NGHIÊN CỨU VI ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU SỬ DỤNG CÁC CUỘN DÂY PHÂN TÁN

RESEARCH OF A MICRO PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR WITH DISTRIBUTED WINDINGS

BÙI GIA THỊNH

Khoa Điện - Cơ, Trường Đại học Hải Phòng

**Email liên hệ: thinhbg@dhhp.edu.vn*

Tóm tắt

Trong nghiên cứu này trình bày về vi động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu sử dụng các cuộn dây phân tán để tạo ra mômen xoắn cao hơn và góc bước nhỏ hơn. Lõi của cuộn dây cuộn phân tán được làm bằng cách sử dụng bản mạch in. Stato được chế tạo bằng vỏ điện hóa đặt ở phía trên của bản mạch in được cuộn tròn. Động cơ ba pha được chế tạo có đường kính ngoài 1,5mm, chiều dài tổng thể 5,6mm, trục truyền động đường kính 0,3mm và góc bước 60^0. Động cơ đạt tốc độ tối đa 11.000 vòng/phút và mômen xoắn cực đại 0,57μNm với dòng điện đầu vào 0,7A. Hiệu suất động cơ có thể được nâng cao hơn nữa bằng cách cải thiện quy trình lắp ráp và ma sát ổ trục.

Từ khóa: *Vi động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu, cuộn dây phân tán, góc bước.*

Abstract

This research presents a micro permanent magnet synchronous motor using distributed windings to get higher output torque and smaller step angle. The distributed winding coil are made using flexible printed circuit broad. The stator is fabricated by electroforming shell on top of the circularly rolled printed circuit broad. The three-phase motor has fabricated with an outer diameter of 1,5mm, overall length of 5,6mm, shaft of 0,3mm-diameter, and step angle of 60^0. The motor achieves a maximum speed of 11.000rpm and a maximum torque of 0,57μNm with input current of 0,7A. The motor performance could be further enhanced by improving assembly process and bearing friction.

Keywords: *Micro permanent magnet synchronous motor, Distributed windings, Step angle.*

1. Mở đầu

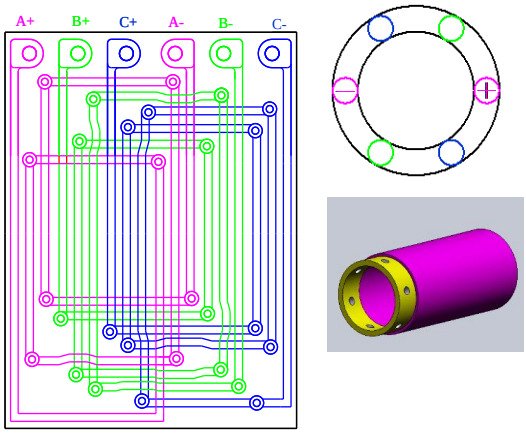
Năm 1993, Wagner và cộng sự đã đề xuất một vi động cơ với nam châm vĩnh cửu hình đĩa (PM) quay đồng bộ với từ trường quay được tạo ra bởi các cuộn dây phẳng trên đế silicon [1]. Năm 2001, Komori đã phát triển động cơ PM siêu nhỏ có từ tính bằng hai loại nam châm điện: hình trụ và hình móng ngựa [2]. Các động cơ được đặc trưng bởi rôto quay nhờ lực từ đẩy lên ở trung tâm nam châm điện mà không có bất kỳ tiếp điểm cơ khí nào. Năm 2006, Kim cùng với các cộng sự đã phát triển một động cơ một chiều (DC) không chổi than siêu nhỏ có đường kính 2mm và các đầu bánh răng kiểu hành tinh như một thiết bị truyền động mạnh mẽ [3]. Năm 2009, Chou và các cộng sự đã thiết kế bộ điều khiển thích nghi cho hệ thống điều khiển vi động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu [4]. Năm 2010, Gerlando cùng đồng nghiệp đã nghiên cứu các tiêu chí thiết kế và phân tích hoạt động của vi động cơ không chổi than PM tốc độ cao [5]. Năm 2008, Lin đã phát triển một phương pháp chế tạo mới cho động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu siêu nhỏ. Các cuộn dây được làm bằng bản mạch in (PCB) và vỏ ngoài được kết hợp với nhau thành một phần. Phương pháp này làm giảm các bước lắp ráp và tăng độ tin cậy của sản phẩm, đặc biệt là đối với sản xuất động cơ nhỏ và đã được nộp đơn xin cấp bằng sáng chế [6]. Năm 2018, Nguyễn Đức Bắc cùng cộng sự thiết kế điện từ cho động cơ servo đồng bộ nam châm vĩnh cửu với hiệu suất cao, kích thước nhỏ gọn [7]. Năm 2020, Pang cùng các cộng sự đã giới thiệu động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu nhỏ nhất thế giới có sử dụng vật liệu composite từ tính mềm. Động cơ được thiết kế với mật độ mômen xoắn cao và gợn mômen xoắn thấp bằng cách thay đổi chiều rộng nội cực của rôto [8]. Năm 2021, Pang đã tiếp tục phát triển động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu bên trong nhỏ nhất thế giới với khả năng nâng cao mômen xoắn [9].

Trong nghiên cứu này một vi động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu mới có đường kính 1,5mm với các cuộn dây phân tán được đề xuất. Việc thay đổi cuộn dây stato từ loại cuộn dây tập trung sang loại cuộn dây phân tán dẫn đến hiệu suất tốt hơn bao gồm mômen xoắn lớn hơn, tốc độ cao hơn, góc bước nhỏ hơn và gợn mômen xoắn ít hơn. Động cơ được kiểm tra thực nghiệm và kết quả được so sánh với phân tích phần mềm chuyên dụng JMAG.

TẠP CHÍ ISSN: 1859-316X
KHOA HỌC CÔNG NGHỆ HÀNG HẢI
JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY

2. Thiết kế động cơ

Các cuộn dây của ba pha được thiết kế phân bố đều nhau trên chiều rộng của stato. Cuộn dây stato có ba cuộn dây pha, mỗi cuộn dây pha có 3 vòng. Cách bố trí của cuộn dây được thể hiện như trong Hình 1.



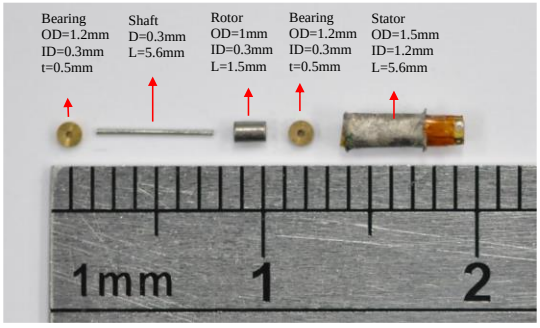
Hình 1. Thiết kế PCB 2D và hình 3D của stator

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của PCB

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Số pha	3	
Số vòng	3	
Khoảng cách dây	0,1	mm
Bề rộng dây	0,1	mm
Tổng chiều dài	5,6	mm
Chiều dài hiệu dụng	2	mm
Chiều rộng PCB	4,2	mm
Độ dày PCB	0,08	mm
Độ dày vỏ	0,025	mm
Góc bước	60	Độ

Các cuộn dây của stato được chế tạo bằng bảng mạch in (PCB) với tổng cộng năm lớp. Lớp đầu tiên và lớp thứ năm giống nhau, cả hai lớp đều bao gồm sáu lỗ đầu cuối để kết nối bên ngoài. Lớp thứ hai chứa các cuộn dây dọc và lớp thứ tư chứa các cuộn dây ngang. Hai lớp này được kết nối thông qua các lỗ kết nối nằm ở lớp thứ ba. Đặc điểm kỹ thuật của cuộn dây được liệt kê trong Bảng 1. Một trong những lợi thế của cuộn dây cuộn phân tán là dòng điện đầu vào cao hơn do chiều rộng đường dây lớn hơn, nó dẫn đến mômen xoắn lớn hơn. Tuy nhiên, nhược điểm là tổng chiều dài của các cuộn dây giảm xuống vì phải tạo các lỗ kết nối trong PCB. Với giới hạn chế tạo của công nghệ PCB hiện tại, kích thước của các lỗ không nhỏ như mong muốn.

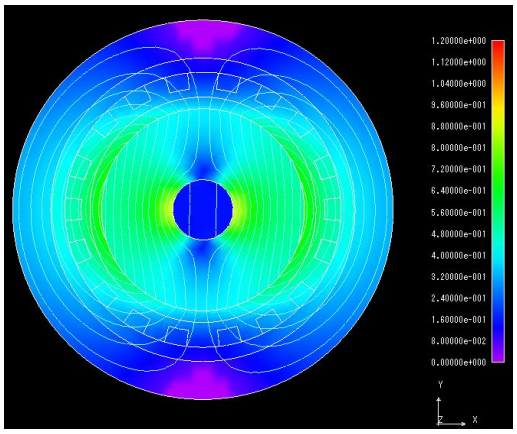
Rôto của động cơ được chế tạo bằng nam châm vĩnh cửu NdFeB hai cực có mật độ từ trường cực đại là 1,26T và lực kháng từ là 945,93kA/m. Nam châm vĩnh cửu có đường kính ngoài 1,2mm, đường kính trong 0,3mm và dài 1,5mm. Trục của động cơ được làm bằng thép không gỉ phi từ tính mác 303. Hai vòng bi được làm bằng đồng và được lắp ráp ở hai bên của động cơ. Hình ảnh của các bộ phận động cơ được hiển thị trong Hình 2.



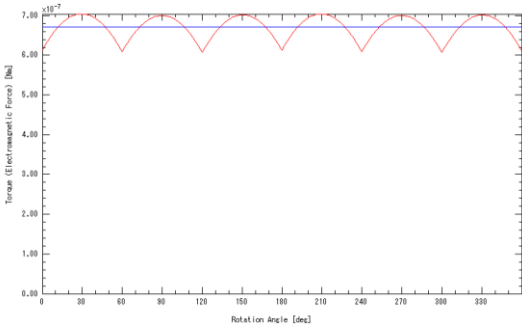
Hình 2. Các thông số hình học của các bộ phận động cơ

3. Phân tích điện từ

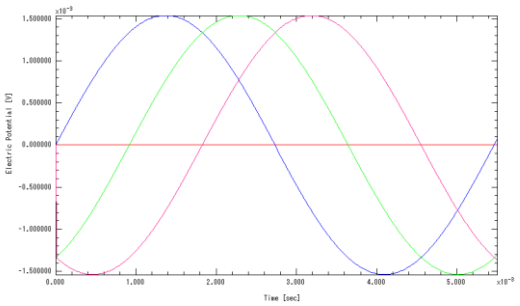
Phần mềm JMAG được sử dụng để phân tích từ trường của động cơ. Mô hình được đề xuất với vật liệu vỏ ngoài được làm bằng vật liệu phi từ tính và được coi như không khí trong phân tích hiệu suất.



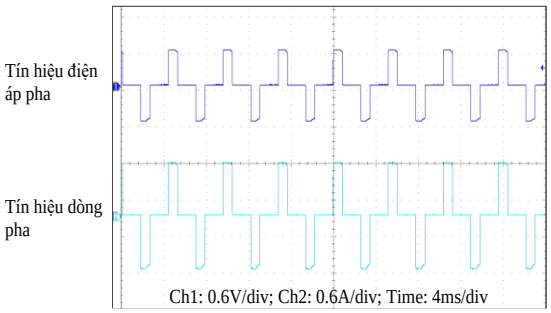
Hình 3. Mật độ từ thông của động cơ tại 0,7A



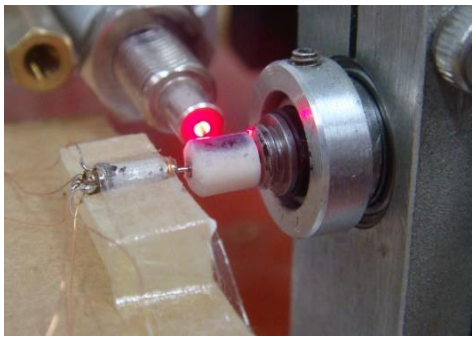
Hình 4. Dạng sóng mômen xoắn của động cơ tại 0,7A



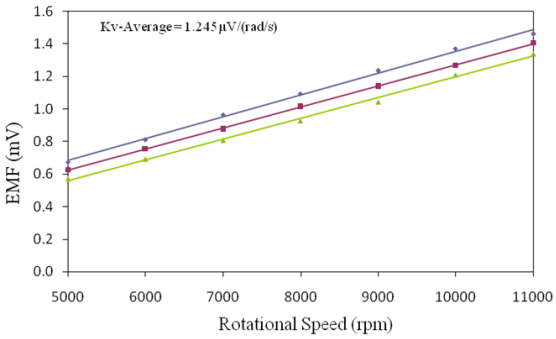
Hình 5. Dạng sóng sức phản điện ở tốc độ 11.000 vòng/phút



Hình 6. Tín hiệu điện áp và dòng điện của cuộn dây pha của động cơ



Hình 7. Hình ảnh thử nghiệm động cơ



Hình 8. Dạng sóng sức phản điện của động cơ

Bảng 2. Kết quả thử nghiệm sức phản điện của động cơ

Tốc độ (rpm)	Sức phản điện pha A (mV)			Sức phản điện pha B (mV)			Sức phản điện pha C (mV)			Tất cả các pha (mV)
	Test 1	Test 2	Avg.	Test 1	Test 2	Avg.	Test 1	Test 2	Avg.	Avg.
5.000	0,673	0,673	0,673	0,625	0,629	0,627	0,570	0,570	0,570	0,623
6.000	0,810	0,813	0,812	0,755	0,756	0,756	0,689	0,693	0,691	0,753
7.000	0,976	0,952	0,964	0,872	0,875	0,874	0,810	0,806	0,808	0,882
8.000	1,089	1,099	1,094	1,012	1,012	1,012	0,923	0,928	0,925	1,010
9.000	1,232	1,236	1,234	1,134	1,140	1,137	1,038	1,049	1,044	1,138
10.000	1,366	1,372	1,369	1,264	1,271	1,268	1,210	1,209	1,210	1,282
11.000	1,489	1,431	1,460	1,406	1,411	1,408	1,340	1,336	1,338	1,402

Mật độ từ thông của động cơ được mô phỏng thể hiện trong Hình 3 tại 0,7A và mật độ từ thông tối đa của khe hở không khí là 0,65T. Dạng sóng mômen xoắn của động cơ với dòng đầu vào 0,7A đạt giá trị tối đa 0,704μNm được thể hiện trong Hình 4. Các dạng sóng sức phản điện của động cơ ở tốc độ 11.000RPM đạt giá trị tối đa 1,539mV được thể hiện trong Hình 5.

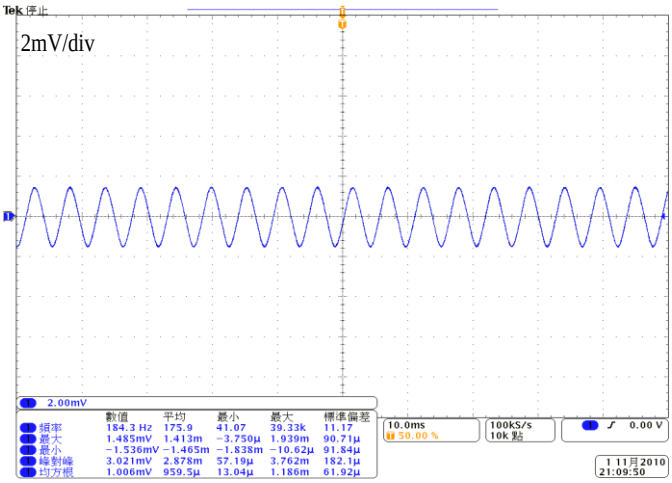
4. Kiểm nghiệm động cơ

Động cơ chế tạo được kiểm tra điện áp, dòng điện, sức phản điện và mômen xoắn. Dòng điện và điện áp của cuộn dây pha ở dạng xung vuông thay thế như trong Hình 6. Tín hiệu điện áp của dây pha được đo trực tiếp thông qua điện trở của dây quấn. Dòng điện được đo qua điện trở 1Ω. Cả hai tín hiệu đều được đo ở tốc độ tối đa 11.000 vòng/phút với dòng đầu vào 0,7A.

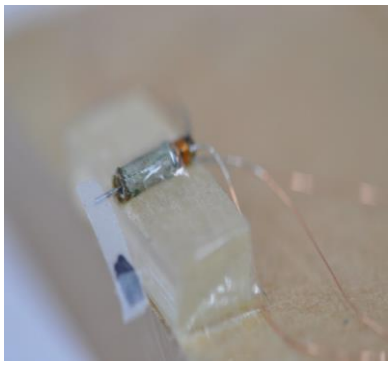
Trong thử nghiệm này, nam châm vĩnh cửu được dẫn động bởi một động cơ khác và sức phản điện của mỗi cuộn dây pha được đo. Động cơ được dẫn động kết nối với một ống cao su. Các thiết bị thử nghiệm của thử nghiệm sức phản điện được thể hiện trong Hình 7 bao gồm máy hiện sóng TDS4031, máy phân tích phổ tín hiệu động PHOTON và bộ nguồn E3648A.

Kết quả của dạng sóng sức phản điện của động cơ với tốc độ 11.000 vòng/phút được thể hiện trong Hình 8. Kết quả kiểm tra mômen xoắn được trình bày trong Bảng 2. Mối liên hệ giữa sức phản điện của cuộn dây

TẠP CHÍ ISSN: 1859-316X
KHOA HỌC CÔNG NGHỆ HÀNG HẢI
JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY



Hình 9. Mối liên hệ giữa sức phản điện của cuộn dây pha so với tốc độ động cơ



Hình 10. Thử nghiệm mômen xoắn của động cơ

Bảng 3. Thử nghiệm mô men xoắn của động cơ

Dòng điện (A)	Khối lượng (g)		Mômen xoắn (µNm)		Trung bình (µNm)
	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2	
0,3	0,16	0,15	0,241	0,225	0,233
0,4	0,22	0,21	0,326	0,305	0,315
0,5	0,28	0,26	0,415	0,387	0,401
0,55	0,31	0,29	0,453	0,428	0,440
0,6	0,34	0,32	0,493	0,467	0,480
0,65	0,37	0,35	0,540	0,510	0,525
0,7	0,40	0,38	0,586	0,554	0,570

pha so với tốc độ động cơ được vẽ trong Hình 9. Hằng số sức phản điện trung bình của động cơ được xác định là 1,245µV/(rad/s). Sự chênh lệch lớn nhất của sức phản điện giữa tất cả các pha là 4,4%.

Mômen xoắn của động cơ cũng được xác định ở các dòng điện đầu vào khác nhau. Tải trọng của động cơ được tạo ra bằng băng dính và trọng lượng được đo bởi Mettler Toledo AB54. Hình ảnh của thử nghiệm như trong Hình 10.

Dòng điện đầu vào của động cơ thay đổi từ 0,3A đến 0,7A. Kết quả thử nghiệm mô men xoắn của động cơ được trình bày trong Bảng 3. Động cơ đạt mômen xoắn cực đại 0,57µNm khi dòng điện đầu vào tại 0,7A. Sai số của hằng số mômen giữa kết quả tính toán và thực nghiệm được xác định là 16%.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã thiết kế, chế tạo và thử nghiệm thành công vi động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu đường kính 1,5mm sử dụng các cuộn dây phân tán. Rôto được làm bằng nam châm vĩnh cửu NdFeB hai cực với đường kính ngoài 1,2mm, đường kính trong 0,3mm và dài 1,5mm. Hai vòng bi được làm bằng đồng, đường kính ngoài 1,2mm, đường kính trong 0,3mm, dày 0,5mm. Hiệu suất của động cơ được đưa ra đánh giá với dòng điện đầu vào 0,7A, động cơ đạt tốc độ tối đa là 11.000 vòng/phút. Mômen xoắn cực đại đạt được là 0,57µNm. Sức phản điện của động cơ là 1,245µV/(rad/s). Mômen xoắn của động cơ là 0,844µNm/A. Nếu quy trình lắp ráp và PCB có thể được cải thiện, phương pháp chế tạo này có thể được áp dụng cho động cơ có đường kính 1mm trở xuống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Wagner, B., Kreutzer, M., & Benecke, W. (1993). *Permanent magnet micromotors on silicon substrates*. Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.2(1), pp.23-29.

[2] Komori, K., & Yamane, T. (2001). *Magnetically levitated micro PM motors by two types of active magnetic bearings*. IEEE/ASME transactions on mechatronics, Vol.6(1), pp.43-49.

[3] Kim, J. H., Jung, I. S., & Sung, H. G. (2006). *Design and manufacturing of ultra small actuator*. In 2006 IEEE International Conference on Mechatronics, pp.23-26. IEEE.

[4] Chou, T. Y., Liu, T. H., & Cheng, T. T. (2009). *Design and implementation of an adaptive inverse controller for a micro-permanent magnet synchronous motor control system*. IET electric power applications, Vol.3(5), pp.471-481.

[5] Di Gerlando, A., Foglia, G. I. O. V. A. N. N. I., Iacchetti, M., & Perini, R. (2010). *Design criteria and operation analysis of a high speed brushless PM micro-motor*. In The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM, 2010, pp.1-8. IEEE.

[6] Lin, R.B., (2008). *Design, Analysis, Fabrication And Testing of Micro Permanent-Magnet Synchronous Motor*, Master Thesis, National Kaohsiung University of Applied Sciences.

[7] Nguyễn Đức Bắc, Trần Tuấn Vũ, Nguyễn Thế Công, Nguyễn Huy Phương, Nguyễn Văn Thiện (2018). *Thiết kế điện từ động cơ Servo đồng bộ nam châm vĩnh cửu*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Năng lượng - Trường Đại học Điện lực, số 16, tr.51-59.

[8] Pang, Da-Chen, Zhen-Jia Shi, Pei-Xuan Xie, Hua-Chih Huang, and Gia-Thinh Bui. (2020). *Investigation of an Inset Micro Permanent Magnet Synchronous Motor Using Soft Magnetic Composite Material*, Energies, Vol.13, No.17: 4445.

[9] Pang, Da-Chen, Zhen-Jia Shi, Young-Ho Chang, Hua-Chih Huang, and Gia-Thinh Bui. (2021). *Investigation of an Interior Micro Permanent Magnet Synchronous Motor*, Energies, Vol.14, No.14: 4172.

Ngày nhận bài:	29/03/2023
Ngày nhận bản sửa:	07/04/2023
Ngày duyệt đăng:	15/04/2023