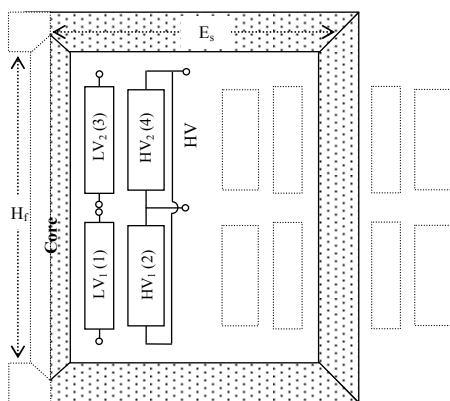


محاسبه تلفات سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه کششی با کمک یک روش شبه‌عددی

داود عزیزیان و گئورگ قره‌پتیان



(الف)



(ب)

شکل ۱: (الف) ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه دوطبقه و (ب) شکل شماتیک آن.

تا [۱۱]، تنها [۱۲] و [۱۳] به مطالعه رفتار حرارتی ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه دوطبقه پرداخته‌اند.

مطمئناً بدون محاسبه دقیق تلفات در سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه، نمی‌توان تحلیلی کامل و دقیق در خصوص مدل‌سازی رفتار مغناطیسی-حرارتی آن ارائه نمود. برخی محققان روش‌های تحلیلی ساده و سریع اما نه چندان دقیقی را جهت محاسبه تلفات سیم‌پیچی‌ها در ترانسفورماتورهای خشک مورد استفاده قرار داده‌اند [۷] و [۱۴] تا [۱۶]. برخی دیگر نیز از روش اجزای محدود برای محاسبه تلفات سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور بهره برده‌اند [۱۷] تا [۱۹].

پیش‌تر رفتار الکترومغناطیسی و توزیع میدان‌های مغناطیسی در ترانسفورماتورهای چندسیم‌پیچه دوطبقه در [۱۹] مورد مطالعه قرار گرفته است. روش‌های تحلیلی و نیمه‌تحلیلی نیز جهت محاسبه تلفات در سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه دوطبقه، در [۱۲] و [۱۳] به کار گرفته شده‌اند. روش به کار گرفته شده در این مقاله، روشی سریع اما نه چندان دقیق است. با این حال زمانی که دقت از درجه اهمیت بالایی برخوردار است، روش‌های تحلیلی خالص جوابگوی نیاز محاسباتی طراح

چکیده: امروزه ترانسفورماتورهای چندسیم‌پیچه به صورت قابل ملاحظه‌ای در سیستم‌های قدرت، به‌خصوص صنایع ریلی و کارخانه‌های فولادسازی مورد توجه متخصصان و طراحان شبکه قرار گرفته‌اند. ترانسفورماتورهای چندسیم‌پیچه مورد استفاده در سیستم‌های ریلی (کششی)، دارای ساختار ویژه دوطبقه بوده و از لحاظ حرارتی و مغناطیسی با مشکلات و پیچیدگی‌های بیشتری نسبت به انواع متداول دوسیم‌پیچه مواجه هستند. بنابراین با توجه به اهمیت محاسبه تلفات (حرارت تولیدی) سیم‌پیچی‌ها (به‌عنوان مقدمه محاسبات حرارتی) در این نوع از ترانسفورماتورها، در تحقیق حاضر یک روش شبه‌عددی جهت تحلیل رفتار الکترومغناطیسی ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه دوطبقه ارائه شده است. با تلفیق روش اجزای محدود و روش تحلیلی، توزیع تلفات سیم‌پیچی‌ها، مرتبط با جریان‌های فوکو، محاسبه و از مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی، دقت و اعتبار مدل‌سازی تأیید می‌شود. چنانچه نشان داده شده است، روش ارائه‌شده، روشی کارآمد جهت مدل‌سازی الکترومغناطیسی و محاسبه تلفات در ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه دوطبقه است. در ادامه، تلفات سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه دوطبقه با نتایج ترانسفورماتورهای دوسیم‌پیچه سنتی معادل مقایسه شده و نتایج مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. در انتها نیز ارتباط تلفات سیم‌پیچی‌های این ترانسفورماتور با فرکانس مطالعه شده است.

کلیدواژه: ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه، سیستم کششی، مدل‌سازی الکترومغناطیسی، تلفات سیم‌پیچی‌ها، روش شبه‌عددی.

۱- مقدمه

امروزه ترانسفورماتورهای با ساختار دوطبقه و سیم‌پیچی‌های مجزا به‌صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم‌های کششی و کارخانجات فولادسازی به‌طور گسترده از سیستم‌های یکسوساز استفاده می‌کنند. یکی از اجزای اصلی این سیستم‌های یکسوساز، ترانسفورماتور آنهاست. ترانسفورماتورهای استفاده‌شده در سیستم‌های یکسوساز ۱۲ پالسه می‌توانند ساختارهای متفاوتی داشته باشند. یکی از ساختارهای متداول این ترانسفورماتورها، ساختار دوطبقه است که در آن دو جفت سیم‌پیچی فشارضعیف و فشارقوی بر روی هم و روی یک ساق هسته مشترک ساخته می‌شوند (شکل ۱).

با وجود مزایای بسیار زیاد این ساختار، طراحی آن با پیچیدگی‌هایی مواجه است [۱]. از جمله موارد مهم در طراحی ترانسفورماتورهای دوطبقه، محاسبه جهش‌های حرارتی و تلفات سیم‌پیچی‌هاست. با وجود مطالعات گسترده بر روی رفتار حرارتی ترانسفورماتورهای دوسیم‌پیچه متداول [۲]

این مقاله در تاریخ ۲۹ آبان ماه ۱۳۹۶ دریافت و در تاریخ ۲۲ اردیبهشت ماه ۱۳۹۷ بازنگری شد.

داود عزیزیان (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی برق، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران، (email: d.azizian@abhariau.ac.ir).

گئورگ قره‌پتیان، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، (email: grptian@aut.ac.ir).

در ادامه ضمن به کارگیری مدل ارائه شده جهت مطالعه توزیع تلفات در سیم پیچی های بالا و پایین، نتایج با تلفات دو ترانسفورماتور بالا و پایین که به صورت مجزا بارگیری شده اند، مقایسه می شود. در انتها با تغییر فرکانس، رفتار تلفات در سیم پیچی های ترانسفورماتور چندسیم پیچه دوطبقه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل سازی الکترومغناطیسی ترانسفورماتور چندسیم پیچه دوطبقه

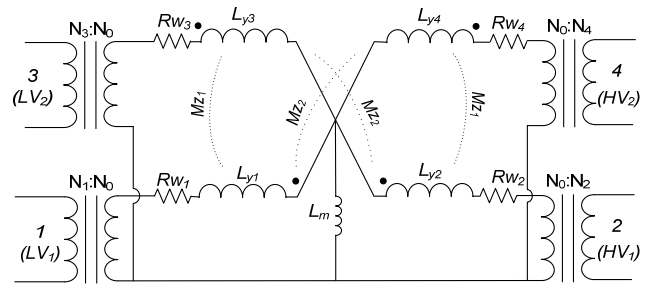
مرحله اول در مدل سازی الکترومغناطیسی ترانسفورماتور، محاسبه جریان سیم پیچی های آن است. برای محاسبه جریان سیم پیچی ها در حالت های مختلف بارگیری، می توان از مدار معادل ترانسفورماتور چندسیم پیچه دوطبقه در شکل ۲ استفاده کرد. توجه شود که پارامترهای این مدار معادل می توانند مطابق روالی که در [۱۹] ارائه شده است، محاسبه شود. با دانستن جریان سیم پیچی ها (و در نتیجه چگالی جریان هر هادی)، می توان توزیع میدان مغناطیسی را در سیم پیچی ها محاسبه کرد. روش های متعددی جهت محاسبه میدان مغناطیسی و تلفات سیم پیچی ها ارائه شده اند که در ادامه به برخی از آنها اشاره می شود.

۲-۱ محاسبه میدان مغناطیسی به روش تحلیلی

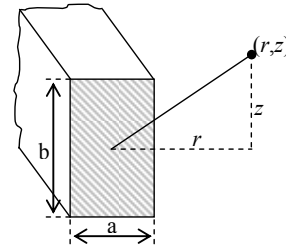
در صورتی که ضخامت بلوک حامل جریان بسیار کوچک تر از قطر آن باشد، شار مغناطیسی ناشی از آن بسیار نزدیک به حالتی است که پیچیده نشده و به صورت مستقیم با طول بی نهایت باشد. این فرض ساده، پی ریزی یک روش تحلیلی دوبعدی را امکان پذیر می سازد. در این حالت منبع پایه تولید میدان مغناطیسی، یک سیم مستقیم با سطح مقطع مستطیلی (شکل ۳) است که چگالی جریان یکنواختی (J) را حمل می کند. بردار پتانسیل مغناطیسی می تواند با انتگرال گیری از میدان یک سیم بسیار نازک روی سطح فویل به دست آید

$$A = \frac{\mu_0 J}{4\pi} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \ln[(r'-r)^2 + (z'-z)^2] dr' dz' \quad (1)$$

مؤلفه های چگالی شار مغناطیسی را نیز می توان با مشتق گیری از بردار پتانسیل مغناطیسی به صورت (۲) و (۳) محاسبه کرد. با بی نهایت فرض کردن ضریب نفوذپذیری هسته، میدان عمود به هسته بوده و سطح



شکل ۲: مدار معادل ترانسفورماتور چندسیم پیچه دوطبقه [۱۹].



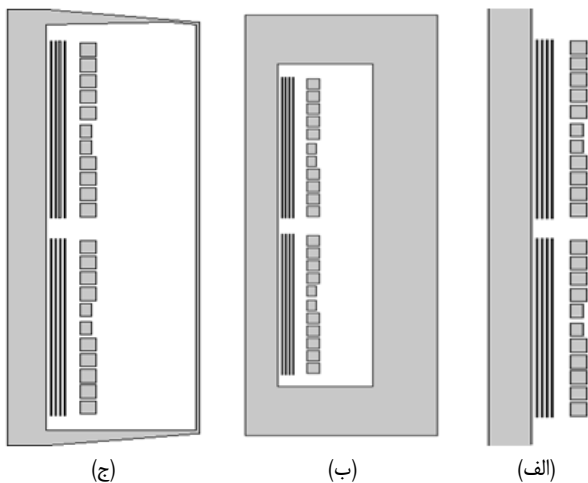
شکل ۳: فویل تخت با طول بی نهایت.

نخواهند بود. از آنجایی که مدل اجزای محدود روشی بسیار دقیق برای مدل سازی ماشین ها و ابزارهای الکتریکی است [۲۰] تا [۲۲]، در برخی مراجع، این روش برای محاسبه میدان های مغناطیسی و توزیع تلفات در ترانسفورماتورها به کار گرفته شده است [۱۴] تا [۲۰]. با وجود دقت بسیار بالای روش اجزای محدود، این روش سرعت مدل سازی و محاسبه بسیار پایینی داشته و نمی تواند به صورت متناوب جهت طراحی ترانسفورماتور مورد استفاده قرار گیرد.

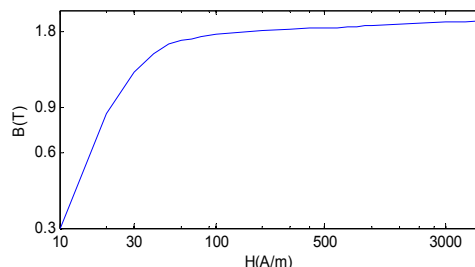
بنابراین برای دستیابی به یک محاسبه سریع و دقیق، در این مقاله یک روش شبه عددی جهت مدل سازی الکترومغناطیسی و محاسبه تلفات سیم پیچی ها ارائه می شود. در روش ارائه شده، مدل اجزای محدود جهت محاسبه دقیق میدان های مغناطیسی در ترانسفورماتور چندسیم پیچه دوطبقه استفاده شده است. با اعمال میدان مغناطیسی به دست آمده از مدل اجزای محدود به روابط تحلیلی، تلفات ترانسفورماتور با دقت بسیار بالایی محاسبه می شوند. با مقایسه نتایج استخراجی از روش ارائه شده با داده های تجربی و نتایج حاصل از روش های تحلیلی و اجزای محدود خالص، اعتبار روش پیشنهادی تأیید شده است. روش ارائه شده نه تنها از دقتی بالا نسبت به روش های تحلیلی موجود برخوردار است، بلکه سرعت بسیار بالاتری را نسبت به روش اجزای محدود خالص ارائه می دهد.

$$H_r(r, z) = \frac{1}{\mu} \frac{\partial A(r, z)}{\partial z} = \frac{J}{4\pi} \left\{ +\left(r + \frac{a}{2}\right) \ln \frac{\left(r + \frac{a}{2}\right)^2 + \left(z - \frac{b}{2}\right)^2}{\left(r + \frac{a}{2}\right)^2 + \left(z + \frac{b}{2}\right)^2} + \left(r - \frac{a}{2}\right) \ln \frac{\left(r - \frac{a}{2}\right)^2 + \left(z + \frac{b}{2}\right)^2}{\left(r - \frac{a}{2}\right)^2 + \left(z - \frac{b}{2}\right)^2} \right. \\ \left. + 2\left(z + \frac{b}{2}\right) \left(\tan^{-1} \frac{r - \frac{a}{2}}{z + \frac{b}{2}} - \tan^{-1} \frac{r + \frac{a}{2}}{z + \frac{b}{2}}\right) + 2\left(z - \frac{b}{2}\right) \left(\tan^{-1} \frac{r + \frac{a}{2}}{z - \frac{b}{2}} - \tan^{-1} \frac{r - \frac{a}{2}}{z - \frac{b}{2}}\right) \right\} \quad (2)$$

$$H_z(r, z) = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A(r, z)}{\partial r} = -\frac{J}{4\pi} \left\{ +\left(z + \frac{b}{2}\right) \ln \frac{\left(r - \frac{a}{2}\right)^2 + \left(z + \frac{b}{2}\right)^2}{\left(r + \frac{a}{2}\right)^2 + \left(z + \frac{b}{2}\right)^2} + \left(z - \frac{b}{2}\right) \ln \frac{\left(r + \frac{a}{2}\right)^2 + \left(z - \frac{b}{2}\right)^2}{\left(r - \frac{a}{2}\right)^2 + \left(z - \frac{b}{2}\right)^2} \right. \\ \left. + 2\left(r + \frac{a}{2}\right) \left(\tan^{-1} \frac{z - \frac{b}{2}}{r + \frac{a}{2}} - \tan^{-1} \frac{z + \frac{b}{2}}{r + \frac{a}{2}}\right) + 2\left(r - \frac{a}{2}\right) \left(\tan^{-1} \frac{z + \frac{b}{2}}{r - \frac{a}{2}} - \tan^{-1} \frac{z - \frac{b}{2}}{r - \frac{a}{2}}\right) \right\} \quad (3)$$



شکل ۴: سیلندر متشکل از فویل‌های پیچیده شده.



شکل ۶: منحنی مغناطیسی B-H هسته آهنی.

هسته مانند یک آئینه برای خطوط میدان عمل خواهد کرد. تأثیر هسته بر روی توزیع میدان مغناطیسی را می‌توان به صورت هادی تصویر مدل کرد و با کنارگذاشتن هسته، میدان مغناطیسی حاصل از هادی اصلی و هادی تصویر را محاسبه کرد [۱۹].

۲-۲ محاسبه میدان مغناطیسی به روش نیمه تحلیلی

از آنجایی که سیم‌پیچی به صورت استوانه‌ای پیچیده می‌شود، فرض آن به صورت هادی با طول بی‌نهایت سبب بروز خطا در محاسبه مؤلفه شعاعی میدان مغناطیسی می‌شود. بنابراین برای افزایش دقت محاسبه میدان مغناطیسی، بهتر است که بلوک پایه تولیدکننده میدان مغناطیسی به صورت استوانه‌ای (شکل ۴) در نظر گرفته شود.

میدان مغناطیسی استوانه‌ای می‌تواند با انتگرال‌گیری از میدان یک حلقه بسیار نازک روی سطح مقطع سیلندر، به صورت (۴) به دست آید

$$B = \frac{\mu_0 J}{4\pi} \times \int_{r_i - \frac{a}{\gamma}}^{r_i + \frac{a}{\gamma}} \int_{-\frac{b}{\gamma}}^{\frac{b}{\gamma}} \int_{-\frac{\pi}{\gamma}}^{\frac{\pi}{\gamma}} r' \frac{(z - z') \sin \varphi \hat{a}_r + (r' - r \sin \varphi) \hat{a}_z}{(r'^2 + r^2 - 2r'r \sin \varphi + (z - z')^2)^{\frac{3}{2}}} d\varphi dz' dr' \quad (4)$$

با حل تحلیلی (۴)، این رابطه را می‌توان به صورت زیر ساده کرد

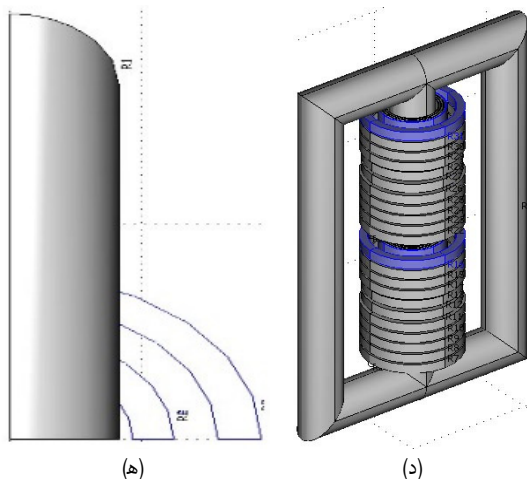
$$B = \frac{\mu_0 J}{4\pi} \int_{r_i - \frac{a}{\gamma}}^{r_i + \frac{a}{\gamma}} \int_{-\frac{b}{\gamma}}^{\frac{b}{\gamma}} [F(\varphi, r', \frac{b}{\gamma}) - F(\varphi, r', -\frac{b}{\gamma})] d\varphi dr' \quad (5)$$

که

$$F(\varphi, r', z') = \frac{r' \sin \varphi \hat{a}_r + \frac{r'(r' - r \sin \varphi)(z - z')}{r'^2 + r^2 - 2r'r \sin \varphi} \hat{a}_z}{(r'^2 + r^2 - 2r'r \sin \varphi + (z - z')^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (6)$$

حل (۵) به صورت تحلیلی پیچیده بوده و به سادگی میسر نیست. یک راه مناسب برای حل این انتگرال پیوسته، تبدیل آن به انتگرال‌گیری عددی و گسسته به صورت زیر است

$$B = \frac{\mu_0 J}{4\pi} \sum_{j=1}^{n_r} \sum_{k=1}^{n_\varphi} [F(\varphi_k, r_j, \frac{b}{\gamma}) - F(\varphi_k, r_j, -\frac{b}{\gamma})] \Delta\varphi \Delta r \quad (7)$$



شکل ۵: مدل‌های اجزای محدود جهت مدل‌سازی الکترومغناطیسی ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه دوطبقه، (الف) مدل دوبعدی با هسته ساده، (ب) مدل دوبعدی با هسته کامل، (ج) مدل دوبعدی با هسته معادل، (د) مدل سه‌بعدی کامل و (ه) مدل سه‌بعدی یک‌چهارم.

مشابه قبل، تأثیر هسته بر روی توزیع میدان مغناطیسی را می‌توان به صورت هادی‌های تصویر مدل کرد [۱۹].

۳-۲ محاسبه میدان مغناطیسی به روش اجزای محدود

میدان‌های مغناطیسی را می‌توان با کمک معادله پواسن (۸) مدل کرد

$$\nabla^2 A - \mu_0 \epsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\mu_0 J \quad (8)$$

توجه شود که عبارت دوم در سمت چپ این معادله مربوط به محاسبات حالت گذرا بوده و بنابراین در حالت پایدار برابر صفر قرار داده می‌شود. در این مقاله برای حل (۸) از روش اجزای محدود استفاده می‌شود. برای ساده‌سازی مدل و کوتاه‌کردن زمان محاسبه، می‌توان ترانسفورماتور را به صورت تک‌فاز مدل کرد [۱۹]. بنابراین می‌توان مدل اجزای محدود دوبعدی با تقارن محوری را مورد استفاده قرار داد. در شکل ۵ مدل اجزای محدود برای ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه با سیم‌پیچ‌های دوطبقه نشان داده شده است.

توجه شود که اثر غیر خطی هسته نیز توسط اعمال منحنی مغناطیسی شکل ۶ در مدل‌سازی الکترومغناطیسی در نظر گرفته شده است.

۳- محاسبه تلفات سیم‌پیچی‌ها

تلفات یک هادی در ترانسفورماتور از دو مؤلفه تلفات ثابت و تلفات

$$P_w = (K_E + \frac{K_{eddy}}{K_E})P_{dc} \quad (۱۸)$$

$$K_E = \frac{T + ۲۳۴/۵}{۱۲۰ + ۲۳۴/۵} \quad (۱۹)$$

که P_{dc} تلفات محاسبه شده در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و T دمای واحد سیم‌پیچی می‌باشند.

۳-۲ روش اجزای محدود

این روش، محدودیت‌های روش تحلیلی را نداشته و به‌سادگی می‌تواند برای هر نوع ساختار ترانسفورماتور مورد استفاده قرار گیرد. از (۸) مشخص است که مقدار پتانسیل مغناطیسی به چگالی جریان هادی‌ها مرتبط است. مدل‌سازی تک‌تک هادی‌ها و عایق مابین آنها سبب ایجاد پیچیدگی بسیار زیادی در حل مسئله شده و در عمل ممکن نیست. در این تحقیق هر لایه سیم‌پیچی فشارضعیف و هر بشقاب سیم‌پیچی فشارقوی در راستای شعاعی به تعدادی بخش تقسیم می‌شوند. دوره‌های میانی در هر بخش از سیم‌پیچی به‌صورت یک‌تکه و فشرده (هادی‌های تجمعی) مدل شده و تنها دو هادی ابتدایی و انتهایی آن به‌صورت تکی مدل می‌شوند (شکل ۷). با اعمال چگالی جریان یکنواخت به بلوک‌های فشرده (هادی‌های تجمعی) و جریان نامی به تک‌هادی‌ها، می‌توان توزیع میدان مغناطیسی را در تمام نقاط سیم‌پیچی‌ها با دقت مناسبی محاسبه کرد. با توجه به میدان مغناطیسی محاسبه شده، می‌توان چگالی جریان را در تک‌هادی‌ها از (۲۰) به دست آورده و از ضرب مقاومت هادی در مجذور جریان آن، تلفات را محاسبه کرد

$$J = \nabla \times A \quad (۲۰)$$

با این حال از آنجایی که هادی‌های تجمعی مانند یک هادی واحد در نظر گرفته می‌شوند، چگالی جریان و تلفات محاسبه شده برای آنها معتبر نیست. بنابراین برای به دست آوردن جریان و تلفات در هادی‌هایی که به‌صورت تکی مدل نشده‌اند (هادی‌های مابین دو هادی تکی)، می‌توان از روش میان‌یابی استفاده کرد. بدیهی است که با افزایش تعداد بخش‌های تقسیم شده در هر سیم‌پیچی، تلفات سیم‌پیچی با دقت بیشتری محاسبه خواهد شد. توجه شود که تلفات سیم‌پیچی از مجموع تلفات تک‌هادی‌ها محاسبه می‌گردد.

۳-۳ روش شبه‌عددی (اجزای محدود- تحلیلی)

روش اجزای محدود خالص (محاسبه هم‌زمان میدان مغناطیسی و تلفات به روش اجزای محدود) جهت محاسبه تلفات همه هادی‌ها، روشی بسیار زمان‌بر و گاهی غیر کاربردی است. در این تحقیق برای کاهش زمان مدل‌سازی و افزایش دقت محاسبه تلفات در هر هادی، روشی جدید مبتنی بر ادغام روش‌های اجزای محدود و تحلیلی برای محاسبه هر چه دقیق‌تر تلفات هادی‌ها در زمانی مناسب پیشنهاد می‌شود. در روش اجزای محدود، با مدل‌سازی یک‌پارچه بشقاب‌ها و لایه‌ها (و نه دورها به‌تنهایی) می‌توان میدان مغناطیسی را با دقت بالایی در تمامی نقاط فضا و هادی‌ها محاسبه کرد. با توجه به عدم مدل‌سازی جزئی تک‌تک هادی‌ها، قطعاً سرعت محاسبه میدان مغناطیسی بسیار بالاتر خواهد بود.

در این تحقیق برای محاسبه تلفات به‌صورت زیر عمل می‌شود:

ابتدا توزیع میدان مغناطیسی در نقاط مختلف سیم‌پیچی‌ها با کمک مدل یک‌پارچه اجزای محدود (مدل‌سازی هر لایه یا بشقاب به‌صورت یک‌پارچه) محاسبه می‌شود.



شکل ۷: مدل یک لایه/بشقاب برای محاسبه تلفات هادی‌ها.

فوکو تشکیل می‌شود. برخلاف تلفات ثابت، محاسبه تلفات فوکو مستلزم دانستن نحوه توزیع میدان مغناطیسی در سیم‌پیچی‌هاست. تلفات فوکوی ناشی از شارهای نشستی در سیم‌پیچی‌های فویلی ناچیز است، با این حال به دلیل وجود میدان‌های شعاعی، تلفات فوکوی بسیار زیادی در انتهای سیم‌پیچی‌های فویلی ایجاد می‌شود. با دانستن شدت میدان مغناطیسی از بخش ۲، توزیع جریان و تلفات در هادی‌های سیم‌پیچی را می‌توان توسط روش‌های تحلیلی و اجزای محدود محاسبه کرد.

۳-۱ روش تحلیلی

با استفاده از شدت میدان مغناطیسی شعاعی در دیواره‌های پایینی (H_r) و بالایی (H_{rh}) و شدت میدان مغناطیسی محوری در دیواره‌های داخلی (H_z) و بیرونی (H_{zb}) هر هادی فویلی با ضخامت b و ارتفاع h ، می‌توان تلفات آن را به‌صورت (۹) بیان کرد

$$P_w = (1 + K_{eddy})P_{dc} \quad (۹)$$

در این رابطه، P_{dc} تلفات اهمی ثابت و K_{eddy} ضریب تلفات فوکو است که به‌صورت (۱۰) محاسبه می‌شود [۶] و [۷]

$$K_{eddy} = P_i [\varphi(\delta b) - 1 + \psi(\delta b) \frac{n'^2 - 1}{3}] + \quad (۱۰)$$

$$P_i [\varphi(\delta h) - 1 + \psi(\delta h) \frac{m'^2 - 1}{3}]$$

که

$$P_i = [1 + \frac{b}{h} \frac{H_{rh}}{H_{zb}}]^{-1} \quad (۱۱)$$

$$P_i = [1 + \frac{h}{b} \frac{H_{zb}}{H_{rh}}]^{-1} \quad (۱۲)$$

$$\delta = \sqrt{\pi f \sigma \mu} \quad (۱۳)$$

$$m' = \sqrt{1 + \frac{3}{\frac{H_{zb}}{H_z} - 1} + \frac{3}{(\frac{H_{zb}}{H_z} - 1)^2}} \quad (۱۴)$$

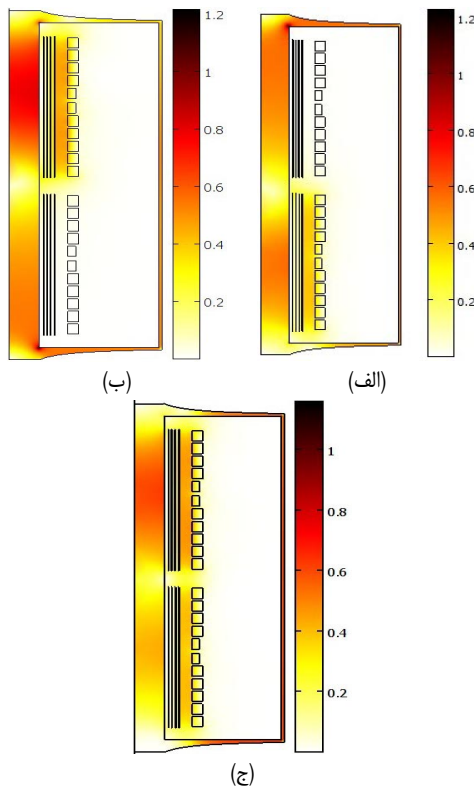
$$n' = \sqrt{1 + \frac{3}{\frac{H_{rh}}{H_r} - 1} + \frac{3}{(\frac{H_{rh}}{H_r} - 1)^2}} \quad (۱۵)$$

$$\varphi(\alpha) = \alpha \frac{\sinh(2\alpha) + \sin(2\alpha)}{\cosh(2\alpha) - \cos(2\alpha)} \quad (۱۶)$$

$$\psi(\alpha) = 2\alpha \frac{\sinh \alpha - \sin \alpha}{\cosh \alpha + \cos \alpha} \quad (۱۷)$$

در این روابط f ، μ و σ فرکانس، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی و هدایت الکتریکی هادی می‌باشند.

قابل ذکر است که تلفات واحدهای سیم‌پیچی با تغییرات دما تغییر می‌کند و می‌توان نشان داد این وابستگی به شکل زیر است [۷]



شکل ۸: توزیع چگالی شار مغناطیسی در حالتی که (الف) تنها ترانسفورماتور پایین، (ب) تنها ترانسفورماتور بالا و (ج) هر دو ترانسفورماتور بارگیری شده‌اند.

روش تحلیلی زمانی حدود ۸۰٪ روش شبه‌عددی را جهت محاسبه تلفات نیاز دارد. به طور مثال در یک نمونه و حالت خاص (که روش اجزای محدود خالص قابل اجرا بوده است)، مدل‌سازی به روش اجزای محدود حداقل ۱۹ دقیقه و روش‌های شبه‌عددی و تحلیلی به ترتیب حدود ۴۰ و ۳۰ ثانیه به طول انجامیدند.

توجه شود که در جدول ۲، نتایج محاسبه تلفات توسط مدل‌سازی عموماً بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری در آزمایشگاه است. این امر دو علت می‌تواند داشته باشد:

(۱) مدل‌سازی الکترومغناطیسی سیم‌پیچ‌ها در ماکسیمم دمای مجاز (۱۲۰ درجه سانتی‌گراد) انجام می‌شود در حالی که در عمل و در شرایط محیطی آزمایشگاهی می‌تواند چنین دمایی در سیم‌پیچ رخ ندهد.

(۲) تشدید اثر هسته در مدل‌سازی دوبعدی (هسته مانند یک سطح احاطه‌کننده سیم‌پیچ دیده می‌شود) به خصوص در روش تحلیلی که از روش تصاویر مغناطیسی استفاده می‌کند.

جدول ۳ نیز نتایج سه نوع مدل‌سازی هسته در مدل اجزای محدود مورد استفاده در روش شبه‌عددی را بر روی نتایج محاسبه تلفات سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور دوطبقه مقایسه کرده است.

مشخص است به‌کارگیری مدل هسته معادل جهت مدل‌سازی رفتار الکترومغناطیسی ترانسفورماتور دوطبقه، نتایج بسیار بهتری را در محاسبه تلفات سیم‌پیچی‌ها نشان می‌دهد. از نتایج این جدول، واضح است که روش شبه‌عددی ارائه‌شده به همراه مدل‌سازی هسته معادل، روشی دقیق‌تر، سریع‌تر و کارآمدتر جهت تخمین توزیع تلفات در سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه دوطبقه است. با کمک مدل الکترومغناطیسی پیشنهادی می‌توان توزیع تلفات در سیم‌پیچی‌ها را تحت شرایط مختلف بارگیری سیم‌پیچی‌ها مورد مطالعه قرار داد.

جدول ۴ میزان تلفات سیم‌پیچی‌ها و شکل ۸ توزیع چگالی شار

جدول ۱: مشخصات ترانسفورماتور تحت مطالعه.

سیم‌پیچی	HV	LV _۱	LV _۲
توان نامی	۲×۲ MVA	۲ MVA	۲ MVA
ولتاژ نامی	۲۰ kV	۷۵۰ V	۷۵۰ V
جریان نامی	۱۱۵٫۵ A	۱٫۵۴ kA	۱٫۵۴ kA
اتصال	D	y	d
تعداد لایه‌ها	۱	۳	۳
مجاری محوری هوا	-	۳×۱۰ mm	۱×۱۲ mm
تعداد بشقاب‌ها	۱۱	۱	۱
فواصل شعاعی	۹×۱۲ mm	-	-
بین بشقاب‌ها	۱×۲۶ mm	-	-
ارتفاع	۱۲۳۰ mm	۱۲۴۰ mm	۱۲۴۰ mm
قطر داخلی	۶۵۴ mm	۳۳۲ mm	۹۲۹ mm
قطر خارجی	۷۹۹ mm	۴۵۴ mm	۹۸۲ mm
هادی	آلومینیوم	آلومینیوم	آلومینیوم
ارتفاع × طول پنجره هسته	۱۰۱۵ mm × ۱۴۱۰ mm		
قطر هسته	۳۲۰ mm		

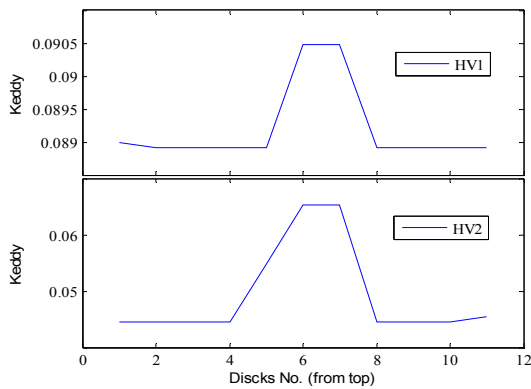
با به دست آوردن توزیع میدان مغناطیسی در اطراف هر هادی، ضریب تلفات فوکو در هر هادی توسط روابط تحلیلی (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شود. بدیهی است که چنین روش ترکیبی به دلیل عدم نیاز به مدل‌سازی دقیق سیم‌پیچی‌ها در روش اجزای محدود و در عین حال محاسبه تلفات هر هادی به صورت مجزا در روش تحلیلی، می‌تواند دقتی بسیار بالا و زمان بسیار پایین را برای محاسبه تلفات واحدهای سیم‌پیچی به همراه داشته باشد.

۴- نتایج مدل‌سازی الکترومغناطیسی و توزیع تلفات در یک ترانسفورماتور دوطبقه نمونه

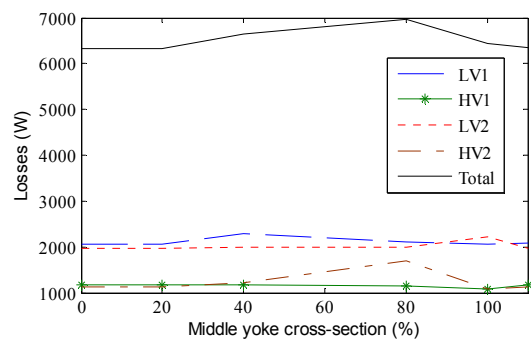
در تحقیق حاضر، ترانسفورماتور دوطبقه نوعی جدول ۱ به‌عنوان نمونه انتخاب و رفتار الکترومغناطیسی سیم‌پیچی‌های آن در ادامه مورد مطالعه قرار گرفته است.

جدول ۲، تلفات تخمینی سیم‌پیچی‌ها در بار کامل را نشان می‌دهد که در آن نتایج روش شبه‌عددی (اجزای محدود- تحلیلی) ارائه‌شده با روش‌های اجزای محدود، تحلیلی و داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند. از این جداول مشاهده می‌شود که روش شبه‌تحلیلی، نتایج بسیار بهتری نسبت به روش‌های دیگر از جمله روش اجزای محدود در اختیار قرار می‌دهد. روش تحلیلی به دلیل عدم مدل‌سازی مناسب هسته، روشی ناکارآمد برای محاسبه دقیق تلفات سیم‌پیچی است. روش تحلیلی با وجود سرعت بالاتر، به دلیل عدم مدل‌سازی مناسب هسته، روشی ناکارآمد برای محاسبه دقیق تلفات سیم‌پیچی است.

با وجود دقت بالای مدل‌سازی در روش اجزای محدود، محاسبه توزیع میدان و تلفات در تک‌تک فویل‌های سیم‌پیچی‌ها امری زمان‌بر و تقریباً غیر ممکن است. با این حال ساده‌سازی مدل جهت محاسبه تلفات در هادی‌ها سبب بروز خطای بسیار زیادی در روش اجزای محدود خالص می‌شود. ترکیب محاسبه میدان مغناطیسی به روش اجزای محدود و محاسبه تلفات تک‌تک هادی‌ها (ناشی از توزیع میدان مغناطیسی در آنها) به روش تحلیلی، سبب افزایش دقت و سرعت محاسبه تلفات سیم‌پیچی‌ها در روش شبه‌تحلیلی می‌گردد. به طوری که برای دستیابی به دقت تقریباً برابر، روش اجزای محدود خالص زمانی چند ده برابر روش شبه‌عددی یا تلفیقی اجزای محدود- تحلیلی صرف خواهد کرد. لازم به ذکر است که



شکل ۱۰: تلفات فوکوی بشقاب‌ها در سیم‌پیچی‌های فشارقوی.



شکل ۹: تلفات سیم‌پیچی‌ها در حضور یوغی میانی.

جدول ۲: تلفات بار کامل (وات) در سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور دوطبقه.

روش استخراج نتایج	تحلیلی (خالص)	اجزای محدود (خالص)	شبه‌عددی	سازنده
LV _۱	۲۲۰۳	۲۰۷۵	۲۰۷۰	۲۰۴۷
HV _۱	۱۱۹۱	۱۱۶۹	۱۱۶۵	۱۱۲۷
مجموع تلفات ترانسفورماتور پایین	۳۳۹۴	۳۲۴۴	۳۲۳۵	۳۱۷۴
LV _۲	۲۱۸۵	۱۹۸۸	۱۹۸۰	۱۹۶۸
HV _۲	۱۲۸۶	۱۱۲۵	۱۱۲۱	۱۱۲۷
مجموع تلفات ترانسفورماتور بالا	۳۴۷۱	۳۱۱۳	۳۱۰۱	۳۰۹۵
تلفات تک‌فاز ترانسفورماتور دوطبقه	۶۸۶۵	۶۳۵۷	۶۳۳۶	۶۲۶۹

جدول ۳: مقایسه نحوه مدل‌سازی هسته در محاسبه تلفات سیم‌پیچی‌ها.

روش مدل‌سازی هسته	LV _۱	HV _۱	LV _۲	HV _۲	مجموع تلفات
هسته ساده	۲۰۶۶	۱۱۴۱	۱۹۷۸	۱۱۹۰	۶۳۷۵
هسته معادل	۲۰۷۰	۱۱۶۵	۱۹۸۰	۱۱۲۱	۶۳۳۶
هسته کامل	۲۱۵۰	۱۶۹۸	۱۹۸۷	۱۱۰۱	۶۹۳۶

جدول ۴: تلفات سیم‌پیچی‌ها تحت شرایط مختلف بارگیری.

روش استخراج نتایج	LV _۱	HV _۱	LV _۲	HV _۲	تلفات
بارگیری نرمال و هم‌زمان بالا و پایین	۲۰۷۰	۱۱۶۵	۱۹۸۰	۱۱۲۱	۱۱۲۱
LV _۱ جریان نامی و LV _۲ مدارباز	۲۰۷۰	۱۱۰۶	-	۰۹۷	۰۹۷
LV _۲ جریان نامی و LV _۱ مدارباز	-	۰۵۲۲	۱۹۷۹	۱۰۷۳	۱۰۷۳
بارگیری ترانسفورماتور پایین	۲۰۹۳	۱۱۶۴	-	-	-
بارگیری ترانسفورماتور بالا	-	-	۱۹۷۹	۱۱۲۱	۱۱۲۱

این افزایش چندان زیاد نیست. بخشی از تغییرات ناگهانی تلفات در این دورها نیز می‌تواند به سبب محاسبات تحلیلی گسسته در هر دور و خطاهای محاسباتی باشد. البته به دلیل محدودبودن این تغییرات در چند دور از بشقاب‌های خاص، عملاً تأثیر چندانی در میزان تلفات محاسبه‌شده کل سیم‌پیچ‌های فشارقوی نخواهند داشت.

شکل ۱۲ نیز ارتباط فرکانس ورودی را با تلفات در سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه دوطبقه نشان می‌دهد. مطابق انتظار تلفات سیم‌پیچی با افزایش فرکانس، افزایش شدیدی را تجربه می‌کند. البته این وابستگی در سیم‌پیچی‌های بشقابی فشارقوی بسیار بیشتر از سیم‌پیچی‌های فشارضعیف لایه‌ای است. توجه شود با محاسبه این تلفات وابسته به فرکانس، مقاومت اهمی وابسته به فرکانس در مدل مشروح ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه نیز قابل محاسبه و استخراج است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش شبه‌عددی یا تلفیقی اجزای محدود-تحلیلی جهت مطالعه رفتار الکترومغناطیسی و محاسبه تلفات سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه دوطبقه کششی ارائه شد. با کمک داده‌های تجربی، نتایج روش ارائه‌شده در مقایسه با روش‌های متداول ارزیابی و تأیید شد. روش شبه‌عددی ارائه‌شده از دقت بسیار بالایی در مقایسه با

مغناطیسی را تحت شرایط مختلف بارگیری در ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه دوطبقه نشان می‌دهد. در برخی موارد ممکن است که یوغی میانی نیز برای بهبود رفتار مغناطیسی ترانسفورماتور تعبیه گردد تا ترانسفورماتورهای پایین و بالا تا حدود زیادی از یکدیگر ایزوله شده و در نتیجه جریان‌های اتصال کوتاه در سیم‌پیچی‌ها کاهش یابند. شکل ۹ تأثیر یوغ میانی (سطح مقطع به صورت درصدی از سطح مقطع ساق اصلی) را ارائه کرده است. دیده می‌شود که با وجود مزایای یوغ میانی در افزایش اندوکنانس‌های بین سیم‌پیچی‌های بالا و پایین و کاهش نیروهای محوری، این یوغ می‌تواند سبب افزایش تلفات سیم‌پیچی‌ها نیز بشود.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تلفات بشقاب‌های سیم‌پیچی‌های فشارقوی بالا و پایین را به نمایش گذاشته‌اند. جهش مختصری که در بشقاب‌های میانی در شکل ۱۰ دیده می‌شود به دلیل تعداد دور بیشتر (۱ دور) آنها نسبت به سایر بشقاب‌هاست که سبب افزایش کمتر از ۲ درصدی در تلفات بشقاب‌های میانی می‌شود.

شکل ۱۱ نیز نشان می‌دهد که توزیع تلفات در داخل بشقاب‌ها عموماً یکنواخت است. البته تغییراتی ناگهانی تنها در چند دور میانی بشقاب‌های بالا و پایین سیم‌پیچ فشارقوی ظاهر شده‌اند. بشقاب‌های بالا و پایین نزدیک به یوغ‌های هسته می‌باشند و یوغ‌ها نیز در مدل‌های دوبعدی به صورت احاطه‌کننده سیم‌پیچ‌ها مدل می‌شوند. لذا بخشی از افزایش تلفات در دورهای میانی می‌تواند به دلیل مدل‌سازی دوبعدی و تأثیرپذیری مضاعف میدان مغناطیسی از یوغ‌های بالا و پایین باشد که البته در واقعیت

- [8] D. Azizian, "Temperature prediction in cast-resin transformer due to non-linear loads," *J. of Electrical Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 23-249, Dec. 2014.
- [9] M. Eslamian, B. Vahidi, and A. Eslamian, "Thermal analysis of cast-resin dry-type transformers," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 7, pp. 2479-2488, Jul. 2011.
- [10] D. Azizian and M. Bigdeli, "A new cast-resin transformer thermal model based on recurrent neural networks," *Archives of Electrical Engineering (AEE)*, vol. 66, no. 1, pp. 17-28, Mar. 2017.
- [11] M. A. F. Finocchio, J. J. Lopes, J. A. de Franca, J. C. Piai, and J. F. Mangili Jr, "Neural networks applied to the design of dry-type transformers: an example to analyze the winding temperature and elevate the thermal quality," *International Trans. on Electrical Energy Systems*, vol. 27, no. 3, Article No. e2257, Mar. 2017.
- [12] D. Azizian, "Windings temperature prediction in split-winding traction transformer," *Turkish J. of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 24, no. 4, pp. 3011-3022, Apr. 2016.

[۱۳] د. عزیزیان، "مدل‌سازی حالت گذرای حرارتی در ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه دوطبقه مبتنی بر روش تفاضلات محدود و شبکه‌های عصبی مصنوعی،" نشریه انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران، دوره ۱۵، شماره ۳، صص. ۳۲-۲۳، پاییز ۱۳۹۷.

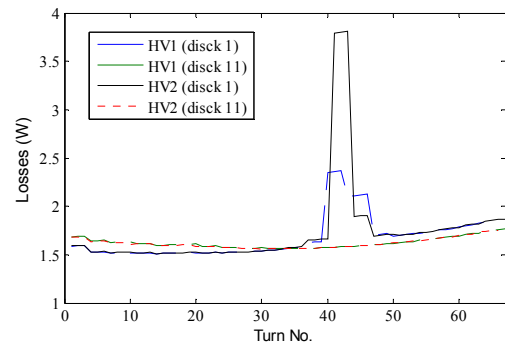
- [14] I. K. Badstubner, R. Burkart, C. Dittl, and A. Musing, "A fast method for the calculation of foil winding losses," in *Proc. 17th European Conf. on Power Electronics and Applications*, 10 pp., Geneva, Switzerland, 8-10 Sept. 2015.
- [15] J. Zhang, W. Yuan, H. Zeng, and Z. Qian, "Simplified 2-D analytical model for winding loss analysis of flyback transformers," *J. of Power Electronics*, vol. 12, no. 6, pp. 960-973, Nov. 2012.
- [16] M. C. Hlatshway, *The Computation of Winding Eddy Losses in Power Transformers Using Analytical and Numerical Method*, MSc. Thesis, University of Witwatersrand, Gauteng, South Africa, WA, 2013.
- [17] C. R. Sullivan, "Computationally efficient winding loss calculation with multiple windings, arbitrary waveforms, and two-dimensional or three-dimensional field geometry," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 16, no. 1, pp. 142-150, Jan. 2001.
- [18] A. Najafi, I. Iskender, B. Dokmetas, and S. A. Hashjin, "Distribution transformer losses calculation based on TSFEM," *International J. of Computing, Communications & Instrumentation Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 224-227, 2015.
- [19] D. Azizian, "Nonlinear behavior analysis of split-winding dry-type transformer using a new star model and a coupled field-circuit approach," *Archives of Electrical Engineering*, vol. 65, no. 4, pp. 773-787, Nov. 2016.

[۲۰] ع. ا. نصیری، ع. م. رنجبر، ف. ققیهی و س. سلیمانی، "تحلیل سه‌بعدی نیروهای الکترومکانیکی ترانسفورماتور سه‌فاز فشارمتوسط تحت تأثیر جریان هجومی به روش آنالیز اجزای محدود با ارائه ساختار جدید سیم‌پیچی،" نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، سال ۱۴، شماره ۲-الف، صص. ۱۰۹-۱۰۱، تابستان ۱۳۹۵.

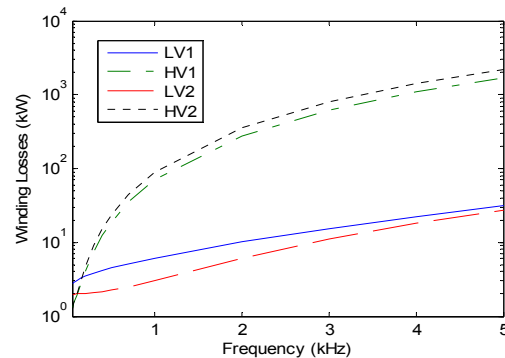
[۲۱] س. ع. سیدی سعادتی و ا. حلوایی نیاسر، "طراحی، بهینه‌سازی و تحلیل اجزای محدود موتور سنکرون آهن‌ربای دایم نوع دیسکی،" نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، سال ۱۴، شماره ۴-الف، صص. ۲۹۷-۲۸۹، زمستان ۱۳۹۵.

[۲۲] م. حق‌پرست، ص. بروجنی تقی‌پور و ع. کارگر، "بهبود ساختار هندسی رتور ماشین سنکرون رلوکتناسی با استفاده ترکیبی از شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک و روش اجزای محدود،" نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، سال ۱۱، شماره ۱-الف، صص. ۳۴-۲۸، بهار ۱۳۹۲.

داود عزیزیان تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۴ از دانشگاه زنجان و در مقطع دکتری مهندسی برق در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران به پایان رسانده است و از سال ۱۳۸۷ در دانشگاه آزاد اسلامی به‌عنوان عضو هیأت علمی مشغول به کار است. دکتر عزیزیان هم‌اکنون استادیار گروه مهندسی برق، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی می‌باشد. ایشان قبل از پیوستن به دانشگاه آزاد اسلامی به مدت ۷ سال و نیم به‌عنوان محقق تحقیق و توسعه و طراح ترانسفورماتورهای خشک در مؤسسه تحقیقات ترانسفورماتور ایران و شرکت ایران ترانسفو مشغول بکار بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: مدل‌سازی حرارتی و مغناطیسی ترانسفورماتورها،



شکل ۱۱: توزیع تلفات در بشقاب‌های نوعی از سیم‌پیچی‌های فشارقوی.



شکل ۱۲: ارتباط تلفات سیم‌پیچی‌ها با فرکانس.

روش تحلیلی برخوردار است و این در حالی است که سرعت محاسبات در این روش بسیار سریع‌تر از روش اجزای محدود می‌باشد. بنابراین روش ارائه‌شده، روشی کارا، دقیق و سریع جهت مدل‌سازی الکترومغناطیسی و محاسبه تلفات در سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور دوطبقه است. چنانچه نشان داده شد، توزیع تلفات در سیم‌پیچی‌های این نوع از ترانسفورماتور با ساختار دوطبقه تا حدودی متفاوت از انواع دوسیم‌پیچه متداول است. در عین حال تعبیه یوغی میانی، می‌تواند منجر به افزایش جزئی در تلفات سیم‌پیچی‌ها شود. چنانچه نشان داده شد، تلفات سیم‌پیچی با افزایش فرکانس، افزایش شدیدی را به‌خصوص در سیم‌پیچی‌های بشقابی فشارقوی تجربه می‌کند.

مراجع

- [1] D. Azizian, M. Bigdeli, and J. Faiz, "Design optimization of cast-resin transformer using nature inspired algorithms," *Arabian J. for Science and Engineering*, vol. 41, no. 9, pp. 3491-3500, Sep. 2016.
- [2] L. W. Pierce, "Thermal consideration in specifying dry-type transformers," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 30, no. 4, pp. 1090-1097, Jul./Aug. 1994.
- [3] H. G. Cho, U. Y. Lee, S. S. Kim, and Y. D. Park, "The temperature distribution and thermal stress analysis of pole cast resin transformer for power distribution," in *Proc. IEEE Conf. Int. Symp. on Electrical Insulation*, pp. 384-386, Boston, MA, USA, 7-10 Apr. 2002.
- [4] L. W. Pierce, "An investigation of the temperature distribution in cast-resin transformer windings," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 7, no. 2, pp. 920-926, Apr. 1992.
- [5] F. Nabhani, S. Hodgson, and K. Warnakulasuri, "Estimation of temperature rise in MVA range dry-type transformers and practical verification based on simulated loading," in *Proc. World Congress on Engineering*, vol. 1, 6 pp., London, U.K., 1-3 Jul. 2015.
- [6] A. Najafi and I. Iskender, "Thermal modeling and electromagnetic analysis of 1000 kVA distribution transformer based on electrical-thermal equivalent circuit and FEM," *Global Advanced Research J. of Engineering, Technology and Innovation*, vol. 4, no. 2, pp. 24-30, Feb. 2015.
- [7] E. Rahimpor and D. Azizian, "Analysis of temperature distribution in cast-resin dry-type transformers," *Electrical Engineering*, vol. 89, no. 4, pp. 301-309, Mar. 2007.

ایشان به عنوان استادیار فعالیت خود را در دانشگاه صنعتی امیرکبیر شروع کرد. در تاریخ ۱۳۸۳ به رتبه دانشیاری و در سال ۱۳۸۶ به رتبه استادی ارتقاء یافت. از ایشان بیش از ۱۱۰۰ مقاله منتشر شده است و در زمره یک درصد برتر دانشمندان و نخبگان علمی جهان به استناد پایگاه استنادی طلایه‌داران علم تامسون رویترز (ISI-ESI) می‌باشند. وی همچنین استاد برجسته مهندسی برق کشور منتخب فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران در سال ۱۳۹۷، پژوهشگر برگزیده کشوری در گروه فنی مهندسی منتخب وزارت علوم تحقیقات و فناوری در سال ۱۳۹۷، پژوهشگر برتر ایران منتخب انجمن استنادات ثبت شده در سامانه SciVal السویر، پژوهشگر برتر ایران منتخب انجمن مهندسیین برق و الکترونیک ایران (IAEEE) در سال ۱۳۸۹ و استاد نمونه کشور منتخب وزارت علوم تحقیقات و فناوری در سال ۱۳۸۷ بوده‌اند.

بهینه‌سازی سیستم‌های قدرت و ماشین‌های الکتریکی، الگوریتم‌های هوشمند، مطالعات حالت‌های گذرا در ترانسفورماتورها روش‌های عددی و اجزای محدود.

گنورگ قره‌پتیان در سال ۱۳۶۵ دوره کارشناسی مهندسی برق (قدرت) را در دانشگاه تبریز ظرف مدت سه سال و نیم و با کسب رتبه اول به اتمام رساند. وی درجه کارشناسی‌ارشد خود را نیز با کسب رتبه اول در سال ۱۳۶۸ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر (در زمینه قدرت) دریافت نمود و بلافاصله به عنوان مربی در دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر مشغول به کار شد. نام‌برده در بهمن ماه سال ۱۳۷۰ وارد دوره دکتری دانشکده فنی دانشگاه تهران شد و بعد از گذراندن دوره آموزشی موفق به دریافت بورس دولت آلمان (DAAD) شد. ایشان دوره تحقیقاتی دکترای را از سال ۱۳۷۲ لغایت ۱۳۷۵ در دانشگاه صنعتی آخن آلمان گذراند و در بهار ۱۳۷۶ موفق به اخذ درجه دکتری مهندسی برق با درجه عالی از دانشکده فنی دانشگاه تهران شد. بعد از فارغ‌التحصیلی