

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG SỐ RĂNG RĂNG RÔTO ĐẾN HIỆU SUẤT VÀ HỆ SỐ CÔNG SUẤT Ở CHẾ ĐỘ XÁC LẬP ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU KHỞI ĐỘNG TRỰC TIẾP

STUDYING EFFECT OF ROTOR SLOT NUMBERS ON EFFICIENCY AND POWER FACTOR OF LINE START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS IN STEADY STATE

Lê Anh Tuấn¹, Bùi Minh Định², Phạm Văn Tuấn³

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội; leanhtuan0985@gmail.com

²Trường Đại học Bách khoa Hà Nội; dinh.buiminhdinh@hust.edu.vn

³Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh; tuanvp.bk@gmail.com

Tóm tắt - Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp với hiệu suất vận hành cao, hệ số công suất xấp xỉ 1 ở chế độ xác lập sẽ là một giải pháp thay thế từng phần cho động cơ không đồng bộ rôto lồng sóc đang được sử dụng phổ biến ở thời điểm hiện tại. Đối với động cơ này, kết cấu rôto ảnh hưởng rất lớn đến các thông số làm việc. Với cấu hình rôto, bên cạnh lựa chọn kích thước răng rãnh thì lựa chọn số lượng răng rãnh thích hợp cũng cần phải tính đến. Vì vậy, bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của số lượng răng rãnh rôto đến thông số vận hành của động cơ có công suất 2,2 kW, 3 pha, bốn cực được cải tiến từ động cơ không đồng bộ rôto lồng sóc. Từ kết quả, bài báo rút ra một số kết luận để nâng cao hiệu suất và hiệu số công suất khi thiết kế lựa chọn số lượng răng rãnh rôto.

Từ khóa - Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp; nam châm vĩnh cửu; răng rãnh; hiệu suất; hệ số công suất

1. Đặt vấn đề

Động cơ không đồng bộ rôto lồng sóc (Squirrel cage induction motor - SCIM) hiện nay rất phổ biến trong các lĩnh vực công nghiệp, nông nghiệp, sinh hoạt, điều khiển,... do chế tạo đơn giản, vận hành tin cậy, ít phải bảo dưỡng. Tuy nhiên, động cơ SCIM lại có nhược điểm chính là hiệu suất thấp, hệ số công suất không cao. Trong xu hướng tiết kiệm điện của thế giới nói chung và chính sách tiết kiệm điện năng của Việt Nam nói riêng đòi hỏi một giải pháp thay thế từng phần động cơ không đồng bộ bằng một loại động cơ khác có hiệu suất và hệ số công suất cao khi vận hành. Trong các dạng động cơ hiện nay, động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp (Line start permanent magnet synchronous motor - LSPMSM) ngoài ưu điểm của dòng động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu là hiệu suất vận hành, hệ số công suất cao, kết cấu nhỏ gọn, vận hành với tốc độ ổn định, thuận tiện khi vận hành và bảo dưỡng,... LSPMSM còn có ưu điểm là khả năng tự khởi động khi cấp nguồn, vì vậy người ta kỳ vọng LSPMSM sẽ là động cơ hiệu suất cao thay thế từng phần cho động cơ không đồng bộ trong tương lai [1], [2].

Đối với LSPMSM, mặc dù được khẳng định là có hiệu suất làm việc, hệ số công suất cao, nhưng nếu thiết kế không tốt thì các thông số làm việc của động cơ có thể không đảm bảo thậm chí thấp hơn so với động cơ SCIM. Các yếu tố liên quan thiết kế LSPMSM có thể kể đến là: Cấu hình stato, kích thước và vật liệu nam châm vĩnh cửu (NCVC), cấu hình rôto, cấu tạo răng rãnh rôto,... Nghiên cứu tập trung phân tích ảnh hưởng của số lượng răng rãnh rôto đến các thông số làm việc của LSPMSM 3 pha, 2,2 kW, tốc độ 1.500 vòng/phút được cải tạo từ SCIM (SCIM

Abstract - These days, line start permanent magnet synchronous motors with high productivity and high power factor in steady state will be a feasible solution to partially replacing squirrel cage induction motors which are widely used. In designing process. Beside stator's configuration, dimension of magnet rod and the type of magnet material, motor's productivity and power factor are especially influenced by the rotor's configuration. Therefore, this paper studies the effect of number of rotor slots as one of the aspects of rotor's configuration on productivity and power factor of a 2,2 kW, 3 phase, 4 pole line start permanent magnet synchronous motor. As a result, some good proposals enhancing productivity and power factor of these motors will be extracted.

Key words - Line start permanent magnet synchronous motors; permanent magnet; slot; productivity, power factor.

thuộc chủng loại 3K112-S4 của Công ty Cổ phần Chế tạo điện cơ Hà Nội). Trong đó, cấu hình stato, kích thước thanh nam châm vĩnh cửu NdFeB-N45, kích thước răng rãnh rôto được giữ nguyên. Bài báo nghiên cứu thay đổi số lượng răng rãnh rôto và mô phỏng để đánh giá chất lượng vận hành ở chế độ xác lập của động cơ. Từ kết quả đạt được, bài báo rút ra một số kết luận trong thiết kế để đảm bảo hiệu suất, hệ số công suất vận hành của động cơ.

2. Kết quả nghiên cứu và mô phỏng

2.1. Mô hình LSPMSM ở chế độ xác lập

Trong chế độ vận hành xác lập, LSPMSM thường được mô hình hóa tương tự như động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (Permanent magnet synchronous motor-PMSM) theo trục tọa độ d-q. Phía stato, các đại lượng 3 pha sẽ được biến đổi theo hệ trục tọa độ d-q gắn liền với trục rôto theo biến đổi Park [3].

Phương trình điện áp LSPMSM [4]:

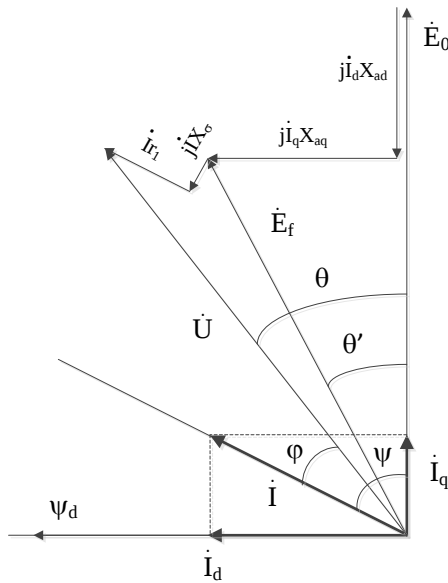
$$\vec{U} = \vec{E}_0 + r_1 \vec{I} + j X_d \vec{I}_d + X_q \vec{I}_q \quad (1)$$

$$\vec{U} = \vec{E}_0 + r_1 \vec{I} + j X_\sigma \vec{I} + j X_{ad} \vec{I}_d + X_{aq} \vec{I}_q \quad (2)$$

Trong đó:

- $\vec{E}_0 = j \cdot \omega \cdot \Psi_d$, Ψ_d là từ thông do nam châm vĩnh cửu sinh ra.
- r_1 là điện trở dây quấn stato.
- X_σ là điện kháng tản dây quấn stato; X_{ad} , X_{aq} là điện kháng từ hóa đồng bộ dọc trục và điện kháng từ hóa đồng bộ ngang trục.

Từ phương trình (1), (2), xây dựng được đồ thị vectơ điện áp như Hình 1.



Hình 1. Đồ thị điện áp của LSPMSM [4]

Từ (1), (2), biến đổi ta được:

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + j X_s \dot{I}_d + \dot{I}_d (r_1 + j X_{ad}) + \dot{I}_q (r_1 + j X_{aq}) \quad (3)$$

$$\dot{U}_f = \dot{U} - \dot{I}_r - j X_\sigma \dot{I} \quad (4)$$

$$\dot{U}_f = \dot{U} + j(X_{ad} \dot{I}_d + X_{aq} \dot{I}_q) \quad (5)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_d + \dot{I}_q \quad (6)$$

$$\dot{I}_d = \dot{I} \sin \psi; \quad \dot{I}_q = \dot{I} \cos \psi \quad (7)$$

Điện áp đầu vào được xác định theo trục d-q như sau:

$$\dot{U} \sin \theta = \dot{I}_d r_1 + \dot{I}_q X_q \quad (8)$$

$$\dot{U} \cos \theta = \dot{E}_0 - \dot{I}_d X_d + \dot{I}_q X_q \quad (9)$$

Trong đó, θ là góc tải của động cơ.

Các thành phần dòng điện được xác định như sau:

$$\dot{I}_d = \frac{\dot{U} (X_q \cos \theta - r_1 \sin \theta) - \dot{E}_0 X_q}{X_d X_q + r_1^2} \quad (10)$$

$$\dot{I}_q = \frac{\dot{U} (r_1 \cos \theta + X_d \sin \theta) - \dot{E}_0 R}{X_d X_q + r_1^2} \quad (11)$$

Công suất và mômen điện từ được xác định như sau:

Công suất đầu vào:

$$P_{in} = 3 [E_0 I_q + R I^2 + I_d I_q (X_d - X_q)] \quad (12)$$

Bỏ qua tổn hao lõi thép stato, công suất điện từ được xác định bằng công suất đầu vào trừ đi phần công suất hao trên điện trở cuộn dây stato:

Công suất tổn hao cuộn dây stato:

$$\Delta P_w = 3 r_1 I^2 = 3 r_1 (I_d^2 + I_q^2) \quad (13)$$

Công suất điện từ

$$P_{em} = P_{in} - \Delta P_w = 3 [E_0 I_q - I_d I_q (X_q - X_d)] \quad (14)$$

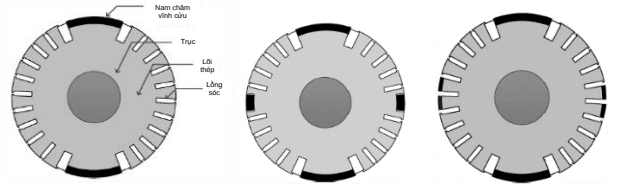
Mômen điện từ

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{2 \pi n_s} = \frac{3}{2 \pi n_s} \left[\frac{U E_0}{X_d} \sin \theta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \right] \quad (15)$$

2.2. Răng rãnh rôto

2.2.1. Cấu hình LSPMSM

Động cơ LSPMSM điển hình có cấu tạo stato giống động cơ không đồng bộ, rôto có lồng sóc hoặc các cuộn khởi động. Tuy nhiên, LSPMSM khác biệt so với động cơ SCIM là động cơ loại này có gắn thêm các thanh NCVC trên bề mặt hoặc chìm trong lõi thép rôto. Một số cấu hình rôto LSPMSM điển hình như Hình 2, Hình 3

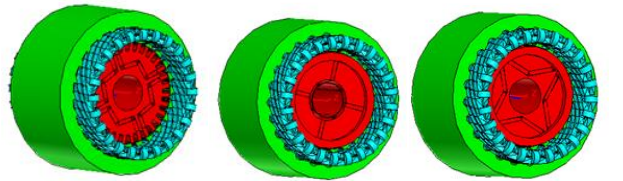


Cấu hình 1

Cấu hình 2

Cấu hình 3

Hình 2. Một số cấu tạo rôto LSPMSM NCVC gắn bề mặt [5]



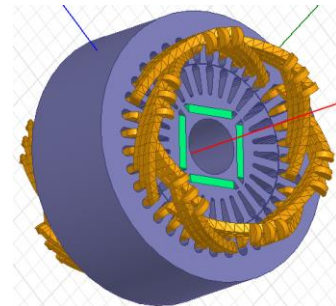
Cấu hình 4

Cấu hình 5

Cấu hình 6

Hình 3. Một số cấu tạo rôto LSPMSM NCVC gắn chìm [6]

Để đánh giá ảnh hưởng của số lượng răng rãnh rôto đến hiệu suất và hệ số công suất của LSPMSM, bài báo nghiên cứu LSPMSM 3 pha, 2,2kW, bốn cực thử nghiệm có cấu hình như sau:



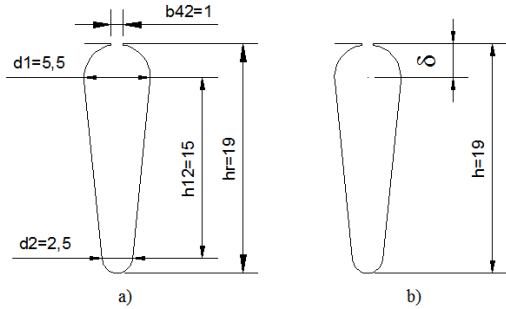
Hình 4. LSPMSM 2,2 kW thử nghiệm

2.2.2. Răng rãnh rôto

Khác với các động cơ PMSM thông thường, rôto của LSPMSM thường có răng rãnh (tương tự SCIM) để đặt các thanh dẫn lồng sóc [4]. Trong giai đoạn mở máy, LSPMSM khởi động như một động cơ không đồng bộ nhờ có kết cấu lồng sóc này. Tuy nhiên, kết cấu lồng sóc chỉ có tác dụng khi động cơ mở máy. Hiện nay, các thiết kế lồng sóc chủ yếu tập trung vào kích thước và số lượng răng rãnh để động cơ có khả năng khởi động tốt, bên cạnh đó cũng cần đảm bảo các thông số ở điều kiện vận hành xác lập. Nguyên nhân chủ yếu là, nếu điện trở rôto cao mômen khởi động lớn động cơ dễ khởi động, điện trở rôto nhỏ thì động cơ

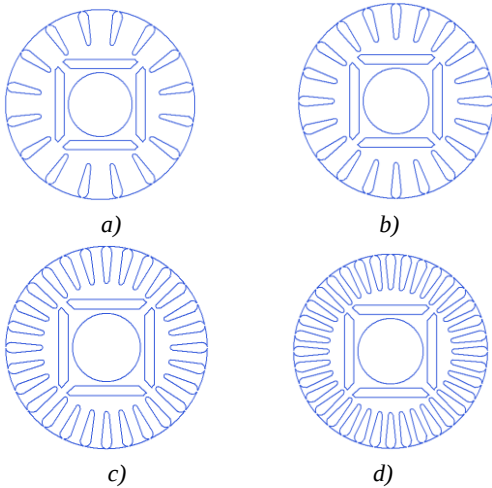
khó khởi động hơn thậm chí sẽ không khởi động được với các tải cần mômen ban đầu lớn như các tải thể năng. Bên cạnh đó, điện trở rôto nhỏ thì quá trình đồng bộ hóa dễ động cơ đi vào ổn định với tốc độ đồng bộ sẽ dễ dàng hơn so với trường hợp điện trở rôto lớn.

Về cấu tạo răng rãnh rôto, người ta thường sử dụng rãnh hình quả lê trong thiết kế, với mục đích để giảm thiểu các từ trường tán rãnh. Trong nghiên cứu, LSPMSM 2,2 kW, 3 pha thử nghiệm có cấu tạo rãnh rôto với kích thước như Hình 5.



Hình 5. Kích thước rãnh của LSPMSM thử nghiệm

Để đánh giá ảnh hưởng của số lượng răng rãnh rôto đến thông số vận hành của LSPMSM ở chế độ xác lập, bài báo nghiên cứu một số số lượng răng rãnh rôto khác nhau của động cơ thử nghiệm. Trong đó, cấu hình stato, kích thước răng rãnh rôto, kích thước và vật liệu NCVC không đổi. Số răng rãnh rôto (Z_2) thử nghiệm trong nghiên cứu cụ thể như sau: $Z_2 = 16, 20, 28$ và 36 rãnh. Số lượng răng rãnh rôto này là phù hợp với dải công suất của động cơ thử nghiệm 2,2 kW [7].



Hình 6. Cấu hình rãnh rôto LSPMSM thử nghiệm
a)-16 rãnh, b)-20 rãnh, c)-28 rãnh, d)-36 rãnh

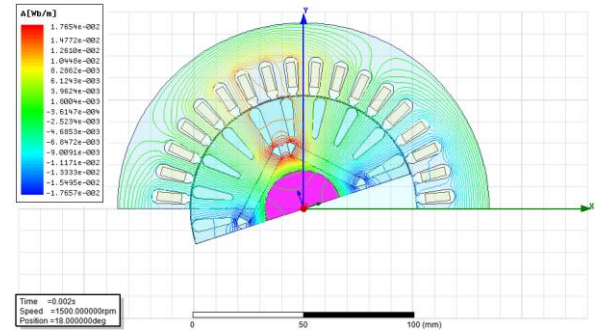
2.3. Phân bố từ trường, mật độ từ trường khe hở không khí và sức điện động không tải của LSPMSM

Phương pháp phần tử hữu hạn đã được chứng minh về hiệu quả và độ chính xác khi giải quyết các bài toán vi tích phân liên quan đến trường điện từ trong máy điện. Vì vậy bài báo sử dụng phần mềm Maxwell2D (Version16) ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method-FEM) để mô phỏng LSPMSM ở chế độ vận hành xác lập.

Trong mô phỏng, phân bố từ trường, mật độ từ trường

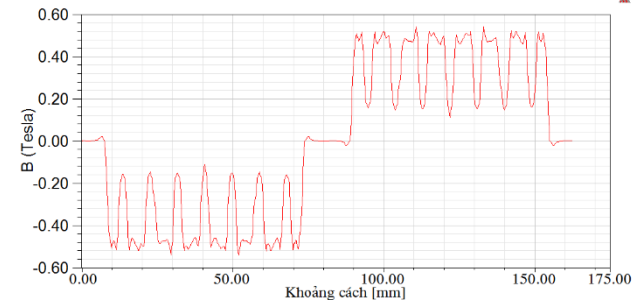
khe hở không khí do NCVC sinh ra và dạng sóng sức điện động không tải sẽ được phân tích và đánh giá chi tiết. Các đặc tính này có mối liên hệ với trị số sức điện động không tải E_0 là đại lượng ảnh hưởng đến các thông số vận hành động cơ. Khi số lượng răng rãnh rôto khác nhau dẫn đến sự thay đổi về giá trị sức điện động không tải E_0 . Sự thay đổi này kéo theo biến đổi về hiệu suất và hệ số công suất của động cơ ở chế độ làm việc xác lập và được bài báo phân tích chi tiết ở các phần sau.

Phân bố từ trường, mật độ từ trường tại khe hở không khí và dạng sóng sức điện động không tải khi mô phỏng LSPMSM 2,2 kW thử nghiệm với $Z_2=20$ như sau:



Hình 7. Đường đi từ trường do NCVC sinh ra với $Z_2=20$

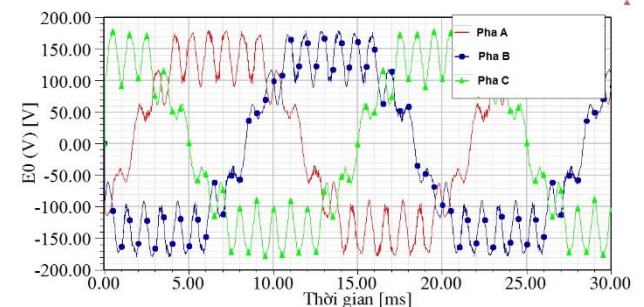
Từ Hình 7 có thể thấy, đường từ trường mô phỏng sẽ hình thành nên bốn phân vùng từ trường đều và đối xứng nhau. Bốn phân vùng này thể hiện 4 cực từ tương ứng do từ trường NCVC sinh ra.



Hình 8. Phân bố mật độ từ trường do NCVC sinh ra với $Z_2=20$

Hình 8 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 đã bị chia cắt do sự có mặt của răng rãnh stato, rôto.

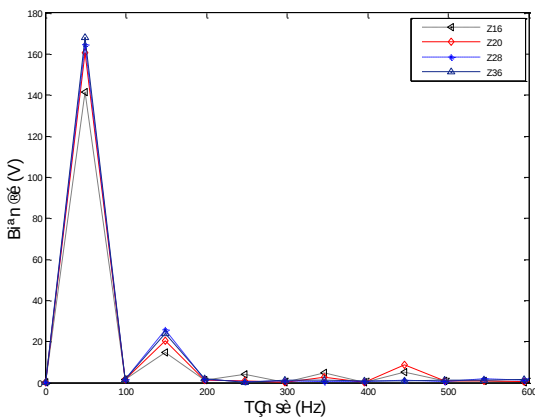
Trong điều kiện không tải, từ trường do NCVC sinh ra sẽ quét qua các cuộn dây stato và cảm ứng sức điện động không tải E_0 trên các cuộn dây. Khi mô phỏng, đặc tính sức điện động không tải trên các cuộn dây sẽ có dạng sau:



Hình 9. Dạng sóng sức điện động không tải E_0 với $Z_{21}=20$

Từ Hình 9, có thể nhận thấy, dạng sóng sức điện động không tải thu được từ mô phỏng, bài báo ứng dụng phần mềm MATLAB để phân tích FFT dạng sóng E_0 . Kết quả cuối cùng là các biên độ của tần số sóng cơ bản và tần số là bội số của sóng cơ bản (như Hình 10 và Bảng 1).

Từ các giá trị chuỗi mô tả dạng sóng sức điện động không tải thu được từ mô phỏng, bài báo ứng dụng phần mềm MATLAB để phân tích FFT dạng sóng E_0 . Kết quả cuối cùng là các biên độ của tần số sóng cơ bản và tần số là bội số của sóng cơ bản (như Hình 10 và Bảng 1).



Hình 10. Phân tích FFT dạng sóng E_0 ứng với số lượng răng rãnh rôto khác nhau

Bảng 1. Biên độ các sóng điều hòa khi phân tích FFT

Số răng rãnh rôto	$Z_2=16$	$Z_2=20$	$Z_2=28$	$Z_2=36$
Bậc 1	141,6	160,5	164,5	168,1
Bậc 3	14,8	20,5	25,9	23,9
Tỷ lệ (%)	10,5	12,8	15,7	14,2

Khi phân tích FFT dạng sóng E_0 có số lượng răng rãnh rôto khác nhau có thể nhận thấy, biên độ thành phần sóng cơ bản là lớn nhất. Tuy nhiên, thành phần sóng bậc 3 cũng chiếm tỷ lệ đáng kể so với sóng bậc 1 (lớn nhất khi $Z_2=28$ tương ứng với 15,7%). Bên cạnh đó, thành phần sóng bậc 9, bậc 11 cũng tồn tại, nhưng tỷ lệ nhỏ hơn so với thành phần sóng bậc 3 (lớn nhất là 5,4% ứng với $Z_2=20$). Các thành phần sóng điều hòa bậc cao này trong quá trình vận hành làm gia tăng tổn hao sắt, tổn hao đồng ảnh hưởng đến chất lượng vận hành của động cơ [8].

2.4. Phân tích RMxprt cho LSPMSM với số lượng răng rãnh rôto khác nhau

Để xác định hiệu suất và hệ số công suất của LSPMSM, bài báo sử dụng phần mềm Ansys/RMxprt. Phần mềm này hiện nay được sử dụng rất phổ biến trong các nghiên cứu về lĩnh vực động cơ điện nói chung và LSPMSM nói riêng [9], [10]. Ở chế độ vận hành xác lập, phần mềm được ứng dụng để mô phỏng tính toán hiệu suất và hệ số công suất của LSPMSM 2,2 kW thử nghiệm với số lượng răng rãnh rôto khác nhau. Kết quả tính toán hiệu suất và hệ số công suất với Ansys/RMxprt như tại Bảng 2.

Bảng 2. Hệ số công suất và hiệu suất LSPMSM 2,2kW với số lượng răng rãnh rôto khác nhau

Số răng rãnh rôto	$Z_2=16$	$Z_2=20$	$Z_2=28$	$Z_2=36$
Hệ số công suất	0,88	0,92	0,98	0,99
Hiệu suất (%)	89,1	93	93,9	94

Qua kết quả mô phỏng LSPMSM với Ansys/RMxprt có thể kết luận rằng, số lượng răng rãnh rôto khác nhau thì hiệu suất và hệ số công suất của động cơ cũng khác nhau. Với LSPMSM 2,2 kW thử nghiệm, khi số lượng răng rãnh rôto lớn hơn 20 răng thì độ thay đổi giá trị hệ số công suất tương đối nhỏ, độ thay đổi giá trị hiệu suất không đáng kể. Với số răng rãnh $Z_2=16$ thì hiệu suất và hệ số công suất của động cơ bị suy giảm đáng kể. Nguyên nhân có thể giải thích như sau, khi số lượng răng tăng thì dạng sóng E_0 sẽ được chia cắt thành nhiều bậc thang hơn, vì vậy khi phân tích FFT biên độ thành phần sóng cơ bản sẽ lớn hơn. Trong khi đó với số lượng răng nhỏ thì dạng sóng E_0 sẽ “bằng phẳng” hơn do đó biên độ thành phần sóng cơ bản giảm đi. Cụ thể, khi $Z_2=16$ thì thành phần E_0 cơ bản là 141,6 V trong khi đó thành phần E_0 cơ bản khi $Z_2=20$ là 160,5 V, độ thay đổi là 11,8%. Như đã phân tích ở Mục 2.1, E_0 ảnh hưởng đến hệ số công suất và hiệu suất của máy điện, vì vậy khi thành phần E_0 cơ bản thay đổi sẽ dẫn đến hiệu suất và hệ số công suất động cơ bị biến đổi theo.

Như vậy, nếu lựa chọn số răng rãnh rôto $Z_2=16$ thì hiệu suất và hệ số công suất của LSPMSM nhỏ hơn đáng kể so với $Z_2 \geq 20$. Lúc này, giá trị hiệu suất và hệ số công suất tương ứng là 89,1% và 0,88. Với kết quả này, LSPMSM không đạt được lớp IE4 theo tiêu chuẩn xếp lớp hiệu suất động cơ xoay chiều hạ áp IEC 60034-30-1 (Bảng 3).

Bảng 3. Tiêu chuẩn xếp lớp hiệu suất động cơ xoay chiều hạ áp 2,2 kW, 4 cực theo IEC 60034-30-1 [11], [12]

Công suất	IE1	IE2	IE3	IE4
2,2 kW	79,7 %	84,3%	86,7 %	89,5 %

3. Kết luận

Ở chế độ xác lập, LSPMS là động cơ có hiệu suất cao, hệ số công suất lớn (xấp xỉ bằng 1). Tuy nhiên, các thông số này sẽ chịu ảnh hưởng bởi cấu hình thiết kế của động cơ. Nếu lựa chọn cấu hình rôto, stato, không hợp lý sẽ dẫn đến hiệu suất và hệ số công suất của LSPMSM thấp (thậm chí có thể thấp hơn so với động cơ không đồng bộ có cùng dải công suất). Đối với rôto, bên cạnh xác định kích thước răng rãnh thì lựa chọn số lượng răng rãnh rôto hợp lý cũng phải được tính đến. Như vậy, việc lựa chọn răng rãnh rôto sẽ là lựa chọn kích thước và số lượng răng rãnh để đảm bảo hiệu suất, hệ số công suất trong quá trình vận hành xác lập.

Đối với LSPMSM thí nghiệm 2,2 kW thử nghiệm trên, để đảm bảo hiệu suất thì số lượng răng rãnh rôto với $Z_2 \geq 20$ là hợp lý (đạt được lớp IE4). Nhưng nếu tiếp tục đảm bảo hệ số công suất (xấp xỉ 1) thì $Z_2 \geq 28$ là hợp lý. Tuy nhiên, nếu lựa chọn $Z_2 = 36$ sẽ khó khăn khi bố trí, tăng độ phức tạp trong chế tạo rôto và gia tăng nguyên vật liệu lồng sóc. Bên cạnh đó, hiệu suất và hệ số công suất khi $Z_2=36$ cũng không tăng được nhiều khi so sánh với $Z_2=28$. Vì vậy, với LSPMSM 2,2 kW trên thì $Z_2=28$ răng là số lượng thích hợp nhất, có hiệu suất đáp ứng lớp IE4 theo

tiêu chuẩn IEC 60034-30-1 và có hệ số công suất lớn (93,9%). Tóm lại, đối với cấu hình rôto thì ngoài kích thước răng rãnh thì người thiết kế cần lựa chọn số lượng răng rãnh hợp lý nhằm đảm bảo hiệu suất, hệ số công suất trong quá trình vận hành đồng thời đơn giản và tiết kiệm nguyên vật liệu trong quá trình chế tạo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] L. S. Maraaba, Z. M. Al-Hamouz, "Mathematical modeling, simulation and experimental testing of interior-mount LSPMSM under stator inter-turn fault", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 34, Issue: 3, pp. 1213 - 1222, Sept. 2019.
- [2] Lê Anh Tuấn, Bùi Đức Hùng, Phùng Anh Tuấn, "Nghiên cứu ảnh hưởng của bão 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", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, số 9(118), trang 63-67, 2017,
- [3] L. S. Maraaba, Z. M. Al-Hamouz, A. Milhem, M. Abido, "Modelling of interior-mount LSPMSM under asymmetrical stator winding", *IET Electric Power Applications*, Vol. 12, Issue: 5, pp. 693-700, May 2018.
- [4] 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.
- [5] H. Saikura, S. Arikawa, T. Huguchi, Y. Yokoi, T. Abe, "Efficiency Improvement of a Self-Start Type Permanent Magnet Synchronous Motor", *IEEE 2014 International Power Electronics Conference*, 2014, pp. 3007-3011.
- [6] A. Nekoubin, "Design a Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor and Analysis Effect of the Rotor Structure on the Efficiency", *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol:5, No:9, 2011.
- [7] Trần Khánh Hà, Nguyễn Hồng Thanh, *Thiết kế máy điện*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật Hà Nội, 2002.
- [8] P. Li, J. X. Shen, W. Sun, Y. Zhang, "Investigation of LSPMSM with unevenly distributed squirrel cage bars", *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2013.
- [9] U. Demir, M.C. Aküner, "Using Taguchi method in defining critical rotor pole data of Lspmsm considering the power factor and efficiency", *Tehnicki Vjesnik* 2, 2017.
- [10] S. K. Chawrasia, C. K. Chanda, S. Banerjee, "Design and Analysis of In-Wheel Motor for an Electric Vehicle", *IEEE Calcutta Conference (CALCON)*, 2020.
- [11] B. Tsybikov, E. Beyerleyn, P. Tyuteva, "Comparison of energy efficiency determination methods for the induction motors", *MATEC Web of Conferences*, 2017.
- [12] V. Goman, S. Oshurbekov, V. Kazakbaev, V. Prakht, V. Dmitrievskii, "Energy efficiency analysis of fixed-speed pump drives with various types of motors", *MDPI, Electrical, Electronics and Communications Engineering*, 2019.

(BBT nhận bài: 18/8/2020, hoàn tất thủ tục phân biên: 23/11/2020)