

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA BẢO HÒA MẠCH TỪ VÀ HIỆU ỨNG MẶT NGOÀI ĐẾN ĐẶC TÍNH KHỞI ĐỘNG CỦA ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU KHỞI ĐỘNG TRỰC TIẾP

STUDYING EFFECTS OF MAGNETIC SATURATION AND SKIN EFFECT ON START CHARACTERISTICS OF LINE START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

Lê Anh Tuấn, Bùi Đức Hùng, Phùng Anh Tuấn

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội;

tuanla@vinacominpower.vn; hung.buiduc@hust.edu.vn; tuan.phunganh1@hust.edu.vn

Tóm tắt - Hiện nay, nghiên cứu đặc tính khởi động đang được quan tâm và mang tính thời sự bởi nó quyết định đến sự phổ biến của LSPMSM. Mô hình toán của LSPMSM viết theo hệ tọa độ d, q thường được sử dụng để mô phỏng các đặc tính của động cơ, tuy nhiên, trong quá trình khởi động xuất hiện hiện tượng bão hòa mạch từ và hiệu ứng mặt ngoài nhưng các yếu tố này lại chưa được xét tổng hợp hoặc chỉ được xét một cách riêng rẽ trong mô hình đề xuất nghiên cứu LSPMSM. Vì vậy, bài báo đề xuất nghiên cứu mô hình LSPMSM có xét ảnh hưởng của bão hòa mạch từ và hiệu ứng mặt ngoài, trong đó, các thông số của động cơ được hiệu chỉnh là các đại lượng phi tuyến. Để đánh giá sự chính xác của mô hình đề xuất, bên cạnh so sánh kết quả với phần mềm ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH), bài báo cũng tiến hành thực nghiệm một LSPMSM 3 pha, 2,2 kW thực tế, các kết quả kiểm nghiệm đều khẳng định sự chính xác của mô hình đưa ra.

Từ khóa - động cơ; động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp; nam châm vĩnh cửu; bão hòa mạch từ; hiệu ứng mặt ngoài.

Abstract - Now, the LSPMSM's start characteristics, which play an important role in LSPMSM popularity, are still under consideration. A LSPMSM's model in the $d-q$ reference frame is often used to simulate LSPMSM's start characteristics. During run-up period, the phenomena of saturation and skin effect occur but these have not been taken into account for the model. Hence, a LSPMSM's modified model considering saturation and skin effect is proposed in this paper. Here, LSPMSM's parameters are nonlinear. For evaluating the accuracy of the proposed model, LSPMSM's start characteristics simulated by the model will be compared with the results of finite element analysis and a 3 phase 2.2 kW prototype LSPMSM. All results are in good agreement.

Key words - motors; permanent magnet synchronous motors; line start; permanent magnet; magnetic saturation; skin effect.

1. Đặt vấn đề

Honsinger [1] nghiên cứu mô hình toán động cơ điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp (LSPMSM) được viết theo hệ tọa độ d, q với các tham số đầu vào là điện áp, điện cảm, điện trở stato và rôto, từ thông do nam châm vĩnh cửu (NCVC) sinh ra, ... Do công nghệ tính toán thời điểm này chưa phát triển nên Honsinger không trực tiếp mô phỏng đặc tính LSPMSM mà thông qua mô hình toán, Honsinger xây dựng các phương trình mô-men không đồng bộ (mô-men lồng sóc) và mô-men cản dưới dạng giải tích.

Hiện nay, mô hình toán LSPMSM được viết theo hệ tọa độ d, q do Honsinger đề xuất vẫn được ứng dụng phổ biến để mô phỏng các đặc tính của động cơ [2], [3], [4]... Trong đó, các thông số động cơ thường được xét ở dạng hằng số. Trong quá trình khởi động, dòng khởi động lớn dẫn đến hiện tượng bão hòa trong mạch từ [5], bên cạnh đó còn xuất hiện hiện tượng hiệu ứng mặt ngoài [6] đối với các động cơ có rôto lồng sóc (LSPMSM có cấu trúc này), nhưng các yếu tố trên lại chưa được xét tổng hợp hoặc chỉ được xét một cách riêng rẽ khi nghiên cứu LSPMSM [6].

Đối với ảnh hưởng của bão hòa mạch từ: Trong quá trình khởi động, do bão hòa mạch từ, các thông số L_{md} , L_{mq} phải được xét là các đại lượng phi tuyến [5]. Do ảnh hưởng của bão hòa mạch từ trong quá trình khởi động, tương tự SCIM, thông số điện kháng tản stato, rôto x_1 , x_2 cũng bị tác động và cũng phải được xét là đại lượng phi tuyến [7].

Đối với ảnh hưởng của hiện tượng hiệu ứng mặt ngoài: LSPMSM kết cấu rôto lồng sóc, trong quá trình khởi động phải xét đến ảnh hưởng của hiệu ứng mặt ngoài, vì vậy các thông số điện trở và điện kháng tản rôto phải được xét là các đại lượng phi tuyến và là hàm của hệ số trượt s [6].

Để tổng hợp các yếu tố chính ảnh hưởng đến quá trình khởi động, bài báo đề xuất nghiên cứu LSPMSM với mô hình toán được hiệu chỉnh. Trong đó, các thông số trong mô hình được xét là các đại lượng phi tuyến và là hàm của các biến phụ thuộc trạng thái bão hòa mạch từ, hiệu ứng mặt ngoài, nhằm đảm bảo chính xác kết quả mô phỏng.

Trong nghiên cứu, bài báo thử nghiệm với LSPMSM 3 pha, 2,2 kW, tốc độ 1.500 vòng/phút, được cải tạo từ SCIM (SCIM chủng loại 3K112-S4 của Công ty Cổ phần Chế tạo Điện cơ Hà Nội) với cấu trúc stato giữ nguyên, rôto được hiệu chỉnh bằng cách gắn các khối NCVC NdFeB-N35 trong lõi thép. Kết quả mô phỏng đặc tính khởi động của LSPMSM từ mô hình toán hiệu chỉnh sẽ được so sánh với kết quả mô phỏng từ phần mềm Ansys/Maxwell 2D ứng dụng phương pháp PTHH và với kết quả đo lường thực tế LSPMSM mẫu thử để kiểm nghiệm mô hình đề xuất.

2. Kết quả nghiên cứu và khảo sát

2.1. Mô hình toán của LSPMSM do Honsinger đề xuất

Mô hình LSPMSM do Honsinger đề xuất viết theo hệ tọa độ d, q như sau [1]:

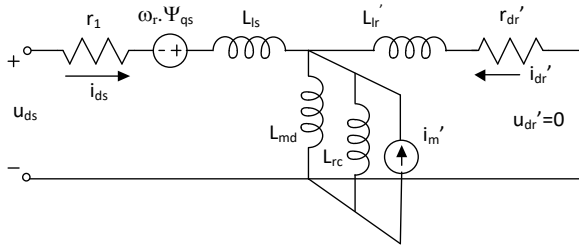
Phương trình điện từ:

$$\begin{cases} u_{ds} = r_1 \cdot i_{ds} + p \cdot (L_{ds} \cdot i_{ds} + L_{md} \cdot i_{dr}') - \omega_r \cdot (L_{qs} \cdot i_{qs} + L_{mq} \cdot i_{qr}') \\ u_{qs} = r_1 \cdot i_{qs} + p \cdot (L_{qs} \cdot i_{qs} + L_{mq} \cdot i_{qr}') + \omega_r \cdot (L_{ds} \cdot i_{ds} + L_{md} \cdot i_{dr}' + \Psi'_m) \\ u_{dr}' = r_{dr}' \cdot i_{dr}' + p \cdot (L_{dr}' \cdot i_{dr}' + L_{md} \cdot i_{ds}) = 0 \\ u_{qr}' = r_{qr}' \cdot i_{qr}' + p \cdot (L_{qr}' \cdot i_{qr}' + L_{mq} \cdot i_{qs}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

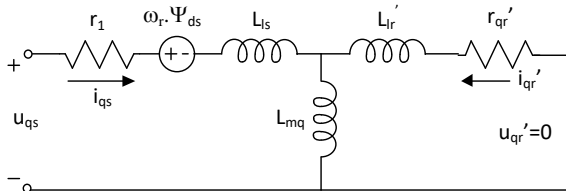
Phương trình điện cơ:

$$\begin{cases} M_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \left[(L_{md} \cdot i_{dr}' \cdot i_{qs} - L_{mq} \cdot i_{qr}' \cdot i_{ds}) + \Psi'_m \cdot i_{qs} + (L_{md} - L_{mq}) \cdot i_{ds} \cdot i_{qs} \right] \\ p \cdot \omega_r = \frac{P}{2 \cdot J} (M_e - M_c - \omega_r \cdot F) \end{cases} \quad (2)$$

Sơ đồ mạch điện thay thế dọc trục và ngang trục của LSPMSM thỏa mãn các phương trình điện áp và từ thông trong mô hình toán (1)-(2) được thể hiện ở Hình 1 và Hình 2, trong đó, để mô hình hóa, thay thế $\Psi'_m = L_{rc} \cdot i'_m$, L_{rc} là điện kháng giả tưởng NCVC [9], i'_m là dòng từ hóa tương đương quy đổi sang stato của NCVC:



Hình 1. Sơ đồ mạch điện thay thế trục d (nguồn [9])

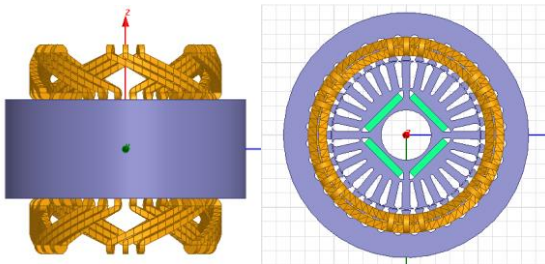


Hình 2. Sơ đồ mạch điện thay thế trục q (nguồn [9])

2.2. Ảnh hưởng của bão hòa mạch từ đến điện cảm từ hóa đồng bộ dọc trục, ngang trục L_{md} , L_{mq}

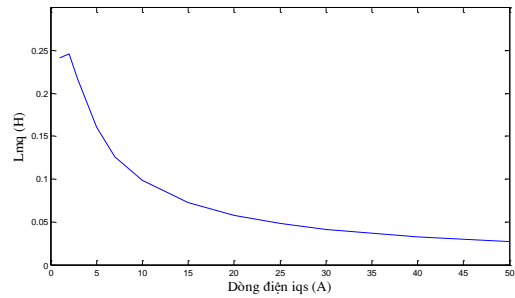
2.2.1. Ảnh hưởng của bão hòa mạch từ đến điện cảm từ hóa đồng bộ ngang trục L_{mq}

Trong quá trình khởi động, dòng khởi động lớn dẫn đến bão hòa mạch từ trong lõi thép của LSPMSM. Do ảnh hưởng của bão hòa mạch từ, điện kháng đồng bộ ngang trục phải được xét là đại lượng phi tuyến phụ thuộc vào trạng thái bão hòa của động cơ và là hàm của dòng ngang trục i_{qs} , $L_{mq} = f(i_{qs})$ [5].



Hình 3. Cấu tạo LSPMSM 3 pha, 2,2 kW

Đối với LSPMSM 3 pha, 2,2 kW thử nghiệm tại Hình 3, đặc tính $L_{mq} = f(i_{qs})$ được xác định bằng phần mềm Ansys/Maxwell 2D ứng dụng phương pháp PTHH như Hình 4 [5]:



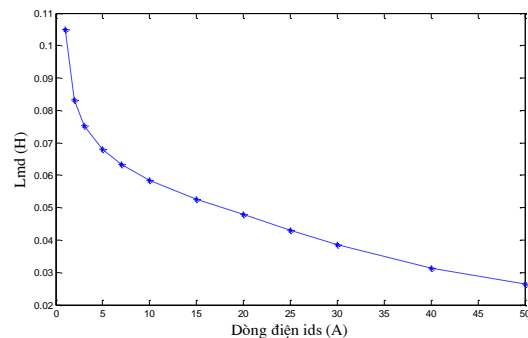
Hình 4. Đặc tính $L_{mq} = f(i_{qs})$ tính toán với phương pháp PTHH

Bảng 1. Kết quả tính toán đặc tính $L_{mq} = f(i_{qs})$ với phương pháp PTHH

Dòng i_{qs} (A)	L_{mq} (H)
1	0,2414
3	0,2167
7	0,1264
15	0,0723
30	0,0416
40	0,0328
50	0,0272

2.2.2. Ảnh hưởng của bão hòa mạch từ đến điện cảm từ hóa đồng bộ dọc trục L_{md}

Tương tự điện cảm đồng bộ ngang trục, trong quá trình khởi động, điện cảm đồng bộ dọc trục cũng phải xét là đại lượng phi tuyến và là hàm của dòng i_{ds} , $L_{md} = f(i_{ds})$. Sử dụng Ansys/Maxwell 2D, xác định đặc tính $L_{md} = f(i_{ds})$ của LSPMSM 3 pha, 2,2 kW thử nghiệm như Hình 5.



Hình 5. Đặc tính $L_{md} = f(i_{ds})$ tính toán với phương pháp PTHH

Bảng 2. Kết quả tính toán đặc tính $L_{md} = f(i_{ds})$ với phương pháp PTHH

Dòng i_{ds} (A)	L_{md} (H)
1	0,10493
3	0,07534
7	0,06344
15	0,05266
30	0,03851
40	0,03136
50	0,02646

2.3. Ảnh hưởng của hiệu ứng mặt ngoài đến điện trở và điện kháng tản rôto, r'_2 , x'_2

LSPMSM là động cơ có rôto lồng sóc, vì thế, quá trình khởi động phải xét đến ảnh hưởng của hiện tượng hiệu ứng

mặt ngoài. Khi đó điện cảm và điện trở rôto được xác định là hàm của độ trượt s [6].

Điện kháng tản rôto được xác định theo hàm:

$$x'_{r2} = x'_{r0} + x'_{r2}.k_{\xi R}(s) \tag{3}$$

Điện trở rôto được xác định theo hàm:

$$r'_2 = r'_{rv} + r'_{rd}.k_{\xi R}(s) \tag{4}$$

Trong đó, $k_{\xi L}(s)$, $k_{\xi R}(s)$ lần lượt là hệ số hiệu ứng mặt ngoài điện kháng tản và hệ số hiệu ứng mặt ngoài điện trở phụ thuộc độ trượt s .

2.4. Ảnh hưởng bão hòa mạch từ và hiệu ứng mặt ngoài đến điện kháng tản stato, rôto x_1, x'_2

Trong quá trình khởi động, tương tự SCIM giả thiết: Thông số điện kháng tản stato và rôto x_1, x'_2 do bão hòa mạch từ gây ra giảm tỷ lệ bậc nhất với dòng điện khởi động [7].

Như vậy, xét ảnh hưởng của bão hòa mạch từ, điện cảm tản stato được xác định như sau:

$$x_1 = x_{10} - (I_s - I_{sdm}).k_{bhx1} \tag{5}$$

Trong đó, x_{10} là thành phần điện kháng tản hằng số không phụ thuộc vào trạng thái bão hòa mạch từ; I_s, I_{sdm} tương ứng là thành phần dòng stato tức thời và định mức stato; k_{bhx1} là hệ số bão hòa đặc tính điện kháng tản stato.

Đối với điện cảm tản rôto, trong quá trình khởi động, ngoài ảnh hưởng của hiệu ứng mặt ngoài (3) còn chịu ảnh hưởng của bão hòa mạch từ [7]. Như vậy, điện kháng tản rôto được xác định:

$$x'_{r2} = x'_{r0} + x'_{r2}.k_{\xi R}(s) - (I_s - I_{sdm}).k_{bhx2} + x'_{20bh} \tag{6}$$

Trong đó, x'_{r0} là thành phần điện kháng hằng số rôto quy đổi không chịu ảnh hưởng của hiệu ứng mặt ngoài, x'_{r2} là thành phần điện kháng tản rãnh rôto quy đổi, k_{bhx2} là hệ số bão hòa đặc tính điện kháng tản rôto, x'_{20bh} là đại lượng điện kháng hằng số.

2.5. Mô hình toán của LSPMSM khi xét bão hòa mạch từ và hiệu ứng mặt ngoài

Khi xét ảnh hưởng của bão hòa mạch từ và hiệu ứng mặt ngoài, các thông số của LSPMSM trong quá trình khởi động được xác định:

- Điện cảm từ hóa dọc trục, ngang trục L_{md}, L_{mq} : Như Bảng 1, 2.

- Điện trở rôto:

$$r'_2 = r'_{rv} + r'_{rd}.k_{\xi R}(s)$$

- Điện kháng tản rôto:

$$x'_{r2} = x'_{r0} + x'_{r2}.k_{\xi R}(s) - (I_s - I_{sdm}).k_{bhx2} + x'_{20bh}$$

- Điện kháng tản stato:

$$x_1 = x_{10} - (I_s - I_{sdm}).k_{bhx1}$$

Áp dụng kết quả tính toán cho LSPMSM thử nghiệm 3 pha, 2,2 kW, các thông số được xác định cụ thể ở Bảng 3.

Bảng 3. Thông số LSPMSM 3 pha, 2,2 kW xét hiệu ứng mặt ngoài và bão hòa mạch từ

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Điện trở stato	$r_1=3,6$	Ω

Điện trở lồng sóc rôto quy đổi	$r'_2 = r'_{gr} = r'_{dr} = 0,72 + 1,39.k_{\xi R}(s)$	Ω
Điện cảm tản stato	$L_{\xi s} = 13,25 - 0,0426.I_s$	mH
Điện cảm tản lồng sóc rôto quy đổi	$L'_{\xi r} = 6,604 + 5,11.k_{\xi L}(s) - 0,112.I_s$	mH
Điện cảm từ hóa đồng bộ dọc trục	Tra bảng $1L_{md} = f(i_{ds})$	mH
Điện cảm từ hóa đồng bộ ngang trục	Tra bảng $2L_{mq} = f(i_{qs})$	mH
Sức điện động cảm ứng NCVC	$E_0=118$	V

Vậy, mô hình toán LSPSM khi xét ảnh hưởng của bão hòa mạch từ và hiệu ứng mặt ngoài được hiệu chỉnh:

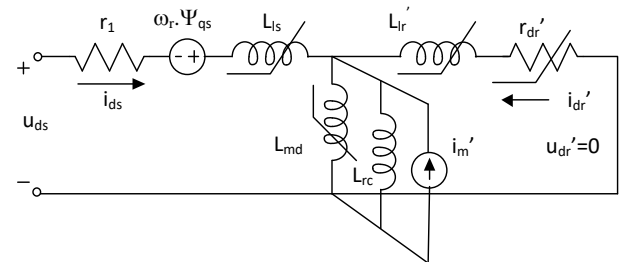
Phương trình điện từ:

$$\begin{cases} u_{ds} = r_1.i_{ds} + p.[(L_{\xi s}(I_s) + L_{md}(i_{ds}))i_{ds} + L_{md}(i_{ds}).i'_{dr} + \Psi'_m] - \omega_r.[(L_{\xi s}(I_s) + L_{mq}(i_{qs}))i_{qs} + L_{mq}(i_{qs}).i'_{qr}] \\ u_{qs} = r_1.i_{qs} + p.([L_{\xi s}(I_s) + L_{mq}(i_{qs})]i_{qs} + L_{mq}(i_{qs}).i'_{qr}) + \omega_r.[(L_{\xi s}(I_s) + L_{md}(i_{ds}))i_{ds} + L_{md}(i_{ds}).i'_{dr} + \Psi'_m] \\ u_{dr} = r'_2(s).i'_{dr} + p.[L_{md}(i_{ds}).(i_{ds} + i'_{dr}) + L'_{\xi r}(I_s, s).i'_{dr} + \Psi'_m] = 0 \\ u_{qr} = r'_2(s).i'_{qr} + p.[L'_{\xi r}(I_s, s).i'_{qr} + L_{mq}(i_{ds}).(i_{qs} + i'_{qr})] = 0 \end{cases} \tag{7}$$

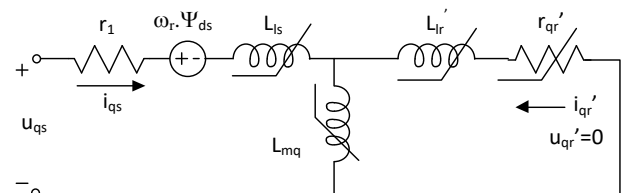
Phương trình điện cơ:

$$\begin{cases} M_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot [L_{md}(i_{ds}).i'_{dr}.i_{qs} - L_{mq}(i_{qs}).i'_{qr}.i_{ds}] + \Psi'_m.i_{qs} + (L_{md}(i_{ds}) - L_{mq}(i_{qs})).i_{ds}.i_{qs} \\ p.\omega_r = \frac{P}{2.J} (M_e - M_c - \omega_r.F) \end{cases} \tag{8}$$

Sơ đồ mạch điện thay thế dọc trục, ngang trục khi xét ảnh hưởng bão hòa mạch từ và hiệu ứng mặt ngoài:



Hình 6. Sơ đồ mạch điện thay thế trục d hiệu chỉnh



Hình 7. Sơ đồ mạch điện thay thế trục q hiệu chỉnh

2.6. Kết quả mô phỏng LSPMSM khi xét đến ảnh hưởng hiệu ứng mặt ngoài

Sử dụng MATLAB/Simulink mô phỏng mô hình toán hiệu chỉnh (7), (8) của LSPMSM, trong đó có xét đến bão

hòa mạch từ và hiệu ứng mặt ngoài. Kết quả mô phỏng sẽ được so sánh với:

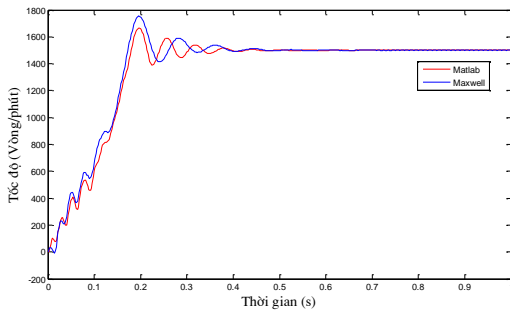
- Kết quả mô phỏng từ phần mềm Ansys/Maxwell 2D ứng dụng phương pháp PTHH.

- Kết quả đo lường từ LSPMSM thử nghiệm.

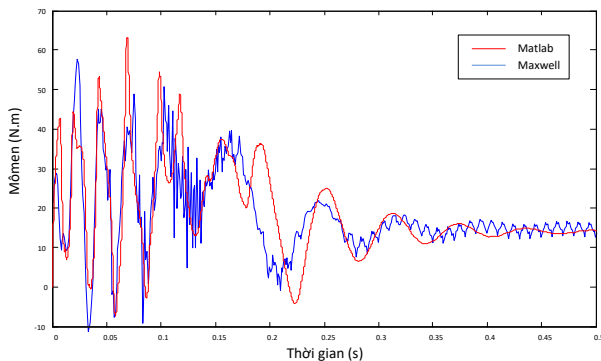
Trong đó, LSPMSM thí nghiệm 3 pha, 2,2 kW có cấu tạo như Hình 3, các thông số được xác định tại Bảng 3.

2.6.1. Kết quả mô phỏng từ mô hình và với phần mềm Ansys/Maxwell 2D

Mô phỏng LSPMSM ở các điều kiện, $J=J_R$, mô-men tải đặt vào trục động cơ bằng mô-men định mức, $M_C=14$ N.m. Kết quả mô phỏng như sau:



Hình 8. Đặc tính tốc độ khởi động từ mô phỏng mô hình với Matlab và Maxwell 2D



Hình 9. Đặc tính mô-men khởi động từ mô phỏng mô hình với Matlab và Maxwell 2D

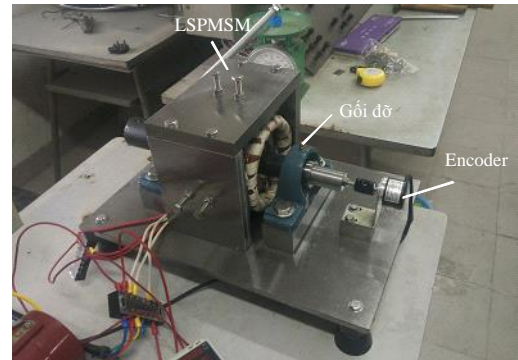
Các đặc tính khởi động thu được từ phương pháp mô phỏng mô hình toán hiệu chỉnh với Matlab và phương pháp PTHH với Ansys/Maxwell 2D là tương đồng nhau, cả 2 phương pháp có cho đường đặc tính tốc độ sẽ mất 0,5s để đi vào đồng bộ, để đạt đến tốc độ đồng bộ (1.500 vòng/phút) lần đầu LSPMSM trải qua 5 lần giảm tốc.

2.6.2. Kết quả mô phỏng từ mô hình với Matlab và thực nghiệm

Bài báo tiến hành đo lường kiểm nghiệm trên mô hình LSPMSM thí nghiệm 2,2 kW thực tế. LSPMSM được khảo sát ở chế độ không tải. Kết quả mô phỏng như Hình 10-13.

Kết quả đặc tính tốc độ, dòng khởi động của LSPMSM 2,2 kW thu được từ mô phỏng mô hình và đo lường thực tế tại chế độ không tải của động cơ là tương đồng nhau, sự sai khác ở đây có thể do một số nguyên nhân như phương pháp đo, thiết bị đo, công nghệ chế tạo, nạp từ nam châm vĩnh cửu, quá trình cân chỉnh trong lắp đặt, tuy nhiên, các sai số này là trong giới hạn cho phép và chấp nhận được. Với kết quả thực nghiệm trên, khẳng định mô hình toán LSPMSM

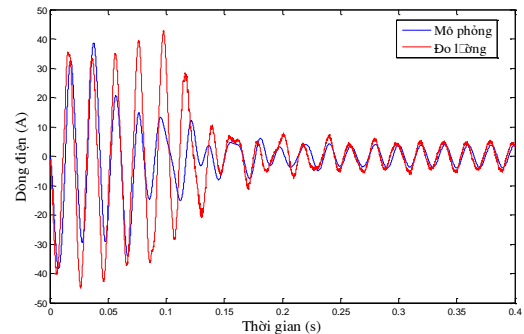
hiệu chỉnh là phù hợp với thực tế vận hành của động cơ.



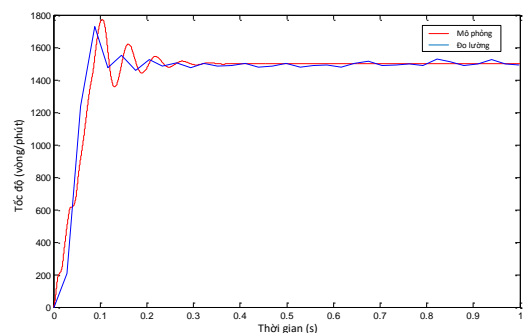
Hình 10. LSPMSM 3 pha, 2,2 kW thí nghiệm



Hình 11. Đo lường LSPSM 2,2 kW thí nghiệm



Hình 12. Đặc tính dòng điện khởi động mô phỏng mô hình với Matlab và đo lường



Hình 13. Đặc tính mô-men khởi động mô phỏng mô hình với Matlab và đo lường

3. Kết luận

Quá trình khởi động của LSPMSM chịu ảnh hưởng lớn nhất là bão hòa mạch từ và hiệu ứng mặt ngoài. Các nghiên

cứ trước đây thường xét các ảnh hưởng trên một cách độc lập, như nghiên cứu ảnh hưởng của hiệu ứng mặt ngoài [6]. Kết quả thu được từ các nghiên cứu đã từng bước làm cho kết quả đặc tính khởi động thu được từ mô phỏng làm hình toán LSPMSM chính xác với thực tế hơn, phần nào giúp người thiết kế điều chỉnh để cải thiện đặc tính khởi động. Tuy nhiên, để có đặc tính LSPMSM chính xác nhất, phần ảnh hưởng quá trình khởi động đòi hỏi phải xét tổng hợp của các ảnh hưởng bão hòa mạch từ và hiệu ứng mặt ngoài. Bài báo đã đề xuất mô hình toán LSPMSM hiệu chỉnh có xét đến đến bão hòa mạch từ và hiệu ứng mặt ngoài, trong đó, các thông số là các đại lượng phi tuyến và là hàm của các biến trạng thái vận hành của động cơ.

Kết quả mô phỏng từ mô hình toán hiệu chỉnh được so sánh với kết quả thu được từ phần mềm Ansys/Maxwell 2D và đo lường thực tế ở chế độ đầy tải và không tải tương ứng. Sự tương đồng trong các đặc tính khởi động thu được khẳng định sự chính xác của mô hình hiệu chỉnh đề xuất.

Kết quả mô hình toán và mô phỏng từ bài báo sẽ giúp ích rất nhiều cho các nhà thiết kế trong đánh giá đặc tính khởi động của LSPMSM, đồng thời có thể đưa ra các quyết định điều chỉnh phù hợp trước khi chế tạo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] V.B. Honsinger, "Permanent Magnet Machines: Asynchronous Operation", *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol.

PAS-99, No. 4, 1980.

- [2] V. Elistratova, M. Hecquet, P. Brochet, D. Vizireanu, M. Dessoude, *Analytical Approach for Optimal Design of a Line-Start Internal Permanent Magnet Synchronous Motor*, 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2013, pp. 1-7.
- [3] A. Takahashi, S. Kikuchi, K. Miyata, S. Wakui, H. Mikami, K. Ide, A. Binder, *Transient-Torque Analysis for Line-Starting Permanent-Magnet Synchronous Motors*, IEEE 18 th International Conference on Electrical Machines, 2008, pp. 1-6.
- [4] M. H. Soreshjani, A. Sadoughi, "Conceptual Comparison of Line-Start Permanent Magnet Synchronous and Induction Machines for Line-Fed of Different Conditions", *Journal of World's Electrical Engineering and Technology*, Issn: 2322-5114, 2014.
- [5] Le Anh Tuan, Bui Duc Hung, Phung Anh Tuan, Saturable q-axis magnetizing inductance calculation of Line Start-Permanent Magnet Synchronous Motors using Lumped Parameter Model, *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*, 2016, pp. 906 - 911.
- [6] Lê Anh Tuấn, Bùi Đức Hùng, Phùng Anh Tuấn, Bùi Minh Định, "Nghiên cứu ảnh hưởng của hiện tượng hiệu ứng mặt ngoài và giải pháp nâng cao chất lượng khởi động của động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng*, số 1-2017, 2017, trang 70-74.
- [7] Bùi Đức Hùng, *Luận án nghiên cứu quá trình động khởi động động cơ không đồng bộ rôto lồng sóc*, 1998, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
- [8] D. Stoia, M. Cernat, A. A. Jimoh, D. V. Nicolae, *Analytical Design and Analysis of Line Starting Permanent Magnet Synchronous Motors*, IEEE Africon'09, 2009, pp.1-7.
- [9] Chee-Mun Ong, *Dynamic Simulation of Electric Machinery using MATLAB/Simulink*, Prentice Hall PTR, 1998, pp. 1-7.

(BBT nhận bài: 28/06/2017, hoàn tất thủ tục phân biên: 01/08/2017)