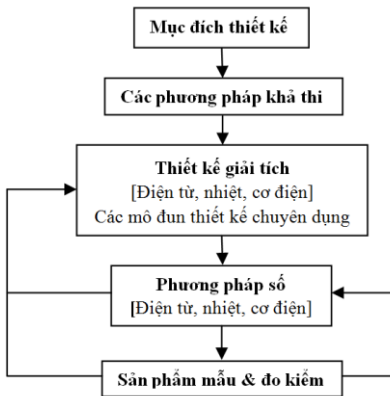


Hình 2. Mô hình mạch nhiệt trên phần mềm Motor-CAD

Motor-CAD còn có điểm mạnh nữa đó là khả năng phân tích độ nhạy với nhiều tham số. Phân tích độ nhạy rất hữu ích để được những hiểu biết sâu về quá trình truyền nhiệt trong các động cơ và mức độ ảnh hưởng của các tham số thiết kế, vật liệu để từ đó đưa ra các điều chỉnh nhằm làm mát tốt hơn.

Năm 2001, trong [1] tác giả 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 3:



Hình 3. 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, nhiệt và cơ khí 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 lợi 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.

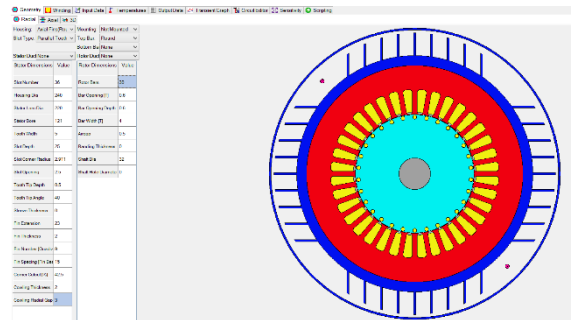
Trong [2], các tác giả đã khảo sát và phân tích hàng loạt các dự án, bài báo và công trình khoa học sử dụng phần mềm Motor-CAD để xây dựng mô hình mạch nhiệt cho các loại máy điện khác nhau, mà phổ biến nhất là các động cơ điện không đồng bộ. Có thể kể đến là các dự án của GS. Aldo Boglietti và Andrea Cavagnino ở Politecnico di Torino, Italy với nhiều bài báo được công bố [3] – [7]. Điều này cho thấy, Motor-CAD là một giải pháp tin cậy, được các chuyên gia hàng đầu trong lĩnh vực phân tích nhiệt trong các động cơ sử dụng để nghiên cứu và thiết kế làm mát cho các động cơ điện.

Trong chuyên đề này, tác giả sử dụng phần mềm Motor-CAD để tính toán, kiểm nghiệm các kết quả mô phỏng của mô hình mạch nhiệt thông số rời đã được đề xuất.

3. Mô hình mạch nhiệt cho động cơ không đồng bộ công suất 11 kW sử dụng phần mềm Motor-Cad

A. Các thông số hình học của động cơ không đồng bộ

Các thông số hình học của động cơ không đồng bộ được thiết lập theo phương ngang trục như Hình 4:



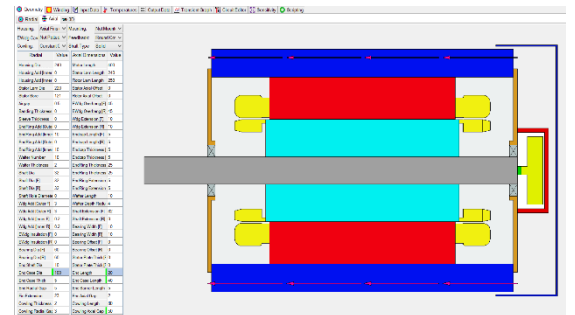
Hình 4. Các thông số hình học ngang trục của động cơ

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: 15 mm;
- + Độ dày của cánh là: 2 mm;
- + Chiều cao của cánh là: 23 mm.

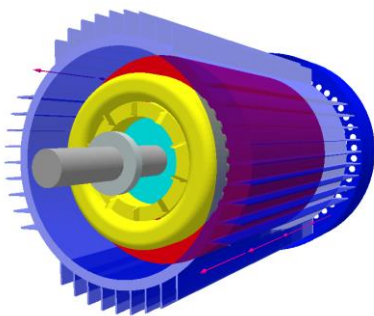
Trong phương án làm mát, có bố trí thêm nắp động cơ bao lấy phần cánh làm mát để tăng cường cho quá trình làm mát cưỡng bức bằng quạt gắn trên trục động cơ.

Sau khi thiết lập các thông số ngang trục, nhóm tác giả thiết lập các thông số hình học theo phương dọc trục của động cơ như Hình 5:



Hình 5. Các thông số hình học dọc trục của động cơ không đồng bộ

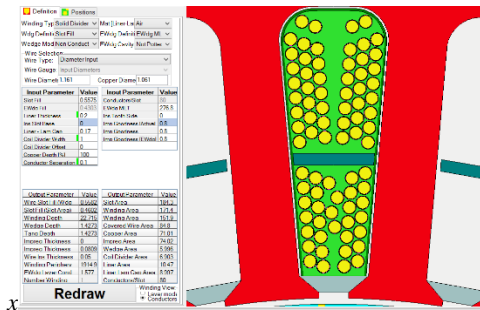
Mô hình động cơ không đồng bộ được nhóm tác giả dùng để nghiên cứu thuộc kiểu kín, làm mát bằng quạt gắn trên trục động cơ còn gọi là kiểu TEFC (Total End Fan Cooling). Dạng cấu trúc 3D của mô hình cánh tản nhiệt của động cơ được thể hiện trên Hình 6.



Hình 6. Cấu trúc 3D của cánh tản nhiệt và phần nắp động cơ không đồng bộ

B. Các thông số dây quấn động cơ không đồng bộ

Các thông số tính toán của dây quấn được nhóm tác giả đưa ra trên mô hình nhiệt:

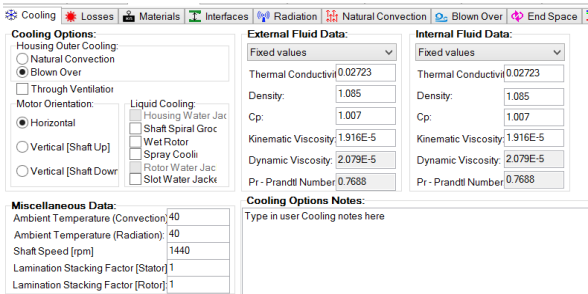


Hình 7. Các thông số dây quấn động cơ không đồng bộ

Dây quấn cho mô hình động cơ là kiểu dây quấn 2 lớp với số vòng dây của một bội 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 phân khe hở giữa cách điện và lõi thép stato, hệ số đánh giá chất lượng tấm sấy.

C. Thiết lập dữ liệu đầu vào

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. Các thông số trên được thiết lập qua bảng thiết lập được giới thiệu như Hình 8.



Hình 8. Các thiết lập về kiểu làm mát và thông số chất lưu (không khí)

Component	P[Input]	Speed[RE]	coef[A]	W/kg	P[speed]
Units	Watts	rpm		W/kg	Watts
Loss [Stator Copper]	199.2	1436	0	23.05	199.2
Loss [Rotor Cage]	246	1436	0	266.2	246
Loss [Stator Back Iron]	60.78	1436	1.5	2.167	61.03

Hình 9. Thông số về các tổn thất trong động cơ

Component	Material from	Thermal	Specific	Density	Weight	Weight	Weight	Weight
Units		W/m/C	kJ/kg/C	kg/m3	kg	kg	kg	kg
Housino [Active]	Aluminium (Alloy 195	168	0.833	2790	5.947	1	0	5.947
Housino [Front]	Aluminium (Alloy 195	168	0.833	2790	1.858	1	0	1.858
Housino [Rear]	Aluminium (Alloy 195	168	0.833	2790	1.858	1	0	1.858
Housino [Total]					9.664			9.664
Endcapp [Front]	Aluminium (Alloy 195	168	0.833	2790	0.6059	1	0	0.6059
Endcapp [Rear]	Aluminium (Alloy 195	168	0.833	2790	0.6059	1	0	0.6059
Stator Lam [Back]		58	0.46	7800	28.17	1	0	28.17
Inter Lam [Back Iron]		58	0.42	7272	0	1	0	0
Stator Lam [Tooth]		58	0.46	7800	8.964	1	0	8.964
Inter Lam [Tooth]		0.02723	1.007	1.127	0	1	0	0
Stator Lamination					37.13			37.13
Copper [Active]	Copper (Pure)	401	0.385	8933	5.481	1	0	5.481
Copper [Front]	Copper (Pure)	401	0.385	8933	1.58	1	0	1.58
Copper [Rear]	Copper (Pure)	401	0.385	8933	1.58	1	0	1.58
Copper [Total]					8.641			8.641

Hình 10. Thông số vật liệu chế tạo động cơ và vật liệu làm mát

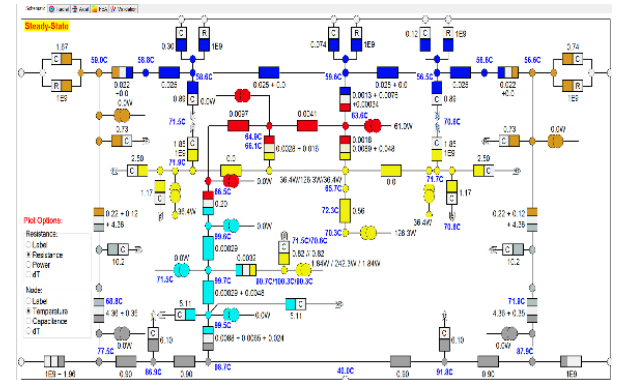
4. Kết quả phân tích mô hình

Độ tăng nhiệt độ của dây quấn bằng:

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

Độ tăng nhiệt độ của lá sắt stato:

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



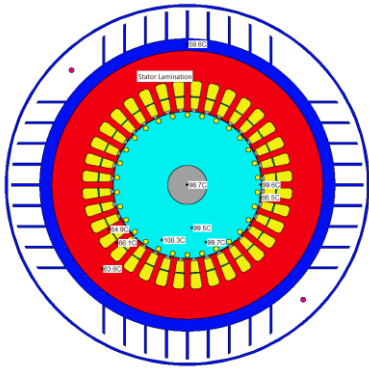
Hình 11. Kết quả phân tích mô hình mạch nhiệt trên phần mềm Motor-CAD

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 như Hình 11.

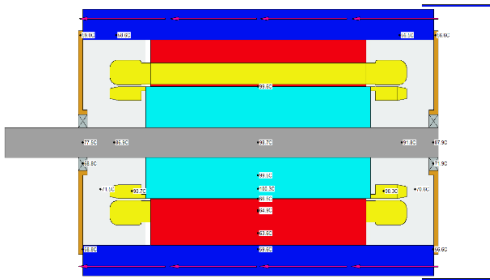
Khảo sát phân bố nhiệt trên động cơ không đồng bộ ở một số điểm cơ bản được thể hiện trên Hình 12 và Hình 13.

So sánh kết quả phân bố nhiệt tính toán bằng phần mềm Motor-CAD với kết quả xác định phân bố nhiệt bằng mô hình mạch nhiệt đã đề xuất.

Motor-CAD cũng hỗ trợ công cụ để xác định sai số mô phỏng như Hình 14 và 15:



Hình 12. Kết quả phân bố nhiệt trên động cơ theo phương hướng kính

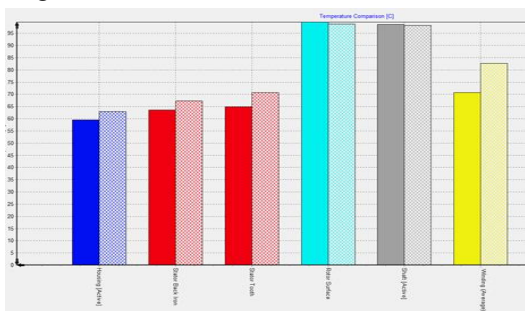


Hình 13. Kết quả phân bố nhiệt trên động cơ theo phương hướng trục

Node	Legend	Graph	Motor-CAD Temperature
Units			
Ambient	Ambient	<input checked="" type="checkbox"/>	C
Housing [Active]	Housing [Active]	<input checked="" type="checkbox"/>	82.5
Housing OH [Front]	Housing OH [Front]	<input checked="" type="checkbox"/>	75.6
Housing [Front]	Housing [Front]	<input checked="" type="checkbox"/>	73.5
Endcap [Front]	Endcap [Front]	<input checked="" type="checkbox"/>	72.8
Flange Plate	Flange Plate	<input checked="" type="checkbox"/>	72.7
Housing OH [Rear]	Housing OH [Rear]	<input checked="" type="checkbox"/>	77.2
Housing [Rear]	Housing [Rear]	<input checked="" type="checkbox"/>	76.2
Endcap [Rear]	Endcap [Rear]	<input checked="" type="checkbox"/>	75.3
Stator Back Iron	Stator Back Iron	<input checked="" type="checkbox"/>	97.6
Stator Tooth	Stator Tooth	<input checked="" type="checkbox"/>	111.7
Rotor Surface	Rotor Surface	<input checked="" type="checkbox"/>	118.0
Magnet	Magnet	<input checked="" type="checkbox"/>	118.4
Rotor Back Iron	Rotor Back Iron	<input checked="" type="checkbox"/>	118.6
Shaft [Active]	Shaft [Active]	<input checked="" type="checkbox"/>	118.3
Shaft [Front]	Shaft [Front]	<input checked="" type="checkbox"/>	109.6
Shaft [Rear]	Shaft [Rear]	<input checked="" type="checkbox"/>	117.7
Encoder	Encoder	<input checked="" type="checkbox"/>	65.3
Enc Housing	Enc Housing	<input checked="" type="checkbox"/>	63.7
Foot Mounted Base	Foot Mounted Base	<input checked="" type="checkbox"/>	79.6
Shaft OHang [F]	Shaft OHang [F]	<input checked="" type="checkbox"/>	113.6
Shaft OHang [R]	Shaft OHang [R]	<input checked="" type="checkbox"/>	117.4
End Space [F]	End Space [F]	<input checked="" type="checkbox"/>	110.9
End Space [R]	End Space [R]	<input checked="" type="checkbox"/>	111.5
EWdg [F]	EWdg [F]	<input checked="" type="checkbox"/>	114.2
EWdg [R]	EWdg [R]	<input checked="" type="checkbox"/>	114.2
Airgap Sleeve	Airgap Sleeve	<input checked="" type="checkbox"/>	115.6

Hình 14. Kết quả kiểm tra sai số giữa mô hình mạch nhiệt trên Motor-CAD và mô hình mạch nhiệt đề xuất

Dạng đồ thị cột như sau:



Hình 15. Kết quả so sánh về sai số nhiệt độ giữa mô hình mạch nhiệt trên Motor-CAD và mô hình mạch nhiệt đề xuất

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 như Hình 16.



Hình 16. 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 Hình 17.

6.1.3.2.3 Đặc tính tải		Điện trở dây quấn trước khi đo				R	Ω	0.6109	
Công suất định mức	%	124%	114%	100%	76%	51%	25%		
Mô men	T	Nm	90.060	82.580	71.780	54.040	35.980	17.960	
Công suất đầu vào	P _i	W	15464.0	14110.0	12186.0	9230.0	6232.0	3332.0	
Dòng điện Stator	I	A	27.115	24.865	21.719	17.130	12.871	9.529	
Tốc độ làm việc	n	min ⁻¹	1448.0	1453.0	1460.8	1471.8	1482.0	1491.4	
Điện áp đầu cực	U	V	380.8	380.8	381.1	380.7	380.4	380.7	
Tần số	f	Hz	50.05	50.05	50.05	50.05	50.05	50.05	
Nhiệt độ dây quấn	θ _w	°C	95.9	96.7	95.5	93.2	90.2	86.5	
			Điện trở dây quấn sau khi đo				R	Ω	0.6166

Hình 17. Bảng kết quả đo kiểm

Nhiệt độ tới hạn lớn nhất của động cơ đo được là 96,7°C. So với kết quả mô phỏng trên Hình 13 thì sai số giữa mô phỏng và đo thực tế là 5°C. Sai số này là chấp nhận được.

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 thực quy đổi gần đúng đã công bố và sử dụng để tính toán trong mô hình mạch nhiệt đề 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 áp dụng tính cho các loại động cơ khác nhau với công suất từ 2,2 kW đến 11 kW.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Chương trình khoa học và công nghệ trọng điểm cấp quốc gia - Bộ Khoa học và Công nghệ thông qua đề tài Mã số KC.05/16-20.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Staton, D. A., Pickering, S. J., Lampard, D., *Recent Advancement in the Thermal Design of Electric Motors*, SMMA 2001 Fall Technical Conference "Emerging Technologies for the Electric Motion Industry", 3-5 Oct 2001, Raleigh-Durham, North Carolina, USA.
- [2] Dave Staton, Douglas Hawkins and Mircea Popescu, *Thermal Behaviour of Electrical Motors – An Analytical Approach*, Motor Design Ltd., Ellesmere, SY12 0EG, U.K.
- [3] Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D. A., *Thermal Analysis of TEFC Induction Motors*, Industry Applications Conference, 38th IAS Annual Meeting, Volume 2, 12-16 Oct. 2003, pp. 849-856.
- [4] Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D. A., *Thermal Sensitivity Analysis of TEFC Induction Motors*, IEE PEMD, Edinburgh, April 2004.
- [5] Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D. A., "TEFC Induction Motors Thermal Models: A Parameter Sensitivity Analysis", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Volume 41, Issue 3, May-June 2005, pp. 756-763.
- [6] Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D.A., Popescu, M., Cossar, C., McGilp, M.I., 'End space heat transfer coefficient determination for different Induction Motor enclosure types', Industry Applications Conference, 2008. Edmonton, October 2008.
- [7] Boglietti, A., Cavagnino, A., Pastorelli, M., Staton, D. A., Vagati, A., *Thermal Analysis of Induction and Synchronous Reluctance Machines*, IEMDC 2005, San Antonio, USA, May 2005.

(BBT nhận bài: 22/12/2017, hoàn tất thủ tục phản biện: 21/03/2018)