

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG VÀ THỬ NGHIỆM ĐO NHIỆT MẪU THỬ ĐỘNG CƠ SERVO

THERMAL SIMULATION AND TESTING MEASUREMENT OF SERVOMOTOR PROTOTYPE

Nguyễn Đức Bắc^{1,2,*},
Trần Tuấn Vũ¹, Nguyễn Thế Công¹

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu mô phỏng và thử nghiệm đo nhiệt độ của động cơ servo không đồng bộ. Kết quả so sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm trên một số điểm hoạt động, chứng minh động cơ thiết kế đảm bảo các vấn đề về nhiệt. Kết quả này khẳng định tính đúng đắn của mô hình mẫu thiết kế ảo trong thiết kế động cơ servo không đồng bộ thông qua mô phỏng nhiệt - điện từ, thử nghiệm mẫu thử.

Từ khóa: Động cơ servo, mô hình nhiệt, mẫu thử, thử nghiệm, cảm biến nhiệt, đo nhiệt.

ABSTRACT

This paper studies thermal simulation and testing measurement of asynchronous servomotor. The comparison results between thermal simulation and experiment of different operating points confirm that the designed servomotor ensures thermal behaviours. This result confirms the correctness of the virtual model in the design of asynchronous servomotor through thermo-electromagnetic simulation, prototype testing.

Keywords: Servomotor, thermal model, prototype, testing, thermal sensor, thermal measurement.

¹Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

²Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

*Email: bacnd@nuce.edu.vn

Ngày nhận bài: 19/10/2021

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 19/12/2021

Ngày chấp nhận đăng: 27/12/2021

1. GIỚI THIỆU

Động cơ servo hoạt động trong một dải tốc độ rộng - mômen xoắn cao, động lực học nhanh, định vị với độ chính xác cao, thời gian tăng tốc ngắn, trọng lượng thấp, thiết kế nhỏ gọn. Vì vậy, việc giảm thiểu khối lượng ở bước thiết kế không chỉ giúp giảm chi phí sản xuất, mà còn để có mômen quán tính nhỏ, trong khi vấn đề về nhiệt và các đặc tính yêu cầu kỹ thuật của động cơ được đảm bảo.

Từ trước đến nay, việc phân tích nhiệt trong động cơ ít nhận được sự quan tâm hơn so với phân tích điện từ [1]. Minh chứng cho điều đó thể hiện trong số lượng các ấn

phẩm liên quan được công bố. Trong thiết kế máy điện hiện đại, với yêu cầu ngày càng cao về việc tối ưu kích thước, tăng hiệu suất và giảm giá thành, khai thác các cấu trúc và vật liệu mới thì cũng cần phải phân tích nhiệt đến mức tương tự như phân tích điện từ. Quá trình nhiệt và điện từ liên quan và ảnh hưởng lẫn nhau, ví dụ như tổn hao phụ thuộc rất lớn vào nhiệt độ và ngược lại [2].

Phân tích nhiệt trong động cơ điện có thể chia thành hai loại cơ bản: phương pháp phân tích mạch tập trung và phương pháp số. Phương pháp phân tích mạch [3-5] có ưu điểm tính toán nhanh, tuy nhiên đòi hỏi phải xác định được chính xác mô hình mạch các đường truyền nhiệt chính. Ở dạng cơ bản, việc phân tích mạng truyền nhiệt bao gồm dẫn nhiệt, đối lưu và bức xạ của các bộ phận trong động cơ. Phương pháp số [6] cho phép có thể mô hình hóa bất cứ bộ phận nào, tuy nhiên đòi hỏi việc thiết lập mô hình phức tạp và thời gian tính toán kéo dài.

Dựa trên kết quả phân tích nhiệt, giúp tối ưu trong quá trình thiết kế tản nhiệt cho động cơ [7]. Mô hình nhiệt được phân tích tương tự như mô hình mạch điện với việc tính toán các điện trở nhiệt, đối lưu và bức xạ cho các bộ phận khác nhau của kết cấu động cơ [8]. Các nút được tự động đặt tại các điểm quan trọng trên mặt cắt của động cơ, được liên kết bởi các điện trở dẫn nhiệt, đối lưu và bức xạ. Nội dung của bài báo gồm 3 phần, trong đó phần 2 đưa ra mô hình nhiệt của động cơ servo mẫu thử theo phương pháp phân tích mạch tập trung. Sử dụng các cảm biến đo nhiệt gắn trực tiếp vào các bộ phận trong động cơ. Kết quả thử nghiệm đo nhiệt được so sánh với kết quả mô phỏng từ mô hình thể hiện trong phần 3. Phần 4 là các kết luận trong nghiên cứu của bài báo.

2. MÔ HÌNH NHIỆT CỦA ĐỘNG CƠ

Nguồn nhiệt trong động cơ chủ yếu là do tổn hao trong dây quấn và lõi sắt. Nếu cần đi sâu vào quá trình phát nhiệt trong dây quấn và lõi sắt thì phải nghiên cứu sự dẫn nhiệt và truyền nhiệt theo nhiều chiều. Tuy nhiên, trong thực tế việc tính toán nhiệt chỉ cho những kết quả gần đúng. Chính vì vậy để đơn giản việc tính toán, giả thiết rằng dây quấn, lõi sắt stator, thanh dẫn rotor là những khối có tính dẫn nhiệt rất lớn, nghĩa là những khối đẳng nhiệt [9].

+) Phát nóng và làm nguội trong động cơ

Cân bằng năng lượng trong khoảng thời gian dt có dạng:

$$Qdt = Cd\theta + \alpha \cdot S \cdot \theta dt \tag{1}$$

Trong đó:

Q: Nhiệt lượng

Cdθ: Nhiệt lượng đốt nóng.

C: Nhiệt dung riêng.

α: Hệ số tản nhiệt của bề mặt.

θ: Độ chênh nhiệt độ giữa bề mặt động cơ với môi trường xung quanh.

Khi động cơ phát nóng đến mức độ nào đó thì nhiệt độ đạt bão hòa (θ = θ∞ = const).

Độ tăng nhiệt do đốt nóng:

$$\theta = \theta_0 + (\theta_\infty - \theta_0)(1 - e^{-1/T}) \tag{2}$$

Trong đó:

θ₀: Độ tăng nhiệt ban đầu.

T: Hằng số phát nóng.

+) Độ chênh nhiệt độ theo chiều dày lớp cách điện

Nhiệt lượng Q truyền qua chiều dày lớp cách điện được thể hiện như công thức:

$$Q = \theta_c \frac{S_c \cdot \lambda_c}{\delta_c} \tag{3}$$

Trong đó:

θ_c: Độ chênh nhiệt độ.

S_c: Tiết diện của đường truyền dòng nhiệt.

λ_c: Hệ số dẫn nhiệt của vật liệu cách điện.

δ_c: Chiều dày lớp cách điện.

Nhiệt dẫn tổng của nhiều lớp cách điện:

$$\lambda_c = \frac{\delta_c}{\frac{\delta_{c1}}{\lambda_{c1}} + \frac{\delta_{c2}}{\lambda_{c2}} + \dots + \frac{\delta_{cn}}{\lambda_{cn}}} \tag{4}$$

Trong đó:

δ₁, δ₂, ..., δ_n: Chiều dày từng lớp cách điện.

λ₁, λ₂, ..., λ_n: Hệ số dẫn nhiệt của từng lớp cách điện tương ứng.

+) Tản nhiệt trên bề mặt

Nhiệt lượng tản ra trên bề mặt động cơ do bức xạ và đối lưu được xác định:

$$Q = \alpha \cdot S_\alpha \cdot \theta_\alpha \tag{5}$$

Trong đó:

θ_α = θ - θ₀: Độ chênh nhiệt của bề mặt so với môi trường.

θ, θ₀: Nhiệt độ bề mặt động cơ và nhiệt độ môi trường.

Q: Nhiệt lượng phát ra trong một giây.

α: Hệ số tản nhiệt trung bình bề mặt bức xạ và đối lưu.

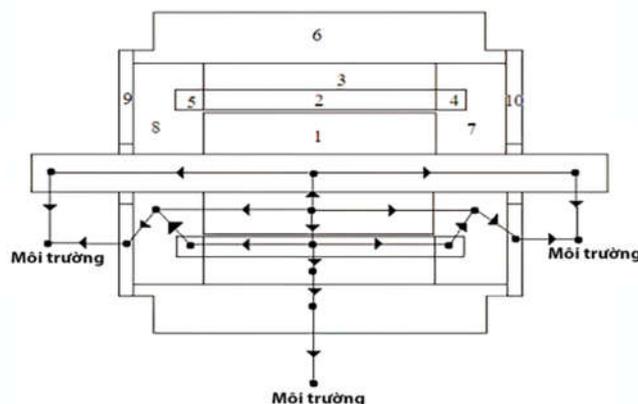
Độ chênh nhiệt giữa bề mặt tản nhiệt với môi trường:

$$\theta_c = \frac{Q}{\alpha \cdot S} = q \frac{1}{\alpha} \tag{6}$$

Trong đó, q: Dòng nhiệt qua đơn vị bề mặt tản nhiệt.

Do có sự tương đồng giữa các mô hình mạch điện và mạch nhiệt nên sự truyền nhiệt trong động cơ có thể được biểu diễn dưới dạng một mô hình mạch, trong đó các nhiệt trở tương ứng với điện trở, dòng nhiệt tương ứng với dòng điện và độ chênh nhiệt tương ứng với điện áp [10, 11].

Mô hình nhiệt của động cơ [12-14] được xây dựng dựa trên các hướng chính của dòng nhiệt trong động cơ như trong hình 1.



Hình 1. Hướng truyền nhiệt trong động cơ [10]

- | | |
|-------------------------|----------------------------|
| 1. Thanh dẫn rotor | 6. Vỏ |
| 2. Dây quấn stator | 7. Không khí đầu dây sau |
| 3. Lõi sắt stator | 8. Không khí đầu dây trước |
| 4. Đầu dây stator sau | 9. Nắp trước |
| 5. Đầu dây stator trước | 10. Nắp sau |

Các hướng của dòng nhiệt:

- Dòng nhiệt từ các thanh dẫn rotor truyền qua khe hở không khí, cuộn dây stator đến lõi sắt stator, đến môi trường xung quanh và qua vỏ bằng đối lưu.

- Dòng nhiệt từ đầu cuộn dây stator và các thanh dẫn rotor hướng về phía không khí ở nắp, đến môi trường xung quanh và qua nắp bằng đối lưu.

Mô hình nhiệt của động cơ [15-17] chứa các thành phần sau:

- Nguồn nhiệt: được sinh ra trong động cơ do các tổn hao trong lõi thép, dây quấn và tổn hao ma sát trên trục (bỏ qua tổn hao điện môi do các chi tiết cách điện đặt trong từ trường biến thiên).

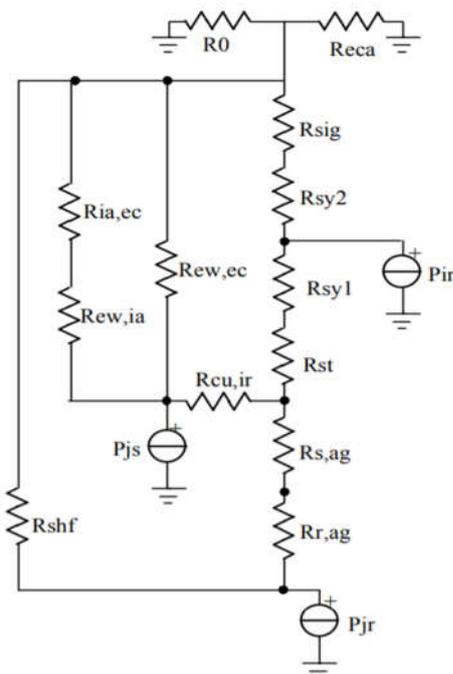
- Nhiệt trở: kết nối giữa hai nút lân cận, điện trở nhiệt cản trở sự truyền nhiệt từ thành phần này qua thành phần khác, phụ thuộc vào kích thước hình học và tính chất vật liệu.

- Nhiệt dung: phụ thuộc vào đặc tính của vật liệu.

Trong những năm qua, mô hình nhiệt được đề xuất bởi Mellor và Turner [18], là mô hình tham chiếu để nghiên cứu các vấn đề về nhiệt trong động cơ. Đây là mô hình dựa vào sự phân chia động cơ thành nhiều phần được giả định có cùng xu hướng tản nhiệt, bằng việc mô hình hóa động cơ thành các hình trụ rỗng đồng tâm với trục rotor (hình 2).

Trong mô hình Mellor và Turner, để tính toán nhiệt trở các thành phần của động cơ, các giả thuyết sau được giả định:

- + Động cơ đối xứng qua trục (đối xứng xuyên tâm).
- + Bỏ qua sự ảnh hưởng của việc phân bố nhiệt không đồng đều trong động cơ do ảnh hưởng của quạt gió.
- + Các mô hình trục đều đối xứng nhiệt theo hướng xuyên tâm.
- + Các nguồn nhiệt trong động cơ được phân bố đồng đều.
- + Dòng nhiệt truyền trong động cơ truyền theo hướng dọc trục chỉ tồn tại trong trục động cơ.
- + Khi thay đổi tốc độ động cơ, nhiệt trở giữa stator và khung vỏ máy không thay đổi.



Hình 2. Mô hình nhiệt Mellor and Turner [18]

- Pir - Tổn hao sắt stator
- Pjs - Tổn hao đồng stator
- Pjr - Tổn hao đồng rotor
- Rsy1, Rsy2 - Nhiệt trở của stator
- Rs,ag - Nhiệt trở giữa stator và khe hở không khí
- Rr,ag - Nhiệt trở giữa rotor và khe hở không khí
- Reca - Nhiệt trở của khe hở không khí
- Rst - Nhiệt trở của răng stator
- Rshf - Nhiệt trở của trục
- Rew,ec - Nhiệt trở giữa phần nối stator với khung vỏ máy
- Rew,ia - Nhiệt trở giữa phần nối stator và không khí bên trong máy
- Ria,ec - Nhiệt trở giữa không khí trong máy và nắp động cơ
- Rcu,ir - Nhiệt trở giữa dây quấn stator và lõi sắt stator
- R0 - Nhiệt trở của khung vỏ máy với không khí môi trường
- Rsig - Nhiệt điện trở quy đổi của khoảng cách giữa lõi stator và khung vỏ máy

Việc tính toán và lựa chọn phương thức làm mát ảnh hưởng rất lớn đến nhiệt độ của động cơ, vì vậy từ việc tính nhiệt và chọn kết cấu làm mát cho động cơ phải được tiến hành song song và qua lại với nhau để đảm bảo nhiệt độ làm việc của máy. Kết quả kiểm tra mô phỏng nhiệt, nếu đạt sẽ cho ra kết quả thiết kế kết cấu làm mát cho động cơ, nếu không đạt sẽ tối ưu thiết kế làm mát và tiếp tục mô phỏng nhiệt.

Hình 3 cho thấy mô hình mạng nhiệt được xây dựng của động cơ servo mẫu thử. Đây là sơ đồ được sử dụng để phân tích nhiệt ở trạng thái ổn định. Phần nhiệt bức xạ (ký hiệu bằng chữ R) và đối lưu (ký hiệu bằng nhiệt dung C) ra ngoài môi trường. Các giá trị nhiệt trở trong mô hình được tính từ các dữ liệu như kích thước động cơ, vật liệu của động cơ. Công suất nhiệt được kết nối với các nút trong sơ đồ. Mỗi giá trị dung nhiệt được tính từ công suất nhiệt và trọng lượng riêng của các thành phần trong động cơ.

3. KẾT QUẢ ĐO NHIỆT TRONG ĐỘNG CƠ SERVO

Phân tích và giải quyết vấn đề nhiệt cho động cơ là một việc rất quan trọng, đặc biệt động cơ servo hoạt động tại nhiều điểm tốc độ - mômen khác nhau. Thiết kế phải đảm bảo nhiệt độ dây quấn không được vượt quá giới hạn của lớp cách điện được chọn. Động cơ servo mẫu thử sử dụng phương thức làm mát tự nhiên, nắp hở [2]. Tiến hành mô phỏng nhiệt trong động cơ ở chế độ làm việc liên tục và ngắn hạn, được so sánh với kết quả thực nghiệm đo nhiệt tại các điểm tốc độ khác nhau.

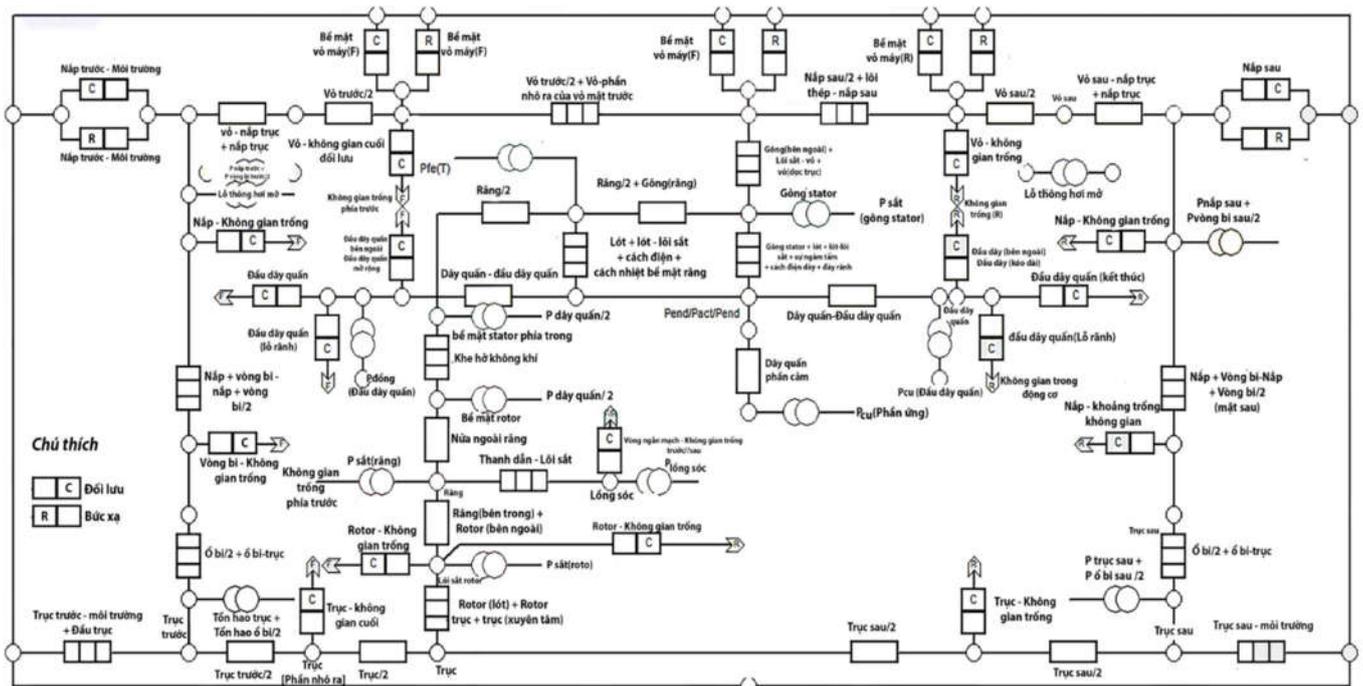
Động cơ servo được thiết kế và chế tạo mẫu thử [19] có các thông số chính như trong bảng 1.

Bảng 1. Kết quả một số thông số chính của động cơ servo mẫu thử

Thông số	Đơn vị	Giá trị
Đường kính ngoài vỏ động cơ	mm	143
Chiều dài vỏ động cơ	mm	180
Số rãnh của stator/rotor	-	36 / 48
Khối lượng động cơ	kg	12,5
Số cực	-	6
Số vòng dây quấn trong 1 rãnh	-	105
Điện áp dây cực đại	V	380
Dòng điện cực đại	A	2,99
Mômen cực đại	N.m	15

Mặt cắt mô phỏng 3D của động cơ servo mẫu thử và vị trí đặt các cảm biến được thể hiện như hình 4. Sáu cảm biến của hệ thống thử nghiệm được sử dụng để đo nhiệt độ tại dây quấn stator, nắp, vỏ động cơ và nhiệt độ môi trường. Trong đó, 1 cảm biến dùng để đo nhiệt độ môi trường, 2 cảm biến đo nhiệt dây quấn stator, 2 cảm biến đo nhiệt nắp, 1 cảm biến đo nhiệt vỏ động cơ.

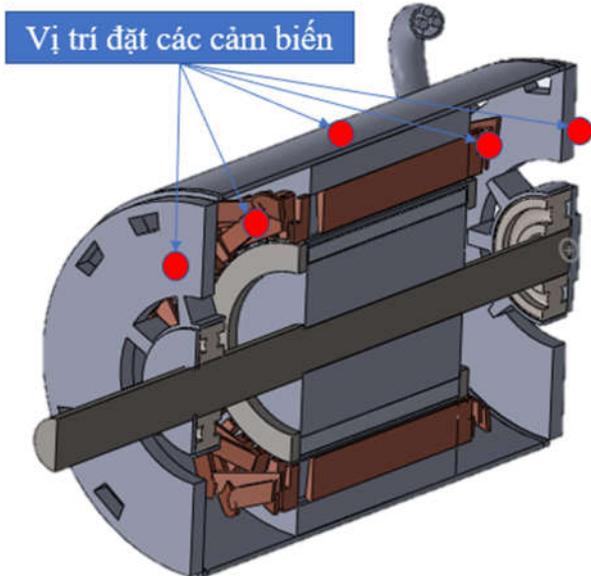
Động cơ được chế tạo là động cơ servo không đồng bộ 3 pha rotor lồng sóc, cách điện cấp F. Mạch từ được chế tạo từ các lá thép sử dụng phương pháp cắt lazer. Dây quấn



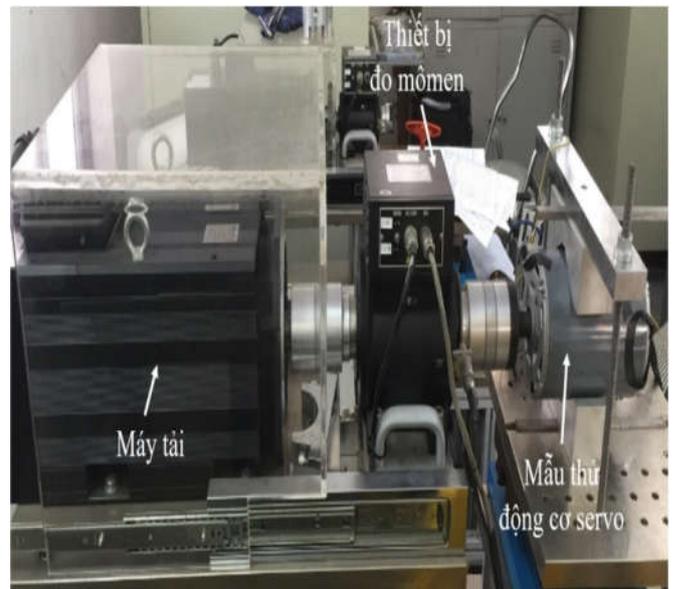
Hình 3. Mô hình nhiệt động cơ

stator là dây quấn một lớp, được quấn thủ công, lồng sóc rotor được đúc bằng vật liệu nhôm. Động cơ được thử nghiệm tại hệ thống test-bench (hình 5) của tại Công ty Cổ phần chế tạo Điện cơ Hà Nội (HEM), thiết bị thử nghiệm được sử dụng để đo các thông số và nhiệt tại một số điểm hoạt động. Các thông số kỹ thuật của hệ thống thử nghiệm động cơ:

- Mômen/công suất cực đại là 50N.m/15kW.
- Điện áp điều chỉnh được trong khoảng [0 : 380V].
- Tần số điều chỉnh trong khoảng [30 : 60Hz].

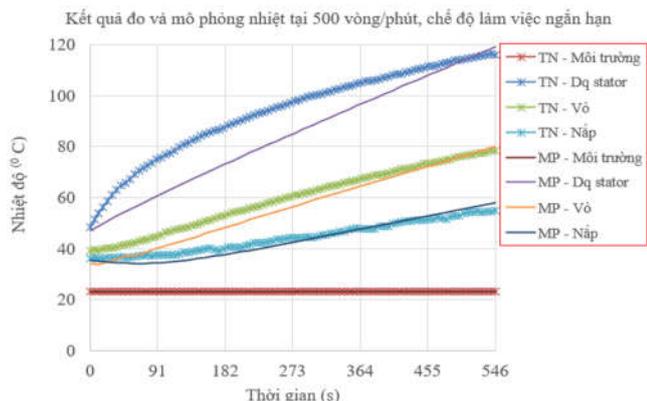


Hình 4. Mặt cắt mô phỏng 3D động cơ servo mẫu thử



Hình 5. Thử nghiệm mẫu thử động cơ trên hệ thống đo test-bench

Trong quá trình thử nghiệm, khi nhiệt độ tăng mômen của động cơ sẽ giảm. Vì vậy, cần điều chỉnh tần số nguồn cấp để giữ mômen không đổi trong quá trình đo nhiệt. Kết quả đo nhiệt độ của động cơ theo thời gian tại điểm làm việc ngắn hạn ở tốc độ $n = 500$ vòng/phút, điện áp $U = 360V$, tần số $f = 32Hz$ được so sánh với kết quả mô phỏng thể hiện như hình 6. Do kết quả đo nhiệt ở 2 cảm biến đặt tại dây quấn stator và 2 cảm biến đặt ở nắp động cơ là tương đương nhau nên trong các đặc tính nhiệt, chỉ trình bày 4 kết quả đo nhiệt bao gồm nhiệt độ môi trường, dây quấn stator, vỏ và nắp động cơ.



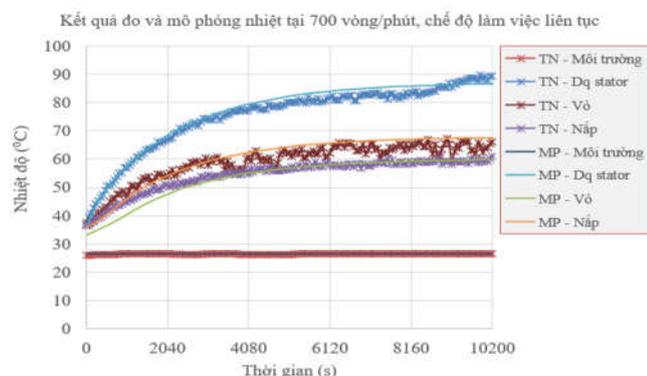
Hình 6. Kết quả đo nhiệt và mô phỏng tại 500 vòng/phút, chế độ làm việc ngắt hạn (TN: Thực nghiệm, MP: Mô phỏng)

Bảng so sánh kết quả đo nhiệt độ (bảng 2) của động cơ giữa thực nghiệm và mô phỏng tại điểm làm việc ngắt hạn ở tốc độ $n = 500$ vòng/phút trong khoảng thời gian ngắt hạn. Nhiệt độ môi trường là $23,3^{\circ}\text{C}$, cho động cơ thử nghiệm chạy khi nhiệt độ dây quấn stator (dq stator) đạt $115,9^{\circ}\text{C}$ thì dừng, kết quả ghi lại thời gian chạy ngắt hạn đạt 546s (9,1 phút). Khi đó, so sánh với kết quả mô phỏng, nhiệt độ ở dây quấn stator đạt $118,1^{\circ}\text{C}$, sai lệch với đo thực nghiệm là 1,9%. Tương tự kết quả so sánh nhiệt giữa thực nghiệm và mô phỏng của một số bộ phận trong động cơ như vỏ, nắp, sai lệch nhỏ hơn 5%. Tại một số thời điểm ngắt hạn khác (hình 6), sai lệch nhiệt giữa thực nghiệm và mô phỏng của dây quấn lớn nhất là 18%. Đó là nhược điểm của mô hình, cần được tiếp tục xem xét và nghiên cứu.

Bảng 2. Kết quả so sánh giữa mô phỏng nhiệt và thực nghiệm tại tốc độ $n = 500$ vòng/phút, chế độ làm việc ngắt hạn

Kết quả nhiệt	Nhiệt độ ngắt hạn ($^{\circ}\text{C}$)			
	Môi trường	Dq stator	Vỏ động cơ	Nắp động cơ
Thử nghiệm	23,2	115,9	78,4	55,0
Mô phỏng	23,2	118,1	79,5	57,7
Sai lệch (%)	0,0	1,9	1,3	4,6

Kết quả đo thử nghiệm và mô phỏng nhiệt độ bão hòa của động cơ tại điểm làm việc liên tục ở tốc độ $n = 700$ vòng/phút, điện áp $U = 300\text{V}$, tần số $f = 38,6\text{Hz}$ được thể hiện ở hình 7.



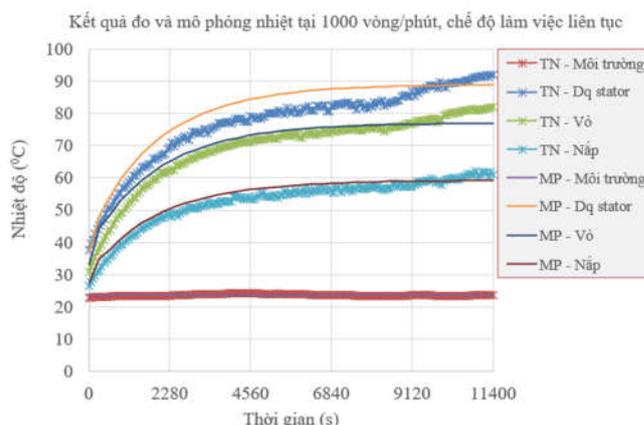
Hình 7. Kết quả đo nhiệt và mô phỏng tại 700 vòng/phút, chế độ làm việc liên tục (TN: Thực nghiệm, MP: Mô phỏng)

Bảng so sánh kết quả đo nhiệt độ của động cơ giữa thực nghiệm và mô phỏng tại 700 vòng/phút (bảng 3), thời gian nhiệt bão hòa là 10200s (2,83h). Nhiệt độ môi trường là $26,5^{\circ}\text{C}$, nhiệt độ bão hòa ở dây quấn stator khi đo thực nghiệm là $89,5^{\circ}\text{C}$, so với mô phỏng là $89,2^{\circ}\text{C}$, sai lệch 0,3%. Tương tự kết quả so sánh nhiệt giữa thực nghiệm và mô phỏng của vỏ và nắp động cơ, sai lệch đều nhỏ hơn 5%.

Bảng 3. Kết quả so sánh giữa mô phỏng nhiệt và thực nghiệm tại tốc độ $n = 700$ vòng/phút, chế độ làm việc liên tục

Kết quả nhiệt	Nhiệt độ bão hòa ($^{\circ}\text{C}$)			
	Môi trường	Dq stator	Vỏ động cơ	Nắp động cơ
Thử nghiệm	26,5	89,5	66,2	58,2
Mô phỏng	26,5	89,8	67,6	59,7
Sai lệch (%)	0,0	0,3	2,0	2,5

Kết quả đo thử nghiệm và mô phỏng nhiệt độ bão hòa của động cơ tại điểm làm việc liên tục ở tốc độ $n = 1000$ vòng/phút, điện áp $U = 380\text{V}$, tần số $f = 54\text{Hz}$ được thể hiện ở hình 8.



Hình 8. Kết quả đo nhiệt và mô phỏng tại 1000 vòng/phút, chế độ làm việc liên tục (TN: Thực nghiệm, MP: Mô phỏng)

Bảng so sánh kết quả đo nhiệt độ của động cơ giữa thực nghiệm và mô phỏng tại 1000 vòng/phút (bảng 4), thời gian nhiệt bão hòa là 11400s (3,16h). Nhiệt độ môi trường là $23,7^{\circ}\text{C}$, nhiệt độ bão hòa ở dây quấn stator khi đo thực nghiệm là $91,9^{\circ}\text{C}$, so sánh với mô phỏng là 89°C , sai lệch 3,2%. Tương tự kết quả so sánh nhiệt giữa thực nghiệm và mô phỏng của vỏ và nắp động cơ, sai lệch đều nhỏ hơn 5%.

Bảng 4. Kết quả so sánh giữa mô phỏng nhiệt và thực nghiệm tại tốc độ $n = 1000$ vòng/phút, chế độ làm việc liên tục

Kết quả nhiệt	Nhiệt độ bão hòa ($^{\circ}\text{C}$)			
	Môi trường	Dq stator	Vỏ động cơ	Nắp động cơ
Thử nghiệm	23,7	91,9	81,9	61,0
Mô phỏng	23,7	89,0	77,0	59,3
Sai lệch (%)	0,0	3,2	5,0	2,9

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả phân tích nhiệt độ trong động cơ servo mẫu thử. Sáu cảm biến của hệ thống test-

bench của Công ty Cổ phần chế tạo Điện cơ Hà Nội (HEM) được sử dụng để đo nhiệt độ tại dây quấn stator, nắp và vỏ động cơ. Kết quả so sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm, nhiệt độ bão hòa ở chế độ liên tục với sai lệch nhỏ hơn 5%. Tại tốc độ 700 và 1000 vòng/phút, chế độ làm việc liên tục, thời gian khi nhiệt bão hòa tương ứng là 2,83h và 3,16h. Kết quả trên khẳng định mẫu thử động cơ servo đáp ứng yêu cầu cách điện khi hoạt động (động cơ mẫu thử chế tạo sử dụng cách điện cấp F). Việc áp dụng mô phỏng nhiệt - điện từ trong quá trình thiết kế, giúp giảm yêu cầu về việc sản xuất nguyên mẫu và thử nghiệm, vì vậy giảm thời gian nghiên cứu chế tạo sản xuất và chi phí.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Aldo Boglietti, Andrea Cavagnino, David Staton, Martin Shanel, Markus Mueller, Carlos Mejuto, 2009. *Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 3, 871-882.
- [2]. Nguyen Duc Bac, Tran Tuan Vu, Nguyen The Cong, Nguyen Truong Giang, 2021. *Thermal simulations, compare cooling structures for asynchronous servomotor*. Journal of Military Science and Technology, Military Science and Technology, vol. 71, 63-70.
- [3]. D. A. Staton, A. Cavagnino, 2008. *Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Models*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 10, 3509-3516.
- [4]. A. Boglietti, A. Cavagnino, 2007. *Analysis of the Endwinding Cooling Effects in TEFC Induction Motors*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 43, No. 5, 1214 – 1222.
- [5]. Arbab N., Wang W., Lin C., Hearron J., Fahimi B., 2015. *Thermal modeling and analysis of a double-stator switched reluctance motor*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 30, No 3, 1209-1217.
- [6]. D. Staton, S. J. Pickering, D. Lampard, 2001. *Recent advancement in the thermal design of electric motors*. in Proc. SMMA - Fall Tech. Conf., Durham, 3-5.
- [7]. Roffi M., Ferreira F. E., De Almeida A. T, 2017. *Comparison of different cooling fan designs for electric motors*. IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 1-7.
- [8]. P.W. Han, J.H. Choi, D.J. Kim, Y.D. Chun, D. Bang, 2015. *Thermal Analysis of High Speed Induction Motor by Using Lumped-Circuit Parameters*. Journal of Electrical Engineering and Technology, Vol. 10, No. 5, 2040-2045.
- [9]. Stephen Whitaker, 2011. *Fundamental Principles of Heat Transfer*. Pergamon Press.
- [10]. Omar Badran, Hussain Sarhan, 2006. *Thermal performance analysis of induction motor*. Al-Balqa University Faculty of Engineering Technology Jordan, 75-85.
- [11]. Ying Huai, 2003. *Computational analysis of temperature rise phenomena in electric induction motors*. Science Direct, Applied Thermal Engineering, Vol.23, 779-795.
- [12]. D. G. Dorrell, 2008. *Combined Thermal and Electromagnetic Analysis of Permanent-Magnet and Induction Machines to Aid Calculation*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 10, 3566-3574.
- [13]. W. Chen, J. Ma, X. Huang, Y. Fang, 2012. *Thermal analysis of an interior permanent magnet synchronous traction motor for high speed railway applications*. 15th International Conference on Electrical Machines and Systems, 1-5.
- [14]. Binder B. F., A. Binder, 2008. *Thermal Design of a Permanent Magnet Motor used for Gearless Railway Traction*. 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2061-2066.
- [15]. C. Kral, A. Haumer, T. Bauml, 2008. *Thermal Model and Behavior of a Totally-Enclosed-Water-Cooled Squirrel-Cage Induction Machine for Traction Applications*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 10, 3555-3565.
- [16]. S. Nategh, Z. Huang, A. Krings, O. Wallmark and M. Leksell, 2013. *Thermal Modeling of Directly Cooled Electric Machines Using Lumped Parameter and Limited CFD Analysis*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 28, No. 4, 979-990.
- [17]. T. V. Tran, E. Nègre, K. Mikati, P. Pellerey, B. Assaad, 2020. *Optimal Design of TEFC Induction Machine and Experimental Prototype Testing for City Battery Electric Vehicle*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 56, No. 1, 635-643.
- [18]. A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, M. Pastorelli, 2002. *A simplified thermal model for variable-speed self-cooled industrial induction motor*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No. 4, 723-730.
- [19]. B. Nguyen Duc, V. Tran Tuan, C. Nguyen The, 2021. *Design and testing servomotor prototype*. Journal Science & Technology Technical Universities, Smart Systems and Devices, Vol. 1, Issue 1, 124-131.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Duc Bac^{1,2}, Tran Tuan Vu¹, Nguyen The Cong¹

¹School of Electrical - Electronics Engineering, Hanoi University of Science and Technology

²Hanoi University of Civil Engineering