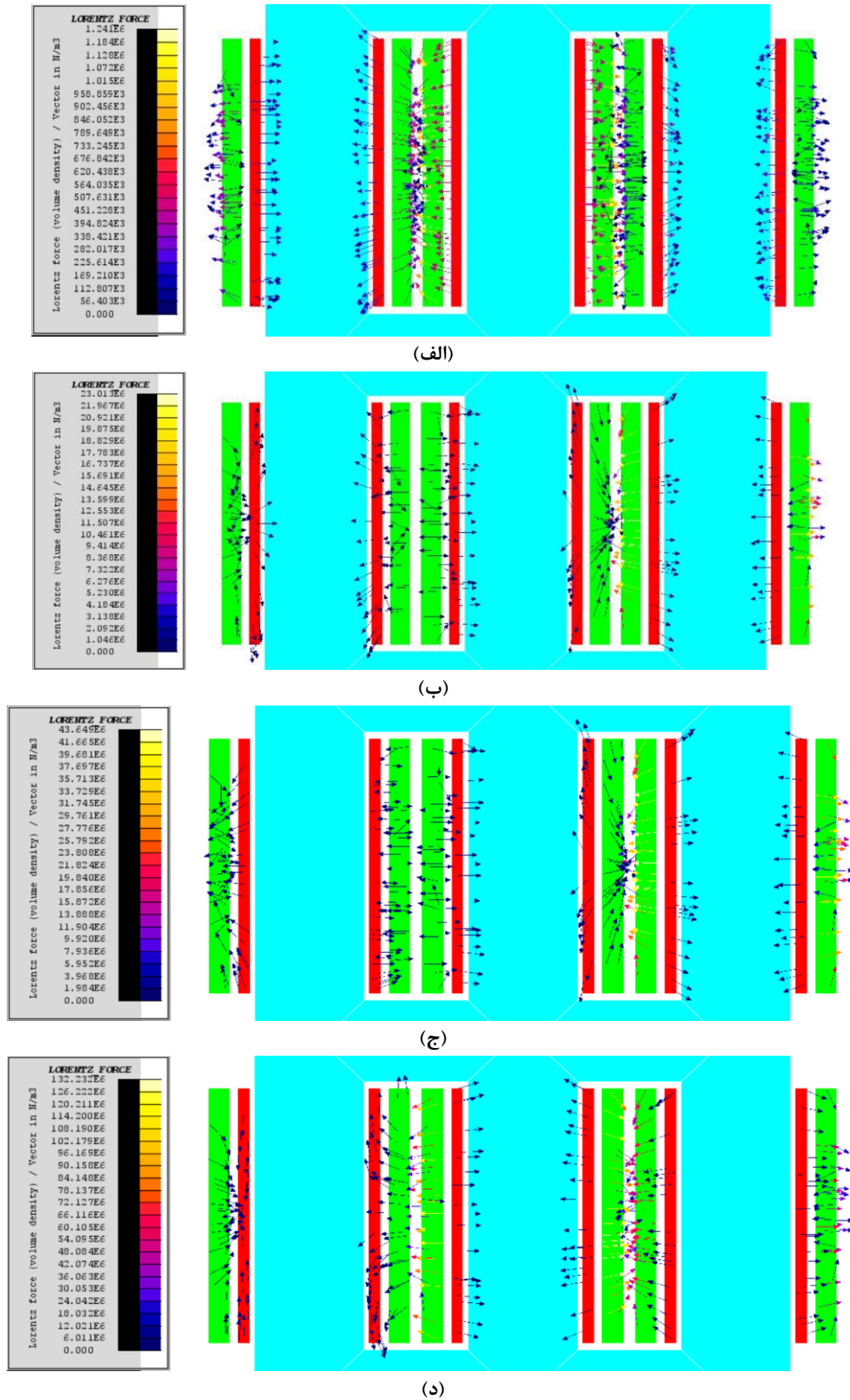
دومین تحلیل به افزایش دمای سیم‌پیچی‌ها و نیز دمای روغن ترانسفورماتور مربوط می‌شود. با توجه به گذرا بودن جریان‌های اضافی، افزایش دمای سیم‌پیچی‌ها، به‌علت زمان بالای مورد نیاز دما برای رسیدن به پایداری، محسوس نخواهد بود. همچنین، نیروهای لورنتس وارد بر سیم‌پیچی‌ها می‌تواند باعث کاهش فاصله بین سیم‌پیچی‌های اولیه با ثانویه، با توزیع جابجایی نامتقارن، شود. در این صورت، بازگشت سیم‌پیچی‌ها به حالت اولیه غیرممکن خواهد بود که باعث مشکلات زیادی، از جمله افزایش میزان شار نشتی خواهد شد.

در شکل‌های (۸) الف تا (۸) د، توزیع چگالی برداری نیروهای لورنتس در حالت‌های عادی، بعد از قطع فاز اول، بعد از قطع فاز دوم و بعد از قطع فاز سوم نشان داده شده است. در شکل (۸) الف، جریان در لحظه $0/034$ ثانیه برای فاز دوم حداکثر شده است. بنابراین، حداکثر نیروی مکانیکی بر سیم‌پیچی‌های این فاز وارد خواهد شد که این نکته در شکل نیز مشهود است. نیروهای مکانیکی در هنگام قطع فاز اول برای لحظه $0/13$ ثانیه، که حداکثر جریان در این لحظه برای فاز سوم اتفاق افتاده است، بیشترین اندازه خود بر فاز سوم وارد می‌کند (شکل (۸) ب). در شکل (۸) ج، حداکثر نیروهای مکانیکی در لحظه $0/15$ ثانیه بر فاز سوم وارد می‌شود که در این لحظه فازهای اول و دوم از مدار خارج شده‌اند. شکل (۸) د توزیع چگالی نیروها را برای لحظه $0/29$ ثانیه نشان داده است که هر سه فاز از مدار خارج شده‌اند. در این لحظه، بیشترین اندازه چگالی نیروهای لورنتس بر سیم‌پیچی‌های فاز سوم وارد می‌شوند.

برای مطالعه دقیق‌تر، اندازه کل توان لحظه‌ای وارد بر سیم‌پیچی‌های اولیه به‌صورت سه فاز در شکل (۹) رسم شده است. بر اساس این شکل، نیروهای مکانیکی تقریباً در تمام لحظات برای فاز دوم بیشترین و برای فاز اول کمترین مقدار را دارد. با توجه به این که فاز دوم در بین دو فاز اول و سوم قرار دارد، جابجایی سیم‌پیچی‌های این فاز می‌تواند اثرات نامطلوبی بر هر کدام از فازهای دیگر بگذارد. این اثرات در صورت جابجایی هر کدام از فازهای اول یا سوم به همراه جابجایی فاز دوم تشدید می‌شود. برای مثال، فازهای دوم و سوم، در تمام شکل‌های (۸) الف تا (۸) د، در اثر نیروی مکانیکی به‌سمت همدیگر حرکت می‌کنند. این اتفاق در شکل ۸-الف، برای سیم‌پیچی‌های اولیه فازهای اول و دوم اتفاق افتاده است. در شکل (۸) ج، سیم‌پیچی‌های اولیه و ثانویه فاز اول به‌سمت هم کشیده می‌شوند.

در شکل (۹) ب، اندازه مولفه شعاعی نیروهای لورنتس رسم شده است. همانطوری که قبلاً گفته شد و در این شکل نیز مشخص است، اندازه کل نیرو را می‌توان برابر با اندازه مولفه شعاعی در نظر گرفت. در شکل (۹) ج، اندازه مولفه محوری رسم شده است که بسیار کمتر از اندازه کل نیرو است. علت این مسأله این است که جهت بردارهای شارهای مغناطیسی در راستای محور عمودی (y) است. برای اثبات این موضوع به‌روش دیگر، در شکل‌های (۸) الف تا (۸) د، جهت اکثر نیروهای مغناطیسی در راستای محور افقی (x) است. همچنین، زاویه بردارهای نیروها در شکل (۹) د رسم شده است. مشخص است که اندازه زاویه نیروها در بیشتر موارد، برابر 180° یا -180° درجه قرار دارد. با توجه به نکته که جابجایی سیم‌پیچی‌ها به‌صورت حرکت به سمت سیم‌پیچی‌های فازهای دیگر است، این نیروها می‌تواند باعث اتصال کوتاه بین سیم‌پیچی‌ها شوند. در این صورت، جداسازی سیم‌پیچی‌ها از یکدیگر یک مشکل زمان‌گیر خواهد بود که مشکلات مالی دیگر را نیز برای شرکت‌های توزیع به همراه خواهد داشت.

یکی از تحلیل‌های اساسی در حوزه الکترومغناطیس، بررسی وضعیت شار مغناطیسی و توزیع آن در هسته است. شکل‌های (۱۰) الف و (۱۰) ب توزیع چگالی شار مغناطیسی را به ترتیب برای حالت قبل از وقوع خطا و بعد از وقوع پدیده فرورزونانس نشان می‌دهد. در هر دو حالت، حداکثر جریان برای فاز دوم سیم‌پیچی‌های اولیه در نظر گرفته شده است. همان‌طوری که از شکل (۱۰) ب نیز مشخص است، اندازه چگالی شار هسته در حالت خطا افزایش یافته است. در این حالت، چگالی شار مغناطیسی نشتی وارد سیم‌پیچی‌های فاز دوم شده است. علاوه بر آن، تلفات آهنی ستون دوم نیز بیشترین مقدار را نسبت به دو ستون کناری دارد.

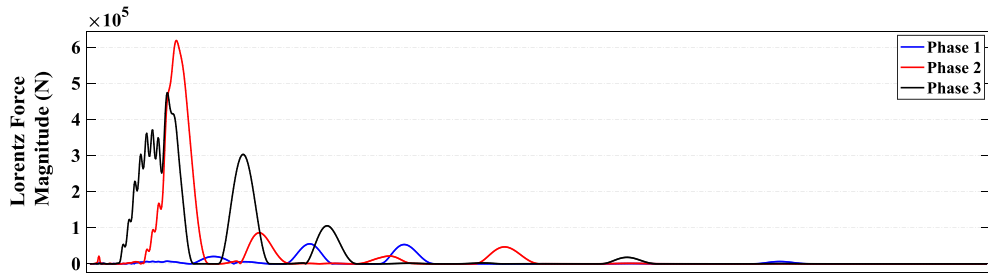


شکل (۸): توزیع بردارهای چگالی نیروهای لورنتس در حالات زمانی مختلف: الف) قبل از خطا ($t=0.034$ s)، ب) بعد از قطع فاز اول ($t=0.13$ s)

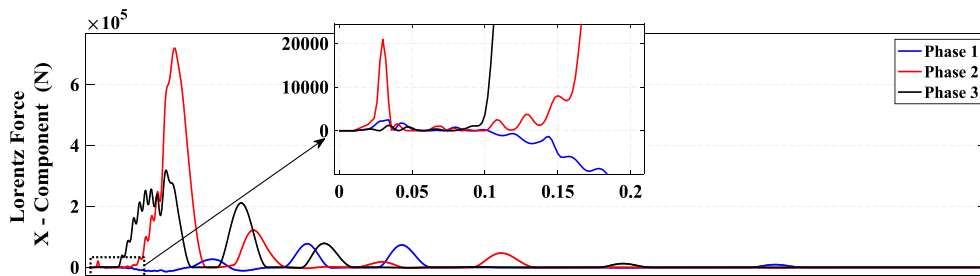
ج) بعد از قطع فاز دوم ($t=0.15$ s)، د) بعد از قطع فاز سوم ($t=0.29$ s)

Fig. (8): The distribution of the Lorentz forces density at the different states: a) Before fault, b) After first phase cutting off, c) After second phase cutting off, d) After third phase cutting off

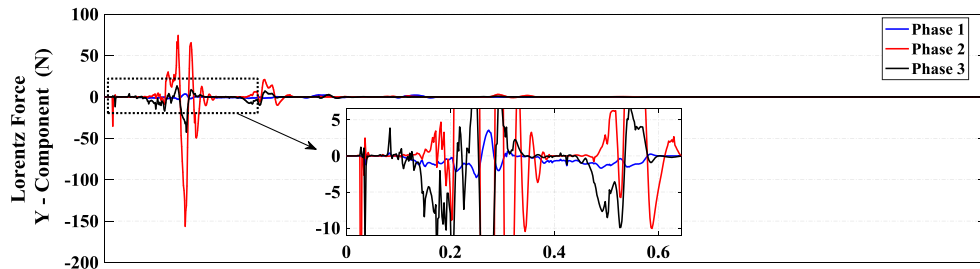
تغییرات زمانی ۳ ثانیه‌ای اندازه میدان میغناطیسی (H) بر حسب چگالی شار (B) به صورت حلقه‌های هیستریزس برای نقطه مشخص شده در شکل ۲ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، حداکثر چگالی شار بزرگ‌تر از ۴ تسلا (T) است که باعث افزایش تلفات مغناطیسی ترانسفورماتور خواهد شد. همچنین این حالت باعث عبور از نقطه اشباع هسته آهنی خواهد شد. با تکرار پدیده‌های گذرای که نقطه اشباع توسط هسته دیده می‌شود، خستگی آهن هسته را به همراه خواهد داشت که در طولانی مدت باید تعویض شود. مشخص است که این تعویض هسته ترانسفورماتور، هزینه مالی بالایی دارد.



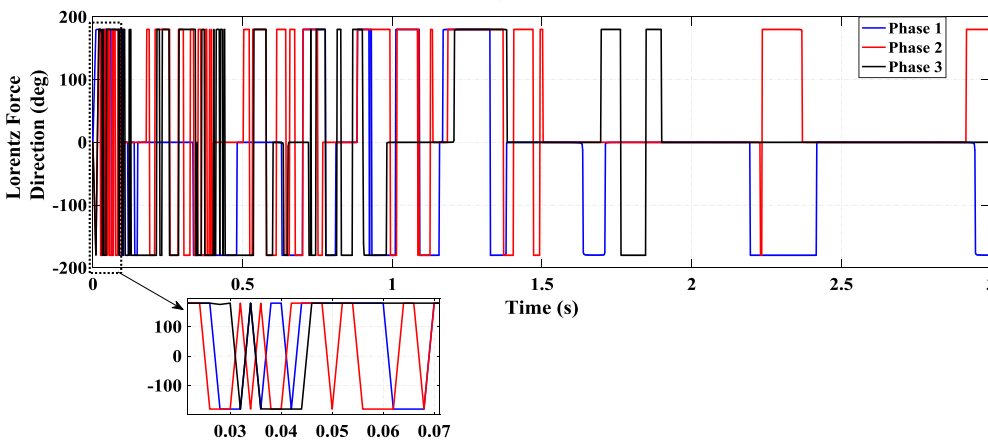
(الف)



(ب)

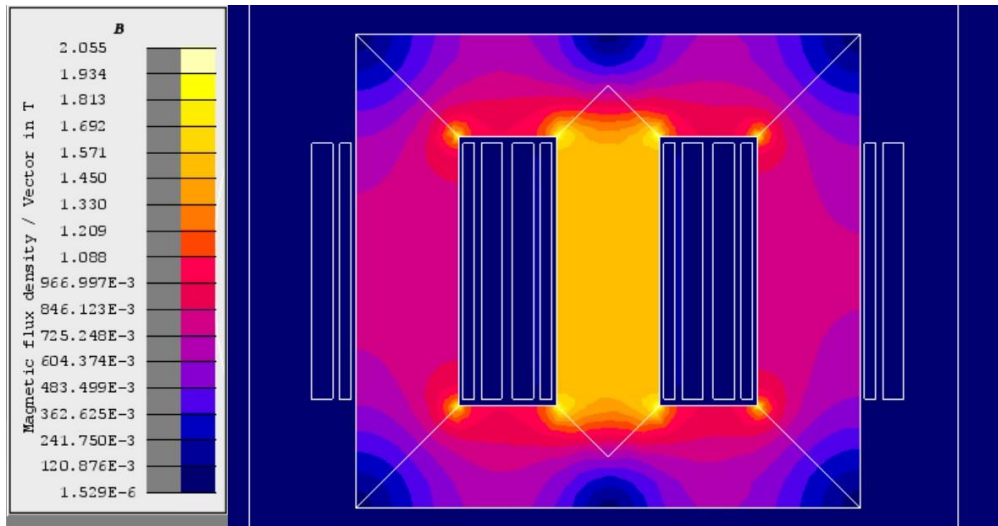


(ج)

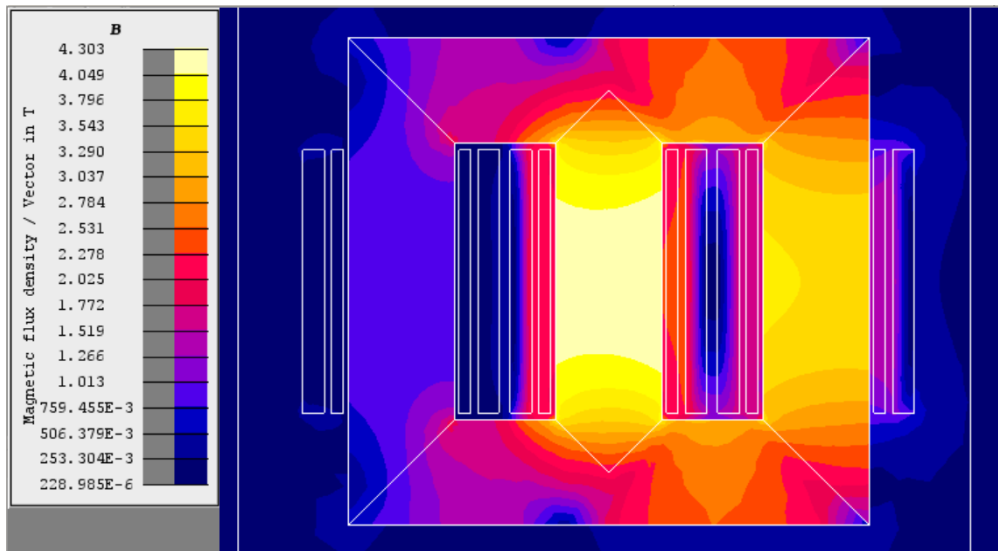


(د)

شکل (۹): نیروهای لورنتس: الف) اندازه کل نیرو، ب) اندازه مولفه شعاعی، ج) اندازه مولفه محوری، د) زاویه نیرو
Fig. (9): The Lorentz forces: a) Magnitude, b) X component, c) Y component, d) Direction

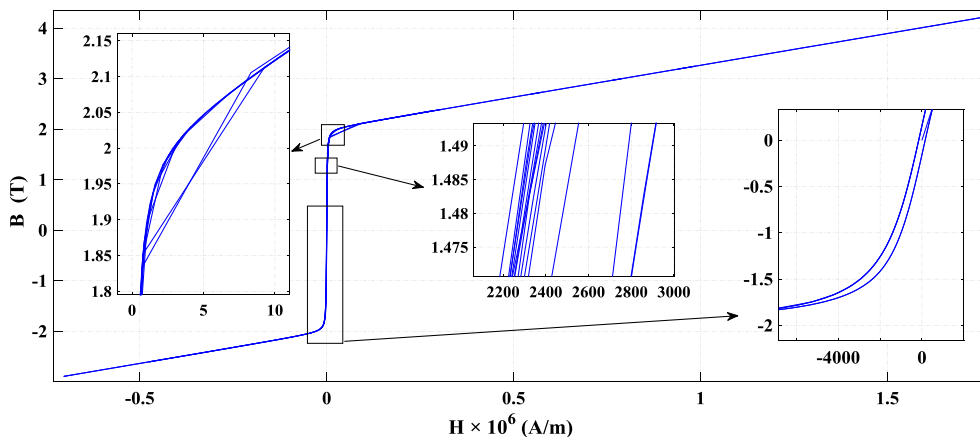


(الف)



(ب)

شکل (۱۰): توزیع چگالی شار در ترانسفورماتور: (الف) قبل از فرورزونانس، (ب) بعد از فرورزونانس ($t=0.29$ s)
Fig. (10): The flux density distribution in transformer: a) Before ferroresonance, b) After ferroresonance



شکل ۱۱- حلقه‌های هیستریزیس به دست آمده از شبیه‌سازی

Fig. 11. The hysteresis loops

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یکی از حالات ممکن برای پدیده فرورزونانس، با در نظر گرفتن مدار معادل یک خط متوسط و خطای اتصال کوتاه سه فاز متوالی، بررسی و در محیط شبیه‌سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. در نتایج به دست آمده، جریان‌های غیرسینوسی هارمونیک‌دار توسط ترانسفورماتور توزیع، با توجه به غیرخطی بودن مشخصه مغناطیسی آن، و خازن معادل طول خط تولید شدند. این جریان‌های اضافی عبوری از سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور باعث تولید نیروهای الکترومغناطیسی اضافی می‌شود که اثرات نامطلوبی در آن دارد. جابه‌جایی نامتقارن و حرکت جزئی سیم‌پیچی‌ها به سمت هم، و تولید تلفات آهنی نمونه‌ای از این اثرات هستند. علاوه بر این، گرمای اضافی تولید شده توسط تلفات اهمی سیم‌پیچی‌ها باعث بالا رفتن دمای روغن ترانسفورماتور خواهد شد که می‌تواند باعث کاهش مقاومت حرارتی آنها شود. به‌طور خلاصه، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های مقاله می‌توانند به شرح زیر توضیح داد:

- پدیده فرورزونانس، به علت مشخصه غیرخطی مغناطیسی هسته آهنی ترانسفورماتور، یک پدیده غیرخطی است و مدل‌سازی مشخصه هسته آهنی با دقت بالا منجر به بالا رفتن دقت نتایج به دست آمده خواهد شد.
- ولتاژها و جریان‌های هر دو سمت ترانسفورماتور به صورت هارمونیک‌دار ظاهر شدند و جریان ترانسفورماتور افزایش یافت که باعث افزایش تولید گرما در سیم‌پیچی‌ها می‌شود.
- جریان‌های هجومی تولید شده باعث تولید نیروهای الکترومغناطیسی اضافی شدند که تقارن نصب را بهم زدند؛ به‌طوری که سیم‌پیچی‌ها به سمت داخل یا بیرون هدایت می‌شدند.
- حداکثر چگالی شار مغناطیسی در حالتی که ترانسفورماتور تحت فرورزونانس بود، به میزان تقریباً دو برابر افزایش یافت که باعث افزایش تلفات آهنی در هسته ترانسفورماتور می‌شود.
- حلقه‌های هیستریزس هسته ترانسفورماتور از هر دو طرف کشیده شدند و شدت شار مغناطیسی در این حالت افزایش قابل توجهی داشت.

بر اساس نتایج به دست آمده از این مقاله، مطالعه پدیده فرورزونانس با حالات مختلف عملکردی آن یک موضوع مهم است که اثرات منفی این پدیده گذرا را می‌تواند بهتر نشان دهد. پیشنهاد مقاله برای بررسی ادامه روند تحلیل‌های این پدیده، مطالعه حرارتی (تغییرات دمایی سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور) در حالت‌های مختلف است.

References

مراجع

- [1] R. D. Evans, A. C. Monteith, and R. L. Witzke, "Power-system transients caused by switching and faults", IEEE Electrical Engineering, vol. 58, no. 8, pp. 386–396, Aug. 1939 (doi: 10.1109/T-AIEE.1939.5057978).
- [2] A. Tokić, and J. Smajčić, "Modeling and simulations of ferroresonance by using bdf/ndf numerical methods", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 30, no. 1, pp. 342–350, Sep. 2015 (doi: 10.1109/TPWRD.2014.2346766).
- [3] W. Sima, M. Yang, Q. Yang, T. Yuan, and M. Zou, "Simulation and experiment on a flexible control method for ferroresonance", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 8, no. 10, pp. 1744–1753, May. 2014 (doi: 10.1049/iet-gtd.2014.0046).
- [4] P. H. Odessey, and E. Weber, "Critical conditions in ferroresonance", Electrical Engineering, vol. 57, no. 8, pp. 444–452, Aug. 1938 (doi: 10.1109/EE.1938.6430867).
- [5] J. T. Salihi, "Theory of ferroresonance", Trans. of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics, vol. 78, no. 6, pp. 755–763, Jan. 1960 (doi: 10.1109/TCE.1960.6368465).
- [6] J. C. Davidson, "The phenomenon of ferroresonance", Students' Quarterly Journal, vol. 41, no. 161, pp. 172–175, Sep. 1970 (doi: 10.1049/sqj.1970.0067).
- [7] E. F. Kratz, L. W. Manning, and M. Maxwell, "Ferroresonance in series capacitor–distribution transformer applications", IEEE Trans. of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, vol. 78, no. 3, pp. 438–445, Apr. 1959 (doi: 10.1109/AIEEPAS.1959.4500349).
- [8] R. F. Karliceck, and E. R. Taylor, "Ferroresonance of grounded potential transformers on ungrounded power systems", IEEE Trans. of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, vol. 78, no. 3, pp. 607–614, Apr. 1959 (doi: 10.1109/AIEEPAS.1959.4500391).

- [9] R. H. Hopkinson, "Ferroresonance during single-phase switching of 3-phase distribution transformer banks", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 84, no. 4, pp. 289–293, Apr. 1965 (doi: 10.1109/TPAS.1965.4766193).
- [10] A. E. A. Araujo, A. C. Soudack, and J. R. Marti, "Ferroresonance in power systems: chaotic behavior", *IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 140, no. 3, pp. 237–240, May. 1993 (doi: 10.1049/ip-c.1993.0035).
- [11] H. Abdi, S. Abbasi, and M. Moradi, "Analyzing the stochastic behavior of ferroresonance initiation regarding initial conditions and system parameters", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 63, pp. 134–139, Dec. 2016 (doi: 10.1016/j.ijepes.2016.04.016).
- [12] M. Esmaeili, M. Rostami, G. B. Gharehpetian, and C. P. McInnis, "Ferroresonance after islanding of synchronous machine-based distributed generation", *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 154–161, May. 2015 (doi: 10.1109/CJECE.2015.2411713).
- [13] U. Karaagac, J. Mahseredjian, and L. Cai, "Ferroresonance conditions in wind parks", *Electric Power Systems Research*, vol. 138, pp. 41–49, Sep. 2016 (doi: 10.1016/j.epsr.2016.04.007).
- [14] R. P. Pineda, R. Rodrigues, and A. A. Telléz, "Analysis and simulation of ferroresonance in power transformers using simulink", *IEEE Latin America Trans.*, vol. 16, no. 2, pp. 460–466, Mar. 2018 (doi: 10.1109/TLA.2018.8327400).
- [15] E. Cazacu, V. Ionita, and Lucian Petrescu, "An efficient method for investigating the ferroresonance of single-phase iron core devices", *The 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering*, Bucharest: Romania, pp. 363–368, 23-25 Mar. 2017 (doi: 10.1109/ATEE.2017.7905167).
- [16] J. A. Corea-Araujo, F. González-Molina, J. A. Martínez, F. Castro-Aranda, J. A. Barrado-Rodrigo, and L. Guasch-Pesquer, "Single-phase transformer model validation for ferroresonance analysis including hysteresis", *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Denver: CO: USA, 26-30 Jul. 2015 (doi: 10.1109/PESGM.2015.7285872).
- [17] P. S. Moses, M. A. S. Masoum, and H. A. Toliyat, "Impacts of hysteresis and magnetic couplings on the stability domain of ferroresonance in asymmetric three-phase three-leg transformers", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 26, no. 2, pp. 581–592, Dec. 2011 (doi: 10.1109/TEC.2010.2088400).
- [18] A. Rezaei-Zare, M. Sanaye-Pasand, H. Mohseni, S. Farhangi, and R. Irvani, "Analysis of ferroresonance modes in power transformers using preisach-type hysteretic magnetizing inductance", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 26, no. 2, pp. 919–929, Apr. 2007 (doi: 10.1109/TPWRD.2006.877078).
- [19] M. Yang, W. Sima, L. Chen, P. Duan, P. Sun, and T. Yuan, "Suppressing ferroresonance in potential transformers using a model-free active-resistance controller", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 95, pp. 384–393, Feb. 2018 (doi: 10.1016/j.ijepes.2017.08.035).
- [20] T. C. Akinci, N. Ekren, S. Seker, and S. Yildirim, "Continuous wavelet transform for ferroresonance phenomena in electric power systems", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 44, pp. 403–409, Jan. 2013 (doi: 10.1016/j.ijepes.2012.07.001).
- [21] H. Radmanesh, and G. B. Gharehpetian, "Ferroresonance suppression in power transformers using chaos theory", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 45, pp. 1–9, Feb. 2013 (doi: 10.1016/j.ijepes.2012.08.028).
- [22] M. Yang et al., "Electromagnetic transient study on flexible control processes of ferroresonance", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 93, pp. 194–203, Dec. 2017 (doi: 10.1016/j.ijepes.2017.05.026).
- [23] B. Rezaealam, B. Norouzi, "Investigating ferroresonance phenomenon in a single-phase transformer with the effect of magnetic hysteresis", *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 2, no. 2, pp. 248–258, May. 2016 (doi: 10.11591/ijeecs.v2.i2.pp248-258).
- [24] C. A. Charalambous, Z. Wang, P. Jarman, and J. P. Sturgess, "Time-domain finite-element technique for quantifying the effect of sustained ferroresonance on power transformer core bolts", *IET Electric Power Applications*, vol. 8, no. 6, pp. 221–231, Mar. 2014 (doi: 10.1049/iet-epa.2013.0330).
- [25] C. A. Charalambous, Z. D. Wang, P. Jarman, and M. Osborne, "2-D finite-element electromagnetic analysis of an autotransformer experiencing ferroresonance", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 24, no. 3, pp. 1275–1283, Apr. 2009 (doi: 10.1109/TPWRD.2009.2016629).
- [26] A. Arroyo, R. Martinez, M. Manana, A. Pigazo, R. Minguez, "Detection of ferroresonance occurrence in inductive voltage transformers through vibration analysis", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 106, pp. 294–300, Mar. 2019 (doi: 10.1016/j.ijepes.2018.10.011).
- [27] V. Valverde, G. Buigues, A. J. Mazón, I. Zamora, I. Albizu, "Ferroresonant configurations in power systems", *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12)*, Santiago de Compostela, Spain, 28–30 March, vol. 1, no. 10, pp. 474–479, Mar. 2012 (doi: 10.24084/repqj10.351).
- [28] A. Djebli, F. Aboura, L. Roubache, O. Touhami, "Impact of the eddy current in the lamination on ferroresonance stability at critical points", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 106, pp. 311–319, Mar. 2019 (doi: 10.1016/j.ijepes.2018.10.008).

- [29] M. M. Beyranvand, B. Rezaeealam, J. Faiz, A. R. Zare, "Impacts of ferroresonance and inrush current forces on transformer windings", *IET Electric Power Applications*, vol. 13, no. 7, pp. 914–921, Feb. 2019 (doi: 10.1049/iet-epa.2018.5193).
- [30] Alexandre B. Nassif, M. Dong, S. Kumar, G. Vanderstar, "Managing ferroresonance overvoltages in distribution systems", *IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, Edmonton, AB, Canada, 5–8 May 2019 (doi: 10.1109/CCECE.2019.8861797).
- [31] M. Navaei, A. A. Abdoos, M. Shahabi, "A new control unit for electronic ferroresonance suppression circuit in capacitor voltage transformers", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 99, pp. 281–289, Jul. 2018 (doi: 10.1016/j.ijepes.2018.01.021).
- [32] F. Delinc, A. Nicolet, W. Legros, and A. Genon, "Analysis of ferroresonance with a finite element method taking hysteresis into account", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 133, pp. 557–560, May. 1994 (doi: 10.1016/0304-8853(94)90621-1).
- [33] A. G. MacPhee, S. McKee, and R. R. S. Simpson, "Ferroresonance in electrical systems", *COMPEL—The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 265–273, Jun. 2002 (doi: 10.1108/03321640210416359).
- [34] W. Sima, M. Zou, M. Yang, D. Peng, and Y. Liu, "Saturable reactor hysteresis model based on Jiles–Atherton formulation for ferroresonance studies", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 101, pp. 482–490, Oct. 2018 (doi: 10.1016/j.ijepes.2018.04.003).
- [35] M. M. Beyranvand, and B. Rezaeealam, "Finite element study of ferroresonance in single–phase transformers considering magnetic hysteresis", *Journal of Magnetism*, vol. 22, no. 2, pp. 196–202, Apr. 2017 (doi: 10.4283/JMAG.2017.22.2.196).
- [36] J. Gyselinck, P. Dular, N. Sadowski, J. Leite and J. P. A. Bastos, "Incorporation of a Jiles–Atherton vector hysteresis model in 2D FE magnetic field computations, application of the Newton–Raphson method", *COMPEL—The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 23, no. 3, pp. 685–693, Sep. 2004 (doi: 10.1108/03321640410540601).
- [37] J. Gyselinck, L. Vandeveld, J. Melkebeek, and P. Dular, "Complementary two-dimensional finite element formulations with inclusion of a vectorized Jiles–Atherton model", *COMPEL—The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 23, no. 4, pp. 959–967, Dec. 2004 (doi: 10.1108/03321640410553382).
- [38] C. Guérin, K. Jacques, R. V. Sabariego, P. Dular, C. Geuzaine, and J. Gyselinck, "Using a Jiles–Atherton vector hysteresis model for isotropic magnetic materials with the finite element method, Newton–Raphson method, and relaxation procedure", *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, vol. 30, no. 5, pp. 1–12, Sep. 2017 (doi: 10.1002/jnm.2189).
- [39] K. Chwastek, "The applications of fixed-point theorem in optimisation problems", *Archives of Electrical Engineering*, vol. 61, no. 2, pp. 189–198, Jun. 2012 (doi: 10.2478/v10171-012-0016-0).

زیر نویس ها:

1. Switching
2. Short–circuit
3. Ferroresonance
4. Distributed generation
5. Hysteresis loops
6. Ferrite
7. Finite element method
8. Yoke
9. Silicon–steel
10. Fundamental
11. Sub–harmonic
12. Quasi–periodic
13. Chaotic
14. Lorentz force
15. 3–Phase breakers