

بررسی پدیده فرورزناس در یک ترانسفورماتور تک فاز با در نظر گرفتن اثر هیستریزیس مغناطیسی

بهرروز رضایی علم ، بهزاد نوروزی ، فرهاد نامداری

۱- دانشیار دانشگاه لرستان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه لرستان

۳- استادیار دانشگاه لرستان

Email: Rezaee.bh@lu.ac.ir-Behzad_noroozi@yahoo.com-namdari.f@lu.ac.ir

چکیده

فرورزناس یک پدیده غیرخطی و بسیار پویا در مسائل کیفیت توان است. این پدیده باید به دقت آنالیز شود تا بتوان اقدامات پیشگیرانه‌ای قبل از بروز آن اتخاذ گردد تا از صدمه و آسیب دیدن وسایل الکتریکی جلوگیری شود. فرورزناس بیشتر در شبکه‌های ولتاژ متوسط با تغذیه ترانسفورماتورهای بی‌بار یا بار اندک توسط کابل دیده می‌شود. مشخصه هسته مغناطیسی در وقوع پدیده فرورزناس نقش مهمی را ایفا می‌کند. در این مقاله علاوه بر منحنی اشباع، اثر تلفات هیستریزیس در نظر گرفته شده است. این پدیده بر روی یک ترانس تک فاز بررسی شده است. برای مدل‌سازی حلقه هیستریزیس از روش جایلز-آرتون (J-A) استفاده شده است. با استفاده از روش اجزا محدود به کمک نرم‌افزار کامسول^۲، ترانسفورماتور در فضای دوبعدی شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد، جهت تحلیل پدیده فرورزناس هسته مغناطیسی باید در حد امکان دقیق مدل‌سازی شود و هیستریزیس هسته باید در مدل‌سازی لحاظ شود.

کلمات کلیدی: تلفات هیستریزیس، فرورزناس، کامسول، مدل جایلز آرتون

۱. مقدمه

فرورزناس یک پدیده غیرخطی است که بین خازن شبکه و اندوکتانس غیرخطی تجهیزات نظیر راکتور ترانسفورماتور 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، فرورزناس تحقق می‌یابد [۱]. اگرچه رزونانس نیز شامل یک خازن و یک اندوکتانس است، اما به‌طور قطع فرکانس رزونانسی که در آن فرورزناس رخ می‌دهد، وجود ندارد. به‌گونه‌ای که در پدیده فرورزناس، بیش از یک پاسخ برای مجموعه‌ای از پارامترهای یکسان وجود دارد [۲]. در حالت فرورزناس رابطه ولتاژ و جریان علاوه بر فرکانس به عوامل دیگری نظیر ولتاژ، شرایط اولیه و تلفات مدار وابسته است [۳]. یکی از عوامل مهم وجود اثرات تلفات هیستریزیس است که نقش مهمی را در رفتار فرورزناسی ایجاد می‌کند [۴-۵]. تحقیقات انجام شده پیرامون فرورزناس نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی حساسیت زیادی به روش تعریف مشخصه اشباع مغناطیسی و تلفات هسته دارد [۶]. تلفات هیستریزیس هسته به فرکانس و سطح محصور در منحنی هیستریزیس و در نتیجه به مدل هیستریزیس وابسته است. بنابراین برای مدل‌سازی مشخصه مغناطیسی و هیستریزیس هسته از مدل دقیق‌تری استفاده کرد.

امروزه محاسبه تلفات هیستریزیس به روش اجزاء محدود بیش‌ازپیش توسط علوم کامپیوتری مورد توجه قرار گرفته است [۷]. مرجع [۸] پدیده فرورزناس را بر روی یک ترانسفورماتور به روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار داده است، اما مدل دقیقی از هیستریزیس را ارائه نمی‌کند. روش‌های متفاوتی برای مدل‌سازی هیستریزیس ارائه شده است، که در این بین مدل جایلز-آرتون [۹] و مدل پریزاک [۱۰] مدل‌های دقیقی از تلفات هیستریزیس را فراهم می‌کنند. در مرجع [۱۱] کنترل نوسانات فرورزناس با در نظر گرفتن اثر تلفات غیرخطی بررسی شده است. در مرجع [۱۲] مدل جدیدی از هیستریزیس بر اساس تئوری پریزاک با فرمول‌بندی جدید در نرم‌افزار

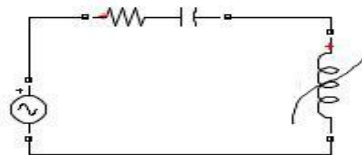
^۱ Jiles_Atherton metod

^۲ COMSOL Multyphysics

ATP ارائه شده است. در این مقاله از روش جایگزین آرتون برای مدل سازی تلفات هیستریزیس استفاده شده است. بررسی پدیده فرورزناس با در نظر گرفتن اثر هیستریزیس بر روی یک ترانسفورماتور تک فاز صورت گرفته است. در بخش ۲ به مبانی پدیده فرورزناس جهت تفهیم هرچه بهتر این پدیده پرداخته شده است. در بخش ۳ توضیح مختصری از طریقه در نظر گرفتن مدل هیستریزیس و نحوه محاسبه تلفات هیستریزیس ارائه شده است. در بخش ۴ نتایج شبیه سازی آورده شده است.

۲. مبانی پدیده فرورزناس

هنگامی که هسته های فرو مغناطیسی تجهیزات فشارقوی اشباع و در مدار به صورت سری با خاصیت خازنی قرار می گیرند، شرایط برای پدیده فرورزناس فراهم می شود. در سیستم های قدرت، ترانسفورماتورها به طور عمده توسط کابل ها تغذیه می شوند. کابل ها خاصیت خازنی بالا برخوردارند و به طور سری با سیم پیچ ترانسفورماتورهای مجهز به هسته فرو مغناطیسی قرار گرفته اند [۱۳]. فرورزناس از نوع اضافه ولتاژهای موقت است و انواع مختلفی دارد. این پدیده از جنبه های 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 فرورزناس بر روی ترانسفورماتور است، جلوگیری نمود. شکل (۱) مدار معادل پدیده فرورزناس 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 فرورزناس رخ می دهد. بنابراین فرورزناس یک پدیده غیر خطی بوده که تابع پارامترهایی شامل ولتاژ القا شده، مشخصه مغناطیس شوندگی، تلفات و خازن مدار است.



شکل ۱: مدار معادل فرورزناس

۳. مدل هیستریزیس

با پیشرفت فناوری امکان در نظر گرفتن مدل کامل تر مواد فرو مغناطیسی ایجاد شده است. شاخص ترین رفتاری که مواد فرو مغناطیسی از خود نشان می دهند، رفتار هیستریزیس است که در ساده ترین حالت موجب می شود مسیر بدون مغناطیسی شدن ماده از مسیر مغناطیسی شدن آن تفاوت پیدا کند. روش جایگزین آرتون (J-A) به دلیل سهولت پیاده سازی همچنین دقت بالا استفاده شده است. این مدل مبنی بر تعادل انرژی در مواد فرو مغناطیس است به طوری که کل انرژی در طول یک دوره به صورت انرژی مغناطیسی ذخیره می شود (W_m) و یا به صورت تلفات هیستریزیس (W_h) تلف می شود.

$$W = W_m + W_h \quad (1)$$

بر اساس این فرض و [۱۰] معادله زیر برای تمام مواد فرو مغناطیس به دست می آید:

$$M = M_{rev} + M_{irr} \quad (2)$$

که در آن M مغناطیس شوندگی ماده، M_{rev} مغناطیس شوندگی برگشت پذیر و M_{irr} مغناطیس شوندگی برگشت ناپذیر ماده است.

$$M_{an}(H_e) = M_s \left(\coth\left(\frac{H_e}{a} - \frac{a}{H_e}\right) \right) \quad (3)$$

با توجه به اصلاح تابع لانگوین که برای توصیف رفتار مواد فرو مغناطیسی بیان می شود، به عنوان یک منحنی مغناطیسی ایده آل، اشباع مغناطیسی، a ضریبی برای توصیف دما و H_e اثر میدان مغناطیسی است که به صورت معادله زیر به دست می آید:

$$H_e = H + \alpha M \quad (4)$$

با تغییر میدان مغناطیسی H معادله مشتق شده از حوزه برگشت پذیر به صورت زیر است:

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an}(H_e) - M_{irr}}{k\delta - \alpha(M_{an}(H_e) - M_{irr})} \quad (5)$$

در (5) ضریب سختی مواد، α ضریبی برای توصیف اتصال حوزه های مغناطیسی و δ نشان دهنده جهت تغییر میدان مغناطیسی H است. δ یک پارامتر جهت دار بوده که مقدار $+1$ است اگر $\frac{dH}{dt} > 0$ و -1 است اگر $\frac{dH}{dt} < 0$ باشد.

$$M_{an} = \begin{cases} M_s H / 3a & |H_e| < 0.1 \\ M_s \coth\left(\frac{|H_e|}{a} - \frac{a}{|H_e|}\right) \frac{H_e}{|H_e|} & |H_e| > 0.1 \end{cases} \quad (6)$$

معادله برگشت پذیر حوزه های مغناطیسی به صورت زیر است:

$$M_{rev}(H_e) = c(M_{an}(H_e) - M_{irr}) \quad (7)$$

که در آن c ضریب برگشت پذیری ماده است. با استفاده از (2)، (3) و (7) رابطه مغناطیس شوندگی ماده به صورت زیر به دست می آید:

$$\frac{dM}{dH} = (1-c) \frac{(M_{an}(H_e) - M_{irr})}{k\delta - \alpha(M_{an}(H_e) - M_{irr})} - c \frac{dM_{an}(H_e)}{dH} \quad (8)$$

۴. روش اجزا محدود

در ریاضیات روش المان محدود (FEM) 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 [۱۴]. به طور کل FEM شامل سه ماتریس اصلی، که عبارتند از: ماتریس مالکیت، ماتریس رفتار و ماتریس عمل.

$$\{K\}\{U\} = \{F\} \quad (9)$$

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

با اعمال روابط مدل J-A به روش اجزا محدود می توان منحنی هیستریزس را برای نقاط مختلف از هسته ترانسفورماتور به دست آورد. تلفات هیستریزس را می توان به کمک (۱۰) محاسبه نمود. با توجه به اینکه عملیات در فضای دوبعدی صورت گرفته است، مقدار

تلفات هیستریزس هسته را می توان از حاصل ضرب انتگرال ضابطه $H \frac{dB}{dt}$ در یک بازه زمانی مشخص به دست آورد.

$$P_{Loss} = \frac{1}{T} \int_0^T (H \frac{\partial B}{\partial t}) \quad (10)$$

از روش اجزا محدود به کمک نرم افزار کامسول جهت شبیه سازی کامپیوتری استفاده شده است [۱۶]. 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.

۵. نتایج مدل سازی و شبیه سازی

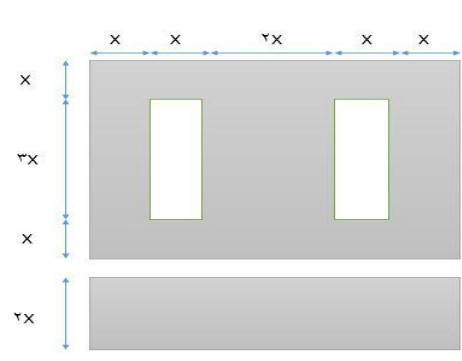
برای بررسی پدیده فرورزناس از یک سری تجهیزات متشکل از یک ترانسفورماتور تک فاز با سیم پیچ اولیه به صورت سری با خازن استفاده شده است.

۵-۱. تعیین پارامترها

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. پارامترهای در نظر گرفته شده برای هسته آهنی در جدول (۳) ارائه شده است.

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

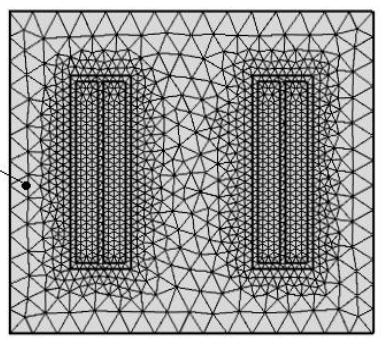
جدول ۲: مشخصات ترانسفورماتور مورد مطالعه



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

۶. نتایج شبیه سازی

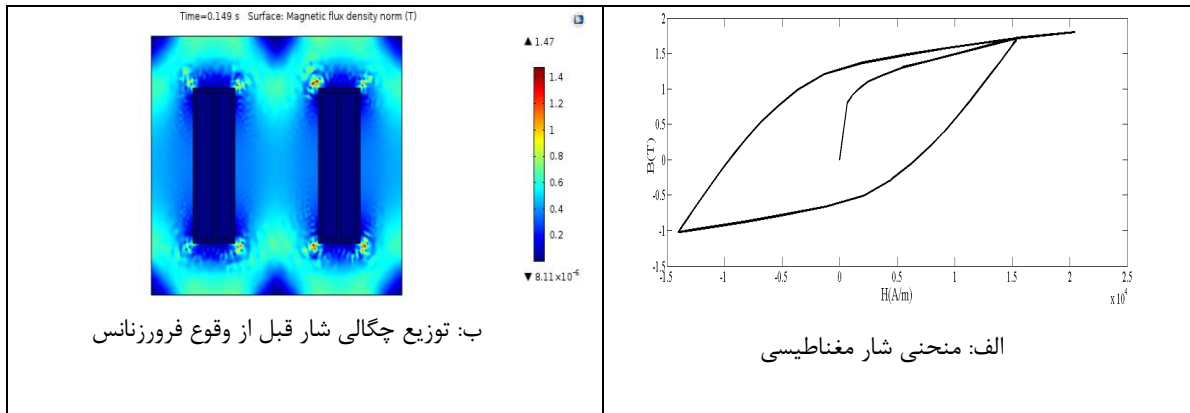
شکل (۳) مدل دوبعدی ترانسفورماتور را نشان می دهد. با در نظر گرفتن منحنی هیستریزس به روش J-A می توان مسیر مغناطیسی هر نقطه از هسته ترانسفورماتور را به دست آورد. شکل (۴) مسیر حرکت شار مغناطیسی را برای یک نقطه مورد نظر از هسته ترانسفورماتور نشان می دهد. مقدار تلفات هیستریزس با پارامترهای روش J-A برابر ۰,۲۰۶۶ وات محاسبه شده است. منحنی شار مغناطیسی با توجه به پارامترهای مشخص شده در جدول (۲) رسم شده است. با تغییر هر کدام از پارامترها منحنی مغناطیسی تغییر می کند. شکل (۵) توزیع چگالی شار مغناطیسی را قبل از وقوع فرورزناس نشان می دهد. منحنی جریان اولیه و ثانویه ترانسفورماتور در حالت کار عادی در شکل (۶) ارائه شده است.



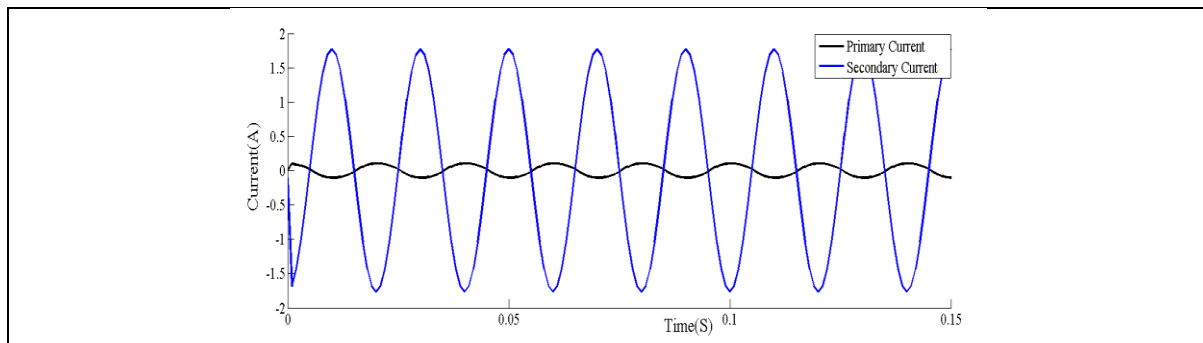
ب: مدل دوبعدی ترانسفورماتور

پارامتر	مقدار
M_s	۱۳۵۰۰۰۰
a	۶۲,۱۵
k	۹۴,۵۲
α	۰,۰۵
c	۰,۰۰۰۱۰۸

جدول ۳: پارامترهای مدل J-A

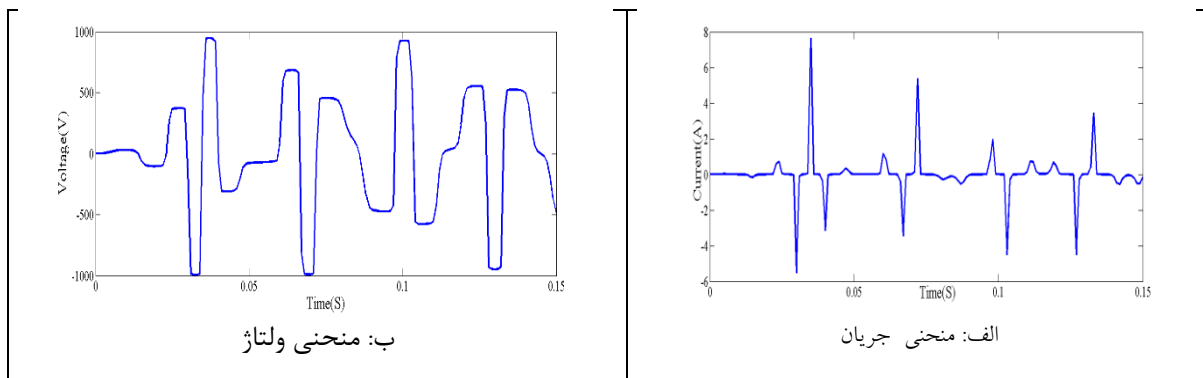


شکل (۱):

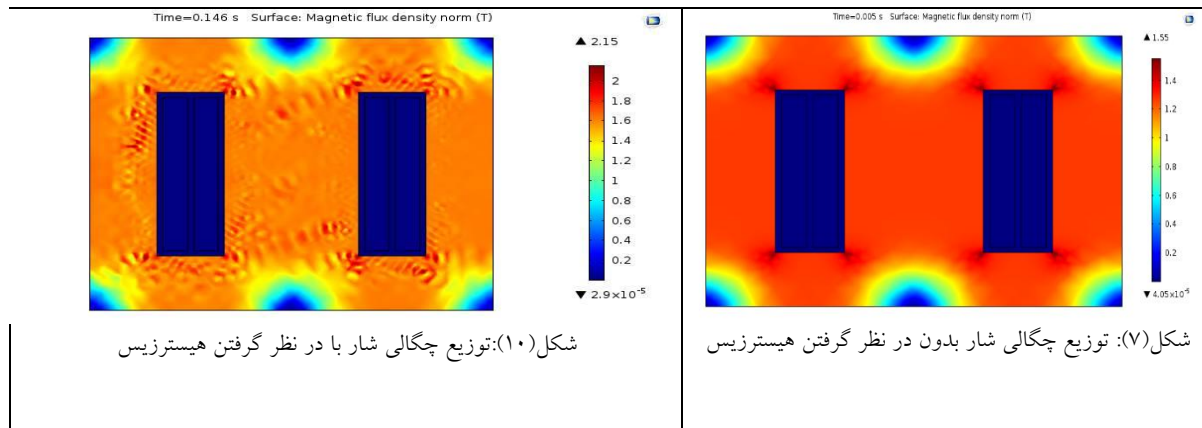


شکل (۲): منحنی جریان در حالت عادی

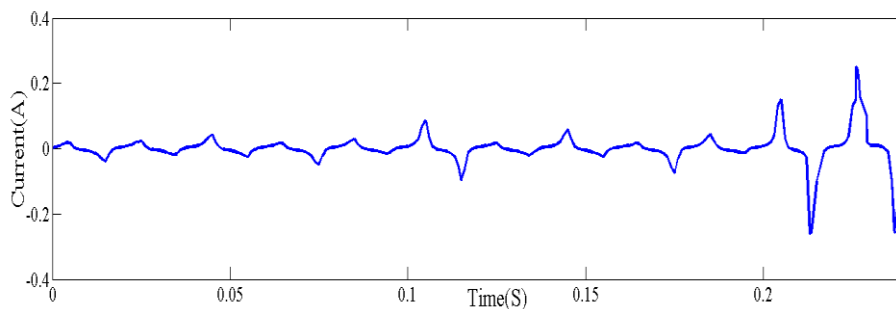
در صورتی که ظرفیت خازنی خطوط، سیم پیچ های ترانسفورماتور و یا بار متصل به ترانسفورماتور اثر سلفی سیم پیچ های ترانسفورماتور را خنثی کنند، فرورزناس اتفاقی افتاده و باعث ایجاد جریان های نامتعادل و ولتاژهای بزرگ در ترانسفورماتور می شود. شکل (۷) توزیع چگالی شار را حین وقوع فرورزناس بدون در نظر گرفتن اثر تلفات را نشان می دهد. هنگام وقوع فرورزناس هسته ترانسفورماتور وارد اشباع مغناطیسی می شود. این موضوع در (۷) نشان داده شده است. شکل (۸) و (۹) به ترتیب منحنی جریان اولیه ترانسفورماتور و ولتاژ خازن را حین وقوع فرورزناس در حالت قبل نشان می دهد. در این حالت منحنی جریان و ولتاژ از حالت سینوسی خارج می شوند. دامنه ولتاژ و جریان به میزان زیادی افزایش یافته است. وجود هارمونیک های ولتاژ و جریان باعث گرم تر شدن و صدمات عایقی ترانسفورماتور می گردد.



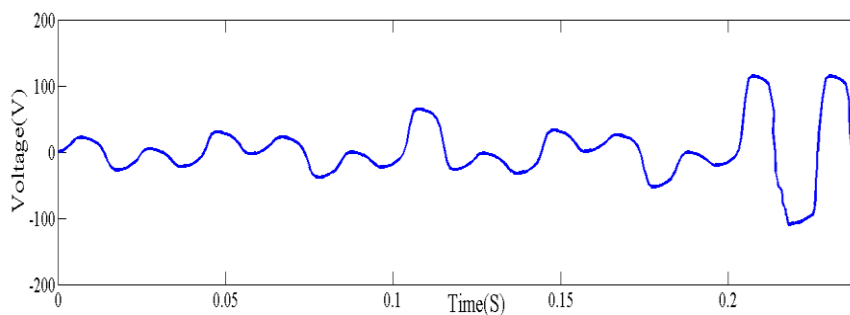
شکل (۳): شکل موج حین وقوع فرورزناس بدون در نظر گرفتن اثر هیستریزیس



شکل (۱۰) توزیع چگالی شار را حین وقوع فرورزناس با در نظر گرفتن اثر هیستریزیس نشان می دهد. در این حالت اشباع مغناطیسی بیشتر از حالت قبل است. شکل (۱۱) و (۱۲) به ترتیب منحنی جریان اولیه ترانسفورماتور و ولتاژ خازن را نشان می دهد. شکل موج ایجاد شده حالت آشفته فرورزناس را نشان می دهد. با توجه به محاسبات انجام شده پدیده فرورزناس در خازن به مقدار ۳ میکرو فاراد رخ می دهد. مقایسه نتایج نشان می دهد، در هنگام وقوع فرورزناس دامنه جریان و ولتاژ به میزان زیادی افزایش می یابد. اما مدلی از ترانسفورماتور که در آن اثر هیستریزیس لحاظ شده است، نتایج بهتری را نشان می دهد [۱۷].



شکل(۱۱): منحنی جریان با در نظر گرفتن هیستریزیس



شکل(۱۲): منحنی ولتاژ خازن با در نظر گرفتن هیستریزیس

۷. بحث و نتیجه گیری

در این مقاله با بهره گیری از روش اجزا محدود، پدیده فرورزناس در ترانسفورماتورها مورد مطالعه قرار گرفته است. این پدیده بر روی یک ترانسفورماتور تک فاز بررسی شده است. علاوه بر منحنی اشباع، تلفات هیستریزیس به عنوان یکی از پارامترهای مهم در بررسی پدیده فرورزناس در نظر گرفته شده است. از روش جایگزین-آترتون برای مدل سازی هیستریزیس استفاده شده است. طراحی ترانسفورماتور در نرم افزار کامسول صورت گرفته است. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهد حین وقوع فرورزناس هسته ترانسفورماتور بیش از حد وارد

اشباع مغناطیسی می شود. جریان و ولتاژ از حالت عملکرد عادی خارج شده، دامنه ولتاژ و جریان افزایش می یابد. این افزایش دامنه در ترانسفورماتورهای قدرت موجب شکست عایقی و گرم تر شدن ترانسفورماتور می شود. همچنین در صورتی که هسته ترانسفورماتور از مواد فرو مغناطیس تشکیل شده است، هیستریزس هسته در شبیه سازی باید لحاظ شود. بر اساس نتایج به دست آمده صرف نظر کردن از آن خطای زیادی ایجاد می کند.

مراجع

۱. Miroslav poljak, Tomislav Kelemen, Boris Bojanic ,” New experience with ferroresonance”, Technical Bulletin of Koncar.
۲. 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.
۳. 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.
۴. R. Javora ,M. Iwahara and S.Yamada, “Effect of dynamic core losses on ferroresonance phenomena”, Journal of Materials Processing Technology ۱۶۱ (۲۰۰۵) ۱۵۶-۱۶۱.
۵. 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.
۶. 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
۷. Y. Huang, J. Dong, and J. Zhu, “Core loss modeling for permanent-magnet based on flux variation locus and finite-element method,” IEEE Trans. Magn., vol. ۴۸, no. ۲, pp. ۱۰۲۳-۱۰۲۶, Feb. ۲۰۱۲.
۸. 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.
۹. F. Preisach, “Uber die magnetische nachwirkung,” Zeitschrift Phys., vol. B ۹۴, pp. ۲۲۷-۳۰۲, ۱۹۳۵.
۱۰. D. C. Jiles and D. L. Atherton, “Theory of ferromagnetic hysteresis,” JMMM, vol. ۶۱, pp. ۴۸-۶۰, ۱۹۸۶.
۱۱. H. Radmanesh, “Controlling ferroresonance in voltage transformer by considering circuit breaker shunt resistance including transformer nonlinear core losses effect,” International Review on Modeling and Simulations, Vol. ۳, No. ۵, Part A, ۲۰۱۰, pp. ۹۸۸-۹۹۶
۱۲. 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. Power Del., vol. ۲۲, no. ۲, pp. ۹۱۹-۹۲۹, Apr. ۲۰۰۷
۱۳. 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
۱۴. Wikipedia [online]. http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method , July ۱۰, ۲۰۱۳
۱۵. Prof. Olivier de Weck and Dr. Il Yong Kim, “Engineering design and rapid prototyping- finite element method”, Massachusetts Institute Of Technology, January ۱۲, ۲۰۰۴.
۱۶. COMSOL, MULTIPHYSICS©(FEMLAB), [online]. <http://www.comsol.com>

۱۷. ب. رضایی علم، ب. نوروزی، " بررسی پدیده فرورزنانس در حضور محدود کننده جریان خطای مغناطیسی با در نظر گرفتن اثر تلفات هیستریزس " کنفرانس ملی فناوری، موسسه آموزش عالی علم- کابردی صنعت برق، خرداد ۱۳۹۴، کرمانشاه، ایران