

NGHIÊN CỨU SỨC ĐIỆN ĐỘNG KHÔNG TẢI ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU KHỞI ĐỘNG TRỰC TIẾP CÔNG SUẤT NHỎ BẰNG PHƯƠNG PHÁP SỐ

STUDYING PHASE BACK-EMF OF LOW POWER THREE PHASE LINE START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS BY A NUMERICAL TECHNIQUE

Lê Anh Tuấn^{1*}, Bùi Đức Hùng²

TÓM TẮT

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp (LSPMSM) có hiệu suất, hệ số công suất gần bằng 1, đáp ứng các tiêu chuẩn yêu cầu ngày càng cao đối với động cơ điện. Vì vậy, LSPMSM chắc chắn sẽ là một trong những giải pháp thay thế từng phần động cơ không đồng bộ rôto lồng sóc trong tương lai. Tuy có nhiều ưu điểm trong vận hành, nhưng LSPMSM bị ảnh hưởng từ các thông số động cơ như kết cấu rãnh, rãnh, kích thước và vật liệu nam châm vĩnh cửu, sức điện động không tải E_0 . Trong quá trình thiết kế, việc lựa chọn cấu hình động cơ không đảm bảo sẽ dẫn đến giá trị sức điện động không tải không phù hợp. Điều này có thể dẫn đến hiệu suất động cơ suy giảm, thậm chí thấp hơn động cơ không đồng bộ cùng công suất. Trong nội dung, bài báo sẽ ứng dụng phương pháp số để nghiên cứu một số kết cấu rôto, dạng sóng và xác định giá trị sức điện động không tải E_0 . Kết quả của bài báo sẽ giúp các nhà thiết kế tính toán và điều chỉnh thông số để đạt được giá trị E_0 theo yêu cầu.

Từ khóa: Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp; nam châm vĩnh cửu; động cơ đồng bộ; sức điện động.

ABSTRACT

Line start permanent magnet synchronous motors with high efficiency and high power factor in steady state are meet the requirements of standards for high efficiency motors. They will be a feasible solution for replacing partially squirrel cage induction motors (SCIM) which widely used at the present time. However, their performance are mainly depended on the configuration of their rotor configuration, sizes of permanent magnets, permanent magnet materials, phase back-EMF value (E_0),... In designing process, if the EMF value is not suitable for motor, the efficiency of the motor will be down. Even, the efficiency of LSPMSM is lower than SCIM with the same power. Therefore, this paper studies the effect of rotor's configuration on LSPMSM's phase back-EMF waveform and determines phase back-EMF value. This study will help the motor designers computing E_0 and modifying configuration of LSPMSM to reach appropriate E_0 value.

Keywords: Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors; Permanent Magnet; Synchronous Motors; Electromotive Force.

¹Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Viện Điện, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: leanhtuan0985@gmail.com

Ngày nhận bài: 01/11/2021

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/12/2020

Ngày chấp nhận đăng: 26/02/2021

KÝ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
E_0	V	Sức điện động không tải
B_r	T	Mật độ từ dư nam châm vĩnh cửu
Φ_{M1}	Wb	Biên độ thành phần từ thông cơ bản
I_d, I_q	A	Dòng điện dọc trục và ngang trục
P_{em}	W	Công suất điện từ

CHỮ VIẾT TẮT

LSPMSM	Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp
NCVC	Nam châm vĩnh cửu
FDM, FEM	Phương pháp sai phân và phương pháp phần tử hữu hạn

1. GIỚI THIỆU

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu đã được chứng minh có những ưu điểm vượt trội trong quá trình vận hành xác lập, ví dụ như có hiệu suất biến đổi điện cơ lớn, hệ số công suất gần bằng 1, mật độ mômen lớn [1, 2]. Do sự phát triển nhanh chóng của công nghệ nam châm vĩnh cửu đất hiếm với mật độ từ trường cao, tích số năng lượng lớn, như chủng loại nam châm Neodimium... nên trong hai thập kỷ gần đây đã thúc đẩy việc ứng dụng các chủng loại nam châm này trong lĩnh vực máy điện để cho ra các động cơ có hiệu suất năng lượng cao. Trong các loại động cơ sử dụng nam châm vĩnh cửu, LSPMSM nổi lên như là một giải pháp thay thế từng phần cho SCIM trong các lĩnh vực công, nông nghiệp. LSPMSM bản chất là sự cải tiến từ động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu và động cơ không đồng bộ. Nói cách khác nó là sự tẠp giữa động cơ không đồng bộ và động cơ đồng bộ bằng cách đặt các thanh nam châm vĩnh cửu vào rôto của SCIM. Do vậy, LSPMSM ngoài sở hữu ưu điểm của động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu, nó còn có ưu điểm của SCIM là khả năng tự khởi động trực tiếp.

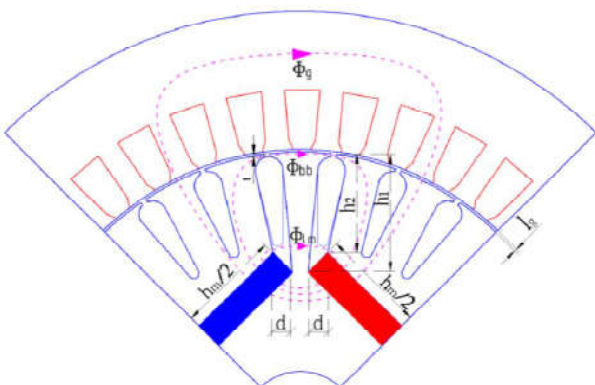
Đối với LSPMSM mặc dù được khẳng định là động cơ có hiệu suất, hệ số công suất cao, nhưng nếu thiết kế không

tốt thì các thông số vận hành có thể sẽ không đảm bảo, thậm chí có thể còn không đạt được các tiêu chuẩn của SCIM [3, 4]. Một trong số yếu tố liên quan rất lớn đến hiệu suất và hệ số công suất trong vận hành của LSPMSM là đại lượng sức điện động không tải E_0 . Sức điện động không tải sinh ra do sự biến thiên từ thông nam châm vĩnh cửu gây ra trên dây quấn stato khi rôto quay. Hiện nay, có một số phương pháp để xác định sức điện động không tải E_0 như phương pháp giải tích, phương pháp số ứng dụng phân tích phần tử hữu hạn, phương pháp đo lường thực tế. Phương pháp giải tích cho kết quả tính toán nhanh, nhưng cách xác định E_0 cho LSPMSM thường áp dụng các công thức tính toán của IPM với giả thiết rằng rôto không bị bão hòa, do đó không xét ảnh hưởng răng rôto trong tính toán [7]. Vì vậy, phương pháp giải tích thường cho kết quả với sai số cao. Bên cạnh đó, phương pháp giải tích cũng không cho phép người sử dụng quan sát dạng sóng sức điện động không tải. Phương pháp đo lường thực tế cho kết quả chính xác nhất, tuy nhiên sẽ phải chế tạo mẫu và đi kèm là các biện pháp đo phức tạp. Phương pháp số đã được khẳng định có độ chính xác cao khi phân tích các bài toán điện từ trường của máy điện [7, 10]. Vì vậy, để nghiên cứu dạng sóng sức điện động không tải và giá trị của nó, bài báo tập trung ứng dụng phương pháp số trong khảo sát, tính toán LSPMSM. Bên cạnh đó, bài báo cũng so sánh kết quả đạt được với kết quả của phương pháp số với kết quả thu được từ phương pháp giải tích và phương pháp thực nghiệm thực tế.

Trong nội dung nghiên cứu, bài báo khảo sát ba LSPMSM 3 pha ứng với ba công suất khác nhau: 2,2kW, 5,5kW, 11kW. Các LSPMSM này đều được hiệu chỉnh từ động cơ không đồng bộ của Công ty Cổ phần Chế tạo động cơ Hà Nội. Trong hiệu chỉnh, các kết cấu răng, rãnh, mạch từ, dây quấn, lồng sóc stato và rôto giữ nguyên, tuy nhiên lõi thép rôto được đặt thêm các thanh NCVC NdFe-45. Từ kết quả đạt được, bài báo sẽ đánh giá và rút ra một số kết luận trong thiết kế cũng như vận hành để đảm bảo hiệu suất, hệ số công suất của động cơ.

2. XÁC ĐỊNH GIÁ TRỊ SỨC ĐIỆN ĐỘNG KHÔNG TẢI Ở CHẾ ĐỘ XÁC LẬP

2.1. Xác định sức điện động không tải theo công thức giải tích



Hình 1. Từ trường nam châm vĩnh cửu theo tiết diện ngang của LSPMSM [8]

Ở điều kiện xác lập, sức điện động không tải E_0 sẽ ảnh hưởng rất lớn đến hiệu suất và hệ số công suất của động cơ. Trong đó, sức điện động không tải được xác định là giá trị sức điện động khi quay động cơ với tốc độ đồng bộ ở trạng thái hở mạch và không bao gồm các thành phần sức điện động sinh ra bởi dòng điện stato [5]. Về lý thuyết E_0 có thể được xác định từ cấu hình thiết kế của động cơ thông qua các phương trình giải tích của các thông số đầu vào: Mật độ từ dư NCVC, số vòng dây stato, chiều dài lõi từ,... [5, 6]. Sức điện động không tải E_0 của LSPMSM được xác định như công thức (1), (2).

Với giả thiết máy điện hoạt động ở chế độ xác lập không xảy ra bão hòa, người ta thường xác định sức điện động không tải của LSPMSM tương tự như với động cơ đồng bộ nam châm gắn chìm (IPM) [8, 9]. E_0 được xác định như sau:

$$E_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot k_{w1} \cdot N_{ph} \cdot f \cdot \Phi_{M1} \tag{1}$$

Trong đó: k_{w1} là hệ số dây quấn, N_{ph} là số vòng dây quấn của 1 pha, f là tần số quay, Φ_{M1} là biên độ của thành phần từ thông cơ bản.

Biên độ thành phần từ thông cơ bản được xác định:

$$\Phi_{M1} = \frac{4 \cdot d \cdot l}{p \cdot \pi} \cdot \frac{C_\phi}{1 + \beta(1 + 2\eta + 4\lambda)} \cdot B_r \cdot \sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) \tag{2}$$

Trong đó: d là chiều rộng của khối barrier từ, l là chiều dài lõi sắt rôto, B_r là mật độ từ dư của nam châm vĩnh cửu và α là hệ số cung cực từ. C_ϕ , β , η là các hệ số tính đến từ thông rò, độ tập trung từ thông [9].

2.2. Xác định sức điện động không tải bằng phương pháp số

Có nhiều phương pháp số ứng dụng trong tính toán các bài toán liên quan đến trường điện từ của máy điện. Các phương pháp phổ biến nhất hiện nay là phương pháp sai phân hữu hạn (FDM - Finite Difference Method), phương pháp thành phần biên (BEM - Boundary Element Method), phương pháp phần tử hữu hạn (FEM - Finite Difference Method), phương pháp rời rạc (Discrete Element Method). Các phương pháp này cho phép giải gần đúng các bài toán phương trình vi phân riêng, ví dụ như bốn phương trình Maxwell mô tả các định luật điện từ trường [6].

Định luật Faraday về cảm ứng điện từ:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

Định luật Ampere về dòng điện chạy trong dây dẫn:

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

Định luật Gauss cho từ trường:

$$\nabla \cdot B = 0$$

Định luật Gauss cho điện trường:

$$\nabla \cdot D = \rho$$

Trong các phương pháp số, phương pháp FDM và FEM được sử dụng rất phổ biến hơn cả khi phân tích kết cấu điện từ của máy điện. Các phương pháp này thực hiện các bài toán liên quan đến các hiện tượng vật lý cơ, nhiệt, từ và điện. Nói chung, hai phương pháp này dựa trên sự rời rạc hóa không gian của một kết cấu thành các bề mặt vuông hoặc tam giác nhỏ hay thành các thể tích khối tử diện, lục diện. Trong đó, đỉnh của các hình khối được gọi là các nút biểu diễn giá trị các biến của hệ. Độ chính xác của các phương pháp vì thế sẽ liên quan trực tiếp đến độ mịn của các mắt lưới.

Trong các phương pháp số, phương pháp phần tử hữu hạn đã được khẳng định có độ chính xác cao khi ứng dụng giải gần đúng các phương trình vi tích phân trong các bài toán liên quan đến điện từ trường [7]. Vì vậy, trong nghiên cứu bài báo sử dụng phần mềm ứng dụng FEM để khảo sát sức điện động không tải E_0 . Bên cạnh đó, bài báo cũng ứng dụng phần mềm Matlab để phân tích Fourier (FFT) tìm giá trị biên độ sóng cơ bản và các thành phần sóng hài đi kèm của sức điện động không tải. Các kết quả sau đó được so sánh với phương pháp giải tích đã đề cập ở mục 2.1 và với phương pháp đo lường kiểm nghiệm thực tế. Trong nội dung, bài báo trình bày phân tích ba LSPMSM có công suất tương ứng: 2,2kW; 7,5kW; 11kW, chi tiết như mục 3 bên dưới. Dải công suất LPMSM thực nghiệm, nhóm tác giả lựa chọn thuộc dải công suất nhỏ mà SCIM đang được sử dụng rất phổ biến hiện nay [8].

3. DẠNG SÓNG VÀ GIÁ TRỊ SỨC ĐIỆN ĐỘNG KHÔNG TẢI E_0

3.1. Áp dụng phương pháp số xác định E_0

Nhóm tác giả ứng dụng phương pháp số để xác định sức điện động không tải đối với 3 loại động cơ có công suất: 2,2 kW, 7,5kW và 11kW 3 pha, điện áp Δ/Y -220/380V. Các thông số chính của động cơ được cho ở bảng 1.

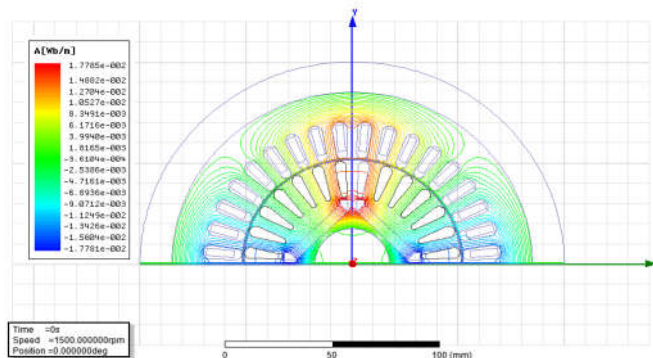
Bảng 1. Các thông số chính của LSPMSM thử nghiệm

Công suất	Ký hiệu	Đơn vị	2,2kW	7,5kW	11kW
Đường kính trong stator	D	mm	104	252	180
Đường kính ngoài stator	D_n	mm	170	140	272
Số rãnh stator	Z_1		36	36	48
Số vòng dây/pha	N_1	vòng	312	156	144
Lớp dây quấn		Lớp	1	1	1
Khe hở không khí	g	mm	0,5	0,35	0,5
Số rãnh rôto	Z_2		28	36	40
Vật liệu NCVC			NdFeN45	NdFeN45	NdFeN45
Mật độ từ dư NCVC	B_r	T	1,38	1,38	1,38
Bề rộng NCVC	w_m	mm	34	44	74
Độ dày NCVC	l_m	mm	5	5	5

Kết quả mô phỏng LSPMSM với phần mềm ứng dụng phương pháp số trong mô phỏng động cơ như sau:

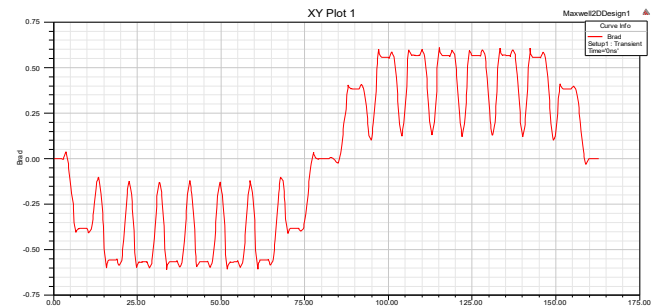
- Đường từ trường mô phỏng động cơ công suất 2,2kW được biểu diễn ở hình 2.
- Từ kết quả, có thể thấy đường từ trường mô phỏng sẽ hình thành nên bốn phân vùng từ trường đều và đối xứng

nhau. Bốn phân vùng này thể hiện 4 cực từ tương ứng do từ trường NCVC sinh ra.



Hình 2. Đường từ trường mô phỏng LSPMSM 2,2kW bằng phương pháp số khi không tải

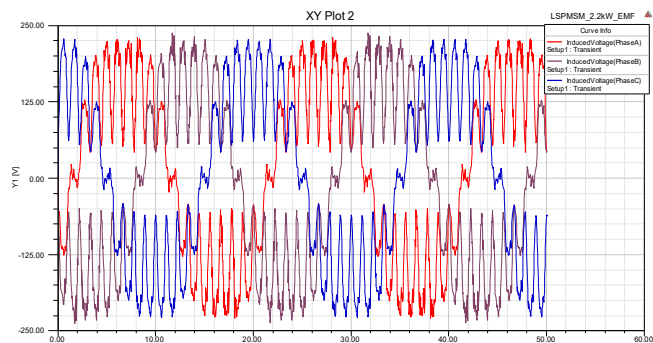
- Phân bố mật độ từ trường trong khe hở không khí của LSPMSM 2,2kW như hình 3.



Hình 3. Phân bố mật độ từ trường LSPMSM 2,2kW khi không tải

Hình 3 cho thấy đường phân bố mật độ từ trường khe hở không khí lúc này sẽ không phải là dạng xung vuông lý tưởng mà bị chia cắt theo kết cấu răng rãnh stator, rôto.

- Dạng sóng sức điện động không tải E_0 ở chế độ xác lập của LSPMSM 2,2kW được mô phỏng như hình 4.



Hình 4. Sức điện động không tải E_0 LSPMSM 2,2kW

Dạng sóng sức điện động không tải E_0 trên các pha không có dạng hình sin mà bị vấp vặt, nhưng dạng sóng sức điện động không tải E_0 vẫn dao động điều hòa với tần số 50Hz. Tuy nhiên, thực tế thì LSPMSM nói riêng và động cơ sử dụng nguồn điện xoay chiều nói chung, được thiết kế để vận hành với sóng sin cơ bản (điện áp, dòng điện). Vì vậy dạng sóng điều hòa trên sẽ được phân tích FFT để tìm giá trị biên độ sức điện động của thành phần cơ bản đồng thời phân tích và đánh giá các thành phần điều hòa bậc cao đi kèm.

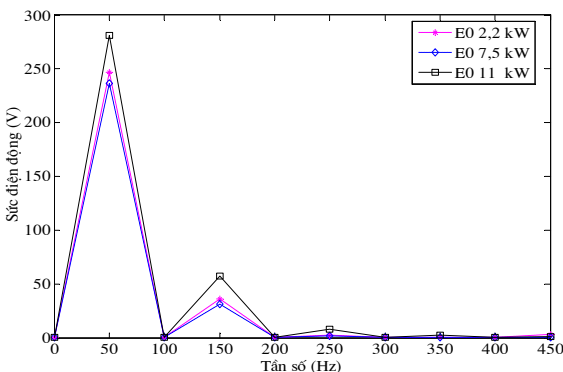
3.2. Phân tích Fourier dạng sóng sức điện động không tải E₀

Từ kết quả mô phỏng là giá trị chuỗi của dạng sóng E₀ thu được từ mô phỏng với Ansys/Maxwell, nhóm tác giả ứng dụng phần mềm Matlab để phân tích FFT tìm biên độ sóng cơ bản và biên độ các thành phần sóng điều hòa đi kèm.

Thuật toán tính ứng dụng phân tích FFT được viết trong Matlab như sau:

```
>> L=length(E0_11kW)
>> t=0:(1/L)*20*10^-3:20*10^-3*(L-1)/L;
>> Fs=50*1000;
>> nfft=L;
>> f=(0:nfft/2-1)*Fs/nfft;
>> E0_2.2kW=fft(E0_2.2kW,nfft)/(L/2);
>> E0_7.5kW=fft(E0_7.5kW,nfft)/(L/2);
>> E0_11kW=fft(E0_11kW,nfft)/(L/2);
>> mxEO_2.2kW=abs(E0_2.2kW);
>> mxEO_7.5kW=abs(E0_7.5kW);
>> mxEO_11kW=abs(E0_11kW);
```

Kết quả phân tích FFT sóng điều hòa của sức điện động không tải ứng với ba LSPMSM khảo sát như ở hình 5.



Hình 5. Phân tích FFT dạng sóng E₀ cho các động cơ khác nhau

Thành phần sức điện động của các LSPMSM thử nghiệm có sự sai khác do cấu hình răng, rãnh và kích thước nam châm vĩnh cửu lựa chọn cho từng động cơ khác nhau. Khi phân tích FFT có thể thấy thành phần sóng hài bậc 3 lớn, trong đó trường hợp lớn nhất khi LSPMSM 11kW lúc đó biên độ thành phần sóng bậc 3 xấp xỉ bằng 20% sóng cơ bản.

3.3. So sánh kết quả tính toán E₀ từ FEM và giải tích

Trong nghiên cứu, nhóm tác giả cũng so sánh kết quả tính toán sức điện động không tải E₀ thu được từ phương pháp giải tích như đã đề cập ở mục 3.1 và kết quả thu được từ phân tích dạng sóng E₀ với FEM. Kết quả so sánh như ở bảng 2.

Sai số giữa phương pháp giải tích và tính toán với FEM có thể được giải thích là do nguyên nhân sức điện động không tải tính theo phương pháp giải tích được suy ra từ cách tính cho động cơ đồng bộ nam châm gắn chìm. Tuy nhiên về cơ bản do rôto của IPM không có răng, rãnh như

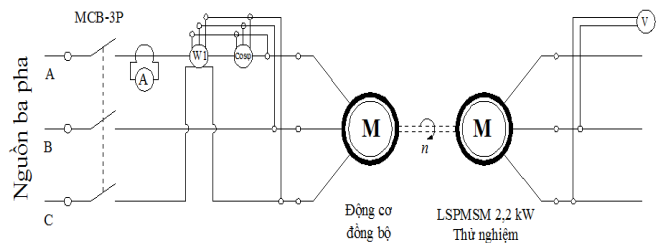
rôto LSPMSM, vì vậy việc áp dụng công thức tính toán trên sẽ có những sai số nhất định do ảnh hưởng của răng, rãnh gây ra. Sai số tính toán sức điện động không tải giữa FEM và phương trình giải tích lớn nhất ứng với động cơ 11kW (tương ứng 7,1%), kết quả với sai số này là chấp nhận được.

Bảng 2. Sức điện động không tải E₀ ở chế độ xác lập với bằng FEM và giải tích

Động cơ	FEM và Matlab	Giải tích	Sai số
2,2kW	173,9	185,1	6,1%
7,5kW	166,9	179,6	7,1%
11kW	198,7	214,8	7,5%

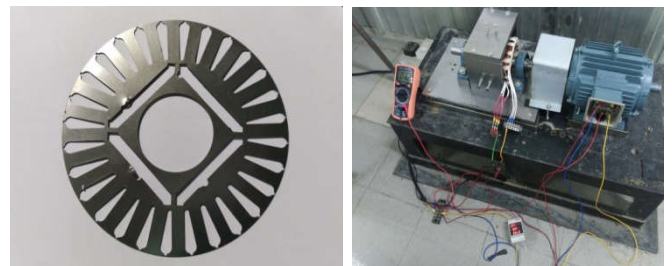
3.4. Kiểm nghiệm thực tế

Để đánh giá thử nghiệm LSPMSM thực tế, nhóm tác giả thực nghiệm mô hình LSPMSM 2,2kW được cải tạo từ động cơ không đồng bộ 3 pha 3K112-S4 của Công ty Cổ phần chế tạo điện cơ Hà Nội. Sơ đồ thử nghiệm LSPMSM như hình 6.



Hình 6. Sơ đồ thử nghiệm LSPMSM 2,2kW

Trong sơ đồ thử nghiệm, nghiên cứu sử dụng một động cơ đồng bộ 3 pha tốc độ 1.500 vg/ph là động cơ sơ cấp để kéo LSPMSM 2,2kW thử nghiệm quay với tốc độ đồng bộ. LSPMSM lúc này sẽ trở thành máy phát. Không nối với tải, tiến hành đo điện áp pha trên LSPMSM, giá trị đo được sẽ là sức điện động không tải E₀. Mô hình triển khai đo lường thực tế như ở hình 7.



Hình 7. Cấu hình rôto và mô hình thử nghiệm LSPMSM 2,2kW

Đồng hồ vạn năng được sử dụng đo điện áp là VOM Digital Multimeter Victor VC890C+ cho phép đo giá trị hiệu dụng thực (true RMS). Kết quả thực tế đo được so sánh với kết quả thu được từ tính toán giải tích và phần mềm ứng dụng phương pháp FEM, kết quả như bảng 3.

Bảng 3. So sánh sai số giữa các phương pháp xác định E₀

	FEM	Giải tích	Đo lường thực tế
Sức điện động (V)	173,9	185,1	165
Sai số so với đo lường thực tế	5,1%	10,9%	

Từ kết quả ở bảng 3 có thể thấy phương pháp xác định sức điện động không tải E_0 bằng FEM sẽ cho kết quả chính xác hơn so với phương pháp giải tích. Cụ thể đối với trường hợp LSPMSM 2,2kW, khi so sánh kết quả tính toán từ FEM và thử nghiệm thực tế cho sai số là 5,1% trong khi giá trị thu được từ phương pháp giải tích sai số là 10,9%.

4. KẾT LUẬN

Bài báo nghiên cứu sức điện động không tải E_0 của LSPMSM bằng phần mềm ứng dụng FEM, từ kết quả mô phỏng bài báo phân tích FFT dạng sóng E_0 với Matlab để xác định biên độ thành phần sóng cơ bản và các thành phần sóng hài đi kèm. Trong nội dung nghiên cứu, nhóm tác giả khảo sát sức điện động không tải E_0 với ba LSPMSM khác nhau có công suất tương ứng: 2,2kW; 7,5kW; 11kW. Kết quả thu được khi tính toán sức điện động không tải E_0 với FEM và Matlab được so sánh với kết quả tính toán từ phương pháp giải tích. Kết quả, so sánh cho thấy sai số giữa hai phương pháp là chấp nhận được (sai số tính toán giữa hai phương pháp lớn nhất ứng với LSPMSM 11kW, sai số 7,5%). Bên cạnh đó, nhóm tác giả cũng tiến hành đo lường LSPMSM 2,2kW thử nghiệm để đánh giá kết quả với thực tế. Kết quả cho thấy, sai số khi xác định E_0 so với thực nghiệm của phương pháp FEM và Matlab là 5,1% trong khi sai số tính toán với phương pháp giải tích là 10,9%. Do đó có thể kết luận, ứng dụng phương pháp FEM và Matlab để xác định E_0 của LSPMSM sẽ chính xác hơn so với phương pháp giải tích. Như vậy, ứng dụng FEM và Matlab là công cụ hữu hiệu giúp người thiết kế xác định E_0 với độ chính xác cao, từ đó có thể điều chỉnh thông số kết phù hợp. Các biện pháp để điều chỉnh E_0 có thể là thay đổi số vòng dây/pha, thay đổi vật liệu NCVC, kích thước NCVC hoặc thay đổi kết cấu răng, rãnh rôto.

Bên cạnh đó, khi khảo sát sức điện động không tải E_0 thì phương pháp FEM và Matlab còn cho phép người sử dụng mô phỏng dạng sóng và tính toán các thành phần sóng hài đi kèm. Cụ thể, trong ba động cơ thử nghiệm trên thì thành phần sóng hài bậc ba là lớn nhất và đạt giá trị cao nhất là 7,5% biên độ sóng cơ bản ứng với LSPMSM 11kW.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. H. Isfahani, S. V. Zadeh, M. A. Rahman, 2011. *Evaluation of Synchronization Capability in Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors*. IEEE International Electric Machines&Drives Conference, pp. 1346-1350.
- [2]. R. Sadoughi, M. Zare, M. Aziz, 2015. *Comparison Between Line Start PM Synchronous Motor and Induction Motor With Same Nominal Power and Same Pole Pairs When Fed by VF Control Drive*. International Journal Electronics Communication and Computer Engineering, Vol. 6, Iss. 2.
- [3]. A. Vagati, G. Franceschini, I. Marongiu, G. P. Troglia, 1992. *Design Criteria of High Performance Synchronous Reluctance Motors*. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting.
- [4]. Abdolamir Nekoubin, 2011. *Design a Line Start Synchronous Motor and Analysis Effect of the Rotor Structure on the Efficiency*. World Academy of Science, Engineering and Technology 57

- [5]. T.J.E. Miller, 1989. *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*. Clarendon Press-Oxford.
- [6]. J.F.Gieras, M. Wing, 2002. *Permanent Magnet Motor Technology Design and Applications*. Marcel Dekker, Inc.
- [7]. V. Elistatova, 2016. *Optimal Design of Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors of High Efficiency*. Doctoral Thesis, Université Lille-de-France.
- [8]. R. T. Ugale, Gaurav Singh, Sriniva Baka, B. N. Chaudhari, 2009. *Effective Energy Conservation for the Agricultural Sector using Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors*. IEEE Region 10 Conference TENCON, pp. 1-5.
- [9]. C.C. Hwang, S.M. Chang, C.T. Pan, T.Y. Chang, 2002. *Estimation of Parameters of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 239, pp. 600 -603.
- [10]. CompleteMaxwell2D_V15, 2010.

AUTHORS INFORMATION

Le Anh Tuan¹, Bui Duc Hung²

¹Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry

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