

بررسی حالت آشفته پدیده فرورزناسی در یک ترانسفورماتور تک فاز

بهزاد نوروزی، بهروز رضایی علم

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه لرستان

۲- دانشیار دانشگاه لرستان

Behzad_noroozi@yahoo.com-Rezaee.bh@lu.ac.ir

چکیده

فرورزناسی یک پدیده غیرخطی و بسیار پویا در مسائل کیفیت توان است. فرورزناسی بیشتر در شبکه‌های ولتاژ متوسط با تغذیه ترانسفورماتورهای بی‌بار یا بار اندک توسط کابل دیده می‌شود. این پدیده بر روی یک ترانس تک فاز بررسی شده است. با استفاده از روش اجزا محدود به کمک نرم‌افزار COMSOL Multiphysics، ترانسفورماتور در فضای دوبعدی شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی‌های انجام نشان می‌دهد، در حالت آشفته فرورزناسی شکل موج ولتاژ و جریان از حالت سینوسی خارج می‌شود. همچنین طیف فرکانسی متغیر مدار هارمونیک‌های فراوانی را در حالت آشفته نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: ترانس تک فاز، فرورزناسی، COMSOL Multiphysics

۱. مقدمه

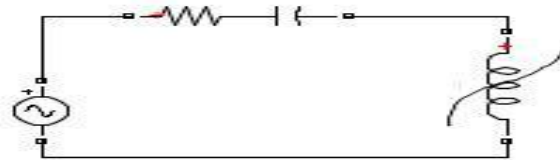
فرورزناسی یک پدیده غیرخطی است که بین خازن شبکه و اندوکتانس غیرخطی تجهیزات نظیر راکتور ترانسفورماتورها رخ می‌دهد. در شرایط بی‌باری یا بار اندک، با بروز اغتشاشات سیم‌پیچ ترانسفورماتور از طریق خازن خطوط و سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور مدار رزونانس تشکیل می‌دهد و با اشباع شدن هسته ترانسفورماتور، فرورزناسی تحقق می‌یابد [۱]. اگرچه رزونانس نیز شامل یک خازن و یک اندوکتانس است، اما به‌طور قطع فرکانس رزونانسی که در آن فرورزناسی رخ می‌دهد، وجود ندارد. به‌گونه‌ای که در پدیده فرورزناسی، بیش از یک پاسخ برای مجموعه‌ای از پارامترهای یکسان وجود دارد [۲]. در حالت فرورزناسی رابطه ولتاژ و جریان علاوه بر فرکانس به عوامل دیگری نظیر ولتاژ، شرایط اولیه و تلفات مدار وابسته است [۳]. در سال‌های اخیر پژوهش‌های مختلفی در زمینه فرورزناسی صورت گرفته است [۴-۶]. مرجع [۷] پدیده فرورزناسی را بر روی یک ترانسفورماتور به روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار داده است. در این مقاله حالت آشفته فرورزناسی با استفاده از مدل اجزا محدود، در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش ۲ به مبانی پدیده فرورزناسی جهت تفهیم هرچه بهتر این پدیده پرداخته شده است. در بخش ۳ توضیح مختصری پیرامون روش المان محدود به کمک نرم‌افزار مربوطه ارائه شده است. در بخش ۴ پارامترهای لازم جهت شبیه‌سازی آورده شده است. در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است.

۲. مبانی پدیده فرورزناسی

هنگامی که هسته‌های فرو مغناطیسی تجهیزات فشارقوی اشباع و در مدار به‌صورت سری با خاصیت خازنی قرار می‌گیرند، شرایط برای پدیده فرورزناسی فراهم می‌شود. در سیستم‌های قدرت، ترانسفورماتورها به‌طور عمده توسط کابل‌ها تغذیه می‌شوند. کابل‌ها خاصیت خازنی بالا برخوردارند و به‌طور سری با سیم‌پیچ ترانسفورماتورهای مجهز به هسته فرو مغناطیسی قرار گرفته‌اند [۸]. فرورزناسی از نوع اضافه ولتاژهای موقت است و انواع مختلفی دارد. این پدیده از جنبه‌های دامنه و

مدت زمان و هارمونیک های موجود در آن قابل بحث و بررسی است. اگر موجی با دامنه زیاد و هارمونیک های بیشتر در مدت زمان طولانی بر روی تجهیزات وجود داشته باشد، موجب خسارت و حتی تخریب آن می شود. به عنوان مثال وجود ولتاژ هارمونیک بر روی ترانسفورماتور سبب گرم شدن و صدمه دیدن سیم پیچ های ترانسفورماتور می شود. بنابراین باید از وجود این عامل که تحت پدیده فرورزنانس بر روی ترانسفورماتور است، جلوگیری نمود.

شکل (۱) مدار معادل پدیده فرورزنانس را نشان می دهد که در آن سلف دارای مشخصه غیرخطی است. با عبور جریان از مدار، خازن شارژ می شود. ولتاژ ذخیره شده در خازن را می توان DC فرض نمود که در دوسر راکتانس مغناطیس شوندگی ترانسفورماتور قرار گرفته و باعث می شود تا هسته به اشباع برود. راکتانس مغناطیس شوندگی کاهش یافته و فرورزنانس رخ می دهد. بنابراین فرورزنانس یک پدیده غیرخطی بوده که تابع پارامترهایی شامل ولتاژ القاشده، مشخصه مغناطیس شوندگی، تلفات و خازن مدار است.



شکل (۱): مدار فرورزنانس

۳. روش اجزا محدود

ح در ریاضیات روش المان محدود (FEM^۱) یک روش عددی برای حل تقریبی مسائل مرزی است. این روش مشابه ایده اتصال بسیاری از خطوط کوچک مستقیم است که می تواند یک دایره بزرگ تر را تقریب بزند. FEM شامل تمام روش ها برای اتصال بسیاری از معادلات عناصر ساده در طول بسیاری از زیر دامنه های کوچک (که عناصر محدود نامیده می شوند) است. و یک معادله پیچیده تر را با یک دامنه بزرگ تر تقریب می زند [۹]. به طور کل FEM شامل سه ماتریس اصلی، که عبارتند از: ماتریس مالکیت، ماتریس رفتار و ماتریس عمل.

$$\{K\}\{U\} = \{F\} \quad (۹)$$

در کاربردهای الکتریکی، $\{K\}$ می تواند نشان دهنده ثابت گذردهی الکتریک، $\{U\}$ نشان دهنده پتانسیل و $\{F\}$ بار الکتریکی است [۱۵].

از روش اجزا محدود به کمک نرم افزار Comsol Multiphysics جهت شبیه سازی کامپیوتری استفاده شده است [۱۰]. این نرم افزار معادلات سیستم های غیرخطی را توسط مشتقات جزئی با حضور میدان الکترومغناطیسی و ... حل می نماید. همچنین در آن امکان تعریف مدارات الکتریکی نظیر بار، مقاومت، سلف، خازن و ... به همراه میدان مغناطیسی وجود دارد.

^۱ Finite Element Magnetic

۴. تعیین پارامترها

برای بررسی پدیده فرورزنانس از یک سری تجهیزات متشکل از یک ترانسفورماتور تک فاز با سیم پیچ اولیه به صورت سری با خازن استفاده شده است. ترانسفورماتور استفاده شده با ولتاژ ۲۲۰ ولت و فرکانس ۶۰ هرتز در مدار قرار گرفته است. مشخصات ترانسفورماتور در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین ابعاد هندسی ترانسفورماتور در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات ترانسفورماتور مورد مطالعه

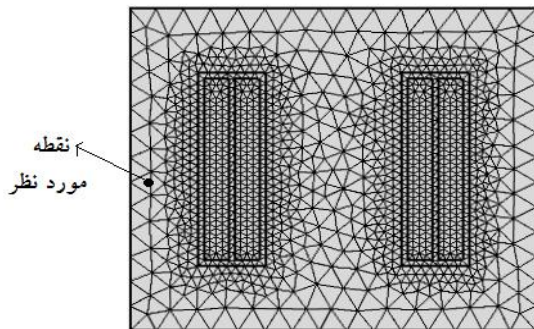
پارامتر	مقدار
توان نامی	۲۰ W
ولتاژ	۲۲۰/۱۲ V
فرکانس	۵۰ Hz
تعداد دور اولیه	۱۶۰۰
تعداد دور ثانویه	۹۰



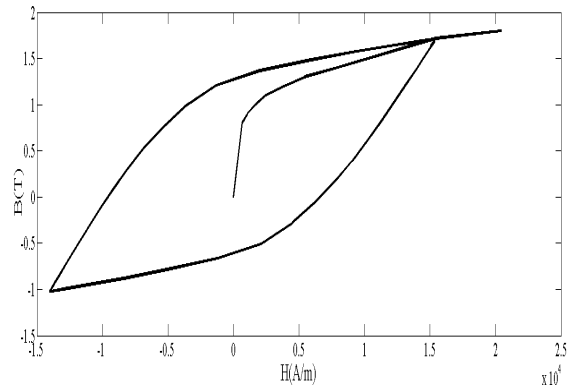
شکل ۲: ابعاد هندسی ترانسفورماتور (x=11 mm)

۵. نتایج شبیه سازی

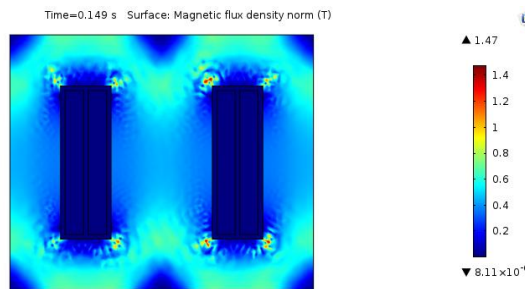
بررسی ترانسفورماتور مورد نظر در نرم افزار کامسول در فضای دوبعدی صورت گرفته است. شکل (۳) مدل دوبعدی ترانسفورماتور را نشان می دهد. شکل (۴) مسیر حرکت شار مغناطیسی را برای یک نقطه مورد نظر از هسته ترانسفورماتور نشان می دهد. شکل (۵) توزیع چگالی شار مغناطیسی را قبل از وقوع فرورزنانس نشان می دهد. منحنی جریان اولیه و ثانویه ترانسفورماتور در حالت کار عادی در شکل (۶) ارائه شده است.



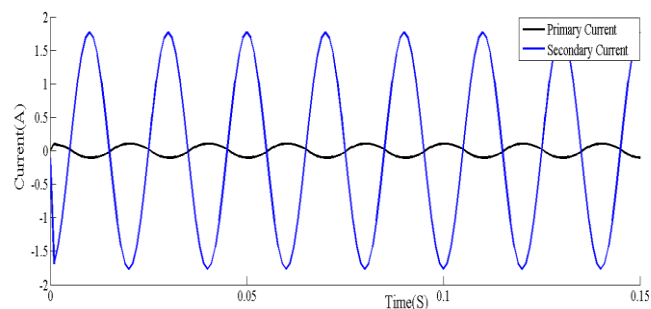
شکل ۳: مدل دوبعدی ترانسفورماتور



شکل ۴: منحنی چگالی شار



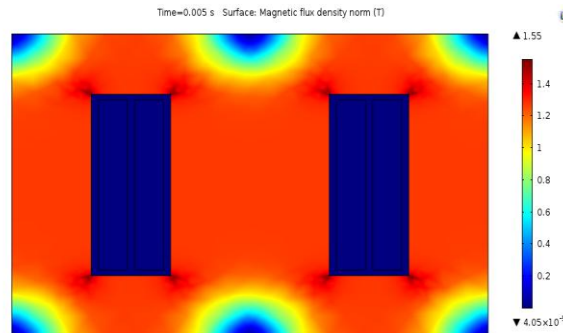
شکل ۵: توزیع چگالی شار قبل از وقوع فرورزنانس



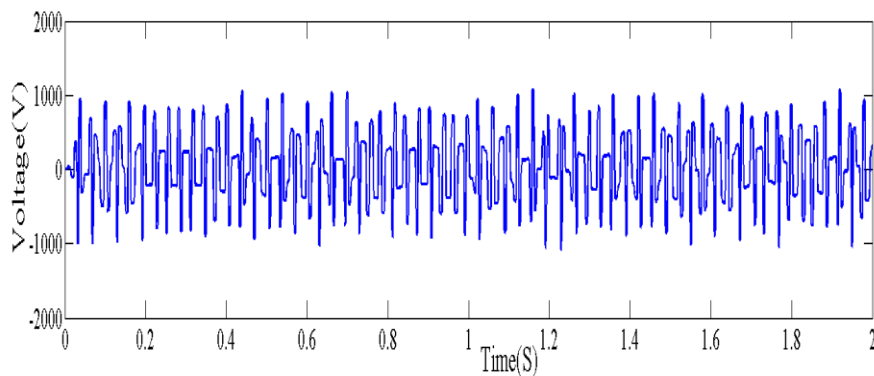
شکل ۶: منحنی جریان اولیه و ثانویه در حالت کار عادی

در صورتی که ظرفیت خازنی خطوط، سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور و یا بار متصل به ترانسفورماتور اثر سلفی سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور را خنثی کنند، فرورزنانس اتفاق افتاده و باعث ایجاد جریان‌های نامتعادل و ولتاژهای بزرگ در ترانسفورماتور

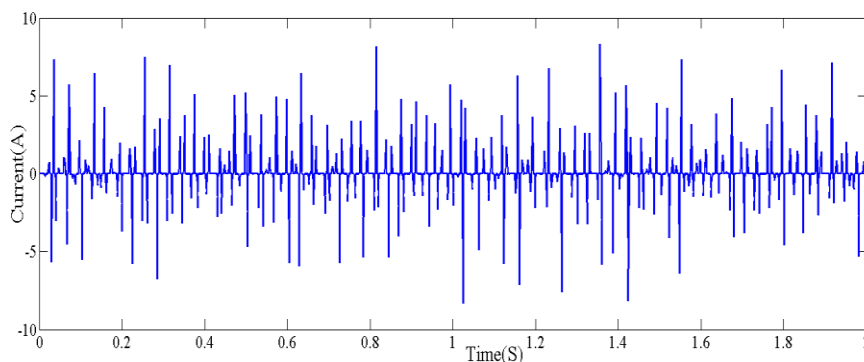
می شود. هنگام وقوع فرورزنانس هسته ترانسفورماتور وارد اشباع مغناطیسی می شود. این موضوع در (۷) نشان داده شده است. در این حالت منحنی جریان و ولتاژ از حالت سینوسی خارج می شوند. دامنه ولتاژ و جریان به میزان زیادی افزایش یافته است. در حالت فرورزنانس آشفتگی شکل موج مدار به صورت کاملاً غیر پریودیک است. شکل (۸) و (۹) به ترتیب شکل موج ولتاژ و جریان را حین وقوع فرورزنانس نشان می دهد. طیف فرکانسی متغیرهای مدار به صورت پیوسته است و وجود هارمونیک های مختلف در مدار را نشان می دهد. شکل (۸) طیف فرکانسی ولتاژ خازن را هنگام وقوع فرورزنانس نشان می دهد.



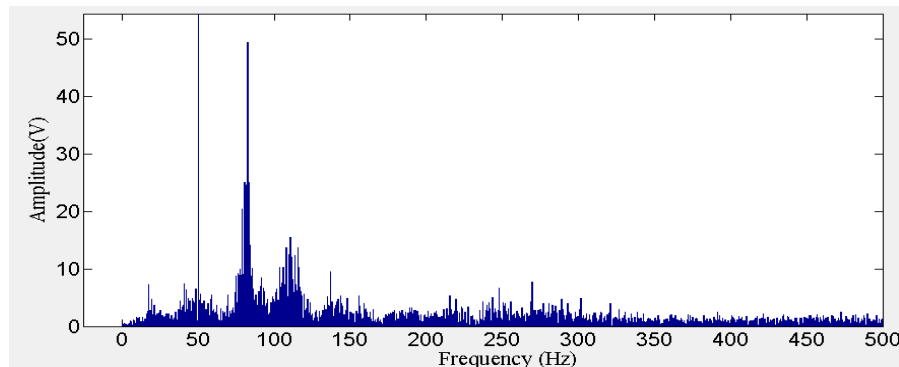
شکل ۷: توزیع چگالی شار حین وقوع فرورزنانس



شکل ۸: شکل موج ولتاژ در حالت وقوع فرورزنانس



شکل ۹: شکل موج جریان در حالت وقوع فرورزنانس



شکل ۱۰: طیف فرکانسی ولتاژ

۱۰. نتیجه‌گیری

در این مقاله با بهره‌گیری از روش اجزا محدود، پدیده فرورزونانس در ترانسفورماتورها مورد مطالعه قرار گرفته است. این پدیده بر روی یک ترانسفورماتور تک فاز بررسی شده است. در این پژوهش منحنی اشباع مطابق با نوع هسته آهنی به کار گرفته شده در ترانسفورماتورهای معمولی است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد، هنگام وقوع فرورزونانس هسته مغناطیسی بیش از حد وارد اشباع مغناطیسی می‌شود. شکل موج جریان و ولتاژ از حالت سینوسی خارج شده و دامنه ولتاژ و جریان تا حد زیادی افزایش می‌یابد. این افزایش دامنه در ترانسفورماتورهای قدرت موجب شکست عایقی و گرم‌تر شدن ترانسفورماتور می‌شود. همچنین وجود هارمونیک‌های مختلف در حالت آشفته فرورزونانس نشان داده شده است.

۱۲. مراجع

1. Miroslav poljak, Tomislav Kelemen, Boris Bojanic ,” New experience with ferroresonance”, Technical Bulletin of Koncar
2. B. A. Mork and D. L. Stuehm, “Application of nonlinear dynamics an Chaos to Ferroresonance in Distribution Systems,” IEEE Transactions on power delivery, Vol. ۹, No. ۲, ۱۹۹۴, pp. ۱۰۰۹-۱۰۱۷.
3. Tong, Y.K , “ NGC experience on ferroresonance in power transformers and voltage transformers on HV transmission systems ” IEE Colloquium on , ۱۲ Nov ۱۹۹۷, Page : ۴/۱ - ۴/۳.A.
4. Irvani M. R., Chaudhary A. K. S., Giesbrecht W. J., et. Al. “Modeling and analysis guidelines for slow transients—Part III: The Study of Ferroresonance”, Slow transients task force of the IEEE working group on modeling and analysis of systems transients using digital programs, IEEE Trans. On power delivery, Vol. ۱۵, No. ۱, Jan. ۲۰۰۰
5. 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.
6. A. Rezaei-Zare, R. Irvani and M. Sanaye-Pasand, “Impacts of Transformer Core Hysteresis Formation on Stability Domain of Ferroresonance Modes,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. ۲۴, No. ۱, ۲۰۰۹, pp. ۱۷۷-۱۸۶.
7. C. A. Charalambous, Z. D. Wang, P. Jarman and M. Osborne, “۲-D Finite-Element electromagnetic analysis of an autotransformer experiencing ferroresonance,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. ۲۴, No. ۳, July ۲۰۰۹, pp. ۱۲۷۵-۱۲۸۳.
8. Valverde, G. Buigues, A. J. Mazón, I. Zamora, I. Albizu, ” Ferroresonant configurations in power systems”, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, ICREPQ’۱۲
9. Wikipedia [online]. http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method , July ۱۰, ۲۰۱۲
۱۰. COMSOL, MULTIPHYSICS©(FEMLAB), [online]. <http://www.comsol.com>