

МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

У цій статті розглядається питання методів розрахунку теплопровідності електричних машин з використанням нового пористого матеріалу. Представлена спрощена модель структури і тепловий опір основних елементів електричних машин. Результат розрахунку перевіряються плоскою моделлю двошаровою теплопровідністю, яка заснована на експериментах і електромагнітному моделюванні. Моделі теплового стану отримані за допомогою паралельних методів і класичним методом оцінки.

Ключові слова: електрична машина, електродвигун, діагностика, методи теплового контролю, нейронні мережі.

D.U. ZUBENKO, O.M. PETRENKO, V.V. LINKOV

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

METHODS OF CALCULATION OF HEAT CONDUCTIVITY OF ELECTRICAL MACHINES

In this paper, Metal examines the question of methods for calculating the thermal conductivity of electric machines. A simplified model of structure and thermal resistance of the main elements of electric machines is presented. The result of the calculation is verified by a flat model of two-layer heat conductivity, which is based on experiments and electromagnetic modelling. Models of the thermal state are obtained using parallel methods and the classical method of evaluation. For such requirements, more accurate thermal models are needed that integrate the thermal properties of the material (electrical insulating and magnetic materials) to accurately imagine the behaviour of the system. For such requirements, more accurate thermal models are needed that integrate the thermal properties of the material (electrical insulating and magnetic materials) to accurately imagine the behaviour of the system. In a thermal study, one of the main problems of electric machines is their materials, of which it is the most vulnerable component, such as insulating materials. Winding of electric machines can be damaged or reduce the service life if the heat limit for the material is exceeded. However, as the slots are filled with composite materials, such a real slot model is difficult to install. The prediction of the thermal conductivity (PFC) using a number of tools, such as the finite element method (ICE), will result in excessive simulation time. Excitation winding where the side of electric machines is usually hidden in a closed room using an epoxy resin (mainly in special linear motors) or varnish (mainly in rotary engines), copper conductors are isolated from each other. Moreover, the enamel wire outside the copper conductor, the insulating paper slot is filled to increase the insulation. Also, different from porous materials, the component of metal and gas in porous materials may be replaced by equivalent insulation and copper wires, respectively. In addition, there is no fluid in the thermal transfer between them, porosity can not be replaced by a wire without isolation. Therefore, the actual task of developing a mathematical model of thermal conductivity in electric machines with different types of insulation.

Key words: electric machine, electric motor, diagnostics, methods of thermal control, neural networks.

Вступ

Існує зростаюча потреба в мініатюризації, енергетичній ефективності, зниженні витрат, а також використанні нових технологій і матеріалів для електричних машин. Для таких вимог потрібні більш точні теплові моделі, що інтегрують теплові властивості матеріалу (електричні ізоляційні і магнітні матеріали) для достовірної уяви поведінки системи [1–3]. В тепловому дослідженні одна з головних проблем електричних машин – їх матеріали, з найбільш вразливим таким компонентом, як ізоляційні матеріали. Обмотки електричних машин можуть бути пошкоджені або можуть зменшити термін служби, якщо теплова межа для матеріалу перевершена [1]. Однак, як слоти заповнені композитними матеріалами, то таку реальну модель слотів важко встановити. Прогнозування коефіцієнта теплопровідності (ПКТ) за допомогою численних інструментів, таких як метод кінцевих елементів (МКЕ), призведе до надмірного часу моделювання [4–6].

Обмотки збудження, де сторона електричних машин, як правило, схована в закриті приміщення за допомогою епоксидної смоли (в основному в спеціальних лінійних двигунах) або просочення лаком (в основному в роторних двигунах), мідні провідники ізолювані один від одного. Більш того, провід емалі зовні мідного провідника, слот із ізоляційного паперу заповнені, щоб збільшити ізоляцію. Також, відрізняючись від пористих матеріалів, компоненти металу і газу в пористих матеріалах можливо замінені еквівалентною ізоляцією і мідними проводами, відповідно. Крім того, не існує будь-якої рідини термічного переносу між ними, пористість не може бути замінена на дріт без ізоляції [4, 8]. Тому актуальна задача розробки математичної моделі теплопровідності в електричних машинах з різними видами ізоляції.

Експериментальна частина

Тепловий опір можна обчислити за такими формулами:

$$R_1 = \frac{L_p}{\frac{L_p - D}{2} L_p \cdot \lambda_{ex}} = \frac{1}{\frac{L_p - D}{2} \cdot \lambda_{ex}}, \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{\frac{L_p - D}{2}}{D \cdot L_p \cdot \lambda_{ex}} = \frac{L_p - D}{2D \cdot L_p \cdot \lambda_{ex}}, \quad (2)$$

$$R_3 = \frac{D}{D \cdot L_p \cdot \lambda_{cu}}, \quad (3)$$

де λ_{ex} – еквівалентний ПКТ ізоляційних матеріалів, λ_{cu} – провідність мідного провідника

Згідно з тепловою мережею, еквівалентний тепловий опір блоку цілих клітин може бути отримано наступним чином [7–9]:

$$R_{eq1} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{2R_2 + R_3} \right)^{-1}, \quad (4)$$

$$\lambda_{eq1} = \frac{2}{R_1} + \frac{1}{2R_2 + R_3} \cdot L_p. \quad (5)$$

Таким чином, еквівалентна ПКТ елементарної комірки є:

$$\lambda_{eq1} = \frac{\lambda_{ex} \cdot (L_p - D)}{L_p} + \frac{D \cdot L_p \cdot \lambda_{ex} \cdot \lambda_{cu}}{\left[\lambda_{cu} \cdot (L_p - D) + D \cdot \lambda_{ex} \right] \cdot L_p} \quad (6)$$

Підставивши формули (2)–(6), що еквівалентно ПКТ всього слота, можна отримати:

$$\varphi = \frac{V_p}{V\alpha} = \frac{V_p}{V_s + V_p}. \quad (7)$$

Подібно визначенням пористості матеріалу, визначення в слоті може бути виражено для голого дроту як коефіцієнт заповнення слота [9–13].

Визначення пористості:

$$\varepsilon = \frac{D^2 \cdot L_p}{L_p^3} = \frac{D^2}{L_p^2} \quad (8)$$

$$\lambda_{eq1} = \lambda_{ex} \left(1 - \sqrt[3]{\varepsilon} \right) + \frac{\sqrt[3]{\varepsilon} \cdot \lambda_{ex} \cdot \lambda_{cu}}{\lambda_{cu} + (\lambda_{ex} - \lambda_{cu}) \sqrt[3]{\varepsilon}} \quad (9)$$

Згідно з відомою моделлю Максвелла-Ейкена [3], нижні і верхні межі можна отримати так:

$$\lambda_{ex} = \lambda_{er} \frac{2\lambda_{er} + \lambda_{we} - 2(\lambda_{er} - \lambda_{we})(1 - \varepsilon')}{2\lambda_{er} + \lambda_{we} + (\lambda_{er} - \lambda_{we})(1 - \varepsilon')} \quad (10)$$

$$\lambda_{ex} = \lambda_{we} \frac{2\lambda_{we} + \lambda_{er} - 2(\lambda_{we} - \lambda_{er})\varepsilon'}{2\lambda_{we} + \lambda_{er} + (\lambda_{we} - \lambda_{er})\varepsilon'} \quad (11)$$

Еквівалентно ПКТ проріз секції отриманий з використанням площі зваженим методом [10, 15, 16], у формулі (9). Проте, цей метод, описаний в (11) можна розглядати як мідь та ізоляційні матеріали, розташовані послідовно, які існують як паралельний термічний стан.

Застосовуючи це для розрахунку еквівалентної ПКТ [14, 15], формула може бути описана так:

$$\lambda^{eff} = \frac{\varepsilon \frac{\lambda_{eu}}{2\lambda^m + \lambda_{eu}} + (1 - \varepsilon) \frac{\lambda_{ex}}{2\lambda^m + \lambda_{ex}}}{\frac{\tau}{2\lambda^m + \lambda_{eu}} + \frac{1 - \tau}{2\lambda^m + \lambda_{ex}}} \quad (12)$$

Інша еквівалентна ПКТ розраховується аналітичним методом, яка представляє собою класичну оцінку [15, 16].

Ця формула, запропонована Даніелем, який описує класичні оцінки еквівалентної поведінки різнорідних матеріалів, які можуть бути тлумаченням з точки зору проблем включення.

Висновки

Отримані математичні моделі для розрахунку теплопровідності на основі структури пористого металевих матеріалу. За допомогою методу мережевого теплового опору, слота ПКТ та отриманої формули для обчислення можна поліпшити точність розрахунку слота ПКТ.

Розрахунки показали, що цей метод є більш правильним і точним як спосіб отримання теплопровідності слота ПКТ, який є важливим параметром для розрахунку теплового випромінювання в аналізі теплового поля і розрахунку теплового опору нових моделей та параметрів. Цей параметр буде застосований в області дослідження теплових характеристик електричної машини, що є важливим чинником

в розробці і оптимізації електричних машин.

References

1. L. Idoughi, X. Mininger, F. Bouillault, L. Bernard, E. Hoang, Thermal model with winding homogenization and FIT discretization for stator slot, *IEEE Trans. Magn.* 47 (12) (2011) 4822–4826.
2. B. Kou, X. Huang, H. Wu, L. Li, Thrust and thermal characteristics of electromagnetic launcher based on permanent magnet linear synchronous motors, in: 2008 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology, 2008, pp. 1–6.
3. J.K. Carson, S.J. Lovatt, D.J. Tanner, A.C. Cleland, Thermal conductivity bounds for isotropic, porous materials, *Int. J. Heat Mass Transf.* 48 (11) (2005) 2150–2158.
4. Y. Liu, H.F. Chen, H.W. Zhang, Y.X. Li, Heat transfer performance of lotus-type porous copper heat sink with liquid GaInSn coolant, *Int. J. Heat Mass Transf.* 80 (2015) 605–613.
5. H. Nakajima, Fabrication, properties and application of porous metals with directional pores, *Prog. Mater Sci.* 52 (7) (2007) 1091–1173.
6. H. Xuzhen, L. Jiayi, Z. Chengming, L. Liyi, Calculation and experimental study on temperature rise of a high overload tubular permanent magnet linear motor, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 41 (5) (2013) 1182–1187.
7. A. Tassarolo, C. Bruzzese, Computationally efficient thermal analysis of a lowspeed high-thrust linear electric actuator with a three-dimensional thermal network approach, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 62 (3) (2015) 1410–1420.
8. X. Song, N. Mijatovic, S. Zou, B.B. Jensen, J. Holbøll, AC losses and their thermal effect in high-temperature superconducting machines, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 26 (4) (2016) 1–5.
9. K. Zhou, J. Pries, H. Hofmann, Computationally efficient 3-D finite-elementbased dynamic thermal models of electric machines, *IEEE Trans. Transp. Electrification* 1 (2) (2015) 138–149.
10. M. Galea, C. Gerada, T. Raminosa, P. Wheeler, A thermal improvement technique for the phase windings of electrical machines, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 48 (1) (2012) 79–87.
11. G.J. Li, J. Ojeda, E. Hoang, M. Gabsi, Thermal-electromagnetic analysis of a fault-tolerant dual-star flux-switching permanent magnet motor for critical applications, *IET Electr. Power Appl.* 5 (6) (2011) 503–513.
12. Q. Lu, X. Zhang, Y. Chen, X. Huang, Y. Ye, Z.Q. Zhu, Modeling and investigation of thermal characteristics of a water-cooled permanent-magnet linear motor, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 51 (3) (2015) 2086–2096.
13. M. Du, H. Zhang, Y. Li, Y. Liu, X. Chen, Y. He, Synthesis of a bimodal porous Cu with nanopores on the inner surface of Gasar pores: influences of preparation conditions, *Appl. Surf. Sci.* 360 (2016) 148–156.
14. D.C. Hanselman, *Brushless Permanent-Magnet Motor Design*, McGraw-Hill, New York, 1994.
15. L. Daniel, R. Corcolle, A note on the effective magnetic permeability of polycrystals, *IEEE Trans. Magn.* 43 (7) (2007) 3153–3158.
16. L. Li, M. Mingna, Y. Tang, Z. He, Q. Chen, Iron loss and inductance analysis considering magnetic nonlinearity in multi-segmented plate permanent magnet linear motor, *IEEE Trans. Magn.* 48 (11) (2012) 3009–3012.

Рецензія/Peer review : 16.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 3.6.2019 р.

Рецензент: д. техн. н., проф. М.Ф. Смирний