

NGHIÊN CỨU SỰ PHÂN BỐ NHIỆT CỦA ĐỘNG CƠ TỪ TRỞ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU TRỢ TỪ KHỞI ĐỘNG TRỰC TIẾP CÓ KỂ ĐẾN HIỆU ỨNG KHỬ TỪ

THERMAL STUDY OF LINE- START PERMANENT MAGNET ASSISTANCE SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTORS TAKING DEMAGNETIZATION EFFECT INTO ACCOUNT

Hồ Mạnh Tiến¹, Bùi Minh Định²,
Triệu Việt Linh², Đặng Quốc Vương^{2,*}

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu sự phân bố nhiệt của động cơ từ trở đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp có kể đến hiệu ứng khử từ bằng phương pháp giải tích trên nền tảng Matlab kết nối với Motor-CAD. Tuy nhiên, các moduls tiêu chuẩn của Motor-CAD chỉ có thể áp dụng để khảo sát và phân tích động cơ cảm ứng mà không thể áp dụng cho động cơ từ trở đồng bộ nam châm vĩnh cửu nói trên. Do đó, để khắc phục được nhược điểm trên, phương pháp phân tử hữu hạn được đề xuất nghiên cứu phân tích sự phân bố nhiệt độ trong động cơ từ trở đồng bộ nam châm vĩnh cửu. Sự phát triển của phương pháp được áp dụng cho động cơ đồng bộ ba pha nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp công suất 7,5kW, 6 cực từ. Các kết quả đạt của phương pháp cho phép xác định vùng quá nhiệt trong động cơ cũng như vùng bị khử từ khi động cơ khởi động hoặc khi động cơ bị ngắn mạch.

Từ khóa: Mạch nhiệt thông số rại; mô hình nhiệt; tính toán nhiệt; mô hình trường nhiệt; động cơ đồng bộ ba pha nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp.

ABSTRACT

This paper studies the thermal distribution for a Line Start Permanent-Magnet Synchronous Reluctance Motor taking the irreversible demagnetization effect into account by analytical embedded in Matlab that is linked to Motor-CAD. However, standard moduls of Motor-CAD can be only applied to investigate and analyze for induction motors without applying to the Permanent-Magnet Synchronous Reluctance Motor. Hence, in order to overcome the above drawback, a finite element method is proposed to research and analyze thermal distributions of the Permanent-Magnet Synchronous Reluctance Motor. The development method is performed for the Line Start Permanent-Magnet Synchronous Reluctance Motor of 7.5kW, 6 poles. The obtained results of the method allow to define the overheat in the motor and demagnetization areas as well when starting or short-circuit occurs.

Keywords: Parameter thermal model; thermal model; thermal calculations; Line Start Permanent-Magnet Synchronous Reluctance Motor (LS-PMA-SynRM).

¹Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Giao thông Vận tải

²Trường Điện - Điện tử, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: vuong.dangquoc@hust.edu.vn

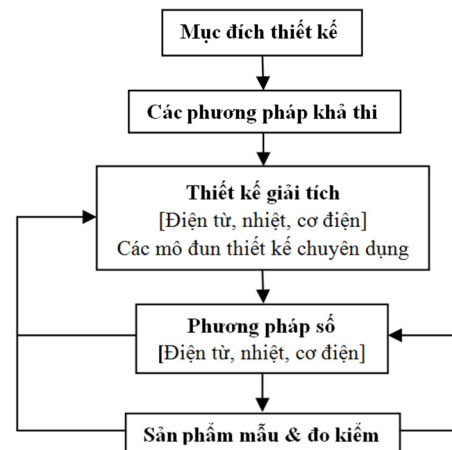
Ngày nhận bài: 10/7/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 18/8/2022

Ngày chấp nhận đăng: 29/8/2022

1. GIỚI THIỆU

Năm 2001, trong [1, 2] tác giả David Staton có đề cập đến xu hướng sử dụng phần mềm tính toán và phân tích nhiệt cho các động cơ điện để đem lại những ưu điểm vượt trội so với các phương pháp phân tích nhiệt truyền thống chỉ dựa trên các thực nghiệm từ động cơ có sẵn, các dữ liệu từ catalog hoặc các hệ số kinh nghiệm. Đồng thời, nhóm tác giả cũng đưa ra quy trình thiết kế một động cơ như hình 1.



Hình 1. Quy trình thiết kế một động cơ [1]

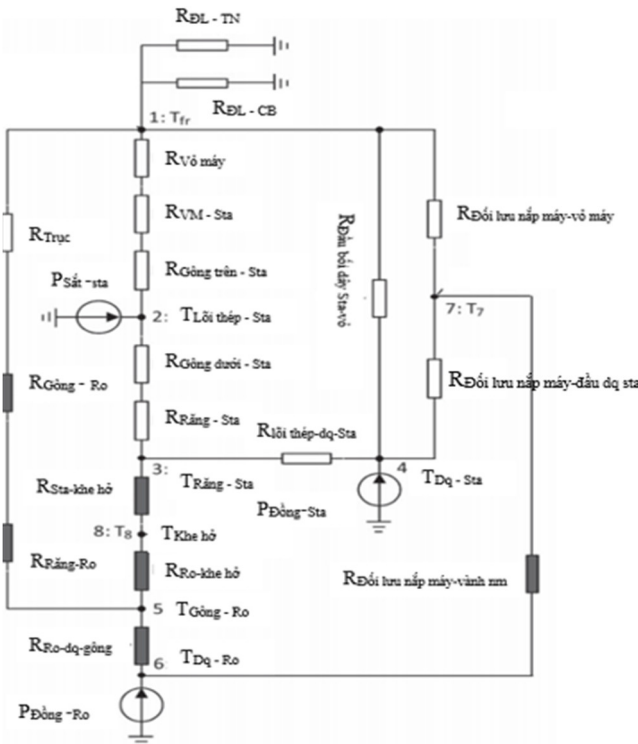
Trong quy trình này, từ các mục tiêu thiết kế, người thiết kế sẽ đưa ra các phương án thiết kế có thể. Sau đó, thiết kế sơ bộ (giải tích) bằng các phần mềm chuyên dụng về điện từ và nhiệt như Motor-CAD. Quá trình tính toán ở giai đoạn này cần nhanh, đưa ra được nhiều phương án thiết kế. Phân tích, so sánh các thiết kế sơ bộ để tìm ra được thiết kế tối ưu với thời gian ngắn nhất. Ở giai đoạn tiếp theo, các phân tích số được sử dụng cho các vấn đề điện từ, nhiệt và cơ khí trên mẫu thiết kế tối ưu đã được lựa chọn từ giai đoạn trước để thu được lời giải có độ chính xác cao hơn. Tất nhiên, các phân tích số sẽ tốn kém nhiều hơn về thời gian và chi phí tính toán. Do đó, chỉ nên dùng phương pháp này khi số mẫu phân tích đã được giới hạn. Cuối cùng, cần tiến hành các thực nghiệm để hiệu chỉnh lại hai mô hình số và mô hình giải

tích để thu được các kết quả mô phỏng tốt hơn. Từ đó, tạo cơ sở để thu được các phân tích có độ chính xác cao hơn với các mẫu thiết kế cải tiến mới.

Trong [2], tác giả Staton đã khảo sát và phân tích hàng mô hình nhiệt học để xây dựng phần mềm chuyên dụng dựa trên các sơ đồ mạch nhiệt và các phương trình cân bằng năng lượng nhiệt cho các loại máy điện khác nhau, mà phổ biến nhất là các động cơ điện từ trở đồng bộ nam châm vĩnh. Tiếp đến tác giả Cavagnino và Politecnico di Torino, Italy với nhiều bài báo được công bố [3-6] về ứng dụng các phương trình cân bằng nhiệt và mô hình mạch nhiệt tương đương để tính toán phân bố nhiệt cho cụ thể là stator và rotor động cơ không đồng bộ, bài báo số [7] tập trung cho động cơ từ trở đồng bộ, kế thừa các kết quả trên cải tiến mạch nhiệt rotor để áp dụng cho động cơ đồng bộ từ trở nam châm vĩnh cửu. Điểm khác biệt lớn nhất tổn hao đồng trên rotor bị triệt tiêu ở tốc độ đồng bộ, do vậy tổn hao đồng trên rotor (P_{cu2}) sẽ bị lược bỏ và thay vào đó là tổn hao phụ của nam châm, tuy nhiên tổn hao này rất nhỏ.

Trong bài báo này, mô hình giải tích được đề xuất trên nền tảng Matlab được kết nối với Motor-CAD thông qua bảng Parameter interface và phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) để tính toán các hệ số dẫn nhiệt, hệ số cân bằng nhiệt cho các loại động cơ PMA-SynRM. Sự phát triển của phương pháp được áp dụng cho động cơ đồng bộ ba pha nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp công suất 7,5kW, 6 cực từ. Các kết quả đạt của phương pháp cho phép xác định vùng quá nhiệt trong động cơ cũng như vùng bị khử từ khi động cơ khởi động hoặc khi động cơ bị ngắn mạch.

2. MÔ HÌNH GIẢI TÍCH



Hình 2. Sơ đồ mạch nhiệt thay thế tương đương

Mô hình giải tích được xây dựng dựa trên các phương trình toán học về cân bằng nhiệt độ, cân bằng tổn hao công suất và lượng tiêu tán do các hệ thống gân cánh tản nhiệt. Gần đây, một số tác giả đã phát triển và xây dựng lên các mô hình nhiệt trên nền các công cụ tính toán MATLAB, Motor-CAD và SPEED [1-6]. Trong đó, Motor-CAD là những phần mềm nổi tiếng để phân tích và tính toán mạch nhiệt mà đang được các Công ty chế tạo động cơ và các nhà nghiên cứu trên thế giới sử dụng. Phần mềm này được viết bởi giáo sư Dave Staton và các cộng sự tại phòng thí nghiệm SPEED Laboratory Glasgow. Bên cạnh những ưu điểm đã đạt được thông qua các kết quả nghiên cứu từ các công trình trước đó, phần mềm này chỉ có thể áp dụng để tính toán cho động cơ cảm ứng mà chưa được phát triển để tính toán cho các loại động cơ mới như động cơ PMA-SynRM. Do vậy, trong bài báo này, nhóm tác giả kết hợp giữa mô hình giải tích trong Matlab, Motor-CAD và phương pháp PTHH để xây dựng mô hình nhiệt động cơ PMA-SynRM, sau đó đưa ra mô hình cải tiến áp dụng cho động cơ PMA-SynRM khởi động trực tiếp (LS PMA-SynRM).

Mô hình giải thay thế nhiệt trở và các nguồn nhiệt tương đương được thể hiện hình 1. Do nhiệt độ không phân bố đều trên toàn bộ thân động cơ, nên nhiệt độ cực đại trên mỗi phần tử có thể được tính như sau theo tài liệu [1].

$$T_{max} = 1,5T_{av} - 0,25(T_1 + T_2) + \frac{(T_1 - T_2)^2}{12(2T_{av} - T_1 - T_2)} \tag{1}$$

Trong đó, T_{max} là nhiệt độ lớn nhất, T_{av} là nhiệt độ trung bình, và T_1, T_2 lần lượt là nhiệt độ tại điểm nút nhiệt 1 và nút nhiệt 2 như trong sơ đồ hình 2.

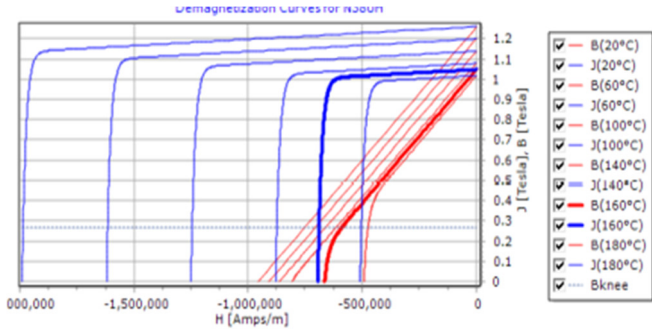
Trên mạch nhiệt này, các nút nhiệt được tự động thiết lập ở những điểm quan trọng trên động cơ như: gông stator, răng, đầu dây quấn, vỏ máy, trục quay... Các nút nhiệt này được liên kết với các nhiệt trở dẫn nhiệt, đối lưu và bức xạ. Tổn thất là thông số đầu vào đặt ở các nút phù hợp.

Thành phần nhiệt dung được kể đến khi xét đến quá trình quá độ nhiệt trong các động cơ. Tất cả các nhiệt trở dẫn nhiệt, đối lưu và bức xạ được tự động tính toán bằng các công thức lý thuyết đã được chứng minh trong các công trình khoa học công bố có liên quan. Đối với các vấn đề truyền nhiệt xác lập, mô hình cải tiến có thể tính toán các tham số và đưa ra lời giải gần như tức thời; với các vấn đề quá độ truyền nhiệt thông thường mất khoảng vài giây để tính toán. Đây chính là ưu điểm nổi bật của việc sử dụng mô hình trong bài báo so với các phương pháp tính toán khác dựa trên phương pháp PTHH hoặc dựa trên các tính toán động lực học chất lưu (CFD).

Từ mô hình nhiệt giải tích trên hình 2, nhiệt trở được thêm vào cho kết cấu nam châm trên Matlab có kết nối với mô hình nhiệt trên Motor-CAD để cải thiện cho việc tính toán được nhanh hơn. Đây là các tham số thiết kế, vật liệu để từ mới, công thức tính mới về truyền nhiệt mà Motor-CAD chưa cập nhật và có thể bổ sung bằng Matlab.

Thông số đặc tính nam châm cho nam châm đã chọn của động cơ là N38UH có điểm đầu gập đường cong BH (khử từ)

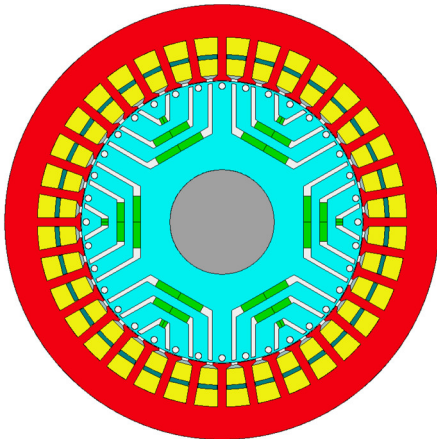
của nam châm ở nhiệt độ nam châm xác định. Điểm đầu gập gối là mật độ từ thông mà tại đó đường cong BH trở nên phi tuyến tính. Nếu mật độ từ thông trong nam châm xuống dưới điểm đó, sẽ có sự khử từ không thể đảo ngược từ tính trong nam châm như đồ thị hình 3. Có thể thấy ở đường cong ở 150°C trở nên phi tuyến tính ở khoảng 0,2T ở 160°C, điểm đầu gối sẽ cao hơn, cho thấy nam châm dễ dàng hơn không thể khử từ không thể đảo ngược ở nhiệt độ cao.



Hình 3. Đặc tính B-H của nam châm vĩnh cửu ứng với nhiệt độ khác nhau

3. MÔ HÌNH NHIỆT CHO ĐỘNG CƠ TỪ TRỞ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CHỦ

Trong phần này, mô hình nhiệt của động cơ LS PMA-SynRM công suất 7,5kW, 6 cực sẽ được áp dụng để phân tích và tính toán sự phân bố nhiệt độ. Mô hình hình học của động cơ được thiết lập theo phương ngang trục như hình 4.



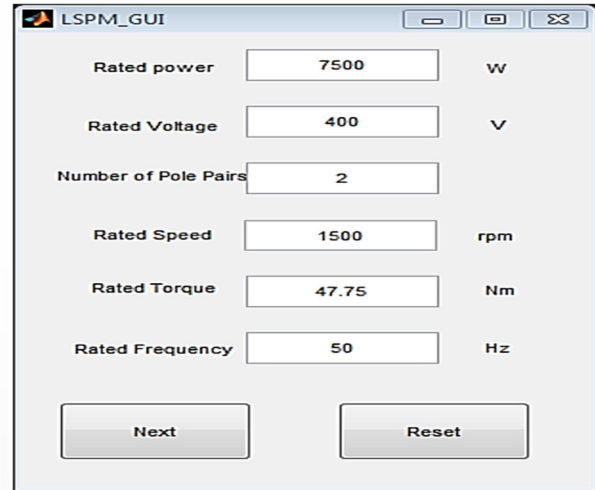
Hình 4. Mô hình hình học ngang trục của động cơ

Trong đó, chọn kiểu cánh làm mát là cánh mở, theo phương dọc trục, phân bố tròn. Số cánh là 36. Các kích thước cánh lần lượt được xác định như sau:

- Số cánh trên ¼ góc = 9 (cả chu vi là 36 cánh)
- Khoảng cách giữa hai cánh là: 15mm;
- Độ dày của cánh là: 2mm;
- Chiều cao của cánh là: 23mm.

Trong phương án làm mát, có bố trí thêm nắp động cơ bao lấy phần cánh làm mát để tăng cường cho quá trình làm mát cưỡng bức bằng quạt gắn trên trục động cơ.

Mô hình động cơ LS PMA-SynRM được nhóm tác giả dùng để nghiên cứu thuộc kiểu kín, làm mát bằng quạt gắn trên trục động cơ còn gọi là kiểu TEFC (Total End Fan Cooling).



Hình 5. Mô hình giao diện tính toán các tham số động cơ bằng Matlab

Để có thể thực hiện trên nền tảng Matlab, mô hình giải tích được thiết kế như giao diện mô tả tại hình 5. Các thông số đầu vào là yêu cầu kỹ thuật như công suất, tốc độ trên giao diện thiết kế, việc tính toán các thông số đầu ra sẽ do Matlab đảm nhiệm thông qua các mô hình toán với các tham số hiệu chỉnh liên quan đến chế độ làm việc, điều kiện biên của động cơ.

Các loại tổn hao đồng $P_{cu1,2}$, tổn hao nam châm và tổn hao sắt được gán như thông số đầu vào của mạch nhiệt, các tổn hao này là hàm phụ thuộc theo nhiệt độ.

Dây quấn cho mô hình động cơ là kiểu dây quấn 2 lớp với số vòng dây của một bố dây là 40 vòng. Do đó, tổng số thanh dẫn tác dụng trong một rãnh stato là 80. Hệ số điện kín của rãnh là 0,4602. Các tham số đầu vào của dây quấn có ảnh hưởng tới kết quả phân tích nhiệt như: bề dày lớp giấy cách điện, bề dày phần khe hở giữa cách điện và lõi thép stato, hệ số đánh giá chất lượng tản sấy.

Các dữ liệu đầu vào của động cơ bao gồm: thông số về kiểu làm mát; tổn hao công suất; đặc tính vật liệu; điều kiện làm việc thông qua một số thông số đặc trưng của đối lưu của vùng không khí cuối nắp động cơ.

4. THẢO LUẬN KẾT QUẢ

Độ tăng nhiệt độ của dây quấn bằng theo tài liệu [2-4]:

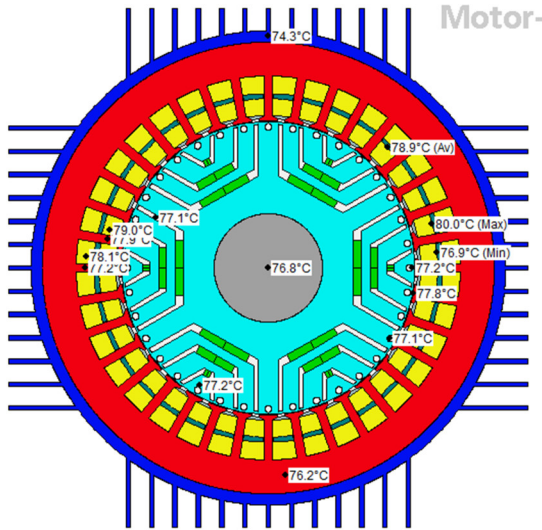
$$\theta_{Cu} = \frac{[Q_{Cu}(1 + R_i / R_{Fe}) + Q_{Fe}] R_{Fe}}{1 + (R_c / R_{Cu}) + (R_{Fe} / R_{Cu})} \tag{2}$$

Độ tăng nhiệt độ của lá sắt stato:

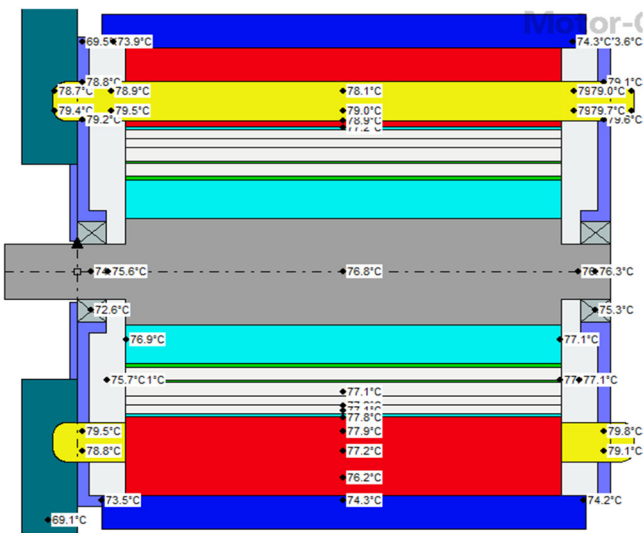
$$\theta_{Fe} = \frac{Q_{Fe} R_c + \theta_{Cu}}{1 + R_c / R_{Fe}} \tag{3}$$

Sau khi đã thiết lập các thông số cơ bản của mô hình mạch nhiệt trên phần mềm Motor-CAD, chạy phân tích nhiệt ở chế độ xác lập. Kết quả phân tích bằng mô hình mô phỏng nhiệt được thể hiện dưới dạng sơ đồ mạch nhiệt. Khảo sát phân bố nhiệt trên động cơ từ trở đồng bộ nam châm vĩnh ở một số điểm cơ bản được thể hiện trên hình 6 và 7. Kết quả phân tích nhiệt độ cho thấy nhiệt độ cao nhất ở lõi thép và dây quấn trong khoảng từ 77,1°C đến 79,8°C nằm trong

khoảng nhiệt độ cho phép vì nhiệt độ chịu lớn nhất 155°C (Cấp cách điện H, tuy nhiên an toàn giảm 1 cấp về F). Các vùng nguy cơ bị khử từ do nhiệt độ cao và dòng điện ngắn mạch được thể hiện hình sau. Để biết được tỷ lệ % về nguy cơ khử từ thì mật độ từ cảm B các vùng nguy cơ cao được kết nối về Matlab để phân tích.



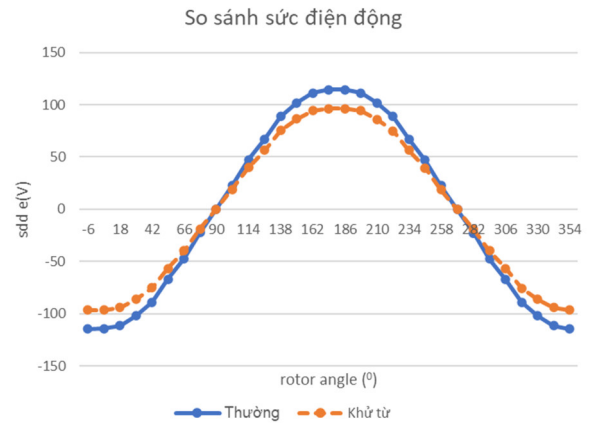
Hình 6. Kết quả phân bố nhiệt trên động cơ theo phương hướng kính



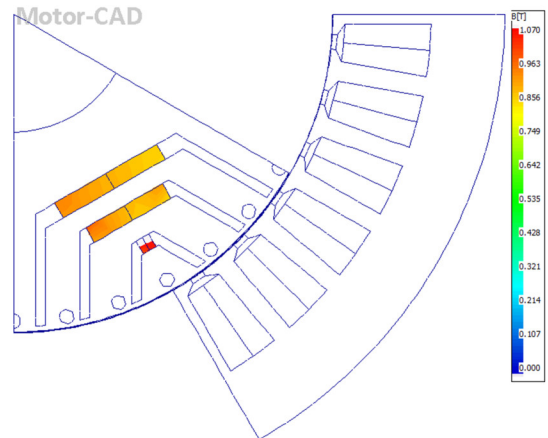
Hình 7. Kết quả phân bố nhiệt trên động cơ theo phương hướng trục

Khi động cơ đang quay ở tốc độ đồng bộ 1500vg/phút đột ngột ngắn mạch sự cố dòng điện 110A thời gian kéo dài 0,1 giây nhiệt độ nam châm 120°C thì sức điện động e giảm 110V xuống 96V khoảng 10%, có nghĩa là mật độ từ cảm ở khe hở không khí sẽ giảm 10% (hình 8). Nếu việc này kéo dài sẽ làm mật độ từ dư nam châm sẽ không trở lại như ban đầu gây giảm chất lượng đặc tính sức điện động và mô men động cơ. Trong hình 9, với mật độ từ dư ban đầu (B_r) của nam châm ở 160°C là 1,048T, một phần nhỏ của nam châm đã được khử từ nhiều, đặc biệt là ở phần ngoài lớp. Vì ban đầu nam châm có $B_r = 1,048T$, khoảng tô đậm màu đỏ có mật độ từ thông lớn hơn 1,048T là phần nam châm bị khử từ rất cao. Với các vùng không bị che khuất vẫn được từ

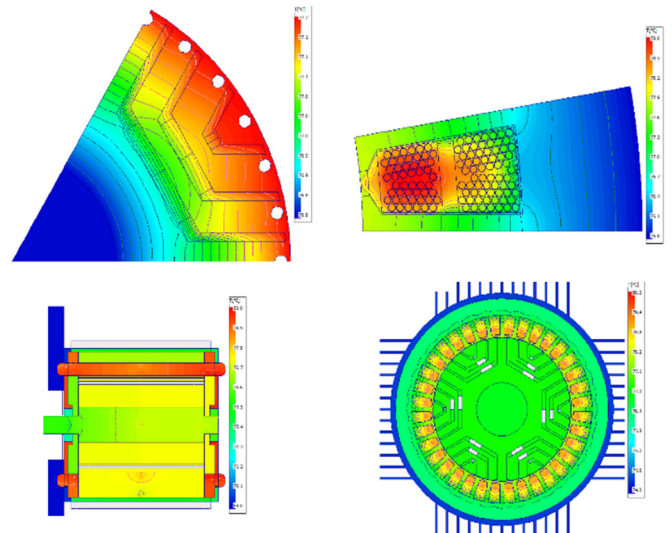
tính hoàn toàn. Hình 10 biểu diễn dự phân bố triển trên roto, rãnh stator của động cơ.



Hình 8. Kết quả sức điện động pha khi kể đến hiệu ứng khử từ



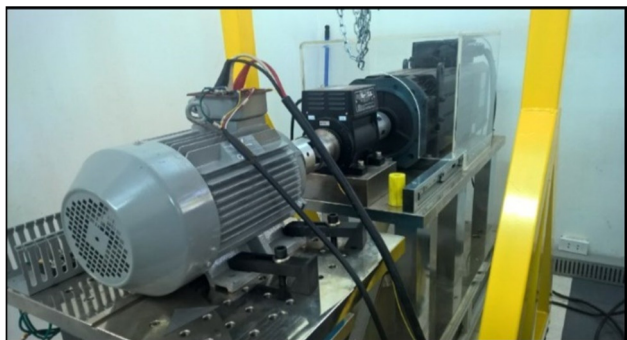
Hình 9. Phân bố vùng bị khử từ khi làm việc nhiệt độ tới hạn



Hình 10. Phân bố nhiệt độ trên roto, rãnh stator thân vỏ và toàn mặt cắt động cơ

5. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ ĐO

Để đánh giá kết quả tính toán và mô phỏng, hệ thống đo độ tăng nhiệt của động cơ được thực hiện theo tiêu chuẩn bài đo IEC 630034-2-1.



Hình 11. Hệ thống phần cứng hệ đo kiểm

Độ tăng nhiệt độ trong dây quấn stator được đo theo các mức công suất khác nhau ở các tỷ lệ tải 25%, 50%, 75% và 100% tải. Nhiệt độ động cơ tới hạn của động cơ có thể đạt được sau 2 đến 3 tiếng chạy liên tục ở chế độ tải định mức. Các số liệu đo được tự động lưu về theo form bảng thông số kỹ thuật như bảng 1.

Bảng 1. Kết quả đo kiểm động cơ các mức tải khác nhau.

| Nhiệt độ trên rotor | Tham số | C | 110 | 100 | 95 |
|---------------------|----------------|------|---------|---------|--------|
| % Tải | $P_{2,\theta}$ | % | 125% | 115% | 100% |
| Công suất đầu ra | $P_{2,\theta}$ | W | 9375,0 | 8625,0 | 7500,0 |
| Dòng điện dây | I_θ | A | 19,58 | 17,96 | 15,72 |
| Hệ số trượt | $s_{1,\theta}$ | p.u. | 0,0625 | 0,0559 | 0,0467 |
| Công suất đầu vào | $P_{1,\theta}$ | W | 11179,1 | 10166,6 | 8712,3 |
| Tổn hao sắt | P_{fe} | W | 154,7 | 154,7 | 154,7 |
| Tổn hao cánh quạt | $P_{w,0}$ | W | 87,5 | 87,5 | 87,5 |
| Tổn hao phụ | P_{ll} | W | 47,3 | 39,4 | 29,3 |
| Tổn hao phía Stator | $P_{s,\theta}$ | W | 881,1 | 741,6 | 567,7 |
| Tổn hao phía Rotor | $P_{r,\theta}$ | W | 633,5 | 518,4 | 373,1 |
| Hệ số công suất | $\cos\varphi$ | % | 86,58 | 85,81 | 84,02 |
| Hiệu suất | η | % | 83,9 | 84,8 | 86,1 |

Nhiệt độ tới hạn lớn nhất của động cơ đo được là 95°C ở tải định mức. Có thể thấy rằng sai số từ kết quả đạt được từ mô hình lý thuyết so với kết quả đạt được từ mô hình thực nghiệm nhỏ hơn 5°C.

6. KẾT LUẬN

Từ các kết quả mô phỏng và kết quả thực nghiệm rút ra một số kết luận như: phân bố nhiệt giữa mô hình mô phỏng và kết quả thực nghiệm là tương đối đồng nhất, sai lệch nhiệt độ lớn nhất là 5°C tại tâm dây quấn stato. Sai số này có thể do một số nguyên nhân như: chưa kể đến quá trình truyền nhiệt theo phương dọc trục của dây quấn stato đã bị bỏ qua. Hệ số truyền nhiệt giữa dây quấn stato và lõi thép phụ thuộc vào nhiều tham số công nghệ và vật liệu. Thuật toán tính toán hệ số này trong Motor-CAD rất phức tạp và được ghi nhận là khác biệt so với các công thức quy đổi gần đúng đã công bố và sử dụng để tính toán trong mô hình mạch nhiệt để xuất. Quá trình trao đổi nhiệt đối lưu ở vùng không khí đầu cuối nắp máy rất phức tạp, nếu chỉ lựa chọn dựa trên các hệ số kinh nghiệm thì khó đạt được độ chính xác cao. Từ kết quả bài báo có thể mở rộng để áp dụng tính cho các loại động cơ khác nhau với dải công suất từ 2,2kW đến 11kW.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Giao thông Vận tải trong đề tài mã số T2022-DT-005. Tác giả xin chân thành cảm ơn Nhà trường đã hỗ trợ kinh phí nghiên cứu thông qua đề tài này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Staton D. A., Pickering S. J, Lampard D, 2001. *Recent Advancement in the Thermal Design of Electric Motors*. SMMA 2001 Fall Technical Conference "Emerging Technologies for the Electric Motion Industry", Raleigh-Durham, North Carolina, USA.
- [2]. Dave Staton, Douglas Hawkins, Mircea Popescu, 2003. *Thermal Behaviour of Electrical Motors - An Analytical Approach*. Motor Design Ltd., Ellesmere, SY12 0EG, U.K. Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D. A., Thermal Analysis of TEFC Induction Motors, Industry Applications Conference, 38th IAS Annual Meeting, Volume 2, pp. 849-856.
- [3]. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D. A., 2004. *Thermal Sensitivity Analysis of TEFC Induction Motors*. IEE PEMD, Edinburgh.
- [4]. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D. A., 2005. *TEFC Induction Motors Thermal Models: A Parameter Sensitivity Analysis*. IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 41, Issue 3, pp. 756-763.
- [5]. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D.A., Popescu M., Cossar C., McGilp M.I., 2008. *End space heat transfer coefficient determination for different Induction Motor enclosure types*. Industry Applications Conference, Edmonton.
- [6]. Boglietti A., Cavagnino A., Pastorelli M., Staton D. A., Vagati A., 2005. *Thermal Analysis of Induction and Synchronous Reluctance Machines*. IEMDC 2005, San Antonio, USA.
- [7]. Hyunwoo Kim, Yeji Park, Seung-Taek Oh, Hyungkwan Jang, Dong-Hoon Jung, Ik Sang Jang, Ju Lee, 2020. *Study on Analysis Method of Asymmetric Permanent Magnet Assistance Synchronous Reluctance Motor Considering Magnetic Neutral Plane Shift*. IEEE Transactions on Applied Superconductivity Volume 30, Issue 4.
- [8]. Cheng Gong, Fang Deng, 2021. *Design and Optimization of a Low-Torque-Ripple High-Torque-Density Vernier Machine Using Ferrite Magnets for Low-Speed Direct-Drive Applications*. 2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC).
- [9]. D. B. Minh, L. D. Hai, T. L. Anh, V. D. Quoc, 2021. *Electromagnetic Torque Analysis of SRM 12/8 by Rotor/Stator Pole Angle*. Eng. Technol. Appl. Sci. Res., vol. 11, no. 3, pp. 7187–7190.
- [10]. D. B. Minh, V. D. Quoc, P. N. Huy, 2021. *Efficiency Improvement of Permanent Magnet BLDC Motors for Electric Vehicles*. Eng. Technol. Appl. Sci. Res., vol. 11, no. 5, pp. 7615–7618.

AUTHORS INFORMATION

Ho Manh Tien¹, Bui Minh Dinh², Trieu Viet Linh², Dang Quoc Vuong²

¹Faculty of Electrical and Electronic Engineering, University of Transport and Communications

²School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Science and Technology