

بررسی فرورزونانس مد پایه برای یک ترانسفورماتور مدل سازی شده از طریق روش المان محدود با لحاظ کردن مدل هیستریزیس برداری معکوس J-A

بهرروز رضایی علم و مرتضی میخک بیرانوند

گاهی اوقات منجر به انفجار دستگاه‌های تحت فشار^۱ شود. پدیده فرورزونانس و سطح تخریب شکل موج‌ها تحت تأثیر ولتاژ تغذیه، ظرفیت خازن موجود در مدار، لحظه کلیدزنی تغذیه و شرایط اولیه مدار الکتریکی (مانند شار مغناطیسی در هسته ترانسفورماتور) هستند. علاوه بر این، رفتار غیر خطی اندوکتانس که با مشخصه هیستریزیس هسته ترانسفورماتور بیان می‌شود شدیداً بر اضافه ولتاژ و جریان فرورزونانس تأثیر می‌گذارد [۱] و [۲].

فرورزونانس ضرورتاً یک پدیده فرکانس پایین است و عموماً در طیف فرکانسی زیر ۲ kHz رخ می‌دهد که معمولاً آن را در سه مد پایه^۲، هرج و مرج^۳ و زیرهارمونیک^۴ کلاس‌بندی می‌کنند [۲]. مد پایه با شکل موج‌های ولتاژ و جریان شناخته می‌شود که فرکانسشان شبیه سیستم الکتریکی است که می‌تواند محتوای هارمونیک داشته یا نداشته باشد. در مد زیرهارمونیک شکل موج‌های ولتاژ و جریان دارای فرکانس‌هایی از مضارب فرکانس سیستم الکتریکی هستند و مد هرج و مرج یک طیف گسترده از فرکانس را ارائه می‌دهد [۳] و [۴]. هدف ما در این تحقیق بررسی رفتار دقیق ترانسفورماتور در مد پایه فرورزونانس می‌باشد که این امر مستلزم ارائه یک مدل دقیق از هسته ترانسفورماتور است.

در [۱] با استفاده از یک مدل استاتیکی، برای مدار معادل مغناطیسی ترانسفورماتور در حالت بی‌باری، یک مدل هیستریزیس استخراج گردیده و فرورزونانس بررسی شده است. در [۵] با استفاده از مدار معادل مغناطیسی و با پیاده‌سازی مدل هیستریزیس به روش پریزاک، پدیده فرورزونانس در حالت گذرا بررسی شده است. در [۶] یک مدل هیستریزیس J-A اسکالر با استراتژی جریان-شار به یک هسته فرومغناطیسی غیر خطی اعمال شده که با لحاظ کردن مدار معادل مغناطیسی می‌تواند در مد فرورزونانس به کار گرفته شود. مدار معادل مغناطیسی این اجازه را نمی‌دهد که با لحاظ کردن ابعاد و هندسه واقعی ترانسفورماتور و همچنین رفتار دینامیکی و غیر خطی هسته مغناطیسی، بتوان به بررسی دقیق مشخصاتی از قبیل تلفات ترانسفورماتور پرداخت. در [۷] پدیده فرورزونانس با کمک المان محدود برای یک اتوترانسفورماتور مورد تحلیل قرار گرفته که البته در این تحلیل از منحنی ساده B-H برای مدل سازی هسته استفاده شده که این مدل سازی نمی‌تواند رفتار غیر خطی واقعی هسته را بیان کند. از این رو در این تحقیق با به کارگیری روش محاسباتی المان محدود و با مشارکت مدل دقیق رفتار غیر خطی هسته، مشخصه‌های رفتاری ترانسفورماتور

چکیده: تأثیرگذارترین عامل در پدیده فرورزونانس برای ترانسفورماتور، اشباع شدید هسته مغناطیسی و ورود به ناحیه غیر خطی است که باعث غیر سینوسی شدن جریان و ولتاژ می‌شود. از این رو چالش مهم در بررسی فرورزونانس، مدل‌سازی رفتار غیر خطی هسته مغناطیسی می‌باشد. در این مقاله برای نخستین بار با لحاظ کردن حلقه هیستریزیس هسته، پدیده فرورزونانس در مد پایه با کمک روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفته شده است. برای مدل کردن حلقه هیستریزیس هسته از مدل برداری معکوس J-A استفاده گردیده که باعث ارائه مدل دقیق رفتار غیر خطی هسته ترانسفورماتور می‌شود. با سری کردن خازن‌های مختلف با ترانسفورماتور مدل شده در حالت بدون بار، وقوع فرورزونانس در حالت ماندگار مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج دقیقی از حلقه هیستریزیس، شکل موج ولتاژ، شکل موج جریان، اشباع هسته، تلفات مسی و تلفات آهنی به عنوان مشخصات مهم ترانسفورماتور در این شرایط، استخراج شده است. مقایسه بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری، اعتبار مباحث مطرح شده را مورد تأیید قرار داده است.

کلیدواژه: المان محدود، ترانسفورماتور، فرورزونانس، مدل هیستریزیس برداری معکوس J-A، هسته غیر خطی.

۱- مقدمه

فرورزونانس یک پدیده نوسانی است که در مدارهای الکتریکی دربرگیرنده سلف غیر خطی و خازن با تغذیه ولتاژ متناوب، رخ می‌دهد. در یک شبکه انتقال تعداد زیادی خازن از قبیل کابل‌ها، خطوط بلند، ترانسفورماتورهای ولتاژ خازنی، بانک‌های خازنی سری یا موازی، خازن‌های گرادینت ولتاژ در مدار بریکرها، Substations روکش فلزی و همچنین سلف‌های قابل اشباع در قالب ترانسفورماتورهای توان، ترانسفورماتورهای القایی اندازه‌گیری ولتاژ و راکتورهای شنت وجود دارد. از اثرات فرورزونانس می‌توان به اضافه ولتاژ و اضافه جریان اشاره کرد که اعوجاج‌های شکل موج جریان و ولتاژ با سطوح بالا، خطرات زیادی را برای دستگاه‌های درگیر در مدار در پی خواهد داشت. از دیگر پیامدهای فرورزونانس می‌توان از تولید حرارت اضافی در ترانسفورماتورها و راکتورها، صدای گوش‌خراش پیوسته بیش از اندازه و مسایل مربوط به سیستم‌های حفاظتی نام برد که این مسایل می‌تواند فاجعه‌بار باشد و حتی

این مقاله در تاریخ ۸ مرداد ماه ۱۳۹۵ دریافت و در تاریخ ۱۰ شهریور ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

بهرروز رضایی علم، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد،
(email: rezaee.bh@lu.ac.ir)

مرتضی میخک بیرانوند، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد،
(email: mikhak.2913@yahoo.com)

1. Stress
2. Fundamental
3. Chaotic
4. Subharmonic

۲-۱ مدل هسته غیر خطی

معادلات اصلی از مدل هیستریزیس J-A به صورت زیر می‌باشند [۱۲]

$$dM = \frac{(\nu - c) \frac{dM_{ir}}{dB_e} + \left(\frac{c}{\mu_0}\right) \frac{dM_{an}}{dH_e}}{\nu + \mu_0(\nu - c)(\nu - \alpha) \frac{dM_{ir}}{dB_e} + c(\nu - \alpha) \frac{dM_{an}}{dH_e}} \quad (1)$$

$$M_{ir} = \frac{M - cM_{an}}{\nu - c} \quad (2)$$

$$H_e = H + \alpha M \quad (3)$$

$$B = \mu_0(H + M) \quad (4)$$

$$B_e = \mu_0 H_e \quad (5)$$

$$\frac{dM_{ir}}{dB_e} = \frac{M_{an} - M_{ir}}{\mu_0 k \delta} \quad (6)$$

$$M_{an} = M_s \left(\coth \frac{H_e}{a} - \frac{a}{H_e} \right) \quad (7)$$

در اینجا μ نفوذپذیری مغناطیسی خلأ، δ پارامتر جهت‌ی وابسته به مشتق چگالی شار میدان مغناطیسی (در صورتی که $dB/dt < 0$ باشد مقدار آن -1 و اگر $dB/dt > 0$ باشد مقدار آن $+1$ است)، H_e میدان مغناطیسی مؤثر، B_e چگالی شار مغناطیسی مؤثر و α ، c ، a و M_s پارامترهای مدل J-A می‌باشند.

Bergqvist یک بردار تعمیم‌یافته از مدل هیستریزیس اسکالر J-A را پیشنهاد داد [۱۳] و در ادامه J. V. Leite و همکارانش نسخه معکوس آن را از معادلات اصلی مدل پیشنهاد داده‌اند [۱۴]

$$dM = \frac{1}{\mu} [1 + f_x(\nu - \bar{\alpha}) + \bar{c} \bar{\xi}(\nu - \bar{\alpha})]^{-1} \cdot [f_x + \bar{c} \bar{\xi}] dB \quad (8)$$

که در این رابطه $f_x = \bar{\chi} |\bar{\chi}|^{-1} |\bar{\chi}|$ می‌باشد و متغیر بردار کمکی $\bar{\chi}$ با $(M_{an} - M) \bar{\chi} = \bar{k}^{-1} (M_{an} - M)$ مشخص می‌شود که M و M_{an} به ترتیب مغناطیس‌شوندگی فاقد هیستریزیس^۵ و مغناطیس‌شوندگی مجموع است. \bar{k} ، $\bar{\alpha}$ و \bar{c} تانسورهای رتبه دوم می‌باشند که این ترم‌ها باید با آزمایش به دست بیایند. I ماتریس واحد قطری و $\bar{\xi}$ ماتریس قطری توابع فاقد هیستریزیس است که با مراجعه به مؤلفه‌های میدان مؤثر حاصل می‌شود. جزئیات بیشتر مربوط به این روش در [۱۴] تشریح شده و ذکر این نکته مهم است که مدل هیستریزیس برداری معکوس J-A می‌تواند برای ورق‌های ایزوتروپیک و غیر ایزوتروپیک ارائه شود.

۲-۲ اتصال مدار الکتریکی به مدل المان محدود

یکی از مهم‌ترین بخش‌های مسایل مدل‌سازی در الکترومغناطیس، کوپلینگ بین محیط دویعدی (یا سه‌بعدی) با مدار الکتریکی خارجی است تا بتوان منابع تغذیه و بارهای الکتریکی را به سادگی برای ترانسفورماتور مدل‌شده تعریف نمود. این نحوه اتصال در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل IR مجموع مقاومت سیم‌پیچ اولیه و مقاومت سیم‌پیچ ثانویه منتقل شده به سمت اولیه، R مقاومت بار و CS ۳D منابع تغذیه جریان وابسته هستند که emf تولیدی در سیم‌پیچ‌ها به روش المان محدود را مدل‌سازی می‌کنند. بر اساس قانون فاراده ولتاژ القایی در سیم‌پیچ ناشی از

تحت وقوع فرورزونانس بررسی خواهد شد. تعیین مدل بیان‌کننده رفتار غیر خطی هسته به نحوه تحلیل میدان‌های مغناطیسی بستگی دارد که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.

جهت تحلیل میدان مغناطیسی در دستگاه‌های الکترومغناطیسی که دارای میدان مغناطیسی چرخان در بعضی نواحی هستند یا دارای مواد با خاصیت ناهمسانگرد^۱ می‌باشند، باید دانست که جهت‌های چگالی شار مغناطیسی B و شدت میدان مغناطیسی H موازی نیستند بلکه یک زاویه تأخیر بین B و H وجود دارد [۸]. اثر متقابل بین B و H را در چنین شرایطی تنها می‌توان با استفاده از روش برداری به دست آورد. از طرفی تلفات ناشی از میدان‌های چرخان سهم قابل توجهی در کل تلفات دستگاه‌های الکتریکی با هسته مغناطیسی مثل ترانسفورماتور دارد و از این رو ضرورت مدل‌سازی برداری میدان‌های مغناطیسی بیش از پیش احساس می‌شود [۹] و [۱۰]. مدل شناخته‌شده Preisach و سایر مدل‌های توسعه‌یافته بر اساس این مدل در سال‌های اخیر به صورت مؤثری برای شبیه‌سازی میدان‌های مغناطیسی استفاده شده است. با این وجود، لحاظ کردن میدان‌های مغناطیسی چرخان و مواد ناهمسانگرد با مدل برداری Preisach پیچیده می‌شود و شناسایی تابع توزیع Preisach (PDF) توسط اندازه‌گیری مجموعه‌ای از منحنی‌های برگشت‌پذیر دشوار خواهد بود [۱۱].

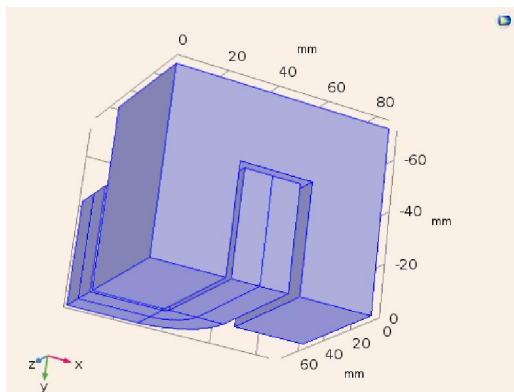
یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌ها برای شبیه‌سازی مشخصات غیر خطی مواد مغناطیسی مدل $J-A^2$ می‌باشد که این روش به دلیل مزیت‌های فراوان به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله آنها می‌توان به تعداد پارامترهای فیزیکی نسبتاً کم و پایین بودن حجم محاسباتی اشاره کرد [۱۲]. در روش المان محدود با فرمول‌بندی پتانسیل بردار مغناطیسی که از تانسور نفوذپذیری دیفرانسیلی مغناطیسی استفاده می‌شود، برای اجتناب از وارونه‌سازی عددی مدل متعارف‌تر است که چگالی شار مغناطیسی به عنوان متغیر مداخله‌گر استفاده شود. بدین ترتیب مدل برداری J-A معکوس در این تحقیق انتخاب شده است [۱۳].

۲-۲ مدل هیستریزیس برداری معکوس J-A

برای آنالیز دقیق رفتار و مشخصات ترانسفورماتور در مد پایه فرورزونانس، روش المان محدود برای مدل‌سازی ترانسفورماتور انتخاب شده است. استفاده از مدل برداری برای لحاظ کردن رفتار غیر خطی هسته ترانسفورماتور به ما اجازه می‌دهد میدان‌ها را در جهت‌های مختلف ورق‌های هسته، اعمال کنیم تا از تقریب‌زدن متوسط نفوذپذیری در هر المان ممانعت شود و محاسبات واقعی اجرا شود [۹].

در این مقاله مدل هیستریزیس برداری معکوس J-A انتخاب شده که قابلیت ارائه رفتار ورق ناهمسانگرد^۲ و همچنین شار چرخشی در شاخه‌های درختی ترانسفورماتور (T-Joints) را دارد. ترانسفورماتور انتخاب شده در این تحقیق دارای ورق‌های همسانگرد^۴ می‌باشد و بنابراین با اعمال روش فوق، رفتار شار چرخشی در T-Joint ترانسفورماتور لحاظ شده است. در آن نواحی که جهت شار فضایی تغییر نمی‌کند مدل‌سازی مذکور به فرم اسکالر تقلیل می‌یابد.

1. Anisotropic
2. Jiles-Atherton
3. Anisotropic
4. Isotropic



شکل ۳: نمای ترانسفورماتور شبیه سازی شده با لحاظ کردن شرایط تقارن.

جدول ۱: مشخصات ترانسفورماتور در دست بررسی.

مقدار	پارامتر	
۱ kVA	توان نامی	
۲۰	تعداد کوپل های سیم پیچ اولیه	
۲۰	تعداد کوپل های سیم پیچ ثانویه	
۲۲	تعداد دور هر کوپل	
۲۰ V	ولتاژ نامی هر کوپل	
۲/۱۳۳ Ω	مقاومت سیم پیچ	مشخصات
۶/۲ mH	اندوکتانس نشتی سیم پیچ	ترانسفورماتور
۲۸ mm	عرض هر ساق از هسته	
۲۸ mm	عرض یوق هسته	
۱۰۰ mm	عمق هسته	
۸۴ mm	ارتفاع پنجره هسته	
۸۴ mm	فاصله مرکز دو ساق مجاور	

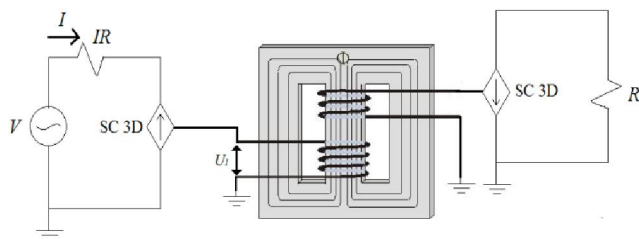
گیرند و سیم پیچ اولیه با ولتاژ نامی ۴۰۰ V تغذیه شود. علت این امر آن است که خازن مورد نیاز جهت وقوع فرورزونانس یک متغیر وابسته به ولتاژ و به خصوص جریان ترانسفورماتور است.

۴- مدل سازی المان محدود ترانسفورماتور

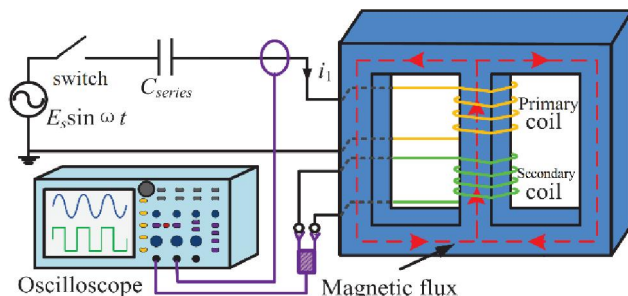
در اینجا از مدل برداری معکوس J-A برای مدل سازی المان محدود ترانسفورماتور در محیط ۳D استفاده شده است. با این کار رفتار دقیق ترانسفورماتور به خصوص لحاظ کردن تلفات ناشی از شار چرخشی در محاسبه تلفات هسته را می توان مورد ارزیابی قرار داد. با توجه به این که پدیده فرورزونانس پدیده ای است که در یک مدار RLC رخ می دهد و نوسانات مربوط کاملاً وابسته به تمام سلف ها و خازن های موجود در مدار می باشد، بنابراین با پیاده سازی مدل ۳D، رفتار واقعی اندوکتانس نشتی سیم پیچ نیز مدل شده و وقوع فرورزونانس با دقتی بیشتر مدل خواهد شد.

در این تحقیق مدل هیستریزس برداری معکوس J-A از طریق برنامه نویسی در بسته نرم افزاری المان محدود COMSOL و به وسیله فرمول بندی پتانسیل بردار مغناطیسی که از تانسور نفوذ پذیری دیفرانسیلی مغناطیسی استفاده می کند، پیاده سازی شده است. بدین ترتیب خازن به صورت سری با منبع ولتاژ و سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور اعمال شده است. برای پرهیز از طولانی شدن زمان شبیه سازی، از تقارن ترانسفورماتور در جهت های x، y و z استفاده کرده و یک هشتم از ترانسفورماتور مدل گردیده که این موضوع در شکل ۳ نشان داده شده است.

یکی از چالش های استفاده از روش J-A، تعیین ضرایب آن با توجه به دستگاه الکترومغناطیسی در دست بررسی می باشد. نحوه تعیین ضرایب



شکل ۱: نحوه اتصال مدار الکتریکی خارجی به مدل المان محدود ترانسفورماتور.



شکل ۲: شماتیک مدار تست مورد استفاده در آزمایشگاه.

تغییرات میدان از رابطه زیر حاصل می شود

$$U = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (9)$$

رابطه مداری یک بوبین با ناحیه هدایت کننده $j \in \Omega_s$ ، جریان I_j و ولتاژ V_j به صورت زیر برای فرمول بندی بر حسب پتانسیل بردار مغناطیسی A استفاده می شود

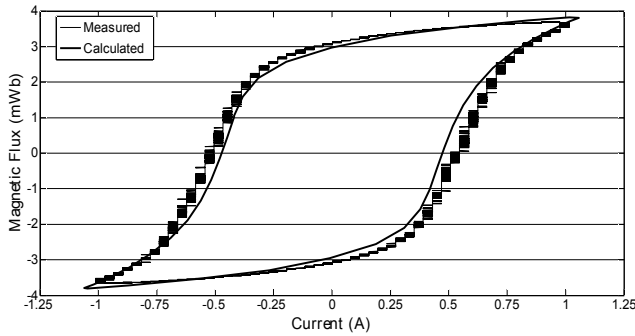
$$\partial t(A \cdot W)_{\Omega_s} + RI_j = -V_j \quad (10)$$

در اینجا R مقاومت بوبین و W بردار چگالی سیم نامیده می شود. یعنی $W = (n/S) \cdot U$ که U یک بردار واحد در جهت عبور جریان کوپل، n تعداد دورهای کوپل و S سطح مقطع بوبین می باشد.

بدین ترتیب روش المان محدود با معادلات بالا به کار گرفته می شود. پتانسیل برداری A و جریان های سیم پیچ مجهول هستند، ولتاژ V به سیم پیچ ها اعمال می شود و از روش تکرار نیوتن رافسون برای حل مسئله می شود تا معیار همگرایی برای A برقرار گردد.

۳- مشخصات ترانسفورماتور مدل شده

ترانسفورماتور انتخاب شده در این تحقیق، یک ترانسفورماتور ایزوله اختصاصی تک فاز ۱ kVA، ۵۰ Hz با سیم پیچ های مشابه اولیه و ثانویه ۳۴۰ دور می باشد که هر سیم پیچ از ۲۰ کوپل سری شده تشکیل گردیده و (هر کوپل دارای ۲۲ دور می باشد) و مشخصات ترانسفورماتور مد نظر در جدول ۱ آمده است. جهت اندازه گیری ولتاژ و جریان ترانسفورماتور (از طریق اندازه گیری ولتاژ مقاومت سری شده با سیم پیچ) از اسیلوسکوپ دیجیتال ۳۲۵۴-GWINSTEK GDS استفاده شده تا شکل موج هیستریزس با دقت بالا قابل نمایش باشد. برای اجتناب از مشکلات حفاظتی در آزمایشگاه و همچنین اندازه گیری مستقیم ولتاژ، از ۳ کوپل سری شده برای هر سیم پیچ استفاده گردیده و از آنجایی که ولتاژ نامی هر کوپل ۲۰ V می باشد، بنابراین ولتاژ نامی هر سیم پیچ ۶۰ V خواهد بود. شماتیک مداری مورد استفاده در آزمایشگاه در شکل ۲ مشاهده می شود. نکته قابل تأمل این است که اندازه خازن مورد نیاز برای وقوع فرورزونانس در این حالت متفاوت از خازن مورد نیاز برای وقوع فرورزونانس در شرایطی است که تمام کوپل های سیم پیچی ترانسفورماتور در مدار قرار



شکل ۶: حلقه هیستریزیس محاسبه شده و اندازه گیری شده ترانسفورماتور.

جدول ۲: پارامترهای تعیین شده جهت مدل سازی J-A برای هسته ترانسفورماتور.

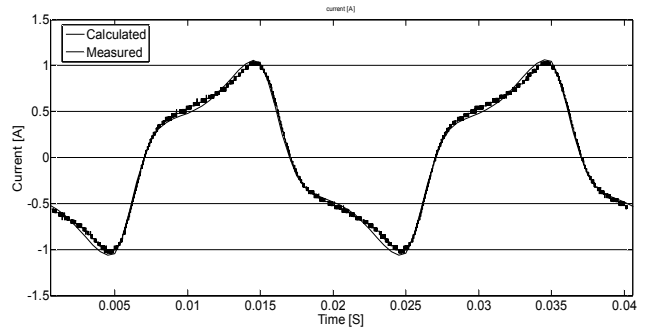
پارامتر	M_s	k	c	a	α
مقدار مشخص شده	$۱,۶۴ \times ۱۰^{-۶}$	$۵۲۳/۴$	۴۴۱×۱۰^{-۲}	$۲۱۲/۳$	۵۰۶×۱۰^{-۶}

۵- بررسی نتایج پدیده فرورزونانس

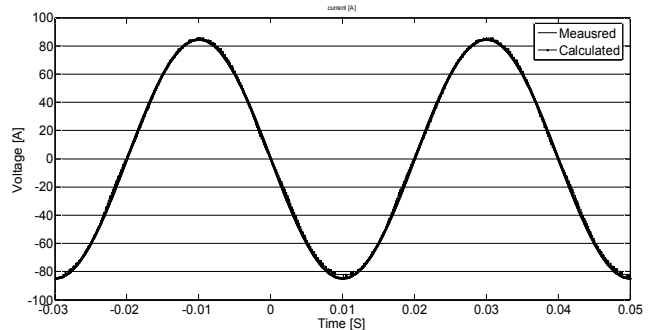
در این بخش پدیده فرورزونانس را برای ترانسفورماتور سری شده با خازن، در حالت ماندگار و با فرکانس نامی ۵۰ Hz مورد بررسی قرار می دهیم. برای این که یک فهم خوب از شرایط فرورزونانس از جمله آستانه وقوع رزونانس شدید حاصل شود، با تغییر مقدار خازن در یک رنج وسیع، $۳۰۰ \mu F - ۱۰ \mu F$ با پله های $۲۰ \mu F$ ، مشخصات ترانسفورماتور در فرکانس نامی از قبیل شکل موج های جریان و ولتاژ و هارمونیک های تشکیل دهنده آنها، حلقه هیستریزیس هسته، تلفات مسی و تلفات هسته را مورد ارزیابی قرار می دهیم. شکل های ۷ تا ۹ به ترتیب جریان ها، ولتاژها و حلقه های هیستریزیس اندازه گیری شده به ازای این رنج وسیع از خازن های سری شده با ترانسفورماتور را نشان می دهند. نتایج حاصل شده نشان می دهند که در طی وقوع فرورزونانس، ولتاژ و جریان ترانسفورماتور به شدت هارمونیکی شده و علاوه بر این مشاهده می شود که دامنه ولتاژ تا دو پریودیت و دامنه جریان تا چند برابر جریان بارداری ترانسفورماتور می تواند افزایش یابد. شرایط غیر خطی هسته متأثر از حلقه هیستریزیس، دلیل این آشفتنی جریان و ولتاژ ترانسفورماتور در حین وقوع فرورزونانس می باشد. نکته تأمل برانگیز در اینجا، افزایش چند برابری سطح حلقه هیستریزیس در پی وقوع فرورزونانس می باشد که بیانگر افزایش شدید تلفات هسته، شار نشتی، ایجاد سر و صدا و ... می باشد.

همان گونه که از شکل های ۷ تا ۹ مشاهده می شود در طی وقوع فرورزونانس، دامنه ولتاژ و جریان ترانسفورماتور وابسته به دامنه خازن سری شده با آن می باشد و بنابراین با تغییر مقدار خازن، دامنه ولتاژ و جریان ترانسفورماتور و به تبع آن حلقه هیستریزیس هسته ترانسفورماتور تغییر می کند. بنابراین جهت مدل سازی حلقه هیستریزیس در هنگام وقوع فرورزونانس، ضرایب J-A به ازای هر مقدار خازن باید به صورت منحصر به فرد تنظیم شوند تا حلقه هیستریزیس پیاده شده در شبیه سازی ۳D بر حلقه هیستریزیس اندازه گیری شده منطبق گردد. این نکته را نیز باید متذکر شد که در مدل سازی های انجام شده در اینجا، پسماند مغناطیس شدگی (شرایط اولیه ترانسفورماتور در لحظه وصل کلید) لحاظ نگردیده و علاوه بر این زیرهارمونیک ها و شرایط گذرا که می توانند باعث اضافه ولتاژهای شدیدی در سیستم گردد در اینجا لحاظ نشده اند و تنها حالت ماندگار (مد پایه) در نظر گرفته شده است.

حلقه هیستریزیس، شکل موج جریان بی باری، شکل موج ولتاژ و توزیع چگالی شار ترانسفورماتور در هنگام وقوع فرورزونانس با خازن $۱۵۰ \mu F$



شکل ۴: جریان محاسبه شده و اندازه گیری شده در حالت بی باری ترانسفورماتور.

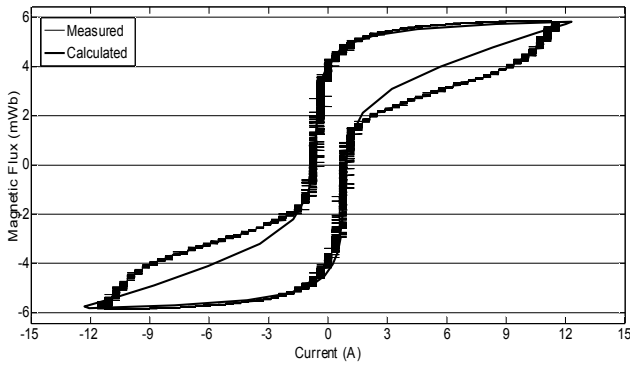


شکل ۵: ولتاژ محاسبه شده و اندازه گیری شده در حالت بی باری ترانسفورماتور.

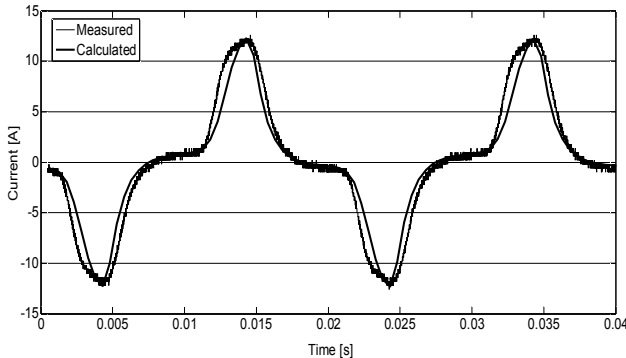
J-A در [۱۵] و [۱۶] تشریح شده و تعیین این ضرایب برای ورق های جهت دار دارای پیچیدگی بیشتری می باشد [۱۷]. ترانسفورماتور در دست بررسی در این تحقیق از فولاد غیر جهت دار ساخته شده که ضرایب مورد استفاده برای حالت بی باری ترانسفورماتور و بدون حضور خازن در جدول ۲ آمده است.

در این بخش ترانسفورماتور در حالت بی باری و بدون حضور خازن با ولتاژ نامی سیم پیچ تغذیه شده تا مشخصات نامی ترانسفورماتور استخراج شوند و این نتایج در بخش های بعد جهت مقایسه و بررسی دقیق فرورزونانس مورد استفاده قرار خواهند گرفت. شکل های ۴ و ۵، شکل موج جریان و ولتاژ اندازه گیری شده و محاسبه شده را در تغذیه ترانسفورماتور با ولتاژ ۶۰ V و در حالت بی باری نمایش می دهد. به وضوح مشاهده می شود که غیر خطی بودن هسته باعث غیر سینوسی شدن جریان بی باری ترانسفورماتور گردیده است. در اینجا به خوبی دقت مدل سازی ارائه شده برای هسته ترانسفورماتور، در نتایج شبیه سازی شده آشکار شده است.

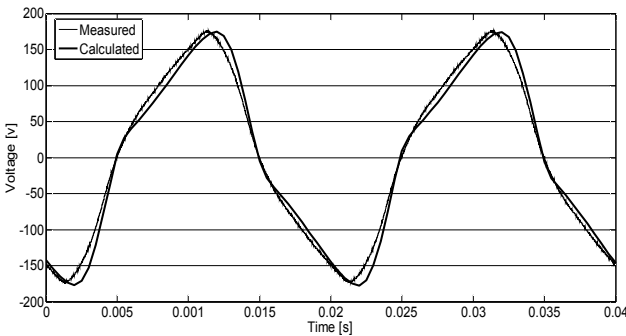
در این تحقیق برای اندازه گیری حلقه هیستریزیس از ترمینال های در دسترس ترانسفورماتور بی بار استفاده شده است. برای نمایش حلقه هیستریزیس $i - \phi$ ، باید جریان و ولتاژ القایی سیم پیچ اندازه گیری شود و برای این منظور جریان سیم پیچ اولیه اندازه گیری شده است ولی از آنجایی که ولتاژ ترمینال سیم پیچ اولیه ولتاژهای نشتی را نیز شامل می شود، ولتاژ سیم پیچ ثانویه بی بار اندازه گیری گردیده (نسبت تبدیل بین سیم پیچ اولیه و ثانویه ۱/۱ می باشد) و این موضوع در شکل ۲ قابل مشاهده است. شکل ۶ حلقه هیستریزیس اندازه گیری شده و محاسبه شده ترانسفورماتور را نشان می دهد. قابل توجه است که ضرایب J-A به گونه ای تنظیم شده اند که حلقه هیستریزیس پیاده شده در شبیه سازی ۳D بر حلقه هیستریزیس اندازه گیری شده منطبق گردد. به عنوان یک نتیجه گیری از مباحث مطرح شده در این بخش و با توجه به تطابق نتایج محاسبه شده و اندازه گیری شده می توان دقت خوب مدل ترانسفورماتور را مورد تأیید قرار داد.



شکل ۱۰: حلقه هیستریزیس محاسبه شده و اندازه گیری شده ترانسفورماتور در زمان وقوع فرورزونانس با خازن سری شده $150 \mu F$.

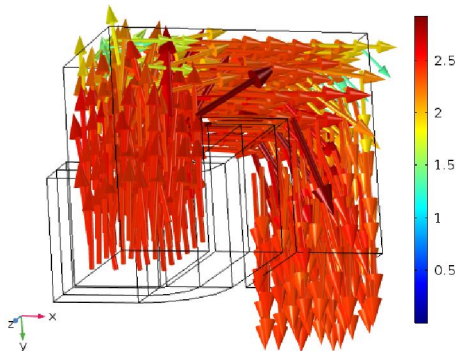


شکل ۱۱: جریان های محاسبه شده و اندازه گیری شده ترانسفورماتور در زمان وقوع فرورزونانس با خازن سری شده $150 \mu F$.



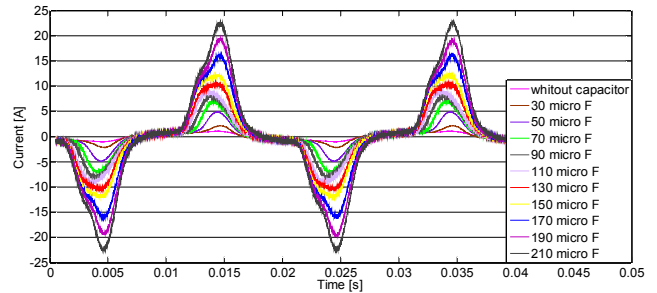
شکل ۱۲: ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور در زمان وقوع فرورزونانس با خازن سری شده $150 \mu F$.

Arrow Volume: Magnetic flux density

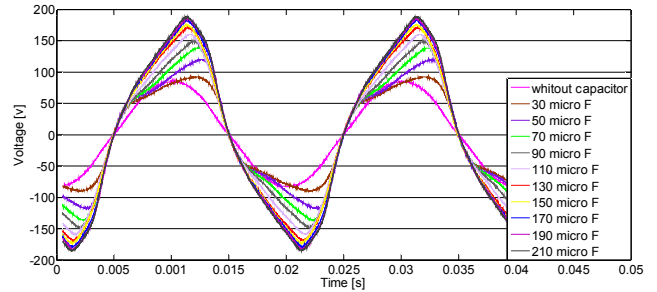


شکل ۱۳: توزیع چگالی شار در ترانسفورماتور در زمان وقوع فرورزونانس با خازن سری شده $150 \mu F$.

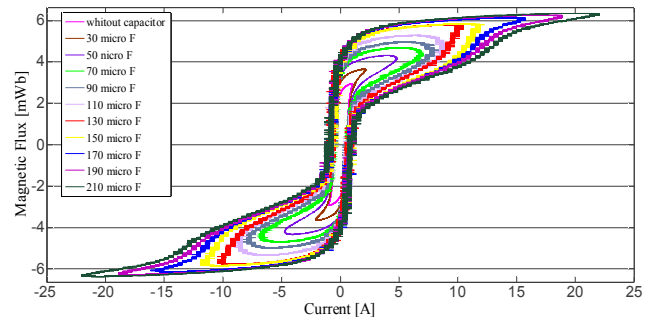
پایه، ولتاژ سیستم در فرکانس پایه خواهد بود و افزایش شدید هارمونیک اول ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور را در پی خواهد داشت.



شکل ۷: شکل موج جریان ترانسفورماتور تک فاز اندازه گیری شده به ازای خازن های مختلف سری شده با سیم پیچ اولیه.

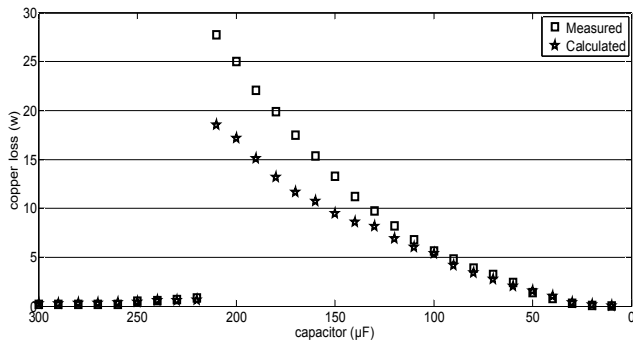


شکل ۸: شکل موج ولتاژ ترانسفورماتور تک فاز اندازه گیری شده به ازای خازن های مختلف سری شده با سیم پیچ اولیه.

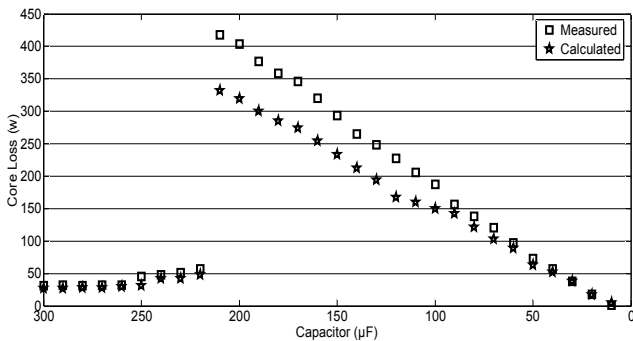


شکل ۹: حلقه هیستریزیس ترانسفورماتور تک فاز اندازه گیری شده به ازای خازن های مختلف سری شده با سیم پیچ اولیه.

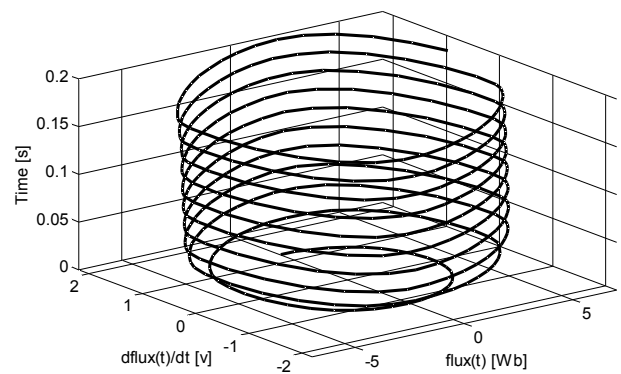
که با مدل سازی از روش J-A حاصل شده اند به ترتیب در شکل های ۱۰ تا ۱۳ نشان داده شده اند و صحت مدل سازی انجام شده را به خوبی منعکس می کنند. توزیع چگالی شار نشان داده شده در شکل ۱۳، اشباع شدید هسته بر اثر وقوع فرورزونانس را نمایانگر می کند که این موضوع می تواند خطرات زیادی برای ترانسفورماتور داشته باشد که گرمای اضافی درون هسته و نیروهای تحمیلی به سیم پیچ های ترانسفورماتور (به دلیل افزایش شار نشتی) را می تواند از جدی ترین خطرات قابل وقوع برای ترانسفورماتور دانست. بر اثر وقوع فرورزونانس، شکل موج ولتاژ ترانسفورماتور از حالت سینوسی خارج می شود و مدهای کاری متناوب و غیر متناوبی می تواند برای آن رخ دهد [۱۸] و بنابراین این ضرورت ایجاد می شود که مسیرهای صفحه فاز و هارمونیک های ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور بررسی شود. شکل های ۱۴ و ۱۵ مسیرهای صفحه فاز و آنالیز FFT ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور را در هنگام وقوع فرورزونانس با خازن سری شده $150 \mu F$ نشان می دهند. همان گونه که از مسیرهای صفحه فاز پیداست در اینجا فرورزونانس در مد متناوب پایه رخ داده که در این شرایط هارمونیک های سوم و پنجم دارای مقدار قابل توجهی می شوند اما در مقایسه با هارمونیک اصلی دارای مقدار کمتری می باشند و از این رو می توان نتیجه گرفت که در شرایط ماندگار پدیده فرورزونانس در مد



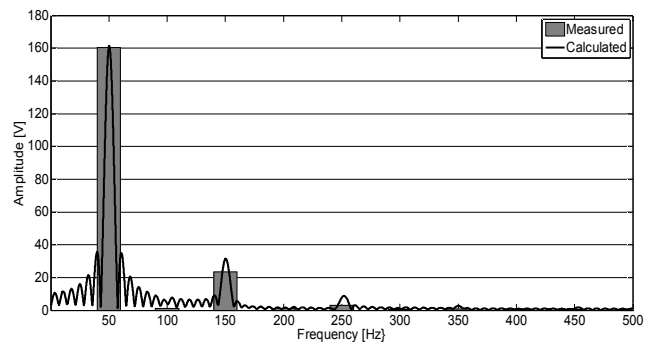
شکل ۱۶: تلفات مسی ترانسفورماتور با وقوع فرورزونانس به ازای خازن‌های مختلف سری‌شده با ترانسفورماتور.



شکل ۱۷: تلفات هسته ترانسفورماتور با وقوع فرورزونانس به ازای خازن‌های مختلف سری‌شده با ترانسفورماتور.



شکل ۱۴: دیاگرام صفحه فاز ترانسفورماتور در زمان وقوع فرورزونانس با خازن سری‌شده ۱۵۰ µF.



شکل ۱۵: FFT شکل موج ولتاژ ترمینال ترانسفورماتور در زمان وقوع فرورزونانس با خازن سری‌شده ۱۵۰ µF.

۶- نتیجه‌گیری

بر اساس روش مدل‌سازی المان محدود ۳D و با لحاظ کردن مدل هیستریزس برداری معکوس J-A، ترانسفورماتور بی‌بار به صورت دقیق مدل‌سازی شد و برای اعتبارسنجی روش مطرح‌شده، تست آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به تطابق نتایج محاسبه‌شده و اندازه‌گیری‌شده حاصل از تغذیه سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور بدون بار، دقت بالای روش پیاده‌شده مورد تأیید قرار گرفت.

با سری کردن خازن‌های مختلف در یک رنج وسیع (۳۰۰ µF - ۱۰ µF) با پله‌های (۲۰ µF) با ترانسفورماتور مدل‌سازی شده، به بررسی پدیده فرورزونانس پرداخته شد. این کار مزیت‌های فراوانی را به همراه داشت به گونه‌ای که رفتار غیر خطی هسته به ازای خازن‌های مختلف با دقت مناسب مدل‌سازی گردید و این باعث شد تا رفتار ترانسفورماتور با وقوع فرورزونانس به ازای خازن‌های مختلف به خوبی نشان داده شود. نتایج نشان دادند که با کاهش ظرفیت خازن از یک مقدار خاص، فرورزونانس شدید رخ خواهد داد و شرایط سختی به ترانسفورماتور تحمیل خواهد شد. بنابراین با توجه به این خازن مشخص، می‌توان یک آستانه وقوع فرورزونانس تعریف کرد و در به کارگیری ترانسفورماتور در سیستم‌های الکتریکی گوناگون، آن را مورد توجه قرار داد و به دنبال آن یک حاشیه امن برای فرورزونانس در سیستم تعریف کرد.

مراجع

- [1] B. Patel, S. Das, C. K. Roy, and M. Roy, "Simulation of ferroresonance with hysteresis model of transformer at no-load measured in laboratory," in *Proc. IEEE Region 10 TENCON Conf.*, 6 pp., Hyderabad, India, 19-21 Nov. 2008.
- [2] P. Ferracci, *Ferroresonance*, Cahier Technique Schneider no. 190: Groupe Schneider, p. 9, 1998.
- [3] H. Radmanesh, A. Heidary, S. H. Fathi, and G. Babamalek Gharehpetian, "Dual function ferroresonance and fault current

از نگرانی‌های جدی در حین وقوع فرورزونانس، افزایش گرما به دلیل بالا رفتن تلفات ترانسفورماتور می‌باشد و از این رو در ادامه این موضوع بررسی می‌شود. در عدم حضور خازن، تلفات مسی و تلفات هسته (توان اکتیو ورودی منهای تلفات هسته) برای ترانسفورماتور به ترتیب ۰/۱۴ w و ۲۵/۸ w می‌باشند. با وقوع فرورزونانس این تلفات دستخوش تغییرات زیادی می‌شوند. با تغییر خازن سری‌شده با سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور بی‌بار، تلفات مسی و تلفات هسته ترانسفورماتور در حالت ماندگار مورد بررسی قرار گرفته‌اند که نتایج حاصل از آن در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مشاهده می‌شود. همان گونه که مشاهده می‌شود، نکته حایز اهمیت در پدیده فرورزونانس، آستانه وقوع رزونانس شدید می‌باشد که باعث تحمیل شرایط سخت به سیستم می‌شود. در اینجا با کاهش ظرفیت خازنی و رسیدن آن به مقدار ۲۲۰ µF بدترین وضعیت در فرورزونانس رخ داده و بیشترین تلفات به ترانسفورماتور تحمیل شده است. در مدل‌سازی صورت‌گرفته برای هسته ترانسفورماتور در این تحقیق، تلفات جریان گردابی و تلفات اضافی هسته لحاظ نگردیده که این امر باعث می‌شود تلفات هسته حاصل‌شده از طریق شبیه‌سازی کمتر از تلفات هسته اندازه‌گیری‌شده گردد [۱۹]. با وقوع فرورزونانس، تلفات هسته و تلفات مسی به صورت چشم‌گیری افزایش یافته‌اند که البته تلفات هسته نسبت به تلفات مسی بسیار بزرگ‌تر است و عمده تلفات ترانسفورماتور را شامل می‌شود. این تلفات بزرگ در صورت طولانی‌شدن زمان فرورزونانس، آسیب‌های حرارتی و عایقی برای ترانسفورماتور در پی خواهد داشت. از اینجا می‌توان به این نتیجه رسید که استفاده از ورق‌های ناهمسانگرد با حلقه هیستریزس کوچک باعث می‌شود تلفات ترانسفورماتور با وقوع فرورزونانس به صورت چشم‌گیری کاهش یافته و صدمات ناشی از آن برای ترانسفورماتور کاهش یابد.

- [15] J. P. A. Bastos and N. Sadowski, *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*, New York: Marcel Dekker, 0-8247-4269-9, 2003.
- [16] K. Chwastek and J. Szczygłowski, "Estimation methods for the Jiles-Atherton model parameters: a review," in *Proc. 2nd Symp. on Applied Electromagnetics*, pp. 33-40, Zamosc, Poland, Dec. 2008.
- [17] L. S. Coelho, F. Guerra, N. J. Batistela, and J. V. Leite, "Multiobjective cuckoo search algorithm based on duffing's oscillator applied to Jiles-Atherton vector hysteresis parameters estimation," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 5, pp. 1745-1748, May 2013.
- [18] H. Radmanesh, G. B. Gharehpetian, and H. Fathi, "Ferroresonance of power transformers considering non-linear core losses and metal oxide surge arrester effects," *Electr. Pow. Compo. Sys.*, vol. 40, no. 5, pp. 463-479, Mar. 2012.
- [19] M. V. F. D. Luz, J. V. Leite, A. Benabou, and N. Sadowski, "Three-phase transformer modeling using a vector hysteresis model and including the eddy current and the anomalous losses," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 8, pp. 3201-3204, Aug. 2010.
- limiter based on DC reactor," *IET Gene. Transm. Dis.*, vol. 10, no. 9, pp. 2058-2065, Jun. 2016.
- [4] H. Lamba, M. Grinfeld, S. McKee, and R. Simpson, "Subharmonic ferroresonance in an LCR circuit with hysteresis," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, no. 5, pp. 2495-2500, Sep. 1997.
- [5] A. Rezaei-Zare, R. Irvani, M. Sanaye-Pasand, H. Mohseni, and S. Farhangi, "An accurate hysteresis model for ferroresonance analysis of a transformer," *IEEE Trans. Power Deliver.*, vol. 23, no. 3, pp. 1448-1456, Jul. 2008.
- [6] J. C. Lacerda Ribas, E. M. Lourenco, J. Vianei Leite, and N. Batistela, "Modeling ferroresonance phenomena with a flux-current Jiles-Atherton hysteresis approach," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 5, pp. 1797-1800, May 2013.
- [7] C. A. Charalambos, Z. D. Wang, P. Jarman, and M. Osborne, "2-D finite-element electromagnetic analysis of an autotransformer experiencing ferroresonance," *IEEE Trans. Power Deliver.*, vol. 24, no. 3, pp. 1275-1283, Jul. 2009.
- [8] X. Wang, D. Xie, B. Bai, N. Takahashi, and S. Yang, "3-D FEM analysis in electromagnetic system considering vector hysteresis and anisotropy," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 6, pp. 890-893, Jun. 2008.
- [9] J. V. Leite, A. Benabou, N. Sadowski, and M. V. F. Da Luz, "Finite element three-phase transformer modeling taking into account a vector hysteresis model," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 3, pp. 1716-1719, Mar. 2009.
- [10] T. D. Kefalas, G. Loizos, and A. G. Kladas, "Transformer joints FE analysis using pseudo-source technique," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 5, pp. 1058-1061, May 2011.
- [11] I. D. Mayergoyz and G. Friedman, "Identification problem for 3-D anisotropic preisach model of vector hysteresis," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 24, no. 6, pp. 2928-2930, Dec. 1988.
- [12] D. C. Jiles and D. L. Atherton, "Theory of ferromagnetic hysteresis," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 61, no. 1, pp. 48-60, Sept. 1986.
- [13] A. J. Bergqvist, "A simple vector generalization of the Jiles-Atherton model of hysteresis," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 32, no. 5, pp. 4213-4215, Sep. 1996.
- [14] J. V. Leite, N. Sadowski, P. Kuo-Peng, N. J. Batistela, and J. P. A. Bastos, "Inverse Jiles-Atherton vector hysteresis model," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no. 4, pp. 1769-1775, Apr. 2004.

بهرروز رضایی علم در سال ۱۳۷۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق - الکترونیک خود را از دانشگاه صنعتی اصفهان و مدارک کارشناسی ارشد مهندسی برق - کنترل و دکتری برق - قدرت خود را به ترتیب در سال های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۴ از دانشگاه تهران دریافت نموده است و هم اکنون دانشیار گروه مهندسی برق - قدرت دانشکده فنی - مهندسی دانشگاه لرستان می باشد. زمینه های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: ماشین های الکتریکی، درایوهای الکتریکی و روش اجزاء محدود.

مرتضی میخک بیرانوند در سال ۱۳۸۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از موسسه هدف ساری و در سال ۱۳۹۲ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی مالک اشتر دریافت نمود. وی هم اکنون دانشجوی دوره دکتری مهندسی برق در دانشگاه لرستان می باشد. زمینه های علمی مورد علاقه نام برده شامل طراحی و بهینه سازی موتورهای الکتریکی، تحلیل مولتی فیزیک ترانسفورماتور قدرت و بررسی رفتارهای حالت گذرا ترانسفورماتور قدرت می باشد.