محاسبه تلفات ترانسفورماتور قدرت با استفاده از روش اجزای محدود

نویسندگان: آرمان آذرخش-
سیدمحمدتقی بطحایی- bathaee@kntu.ac.ir

چکیده: در این مقاله شبیه‌سازی سه‌بعدی ترانسفورماتور قدرت و محاسبه‌ی تلفات آن به طور کامل بررسی خواهد شد. بدین منظور ابتدا در مورد اهمیت بررسی تلفات یک ترانسفورماتور به طور خلاصه توضیح داده خواهد شد. در ادامه انواع تلفات موجود در ترانسفورماتور بررسی شده و توضیح مختصری در مورد هر کدام داده خواهد شد. سپس تلفات ترانسفورماتور با استفاده از روش اجزاء محدود سه‌بعدی محاسبه خواهد شد. تحلیل اجزاء محدود (FEM) دستیابی به‌دقت بالا، بدون فرض‌های زیاد را ممکن می‌سازد. در انتها تلفات بی باری و بارداری ترانسفورماتور با استفاده از روش اجزای محاسبه شده و نتایج مربوط به هر کدام ارائه خواهد شد.

کلید واژه: ترانسفورماتور قدرت، تلفات ، چگالی شار، روش اجزاء محدود

۱- مقدمه

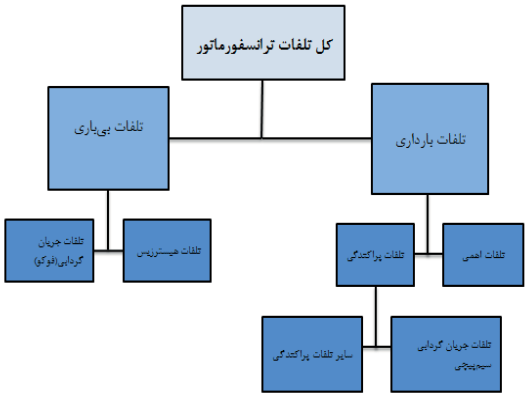
ترانسفورماتورهای قدرت یکی از گران‌ترین قطعات در سیستم قدرت می‌باشند، به همین دلیل راندمان و استفاده بهینه ازاین‌گونه تجهیزات بسیار حائز اهمیت است. دمای نقطه‌ی داغ ترانسفورماتور و حرارت ترانسفورماتور نیز مستقیماً به دمای محیط و نحوه بارگیری از ترانسفورماتور بستگی دارد. از طرفی دمای نقطه‌ی داغ ترانسفورماتور یکی از پارامترهای مهم و کلیدی در تعیین عمر عایقی می‌باشد. به همین دلیل داشتن مدل حرارتی ترانسفورماتور و تعیین دمای نقاط مختلف آن، تحت شرایط کاری متفاوت، جهت تحلیل عمر مفید ترانسفورماتور و همچنین بارگیری و استفاده بهینه از آن لازم و ضروری است. از طرفی تلفات هر ماشین الکتریکی، منابع تولید گرما در آن می‌باشند.

امروزه با توجه به رشد فزاینده قیمت مواد مصرفی مورد استفاده در ترانسفورماتورها نظیر مس و مواد عایقی، این تجهیز به‌عنوان یکی از تجهیزات بسیار گران‌قیمت شبکه قدرت بشمار آمده و درصد قابل‌توجهی از هزینه‌ها را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین، یکی از عوامل مؤثر در هزینهٔ مالکیت ۱۸ ترانسفورماتورها، بررسی و ارزیابی میزان تلفات آن‌ها می‌باشد. لذا، توجهات به سمت خرید ترانسفورماتورهایی با اتلاف کمتر جلب شده است[۱] و مطالعه و ارزیابی مسائل مرتبط با تلفات آن، موضوع بسیاری از پژوهش‌ها بوده است. تلفات ترانسفورماتورها، معمولاً به دودستهٔ عمده " تلفات بارداری[۱] " و " تلفات بی‌باری[۲] " تقسیم می‌شوند که در رابطه‌ی ۱ نشان داده‌شده است. در این رابطه، P_{LL} تلفات بارداری، P_{NL} تلفات بی‌باری و P_T تلفات کل ترانسفورماتور است. تقسیم‌بندی تلفات ترانسفورماتور در شکل (۱) نشان داده‌شده است[۲] ، [۳].

تلفات بارداری یا امپدانسی، مربوط به جریان‌های بارداری بوده و شامل تلفات اهمی در هادی‌ها، تلفات جریان گردابی در سیم‌پیچ‌ها ناشی از شار نشتی متناوب و سایر تلفات پراکندگی ناشی از جریان‌های گردابی در تمام هادی‌های موجود در ساختار ترانسفورماتور می‌باشد.

هنگامی‌که ترانسفورماتور به‌صورت بی‌بار به شبکه متصل شود، مقداری تلفات خواهد داشت. این تلفات، به تلفات بی‌باری موسوم است. اندازه‌گیری‌های مختلف نشان می‌دهند که تلفات بی‌باری شامل تلفات هیسترزیس، تلفات جریان گردابی در ورقه‌های هسته، تلفات اهمی در سیم‌پیچی ناشی از جریان بی‌باری، تلفات پراکندگی در کلمپ‌های هسته و سایر ساختارهای فلزی، تلفات حاصل از شار بین‌ورقه‌ای (شار عبوری از یک ورقه به ورقهٔ دیگر) و درنهایت تلفات دی‌الکتریک می‌باشد[۴].

$$P_T = P_{LL} + P_{NL} \quad (۱)$$



شکل۱- انواع تلفات در ترانسفورماتور

در این مقاله ابتدا به ترانسفورماتور و اهمیت بررسی تلفات در آن پرداخته خواهد شد. در بخش دوم انواع تلفات در این ترانسفورماتورها بررسی خواهد شد. در بخش سوم شبیه‌سازی یک نمونه ترانسفورماتور و محاسبه‌ی تلفات آن با استفاده از روش اجزای محدود محاسبه‌شده و بررسی خواهند شد. و در انتها نتیجه‌گیری بیان خواهد شد.

۲- انواع تلفات در ترانسفورماتور

تلفات مرسوم در یک ترانسفورماتور در شکل (۱) نشان داده‌شده است. در این بخش به بررسی این تلفات می‌پردازیم.

۲-۱- تلفات اهمی

وقتی ترانسفورماتور زیر بار قرار می‌گیرد، در سیم‌پیچ‌های آن جریان جاری می‌شود و تلفاتی متناسب با (RI^2) در هر یک از سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه به گرما تبدیل می‌شود. به مقدار انرژی الکتریکی که در واحد زمان در سیم‌پیچ اولیه و ثانویه ترانسفورماتور و براثر مقاومت اهمی سیم‌پیچ‌ها به گرما تبدیل می‌شود، تلفات اهمی سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور می‌گویند. و ازآنجاکه غالباً جنس سیم‌پیچ‌ها مسی است، به این تلفات، تلفات مسی نیز گفته می‌شود. تلفات اهمی از رابطه‌ی (۲) به دست می‌آید که در این رابطه R مقاومت DC سیم‌پیچ (Ω) و I مقدار مؤثر (rms) جریان عبوری (A) از سیم‌پیچی است.

$$P_{cu} = RI^2 \qquad (۲)$$

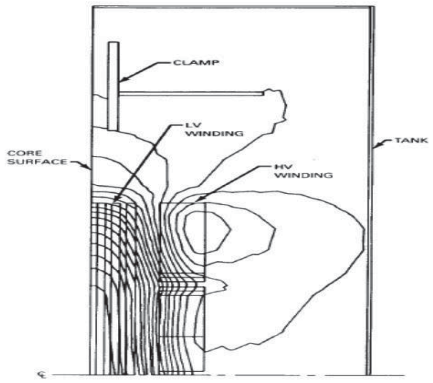
در ترانسفورماتور سه فاز تلفات مسی از رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود.

$$P_{cu-T} = P_{cu-Hv} + P_{cu-Lv} = ۳\times R_{Hv} {I_{Hv}}^{۲} + ۳\times R_{Lv} {I_{Lv}}^{۲} \qquad (۳)$$

در رابطهٔ فوق، I_{Hv} و I_{Lv} به ترتیب جریان‌های اولیه و ثانویه بوده و R_{Hv} و R_{Lv} به ترتیب مقاومت‌های اهمی سمت اولیه و ثانویه هستند.

۲-۲- تلفات جریان گردابی در سیم‌پیچ‌ها

سیم‌پیچ‌های فشارقوی و ضعیف ترانسفورماتور به‌صورت استوانه‌های هم‌محور حول ستون‌های هسته قرار می‌گیرند. ستون‌های هسته به‌صورت عمودی و اجزای یوغ هسته به‌صورت افقی، مدار مغناطیسی هسته را تشکیل می‌دهند. در قسمت‌های بالا و پایین یوغ، معمولاً ساختارهای گیرهای از جنس مواد عایقی یا فلزی برای محکم کردن ورقه‌های هسته وجود دارند. همچنین ترانسفورماتورهای روغنی، شامل یک تانک فولادی بوده درحالی‌که ترانسفورماتورهای نوع خشک شامل یک حفاظ فلزی ساده‌تر می‌باشند. هرگاه جریان متناوب از سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور عبور کند، شار و شار دور ایجادشده و هر هادی از طریق یک میدان مغناطیسی متناوب که شدت آن با دامنهٔ جریان نسبت مستقیم دارد احاطه می‌گردد. در شکل (۲) برش سطح مقطع عرضی از هسته، سیم‌پیچی‌ها، کلمپ و تانک ترانسفورماتور نشان داده‌شده است[۵].



شکل۲- میدان الکترومغناطیسی تولیدشده در ترانسفورماتور

تلفات جریان گردابی در سیم‌پیچ‌ها از رابطه‌ی (۴) به دست می‌آید.

$$P_{EC} = \frac{\pi^2 \tau^2 \mu^2}{3\rho} f^2 H^2 \qquad (۴)$$

در رابطه فوق، τ پهنای هادی عمود بر خطوط میدان(m) و ρ مقاومت مخصوص هادی(Ω.m)، H شدت میدان مغناطیسی(A/m)، f فرکانس (Hz) و μ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی($N.A^{-2}$) می‌باشد[۶].

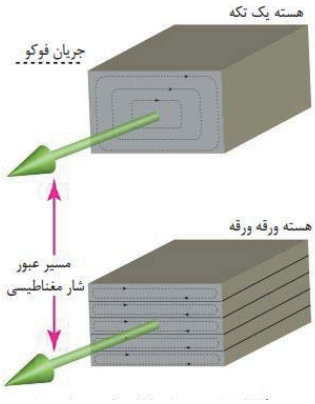
۲-۳- سایر تلفات پراکندگی

هنگامی‌که شار الکترومغناطیسی متغیر با زمان، یک فلز را در بربگیرد، در آن ولتاژ القا کرده و سپس، جریان گردابی به وجود می‌آورد. این جریان، تلفات ایجاد کرده و درنتیجه موجب افزایش دما و حرارت می‌شود. در اثر عبور جریان از سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور، شار مغناطیسی درون‌هسته ایجاد می‌شود؛ اما ازآنجایی‌که نفوذپذیری ورقه‌های هسته بی‌نهایت نیست لذا برخی خطوط شار در مسیری خارج از هسته بسته می‌شوند. این خطوط شار، ساختارهای فلزی ترانسفورماتور را قطع نموده و در آن‌ها ایجاد جریان گردابی و تلفات می‌نمایند. به‌طورکلی، تلفات جریان گردابی را که در بخش‌های فلزی و ساختاری ترانسفورماتور به‌غیراز سیم‌پیچ‌ها ایجاد می‌گردد را سایر تلفات پراکندگی می‌نامند. این تلفات در تانک، مخزن، کلمپها و سایر قسمت‌های فلزی به وجود می‌آید. سایر تلفات پراکندگی تابعی از شکل و حجم فیزیکی هسته، قدرت خروجی و کلاس ولتاژ ترانسفورماتور، جنس مواد مورد استفاده در ساخت تانک و غیره است.

۲-۴- تلفات هسته

به مجموع تلفات هیسترزیس و فوکو، تلفات هسته ترانسفورماتور گویند و ازآنجاکه هر ترانسفورماتور در یک ولتاژ نامی و فرکانس نامی به کار گرفته می‌شود؛ بنابراین تلفات هسته ثابت خواهد بود. از طرفی چون جنس هسته ترانسفورماتور از ترکیبات آهنی است، به تلفات هسته(۵) تلفات آهنی نیز گفته می‌شود. به‌دلیل ثابت بودن تلفات هسته ترانسفورماتور در محاسبات آن را به‌عنوان تلفات ثابت ترانسفورماتور در نظر می‌گیرند.. میزان تلفات هیسترزیس به مشخصهٔ B-H هسته بستگی دارد. به‌طوری‌که میزان آن به این‌که در طی یک سیکل کامل جریان، چه میزان انرژی به سیستم روانه و سپس به منبع بازمی‌گردد، وابسته است. البته انرژی ورودی به سیستم همواره بیشتر از انرژی برگشتی به منبع است. لذا در یک سیکل کامل جریان، مقداری انرژی در هسته به‌صورت گرما تلف‌شده و سبب افزایش دمای آن می‌گردد مساحت داخل حلقهٔ هیسترزیس بیانگر کار انجام‌شده به‌وسیلهٔ میدان اعمال‌شده می‌باشد.

با عبور شار مغناطیسی از هسته، در هسته ترانسفورماتور نیز نیروی محرکه القاء می‌شود و چون هسته ترانسفورماتور هادی است، لذا جریان الکتریکی در آن القا می‌شود. مسیر حرکت جریان القایی هسته عمود بر مسیر عبور شار و مانند گرداب در مقطع هسته می‌باشد به همین خاطر آن را جریان گردابی[۳] می‌گویند. برش مقطعی از یک هسته و مسیر جریان گردابی در شکل (۳) نشان داده‌شده است. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود با ورقه ورقه کردن هسته و عایق کردن آن‌ها از یکدیگر مقاومت الکتریکی هسته را افزایش می‌دهند تا تلفات فوکو کاهش یابد.



شکل۳- نمایش عبور جریان گردابی از مقطع هسته‌ی ترانسفورماتور

در این مقاله از روش برتوتی جهت محاسبه‌ی تلفات هسته استفاده‌شده است[۷]. درروش برتوتی تلفات هسته به‌صورت تابعی از چگالی شار ماکزیمم و فرکانس بیان می‌شود. چگالی حجمی تلفات لحظه‌ای هسته از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید

$$dP_V = K_h B_m^2 f K_f + \frac{1}{T}\int_0^T [\sigma \frac{d^2}{12}\left(\frac{\partial B(t)}{\partial t}\right)^2 + K_e \left(\frac{\partial B(t)}{\partial t}\right)^{\frac{3}{2}}] K_f \, dt$$

در این رابطه:

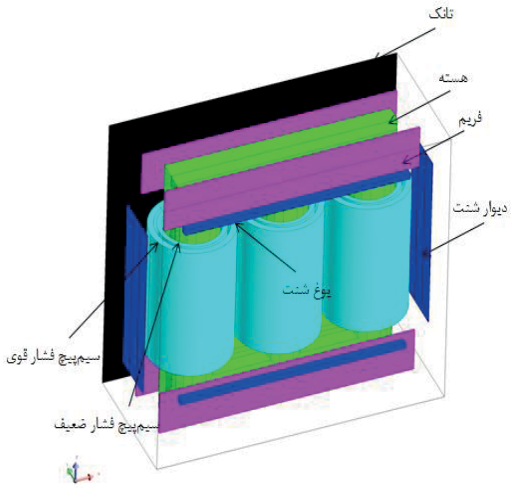
- ✓ K_h ضریب تلفات هیسترزیس $(Ws T^{-2} m^{-3})$
- ✓ K_e ضریب تلفات جریان گردابی $(Ws^{\frac{3}{2}} T^{-\frac{3}{2}} m^{-3})$
- ✓ σ رسانایی (Ωm^{-1})
- ✓ d ضخامت لایه‌ها (m)
- ✓ f فرکانس (Hz)
- ✓ B_m چگالی شار ماکزیمم (T)
- ✓ K_f ضریب پرشدگی (نزدیک ۱)

با انتگرال‌گیری از رابطه (۵) در یک دوره‌ی تناوب چگالی حجمی تلفات هسته مطابق با رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$dPv = \frac{1}{T}\int_o^T dp(t)\,dt \qquad (۶)$$

۳- محاسبه‌ی تلفات یک نمونه ترانسفورماتور با استفاده از روش اجزای محدود

نمایی سه‌بعدی از ترانسفورماتور موردمطالعه به همراه اجزای مختلف آن در شکل (۴) نشان داده‌شده است. مقادیر نامی ترانسفورماتور در جدول (۱) آورده شده است. در این قسمت تحلیل‌های بی‌باری و اتصال کوتاه در یک ترانسفورماتور با استفاده از روش اجزای محدود بررسی‌شده و تلفات مورداشاره در قسمت قبل محاسبه می‌گردد.



شکل۴- مدل سه‌بعدی ترانسفورماتور

جدول ۱- مقادیر نامی ترانسفورماتور

توان نامی	۱۵۰ MVA
فرکانس	۵۰ Hz
ولتاژهای نامی	$\frac{۱۴/۱}{۱۳۲}\ KV$
جریان‌های نامی	$\frac{۳۵۳۷}{۶۵۵}\ A$
تعداد دور سیم‌پیچ اولیه	۴۳۲
تعداد دور سیم‌پیچ ثانویه	۸۰
مقاومت DC سیم‌پیچ اولیه	۰/۱۸۷۶ Ω
مقاومت DC سیم‌پیچ ثانویه	۰/۰۰۴۹ Ω

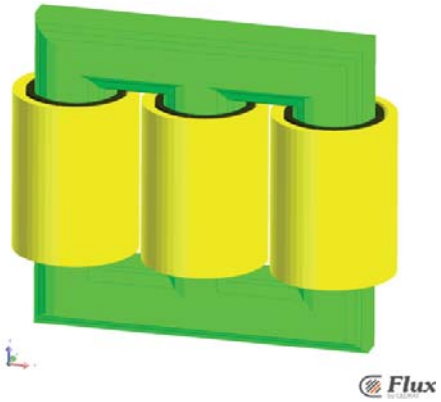
۳-۱- آزمایش بی‌باری

هدف از انجام این آزمایش محاسبه‌ی تلفات هسته است. در این حالت هسته‌ی ترانس و سیم‌پیچ‌ها مدل می‌شوند و از فریم‌ها و یوغ‌ها صرف‌نظر خواهد شد.

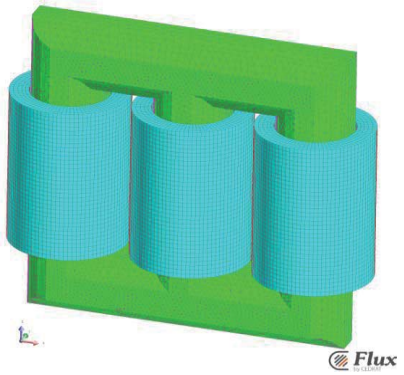
مراحل شبیه‌سازی به‌صورت زیر است:

- ❖ ابتدا ساختار سه‌بعدی از ترانسفورماتور موردنظر مطابق با شکل(۵) در نرم‌افزار کشیده می‌شود.
- ❖ بعد از تعریف قسمت‌های مختلف، ساختار ترانسفورماتور مش‌بندی می‌شود. نمایی سه‌بعدی از مش‌بندی ترانسفورماتور موردمطالعه در شکل(۶) نشان داده‌شده است.
- ❖ در مرحله‌ی بعد مدار الکتریکی متناسب با شرایط بی‌باری تعریف می‌شود. مدار الکتریکی بی‌باری در شکل(۷) نشان داده‌شده است. با توجه به این شکل، سیم‌پیچ‌های فشارقوی به ولتاژ نامی شبکه $\frac{۱۳۲KV}{\sqrt{3}}$ با اختلاف‌فاز ۱۲۰ درجه و سیم‌پیچ‌های فشار ضعیف به مقاومتی با مقدار بزرگ متصل شده‌اند تا جریان بسیار کمی از سیم‌پیچ‌های فشار ضعیف عبور کند.

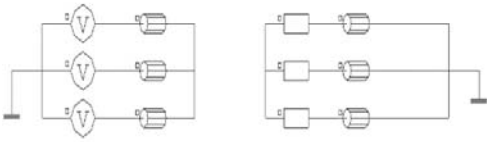
❖ بعد از اتمام مراحل قبل، ترانسفورماتور موردنظر شبیه‌سازی‌شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی استخراج می‌گردند.



شکل۵- ساختار ترانسفورماتور موردمطالعه



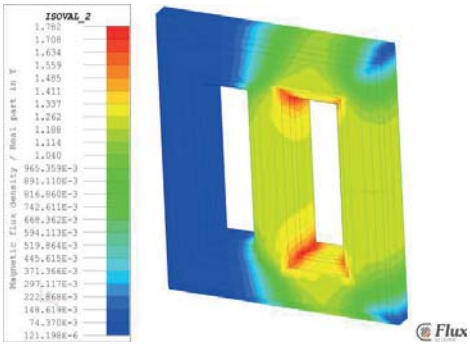
شکل۶- ساختار ترانسفورماتور موردمطالعه



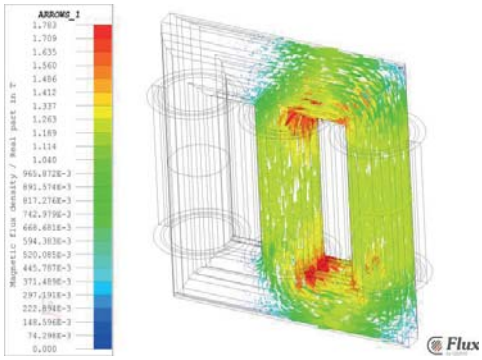
شکل۷- ساختار ترانسفورماتور موردمطالعه

چگالی شار هسته در شکل (۸) نشان داده‌شده است. با توجه به این شکل بیشترین چگالی شار هسته T ۱/۷۸۲ است. علاوه بر این جهت حرکت شار در هسته در یک‌لحظه در شکل (۹) نشان داده‌شده است. با توجه به اینکه اندازه‌ی ولتاژ فاز a در این لحظه صفر می‌باشد، درنتیجه شار عبوری از ستون سمت چپ صفر و شار بین دو ستون دیگر در گردش می‌باشد.

همان‌طور که در بخش قبل گفته شد جهت محاسبه‌ی تلفات هسته از روش برتوتی استفاده می‌شود. درروش برتوتی با در اختیار داشتن ضرایب K_h و K_e تلفات هسته قابل‌محاسبه می‌باشد. ویژگی‌های هسته‌ی مورد استفاده در این ترانسفورماتور در جدول (۲) آورده شده است. با توجه به این مقادیر تلفات هسته W ۳۷۹۰۰ محاسبه‌شده است.



شکل۸- چگالی شار هسته‌ی ترانسفورماتور



شکل۹- جهت حرکت شار در هسته

جدول۲- مقادیر نامی ترانسفورماتور

۱۳/۴	K_h
۰/۲۶۵	K_e
۰/۰۰۰۲۷	d
۴۸۲۲۱۰۰	σ
۰/۹۷	K_f

۳-۲- آزمایش اتصال کوتاه

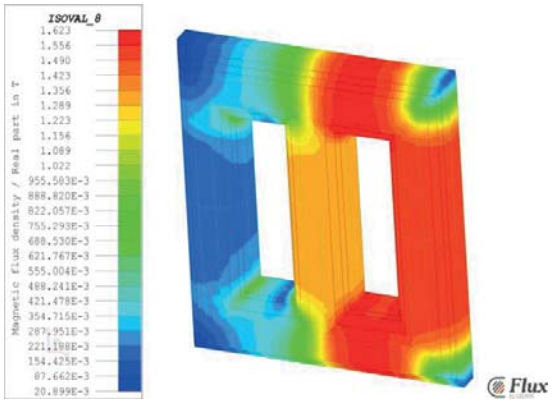
در آزمایش اتصال کوتاه عبور جریان از سیم‌پیچ‌ها و تولید شارهای پراکندگی خارج از هسته، منجر به ایجاد

جریان‌های گردابی در تمام هادی‌های موجود در ساختار ترانسفورماتور می‌شود که به تلفات ناشی از این جریان‌ها تلفات سرگردان می‌گویند. درنتیجه در آزمایش اتصال کوتاه علاوه بر اجزای نشان داده‌شده در شکل (۵) ، قسمت‌های دیگری ازجمله فریم‌ها، یوغ شنت، دیوار شنت و تانک به این شکل اضافه خواهند شد (شکل (۴)) و با توجه به مدار معادل آزمایش اتصال کوتاه تلفات موردنظر در این حالت محاسبه خواهند شد. لازم به ذکر است که تنها راه محاسبه‌ی تلفات شارهای نشتی استفاده از روش اجزای محدود سه‌بعدی است. مراحل شبیه‌سازی مشابه حالت قبل می‌باشد با این تفاوت که در این حالت هرکدام از سیم‌پیچ‌ها

$$P_{cu-Hv} = ۳\times R_{Hv} I_{Hv}{}^{۲} = ۲۴۱/۴ \text{ Kw} \quad (۷)$$

با جریان نامی تحریک می‌گردند.

چگالی شار هسته در شکل (۱۰) نشان داده‌شده است. با توجه به این شکل بیشترین چگالی شار هسته ۱/۶۲۳ T است.



شکل۱۰- جهت حرکت شار در هسته

۳-۲-۱- تلفات اهمی

تلفات اهمی از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید درنتیجه داریم:

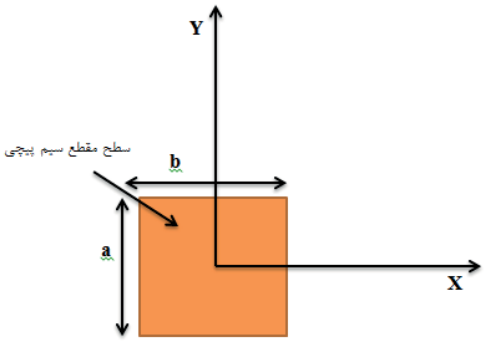
$$P_{cu-Lv} = ۳\times R_{Lv} I_{Lv}{}^{۲} = ۱۸۳/۹ \text{ Kw} \quad (۸)$$

۳-۲-۲- محاسبه‌ی تلفات جریان گردابی در سیم‌پیچ‌ها

همان‌طور که پیشتر گفته شد، عبور جریان از سیم‌پیچ‌ها و تولید شارهای نشتی خارج از هسته، منجر به ایجاد جریان‌های گردابی در تمام هادی‌های موجود در ساختار ترانسفورماتور می‌شود. به تلفات ناشی از این جریان‌ها در سیم‌پیچ‌های فشارقوی و فشار ضعیف، تلفات جریان‌های گردابی در سیم‌پیچ می‌گویند.

در این مقاله از روش اشاره‌شده در [۸] جهت محاسبه‌ی تلفات جریان‌های گردابی در سیم‌پیچ‌ها استفاده‌شده است. با توجه به این مقاله، تلفات ناشی از جریان‌های گردابی از رابطه‌ی (۹) محاسبه می‌شود. در این رابطه، σ رسانایی مس (Ωm^{-1})، μ_o نفوذپذیری نسبی هوا، a عرض سیم‌پیچ (mm)، b طول سیم‌پیچ (mm)، δ عمق پوستی($mm^{۴}$)، B_{rad} چگالی شار در راستای شعاع (T)، B_{ax} چگالی شار در راستای محور (T) و P_{eddy} تلفات جریان‌های گردابی در سیم‌پیچ‌ها (W/m) می‌باشد. نمایی دوبعدی از سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور در شکل (۱۱) نشان داده‌شده است. با توجه به این شکل، B_{rad} چگالی شار در راستای محور X و B_{ax} چگالی شار در راستای محور Y می‌باشد.

$$P_{eddy} = \frac{1}{(\sigma\mu_o \delta^{۲})}\left[\frac{b}{\delta}\frac{(\sinh(\frac{a}{\delta})-\sin(\frac{a}{\delta}))}{(\cosh(\frac{a}{\delta})+\cos(\frac{a}{\delta}))} B_{rad}{}^{۲} + \frac{a}{\delta}\frac{(\sinh(\frac{b}{\delta})-\sin(\frac{b}{\delta}))}{(\cosh(\frac{b}{\delta})+\cos(\frac{b}{\delta}))} B_{ax}{}^{۲}\right] \quad (۹)$$



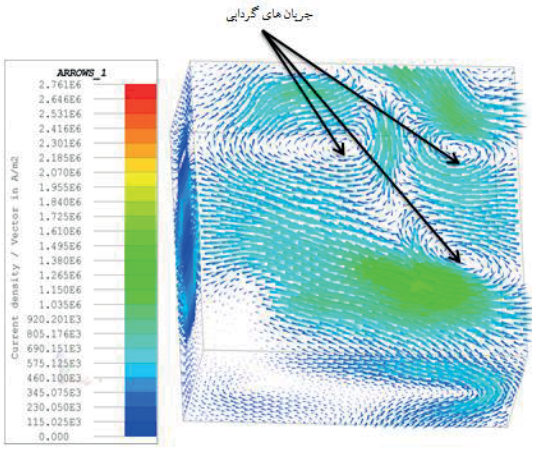
شکل۱۱- نمایی از سطح مقطع سیم‌پیچی

درنتیجه تلفات ناشی از جریان‌های گردابی در سیم‌پیچ‌ها ۳۴۷۸۹ w خواهد شد.

۳-۲-۳- محاسبه‌ی تلفات سرگردان

در قسمت قبل گفته شد که با عبور جریان از سیم‌پیچ‌ها و تولید شارهای نشتی خارج از هسته، جریان‌های گردابی در تمام هادی‌های موجود در ساختار ترانسفورماتور ایجاد می‌شود. به‌عنوان نمونه جریان‌های گردابی ایجادشده در تانک ترانسفورماتور ناشی از شارهای نشتی در شکل (۱۲) نشان داده‌شده است.

هادی‌های در نظر گرفته‌شده در این ترانسفورماتور شامل تانک، یوغ شنت، دیوار شنت و فریم می‌باشند. تلفات ناشی از شارهای نشتی در هرکدام از این اجزاء در جدول (۳) آورده شده است. بنابراین با توجه به این جدول، مجموع تلفات شارهای سرگردان W ۷۱۶۲ خواهد بود.



شکل۱۲- جریان‌های گردابی در تانک ترانسفورماتور

جدول۳- تلفات شارهای سرگردان

فریم	دیوار شنت	یوغ شنت	تانک	هادی موردنظر
۱۷۰۱	۱۸۶	۴۷۱	۴۸۰۴	مقدار(W)

۴-نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی دقیق و محاسبه‌ی تلفات ترانسفورماتور نقش مهمی در تعیین عمر مفید ترانسفورماتور و طراحی دقیق آن دارد. در این مقاله آزمایش بی‌باری و اتصال کوتاه یک ترانسفورماتور نمونه با استفاده از روش اجزای محدود بررسی‌شده و انواع تلفات موجود در آن ازجمله تلفات هسته، تلفات مسی، تلفات سرگردان و غیره محاسبه‌شده است.

1- Load loss
2- No-load loss
3- Eddy Current
4- Skin Depth

مراجع

[1] J. C. Olivares-Galván, P. S. Georgilakis, and R. Ocon-Valdez, "A review of transformer losses," *Electr. power components Syst.*, vol. 37, no. 9, pp. 1046–1062, 2009.

[2] V. Sarac, "FEM 2D and 3D design of transformer for core losses computation," *Int. Sci. J. Ind. 4.0*, vol. 2, no. 3, pp. 119–122, 2017.

[3] S. M. H. Hosseini, S. M. E. Madar, and M. Vakilian, "Using the finite element method to calculate parameters for a detailed model of transformer winding for partial discharge research," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 23, no. 3, pp. 709–718, 2015.

[4] D. S. Takach and R. L. Boggavarapu, "Distribution transformer no-load losses," *Power Appar. Syst. IEEE Trans.*, no. 1, pp. 181–193, 1985.

[5] A. Gupta and R. Singh, "Evaluation of Distribution Transformer Losses Under Harmonic Loads Using Analytical and Simulation Methods," *Int. J. Emerg. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 90–95, 2011.

[6] E. F. Fuchs, D. Yildirim, and W. M. Grady, "Measurement of eddy-current loss coefficient P EC-R, derating of single-phase transformers, and comparison with K-factor approach," *Power Deliv. IEEE Trans.*, vol. 15, no. 1, pp. 148–154, 2000.

[7] G. Bertotti, "General properties of power losses in soft ferromagnetic materials," *Magn. IEEE Trans.*, vol. 24, no. 1, pp. 621–630, 1988.

[8] T. Ngnegueu, G. Meunier, J. C. Sabonnadiere, M. Mailhot, and J. P. Arthaud, "Calculation of extra losses in shell form power transformer windings," *Magn. IEEE Trans.*, vol. 24, no. 6, pp. 2673–2675, 1988.