مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1397، دوره 18، شماره 03، ص‌ص 95-106

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی الکترومغناطیسی- مکانیکی- حرارتی ترانسفورماتورهسته آمورف و مقایسه با ترانسفورماتورهای معمولی با استفاده از روش اجزاء محدود

علی حیدری[1]، محمد علی تقی خانی[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی برق قدرت، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین
2- استادیار، مهندسی برق قدرت، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) - قزوین
*قزوین، صندوق پستی 34148-96818، taghikhani@eng.ikiu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 18آبان 1396
پذیرش: 22 دی 1396
ارائه در سایت: 02 اسفند 1396

کلید واژگان:
ترانسفورماتور هسته آمورف
ترانسفورماتور هسته سیلیکونی
تلفات بی‌باری و بارداری
تحلیل الکترومغناطیسی- مکانیکی- حرارتی
روش اجزاء محدود

چکیده

از آنجایی‌که یکی از مهم‌ترین و پرمصرف‌ترین تجهیزات شبکه برق ترانسفورماتورها می‌باشند، بررسی عوامل مؤثر بر کاهش تلفات این تجهیزات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. امروزه ترانسفورماتورهای هسته آمورف دارای جایگاه مهمی در بازار برق هستند چون در مقایسه با ترانسفورماتورهایی با هسته‌ای از جنس استیل کریستالی سیلیکون حدود 60 تا 70 درصد تلفات بی‌باری را کاهش می‌دهند. به منظور بهبود در طراحی و همچنین صرفه‌جویی در وقت و هزینه برای تولید ترانسفورماتورهای هسته آمورف تحلیل عددی حالت بی‌باری همانند حالت بارداری یکی از مهم‌ترین فاکتورها بوده که باید مورد توجه قرار گیرد. از طرفی دما نیز یکی از فاکتورهای مهم و تأثیرگذار در عمر ترانسفورماتور است، چون افزایش دمای ترانسفورماتور باعث کاهش عمر ترانسفورماتور می‌شود. در این مقاله یک نمونه ترانسفورماتور 100kVA به وسیله کوپل نرم‌افزارهای انسیس ماکسول و انسیس فلوئنت شبیه‌سازی شده، تلفات بی‌باری و بارداری مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهند که ترانسفورماتور هسته آمورف تلفات بی‌باری را در حدود 65 درصد در مقایسه با ترانسفورماتور هسته استیل کریستالی سیلیکون کاهش می‌دهد. همچنین تحلیل حرارتی انجام شده نشان می‌دهدکه ترانسفورماتور هسته آمورف در مقایسه با ترانسفورماتور هسته سیلیکون در شرایط بی‌باری دمای پایین‌تری دارد.

Electromagnetic-Mechanical-Thermal Amorphous Core Transformer Simulation Compare to Conventional Transformers using FEM

Ali Heidary, Mohammad Ali Taghikhani*

Department of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
*P.O.B. 34148-96818 Qazvin, Iran, taghikhani@eng.ikiu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 09 November 2017
Accepted 12 January 2018
Available Online 21 February 2018

Keywords:
Amorphous Core Transformer
Silicon Core Transformer
No-load and Load losses
Electromagnetic-Mechanical-Thermal Analysis
Finite Element Method(FEM)

ABSTRACT

Since transformers are one of the most important and most used equipment in power network, investigating the factors which affect the loss of these equipments is of particular importance. Nowadays Amorphous metal core transformers have a significant place in today power market, since they exhibit 60-70% lower no-load losses compared to the Silicon crystalline steel core transformers. In order to enhance the design and cost and also to shorten the time to produce Amorphous metal core transformers, numerical analysis of the no-load as well as load conditions are of paramount importance and hence should be considered. On the other hand, temperature is one of the important and effective factors in transformer life, because increasing the transformer temperature leads to reduction of its rated life. In this paper, a 100 kVA unit transformer has been simulated by coupling ANSYS Maxwell and ANSYS FLUENT softwares and no-load and load losses are investigated. The results show that amorphous core transformer compared to Silicon Crystalline Steel core transformer reduce no-load losses about 65 percent. Furthermore, thermal analysis shows amorphous core transformer has lower temperature compared to the Silicon core transformer in no-load conditions.

1- مقدمه

رشد و پیشرفت در زمینه صنعت برق نیاز به استفاده مفید از انرژی و تمامی زمینه‌های فنی آن دارد [1]. در یک سیستم قدرت متعارف تلفات به دو بخش تلفات انتقال و تلفات توزیع تقسیم می‌شود، که حدود 2 تا 3 درصد مربوط به تلفات خط و 5 تا 6 درصد مربوط به تلفات ترانسفورماتور است. تلفات ترانسفورماتور به دو مؤلفه تلفات بی‌باری و بارداری تقسیم شده که تلفات بی‌باری در حدود 2 تا 3 درصد تولید است. بنابراین امری مشهود است که کاهش این تلفات یکی از فاکتورهای مهم در ترانسفورماتورهای توزیع می‌باشد. ترانسفورماتورهای توزیع با توجه به طراحی، نحوه ساخت، کیفیت مواد اولیه مورد استفاده و نوع بهره برداری دارای تلفات متفاوتی هستند [2]. امروزه با پیشرفت تکنولوژی ساخت و تامین مواد اولیه مناسب می‌توان بیش از 70 درصد تلفات بی‌باری را کاهش داد. به کارگیری و استفاده بهینه از

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Heidary, M. A. Taghikhani, Electromagnetic-Mechanical-Thermal Amorphous Core Transformer Simulation Compare to Conventional Transformers using FEM, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 03, pp. 95-106, 2018 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.41.2]

ترانسفورماتورهای کم تلفات در شبکه‌های توزیع به‌جای احداث و توسعه نیروگاه، صرفه‌جویی قابل توجهی در سرمایه‌گذاری اولیه جهت احداث نیروگاه‌ها و توسعه شبکه های انتقال و توزیع و سوخت مصرفی ایجاد می‌کند. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که کاهش تلفات بی‌باری در ترانسفورماتور باعث کاهش هزینه در ساخت و نگهداری ترانسفورماتور می‌شود. یکی از بهترین راه‌حل‌ها برای کاهش تلفات بی‌باری استفاده از ترانسفورماتورهای هسته‌آمورف است [5-3]. در فرآیند طراحی ترانسفورماتورها یکی از موضوع‌های مهم پیش‌بینی دقیق مکان نقطه داغ در ترانسفورماتور و به ویژه در هسته و سیم‌پیچ‌ها است. میزان دما در این تجهیزات به طور مستقیم بر روی عمر ترانسفورماتور تأثیرگذار است [6]. مکان نقطه داغ در ترانسفورماتورهای مختلف، متفاوت بوده، اندازه‌گیری دمای داخل ترانسفورماتور و نزدیک به سیم‌پیچ‌ها به‌راحتی قابل انجام نیست و برای انجام این کار از تجهیزات مخصوصی مانند میله‌های فیبر نوری استفاده می‌کنند [7].

در مرجع [8]، به بررسی ویژگی‌ها و مشخصات آلیاژهای آمورف پرداخته شده، بطوریکه سه نوع مختلف از آلیاژهای پرکاربرد آمورف انتخاب شده، ویژگی‌ها، رفتارهای مکانیکی، مغناطیسی و استقامت حرارتی این ترکیبات بررسی شده و مقایسه‌ای بین آن‌ها انجام می‌شود. طراحان ترانسفورماتورها با موضوع های مهمی مثل ارزیابی تلفات، قابلیت اطمینان بالا، هزینه و وزن کم روبه‌رو می‌باشند. بنابراین مهندسان طراح به‌منظور طراحی بهینه و بهبود عملکرد ترانسفورماتورها نیاز به روش‌ها و ابزارهای پیشرفته دارند. در [9] محاسبات مربوط به تلفات و شارهای مغناطیسی یک نمونه ترانسفورماتور توزیع سه‌فاز که هسته آن از جنس فلز آمورف می‌باشد، مورد مطالعه قرار گرفته با استفاده از روش اجزاء محدود به‌صورت دوبعدی شبیه‌سازی شده، مشخصات مغناطیسی آن مورد تحلیل قرار گرفته است. مرجع [10]، یک نمونه ترانسفورماتور توزیع نوع خشک را که ظرفیت توان آن 1MVA می‌باشد مورد بررسی قرار داده است. در این مقاله ترانسفورماتور مذکور با استفاده از روش اجزاء محدود شبیه‌سازی شده، مشخصات و ویژگی‌های مغناطیسی آن مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله پارامترهای مهمی از جمله توزیع چگالی شار مغناطیسی، توزیع شار مغناطیسی، توزیع تلفات بی‌باری و بارداری هم به‌صورت گرافیکی نشان داده شده و هم به‌صورت عددی محاسبه شده است. مدل‌سازی حرارتی سیم‌پیچ‌های یک ترانسفورماتور32MVA روغنی با استفاده از معادله هدایت گرمائی و روابط ساده شده ترمودینامیک در [11] ارائه شده است. در این مقاله تغییرات درجه حرارت نقطه داغ ترانسفورماتور نسبت به تغییرات بار در حالت خنک‌سازی اجباری مورد ارزیابی قرار گرفته است. در [12] شبیه‌سازی دو بعدی الکترومغناطیسی-حرارتی یک ترانسفورماتور50kVA روغنی با خنک‌سازی طبیعی در محیط نرم‌افزار انسیس ارائه شده است. در تحلیل حرارتی، معادله هدایت – همرفت حرارتی به همراه شرایط مرزی ساده شده برای سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور و روغن به‌صورت گذرا حل شده است. در این مرجع فقط درجه حرارت سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور بدست آورده شده، تغییرات درجه حرارت نقطه داغ نسبت به تغییرات بار، مورد بررسی قرار گرفته است. در [13] هم، تحلیل‌های الکترومغناطیسی و حرارتی یک نمونه ترانسفورماتور خشک 630 kVAبررسی شده است. مدل‌سازی الکترومغناطیسی- حرارتی ساده شده دو بعدی یک ترانسفورماتور خشک 4.92MVA در [14] انجام شده است. در این مقاله خواص حرارتی سیال، هسته و سیم‌پیچ‌ها، ثابت در نظر گرفته شده، شرائط مرزی به‌صورت دو بعدی ساده شده(فرض شده)، از طرف دیگر جزئیات دقیق ترانسفورماتور مدل‌سازی نشده است. در مرجع [15] مدل‌سازی حرارتی- جریان سیال دوبعدی سیم‌پیچ‌های فشارقوی یک ترانسفورماتور روغنی دیسکی در محیط نرم‌افزار کامسول صورت گرفته است. در این شبیه‌سازی نیز تحلیل الکترومغناطیسی ترانسفورماتور صورت نگرفته بلکه چگالی تلفات حجمی به‌صورت ثابت روی سیم‌پیچ‌ها فرض در نظر گرفته شده است. همچنین از تحلیل حرارتی هسته صحبتی نشده، از شار پراکندگی و اثر جریان گردابی صرفنظر شده است. مدل‌سازی ترمودینامیکی- مغناطیسی یک ترانسفورماتور روغنی80MVA بصورت عددی در محیط نرم افزار ای اف کد و انسیس جهت تخمین درجه حرارت در [16] انجام شده است. در این مرجع جهت تحلیل مغناطیسی از یک مدل ساده شده دوبعدی استفاده گردیده، از نتایج آن جهت استخراج مقدار تلفات بصورت ثابت(مانند مرجع [15]) استفاده شده است. در قسمت تحلیل حرارتی نیز فقط سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور به‌صورت دو بعدی مدل‌سازی گردیده، از تحلیل حرارتی روغن داخل تانک و همچنین از تحلیل کوپل الکترومغناطیسی- مکانیکی- حرارتی خبری نیست.

اگرچه مقالات زیادی تحلیل الکترومغناطیسی - حرارتی ترانسفورماتورها را انجام داده‌اند، اما همان‌طور که در بخش قبلی ذکر شد خیلی از این مقالات و مراجع یا ترانسفورماتورهای خشک با هسته سیلیکونی را بررسی کرده‌اند و یا ترانسفورماتورهای روغنی را با جزئیات کامل مورد بررسی قرار نداده، تنها مدل ساده‌ای از ترانسفورماتور را در نظر می‌گیرند بدون اینکه صحبتی راجع به اثر درجه حرارت بر هسته داشته یا تأثیر جریان گردابی را بررسی نمایند. بنابراین در این مقاله به بررسی یک نمونه ترانسفورماتور توزیع روغنی با هسته‌ای از دو جنس مختلف سیلیکون و آمورف، بالحاظ کردن ساختار کلی و جزئیات ترانسفورماتور که شامل رادیاتورها، هسته، سیم‌پیچ‌ها، تانک روغن و ... می‌باشد، پرداخته شده است. همچنین در این مقاله پس از شبیه‌سازی الکترومغناطیسی ترانسفورماتور، به‌منظور تحلیل حرارتی ترانسفورماتور یک تحلیل عددی که شامل کوپل بین بخش حرارت، جریان سیال و بخش الکترومغناطیسی است، اعمال شده است. در این روش ساختار ترانسفورماتور که بخش ساکن(جامد) مسأله می‌باشد بطور همزمان با قسمت سیال(روغن) مسأله مورد تحلیل حرارتی قرار می‌گیرد. این موضوع در قسمت‌های بعدی مقاله تشریح خواهد گردید.

2- بررسی ویژگی‌های فلز آمورف در مقایسه با استیل کریستالی سیلیکون

در دهه 1970 گرایش به ترانسفورماتورهای هسته آمورف افزایش پیدا کرد. در آن زمان بازده انرژی در سیستم‌های توزیع برق به‌صورت قابل قبولی در حال افزایش بود [17]. در اواسط دهه 90 میلادی این گرایش به دلیل کاهش هزینه انرژی افت پیدا کرد چون هزینه‌های داخلی ترانسفورماتور هسته آمورف بیشتر از ترانسفورماتور هسته استیل کریستالی سیلیکون است(فلز آمورف خیلی گران‌تر از استیل کریستالی سیلیکون است و از طرفی حد اشباع چگالی شار مغناطیسی فلز آمورف کمتر از استیل کریستالی سیلیکون می‌باشد که این موضوع باعث افزایش حجم ترانسفورماتور هسته آمورف شده در نتیجه افزایش هزینه را در پی خواهد داشت). به هر حال این هزینه‌ها در طول عملکرد ترانسفورماتور و با توجه به افزایش بازدهی قابل جبران خواهند بود. این روزها ترانسفورماتورهای هسته آمورف به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند و از نظر هزینه نیز با دیگر ترانسفورماتورها در حال رقابت هستند [4,5,18]. فلز آمورف به‌وسیله انجمادسازی سریع فاز مایع آلیاژ

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.41.2]

آهن-سیلیسیم-بور تهیه می‌شود که برخلاف استیل کریستالی سیلیکون داری ساختار اتمی نامنظم است [8,17,19]. نبود این نظم در ساختار اتمی فلز آمورف باعث کاهش تلفات هسته برخلاف استیل سیلیکون شده، همینطورحلقه هیسترزیس فلز آمورف در مقایسه با استیل کریستالی سیلیکون کوچک‌تر می‌باشد(همان‌طور که میدانیم تلفات هسته ترانسفورماتور به دو بخش تلفات هیسترزیس وتلفات جریان گردابی تقسیم شده، اندازه تلفات هیسترزیس توسط ناحیه‌ای که حلقه هیسترزیس در نمودار B-H در برمی‌گیرد تعیین می‌گردد). تلفات جریان گردابی در هسته با افزایش مقاومت الکتریکی آلیاژ فلز آمورف کاهش پیدا می‌کند. با توجه به ساختار اتمی نامنظم فلز آمورف و مواد حل شده زیاد در این فلز مسیر حرکت الکترون‌ها محدود است (این در مورد استیل سیلیکون صادق نیست) که این موضوع موجب افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود. از طرفی ضخامت خیلی کم ورقه‌های آلیاژ فلز آمورف در مقایسه با ورقه‌های استیل سیلیکون نیز منجر به افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود. در نتیجه، بالا بودن مقاومت الکتریکی باعث کمینه شدن تلفات جریان گردابی در هسته می‌گردد. بعلاوه با توجه به ساختار اتمی فلز آمورف ازآنجایی‌که حد اشباع چگالی شار مغناطیسی فلز آمورف پایین است این موضوع باعث می‌شود برای تنظیم چگالی شار مغناطیسی در هسته، لایه‌های هسته را افزایش دهند که منجر به افزایش حجم ترانسفورماتور شده درنتیجه هزینه داخلی ساخت هر واحد ترانسفورماتور افزایش پیدا می‌کند.

3-تلفات بی باری و بارداری درترانسفورماتور

موضوعی که در روند طراحی ترانسفورماتورها به شدت مورد توجه قرار می‌گیرد، کمینه کردن تلفات است که این تلفات به دو بخش تلفات بی‌باری و بارداری تقسیم می‌شود. تلفات بی‌باری که به تلفات هسته یا تلفات آهنی نیز معروف است، مقدار توان فعالی است که در طی فرآیند مغناطیس شوندگی (برق‌دار کردن) هسته ترانسفورماتور هدر می‌رود [20]. چون اکثر ترانسفورماتورهای توزیع، همیشه در حال مغناطیس شدن هستند، تلفات بی‌باری در تمام زمان‌ها وجود دارد، چه زمانی که بار به ترانسفورماتور متصل است و چه زمانی که بار به ترانسفورماتور متصل نیست. هنگامی که بخشی از بار به ترانسفورماتور متصل است، زمانی است که تلفات بی‌باری بیشترین نسبت تلفات را شامل می‌شود. در مقالات متعددی تلفات بی‌باری ترانسفورماتور های توزیع هسته آمورف در مقایسه با تلفات بی‌باری ترانسفورماتورهای استیل سیلیکونی مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد [5,17,20,21]. بطور معمول وقتی ترانسفورماتورهای توزیع در گستره 30 تا 40 درصد بیشینه مقدار بار عمل می‌کنند تلفات بی‌باری بر تلفات بارداری چیره است اما از این گستره به بالا تلفات بارداری به شدت افزایش پیدا می‌کند. در این مقاله برای مدل‌سازی حالت بی‌باری، به سیم‌پیچ‌های فشارقوی(سیم‌پیچ‌های اولیه) ولتاژ نامی اعمال می‌شود، درحالی‌که سیم‌پیچ‌های فشار ضعیف (ثانویه) باز هستند. در این حالت جریان منتجه در سیم‌پیچ‌های اولیه فقط درصدی از جریان نامی است. بنابراین هیچ تلفات دیگری (در سیم‌پیچ‌ها یا دیگر بخش‌ها) بر روی تلفات بی‌باری تأثیرگذار نیست. تلفات بارداری مربوط به توانی است که ترانسفورماتور هنگامی که سیم‌پیچ‌های ثانویه اتصال کوتاه شده‌اند از منبع می‌کشد که در این حالت باید ولتاژی که بر روی اولیه قرار دارد کاهش پیدا کرده جریان‌ها به مقدار نامی خود برسند.

4-مدل ریاضی

همانگونه که اشاره شد تلفات هسته در ترانسفورماتور به دو بخش تلفات هیسترزیس و تلفات جریان گردابی تقسیم می‌شود. تلفات هیسترزیس تلفاتی است که در صورت برقدار شدن ترانسفورماتور (با یک ولتاژ و جریان متناوب در فرکانس شبکه قدرت) بدلیل مغناطیسی شدن و یا مغناطیس‌زدا شدن هسته (با توجه به نوع جنس هسته) ایجاد میگردد. اندازه این تلفات متناسب با مساحت حلقه ای بنام حلقه هیسترزیس در نمودار B-H می باشد. تلفات جریان گردابی بخاطر وجود مقاومت الکتریکی هسته در اثر القاء(قانون فارادی) بوسیله شار مغناطیسی متغیر با زمان در هسته ایجاد می‌شود. البته تلفات جریان گردابی در سیم پیچها علی الخصوص سیم پیچ فشار ضعیف(به غیر از تلفات اهمی) نیز وجود دارد. توزیع این تلفات (یا جریان) چه روی هسته و چه روی سیم پیچها یکنواخت نیست. بعنوان مثال چگالی جریان گردابی روی سطح سیم پیچها نسبت به عمق(داخل سیم پیچها) بیشتر است. برای اینکه بتوان توزیع درجه حرارت در ترانسفورماتور را بدست آورد، باید علت اصلی پدید آمدن گرما را که همانا چگالی جریان الکتریکی می‌باشد در نقاط مختلف آن در دست داشت. برای داشتن چگالی جریان الکتریکی، بایستی شدت میدان الکتریکی را با استفاده از تحلیل الکترومغناطیسی معادلات ماکسول (قوانین آمپر و فارادی) در نقاط مختلف ترانسفورماتور بدست آورد. با دانستن مقدار ولتاژ و مقدار مقاومت سیم‌پیچ‌ها در ترانسفورماتور و با حل معادلات ماکسول، شدت میدان الکتریکی بدست آمده، از روی آن چگالی جریان الکتریکی محاسبه شده به‌عنوان منبع گرمایی در معادله انرژی(مربوط به قسمت ساکن یعنی ترانسفورماتور) از آن استفاده می‌شود. قسمت اصلی تلفات بی‌باری ترانسفورماتور به هسته و کیفیت آن بستگی مستقیم دارد. بنابراین به‌منظور محاسبه تلفات هسته، مقدار چگالی شار در هر المان از هسته از تحلیل میدان مغناطیسی بدست آورده می‌شود. از روی مدل‌سازی سیم‌پیچ‌ها تلفات بارداری که شامل تلفات مسی و تلفات جریان گردابی است بدست می‌آید. تلفات جریان گردابی نیز به مقدار شار نشتی وابسته است. قوانین آمپر و فارادی حاکم بر ترانسفورماتور برحسب پتانسیل برداری مغناطیسی در سه بعد که در واقع همان اثر القائی جریان الکتریکی را مطرح می کنند عبارتند از:

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu}\vec{\nabla} \times \vec{A}\right) = \vec{J} \qquad (1)$$

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} + \vec{J_s} = \sigma\left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\nabla}V\right) + \vec{J_s} \qquad (2)$$

که در آن A پتانسیل برداری مغناطیسی(Tm)، V پتانسیل اسکالر الکتریکی(V)، E شدت میدان الکتریکی(Vm^{-1})، J چگالی جریان الکتریکی(Am^{-2})، σ ضریب هدایت الکتریکی ($\Omega^{-1}m^{-1}$) و μ قابلیت نفوذپذیری مغناطیسی(TmA^{-1}) می‌باشند. با در نظرگیری شرط کولمب برای واگرائی و فرض شرایط خطی خواهیم داشت:

$$-\frac{1}{\mu}\nabla^2\vec{A} + \sigma\left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{\nabla}V\right) = \vec{J_s} \qquad (3)$$

با حل معادله (3) برای A مقدار E با استفاده از رابطه (2) در هر نقطه از ترانسفورماتور قابل محاسبه خواهد بود. برای تحلیل حرارتی ترانسفورماتور بایستی مقدار تلفات بدست آمده (بر حسب E) از تحلیل الکترومغناطیسی در معادله حرارتی ترانسفورماتور قرار داده شود:

$$k_s\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \sigma\left|\vec{E}\right|^2 = 0 \qquad (4)$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.41.2]

این معادله بایستی به همراه دسته معادلات ناویه-استوکس[1] و انرژی(مربوط به سیال داخل ترانسفورماتور یعنی روغن) بصورت عددی با استفاده از روش اجزاء محدود یا روش حجم محدود حل گردند. این نوع روش تحلیل به نام تحلیل انتقال حرارت مزدوج[2] معروف می‌باشد. معادلات ناویه-استوکس شامل دسته معادلات اندازه حرکت و معادله پیوستگی سیال می‌باشند. شکل این دسته معادلات به همراه معادله گرما برای یک سیال تراکم‌ناپذیر یا بطور تقریبی تراکم‌ناپذیر(مثل روغن ترانسفورماتور) بدین گونه مطرح می‌شوند:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x}+\frac{\partial V_y}{\partial y}+\frac{\partial V_z}{\partial z}=0 \quad (5)$$

$$\eta\left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2}\right)-\rho\left(V_x\frac{\partial V_x}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_x}{\partial y}+V_z\frac{\partial V_x}{\partial z}\right)-\frac{\partial P}{\partial x}=0 \quad (6)$$

$$\eta\left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2}\right)-\rho\left(V_x\frac{\partial V_y}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_y}{\partial y}+V_z\frac{\partial V_y}{\partial z}\right)-\frac{\partial P}{\partial y}=0 \quad (7)$$

$$\eta\left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2}\right)-\rho\left(V_x\frac{\partial V_z}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_z}{\partial y}+V_z\frac{\partial V_z}{\partial z}\right)-\frac{\partial P}{\partial z}=0 \quad (8)$$

$$k_f\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)-\rho C_p\left(V_x\frac{\partial T}{\partial x}+V_y\frac{\partial T}{\partial y}+V_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)=0 \quad (9)$$

که در آنها:

V_x: سرعت سیال در جهت x (ms^{-1})

V_y: سرعت سیال در جهت y (ms^{-1})

V_z: سرعت سیال در جهت z (ms^{-1})

P : فشار داخل سیال ($kgm^{-1}s^{-2}$)

T: درجه حرارت (K)

η : لزجت سیال ($kgm^{-1}s^{-1}$)

ρ : چگالی سیال(kgm^{-3})

C_p : ظرفیت گرمائی ویژه سیال ($Jkg^{-1}K^{-1}$)

k_f : هدایت گرمائی سیال ($Wm^{-1}K^{-1}$)

k_s : هدایت گرمائی قسمت‌های ساکن ($Wm^{-1}K^{-1}$)

5- شبیه‌سازی وتحلیل الکترومغناطیسی ترانسفورماتور 100kVA

اطلاعات طراحی برای ترانسفورماتور مورد نظر در جدول1 آورده شده است. شبیه‌سازی آزمایش‌های بی‌باری و بارداری در این مقاله با استفاده از روش اجزاء محدود سه‌بعدی و با حل کننده گذر[3] در محیط نرم‌افزار انسیس-ماکسول[4] انجام شده است. در مورد استیل مغناطیسی در فرکانس‌های صنعتی عمق نفوذپذیری 2 میلیمتر مقدار متعارفی است. از این رو با استفاده از افزایش حجم مش‌بندی می‌توان به جواب مطلوب رسید. برای تعیین شرائط مرزی تحلیل الکترومغناطیسی، پتانسیل برداری مغناطیسی A در فاصله ای از هر طرف از ترانسفورماتور برابر با صفر در نظر گرفته میشود (شکل "1").

5-1- بی‌باری (مدارباز)

این آزمایش با درنظر گرفتن منحنی‌های غیرخطی B-H و منحنی‌های غیرخطی P-B (تلفات برحسب چگالی شار) که توسط تولید کننده تهیه شده، همچنین شرایط بی‌باری ترانسفورماتور انجام می‌شود. در جدول2 مقادیر مهم چگالی شار مغناطیسی آورده شده است.

در شکل‌های"2" تا "5" چگونگی توزیع چگالی شار مغناطیسی در هسته نشان داده شده است. بیشینه مقدار چگالی شار مغناطیسی را که از این شبیه‌سازی به دست آمده می‌توان در گوشه های داخلی هسته مشاهده کرد (محل اتصال ستون به یوغ). توزیع چگالی شار بطور واضح اثرات غیرخطی در نظر گرفتن ماده را نشان می‌دهد (شار مسیر کوتاه‌تر را انتخاب می‌کند)، در نتیجه تراکم شدیدی در گوشه‌های پنجره هسته مشاهده شده، که هسته را به سمت اشباع هدایت می‌کند. این موضوع با دقت در شکل‌های "3" و "5" که گوشه سمت چپ قسمت پایین هسته را نشان می‌دهد قابل توجه است.

با مقایسه شکل‌های "6" و "7" مشاهده می‌گردد که با به کارگیری فلز آمورف در هسته ترانسفورماتور، تلفات بی‌باری حدود 65 درصد کاهش می‌یابد.

در جدول 3 مقادیر مربوط به تلفات بی‌باری آورده شده است.

5-2- بار کامل (اتصال کوتاه)

شبیه‌سازی بعدی، محاسبه تلفات اهمی و گردابی مربوط به سیم‌پیچ‌ها در ترانسفورماتور می‌باشد. شکل‌های "8" و "9" توزیع چگالی شار در هسته در شرایط بار کامل برای دو حالت هسته آمورف و هسته استیل کریستالی

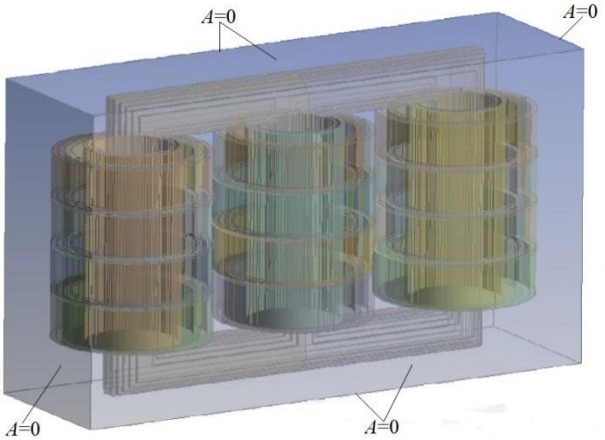


Fig. 1 Transformer electromagnetic boundary conditions

شکل 1 شرائط مرزی الکترومغناطیسی ترانسفورماتور

جدول 1 اطلاعات مربوط به طراحی ترانسفورماتور 100kVA

Table 1 100kVA Transformer design information

توان نامی	100(kVA)
فرکانس	60(Hz)
ولتاژ نامی سیم‌پیچ اولیه	11(kV)
ولتاژ نامی سیم‌پیچ ثانویه	400(V)
جریان نامی سیم‌پیچ اولیه	3.03(A)
جریان نامی سیم‌پیچ ثانویه	34.133(A)
نوع اتصال	Dyn11

جدول 2 مقادیر مهم چگالی شار مغناطیسی در شرایط بی‌باری

Table 2 Important values of magnetic flux density in no-load condition

	استیل سیلیکون	فلز آمورف
چگالی شار بیشینه	1.81	1.56
چگالی شار در ستون‌ها	1.4	1.1

[1]Navier–Stokes Equations
[2]Conjugate Heat Transfer
[3]Transient
[4]ANSYS Maxwell

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.41.2]

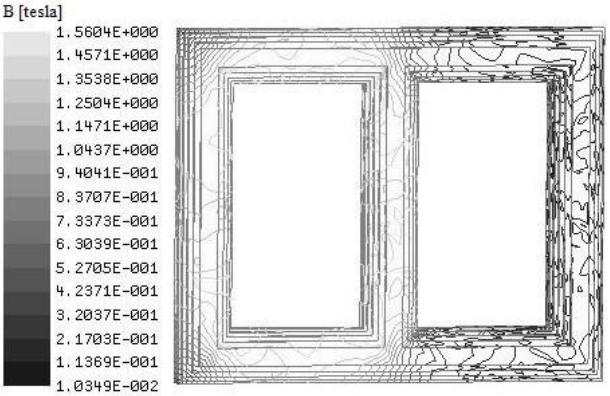


Fig. 2 Distribution of magnetic flux density at the amorphous core in no-load conditions

شکل 2 توزیع چگالی شار مغناطیسی در هسته آمورف در شرائط بی‌باری

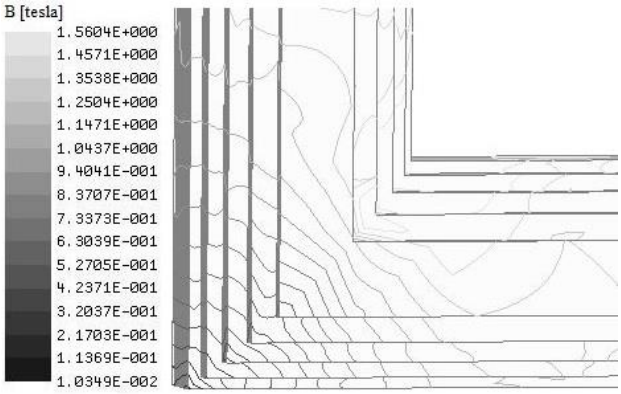


Fig. 3 Distribution of magnetic flux density in the lower left corner of the bottom of amorphous core in no-load conditions

شکل 3 توزیع چگالی شار مغناطیسی در گوشه سمت چپ قسمت پایین هسته آمورف در شرایط بی‌باری

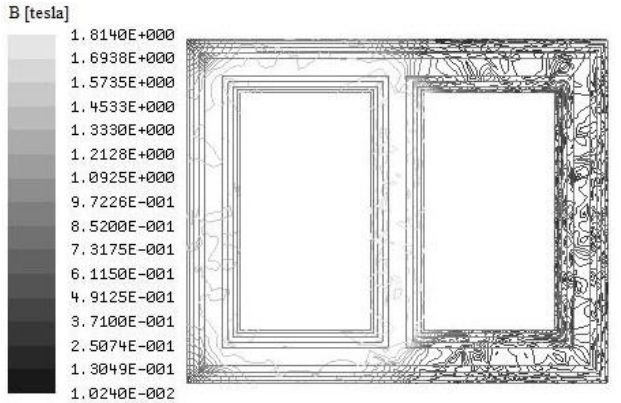


Fig. 4 Distribution of magnetic flux density at the silicon core in no-load conditions

شکل 4 توزیع چگالی شار مغناطیسی در هسته سیلیکونی در شرائط بی‌باری

جدول 3 تلفات هسته در شرایط بی‌باری

Table 3 Core losses in no-load conditions

	بیشینه مقدار تلفات هسته (W)	درصد کاهش تلفات هسته
ترانسفورماتور هسته سیلیکونی	249.26	66.23
ترانسفورماتور هسته آمورف	84.18	

از طرفی شکل‌های "10" و "11" تلفات هسته در شرایط بار کامل را نشان می‌دهند. با دقت در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که در این شرایط ترانسفورماتور هسته آمورف نه تنها بیشینه تلفات هسته را کاهش نمی‌دهد، سیلیکون را نشان می‌دهند.

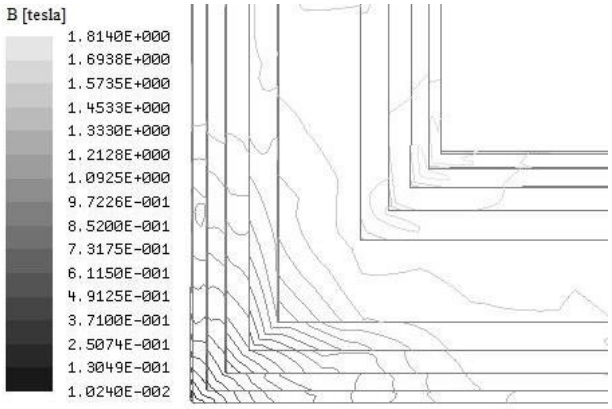


Fig. 5 Distribution of magnetic flux density in the lower left corner of the bottom of silicon core in no-load conditions

شکل 5 توزیع چگالی شار مغناطیسی در گوشه سمت چپ قسمت پایین هسته سیلیکونی در شرایط بی‌باری

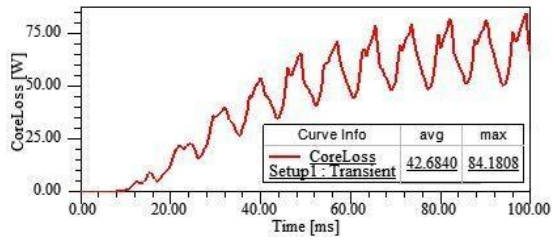


Fig. 6 Core loss versus time for amorphous core in no-load conditions

شکل 6 منحنی تلفات هسته برحسب زمان برای هسته آمورف در شرایط بی‌باری

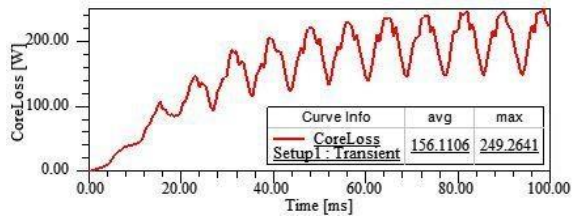


Fig. 7 Core loss versus time for silicon core in no-load conditions

شکل 7 منحنی تلفات هسته برحسب زمان برای هسته سیلیکونی در شرایط بی‌باری

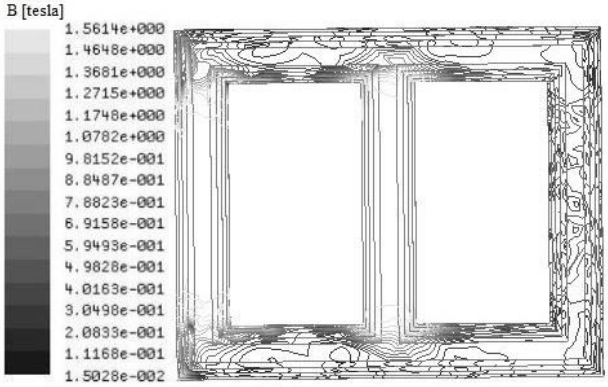


Fig. 8 Distribution of magnetic flux density at the amorphous core in full load conditions

شکل 8 توزیع چگالی شار مغناطیسی در هسته آمورف در شرایط بار کامل

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.41.2]

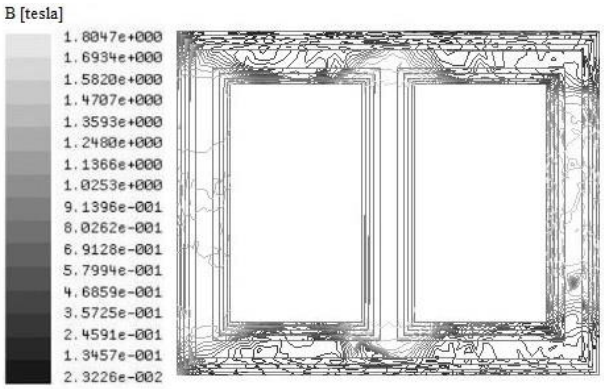


Fig. 9 Distribution of magnetic flux density at the silicon core in full load conditions

شکل 9 توزیع چگالی شار مغناطیسی در هسته سیلیکونی در شرایط بار کامل

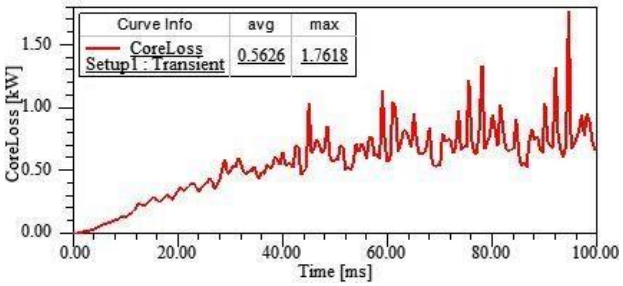


Fig. 10 Core loss versus time for amorphous core in full load conditions

شکل 10 منحنی تلفات هسته برحسب زمان برای هسته آمورف در شرایط بار کامل

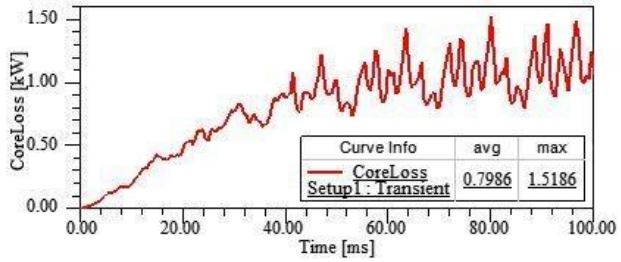


Fig. 11 Core loss versus time for silicon core in full load conditions

شکل 11 منحنی تلفات هسته برحسب زمان برای هسته سیلیکونی در شرایط بار کامل

جدول 4 تلفات هسته در شرایط بارداری

Table 4 Core loss in full load conditions

	بیشینه مقدار تلفات هسته (kW)	درصد افزایش تلفات هسته
ترانسفورماتور هسته سیلیکونی	1.5186	16.08
ترانسفورماتور هسته آمورف	1.7618	

بلکه افزایش تلفات هسته را به دنبال دارد. اما در صورتیکه کاهش متوسط تلفات مد نظر باشد ترانسفورماتور هسته آمورف نسبت به ترانسفورماتور هسته سیلیکونی برتری دارد

در جدول 4 مقادیر مربوط به تلفات بارکامل آورده شده است.

6- پیوندتحلیل الکترومغناطیسی- حرارتی-جریان سیال

برای انجام تحلیل حرارتی ترانسفورماتور از نرم افزار انسیس- فلوئنت[1] استفاده می‌شود. در این مرحله از شبیه‌سازی برای انتقال اطلاعات و نتایج الکترومغناطیسی از نرم افزار ماکسول به نرم‌افزار انسیس بایستی کوپل بین دو نرم‌افزار برقرار گردد.

6-1- هندسه و مش‌بندی ترانسفورماتور

برای تحلیل فرآیندهای حرارتی و جریان سیال که در داخل ترانسفورماتور رخ می‌دهد نه تنها به مدل کردن هندسه ترانسفورماتور نیاز است بلکه باید تانک روغن و رادیاتورها نیز مدل‌سازی شوند. از آن‌جا که مدل‌سازی هندسه ترانسفورماتور و تجهیزات آن مانند هسته، سیم‌پیچ‌ها و تانک روغن پیچیده است و نیاز به زمان زیادی دارد، این کار توسط نرم‌افزار ماکسول انجام می‌شود و با برقراری کوپل بین دو نرم‌افزار هندسه ترانسفورماتور و تجهیزات دیگر به نرم‌افزار انسیس منتقل می‌شود. به طور کلی یک ترانسفورماتور 100kVA ابعادی به بزرگی 0.905 متر، 0.335 متر و 0.835 متر دارد، که در شکل‌های "12" و "13" مشاهده می‌شود. رادیاتورها و تانک روغن ترانسفورماتور بصورت طبیعی توسط هوای اطراف خنک می‌شوند.

مش‌بندی مناسب ترانسفورماتور که دارای یک هندسه پیچیده است باید دارای تعداد زیادی جزء و گره باشد. در تحلیل مورد نظر برای انجام محاسبه دقیق و دست‌یابی به جواب معقول و دقیق تعداد اجزاء(المان‌ها)3073784 و تعداد گره‌ها 663164 در نظر گرفته شده که در شکل"14" نشان داده شده است.

6-2- خواص مواد به کارگرفته شده وشرایط مرزی

یکی از مهم‌ترین مواردی که باید در شبیه‌سازی مورد توجه قرار گیرد، دقت

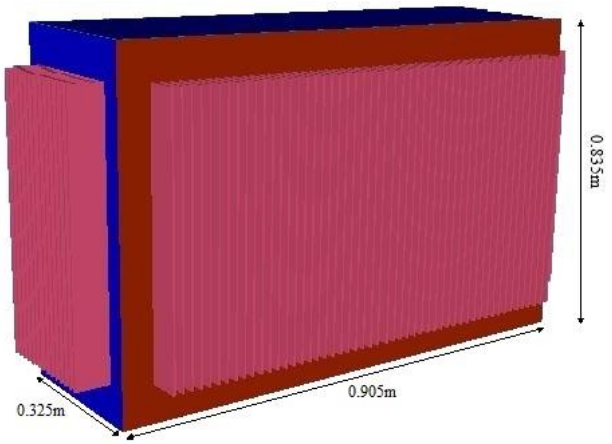


Fig. 12 Transformer oil tank

شکل 12 تانک روغن ترانسفورماتور

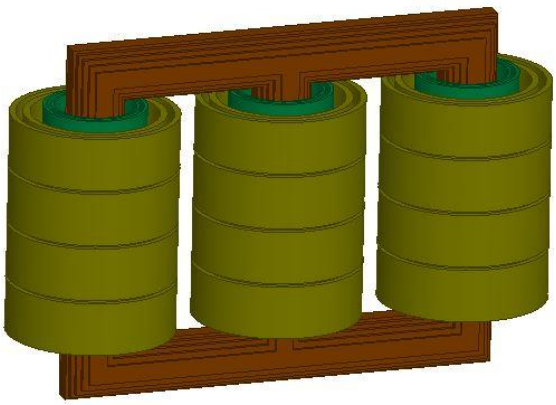


Fig. 13 100kVATransformer

شکل 13 ترانسفورماتور 100kVA

[1]Fluent

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.41.2]

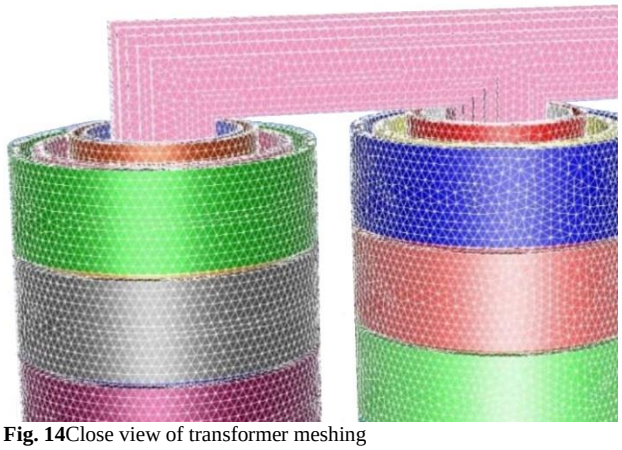


Fig. 14 Close view of transformer meshing

شکل 14 نمایی نزدیک از مش‌بندی ترانسفورماتور

در مدل‌سازی خواص مواد بکار گرفته شده است. در جدول5 ویژگی‌های فلزات مورد استفاده در شبیه‌سازی آورده شده است. دمای محیط اطراف ترانسفورماتور 300 درجه کلوین یا 26.85 درجه سانتیگراد درنظر گرفته شده است. در تحلیل حرارتی حاضر اثر تغییرات چگالی تلفات مسی بخاطر تغییرات دما نیز در نظر گرفته شده،Q(Wm^{-3})چگالی تلفات وα_c(K^{-1})ضریب انبساط حرارتی[1] مس می‌باشند.

$$Q = Q_0(1 + \alpha_c \Delta T) \quad (10)$$

همان‌طور که قبلا اشاره شد، برای خنک کردن ترانسفورماتور از روغن ترانسفورماتور استفاده می‌کنیم. چگالی(ρ)، ضریب هدایت گرمائی(k)، گرمای ویژه(C_p) و لزجت(η)روغن غیرخطی بوده و تابعی از درجه حرارت می‌باشند.

$$\eta = a_1 \exp(\frac{a_2}{T + 273}) \quad (11)$$
$$C_p = a_3 + a_4 T \quad (12)$$
$$\rho = a_5 + a_6 T \quad (13)$$
$$k = a_7 + a_8 T \quad (14)$$
$$\beta = a_9 \quad (15)$$

مقادیر ثابت در جدول 6 آمده است.

تقریباً در همه نوع روغن ترانسفورماتور، تغییرات لزجت با درجه حرارت خیلی بیشتر از تغییرات سایر خواص روغن با درجه حرارت میباشد. بنابراین

جدول 5 خواص فلزات مورد استفاده در ترانسفورماتور[8]

Table 5 Properties of metals used in transformer [8]

	ظرفیت گرمایی ویژه	رسانایی گرمایی
مس	381	387.6
آلومینیوم	871	202.4
استیل کریستالی سیلیکون	711	84
آمورف	640	65

جدول 6 ثابت‌های روغن ترانسفورماتور[22]

Table 6 Transformer oil constants [22]

ثابت	روغن ترانسفورماتور
a_1	0.0000013537
a_2	2797.3
a_3	1960
a_4	4.005
a_5	887
a_6	-0.659
a_7	0.124
a_8	-0.0001525
a_9	0.00086

[1] Thermal Expansion Coefficient

میتوان همه خواص بغیر از لزجت را ثابت فرض نمود. جنس هسته ترانسفورماتور از دو فلز آمورف و استیل کریستالی سیلیکون، جنس سیم‌پیچ-ها از فلز مس و جنس تانک ترانسفورماتور و رادیاتور آن از فلز آلومینیوم است. در چنین تحلیل‌هایی که فرآیند هدایت و همرفت حرارت وجود دارد باید شرایط مرزی مناسبی درنظر گرفته شود. بنابراین ضریب انتقال حرارت[2] دیواره‌های تانک روغن در شرایط بی‌باری(مدارباز) و بار کامل(اتصال کوتاه) باید اعمال شوند.در جدول 7 ضریب انتقال حرارت دیواره‌های تانک روغن در شرایط بی‌باری(مدارباز) و بار کامل(اتصال کوتاه) آورده شده است. در طی محاسبه ضریب انتقال حرارت دیواره‌های تانک میانگین دمای هوای اتاق درنظر گرفته شده است. شکل "15" شرائط مرزی روی تانک روغن ترانسفورماتور را نشان میدهد. روی دیواره های تانک بردار سرعت برابر صفر فرض میشود. از طرفی ضریب انتقال حرارت برای هر یک از دیواره‌های تانک روغن نیز مطابق جدول 7 اعمال میگردد.

6-3- نتایج شبیه‌سازی درشرایط بی‌باری (مدار باز) وبار کامل (اتصال کوتاه)

از آن‌جا که تلفات ترانسفورماتور بطور مستقیم روی درجه حرارت ترانسفورماتور تاثیر دارد، در شکل‌های "16" تا "19" مشاهده می‌شود که در شرایط بی‌باری(مدار باز) درجه حرارت ترانسفورماتور هسته استیل کریستالی سیلیکون از ترانسفورماتوری که هسته آن از جنس فلز آمورف است، بیشتر است، چون در تحلیل مغناطیسی نشان داده شد که در شرایط بی‌باری، ترانسفورماتور هسته آمورف تلفات را تا حدود 65 درصد کاهش می‌دهد. همان‌طور که در تحلیل مغناطیسی گفته شد در شرایط بار کامل در ترانسفورماتور هسته آمورف نه تنها تلفات کاهش پیدا نمی‌کند بلکه افزایش تلفات را به دنبال دارد که این افزایش تلفات در افزایش درجه حرارت نیز تاثیر خود را نشان می‌دهد. در شکل‌های "20" تا "23" توزیع دما مربوط به

جدول 7 ضریب انتقال حرارت($W.m^{-2}.K^{-1}$) دیواره‌های تانک در شرایط بی‌باری و بار کامل [13]

Table 7 Heat transfer coefficient of tank walls in no-load and full load conditions [13]

	شرایط اتصال کوتاه	شرایط مدار باز
دیواره بالایی تانک	5.5	4.8
دیواره پایینی تانک	3.7	3.4
دیواره های طرفین تانک	4.4	3.8

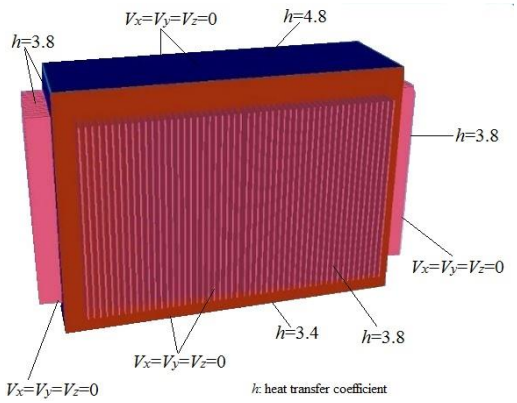


Fig. 15 Transformer no-load mechanical boundary conditions

شکل 15 شرائط مرزی مکانیکی ترانسفورماتور در بی‌باری

[2]Heat Transfer Coefficient(HTC)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.41.2]

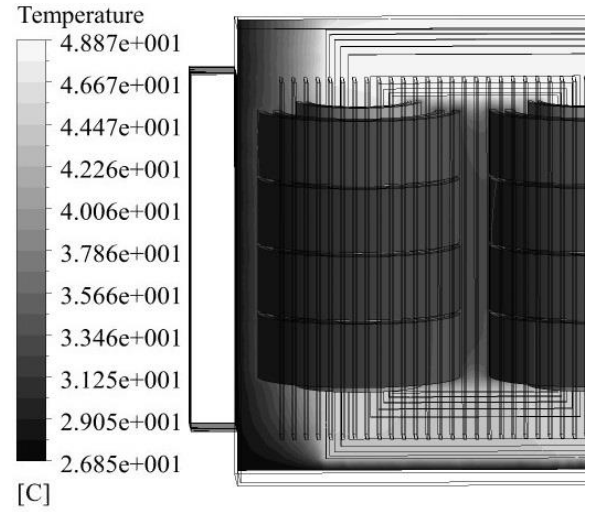


Fig. 19 Temperature distribution external view in amorphous core transformer in no-load conditions

شکل 19 نمای خارجی از توزیع دما در ترانسفورماتور هسته آمورف در حالت بی‌باری

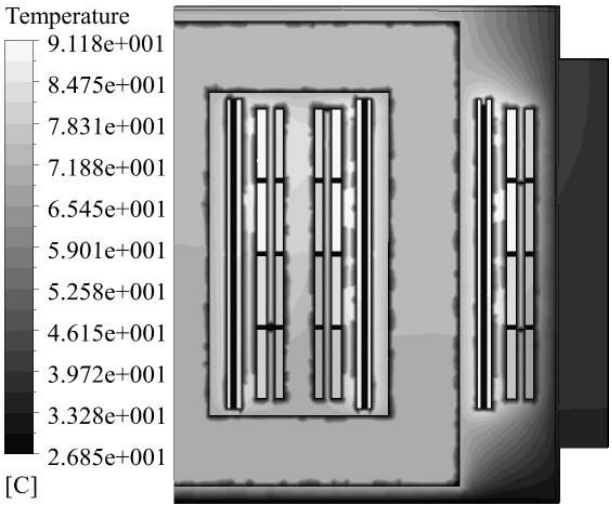


Fig. 20 Temperature distribution internal view in silicon core transformer in full load conditions

شکل 20 نمای داخلی از توزیع دما در ترانسفورماتور هسته سیلیکونی در حالت بار کامل

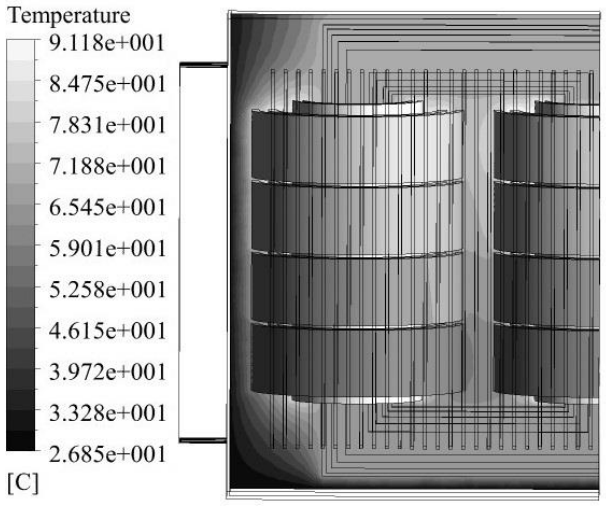


Fig. 21 Temperature distribution external view in silicon core transformer in full load conditions

شکل 21 نمای خارجی از توزیع دما در ترانسفورماتور هسته سیلیکونی در حالت بار کامل

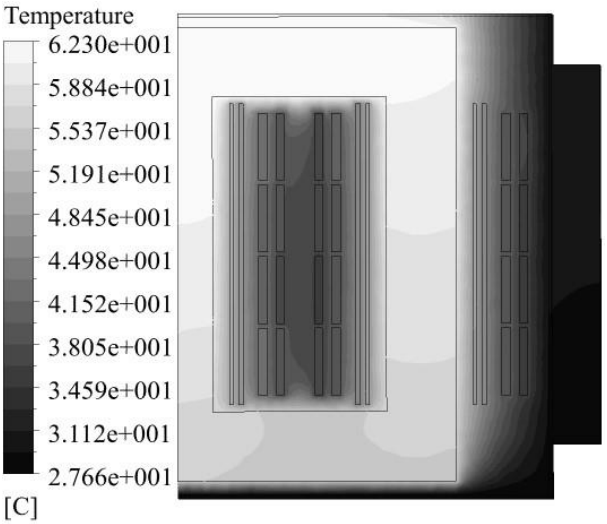


Fig. 16 Temperature distribution internal view in silicon core transformer in no-load conditions

شکل 16 نمای داخلی ازتوزیع دما در ترانسفورماتور هسته سیلیکونی درحالت بی باری

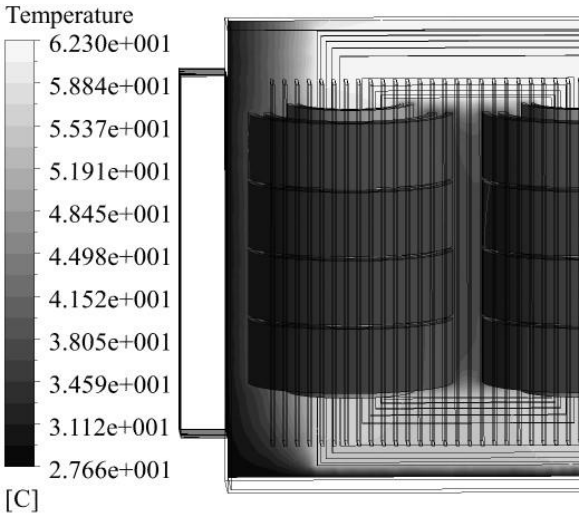


Fig. 17 Temperature distribution external view in silicon core transformer in no-load conditions

شکل 17 نمای خارجی از توزیع دما در ترانسفورماتور هسته سیلیکونی در حالت بی باری

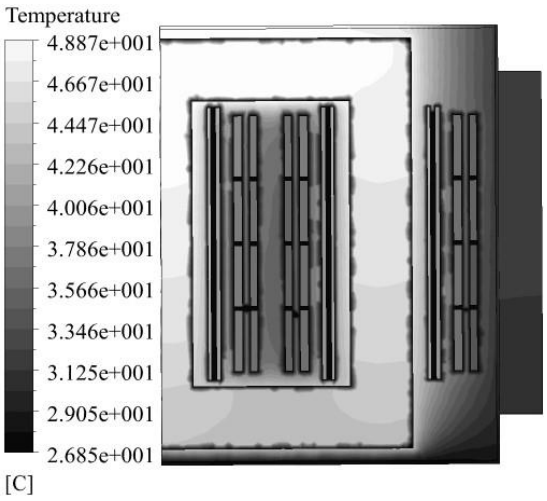


Fig. 18 Temperature distribution internal view in amorphous core transformer in no-load conditions

شکل 18 نمای داخلی از توزیع دما در ترانسفورماتور هسته آمورف در حالت بی‌باری

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.41.2]

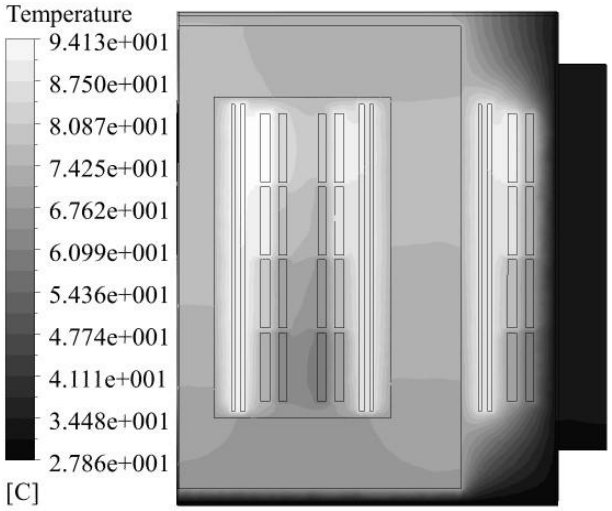


Fig. 22 Temperature distribution internal view in amorphous core transformer in full load conditions

شکل 22 نمای داخلی از توزیع دما در ترانسفورماتور هسته آمورف در حالت بار کامل

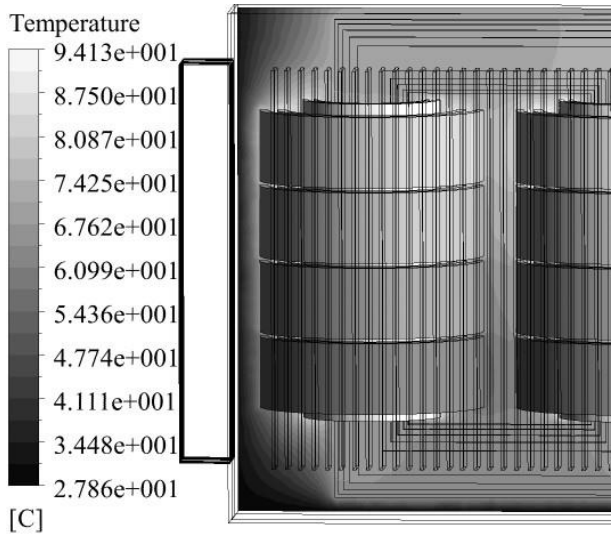


Fig. 23 Temperature distribution external view in amorphous core transformer in full load conditions

شکل 23 نمای خارجی از توزیع دما در ترانسفورماتور هسته آمورف در حالت بار کامل

ترانسفورماتورهای هسته آمورف و هسته استیل کریستالی سیلیکونی در شرائط بار کامل نشان داده شده است.

6-4- دمای نقطه داغ[1] ترانسفورماتوردر بارهای مختلف

دمای نقطه داغ ترانسفورماتور، یکی از پارامترهای مهم و کلیدی در تعیین عمر عایقی ترانسفورماتور می‌باشد. تاکنون مطالعات زیادی برای تخمین عمر ترانسفورماتورها انجام شده که تمرکز همه این مطالعه‌ها بر میزان عمرعایق این تجهیز بوده است. افزایش دمای بالای روغن و در نتیجه افزایش دمای نقطه داغ ترانسفورماتور سبب پیری زودرس عایق و در نتیجه کاهش عمر آن می‌شود[23]. یکی از عوامل مهم پیری ترانسفورماتور، تنش‌های حرارتی اعمالی به عایق‌های آن است. این تنش‌ها ناشی از تلفات آهنی و مسی، افزایش دما به سبب بارگیری، توزیع غیریکنواخت دما در سیم‌پیچ ترانسفورماتور و شرایط محیطی به ویژه دما و ارتفاع از سطح دریای آزاد است. همچنین سرعت باد و میزان تابش خورشید بر این ازدیاد دما مؤثر خواهد بود، لذا عوامل مذکور می‌بایست در مطالعات پیری مدنظر قرار گیرند. اندازه‌گیری مستقیم دمای نقطه داغ هزینه‌های زیادی به همراه دارد و لذا برای پیش‌بینی آن از مدل‌های مختلفی استفاده می‌شود[24,25]. معادله افزایش دمای روغن در استاندارد[26] با در نظر گرفتن تغییر دمای محیط اصلاح شده است. از طرفی ایجاد شرایط کاری نرمال ترانسفورماتور در بار نامی، نیازمند مطالعه دقیق رفتار حرارتی ترانسفورماتور می‌باشد. تنوع بارگیری از ترانسفورماتور در حالت نرمال و اضطراری سبب افزایش دمای روغن ترانسفورماتور می‌شود [27]. در بحث بارگیری از ترانسفورماتور باید به این نکته اشاره کرد که عامل اصلی افزایش دمای نقطه داغ ترانسفورماتور، گرمای تولید شده ناشی از تلفات بار است. در جدول8دمای نقطه داغ ترانسفورماتورهای هسته سیلیکونی و هسته آمورف مورد بحث، که در بارهای مختلف با استفاده از روش قسمت قبل به دست آمده، آورده شده است.

7-اعتبارسنجی وراستی‌آزمایی نتایج بدست آمده ازشبیه‌سازی

در این قسمت به منظور راستی آزمائی نتایج الکترومغناطیسی و حرارتی حاصل از شبیه‌سازی، بصورت کیفی مقایسه ای با نتایج مرجع[13] انجام میشود. مرجع مذکور ترانسفورماتور خشکی با ظرفیت توان 630kVA را از نظر الکترومغناطیسی و حرارتی مورد مطالعه قرار داده است. با توجه به اینکه در این مقاله تمرکز بر روی شرایط بی‌باری ترانسفورماتور است، نتایج حاصل از شبیه‌سازی شرایط بی‌باری مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در شکل‌های "24"تا "26" چگالی شار مغناطیسی در شرایط بی‌باری در ترانسفورماتورهای 100kVA و 630kVA نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده میگردد مقدار چگالی شار بی باری بیشینه ترانسفورماتور روغنی هسته سیلیکونی 100kVA در شکل "24" با مقدار آن برای ترانسفورماتور خشک هسته سیلیکونی 630kVA در شکل "26" (ازمرجع [13]) مطابقت دارد. همینطور از نظر کیفی توزیع چگالی شار (مخصوصا در گوشه های داخلی و خارجی هسته) در دو شکل "24" و "26" تقریبا به یک گونه می باشد.

به دلایل ذکر شده در بخشهای قبلی قاعدتا نبایستی توقع داشت تا توزیع چگالی شار بی باری همینطور مقدار بیشنه آن در ترانسفورماتور روغنی هسته آمورف 100kVA در شکل "25" همانند شکل "26" (ترانسفورماتور خشک هسته سیلیکونی 630kVA) گردد. در ادامه در شکل‌های "27" تا "29" توزیع دما در شرایط بی‌باری برای ترانسفورماتور های 100kVA و 630kVA به تصویر کشیده شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد نحوه توزیع دما در ترانسفورماتور 100kVA باهسته های مختلف (شکلهای "27" و

جدول 8 مقادیر دمای نقطه داغ ترانسفورماتورهای هسته آمورف و هسته سیلیکونی در بارهای مختلف

Table 8 The hot spot temperature values of amorphous core and silicon core transformers in different loads

ترانسفورماتور هسته سیلیکونی		ترانسفورماتور هسته آمورف	
دما (سانتیگراد)	بار (در واحد)	دما (سانتیگراد)	بار (در واحد)
68	0.5	55.1	0.5
73.5	0.6	63.8	0.6
78.4	0.7	72.7	0.7
83.1	0.8	80.6	0.8
87.3	0.9	87.6	0.9
91.2	1.0	94.1	1.0
94.4	1.1	98.9	1.1
97.8	1.2	104	1.2
101	1.3	108	1.3
104	1.4	113	1.4
107	1.5	117	1.5

[1] Hottest Spot Temperature (HST)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.41.2]

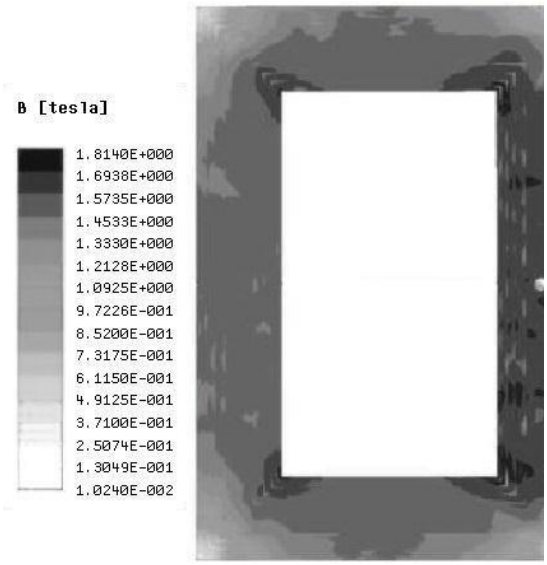


Fig. 24 Magnetic flux density in core of 100kVA silicon transformer in no-load conditions

شکل 24 چگالی شار مغناطیسی در هسته ترانسفورماتور سیلیکونی با ظرفیت 100kVA در شرایط بی‌باری

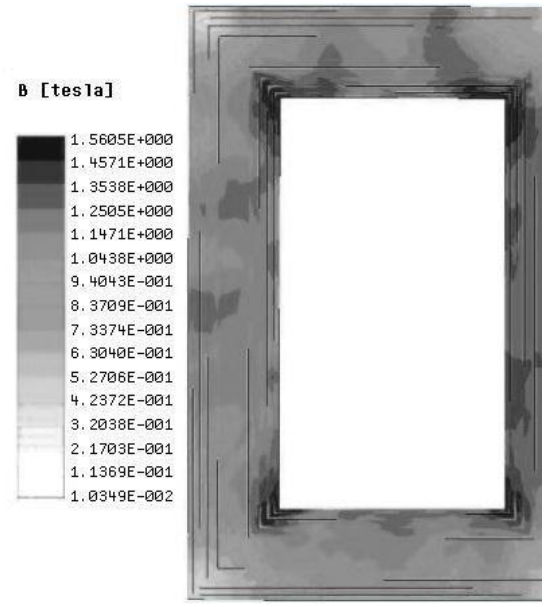


Fig. 25 Magnetic flux density in core of 100kVA amorphous transformer in no-load conditions

شکل 25 چگالی شار مغناطیسی در هسته ترانسفورماتور آمورف با ظرفیت 100kVA در شرایط بی‌باری

"28") بصورت کیفی انطباق قابل قبولی با شکل "29" از مرجع [13] دارد.

8-نتیجه گیری

در این مقاله تحلیل الکترومغناطیسی-مکانیکی-حرارتی یک نمونه ترانسفورماتور توزیع با هسته‌ای از جنس فلز آمورف در مقایسه با ترانسفورماتوری که هسته آن از جنس استیل کریستالی سیلیکون است بصورت عددی شبیه‌سازی و بررسی شد. در بیشتر مراجع جهت مدلسازی حرارتی هسته یا سیم پیچهای ترانسفورماتور، تلفات بصورت یکنواخت لحاظ میگردد. یعنی یک چگالی جریان یا چگالی تلفات ثابت در نظر گرفته میشود. این موضوع باعث میگردد توزیع درجه حرارت روی هسته یا سیم پیچها چه از نظر مکان (مثل مکان نقطه داغ) چه از نظر مقدار بیشینه درجه حرارت (اندازه درجه حرارت نقطه داغ) با واقعیت مطابقت نداشته باشد. در نظرگیری تلفات جریان گردابی باعث افزایش درجه حرارت (میانگین و بیشینه) ترانسفورماتور شده، مکان نقطه داغ جابجا میگردد. بنابراین جهت حصول به یک نتیجه قابل قبول ابتدا با استفاده از نرم‌افزار ماکسول تحلیل الکترومغناطیسی هر دو ترانسفورماتور انجام گرفت. در این شبیه‌سازی تاکید بر روی بهبود تلفات بی‌باری ترانسفورماتور بود و نشان داده شد که در شرایط بی‌باری با بهره گیری از فلز آمورف در هسته ترانسفورماتور می‌توان تلفات را تا حدود 65 درصد کاهش داد. سپس با استفاده از نتایج تحلیل الکترومغناطیسی و ایجاد کوپل بین نرم‌افزارهای ماکسول و انسیس- فلوئنت

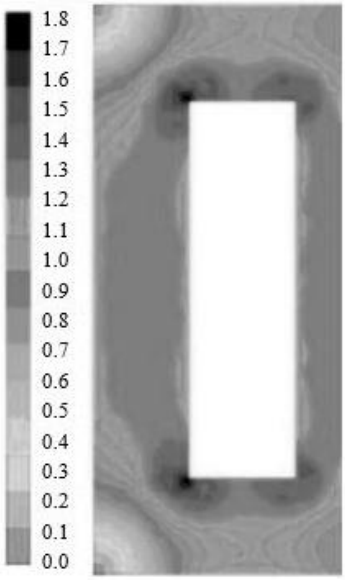


Fig. 26 Magnetic flux density in core of 630kVA dry-type silicon transformer in no-load conditions [13]

شکل 26 چگالی شار مغناطیسی در هسته ترانسفورماتور خشک سیلیکونی با ظرفیت 630kVA در شرایط بی‌باری[13]

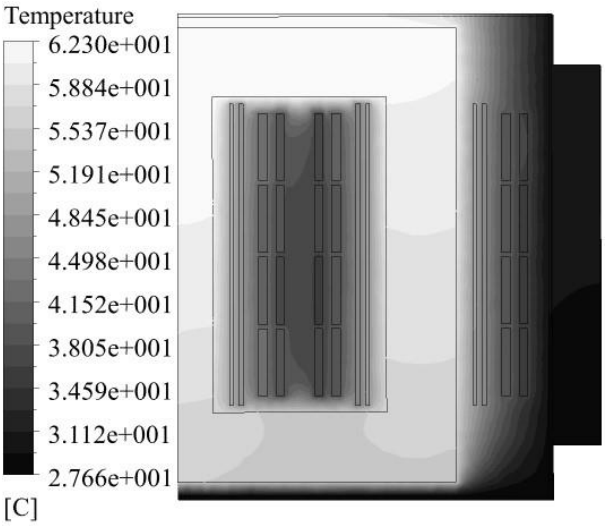


Fig. 27 Temperature distribution in 100kVA silicon core transformer in no-load conditions

شکل 27 توزیع دما در ترانسفورماتور هسته سیلیکونی با ظرفیت100kVA در شرایط بی‌باری

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.41.2]

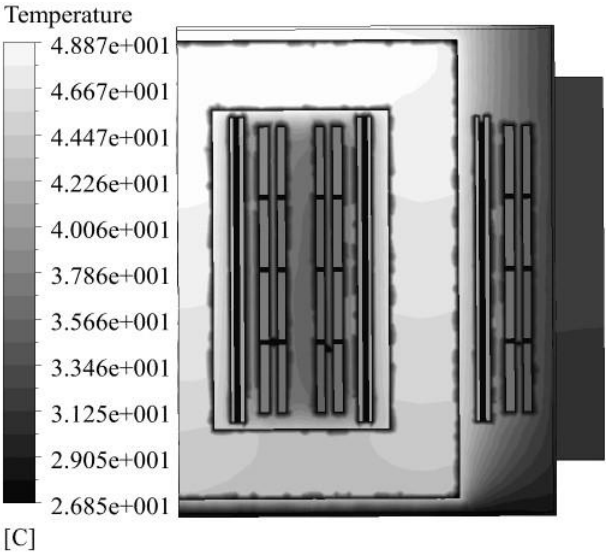


Fig. 28 Temperature distribution in 100kVA amorphous core transformer in no-load conditions

شکل 28 توزیع دما در ترانسفورماتور هسته آمورف با ظرفیت 100kVA در شرایط بی‌باری

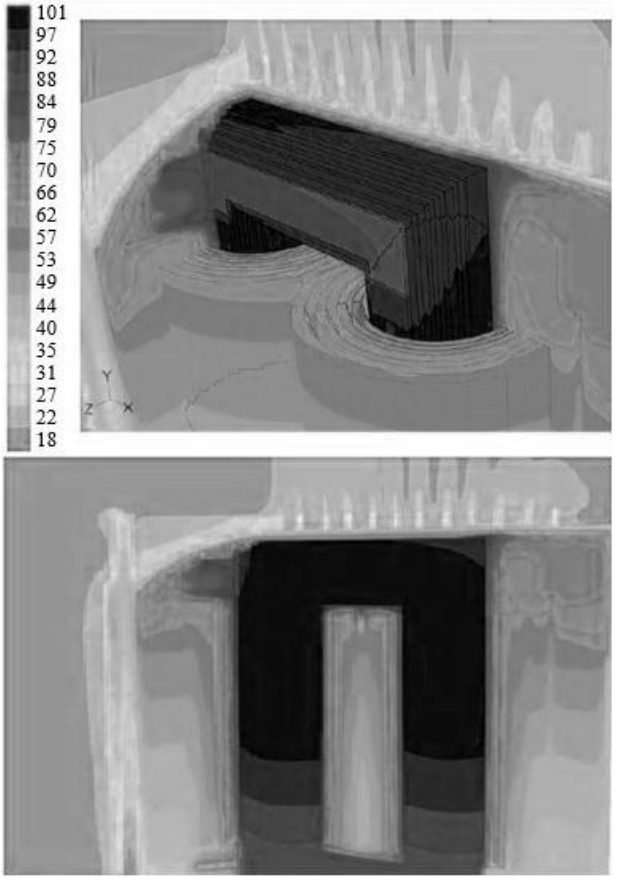


Fig. 29 Temperature distribution in 630 kVA dry-type silicon core transformer in no-load conditions [13]

شکل 29 توزیع دما در ترانسفورماتور خشک هسته سیلیکونی با ظرفیت 630kVA در شرایط بی‌باری [13]

تحلیل حرارتی ترانسفورماتور انجام شد. در تحلیل حرارتی نشان داده شد که ترانسفورماتور هسته آمورف در شرایط بی‌باری دمای کمتری نسبت به ترانسفورماتور هسته سیلیکونی دارد. از طرف دیگر ترانسفورماتور هسته آمورف در شرایط بار کامل بر عکس حالت بی باری دارای دمای بیشتری نسبت به ترانسفورماتور هسته سیلیکونی خواهد بود.

9- مراجع

[1] A. Baggini, F. Bua, Power transformers energy efficiency programs: a critical review, *IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Rome, Italy, pp. 1961-1965, 10-13 June, 2015.

[2] M. Toren, M. Celebi, Impact on efficiency of core materials in dry type transformers, *National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)*, Bursa, Turkey, pp. 308-312, 1-3 Dec., 2016.

[3] A. S. Tatevosyan, A. A. Tatevosyan, N. V. Zaharova, The study of the electrical steel and amorphous ferromagnets magnetic properties, *Procedia Engineering, International Conference on Oil and Gas Engineering(OGE)*, Omsk, Russian Federation, pp. 727-734, 25-30 April, 2016.

[4] F. Isik, Y. Uyaroglu, Amorphous core transformers efficiency analysis in turkish electrical distribution systems, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, Vol. 23, No. 6, pp. 1523-1535, 2015.

[5] J. Wang, W. Sheng, L. Wang, H. Yang, Study on technical and economical efficiency of amorphous alloy transformer and on-load capacity regulating transformer in distribution network application, *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Shenzhen, China, pp. 30-34, 23-26 Sept., 2014.

[6] M. T. Isha, Z. Wang, Transformer hotspot temperature calculation using IEEE loading guide, *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, pp. 1017-1020, 21-24 April, 2008.

[7] J. Li, T. Jiang, S. Grzybowski, Hot spot temperature models based on top-oil temperature for oil immersed transformers, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Virginia Beach, VA, USA, pp. 55-58, 18-21 Oct., 2009.

[8] H. R. Lashgari, Z. Chen, X. Z. Liao, D. Chu, M. Ferry and S. Li, Thermal stability, dynamic mechanical analysis and nanoindentation behavior of FeSiB(Cu) amorphous alloys, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 626, No. 6, pp. 480-499, 2015.

[9] A. Najafi, I. Iskender, Reducing losses in distribution transformer using 2605SA1 amorphous core based on time stepping finite element method, *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Omsk, Russia, pp. 1-4, 21-23 May, 2015.

[10] T. Steinmetz, B. Cranganu-Cretu, J. Smajic, Investigations of no-load and load losses in amorphous core dry-type transformers, *The XIX International Conference on Electrical Machines(ICEM)*, Rome, Italy, pp.1-6, 6-8 Sept., 2010.

[11] M. A. Taghikhani, A. Gholami, Estimation of hottest spot temperature in power transformer windings with NDOF and DOF cooling, *ScientiaIranica, Transactions D: Computer Science & Engineering and Electrical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 163-170, 2009.

[12] J. Faiz, M. B. B.Sharifian, A. Fakhri, Two-dimensional finite element thermal modeling of an oil-immersed transformer, *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 18, No. 6, pp. 577-594, 2007.

[13] J. Smolka, A. J. Nowak, Experimental validation of the coupled fluid flow, heat transfer and electromagnetic numerical model of the medium-power dry-type electrical transformer, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47, No. 10, pp. 1393-1410, 2008.

[14] C. Liu, J. Ruan, W. Wen, R. Gong, C. Liao, Temperature rise of a dry-type transformer with quasi-3D coupled-field method, *IET Electric Power Applications*, Vol. 10, No. 7, pp. 598–603, 2016.

[15] A. K. Das, S. Chatterjee, Finite element method-based modelling of flow rate and temperature distribution in an oil-filled disc-type winding transformer using COMSOL multiphysics, *IET Electric Power Applications*, Vol. 11, No. 4, pp. 664–673, 2017.

[16] J. R. D. Silva, J. P. A. Bastos, On-line evaluation of power transformer temperatures using magnetic and thermodynamics numerical modeling, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 53, No. 6, pp. 1 – 4, 2017.

[17] R. Hasegawa, D. Azuma, Impact of amorphous metal-based transformers on energy efficiency and environment, *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, Vol. 320, No. 20, pp. 2451- 2456, 2008.

[18] J. Guo, S. Li, Study on no-load loss of amorphous alloy control transformer based on the finite element method analysis, *IEEE International Conference of Online Analysis and Computing Science (ICOACS)*, Chongqing, China, pp. 16-19, 28-29 May, 2016.

[19] D. L. P. Feil, P. R. Silva, D. P. Bernardon, T. B. Marchesan, M. Sperandio, L. H. Medeiros, Development of an efficient distribution transformer using amorphous core and vegetable insulating oil, *Electric Power Systems Research*, Vol. 144, No. 4, pp. 268-279, 2017.

[20] B. A. Luciano, M. E. de Morais, C. S. Kiminami, Single phase 1-kVA amorphous core transformer: design, experimental tests, and performance after annealing, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, No. 4, pp. 2152-2154, 1999.

[21] S. Sieradzki, R. Rygal, M. Soinski, Apparent core losses and core losses in five-limb amorphous transformer of 160 kVA, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 34, No. 4, pp. 1189-1191, 1998.

[22] M. A. Taghikhani, Modeling of heat transfer in layer-type power transformer, *PrzegladElektrotechniczny (Electrical Review)*, Vol. 87, No. 12, pp. 121-123, 2011.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.41.2]

[23] G. Swift, T. S. Molinski, W. Lehn, A fundamental approach to transformer thermal modeling—part I: Theory and equivalent circuit, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 16, No. 2, pp. 171-175, 2001.
[24] D. J. Tylavsky, Q. He, G. A. McCulla, J. R. Hunt, Sources of error in substation distribution transformer dynamic thermal modeling, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 1, pp. 178-185, 2000.
[25] D. Azizian, Triple winding dry type transformers thermal modeling with sandwich winding, *28th International Power System Conference*, Tehran, Iran, pp. 1-7, 4-6 Nov., 2013. (in Persianفارسی)
[26] *IEEE Standards*, *C57.91-2011*, IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers and step-voltage regulators, 2012.
[27] L. J. Rivera, D. J. Tylavsky, Acceptability of four transformer top-oil thermal models-part 2: comparing metrics, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 23, No. 2, pp. 866–872, 2008.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.41.2]