

مدلسازی ترانسفورمرهای پالسی با هسته‌های نانو بلوری

امیر بکتاش^(۱) – ابوالفضل واحدی^(۲)

(۱) دانشجوی دکتری - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

(۲) استاد - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۱۲

خلاصه: امروزه هسته‌های نواری مدور نانو بلوری به واسطه ویژگی‌های مغناطیسی مطلوبی که دارند به طور گسترده‌ای در ترانسفورمرهای پالسی و فرکانس بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. ساختار حلزونی این هسته‌ها بر روی نحوه توزیع شار درون آن تأثیر گذاشته و باعث پیچیدگی زیاد تحلیل مغناطیسی این هسته‌ها شده است. در این مقاله با استفاده از روش شبکه‌های رلوکتانسی یک مدل برای این هسته‌ها ارائه شده است. این مدل قادر به تعیین شار در نقاط مختلف هسته می‌باشد. ویژگی غیرخطی مغناطیسی هسته نیز با استفاده از یک مدل پسماند در مدل هسته گنجانده شده که با استفاده از آن به آسانی می‌توان تلفات مغناطیسی هسته را معلوم نمود. سادگی پیاده‌سازی مدل از ویژگی‌های مثبت آن می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی مدل با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود و همچنین تست‌های عملی بررسی شده‌اند. مقایسه نتایج نشان می‌دهند که روش ارائه شده علاوه بر سادگی دارای دقت مطلوب بوده و سرعت همگرایی آن در شبیه‌سازی نیز بالا است.

کلمات کلیدی: روش تکرار نیوتن، روش شبکه‌های رلوکتانسی، مبدل رزونانسی سری، مدل مشخصه پسماند، مواد مغناطیسی نانو بلوری و هسته‌های مدور نواری.

Modeling of Pulsed Transformer with Nanocrystalline Cores

Amir Baktash⁽¹⁾ – Abolfazl Vahedi⁽²⁾

(1) Ph.D. Student - Department of Electrical Engineering, Iran University of Science & Technology
amir_baktash@yahoo.com

(2) Professor - Department of Electrical Engineering, Iran University of Science & Technology
avahedi@iust.ac.ir

Recently tape wound cores, due to their excellent properties, are widely used in transformers for pulsed or high frequency applications. The spiral structure of these cores affects the flux distribution inside the core and causes complication of the magnetic analysis and consequently the circuit analysis. In this paper, a model based on reluctance networks method is used to analyze the magnetic flux in toroidal wound cores and losses calculation. A Preisach based hysteresis model is included in the model to consider the nonlinear characteristic of the core. Magnetic losses are calculated by having the flux density in different points of the core and using the hysteresis model. A transformer for using in a series resonant converter is modeled and implemented. The modeling results are compared with experimental measurements and FEM results to evaluate the validity of the model. Comparisons show the accuracy of the model besides its simplicity and fast convergence.

Index Terms: Hysteresis loop model, nanocrystalline materials, reluctance networks method, series resonant converter, tape wound core.

۱- مقدمه

هسته‌های فریت^۱ به دلیل داشتن تلفات مغناطیسی کم در فرکانس‌های بالا، به طور گسترده‌ای در ترانسفورمرهای پالسی استفاده می‌شوند. با این وجود این هسته‌ها معایب زیادی نیز دارند. چگالی اشباع پایین، مشکلات ساخت در ابعاد بزرگ و ویژگی‌های حرارتی ضعیف از معایب این هسته‌ها محسوب می‌شوند. در هسته‌هایی از جنس آلیاژهای نانو بلوری^۲ آهن تا حد زیادی این معایب رفع شده‌اند. این آلیاژ علاوه بر آهن، سیلیسیم و بور دارای مقدار ناچیزی مس و نوبیدیم می‌باشد. آلیاژ مذاب با استفاده از روش خنک‌سازی سریع^۳ به نوارهایی با ضخامت ۲۵-۱۸ میکرومتر تبدیل شده که ساختارهای بلوری درون آن در ابعاد نانومتر است. از پیچاندن این نوارها روی هم یک هسته توروئیدی به دست می‌آید. این هسته‌ها به هسته‌های مدور^۴ معروف می‌باشند. با یک عملیات حرارتی مناسب بر روی این هسته می‌توان به ویژگی‌های مطلوب مغناطیسی دست یافت. مزایای این هسته‌ها عبارتند از:

- چگالی اشباع بالا (تا ۱/۲ T)
- نفوذپذیری مغناطیسی بالا
- تلفات مغناطیسی کم
- ویژگی‌های حرارتی عالی

از آنجایی که این هسته دارای ساختار متقارن نیستند و ضخامت نوارها نسبت به شعاع هسته بسیار کوچک است، استفاده از FEM در تحلیل این هسته‌ها بسیار زمانبر می‌باشد. به همین دلیل در این مقاله مدلی برای تحلیل هسته‌های مدور ارائه شده است. این مدل بر اساس شبکه‌های رلوکتانسی^۵ (RNM) می‌باشد و می‌تواند توزیع شارهای درون هسته را به خوبی تعیین کند. از ویژگی‌های این مدل پیاده‌سازی آسان، محاسبات سریع و دقت کافی می‌باشد. به منظور تعیین دقیق تلفات هسته همچنین اعمال مشخصه مغناطیسی غیرخطی هسته در مدل، از یک مدل مشخصه پسماند^۶ نیز استفاده شده است.

۲- مدل‌سازی شبکه رلوکتانسی

شکل (۱) ساختار یک هسته توروئیدی مدور را به همراه شارهای طولی و عرضی درون آن نشان می‌دهد. در این بخش با استفاده از روش شبکه رلوکتانسی به مدل‌سازی این هسته می‌پردازیم. این روش بر پایه شباهت بین مقادیر و روابط الکتریکی و مغناطیسی بوده و با تقسیم مدار مغناطیسی به مجراهای مجزای انتقال شار صورت می‌گیرد. برای تشکیل شبکه رلوکتانسی برای هر مجرا، یک رلوکتانس تعریف شده و با استفاده از قوانین مغناطیسی کرشهف و اهم، شبکه حل می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان صرفه جویی قابل توجهی در زمان تحلیل بسیاری از ساختارهای پیچیده داشت [۷-۵].

۲-۱- پیاده‌سازی در هسته‌های مدور

به منظور پیاده‌سازی این روش بر روی هسته‌های مدور، ابتدا نوار مغناطیسی و فاصله هوایی به المان‌های کوچکی تقسیم می‌شوند. هر المان در نوار مغناطیسی شامل یک رلوکتانس غیرخطی R_i که شار

- تلفات مکانیکی و نویز صوتی کم (کشسانی مغناطیسی^۵ تقریباً صفر)
 - قابلیت شکل‌دهی مشخصه مغناطیسی حین عملیات حرارتی.
- ویژگی‌های فوق باعث شده تا این هسته‌ها گزینه‌های مناسبی برای استفاده در ترانسفورمرهای پالسی گردند. با این وجود ساختار حلزونی این هسته‌ها تحلیل مغناطیسی آنها را مشکل ساخته است. در یک هسته توروئیدی یکپارچه فریت، میدان مغناطیسی از سمت شعاع داخلی به سمت شعاع خارجی با کاهش همراه است که این به دلیل افزایش طول مسیر مغناطیسی می‌باشد. متناسب با این کاهش، چگالی شار درون هسته نیز کاهش می‌یابد. در هسته مدور دو شار مجزا وجود دارد. شاری که درون نوار حرکت کرده و به شار طولی^۶ موسوم است و می‌کند و به شار عرضی^۷ موسوم است. در واقع در این هسته‌ها با یک فاصله هوایی ذاتی درون هسته روبرو هستیم. بررسی این شارها به دلیل پیچیدگی ساختار هسته با استفاده از روش‌های تحلیلی بسیار مشکل می‌باشد و تا کنون مدلی برای این هسته‌ها ارائه نشده است. در [۱] و [۲] با استفاده از روش تحلیل اجزاء محدود (FEM) به مدل‌سازی و بررسی شارهای درونی این هسته پرداخته شده و در [۳] و [۴] با استفاده از آزمایش و اندازه‌گیری این هسته‌ها بررسی شده‌اند.

طولی از آن می‌گذرد و یک منبع نیروی محرکه مغناطیسی F (mmf) می‌باشد. المان‌های فاصله هوایی تنها از یک رلوکتانس خطی R_i تشکیل شده‌اند و شارهای عرضی از آنها عبور می‌کنند. شکل (۲) ساختار اشاره شده را نمایش می‌دهد. رلوکتانس‌های غیرخطی به صورت زیر محاسبه می‌گردند.

$$R_i = \frac{l_i}{\mu_0 \cdot \mu_r(B) \cdot A_i} \quad (1)$$

که در این رابطه l_i طول المان، A_i سطح مقطع المان و $\mu_r(B)$ نفوذپذیری نسبی المان است که به دلیل غیرخطی بودن مشخصه هسته، تابعی از میدان مغناطیسی می‌باشد. با فرض اینکه سیم‌پیچی به‌طور یکنواخت دور تا دور هسته پراکنده شده باشد، mmf هر المان برابر است با $F = NI/n$ که N تعداد دور سیم‌پیچی، I جریان سیم‌پیچی و n تعداد المان در هر دور از نوار می‌باشد. رلوکتانس‌های R_i نیز به سادگی با رابطه‌ای مشابه (۱) قابل محاسبه هستند با این تفاوت که نفوذپذیری نسبی آنها ثابت و برابر یک می‌باشد. پس از محاسبه المان‌ها و تشکیل یک شبکه، می‌توان با استفاده از روش‌های مرسوم حل شبکه‌های الکتریکی مانند روش گره، به حل شبکه پرداخت.

شبکه به دست می‌آید. به علاوه برای تعیین mmf‌ها باید جریان سیم‌پیچی مشخص باشد. مقدار این جریان عموماً به ساختار مداری که ترانسفورمر در آن استفاده شده و ولتاژ القایی ترانسفورمر بستگی دارد. پس در اینجا نیاز است تا از روش‌های تکرار شونده^{۱۱} برای تعیین همزمان نفوذپذیری المان‌ها، جریان مدار و حل کلی سیستم استفاده کرد. در واقع باید مدار مغناطیسی و الکتریکی همزمان حل شوند. برای حل این شبکه غیرخطی پیچیده با تعداد المان‌های زیاد از روش نیوتن استفاده می‌شود. ابتدا تابع F_n به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$F_n = [f_1, \dots, f_k, f_{k+1}], \quad f_i = \begin{cases} \mu_i^0 - \mu_i & i = 1 \dots k \\ I^0 - I & i = k+1 \end{cases} \quad (2)$$

که در آن μ_i مقدار نهایی نفوذپذیری المان i می‌باشد و از حل سیستم توسط روش نیوتن تعیین می‌شود، μ_i^0 مقدار اولیه نفوذپذیری المان i بوده که برای تشکیل شبکه استفاده می‌شود، k تعداد المان‌های غیرخطی شبکه است، I و I^0 نیز مقادیر نهایی و اولیه جریان سیم‌پیچی هستند. برای استفاده از روش نیوتن نیاز است که ابتدا ماتریس ژاکوبی تابع F_n تعیین شود. این ماتریس مربعی بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود.

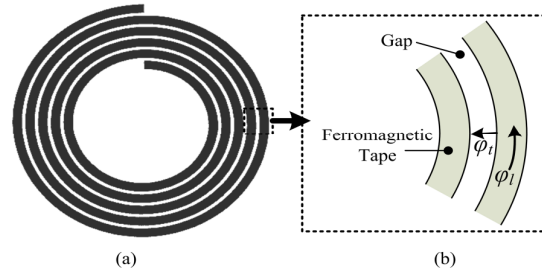
$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \mu_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial I} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_{k+1}}{\partial \mu_1} & \dots & \frac{\partial f_{k+1}}{\partial I} \end{bmatrix} \quad (3)$$

برای تعیین این ماتریس باید مشتق توابع f_i نسبت به تک تک متغیرها حساب شود. از آنجایی که مشتق این توابع دارای یک رابطه صریح نبوده، ارائه یک مشتق به فرم بسته بسیار مشکل می‌باشد. به همین خاطر مشتق توابع با استفاده از روش تفاضل محدود^{۱۱} تخمین زده می‌شود. از سوی دیگر تغییرات برخی از متغیرها بر روی بعضی از توابع ناچیز است، یعنی مقدار مشتق آن تابع نسبت به متغیر مذکور در حوالی نقطه کار بسیار کوچک است و می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. از آنجایی که نفوذپذیری رلوکتانس i ام تقریباً مستقل از نفوذپذیری رلوکتانس j ام می‌باشد، پس اکثر المان‌های ماتریس ژاکوبی مساوی صفر قرار می‌گیرند و فقط سطر و ستون‌های اول و آخر ماتریس دارای مقدار می‌باشند. با استفاده از این ساده‌سازی در تشکیل ماتریس ژاکوبی، این ماتریس به یک ماتریس تهی^{۱۲} تبدیل شده و حجم محاسبات شدیداً کاهش می‌یابد.

با محاسبه ماتریس ژاکوبی می‌توان به حل شبکه پرداخت. پس از حل شبکه مقدار ولتاژ مغناطیسی گره‌ها مشخص می‌گردد. با استفاده از ولتاژ گره‌ها و استفاده از قانون اهم مغناطیسی، شارهای گذرا از هر المان و چگالی آنها قابل محاسبه هستند. ولتاژ القا شده در سیم‌پیچی و تلفات هسته نیز پس از آن به دست می‌آیند.

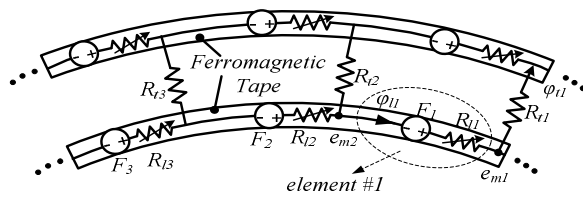
۳-۱- انتخاب تعداد المان‌ها

در روش ارائه شده، تعداد المان‌های در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی هسته و طول آنها دقت شبیه‌سازی و بالطبع زمان آن را تعیین می‌کنند. برای داشتن یک ملاک مناسب در انتخاب تعداد المان‌ها یک



شکل (۱): ساختار یک هسته مدور توروییدی (الف) و شارهای عرضی و طولی درون هسته (ب)

Fig. (1): Structure of a wound toroidal core (a) and longitudinal and transverse fluxes inside the core



شکل (۲): شبکه رلوکتانسی ارائه شده برای یک هسته مدور

Fig. (2): Presented reluctance network for a wound core

۲-۲- مدلسازی پسماند هسته

می‌دانیم که در یک هسته مغناطیسی بین کمیت‌های B و H یک رابطه خطی برقرار نبوده و با یک مشخصه هیستریزیسی روبرو هستیم. با افزایش فرکانس میدان مغناطیسی، به دلیل افزایش میزان جریان‌های گردابی، این مشخصه تغییر کرده و سطح آن که متناسب با تلفات هسته می‌باشد افزایش می‌یابد. به منظور اعمال این مشخصه غیرخطی هسته در مدلسازی و همچنین تعیین دقیق تلفات مغناطیسی، از یک مدل پسماند استفاده می‌شود. با استفاده از این مدل، نفوذپذیری مغناطیسی هر المان در هر لحظه با توجه به چگالی شار موجود در المان تعیین می‌گردد. تلفات هر المان نیز با استفاده از سطح حلقه پسماند المان قابل محاسبه است. تلفات مغناطیسی کل مجموع تلفات المان‌ها می‌باشد. این مدل بر اساس مدل ساده‌شده پریساز پیاده شده است [۸]. جزئیات مدل، همچنین نحوه استخراج پارامترهای مدل در [۹] و [۱۰] ارائه شده‌اند. به‌منظور استخراج پارامترهای مدل ابتدا باید مشخصه هسته در یک فرکانس پایین (حداکثر ۱۰ Hz) و یک فرکانس نزدیک به فرکانس مطلوب اندازه‌گیری شود. با داشتن این دو مشخصه و استفاده از روش‌های برازش توابع می‌توان پارامترهای مدل را تعیین کرد.

۳- حل شبکه رلوکتانسی

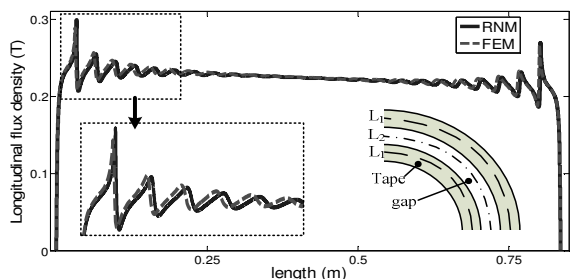
پس از تشکیل شبکه رلوکتانسی با استفاده از روش گره می‌توان به تعیین ولتاژ مغناطیسی هر گره پرداخت. برای تشکیل شبکه رلوکتانسی باید مقادیر رلوکتانس‌های المان‌های مختلف و mmf‌ها تعیین گردند. ولی برای تعیین رلوکتانس‌های غیرخطی به مقدار μ آنها نیاز است که تابعی از چگالی شار است و چگالی شار خود پس از حل

۴-۱- شبیه‌سازی القاگر

این القاگر شامل ۲۵ دور نوار فرومغناطیس نانوبلوری با نام Finemet می‌باشد. شعاع داخلی این هسته توروییدی ۱۰ mm و ارتفاع آن نیز ۱۰ mm می‌باشد. برای مدلسازی هسته، هر دور هسته به ۴۰۰ المان تقسیم شده است. با این تعداد المان مقدار خطا با استفاده از روش تست ارائه شده ۳٪ است. در شبیه‌سازی نفوذپذیری نسبی هسته مقدار ثابت $\mu_r = 30000$ در نظر گرفته می‌شود و آمپر- دور اعمالی به هسته $0.2 A$ است. برای ارزیابی نتایج با استفاده از FEM از نرم‌افزار Maxwell استفاده شده است. شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب مقدار شارهای طولی و عرضی درون هسته را نشان می‌دهند. در شکل (۴) شارهای طولی هسته بر روی خطی درون نوار مغناطیسی محاسبه شده‌اند. همچنین شارهای عرضی نیز بر روی خطی در فاصله هوایی هسته مشخص شده است (شکل (۵)). تغییرات شدید شار در دورهای ابتدایی و انتهایی نوارها مشخص است. وجود شار عرضی درون هسته نشان‌دهنده وجود یک فاصله هوایی ذاتی در هسته می‌باشد. نتایج به دست آمده با استفاده از روش ارائه شده انطباق خوبی با نتایج FEM دارند. برای اینکه یک معیار مناسب برای مقایسه نتایج حاصله با نتایج FEM داشته باشیم از معیار نرمال‌شده ریشه متوسط مربع خطا^{۱۳} (NRMSE) استفاده می‌کنیم که به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$NRMSE = \frac{1}{B_{\max} - B_{\min}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (B_i - \hat{B}_i)^2} \quad (4)$$

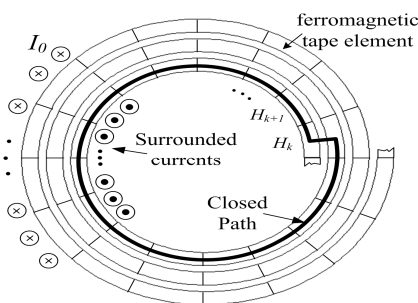
که در آن B مقدار چگالی شار به دست آمده از FEM می‌باشد، \hat{B} مقدار چگالی شار محاسبه شده با مدل است و n تعداد المان‌ها می‌باشد. این معیار برای شارهای طولی $0.2/6$ ٪ و برای شارهای عرضی $0.3/3$ ٪ است. پس نتایج به‌دست آمده از مدل دقت مطلوبی داشته و این دقت با روش تست ارائه شده همخوانی دارد. در شبیه‌سازی FEM انجام شده، هسته دارای ۱۵۰۰۰ المان است و مدت آن $2/4$ ثانیه طول می‌کشد. مدل RNM دارای ۱۰۰۰۰ المان بوده و مدت شبیه‌سازی آن ۲ ثانیه می‌باشد. دلیل استفاده از یک هسته کوچک در ارزیابی مدل، طولانی بودن مش‌بندی خودکار هسته در نرم‌افزار Maxwell است که برای این هسته حدود ۳۱ دقیقه زمان برد.



شکل (۴): توزیع چگالی شار طولی بر روی خط گذرا از وسط نوار مغناطیسی (خط L1)

Fig. (4): Distribution of longitudinal flux on a line passing from the middle of the tape (line L1)

روش تست پیشنهاد می‌گردد. بر اساس مقدار خطایی که این روش تعیین می‌کند، می‌توان تعداد المان‌ها را برای داشتن دقت مناسب و کمترین زمان شبیه‌سازی، انتخاب کرد. در این روش پس از انتخاب تعداد المان‌ها، یک جریان مشخص I_0 به سیم‌پیچی اعمال می‌شود. فرض اینکه هسته خطی باشد و نفوذپذیری المان‌های آن مقدار ثابت و مشخصی داشته باشند، شبکه رلوکتانسی ایجاد شده و چون سیستم خطی است و همه رلوکتانس‌ها و mmf‌ها مشخص هستند، به راحتی حل می‌شود. با حل سیستم، شدت میدان همه المان‌ها معلوم است. یک مسیر بسته بر روی هسته انتخاب کرده (شکل (۳)) و با استفاده از قانون آمپر مقدار آمپر- دور محسور شده توسط این مسیر بسته را محاسبه می‌کنیم. با معلوم بودن تعداد دور می‌توان جریان سیم‌پیچی I_0 را حساب کرد. این جریان باید برابر با همان جریان اعمالی I_0 باشد. خطای بین مقدار محاسبه شده و مقدار اصلی، بیانگر دقت مدل با تعداد المان‌های موجود می‌باشد.



شکل (۳): مسیر بسته انتخاب شده به منظور تست دقت مدل با تعداد المانهای انتخاب شده

Fig. (3): Selected close path in order to test the accuracy of the model

۴-۲- شبیه‌سازی و نتایج

به منظور ارزیابی عملکرد مدل ارائه شده از دو شبیه‌سازی مختلف استفاده می‌شود. ابتدا یک القاگر مدلسازی و شبیه‌سازی شده و نتیجه آن با مدل اجزاء محدود مقایسه می‌شود. سپس یک ترانسفورمر مورد استفاده در یک مبدل رزونانسی مدل شده و نتایج حاصل با نتایج عملی مقایسه می‌شوند. در هر دو شبیه‌سازی، جنس هسته از نوارهای نانوبلوری Finemet از شرکت MK magnetics می‌باشد [۱۱]. خصوصیات این نوارها در جدول (۱) آمده است.

Table (1): Characteristics of used Nanocrystalline tapes
جدول (۱): ویژگی‌های نوارهای نانو بلوری مورد استفاده

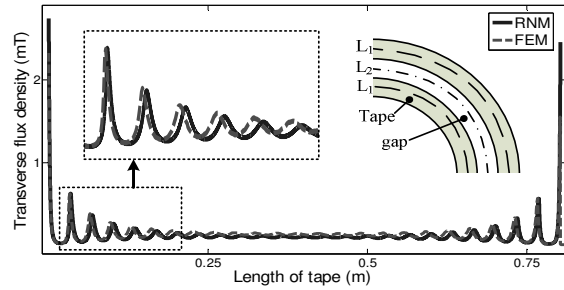
۱۸ μm	ضخامت
۱۰ mm	ارتفاع
۴ μm	ضخامت عایق روی سطح نوار
۸۳۳۰۰۰ S/m	رسانایی
۱/۲۱ T	چگالی شار اشباع
۷/۳ g/cm ³	چگالی وزنی

رزونانس LC بوده و باعث می‌شود تا جریان کشیده شده از منبع سینوسی باشد. عمل سوئیچ‌زنی در مبدل در جریان صفر اتفاق می‌افتد تا تلفات سوئیچ‌زنی کاهش یابد. از این مبدل به منظور شارژ خازن خروجی استفاده می‌شود.

هسته ترانسفورمر از ۲۲۰ دور نوار نانو بلوری ساخته شده و قطر داخلی آن ۳۲ mm، قطر خارجی آن ۴۳/۶ mm و ارتفاع آن ۱۰ mm می‌باشد. جدول (۲) ویژگی‌های این ترانسفورمر را ارائه می‌دهد.

Table (2): Characteristics of used transformer
جدول (۲): ویژگی‌های ترانسفورمر مورد استفاده

ولتاژ اولیه	300 V	تعداد دور ثانویه	150
ولتاژ ثانویه	1500 V	ضخامت سیم‌های اولیه	2 mm
توان نامی	800 W	ضخامت سیم‌های ثانویه	0.8 mm
فرکانس	20 kHz	ضخامت عایق روی هسته	1mm
تعداد دور اولیه	30	ضخامت عایق بین اولیه و ثانویه	30 mm

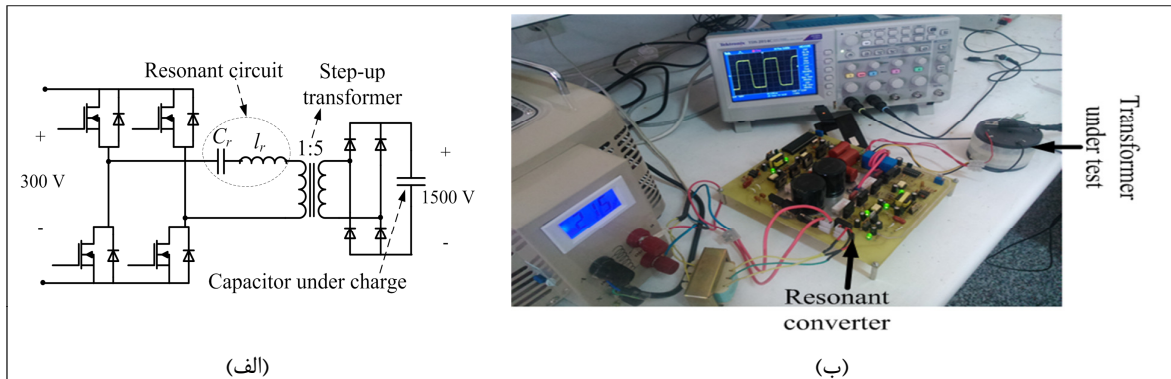


شکل (۵): توزیع چگالی شار عرضی درون هسته بر روی خطی گذرا از وسط فاصله هوایی (خط L2)

Fig. (5): Distribution of transverse flux on a line passing from the middle of the gap (line L2)

۲-۴- مدلسازی ترانسفورمر

در این قسمت به مدلسازی یک ترانسفورمر ۳۰۰/۱۵۰۰ V و ۲۰ kHz با هسته مدور پرداخته می‌شود. این ترانسفورمر به منظور استفاده در یک مبدل رزونانسی سری طراحی شده است. شکل (۶) ساختار مبدل و سیستم تست عملی را نشان می‌دهد. این مبدل شامل یک بخش



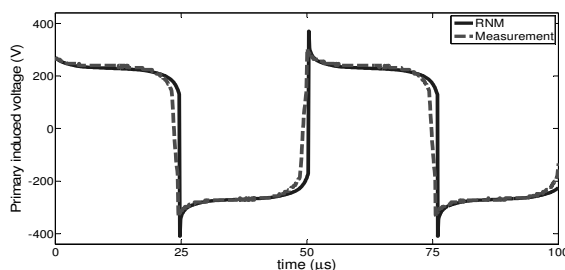
(الف)

(ب)

شکل (۶): ساختار یک مبدل رزونانسی سری (الف) و مدار تست عملی (ب)

Fig. (6): Structure of a resonant circuit (a) and experimental test setup (b)

مدار ۶۳/۴ W/kg و مقدار اندازه‌گیری شده آن ۶۷/۱ W/kg می‌باشد. مقادیر فوق با مقداری که تولیدکننده برای این ماده، در فرکانس ۲۰ kHz و چگالی شار ماکزیمم ۰/۷۲ T داده است (۶۶/۷ W/kg) انطباق دارند. مقایسه مقادیر به‌دست آمده از دقت مطلوب روش ارائه حکایت دارند.



شکل (۷): ولتاژ القا شده در سمت اولیه ترانسفورمر

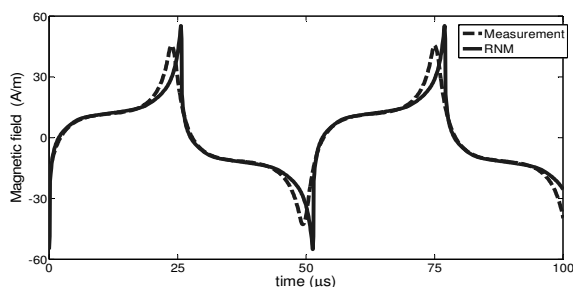
Fig. (7): Induced transformer voltage in primary side

برای داشتن خطای کمتر از ۵٪ هر دور نوار هسته به ۷۰۰ المان تقسیم شده است. شبیه‌سازی برای مدت دو سیکل با پله‌های ۸۳۳ ns (یعنی در ۱۲۰ پله) انجام می‌شود. اندوکتانس نشستی، خازن پراکندگی و مقاومت سیم‌پیچی‌های ترانسفورمر جداگانه محاسبه شده و در مدار الکتریکی اعمال شده‌اند [۱۲]. هر پله شبیه‌سازی به طور متوسط حدود ۴/۳ s طول می‌کشد. شکل (۷) مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده ولتاژ القایی سمت اولیه ترانسفورمر را نشان می‌دهد. شکل (۸) متوسط میدان مغناطیسی درون هسته را نمایش می‌دهد. مقدار اندازه‌گیری شده این پارامتر با توجه به مقدار جریان مغناطیس‌کنندگی هسته تعیین شده است. دلایل خطای بین مقدار محاسبه شده و مقدار اندازه‌گیری شده ناشی از خطای تعیین پارامترهای مدل مشخصه پسماند، خطای محاسبه پارامترهای پارازیتی ترانسفورمر و همگرایی ضعیف الگوریتم در نقاط با تغییرات شدید H، می‌باشد. تلفات هسته از مجموع تلفات المان‌ها به‌دست می‌آید. چگالی تلفات محاسبه شده هسته در این

در روش ارائه شده تنها هسته مغناطیسی ترانسفورمر مدل می‌گردد و پارامترهای پارازیتی آن (اندوکتانس نشتی، خازن پراکندگی و مقاومت سیم‌پیچی‌ها) با استفاده از روابط بسته به‌دست می‌آیند. این مسئله به تسریع روند شبیه‌سازی ترانسفورمر کمک می‌کند بدون آنکه افت قابل ملاحظه‌ای در میزان دقت مدل به همراه داشته باشد. در مدل‌سازی هسته می‌توانستیم آن را به یک مدل ساده یکپارچه مانند هسته‌های فریت تقریب بزینم در این صورت چشم‌پوشی از فاصله هوایی درون هسته دقت نتایج را کاهش می‌داد. از طرف دیگر نوارهای نانو بلوری پایه آهن دارای مقاومت الکتریکی کمی می‌باشند و با افزایش فرکانس جریان‌های گردابی درون آنها افزایش می‌یابد. ولی با استفاده از مدل حلقه پسماند، اثر این جریان‌های گردابی بر روی تغییرات نفوذپذیری هسته و افزایش تلفات آن در نظر گرفته شده است.

پی نوشت:

- 1- Ferrite
- 2- Nanocrystalline
- 3- Rapid quenching
- 4- Wound core
- 5- Magnetostriction
- 6- Longitudinal flux
- 7- Transverse flux
- 8- Reluctance networks method
- 9- Hysteresis model
- 10- Iterative
- 11- Finite difference
- 12- Sparse matrix
- 13- Normalized root mean square error



شکل (۸): مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده متوسط شدت میدان مغناطیسی هسته در طی دو سیکل
Fig. (8): Measured and simulated values of core average field in tow cycle

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش RNM به مدل‌سازی هسته‌های توروئیدی مدور پرداخته شد. مدل ارائه شده قادر به تعیین دقیق شارهای عرضی و طولی درون هسته بوده و تغییرات شار در دوره‌های ابتدایی و انتهایی هسته همچنین اثر فاصله هوایی ذاتی هسته در نتایج آن مشهود است. با استفاده از این مدل مدارهای الکتریکی و مغناطیسی به صورت همزمان تحلیل شده پارامترهای آنها تعیین می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی FEM صحت نتایج این مدل را تصدیق می‌کنند. روابط استفاده شده در تحلیل با استفاده از RNM در حقیقت ساده‌شده روابط FEM می‌باشند، به همین دلیل پیاده‌سازی ساده‌تری داشته و سرعت حل آنها نیز سریعتر است. نتیجه مقایسه نشان می‌دهد که از نظر دقت نیز مدل ارائه شده در حد قابل قبولی می‌باشد.

References

- [1] S. Zurek, F. Al-Naemi, A.J. Moses, "Finite-element modeling and measurements of flux and eddy current distribution in toroidal cores wound from electrical steel", IEEE Trans. on Magn., Vol. 44, No. 6, pp. 902-905, 2008.
- [2] T. Nakata, N. Takahashi, K. Fujiwara, M. Nakano, "Analysis of flux and eddy current distributions in wound cores and experiments", Trans. on Engineering Sciences, Vol. 11, pp. 255-264, 1996.
- [3] G. Loizosa, T. Kefalass, A. Kladas, T. Souflaris, D. Paparigas, "Flux distribution in single phase, Si-Fe, wound transformer cores", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 320, No. 20, pp. 874-877, 2008.
- [4] I. Hernandez, F. de Leon, J. M. Canedo, J.C. Olivares-Galvan, "Modeling transformer core joints using Gaussian models for the magnetic flux density and permeability", IET Electr. Power Appl., Vol. 4, No. 9, pp. 761-771, 2010.
- [5] J. Turowski, "Reluctance Networks", in Sykulski, J. K., Computational Magnetism, Springer, Netherlands, pp. 145-164, 1995.
- [6] C.R. Lines, W.A. Cronje, B. Wigdorowitz, "Extended 2D magnetic equivalent circuit method", COMPEL, Vol. 29, No. 6, pp. 1435-1443, 2010.
- [7] A. Ibala, A. Masmoudi, G. Atkinson, A.G. Jack, "On the modeling of a TFPM by reluctance network including the saturation effect with emphasis on the leakage fluxes", COMPEL, Vol. 30, No. 1, pp. 151-171, 2011.
- [8] V. Basso, "Hysteresis models for magnetization by domain wall motion", IEEE Trans. Magn., Vol. 34, pp. 2207-2212, 1998.
- [9] P. Nakmahachalasint, K.D. T. Ngo, L. Vu-Quoc, "A Static hysteresis model for power ferrites", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, No. 4, pp. 453-460, 2002.
- [10] P. Nakmahachalasint, K.D. T. Ngo, L. Vu-Quoc, "A behavioral model for frequency-dependent hysteresis in power ferrites", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, No. 4, pp. 1784-1790, 2004.
- [11] "Nano-crystalline: A special product announcement", MK Magnetics, 2007, available at: <http://www.mkmagnetics.com/dataSheets/pdf/mkm-nanoCurves.pdf>.
- [12] A. Baktash, A. Vahedi, "Calculation of parasitic elements in Toroidal core transformers," IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 42, No. 6, pp. 1690 - 1696, 2014.