

Design and construction of high frequency transformers based on resonance converter

A. Daneshmandi, A. Bali*, H. Fayazi

* Assistant Professor, Electrical and Computer University Complex, Malik Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

(Received: 08/07/2021; Accepted: 29/11/2021)

Abstract

High-frequency power transformers are available in electronic power converters for many applications such as power transmission, renewable energy systems, and power supplies. Magnetic materials production technologies such as ferrite, amorphous, and high-frequency nanocrystals are used to miniaturize transformers and optimize the design. In this paper, the design of a high-frequency transformer based on the finite element method (FEM) is proposed, and a frequency transformer above 5 kV and a power of 100 watts with a ferrite core is designed for use in high voltage charges in pulse power technology. After the calculation step, the three-dimensional model of the transformer with the nonlinear core is created with Maxwell finite element analysis software and then the simulations of the electromagnetic model of the transformer with electronic power converter circuit are implemented with the help of Simplorer software for operating conditions. Also, the efficiency of the transformer, the exact equivalent circuit of the transformer, and the flux distribution in the transformer core are obtained. In addition, transformer samples have been fabricated and tested. The data obtained from the finite element method are compared with the analytical and laboratory methods. The results show that the finite element method seems more accurate compared to the analytical methods. Due to the importance and complexity of designing high-frequency transformers, using this method can provide advantages and simplicity for transformer designers for parameter calculation and optimal design.

Keywords: Finite element method, Pulse transformer, Resonant converter, Power electronics.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

© Authors



* Corresponding author E-mail: A_bali@mut.ac.ir

طراحی و ساخت ترانسفورماتور فرکانس بالا مبتنی بر مبدل رزونانسی

علیرضا دانشمندی^۱، عارف بالی^{۲*}، حسین فیاضی^۳

۱- کارشناسی ارشد، ۲ و ۳- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۸)

چکیده

ترانسفورماتورهای قدرت فرکانس بالا در مبدل‌های الکترونیک قدرت وجود دارند برای بسیاری از کاربردها مانند انتقال انرژی، سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر و منابع تغذیه وجود دارد. فن آوری‌های تولید مواد مغناطیسی مانند فریت، آمورف و نانوکریستال با فرکانس بالا برای کوچک‌سازی ترانسفورماتورها و طراحی بهینه به کار گرفته می‌شود. در این مقاله، طراحی ترانسفورماتور فرکانس بالا مبتنی بر روش اجزای محدود (FEM)^۱ پیشنهاد شده است، و یک ترانسفورماتور فرکانس بالای ۵ کیلوولت و توان ۱۰۰ وات با هسته فریت برای کاربرد در شارژر کننده ولتاژ بالا در فناوری توان پالسی طراحی شده است. پس از مرحله محاسبات، مدل سه بعدی ترانسفورماتور با هسته غیر خطی با نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود ماکسول ایجاد می‌شود و سپس شبیه‌سازی‌های مدل الکترومغناطیسی ترانسفورماتور با مدار مبدل الکترونیک قدرت با کمک نرم‌افزار Simplorer برای شرایط عملیاتی پیاده‌سازی می‌شود. همچنین بازده ترانسفورماتور، مدار معادل دقیق ترانسفورماتور و توزیع شار در هسته ترانسفورماتور به دست آمده است. علاوه بر این، نمونه ترانسفورماتور ساخته و آزمایش شده است. داده‌های به دست آمده از روش المان محدود با روش تحلیلی و آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش المان محدود در مقایسه با روش‌های تحلیلی دقیق تر به نظر می‌رسد. با توجه به اهمیت و پیچیدگی طراحی ترانسفورماتورهای فرکانس بالا، استفاده از این روش می‌تواند مزایا و سادگی را برای طراحان ترانسفورماتور برای محاسبات پارامترها و طراحی بهینه فراهم کند.

کلیدواژه‌ها: روش المان محدود، ترانسفورماتور پالسی، مبدل رزونانسی، الکترونیک قدرت

۱- مقدمه

علاوه بر این فرکانس کاری روی مقاومت ac سیم‌پیچ‌ها و تلفات سیم‌پیچ‌ها تأثیر می‌گذارد. بنابراین انتخاب ماده هسته و سیم‌پیچ‌ها بسیار مهمی در طراحی ترانسفورماتور است [۱۱-۱۳]. بنابراین مقدار مقاومت ac با افزایش فرکانس به دلیل اثرات پوستی و مجاورتی افزایش می‌یابد [۱۴]. محاسبه تحلیلی و اندازه‌گیری دقیق مقاومت ac با استفاده از روش‌های مرسوم دقیق نیست. علاوه بر این، در ترانسفورماتور به دلیل شار پراکندگی راکتانس نشتی به وجود می‌آید که نقش مهمی در طراحی ترانسفورماتور ایفا می‌کند. افت ولتاژ و راندمان ترانسفورماتور عمدتاً تحت تأثیر راکتانس نشتی است. علاوه بر این، انرژی ذخیره شده در اندوکتانس نشتی منجر به سوئیچ زنی سخت و تلفات می‌شود. بنابراین محاسبه دقیق مقدار راکتانس نشتی در مرحله طراحی ترانسفورماتور بسیار مهم است. علاوه بر این، راکتانس نشتی عمدتاً به ابعاد مکانیکی بستگی دارد و یکی از شاخص‌های اصلی برای تعیین وضعیت مکانیکی و عیوب رخ داده در ترانسفورماتور می‌باشد. در مقالات، شیوه‌های تحلیلی و عددی مختلف برای محاسبه راکتانس نشتی موجود است. اما در هندسه‌های پیچیده این شیوه‌ها غیرقابل اعتماد هستند. آزمایش دقیق راکتانس و به دست آوردن مقدار دقیق آن به طور عملی نیز مشکل است [۱۵]. شیوه دیگر به دست آوردن دقیق مقاومت ac و راکتانس نشتی استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود (FEM) است.

امروزه به منظور کاهش اندازه منابع تغذیه از مبدل‌های سوئیچینگ با فرکانس بالا استفاده می‌شود که این موجب کاهش اندازه اجزاء الکترومغناطیسی و افزایش تلفات سوئیچ‌ها می‌شود. علاوه بر این، اندوکتانس پراکندگی^۱ در ترانسفورماتورهای فرکانس بالا افزایش می‌یابد و روی مدار تأثیر می‌گذارد. استفاده از فناوری سوئیچینگ نرم رزونانسی منجر به کاهش تلفات سوئیچینگ می‌شوند [۱-۲]. مبدل‌های رزونانسی می‌توانند هم‌زمان با فرکانس سوئیچینگ بالا، سوئیچینگ ولتاژ صفر (ZVS) سوئیچ‌های اولیه و سوئیچینگ جریان صفر (ZCS) برای یک سوساز در ثانویه عمل کنند [۳-۴].

طراحی ترانسفورماتور با فرکانس بالا، چالش مهمی در طراحی مبدل DC-DC است. مواد مغناطیسی نرم مانند آمورف، نانوکریستال و فریت‌ها در ترانسفورماتورها با فرکانس بالا به طور معمول استفاده می‌شوند [۵-۶]. امروزه، مطالعات گسترده‌ای در زمینه طراحی ترانسفورماتورها در سطوح مختلف توان و فرکانس کاری انجام شده است [۷-۹]. با توجه به فرکانس کاری نوع ماده هسته و با توجه به چگالی توان و بهره، سطح توان ترانسفورماتور تعیین می‌شود [۱۰].

* رایانامه نویسنده مسئول: A_bali@mut.ac.ir

^۱ Finite element method

^۲ Leakage Inductance



استفاده شده است. سپس شبیه‌سازی گذرای مدار الکترونیک قدرت و ترانسفورماتور با استفاده از ANSYS Maxwell-3D/Simplorer انجام شده است.

۲- روش طراحی ترانسفورماتور با فرکانس بالا

برای طراحی ترانسفورماتور از فلوجارت نشان داده شده در شکل (۱) استفاده شده است. در مرحله اول نوع ماده هسته (فریت^۱، آمورف^۲ و نانوکریستال^۳)، هندسه هسته و اندازه هسته پارامترهای مهمی هستند که باید در روند طراحی در نظر گرفته شوند. اشکال هندسی هسته ترانسفورماتور عبارت‌اند از EE، UU، EI، CC و I. toroid. در مرحله بعد پارامترهای مدار معادل دقیق ترانسفورماتور با روش تحلیلی محاسبه شده است. با استفاده از نرم‌افزار تحلیل المان محدود (FEM) در فرایند طراحی، مدل‌سازی و مطالعات شبیه‌سازی عملکرد ترانسفورماتور به‌راحتی برای شرایط غیرخطی قبل از تولید نمونه اولیه امکان‌پذیر است. پس از طراحی و مدل‌کردن ترانسفورماتور در نرم‌افزار، با ایجاد لینک مابین نرم‌افزار Ansys-Maxwell که مدل ترانسفورماتور در آن قرار دارد و Ansys-Simplorer که در آن مدارهای الکترونیک قدرت مدل‌سازی می‌شود، داده‌های مختلفی مانند تلفات ترانس، توزیع شار، مقادیر مقاومت AC سیم‌پیچ‌ها، مقادیر ظرفیت، مقادیر القایی و شکل موج جریان و ولتاژ از شبیه‌سازی‌های مشترک به دست می‌آید. سپس نمونه آزمایشگاهی ترانسفورماتور ساخته می‌شود و نتایج حاصله مقایسه می‌شوند.

۲-۱- طراحی ماده و ابعاد هسته ترانسفورماتور

باتوجه به اینکه فرکانس کاری ترانسفورماتور به عملکرد ماده مغناطیسی وابسته است در انتخاب ماده مغناطیسی باید دقت کرد. به طوری که با افزایش فرکانس عملکرد، اندازه ترانسفورماتور به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. با این وجود، افزایش مقدار فرکانس روی تلفات سیم‌پیچ و تلفات هسته ترانسفورماتور تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این در انتخاب ماده مغناطیسی به عوامل مختلفی از جمله هزینه، ابعاد، عملکرد و کاربرد باید توجه شود.

از آنجاکه فریت مناسب‌ترین برای کاربردهای فرکانس بالا است، و از نظر هزینه و عملکرد مناسب است از این ماده برای هسته استفاده می‌شود.

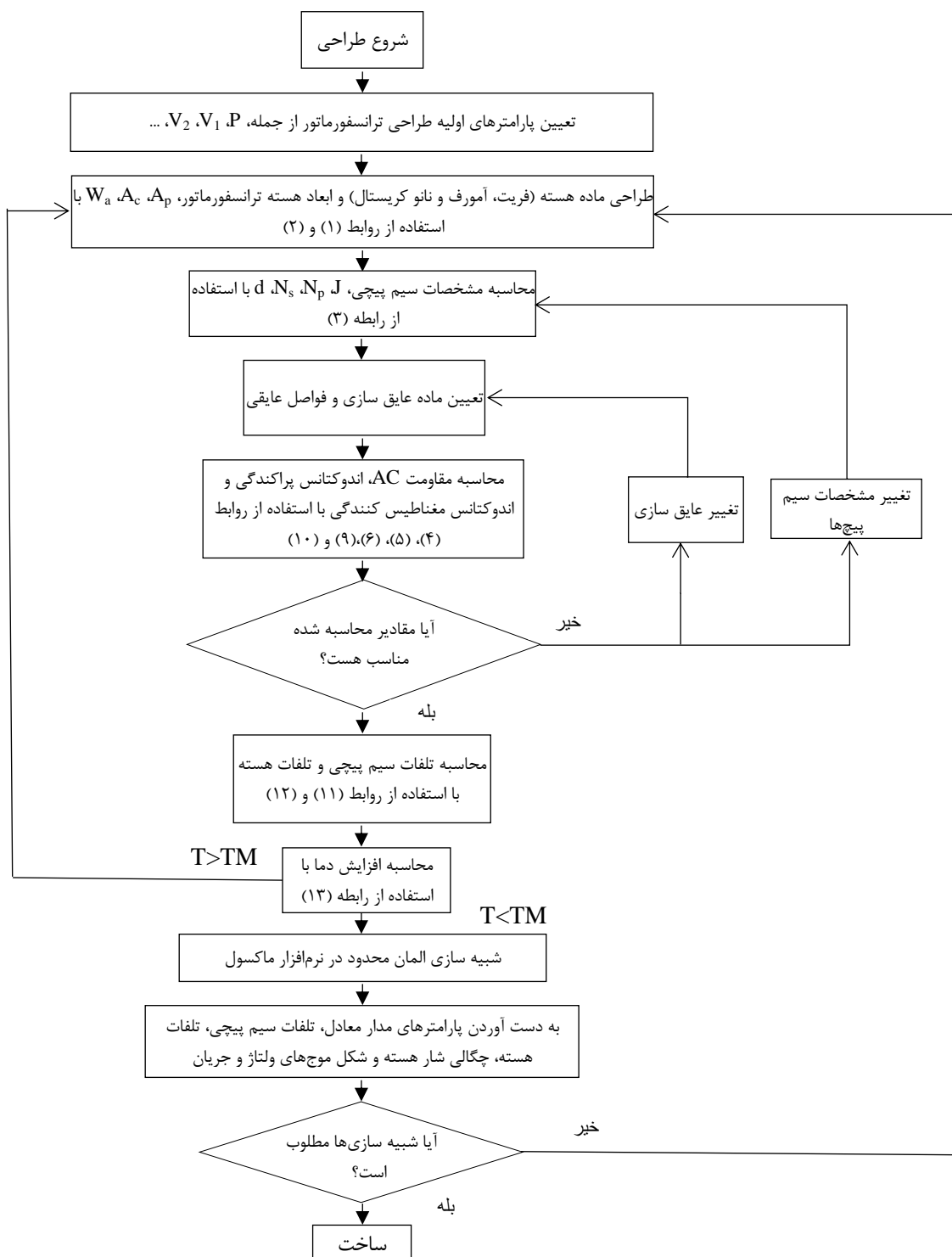
به‌طور کلی از مدار معادل تقریبی T برای مدل‌سازی رفتار مغناطیسی خطی یک ترانسفورماتور استفاده می‌شود. پارامترهای مدار معادل T شامل مشخصه مغناطیسی خطی، مقاومت سیم‌پیچ‌ها و اندوکتانس نشتی سیم‌پیچ‌ها می‌باشد. تجزیه و تحلیل مغناطیسی مورد نیاز برای تخمین مقاومت ac، اندوکتانس پراکندگی و اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی را می‌توان با استفاده از روش المان محدود انجام داد [۱۶]. با این حال، طراحی مغناطیسی، به‌ویژه طراحی ترانسفورماتور فرکانس بالا، ولتاژ بالا چالش بزرگی است [۱۷]. اندوکتانس نشتی یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی ترانسفورماتور قدرت است. اندوکتانس نشتی ترانسفورماتور قدرت را می‌توان با استفاده از شیوه‌های تحلیلی یا با استفاده از روش اجزای محدود محاسبه کرد [۱۷، ۱۸، ۱۹]. در گذشته از مدار معادل تقریبی ترانس برای مدل‌سازی و سپس شبیه‌سازی استفاده می‌شد که در این روش عملکرد غیر خطی ترانس و پارامترهای غیر خطی ترانسفورماتور قابل‌بررسی نبودند. همچنین تلفات هیستریزس، فوکو و حرارت در ترانس به طور دقیق قابل اندازه‌گیری نیستند. برای اندازه‌گیری دقیق این پارامترها، ترانسفورماتور باید به طور آزمایشگاهی ساخته شود که این هزینه بر و زمان بر است. بنابراین در این مقاله از روش FEM برای اندازه‌گیری دقیق پارامترها و مدل‌سازی ترانسفورماتور استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل المان محدود نشان می‌دهد که روش المان محدود دقت بالاتری در مقایسه با روش معمولی دارد. علاوه بر این قابلیت بررسی عملکرد غیر خطی ترانسفورماتور و اندازه‌گیری دقیق پارامترها وجود دارد.

در این مقاله، یک ترانسفورماتور ولتاژ بالا با فرکانس بالا طراحی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است. برای فشرده‌سازی، حمل‌پذیر شدن و کاهش هزینه‌های مواد اولیه از ترانس با فرکانس بالا استفاده شده است. با این حال با در نظر گرفتن فرکانس بالا چندین چالش جدی از جمله افزایش تلفات سوئیچ‌ها، تلفات اضافی در هسته، افزایش تلفات ناشی از اثرات پوستی و مجاورتی در سیم‌پیچ‌ها به وجود می‌آید. بنابراین از نرم‌افزار المان محدود برای محاسبه دقیق پارامترها برای طراحی بهینه ترانسفورماتور استفاده شده است. جنس هسته، شکل، اندازه، در دسترس بودن و هزینه به‌عنوان پارامترهای طراحی باید در نظر گرفته شوند. همچنین، نحوه قرار گرفتن سیم‌پیچ‌ها و المان‌های پارازیتی باید در محاسبات در نظر گرفته شوند. نحوه قرار گرفتن هسته و سیم‌پیچ به‌منظور به حداکثر رساندن ضریب کوپلینگ و دستیابی به اندوکتانس نشتی مناسب مورد مطالعه قرار گرفته است. ترانسفورماتور به طور کامل با استفاده از ANSYS Maxwell-3D مدل‌سازی شده است. از شیوه سوییچینگ نرم برای کاهش تلفات در ترانسفورماتور فرکانس بالا

¹ ferrite

² amorphous

³ nanocrystalline



شکل (۱). فلوچارت طراحی ترانسفورماتور فرکانس بالا

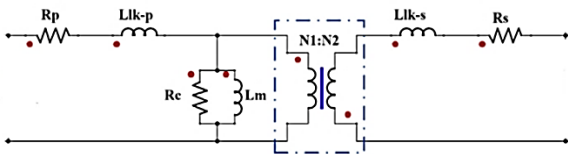
اندوکتانس پراکندگی بسیار زیادی ایجاد می‌کند که البته با توجه به استفاده ترانسفورماتور در میدل رزونانسی پارامتر تعیین کننده‌ای است که باید تعیین شود.

یکی از اصلی ترین پارامترهایی که باید در ابتدا تعیین و طراحی شود، A_p یعنی پارامتر مکانیکی ترانسفورماتور است که به

برای عایق سازی بهینه در بسیاری از ترانسفورماتورهای ولتاژ بالا از هسته های U شکل استفاده می‌شود به این صورت که اولیه روی یک پایه و ثانویه روی پایه دیگر قرار می‌گیرد. اگر چه جداسازی بین سیم پیچ اولیه و ثانویه ترانسفورماتور به طور قابل توجهی عایق سازی سیم پیچها را آسان تر می‌کند اما

۲-۲- مدار معادل ترانسفورماتور

مدل‌های مدار معادل بررسی شده در میان همه ترانس‌ها مشترک می‌باشد و همین مدل مرسوم، برای طراحی ترانسفورماتور قابل استفاده است. بسته به گونه‌های توصیف شده و دقت مطلوب، مدار معادل ممکن است شامل مقادیر و اجزای کوچک یا بزرگ باشد. بررسی دقیق ترانسفورماتور و پارامترهای آن برای ارائه اجزای مدار معادل مورد نیاز است که در شکل (۳) نشان داده شده است و در جدول (۱) بحث شده است.



شکل (۳). مدار معادل دقیق ترانسفورماتور

باتوجه به نحوه سیم‌پیچی و محدوده فرکانسی که ترانسفورماتور عمل می‌کند برخی مؤلفه‌ها مهم‌تر هستند. در ترانسفورماتور مورد نظر اندوکتانس پراکندگی اولیه L_{lk-p} و ثانویه L_{lk-s} اهمیت بسیار زیادی دارند که در نتیجه شار پراکندگی ایجاد می‌شود. مقاومت سیم‌پیچی R_{cu1} ، R_{cu2} در وضعیت DC به طور ساده با استفاده از معادله زیر به دست می‌آیند. این تقریب بسیار خوب می‌باشد، اما اثرات پوستی و مجاورتی در سیم‌پیچ‌های بررسی شده با فرکانس بالا نقش مهمی بازی می‌کند.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (۴)$$

بنابراین تخمین اثرات پوستی باتوجه به مدل سیم‌پیچ بسیار مهم است و توسط معادله زیر محاسبه می‌شود. با حل این معادله برای فرکانس زاویه‌ای مورد نظر ω عمق نفوذ هادی به دست می‌آید که باعث تغییر

چگالی جریان J عبوری از هادی ناشی از اثرات پوستی و مجاورتی می‌شود. این فرمول برای شکل موج‌های سینوسی می‌باشد برای شکل موج‌های مربعی از تجزیه سری فوریه استفاده می‌شود.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \cdot \mu_r \cdot \mu_0}} \quad (۵)$$

پس از تخمین اثر پوستی δ مقدار جدید مقاومت AC با استفاده از معادله (۴) محاسبه می‌شود. در واقع این اثر باعث کاهش سطح مقطع هادی به سطح لوله توخالی با ضخامت دیواره δ می‌شود. بنابراین در معادله (۴) سطح مقطع هادی از رابطه $\pi(\tau - \delta)^2$ قابل محاسبه است.

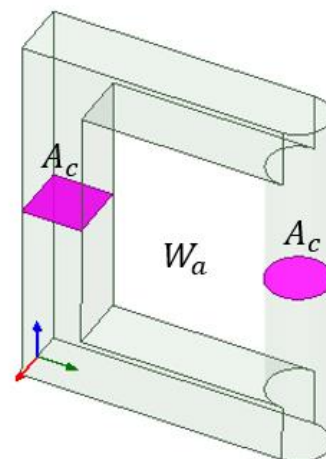
توانایی انتقال توان وابسته است و حاصل ضرب مساحت هسته A_c و مساحت پنجره هسته W_a است که در شکل (۲) نشان داده شده است [۱۳].

$$A_p = W_a \cdot A_c \quad (۱)$$

بنابراین از رابطه تجربی زیر برای محاسبه اندازه هسته استفاده می‌شود [۱۸].

$$A_p = \frac{(P_{in} + P_{ou}) \cdot 10^4}{K_f \cdot B_m \cdot f \cdot K_u \cdot J} V_{core} \quad (cm^4) \quad (۲)$$

که K_f بهره شکل موج (برای شکل موج مربعی ۴ و برای شکل موج سینوسی ۴/۴۴)، B_m چگالی شار ماکزیمم (که باتوجه به نوع هسته انتخاب شده تعیین می‌گردد)، J چگالی جریان (با توجه به نوع هادی استفاده شده تعیین می‌گردد)، K_u ضریب استفاده از پنجره (یک ضریب ثابت) و V_{core} حجم هسته می‌باشد. لازم به ذکر است باتوجه به نمونه‌های قبلی انجام شده و محدودیت‌های مسئله و اینکه در دیتاشیت هسته‌ها، W_a و A_c داده شده است، با استفاده از جدول کلی هسته‌های فریتی و ضرب این دو پارامتر نزدیک‌ترین مقدار به A_p یافت شده و پارامترهای هسته مورد نظر انتخاب گردید. همچنین ضریب پنجره یک مقدار ثابت معادل ۰/۳ و باتوجه به اینکه چگالی به پارامترهای زیادی وابسته است، مقدار آن عددی بین ۴ تا ۳ است و چگالی شار بیشینه در مسئله ما ۰/۴ تسلا فرض شده است.



شکل (۲). اندازه ابعاد ترانسفورماتور A_c و W_a

تعداد دور سیم‌پیچ‌ها از قانون القای فارادی با رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۷].

$$N = \frac{V \cdot 10^4}{K_f \cdot B_m \cdot f \cdot A_c} \quad (۳)$$

مغناطیس‌کنندگی می‌باشد. بنابراین اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$L_m = L_{self} - L_l \quad (10)$$

ضریب نفوذپذیری نسبی هسته ثابت نیست، بدین ترتیب که برای دستیابی به نتیجه صحیح مشخصه غیر خطی هسته باید در نظر گرفته شود. بهترین و دقیق‌ترین روش استفاده از نرم‌افزار المان محدود FEM است که در ادامه توصیف می‌شود.

یک از چالشی‌ترین پارامترها تخمین مقاومت هسته R_c می‌باشد. یک شیوه محاسبه تلفات هسته برای فرکانس مشخص و چگالی شار مغناطیسی مشخص با استفاده از رابطه ۱۱ سپس محاسبه مقاومت هسته با استفاده از قانون اهم از رابطه ۱۲ قابل محاسبه است.

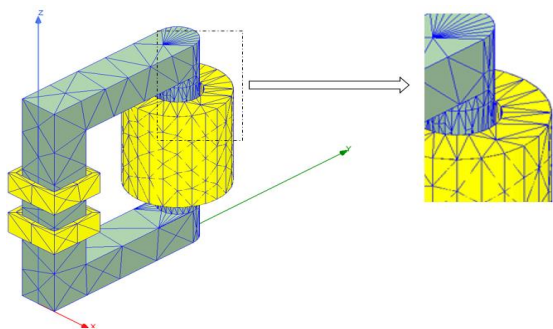
$$P_c = k \cdot f^\alpha \cdot B^\beta \cdot V_c \quad (11)$$

$$P_c = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R} \quad (12)$$

که f فرکانس عملکرد ترانسفورماتور، B چگالی شار و α ، β ضرایبی هستند که توسط تولیدکنندگان داده می‌شود.

۲-۳- تحلیل المان محدود

در شکل (۴) ترانسفورماتور طراحی شده با هسته فریت به‌منظور به‌دست‌آوردن رفتار ترانسفورماتور در نرم‌افزار المان محدود Maxwell 3D مدل شده است. هسته ترانسفورماتور با دو هسته فریت U شکل متقارن با منحنی $B-H$ هسته فریت در کتابخانه Maxwell 3D ایجاد شده است. مقدار دقیق منحنی $B-H$ برای به‌دست‌آوردن نتایج شبیه‌سازی دقیق بسیار مهم است. ترانسفورماتور مدل شده افزاینده با نسبت تبدیل ۳۷۰ می‌باشد. نرم‌افزار FEM ترانسفورماتور را به المان‌های محدود تقسیم می‌کند.



شکل (۴). نمایش المان محدود ترانسفورماتور

در شکل (۵) منحنی هیستریزس ترانسفورماتور نشان داده شده است. باتوجه‌به اینکه اشباع در ترانسفورماتورهای فرکانس بالا

یک شیوه محاسبه اندوکتانس پراکندگی با استفاده از فاصله مابین سیم پیچ اولیه و ثانویه است. باتوجه‌به اینکه میدان مغناطیسی پراکندگی داخل این حجم بسیار زیاد است. این شیوه به صورت مستقیم با تقریب حجم و سیم پیچ با فاصله هوایی می‌توان اندوکتانس خودی سیم پیچ با فاصله هوایی را از رابطه زیر به دست آورد.

$$L_{ll} = \frac{\mu_0 \cdot N_1^2 \cdot A}{l} \quad (6)$$

که L_{ll} اندوکتانس پراکندگی، N_1 تعداد دور سیم پیچ، l طول سلونوئید و A مساحت مابین سیم پیچ اولیه و ثانویه است. این تقریب باتوجه به این واقعیت است که اکثر شار پراکندگی مغناطیسی مابین سیم پیچ اولیه و ثانویه است و این حجم بنابراین می‌تواند با جایگزینی هسته هوایی ساختگی به دست آید. باتوجه‌به اینکه که تعداد دورهای سیم پیچ اولیه در نظر گرفته شده است اندوکتانس پراکندگی به طرف اولیه ارجاع داده شود.

اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی L_m می‌تواند به طور تقریبی توسط به‌کاربردن قانون آمپر و فارادی برای هسته تروئید شکل به دست آید [۱۰].

$$\int_C H \cdot dl = I_{enc} \quad (7)$$

که عبارت مذکور انتگرال خطی در طول حلقه بسته را بیان می‌کند، در واقع در هسته، شدت میدان مغناطیسی H و جریان کل حلقه I_{enc} می‌باشد که با انتگرال‌گیری به‌دست‌آمده است.

$$E = - \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \quad (8)$$

که E نیروی محرکه القا شده و $\frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t}$ تغییر شار مغناطیسی در طول زمان است. حال اندوکتانس خودی از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$L_{self} = \frac{\int V(t) \cdot dt}{I(t)} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N_1 \cdot A}{2\pi r} \quad (9)$$

N_1 تعداد دورهای سیم پیچ اولیه است، A سطح مقطع هسته و r شعاع متوسط هسته تروئید شکل می‌باشد.

لازم به ذکر است که این تقریب با در نظر گرفتن توزیع چگالی شار یکنواخت داخل هسته، هسته دایره‌ای شکل و سیم پیچی روی هسته می‌باشد. بنابراین در هسته‌هایی که دایره‌ای شکل نیستند بر این اساس طول مغناطیس مؤثر در نظر گرفته می‌شود. L_{self} محاسبه‌شده شامل اندوکتانس پراکندگی و اندوکتانس

مدار میدل Push-Pull تک‌فاز رزونانسی که در شکل (۷) نشان داده شده است در نرم‌افزار ANSYS-Simplorer با نرم‌افزار ماکسول برای تست عملکرد ترانسفورماتور قدرت لینک شده است. بنابراین، نتایج واقعی رفتار الکترومغناطیسی ترانسفورماتور مورد نظر توسط مدار الکترونیک قدرت به دست می‌آید.

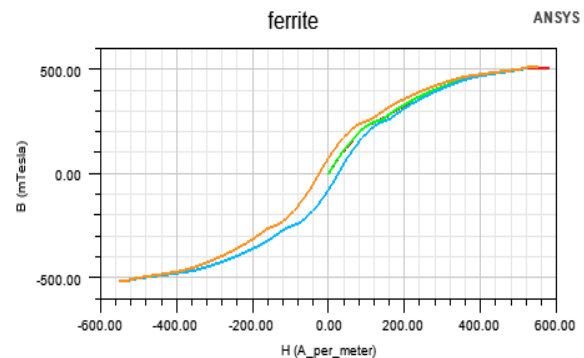
۳- نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی

مطالعات شبیه‌سازی و آزمایشگاهی ترانسفورماتور طراحی شده با مدار میدل با ولتاژ ۱۲ V و فرکانس ۲۵ kHz برای بررسی عملکرد انجام شده است. نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی در وضعیت بارداری در شکل (۸) نشان داده شده است. از آنجاکه، میدل رزونانسی است و در ناحیه خطی منحنی B-H کار می‌کند ولتاژ و جریان ترانسفورماتور به طور کامل سینوسی و بدون اعوجاج می‌باشند و با هم اختلاف‌فاز ۹۰ درجه دارند که ناشی از خاصیت القایی هسته ترانسفورماتور می‌باشد. همچنین مقدار جریان مغناطیسی کننده هسته در نیم سیکل مثبت کمی بیشتر از نیم سیکل منفی است که ناشی از اختلاف مشخصه سوئیچ‌های ماسفت می‌باشد. مقایسه حالت شبیه‌سازی و تست شده اختلاف مقدار حدوداً ۴ و ۲/۵ درصدی را به ترتیب برای ولتاژ و جریان نشان می‌دهد. همچنین لازم به ذکر است همچنین در شبیه‌سازی مقاومت بار بسیار زیاد انتخاب شده تا حالت مدار باز ایجاد شده و شبیه‌سازی خطا نداده و متوقف نشود.

جدول (۱). پارامترهای محاسبه شده در دو مقطع

پارامترها	L_{lkp}	L_M	R_p	R_s	R_c
روش محاسباتی	۶/۰۳ uH	۱۵ uH	۰/۲۵ Ω	۵/۵۰ Ω	۱۴۴
شبیه‌سازی المان محدود	۶/۳۰ uH	۱۴/۲۵ uH	۰/۱۵ Ω	۵ Ω	-
نتایج آزمایشگاهی	۶/۱۰ uH	۱۴/۵۰ uH	۰/۲۰ Ω	۵/۱۰ Ω	۱۴۶
درصد خطای شبیه‌سازی المان محدود %	۳	۱/۷	۲/۵	۱/۹	-

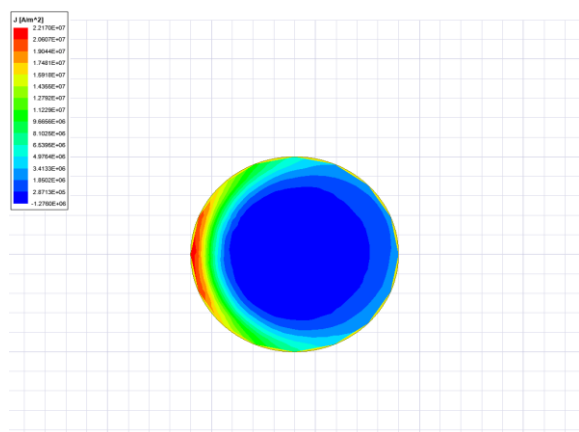
باعث افزایش تلفات هسته، جریان بسیار زیاد در سیم‌پیچ‌ها و افزایش تلفات سیم‌پیچ‌ها و تلفات سوئیچینگ و در نتیجه افزایش حرارت در ترانسفورماتور می‌شود بنابراین ترانسفورماتور باید به گونه‌ای طراحی شود که در زیر ناحیه اشباع یا همان ناحیه خطی کار کند.



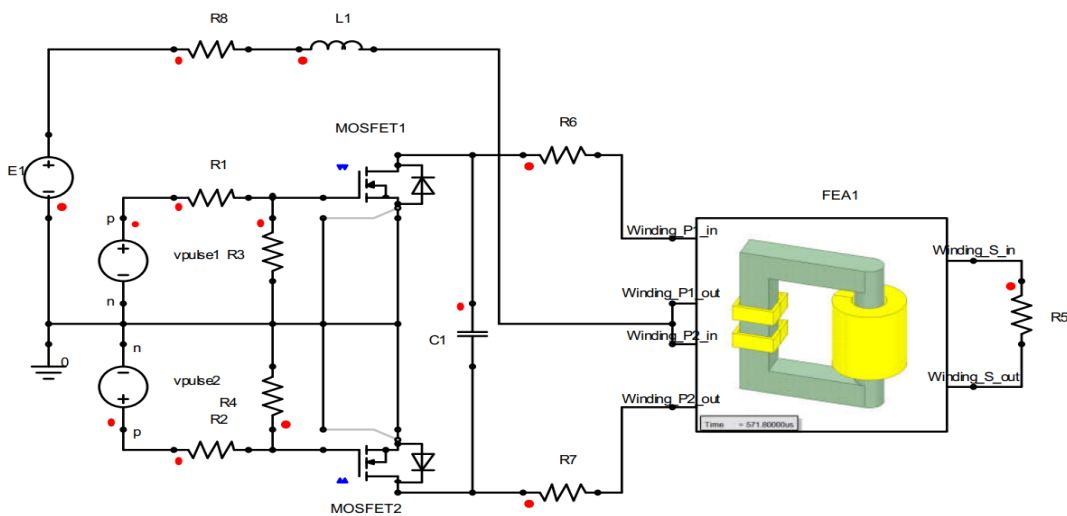
شکل (۵). منحنی هیستریزس

در مدل‌سازی المان محدود پارامترهای مدار معادل از جمله مقاومت، اندوکتانس نشتی و اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی طرف اولیه و ثانویه ترانسفورماتور با تنظیمات مختلف حل‌کننده Ansys Maxwell تعیین می‌شوند.

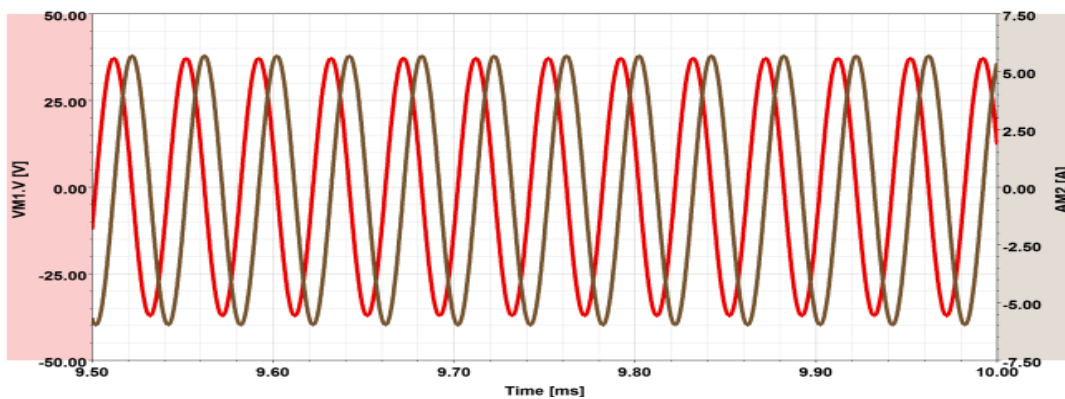
مقدار مقاومت AC سیم‌پیچ‌ها با توجه به فرکانس کار با در نظر گرفتن اثرات پوستی و مجاورتی، باید تخمین زده شود که به راحتی توسط شبیه‌سازی Ansys Maxwell امکان‌پذیر است که با فرض انتهایی‌ترین هادی در سیم‌پیچ شبیه‌سازی شده و در شکل (۶) نشان داده شده است. پارامترهای مدار معادل در جدول (۱) نشان داده شده است.



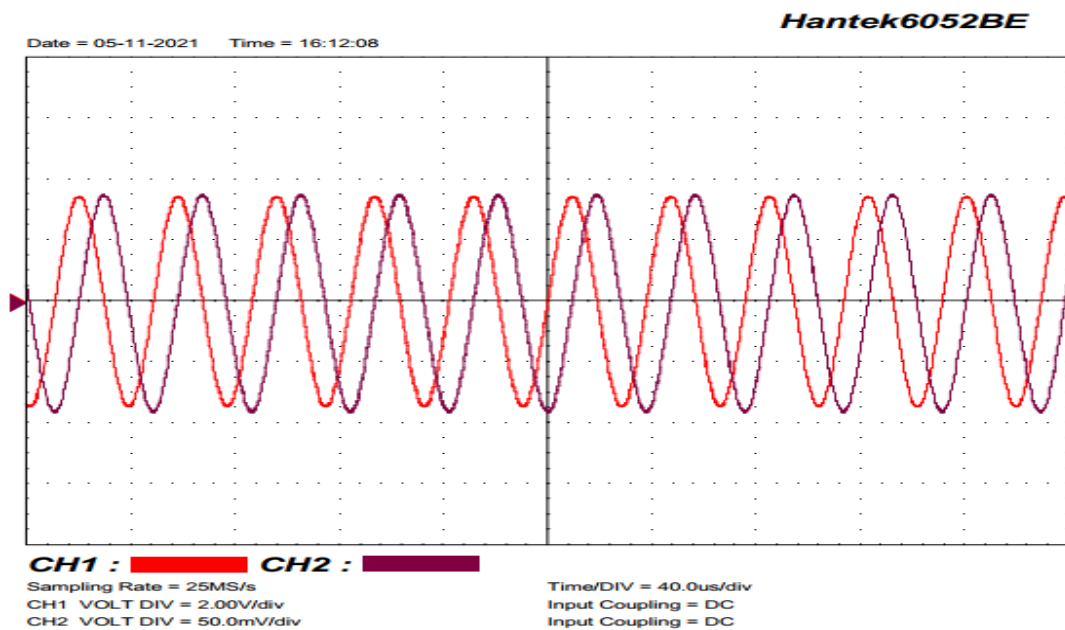
شکل (۶). اثر پوستی و مجاورتی در سطح مقطع عرضی هادی



شکل (۷). شبیه‌سازی مدار Push-Pull رزونانسی در محیط Simplerer



(الف)

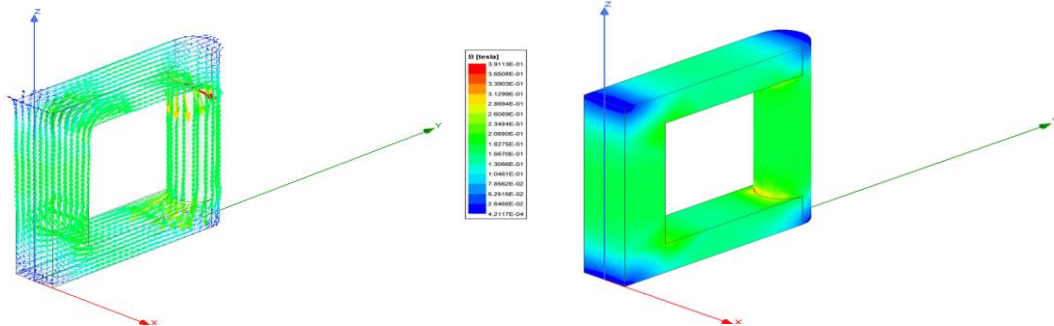


(ب)

شکل (۸). شکل موج‌های ولتاژ و جریان اولیه ترانسفورماتور در وضعیت بار کامل (الف) نتایج FEM، (ب) نتایج آزمایشگاهی (سمت چپ ولتاژ با نسبت اندازه‌گیری ۱/۱۰ و سمت راست جریان با نسبت اندازه‌گیری ۱/۶۶).

کانال و اعمال ۱/۸ واحد مقدار معادل ۹۰ میلی می شود که با اعمال نسبت اندازه گیری ۱/۶۶ مقدار حدوداً ۵۹۴۰ میلی آمپر می شود که با مقدار حدودی ۶/۱ آمپری شبیه سازی، اختلافی حدوداً ۲/۶ درصدی دارد.

باتوجه به شکل توزیع چگالی شار در گوشه داخلی هسته تقریباً T ۰/۴ است، در بخش های دیگر کمتر از T ۰/۳ است. بنابراین، چگالی شار در گوشه های داخلی بیشتر است و احتمال اشباع در آنها وجود دارد اما مقدار چگالی شار تعیین شده بیش از چگالی شار اشباع طراحی شده نیست، و اشباع برای فرکانس عملکرد ۲۵kHz و ولتاژ ۱۲V اتفاق نمی افتد.



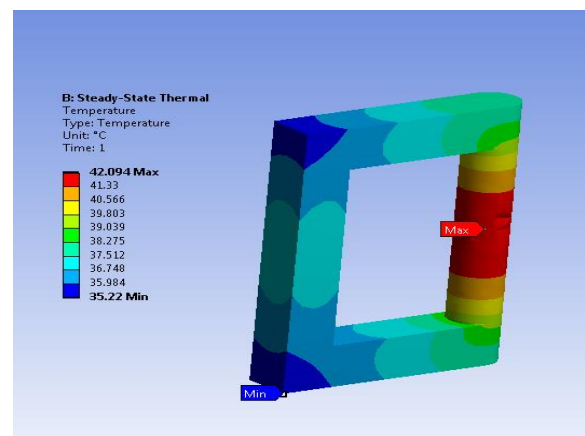
شکل (۹). توزیع چگالی شار در هسته

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، ترانسفورماتور میدل رزونانسی با هسته فریت با ولتاژ ۱۲V و فرکانس ۲۵kHz، طراحی و با نرم افزار FEM مدل سازی، شبیه سازی و ساخته شده است. روش های تحلیلی و المان محدود برای محاسبه پارامترهای ترانسفورماتور از جمله، چگالی شار اشباع و تلفات هسته بررسی شدند. مدل ترانسفورماتور باتوجه به پارامترهای طراحی به دست آمده سپس مدل 3D FEM ترانسفورماتور ایجاد شده است. بخش های مغناطیسی ترانسفورماتور طراحی شده با نرم افزار Ansys Maxwell و مدار الکترونیک قدرت با کمک نرم افزار Simplorer شبیه سازی شده است و مطالعات شبیه سازی هر دو بخش مرتبط با هم انجام شده است. پس از تکمیل مطالعات شبیه سازی ترانسفورماتور، نمونه اولیه میدل رزونانسی طراحی شده ساخته شده و مطالعات آزمایشگاهی انجام شده است. نتایج به دست آمده از تحلیل اجزای محدود نشان می دهد که روش المان محدود دقت بالاتری در مقایسه با روش های معمولی دارد. بنابراین این روش می تواند برای سازندگان ترانسفورماتور برای به حداقل رساندن زمان طراحی ترانسفورماتور مفید باشد و همچنین می تواند کیفیت عملکرد ترانسفورماتور را افزایش دهد. همان گونه مشاهده شد پارامترهای طراحی و نتایج شبیه سازی با

باتوجه به اینکه، عملکرد الکترومغناطیسی ترانسفورماتور به خواص ماده مغناطیسی هسته وابسته است (مانند نفوذپذیری و چگالی شار اشباع). توزیع چگالی شار ترانسفورماتور با هسته فریت با استفاده از نرم افزار المان محدود در شکل (۹) نشان داده شده است. در ارتباط با شکل (۸)، ابتدا یک جهت برای اندازه گیری جریان انتخاب شد و سپس متوجه شدیم که جهت معکوس انتخاب شده است برای همین جریان از نظر فاز جلوتر می باشد که از نظر علمی باید برعکس در نظر گرفته شود. همچنین از نظر مقدار در شکل (۸) (ب) هر واحد ۲ ولت و با اعمال ۱/۸ واحد و نسبت اندازه گیری ۱۰/۱ مقدار ۳۶ به دست می آید که در نمونه شبیه سازی شده هم این مقدار تقریباً ۳۷/۵ است که اختلافی ۴ درصدی دارد. در مورد جریان هم باتوجه به تنظیم

به دلیل عملکرد ترانس در فرکانس بالا و مشخصه غیر خطی هسته محاسبه دقیق تلفات و در نتیجه دمای عملکرد ترانس برای طراحی بهینه بسیار مهم است. نرم افزار این قابلیت را دارد که تلفات و حرارت را به طور دقیق محاسبه کند. سپس با توجه با آن ماده مناسب برای هسته انتخاب نمود تا تلفات هسته مینیمم شود. در شکل (۱۰) دمای عملکرد هسته ترانسفورماتور نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در بخشی از هسته دما کمی بیشتر است. اما در مجموع توزیع دما در هسته مناسب است.



شکل (۱۰). دمای هسته ترانسفورماتور

- [10] C. Liao, J. Ruan, C. Liu, W. Wen and Z. Du, "3-D Coupled Electromagnetic-Fluid-Thermal Analysis of Oil-Immersed Triangular Wound Core Transformer," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2014, Art no. 8401904, doi: 10.1109/TMAG.2014.2330953.
- [11] I. Villar, "Multiphysical characterization of medium-frequency power electronic transformers." Lausanne, Switzerland: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (2010).
- [12] S. Balci, I. Sefa, and N. Altin. "Design and analysis of a 35 kVA medium frequency power transformer with the nanocrystalline core material." *International journal of hydrogen energy*, vol. 42, no. 28, pp. 17895-17909, 2017.
- [13] V. S. Duppalli and S. Sudhoff, "Computationally efficient leakage inductance calculation for a high-frequency core-type transformer," 2017 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), Arlington, VA, 2017, pp. 635-642, doi: 10.1109/ESTS.2017.8069348.
- [14] D. Kamran, M. Aytac Cinar, B. Alboyaci, and O. Sonmez, "Calculation of the leakage reactance in distribution transformers via numerical and analytical methods." *Journal of Electrical Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 213-221, 2019.
- [15] B. Zhao, Z. Ouyang, M. C. Duffy, M. A. E. Andersen and W. G. Hurley, "An Improved Partially Interleaved Transformer Structure for High-Voltage High-Frequency Multiple-Output Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 4, pp. 2691-2702, April 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2840499.
- [16] D. Kamran and G. Komurgoz, "Effect of the Tap Winding Configurations on the Leakage Reactance of the Concentric Transformer Coils," 2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Nevsehir, Turkey, 2019, pp. 200-205, doi: 10.1109/GPECOM.2019.8778565.
- [17] M. Aghaei, S. Mohsenzade and S. Kaboli, "On the Calculation of the Leakage Inductance in Transformers With Nonideal Windings," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 8, pp. 8460-8471, Aug. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2963274.
- [18] H. Tian, Z. Wei, S. Vaisambhayana, M. P. Thevar, A. Tripathi and P. C. Kjær, "Calculation and Experimental Validation on Leakage Inductance of a Medium Frequency Transformer," 2018 IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC), Singapore, Singapore, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/SPEC.2018.8635637.

نتایج آزمایشگاهی تأیید شده است، و ترانسفورماتور طراحی شده با هسته فریت از نظر الکتریکی و مغناطیسی عملکرد بسیار مطلوبی دارد.

۵- مراجع

- [1] C. Zhang, H. Lin, and Z. Zhiguo "An overview of switching power supply technology development." *Microelectronics*, vol. 46, no. 2, pp. 255-260, 2016.
- [2] S. Wang, "An overview of the basic principle and technology development of switching power supply." *Value Engineering*, vol. 37, no. 14, pp. 269-271, 2018.
- [3] J. Afsharian, G. Bing, Z. Ning, D. X. Dewei and Y. Zhihua, "A Low Profile Stacked Transformer for High-Efficiency High-Output-Current 380 V/12 V LLC Resonant Converters." In 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 810-816. IEEE, 2019.
- [4] J. Afsharian, G. Bing, Z. Ning, D. X. Dewei and H. S. Athab, "High-frequency transformer design for DC/DC resonant converters." U.S. Patent 10,832,858, issued November 10, 2020.
- [5] S. Balci, "The analysis, design and implementation of the medium frequency power transformer with the nanocrystalline core material." (2016).
- [6] S. Ozdemir, S. Balci, N. Altin, and I. Sefa, "Design and performance analysis of the three-level isolated DC-DC converter with the nanocrystalline core transformer." *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 28, pp. 17801-17812, 2017.
- [7] S. Zhao, Q. Li, F. C. Lee and B. Li, "High-Frequency Transformer Design for Modular Power Conversion From Medium-Voltage AC to 400 VDC," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 9, pp. 7545-7557, Sept. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2774440.
- [8] G. Ortiz, M. G. Leibl, J. E. Huber and J. W. Kolar, "Design and Experimental Testing of a Resonant DC-DC Converter for Solid-State Transformers," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 10, pp. 7534-7542, Oct. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.26378273.
- [9] A. E. Shafei, S. Ozdemir, N. Altin, G. Jean-Pierre and A. Nasiri, "A High Power High Frequency Transformer Design for Solid State Transformer Applications," 2019 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Brasov, Romania, 2019, pp. 904-909, doi: 10.1109/ICRERA47325.2019.8996515.