

مدلسازی حرارتی سیم پیچ ترانسفورمر با استفاده از کوپل میدانهای مغناطیسی و حرارتی در محیط المان محدود

عطا فخری^۱، فرهاد شهینیا^۲، محمد باقر بناء شریفیان^۳، جواد فیض^۴

^۱شرکت مهندسی مشاور نیروی آذربایجان (منا)

^۲دفتر تحقیقات و استاندارد- شرکت توزیع نیروی برق آذربایجانشرقی

^۳دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز

^۴گروه مهندسی برق و کامپیوتر- دانشکده فنی- دانشگاه تهران

^۱ata_fakhri@yahoo.com, ^۲farhadshahnia@yahoo.com, ^۳sharifian@tabrizu.ac.ir, ^۴jfaiz@ut.ac.ir

چکیده- محاسبه مولفه‌های مختلف تلفات ترانسفورمرها توسط روشهای محاسباتی بعلا پیچیدگی هندسی ساختمان ترانسفورمر، وابسته بودن خواص مواد بکار رفته با درجه حرارت و غیرخطی بودن رفتار مغناطیسی آنها معمولاً مشکل می‌باشد. در این بین استفاده از روشهای عددی همانند المان محدود یک روش کارآمد برای محاسبه و پیشگویی این تلفات به منظور محاسبه گرمترین نقطه ترانسفورمر می‌باشد. در این مقاله یک مدل دو بعدی مغناطیسی و حرارتی برای پیشگویی حداکثر درجه حرارت سیم‌پیچی ترانسفورمرها ارائه شده است. مدل بکار رفته برای مطالعه حرارتی حالت ماندگار و گذرای سیم‌پیچهای فشار قوی و ضعیف بکار رفته است.

کلمات کلیدی : ترانسفورمر، المان محدود، گرمترین نقطه، تلفات ادی

۱- مقدمه

شده در قسمتهای مختلف ترانسفورمرها معمولاً ثابت نبوده و تابع درجه حرارت می‌باشد. بنابراین استفاده از کوپل میدانهای مغناطیسی و حرارتی برای محاسبه تلفات و توزیع حرارت در ترانسفورمرها الزامی است [۶-۷]. در این مقاله مطالعه مغناطیسی و حرارتی یک ترانسفورمر توزیع ۵۰ کیلو ولت آمپر که دارای ۷۲ دور سیم‌پیچ از نوع فویلی در طرف فشار ضعیف می‌باشد، بمنظور یافتن حداکثر درجه حرارت سیم‌پیچهای آن مورد نظر است. اطلاعات مربوط به ابعاد تلفات سیم‌پیچهای این ترانسفورمر در مرجع [۸] آمده است.

ترانسفورمرها از تجهیزات مهم سیستمهای قدرت و توزیع می‌باشند و مطالعه رفتار مغناطیسی و حرارتی آنها دارای اهمیت بسزائی است. قسمتهای مختلف یک ترانسفورمر از جمله سیم‌پیچها توسط تلفات داخلی سیستم همانند تلفات DC و تلفات ادی سیم‌پیچها شروع به گرم شدن می‌کنند. محاسبه این تلفات توسط روشهای عددی همانند روش المان محدود توسعه یافته است [۱-۲]. حداکثر درجه حرارت مجاز قسمتهای مختلف یک ترانسفورمر تحت انواع مختلف بارگذاری برای ترانسفورمرهای غوطه‌ور در روغن توسط استانداردهای IEEE معرفی و محاسبه گردیده‌اند. مطابق با این استانداردها عمر عایقی ترانسفورمرها کاملاً در ارتباط با درجه حرارت می‌باشد [۳-۴]. مشخصات مواد بکار برده شده در ساختمان ترانسفورمرها عموماً ثابت نبوده و تابع درجه حرارت می‌باشد [۵]. بعنوان مثال مقاومت مخصوص مس ممکن است به ازای یک بازه تغییرات ۱۰۰ درجه‌ای به میزان ۳۰٪ تغییر نماید. بنابراین کل تلفات ایجاد

۲- توسعه معادلات الکترومغناطیس در محیط المان

محدود

با فرض وابسته بودن مشخصات الکتریکی مواد با درجه حرارت، صورت کلی معادله پواسن در مورد یک میدان مغناطیسی متغیر با زمان به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\nabla \cdot (\nu_r(T) \nabla A) - \mu \sigma(T) \frac{\partial A}{\partial T} = -\mu J_0 \quad (1)$$

تغییر نماید. بعنوان نمونه با فرض معلوم بودن دما در سطح D:

$$T|_D = T_0 \quad (7)$$

۳-۲- شرط مرزی با شار حرارتی مشخص برای سطح

معلوم بودن شار حرارتی بر روی سطح D بر طبق شرط مرزی نیومن می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_D = Q_N \quad (8)$$

برای مشخص نمودن یک سطح عایق که قابلیت انتقال حرارت آن صفر است معادله بالا به صورت همگن قابل تعریف می‌باشد.

۳-۳- شرط مرزی با ضریب همرفت مشخص برای

سطح

در بسیاری از کاربردها انتقال گرما به محیط اطراف آن از طریق همرفت انجام می‌گیرد. این کار به خاطر وجود اختلاف دمای سطح و دمای سیال اطراف آن می‌باشد. بیان ریاضی این شرط مرزی از موازنه انرژی بصورت زیر بیان می‌شود:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_D = h(T - T_\infty) \quad (9)$$

که در آن، T_∞ درجه حرارت سیال و h ضریب انتقال همرفتی برای سطح مورد نظر است.

۴- مدل مغناطیسی دو بعدی سیم‌پیچها

سیم‌پیچهای ترانسفورماتورها معمولاً جزو ظرفیت‌ترین قسمتهای ترانسفورمر در مدلسازی المان محدود می‌باشند. آنها معمولاً برای مدل‌سازی تلفات ژول و ادی ناشی از سیم‌پیچها و انتقال این تلفات به میدانهای حرارتی بکار برده می‌شوند. در شرایط اعمال بار به ثانویه ترانسفورمر جریان سیم‌پیچهای اولیه و ثانویه افزایش یافته و به تبع آن شار پراکندگی سیم‌پیچها نیز افزایش می‌یابد. تلفات حالت بارداری ترانسفورمرها شامل دو مولفه کلی است. مولفه اول ناشی از تلفات سیم‌پیچها و مولفه دوم ناشی از وجود چگالی جریانهای ادی سیم‌پیچها بعلت وجود شارهای مغناطیسی ناشی می‌باشد که به تلفات ناشی از شارهای پراکنده یا تلفات ادی موسوم است. عموماً دو مدل کلی برای مدل‌سازی سیم‌پیچهای ترانسفورماتورها در محیط المان

در یک محیط دو بعدی، A مولفه Z از پتانسیل مغناطیسی متغیر با زمان بوده که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A(t) = A.e^{j\omega t} \quad (2)$$

با استفاده از مختصات کارتزین معادله رابطه ۱ بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -J_0 + j\omega\sigma A \quad (3)$$

که در آن، μ ضریب نفوذ مغناطیسی، σ رسانایی الکتریکی و J_0 چگالی جریان کل سیم‌پیچها بوده که شامل دو مولفه چگالی جریانهای منبع و جریانهای ادی است.

معادلاتی که رفتار یک میدان مغناطیسی را در محیط المان محدود بیان می‌کنند بایستی توسط یک سری شرایط مرزی محدود گردند. بر طبق شرط مرزی نیومن برای آنکه حل المان محدود یک مساله الکترومغناطیس، یک جواب منحصر به فرد داشته باشد بایستی مشتق عمود آن پارامتر در هر نقطه از مرز برابر صفر باشد، یعنی:

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

۳- توسعه معادلات حرارتی در المان محدود

گرادیان گرمایی ایجاد شده در اثر وجود شار گرمایی در مورد یک جسم همگن تک‌بعدی را بر طبق قانون فوریه می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$Q = -\lambda \nabla T(x, t) \quad (5)$$

که در آن، T درجه حرارت ماده و λ ضریب هدایت حرارتی ماده بوده و وابسته به درجه حرارت می‌باشد. بر طبق قانون بقای انرژی حرارتی، هنگامی که شار حرارتی خارج شده از یک جسم در مقایسه با نرخ تولید انرژی در واحد حجم آن جسم (q) کمتر باشد، دمای جسم شروع به کاهش می‌یابد، یعنی:

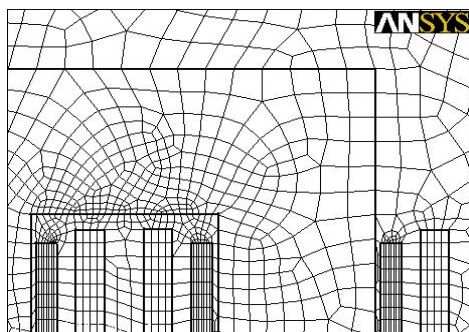
$$-\nabla \cdot (\lambda \nabla T(x, t)) + q = \rho \cdot c \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \quad (6)$$

تحلیل مسائل انتقال حرارت نیازمند دانستن شرایط مرزی و اولیه مناسب است. در تحلیل حرارتی یک مساله مفروض بسته به هندسه مساله و محیط مورد بررسی، سه نوع شرط مرزی به شرح زیر ممکن است تعیین شود:

۳-۱- شرط مرزی با دمای معلوم برای سطح

در بعضی از موارد دمای سطح مرزی معلوم بوده به طوری که مقدار آن می‌تواند در طول تحلیل ثابت باقی مانده یا

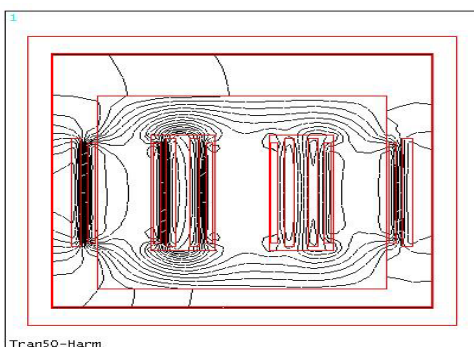
قسمت خارجی مربوط به سیم‌پیچهای فشار قوی و از نوع رشته‌ای است.



شکل ۱: یک چهارم از سطح مقطع مدل دوبعدی یک ترانسفورمر به همراه مش‌بندی سیم‌پیچهای آن.

۵- آنالیز مغناطیسی محاسبه تلفات سیم‌پیچها

برای تعیین مولفه‌های تلفات حالت بارداری نظیر تلفات dc و تلفات ناشی از تاثیر شارهای ناشی در سیم‌پیچها و بمنظور مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی المان محدود این تلفات با نتایج اندازه‌گیری شده مرجع [۸] مقایسه می‌شود. مدل دوبعدی این ترانسفورمر در حالت اتصال کوتاه و در یک محیط المان محدود مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. شکل ۲ توزیع مولفه‌های حقیقی خطوط شار مغناطیسی داخل هسته و اطراف سیم‌پیچها در مدل اتصال کوتاه را نشان می‌دهد. مقدار واقعی تلفات DC و ادی سیم‌پیچها به منظور مقایسه با مقادیر محاسبه شده این کمیتها حاصل از المان محدود در جدول ۱ آمده است.



شکل ۲: مولفه حقیقی خطوط شار مغناطیسی داخل هسته و اطراف سیم‌پیچها در مدل اتصال کوتاه ترانسفورمر.

محدود قابل تعریف می‌باشد. یکی استفاده از سیم‌پیچهای رشته‌ای و دیگری استفاده از سیم‌پیچهایی بصورت شمشهای توپر می‌باشد.

۴-۱ سیم‌پیچهای نوع رشته‌ای

در این حالت کویلها از یک سری سیم‌پیچها با سطح مقطع بسیار بزرگتر از عمق نفوذ مجموعه تشکیل شده‌اند به طوری که تقسیم سطح مقطع هر هادی به تعدادی مش جداگانه لازم نیست. به علت کوچک بودن سطح مقطع سیم‌پیچها از اثر تلفات ادی ناشی از شارهای ناشی ترانسفورمر صرف نظر می‌شود. از این مدل بیشتر برای مدل‌سازی سیم‌پیچهای فشار قوی که دارای سیم‌پیچهایی با سطح مقطع کوچکتر و تعداد دور بیشتر است استفاده می‌شود.

۴-۲ سیم‌پیچهای نوع شمش

از این مدل بیشتر زمانیکه تلفات ناشی از شارهای پراکنده بر روی سیم‌پیچها مهم باشد استفاده می‌شود. در این حالت به منظور مدل‌سازی چگالی جریانهای ادی، هرکدام از سیم‌پیچها به طور مجزا مش‌بندی می‌شوند. در این حالت المانهای به کار برده شده بایستی دارای ابعادی کوچکتر از عمق نفوذ باشند. از این روش بیشتر برای مدل‌سازی سیم‌پیچهای فشار ضعیف که دارای سطح مقطعی بسیار بزرگتر از عمق نفوذ هستند استفاده می‌شود. از آنجائیکه سیم‌پیچهای فشار قوی دورتر از سطح هسته قرار گرفته‌اند و اثر شارهای ناشی بر روی آنها بسیار ضعیف است، لذا از تلفات ادی این سیم‌پیچها می‌توان صرف‌نظر نمود. بنابر این لزومی به یکسان بودن مدل بکار برده شده در سیم‌پیچهای فشار قوی و ضعیف وجود ندارد.

شکل ۱، یک چهارم از سطح مقطع مدل دوبعدی ترانسفورمر سه فاز مورد مطالعه را به همراه مش‌بندی سیم‌پیچهای اولیه و ثانویه آن نشان می‌دهد. قسمت داخلی مربوط به سیم‌پیچهای فشار ضعیف و از نوع شمش و

جدول ۱- مقدار واقعی تلفات dc و ادی سیم‌پیچها به همراه مقادیر محاسبه شده این کمیتها در محیط المان محدود

نوع تلفات	مقدار واقعی تلفات (وات)	تلفات محاسبه شده توسط مدل المان محدود (وات)
تلفات DC سیم‌پیچهای فشار ضعیف	۳۸۴/۹۲	۳۹۴/۴۶
تلفات DC سیم‌پیچهای فشار قوی	۵۳۴/۷۳	۵۳۹/۷۲
تلفات ادی سیم‌پیچهای فشار ضعیف	۶۴/۳۸	۸۰/۰۷
تلفات ادی سیم‌پیچهای فشار قوی	-	۱/۳۸

C ظرفیت حرارتی ($J.kg^{-1}.c^{-1}$)

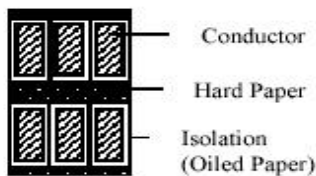
ρ چگالی حجمی ($Kg.m^{-3}$)

V حجم جسم (m^3)

که بالا نویس‌های A, B در رابطه ۱۰ بترتیب نشان دهند محیط هادی و عایق اطراف آنها هستند.

۵-۱-۲- مدل حرارتی سیم‌پیچهای فشار ضعیف

در سیم‌پیچهای فشار ضعیف بخاطر استفاده از سیم‌پیچهای فویل‌ی و نیز به خاطر متفاوت بودن ضخامت لایه عایقی بکار رفته در امتداد x و y ، رفتار حرارتی کل سیم پیچها نمی‌تواند همانند یک جسم همگن در نظر گرفته شود. بنابراین این سیم‌پیچهای فشار ضعیف را می‌توان همانند یک جسم غیرهمگن با ضریب هدایت حرارتی متفاوت در امتداد x و y تصور نمود. شکل ۴ سطح مقطع این نوع سیم‌پیچی را نشان می‌دهد.



شکل ۴: سطح مقطع سیم‌پیچهای فشار ضعیف.

با توجه به اینکه ارتفاع کل سیم‌پیچهای فشار ضعیف در مقایسه با عرض آنها بسیار بیشتر می‌باشد، با تقریب می‌توان تصور نمود که شار حرارتی ایجاد شده ناشی از تلفات سیم‌پیچها فقط در جهت x و عمود بر ارتفاع سیم‌پیچها انتقال می‌یابد. بنابراین گرادیان دما در جهات y , z نسبت به مقدار آن در جهت x ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. شار حرارتی در جهت x از سیم‌پیچها توسط دو ضریب هدایت حرارتی متفاوت λ_x, λ_y منتقل می‌شود. λ_x ضریب هدایت حرارتی معادل در جهت عمود بر فویلها بوده و به صورت هدایت حرارتی معادل دو مسیر حرارتی سری که شامل هادی و عایق است تعریف می‌شود، یعنی:

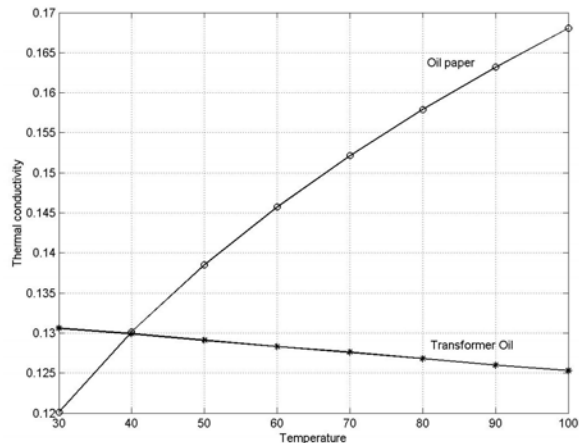
$$\lambda_x = \frac{(d_A + d_B)}{\left(\frac{d_A}{\lambda_A} + \frac{d_B}{\lambda_B}\right)} \quad (11)$$

در این رابطه d نشان دهنده ضخامت محیط مورد نظر می‌باشد. λ_y ضریب هدایت حرارتی معادل در جهت فویلها بوده و بصورت هدایت حرارتی معادل دو مسیر حرارتی موازی که شامل هادی و عایق است تعریف می‌گردد، یعنی:

۵-۱-۱- مدل حرارتی دو بعدی سیم‌پیچها

مشخصات حرارتی مواد هادی و عایق بکار رفته در ترانسفورمرها عموماً ثابت نبوده و تابعی از درجه حرارت است. بعنوان نمونه تغییرات ضریب هدایت حرارتی روغن و یک نوع کاغذ آغشته به روغن که به عنوان عایق بین سیم‌پیچها مورد استفاده قرار می‌گیرد در شکل ۳ نشان داده شده است.

مدلسازی حرارتی تک‌تک سیم‌پیچهای ترانسفورمرها در محیط المان محدود به خاطر بالا بودن تعداد دور سیم‌پیچها و متفاوت بودن مشخصات عایقی مواد به کار رفته در آنها مشکل و غالباً غیرممکن است. همچنین بخاطر متفاوت بودن نحوه سیم‌پیچی و ابعاد هادیهای بکار رفته در سیم‌پیچهای فشار قوی و فشار ضعیف، استفاده از یک مدل واحد بمنظور مطالعه حرارتی آنها ممکن نیست.



شکل ۳: تغییرات تغییرات ضریب هدایت حرارتی روغن و یک نوع کاغذ آغشته به روغن با درجه حرارت.

۵-۱-۱-۱- مدل حرارتی سیم‌پیچهای فشار قوی

درمورد سیم‌پیچهای فشار قوی به خاطر استفاده از سیم‌پیچهای نوع رشته‌ای و به علت متقارن بودن توزیع مواد هادی و عایقی استفاده شده در آنها رفتار کل سیم‌پیچها را می‌توان همانند یک جسم همگن با مشخصات حرارتی معادل که بصورت زیر تعریف می‌شود در نظر گرفت:

$$\lambda^{AB} = \frac{\lambda^A V^A + \lambda^B V^B}{V^A + V^B}$$

$$C^{AB} = \frac{C^A \rho^A V^A + C^B \rho^B V^B}{\rho^A V^A + \rho^B V^B} \quad (10)$$

$$\rho^{AB} = \frac{\rho^A V^A + \rho^B V^B}{V^A + V^B}$$

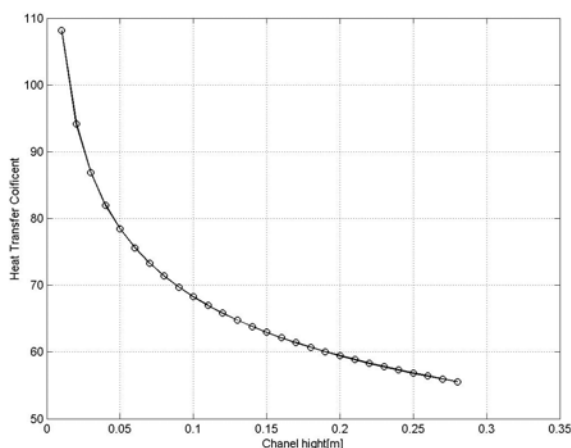
λ ضریب هدایت گرمائی ($W.m^{-1}.c^{-1}$)

همانطور که ملاحظه می‌شود حداکثر ضخامت لایه مرزی گرمائی در مقایسه با عرض کانال بین سیم‌پیچها که برابر ۴ میلی‌متر است بسیار کوچک می‌باشد. بر طبق نظریه Eckert، برای حالتی که ضخامت لایه مرزی سیال در بالاترین نقطه سیم‌پیچها در مقایسه با عرض کانال کوچک باشد جریان سیال داخل کانال آرام بوده و ضریب همرفت توسط رابطه تجربی زیر محاسبه می‌گردد:

$$h(y) = (Nu(y) \times \lambda) / y \quad (15)$$

$$Nu(y) = 0.6(Gr(y) \times Pr)^{0.2}$$

که در آن $Nu(y)$ ضریب بدون بُعد ناسلت است. مقدار تغییرات این ضریب نسبت به ارتفاع کانال در شکل ۵ آمده است.



شکل ۵: تغییرات ضریب همرفت نسبت به ارتفاع کانال.

۵-۳- توزیع حرارتی سیم‌پیچها

با استفاده از اطلاعات بدست آمده از آنالیز مغناطیسی در مورد تلفات سیم‌پیچها و نیز مدل حرارتی ارائه شده برای سیم‌پیچهای ترانسفورمر، مدل حرارتی ترانسفورمر مورد مطالعه در محیط المان محدود و در حالت ماندگار مورد بررسی قرار گرفت. شکلهای ۶ و ۷ توزیع درجه حرارت قسمتهای مختلف سیم‌پیچهای فشار قوی و ضعیف را به ازای بارگذاری عادی ترانسفورمر نشان می‌دهد.

بررسی نتایج شکلهای ۶ و ۷ حاکی از آن است که حداکثر درجه حرارت سیم پیچ فشار ضعیف برابر ۹۹/۲ درجه و برای سیم‌پیچ فشار قوی برابر ۸۷/۶ درجه است. همچنین با دقت در شکل ۷ ملاحظه می‌شود که درجه حرارت قسمت داخلی سیم‌پیچهای فشار ضعیف بعلاوه تمرکز شارهای نشتی و بالا بودن تلفات ادی سیم‌پیچها از درجه حرارت سایر قسمتهای سیم‌پیچ بالاتر است. همچنین شکلهای فوق نشان می‌دهند

$$\lambda_y = \frac{(\lambda_A d_A + \lambda_B d_B)}{(d_A + d_B)} \quad (12)$$

۵-۲- محاسبه شرط همرفت بر روی دیواره های سیم‌پیچ

مدل حرارتی ارائه شده برای ترانسفورمر تنها شامل سیم‌پیچهای فشار قوی و ضعیف است. برای حل مدل ارائه شده در محیط المان محدود نیازمند دانستن شرایط مرزی در مرزهای سیم‌پیچها هستیم. یکی از شرایط مرزی که معمولاً توسط روشهای محاسباتی قابل محاسبه می‌باشد، شرط مرزی ضریب همرفت بر روی دیواره های سیم‌پیچها می‌باشد.

مقدار این ضریب معمولاً ثابت نبوده و تابعی از ارتفاع، درجه حرارت سطح، مشخصات فیزیکی سیال اطراف سیم‌پیچها و هندسه سطح می‌باشد. در هر مکان y از ارتفاع سیم‌پیچها مکانی مثل $x = \delta(y)$ در شار وجود دارد که درجه حرارت آن ۰/۹۹ درجه حرارت سیال باشد. مکان هندسی چنین نقاطی لایه مرزی گرمائی نامیده می‌شود. طبق نظریه Eckert [۹] ضخامت این لایه در داخل یک سیال توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta(y) = 3.93.x.Pr^{-0.5} (0.952 + Pr)^{0.25} Gr^{-0.25} \quad (13)$$

که در آن، $\delta(y)$ ضخامت لایه مرزی، y ارتفاع سیم‌پیچ، Pr ضریب بدون بُعد پرائندالت و Gr ضریب بدون بُعد گراشهف می‌باشند. ضریب بدون بُعد گراشهف بصورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$Gr(y) = \frac{g \cdot \beta \cdot q_w \cdot y^4}{\lambda \cdot \nu^2} \quad (14)$$

g شتاب جاذبه ($m.s^{-2}$)

β ضریب انبساط حجمی ($^{\circ}C^{-1}$)

q_w شار حرارتی منتقل شده از سطح سیم‌پیچها ($W.m^{-2}$)

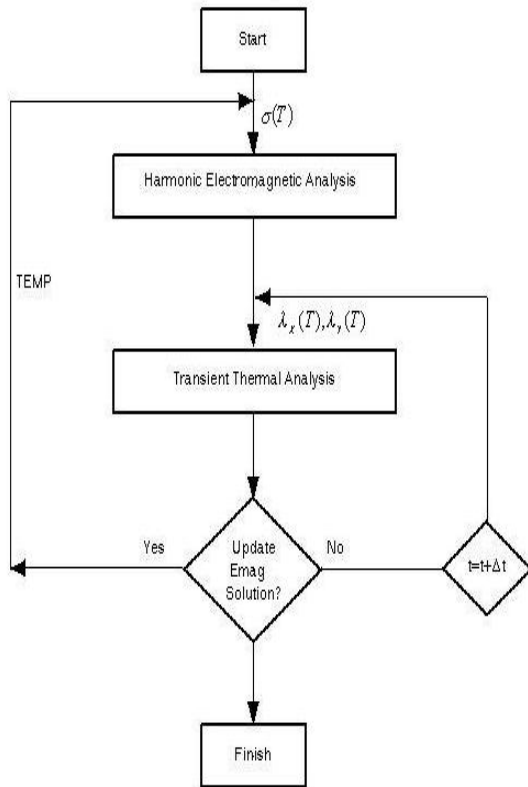
ν ویسکوزیته سیال ($m^2.s^{-1}$)

با توجه به روابط ۱۳ و ۱۴ و با فرض دانستن مشخصات حرارتی روغن [۹]، حداکثر ضخامت لایه مرزی گرما در حداکثر ارتفاع سیم‌پیچها و با فرض حداکثر میانگین درجه حرارت روغن داخل کانال برابر با ۱۰۰ درجه سانتیگراد به صورت زیر خواهد بود:

$$Gr|_{y=0.28} = 2.7 \times 10^{10}$$

$$\delta|_{y=0.28} = 1.06 \times 10^{-3} (m)$$

مشخصات غیرخطی و تابع حرارت مدل مغناطیسی، به مدل مغناطیسی اعمال می‌گردد. شکل ۸ الگوریتم انجام این تحلیل را نشان می‌دهد. تغییرات حداکثر درجه حرارت سیم‌پیچهای فشار قوی و فشار ضعیف بر حسب زمان نیز در شکل ۹ آمده است.

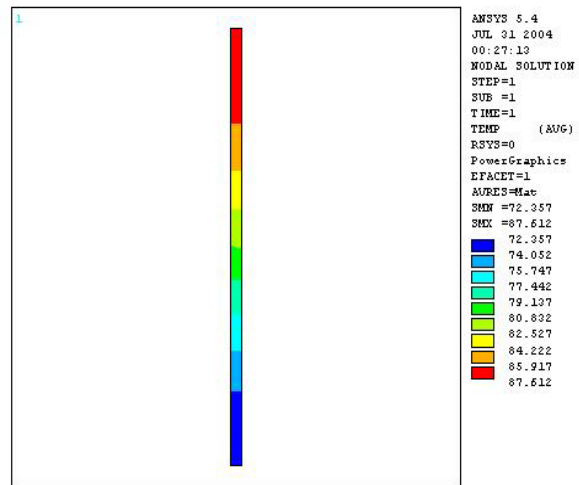


شکل ۸: الگوریتم استفاده شده برای کوپل میدانهای مغناطیسی حرارتی.

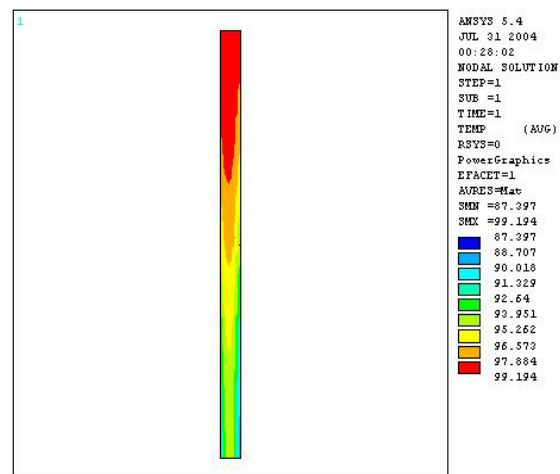
۶- نتیجه گیری

در این مقاله تحلیل ماندگار و گذرای مغناطیسی و حرارتی سیم‌پیچهای یک ترانسفورمر غوطه‌ور در روغن نمونه با استفاده از کوپل بین میدانهای مغناطیسی و حرارتی در یک محیط المان محدود انجام گرفت. یک مدل مغناطیسی به همراه مدل حرارتی سیم‌پیچها برای محاسبه گرمترین درجه حرارت و توزیع خطوط هم دما ارائه شده است. انتظار می‌رود مدل ارائه شده یک روش مناسب برای محاسبه مقدار درجه حرارت سیم‌پیچها به منظور پیشگویی حداکثر قابلیت بار گذاری ترانسفورمرها باشد.

که مکان حداکثر درجه حرارت سیم‌پیچها در قسمت بالائی آنها قرار گرفته است.



شکل ۶: توزیع حرارت در سیم‌پیچ فشار قوی.



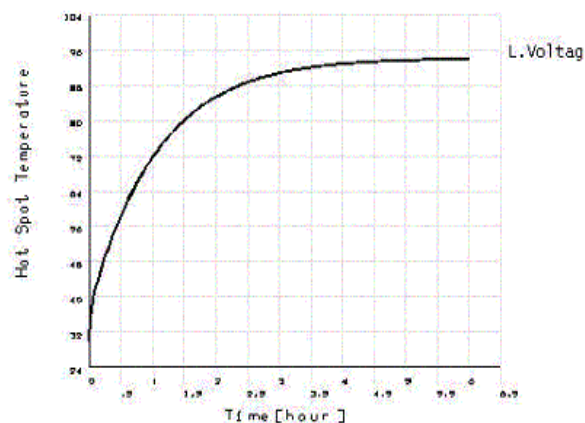
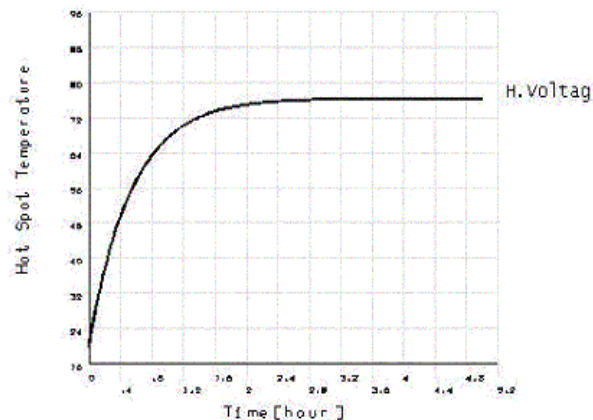
شکل ۷: توزیع حرارت در سیم‌پیچ فشار ضعیف.

۴-۵- کوپل میدانهای مغناطیسی و حرارتی به منظور تحلیل گذرای درجه حرارت سیم‌پیچها

بمنظور تحلیل گذرای درجه حرارت سیم‌پیچها، میدانهای مغناطیسی و حرارتی در محیط المان محدود کوپل شده و یک حل مغناطیسی-حرارتی بر پایه تکرار با بازه زمانی معلوم انجام گرفت. در این مدل به جای استفاده از آنالیز حرارتی ماندگار از آنالیز گذرا با پله های زمانی مشخص استفاده شده است. حرارت ایجاد شده از تحلیل مغناطیسی به عنوان ورودی برای تحلیل حرارتی اعمال می‌گردد. این حرارت در داخل مدل حرارتی و به ازای بازه زمانی بسیار کوتاه Δt توزیع شده، سپس درجه حرارت قسمت‌های مختلف مدل در انتهای این بازه زمانی به منظور یافتن

مراجع

- [1] K. Tekletsadik and M. Saravolac, "Calculation of Losses in Structural Parts of Transformer by FE Method", The Institution of Electrical Engineers, Printed and published by the IEE, London 1996, pp. 1-4.
- [2] D. Pavilk and R. S. Girgis, "Calculation and Reduction of Stray and Eddy Losses in Core-Form Transformer using a Highly Accurate Finite Element Modeling Technique", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, April 1993, pp. 239-245.
- [3] IEEE STD C57.91-1995, IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers, 1995.
- [4] IEEE c57.92.1981, American National Standard Guide for Loading Mineral-Oil Immersed Power Transformer, 1981.
- [5] K. Karsai, D. Kerényi and L. Kiss, Large Power Transformers, Elsevier Science Publishing Company, New York, 1987.
- [6] J. Driesen and G. Deliege, "Coupled Thermo-Magnetic Simulation of a Foil-Winding Transformer Connected to Non-Linear Load", IEEE Trans. on Magnetic, Vol. 36, No. 36, July 2000, pp.1381-1385.
- [7] G. Driesn and R.Belmans, "Methodologies for coupled Transient Electromagnetic-Thermal Finite Element Modeling of Electrical Energy Transducers", IEEE Trans. On Magnetic, Vol. 36, No. 36, July 2000, pp.681-686.
- [8] علی زراعت پرور، "تخمین تلفات متفرقه در ترانسفورمرها و نحوه کاهش آنها"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تبریز، آبان ۱۳۷۹.
- [9] M. Necati, Heat Transfer: A Basic Approach, McGraw-Hill, 1985.



شکل ۹: تغییر درجه حرارت نقطه داغ سیم پیچ ها نسبت به زمان به ازای بار ۱ pu ، الف) سیم پیچ فشار قوی، ب) سیم پیچ فشار ضعیف.