

# NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA SỐ LƯỢNG RĂNG ROTO ĐẾN ĐẶC TÍNH LÀM VIỆC CỦA ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ 5,5KW 4 CỰC DỰA TRÊN PHẦN MỀM ANSYS MAXWELL

Đoàn Thị Như Quỳnh\*, Trần Thanh Tuyền

Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

\* Email: nhuquynh.dhcnqn@gmail.com

## TÓM TẮT

Động cơ không đồng bộ (KĐB) là loại động cơ được sử dụng rộng rãi nhất trong các ứng dụng công nghiệp nói chung và trong các thiết bị điện nhỏ nói riêng do cấu trúc chắc chắn, giá rẻ, chi phí bảo trì thấp và hiệu suất cao. Đặc tính làm việc là một trong những thông số quan trọng nhất của động cơ KĐB, bị ảnh hưởng nhiều bởi cấu trúc cũng như số lượng răng rôto. Do đó, cấu trúc và số lượng răng phải được thực hiện hợp lý để tối đa hóa hiệu suất của động cơ trong quá trình thiết kế động cơ không đồng bộ. Trong quá trình thiết kế động cơ KĐB, việc tính toán số lượng răng rôto cũng như các thông số khác có tầm quan trọng rất lớn và các hiệu ứng như gợn sóng mô-men xoắn, tiếng ồn âm thanh và rung động cơ học cần được nghiên cứu chi tiết. Trong nội dung bài báo, nhóm tác giả nghiên cứu ảnh hưởng của số lượng răng rôto lên chế độ làm việc của động cơ với số lượng răng rôto khác nhau. Nhóm tác giả sử dụng động cơ KĐB lồng sóc 3 pha, công suất 5.5 kW 4 cực làm mô hình nghiên cứu trên phần mềm Ansys Maxwell.

**Từ khóa:** Động cơ không đồng bộ (KĐB), phần mềm Ansys Maxwell, răng rôto, đặc tính làm việc, mô hình hoá.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Động cơ KĐB ba pha chiếm một vị trí quan trọng trong bối cảnh công nghiệp toàn cầu vì động cơ này sử dụng trong hầu hết các hệ thống truyền động động cơ điện trên toàn thế giới [1]. Các ứng dụng quan trọng của động cơ KĐB bao gồm hệ thống quạt làm mát, bơm nước, động cơ băng tải, ... [2]. Do đó đòi hỏi sự cần thiết phải phát triển thiết kế tối ưu của động cơ KĐB ba pha từ quan điểm chi phí thấp, hiệu suất tốt, ít gợn sóng mô-men xoắn, hệ số công suất tốt và độ ổn định nhiệt cao. Việc lựa chọn kết hợp răng stato và rôto để đạt được hiệu suất tối ưu là một khía cạnh bắt buộc của thiết kế động cơ KĐB ba pha [3]. Sự kết hợp thích hợp giữa các khe stato và rôto là điều cần thiết để đạt được hoạt động không có tiếng ồn và độ rung của động cơ KĐB và để loại bỏ ảnh hưởng của mômen hài bậc cao.

Ảnh hưởng của số lượng răng stato và các thanh dẫn rôto đến gợn sóng mô men điện từ của động cơ KĐB ba pha trong quá trình ở trạng thái

ổn định đã được phân tích trong [4]. Các tác giả đã trình bày hệ số gợn sóng mô-men xoắn và đánh giá nó cho các hỗn hợp khe khác nhau trong rôto lệch và không lệch. Người ta quan sát thấy rằng trong trường hợp động cơ KĐB có thanh rôto bị lệch, gợn sóng mô men điện từ bị ảnh hưởng rất nhiều, chỉ bởi số lượng thanh rôto chứ không phải do sự kết hợp khe.

Ảnh hưởng của tổ hợp khe stato - rôto đa dạng đến hiệu suất của động cơ cảm ứng điện áp cao 10 kV, 1000 kW (HVIM) đã được phân tích trong [3] bằng cách sử dụng mô hình phần tử hữu hạn (PTHH). Dựa trên mô hình này, các đặc tính hiệu suất như mô-men xoắn trung bình, công suất quá tải, mật độ từ khe hở không khí và gợn sóng mô-men xoắn của máy đang xem xét được nghiên cứu và từ đó đạt được nguyên tắc phân phối theo số khe rôto khác nhau. Ngoài ra, nhóm tác giả cũng cung cấp cái nhìn sâu sắc về tổn thất lõi stato và tổn thất dòng điện xoáy rôto đối với các khe rôto khác nhau. Cuối cùng, tài liệu này

đã so sánh các thông số hiệu suất của HVIM về sự thay đổi số lượng khe rôto và đã đi đến số lượng khe rôto hợp lý để cải thiện hiệu suất của động cơ.

Sự phụ thuộc của các đặc tính hiệu suất của động cơ KĐB vào việc lựa chọn số rãnh rôto đã được thử nghiệm trong [5]. Động cơ KĐB 6 cực rôto không lệch có các stato giống hệt nhau nhưng có số khe rôto đa dạng là 24, 28, 30, 40, 41 và 48 được xem xét để phân tích bằng phần mềm FEM. Các động cơ KĐB được coi là này được nghiên cứu và so sánh bằng phân tích hài hòa ở quá trình khởi động và ở tốc độ 1440 vòng/phút về các khía cạnh mật độ từ thông, dòng điện stato và mô-men xoắn điện từ. Các kết quả đã cho thấy tác động của việc lựa chọn đúng số khe rôto đến hiệu suất của động cơ KĐB. Ngoài ra, những kết quả này còn cho thấy rằng, động cơ KĐB với 48 rãnh rôto có hiệu suất tốt nhất nhờ hiệu suất khởi động đáng kể với hàm lượng hài hòa ít hơn và mật độ từ thông khe hở không khí, cùng với đáp ứng ở tốc độ bình thường của chúng. Do đó, việc phân tích hiệu suất của động cơ KĐB đối với các tổ hợp khe rôto-stato khác nhau trong giai đoạn thiết kế là điều không thể tránh khỏi. Việc phân tích như vậy được thực hiện trong bài báo này trên một động cơ KĐB mẫu sử dụng phần mềm Ansysmaxwell để đánh giá và so sánh.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Khi nghiên cứu ảnh hưởng của số lượng rãnh rôto đến hiệu suất và chế độ làm việc của động cơ KĐB, các tham số và cấu trúc stato và số cực của động cơ nghiên cứu khi thay đổi số lượng rãnh rôto là không đổi. Ngoài ra để đảm bảo lượng rãnh là một biến duy nhất khi số lượng rãnh thay đổi khác nhau cũng cần đảm bảo điện trở của thanh rôto bằng nhau. Điện trở của các thanh dẫn rôto của động cơ KĐB lồng sóc được xác định theo phương trình sau [6]:

$$r_t = K \frac{k_2 l'_2 \rho}{s_t Z_2} \quad (1)$$

Trong đó:  $r_t$  là điện trở thanh dẫn lồng sóc ( $\Omega$ );  $K$ ,  $k_2$  là các hệ số;  $Z_2$  là số rãnh rôto của động cơ KĐB;  $\rho$  là điện trở suất của vật liệu thanh dẫn ở

hiệu suất tính toán;  $s_t$  là tiết diện thanh dẫn rôto ( $\text{mm}^2$ );  $l'_2$  là chiều dài của rôto (cm);

Từ phương trình (1) để đảm bảo cùng một điện trở của thanh dẫn rôto dưới các số rãnh khác nhau, biểu thức dưới mẫu của phương trình (1) phải được đảm bảo không thay đổi. Tức là tổng diện tích của rãnh rôto là nhất quán. Do chiều rộng mở của khe rôto cũng ảnh hưởng đến từ trường khe hở không khí nên tổng chiều rộng mở của khe rôto phải được giữ nguyên không thay đổi.

Vậy điện trở của rôto xác định như sau [7]:

$$r_2 = r_t + \frac{2r_v}{\Delta^2} \quad (2)$$

Do đó, điện trở quy đổi của dây quấn rôto là:

$$r_2' = r_2 \frac{4m_1 (w_1 k_{d1})^2}{Z_2} \quad (3)$$

Đối với điện kháng của rôto:

$$x_2 = 7,9 f_1 (l_2 - 0,5 n_g b_g) \left( \lambda_1 + 0,9 \frac{t_2 Z_2^2 \rho_{12} k_{12}}{36 \delta k_g p} + \frac{2,3 D_v}{Z_2 (l_2 - 0,5 n_g b_g) \Delta^2} \lg \frac{4,7 D_v}{a+b} \right) 10^{-8} \quad (4)$$

Do đó, điện kháng quy đổi của dây quấn rôto là:

$$x_2' = x_2 \frac{4m_1 (w_1 k_{d1})^2}{Z_2} \quad (5)$$

Mô men điện từ của động cơ KĐB rôto lồng sóc:

$$M_{dt} = \frac{m_1 U_1^2 p r_2' / s}{2\pi f \left[ (r_1 + C_1 r_2' / s)^2 + (x_1 + C_1 x_2')^2 \right]} \quad (6)$$

Từ đó ta có mô men cực đại của động cơ KĐB rôto lồng sóc:

$$M_{\max} = 2C_1 \frac{1}{2\pi f} \frac{m_1 U_1^2 p}{\left[ r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + C_1 x_2')^2} \right]} \quad (7)$$

Từ phương trình (7), mô-men cực đại của động cơ KĐB có liên quan đến điện kháng của rôto. Do đó khi thay đổi  $Z_2$  thì làm cho điện kháng

của roto thay đổi từ đó làm thay đổi đến mô men cực đại của động cơ.

**3. PHÂN TÍCH VÀ MÔ PHÒNG**

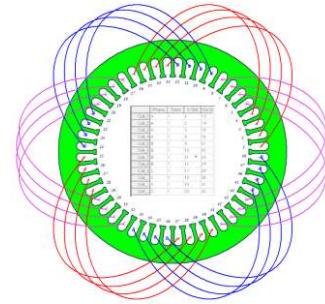
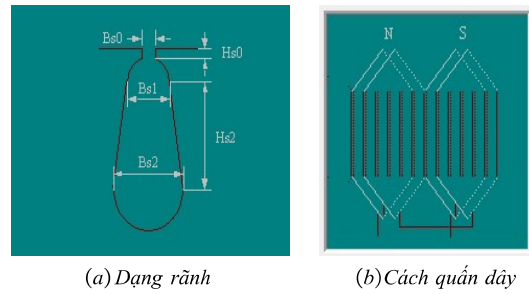
**3.1. Thiết lập mô hình mô phỏng**

Phần mềm Ansys Maxwell [8] là phần mềm ứng dụng phương pháp PTHH để mô phỏng và mô hình hóa rất mạnh mẽ giúp nhóm tác giả kiểm nghiệm và hiệu chỉnh các thông số đã tính toán được từ đó là cơ sở để chế tạo thử nghiệm động cơ theo thiết kế.

Thực nghiệm mô hình thiết lập sử dụng thông số động cơ cho quá trình mô phỏng như sau bảng 1.

**Bảng 1. Thông số của động cơ KĐB 5,5kW 4 cực**

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Công suất định mức	5,5	kW
Tốc độ định mức	1455	V/p
Tần số định mức	50	Hz
Khe hở không khí	0,4	mm
Số rãnh stato	48	rãnh
Điện áp định mức	220/380	V
Đường kính ngoài stato	225	mm
Đường kính trong stato	144	mm
Đường kính dây dẫn	0,8118	mm
Vật liệu chế tạo lõi thép	Steel_1008	



(c) Dây quấn 1 lớp đồng khuôn

**Hình 1. Dạng rãnh và cách quấn dây của stato**

Trong mô hình mô phỏng để đảm bảo chính xác, các thông số cơ bản của stato động cơ cho từng trường hợp đều giống nhau, các thông số này dựa trên kết quả tính toán động cơ 5,5kW 4 cực trong tài liệu [9]. Số rãnh roto  $Z_2$  được chọn để so sánh và đánh giá dựa trên bảng 10.6 [10], với số rãnh stato  $Z_1$  là 48 rãnh thì ta có  $Z_2$  lần lượt tương ứng cần đánh giá là 36, 38, 40, 44, 57 và 59.

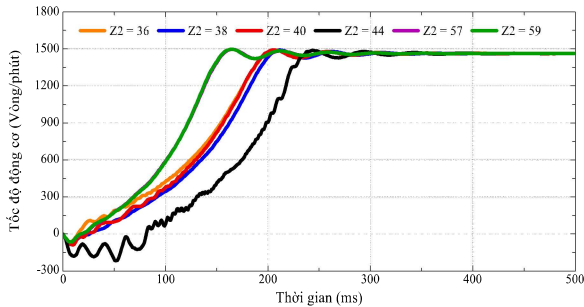
**3.2. Đánh giá kết quả mô phỏng**

Sau khi mô phỏng ta có bảng kết quả tính của của động cơ KĐB với số rãnh roto khác nhau:

**Bảng 2. Bảng kết quả thông số của động cơ với số rãnh rôto khác nhau**

Thông số	Số rãnh của rôto					
	$Z_2 = 36$	$Z_2 = 38$	$Z_2 = 40$	$Z_2 = 44$	$Z_2 = 57$	$Z_2 = 59$
Điện trở rôto ( $\Omega$ )	0,5296	0,5296	0,5296	0,5296	0,5296	0,5296
Hiệu suất động cơ (%)	90,9422	90,9724	90,9798	91,0061	91,0451	91,0462
Hệ số công suất	0,8599	0,8619	0,8625	0,8643	0,8669	0,8669
Mô men định mức (Nm)	35,8960	35,8926	35,8940	35,8935	35,8894	35,8885
Tốc độ định mức(vòng/phút)	1463,24	1463,30	1463,31	1463,36	1463,45	1463,46
Dòng điện định mức (A)	10,5590	10,5299	10,5228	10,4978	10,4609	10,4601
Dòng điện khởi động (A)	54,3451	54,8627	54,6006	54,855	55,4566	55,4729
Hệ số trượt định mức	0,0245	0,0245	0,0245	0,0244	0,0244	0,0244
Mô men cực đại (Nm)	125,523	128,057	126,962	128,332	131,528	131,625
Mô men khởi động (Nm)	74,9124	76,1603	76,4802	77,6310	80,1119	80,303

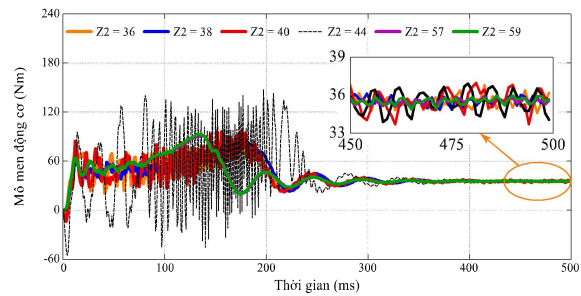
Qua kết quả bảng 2 có thể thấy khi chọn số lượng răng rôto khác nhau thì mô men khởi động và mô men cực đại là khác nhau. Còn các thông số như mô men định mức, tốc độ định mức, dòng điện định mức, hiệu suất động cơ hay hệ số công suất thì thay đổi không đáng kể. Khi số rãnh rôto thay đổi với giá trị tăng cao thì giúp nâng cao được mô men cực đại và mô men khởi động lên. Với số rãnh rôto của động cơ  $Z_2 = 36$  so với  $Z_2 = 59$  thì mô men cực đại tăng 4,8613%, mô men khởi động sẽ tăng 7,1959%.



**Hình 2. Đặc tính tốc độ của động cơ với số rãnh rôto khác nhau**

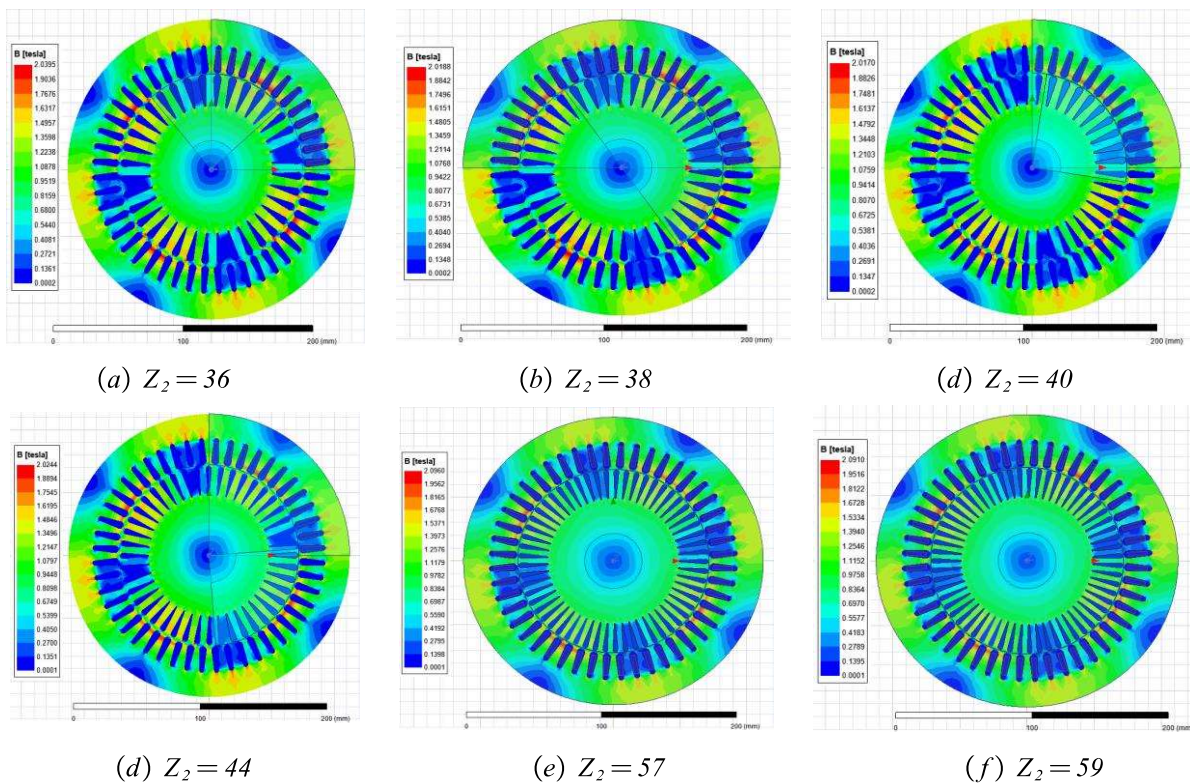
Qua hình 3, có thể thấy được đặc tính tốc độ của động cơ KĐB 3 pha 5,5kW 4 cực khi thay đổi số rãnh của rôto. Có thể thấy được khi số rãnh của rôto tăng lên thì thời gian khởi động của động

cơ sẽ giảm, tuy nhiên trong trường hợp  $Z_2 = 44$  thì thời gian khởi động của động cơ KĐB khá dài và đặc tính có chất lượng kém hơn so với các đặc tính khác.



**Hình 3. Đặc tính mô men của động cơ với số rãnh rôto khác nhau**

Với hình 3, có thể thấy đường đặc tính mô men của động cơ ứng với các rãnh rôto khác nhau, cũng như hình 3, có thể thấy đặc tính của động cơ có rãnh rôto  $Z_2 = 44$  là có độ dao động không ổn định lớn nhất, còn trường hợp rãnh rôto là  $Z_2 = 57$  và  $Z_2 = 59$  là có độ dao động khi khởi động là nhỏ nhất. Như vậy có thể thấy trong các phương án chọn thì việc lựa chọn rãnh rôto là  $Z_2 = 57$  hoặc  $Z_2 = 59$  sẽ cho kết quả đầu ra mô men khi khởi động là tốt nhất.



**Hình 4. Mật độ từ thông stato của tổ hợp khe stato- rôto khác nhau**

Hình 4 cho thấy thấy phân bố của mật độ từ thông trên rôto và stato của động cơ với các trường hợp thay đổi số rãnh của rôto khi động cơ đã ổn định tốc độ.

Qua bảng 3 và hình 5 có thể thấy độ gợn sóng của mô men nhỏ nhất khi số rãnh rôto là  $Z_2 = 57$  với 0,58%, tiếp theo là  $Z_2 = 59$  với 0,71% sau đó là  $Z_2 = 38$  và  $Z_2 = 36$  tương ứng là 0,95 và 1,39. Với số sãnh rôto là  $Z_2 = 40$  và  $Z_2 = 44$  có

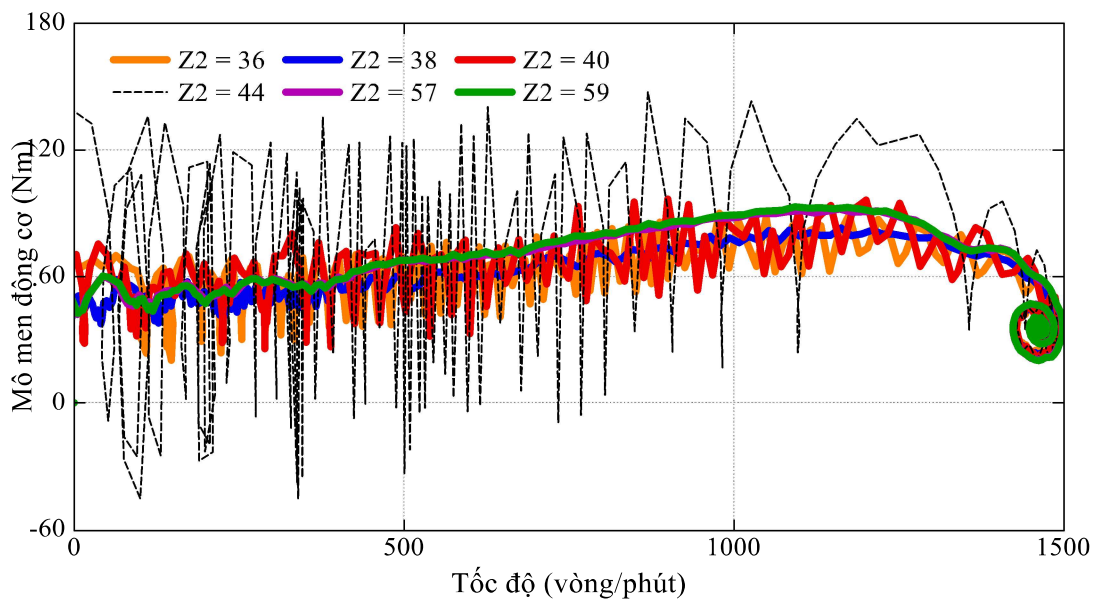
độ gợn sóng lớn nhất là số rãnh rôto  $Z_2 = 44$  với 2,4%. Tuy nhiên, việc chế tạo số lượng rãnh rôto lớn cũng sẽ ảnh hưởng đến kết cấu cơ khí của rôto, gây khó khăn cho việc chế tạo. Thông qua các thông số mô phỏng có thể thấy số rãnh rôto  $Z_2 = 38$  là số rãnh thích hợp nhất về tối ưu công nghệ và chi số. Tuy nhiên nếu công nghệ chế tạo động cơ không ảnh hưởng đến việc lựa chọn thì ta chọn số rãnh rôto  $Z_2 = 57$  sẽ thích hợp hơn  $Z_2 = 59$  do có độ gợn sóng mô men thấp hơn.

**Bảng 3. Gợn sóng mô men khi ổn định của động cơ với số rãnh rôto khác nhau**

Thông số	Số rãnh của rôto					
	$Z_2 = 36$	$Z_2 = 38$	$Z_2 = 40$	$Z_2 = 44$	$Z_2 = 57$	$Z_2 = 59$
Mô men trung bình theo RMSV (Nm)	35,53	35,55	35,56	35,52	35,52	35,54
Sai số mô men theo RMSE (Nm)	0,494	0,337	0,785	0,853	0,207	0,252
Độ gợn sóng mô men (%)	1,39	0,95	2,21	2,40	0,58	0,71

Trong hình 5 mô tả đặc tính cơ của động cơ KĐB, có thể thấy với  $Z_2 = 57$ ,  $Z_2 = 59$  và  $Z_2 = 38$  thì

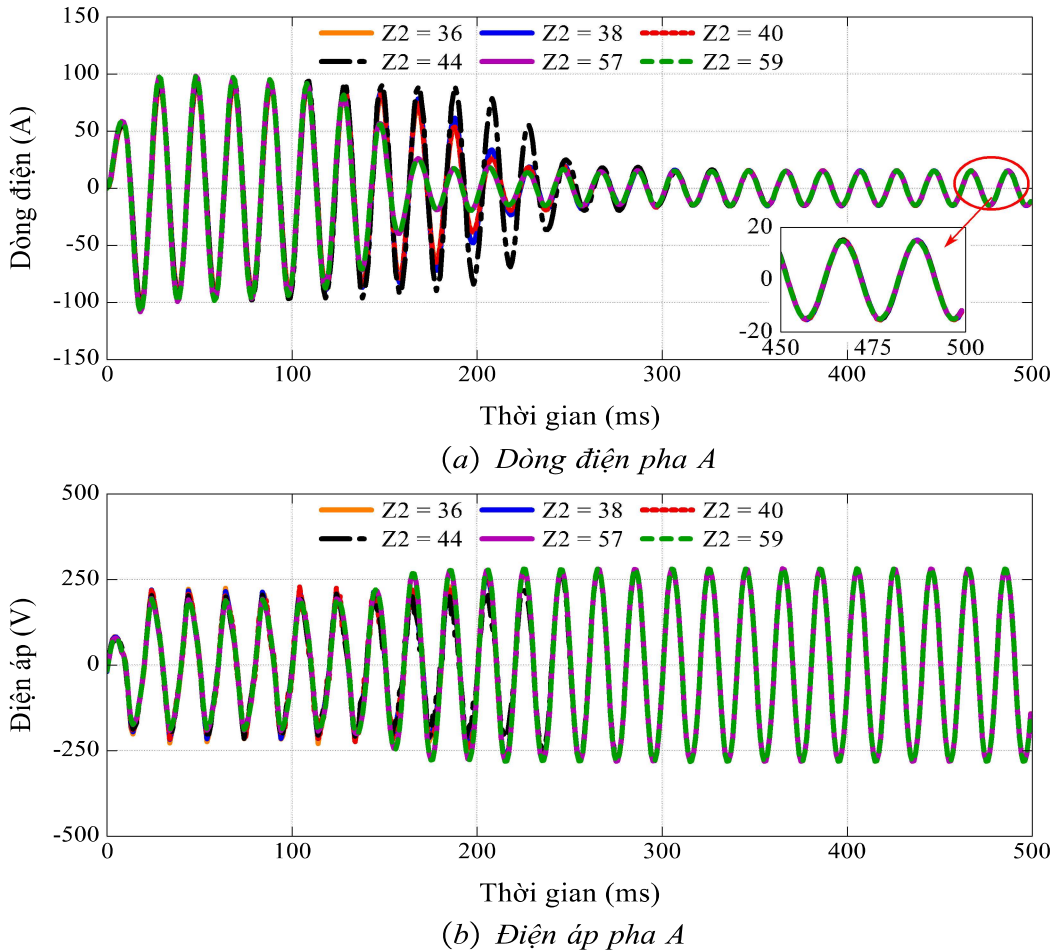
đường đặc tính ổn định và ít dao động hơn so với các số lượng rãnh  $Z_2 = 36$ ,  $Z_2 = 40$  và  $Z_2 = 44$ .



**Hình 5. Đặc tính cơ của động cơ mô phỏng 2D với số rãnh rôto khác nhau**

Trong hình 6a có thể thấy được tương tự như hình 2 và 3, khi khởi động dòng điện của các rãnh rôto khác nhau có biên độ khởi động tương tự nhau nhưng khác nhau về thời gian khởi động. Tuy nhiên khi ổn định thì dao động giống nhau

điều đó cho thấy khi ổn định thì rãnh rô to khác nhau không ảnh hưởng đến đặc tính ổn định của dòng điện. Với hình 6b cũng cho thấy đặc tính của điện áp động cơ khi ổn định với các rãnh rôto khác nhau đều giống nhau.



Hình 6. Điện áp và dòng điện của động cơ với số rãnh rôto khác nhau

#### 4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, động cơ KĐB 5,5kW 4 cực được lấy làm ví dụ để phân tích ảnh hưởng của sự kết hợp rãnh stato - rôto khác nhau đến hiệu suất của động cơ KĐB và rút ra các kết luận sau:

- Khi dùng tổ hợp rãnh stato – rôto là 48/38 giúp mô men cực đại cao hơn các động cơ có số lượng rãnh tương tự, có độ gợn sóng mô men thấp khi ổn định, tối ưu được về công nghệ chế tạo so với việc chọn số lượng rãnh lớn;
- Khi dùng tổ hợp rãnh stato – rôto là 48/57 thì mô men cực đại lớn giúp động cơ chịu được quá

tải cao, thời gian khởi động rút ngắn, độ gợn sóng mô men nhỏ, tuy nhiên ảnh hưởng đến kết cấu cơ khí của rôto, phức tạp hơn trong chế tạo.

Như vậy có thể thấy được việc lựa chọn số lượng rãnh rôto sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến thời gian khởi động, mô men cực đại và độ gợn sóng của mô men động cơ khi ổn định. Thông qua quá trình mô hình hoá trên phần mềm Ansys Maxwell giúp cho người thiết kế có thể tối ưu được số lượng rãnh rôto đảm bảo được yêu cầu về kỹ thuật cũng như về công nghệ chế tạo và vẫn có đảm bảo được hiệu suất và chế độ làm việc tốt.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Pareek, A., Dom, R., Gupta, J., Chandran, J., Adepu, V., & Borse, P. H. (2020). "Insights into renewable hydrogen energy: Recent advances and prospects". *Materials Science for Energy Technologies*, 3, 319-327.
2. Antonacci, A., Giraldi, A., Innocenti, E., & Delogu, M. (2023). "A Scientific Approach for Environmental Analysis: An Asynchronous Electric Motor Case Study for Stand-By

- Applications". *Machines*, 11(8), 810.
3. Qiu, H., Zhang, Y., Yang, C., & Yi, R. (2019). "The Influence of Stator–Rotor Slot Combination on Performance of High-Voltage Asynchronous Motor. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 30, 1126-1134.
  4. Joksimović, G., Melecio, J. I., Tuohy, P. M., & Djurović, S. (2020). "Towards the optimal 'slot combination' for steady-state torque ripple minimization: An eight-pole cage rotor induction motor case study". *Electrical Engineering*, 102, 293-308.
  5. Gundogdu, T., Zhu, Z. Q., & Mipo, J. C. (2017). "Influence of rotor slot number on rotor bar current waveform and performance in induction machines". In 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (pp. 1-6). IEEE.
  6. Qiu, H., Zhang, Y., Yang, C., & Yi, R. (2019). "The Influence of Stator–Rotor Slot Combination on Performance of High-Voltage Asynchronous Motor". *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 30, 1126-1134.
  7. Vũ Gia Hanh, Trần Khánh Hà, Phan Tử Thụ, Nguyễn Văn Sáu (2006), "Máy điện 1", Nhà xuất bản KHKT Hà Nội.
  8. Tikhonova, O., Malygin, I., & Plastun, A. (2017). "Electromagnetic calculation for induction motors of various designs by ANSYS maxwell". In 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (pp. 1-5). IEEE.
  9. Nguyễn Thị Thương Duyên, Trần Thanh Tuyền, Trần Văn Thương, Đoàn Thị Bích Thủy (2023), "Nghiên cứu cải thiện hiệu suất động cơ 5,5kW 4 cực qua các quần dây quấn phần ứng trên phần mềm Ansys Maxwell", *Tạp chí khoa học và công nghệ QUI*, tập 1, số 2 – 2023, trang 45-53.
  10. Tran Khanh Ha, Nguyen Hong Thanh (2001), "Thiết kế máy điện", Nhà xuất bản KHKT Hà Nội.

**Thông tin của tác giả:****ThS. Đoàn Thị Như Quỳnh**

Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

Điện thoại: +(84).983.998.883 Email: nhuquynh.dhcnqn@gmail.com

**ThS. Trần Thanh Tuyền**

Nghiên cứu sinh tại Viện Tự động hóa, Trường Đại học Trung Nam, Hồ Nam, Trung Quốc

Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

Điện thoại: +(84).977.386.134 Email: tuyentt@qui.edu.vn

## THE EFFECT OF THE NUMBER OF ROTOR SLOTS ON THE WORKING CHARACTERISTICS OF 5.5KW 4 POLES ASYNCHRONOUS MOTORS USING ANSYS MAXWELL SOFTWARE

**Information about authors:**

**Doan Thi Nhu Quynh**, MEng., Faculty of Electricity, Quang Ninh University of Industry. Email: nhuquynh.dhcnqn@gmail.com

**Tran Thanh Tuyen**, MEng., PhD. Student at Central South University, Changsha, Hunan 410083, China. Faculty of Electricity, Quang Ninh University of Industry.

**ABSTRACT:**

*Asynchronous motors are the most widely used type of motor in industrial applications in general and in mine electrical equipment in particular due to their sturdy structure, low price, low maintenance costs, and high performance. The structure and the number of rotor slots greatly influence the working*

*characteristics of an asynchronous motor. Therefore, during asynchronous motor design, we must make the structure and number of slots reasonable to maximize motor performance. When designing asynchronous motors, it's critical to calculate the number of rotor slots and other parameters, as well as to thoroughly study the effects of torque ripple and motor vibration. In the article, the authors research the effect of the number of rotor groove teeth on the working mode of motors with different numbers of groove teeth. A 3-phase squirrel cage asynchronous motor with a capacity of 5.5 kW and 4 poles was used as a research model on Ansys Maxwell software by the authors.*

**Keywords:** Asynchronous motors, Ansys Maxwell software, rotor slots, working characteristics, simulation model.

## REFERENCES

1. Pareek, A., Dom, R., Gupta, J., Chandran, J., Adepur, V., & Borse, P. H. (2020). "Insights into renewable hydrogen energy: Recent advances and prospects". *Materials Science for Energy Technologies*, 3, 319-327.
2. Antonacci, A., Giraldo, A., Innocenti, E., & Delogu, M. (2023). "A Scientific Approach for Environmental Analysis: An Asynchronous Electric Motor Case Study for Stand-By Applications". *Machines*, 11(8), 810.
3. Qiu, H., Zhang, Y., Yang, C., & Yi, R. (2019). "The Influence of Stator-Rotor Slot Combination on Performance of High-Voltage Asynchronous Motor". *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 30, 1126-1134.
4. Joksimović, G., Melecio, J. I., Tuohy, P. M., & Djurović, S. (2020). "Towards the optimal 'slot combination' for steady-state torque ripple minimization: An eight-pole cage rotor induction motor case study". *Electrical Engineering*, 102, 293-308.
5. Gundogdu, T., Zhu, Z. Q., & Mipo, J. C. (2017). "Influence of rotor slot number on rotor bar current waveform and performance in induction machines". In *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* (pp. 1-6). IEEE.
6. Qiu, H., Zhang, Y., Yang, C., & Yi, R. (2019). "The Influence of Stator-Rotor Slot Combination on Performance of High-Voltage Asynchronous Motor". *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 30, 1126-1134.
7. Vu Gia Hanh, Tran Khanh Ha, Phan Tu Thu, Nguyen Van Sau (2006), "Electrical machine 1", In Vietnamese. Hanoi Science and Technology Publishing House.
8. Tikhonova, O., Malygin, I., & Plastun, A. (2017). "Electromagnetic calculation for induction motors of various designs by ANSYS maxwell". In *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)* (pp. 1-5). IEEE.
9. Nguyen Thi Thuong Duyen, Tran Thanh Tuyen, Tran Van Thuong, Doan Thi Bich Thuy (2023), "Research to improve 5.5 kW 4-poles asynchronous motor performance based on the winding type by Ansys Maxwell software", In Vietnamese. *Journal of science and Technology QUI*, Vol.1, No.2 – 2023, pp. 45-53.
10. Tran Khanh Ha, Nguyen Hong Thanh (2001), "Electrical machine design", In Vietnamese. Hanoi Science and Technology Publishing House.

**Ngày nhận bài:** 07/5/2024;

**Ngày gửi phản biện:** 08/5/2024;

**Ngày nhận phản biện:** 10/6/2024;

**Ngày chấp nhận đăng:** 10/6/2024.