

CẢI THIỆN MẬT ĐỘ PHÂN BỐ LỰC TRONG ĐỘNG CƠ TỪ TRỞ

IMPROVING FORCE DISTRIBUTION DENSITY IN SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Phí Hoàng Nhã^{1,2}, Đào Quang Thủy³, Phạm Hùng Phi¹

¹Trường Đại học Bách khoa Hà Nội; phihoangnha@gmail.com

²Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội; phihoangnha@hau.edu.vn

³Bộ Khoa học và Công nghệ; hvgn.98@gmail.com

Tóm tắt - Động cơ từ trở có nhiều ưu điểm nổi bật, dần trở thành sự lựa chọn trong các hệ thống truyền động tốc độ cao. Trong động cơ từ trở, lực và mật độ phân bố lực có ảnh hưởng không nhỏ đến đặc tính làm việc của động cơ. Mật độ phân bố lực tác động trực tiếp đến quá trình hình thành mô men quay trong động cơ, từ đó quyết định đến hiệu suất làm việc của động cơ. Bài báo trình bày mối quan hệ giữa lực từ và mô men trong động cơ từ trở. Đồng thời, nhóm tác giả đề xuất một giải pháp mới - thay đổi cấu trúc rotor nhằm cải thiện mật độ phân bố lực trong động cơ từ trở. Kết quả bước đầu cho thấy, mật độ phân bố lực trong động cơ từ trở mới tăng, góp phần nâng cao mô men quay.

Từ khóa - Mật độ phân bố lực; mô men; động cơ từ trở; SRM; động cơ từ trở mới.

1. Giới thiệu

Động cơ từ trở (SRM) được biết đến với nhiều ưu điểm như cấu tạo đơn giản, mô men khởi động lớn, rotor không có nam châm vĩnh cửu nên cho phép nhiệt độ làm việc cao,... Tuy nhiên, SRM chưa được quan tâm nhiều do khó điều khiển và mô men đập mạch lớn. Những năm gần đây, cùng với sự phát triển của công nghệ bán dẫn, điện tử công suất, ... động cơ từ trở dần được ứng dụng phổ biến trong một số lĩnh vực công nghiệp và gia dụng. Những ứng dụng trong công nghiệp đòi hỏi SRM đạt được những đặc tính làm việc khắt khe như mô men quay lớn, hiệu suất cao, ... Nhiều công trình nghiên cứu [1], [2] tập trung thay đổi cấu trúc động cơ, hay tác động vào phần điều khiển [3], [4] nhằm nâng cao mô men, hiệu suất trong động cơ từ trở. Tuy nhiên, những thay đổi đó làm tăng tính phức tạp trong chế tạo và tăng chi phí.

Hơn nữa, sự phân bố mật độ khối lượng lực trong rotor và stator quyết định đến mô men quay của động cơ. Lực từ trong động cơ càng lớn sẽ sinh ra mô men quay càng lớn. Lực từ là hợp lực của hai lực tiếp tuyến và xuyên tâm, phụ thuộc vào cấu tạo và vật liệu chế tạo động cơ. Chính vì vậy, tác giả tiến hành phân tích, đánh giá mối quan hệ giữa lực từ và mô men trong động cơ từ trở, đồng thời đề xuất giải pháp thay đổi cấu trúc rotor của động cơ nhằm nâng cao mật độ khối lượng lực, cải thiện mô men quay trong động cơ từ trở.

2. Mô hình toán của động cơ từ trở

Mô hình toán của động cơ từ trở [5] gồm ba phương trình: phương trình điện áp, phương trình mô men và phương trình cơ.

2.1. Phương trình điện áp

Giả thiết rằng mỗi pha riêng biệt của động cơ gồm: điện trở cuộn dây R , điện cảm $L(i, \theta)$, điện áp u cung cấp cho các pha bằng tổng độ sụt áp và tỉ lệ từ thông $\psi(i, \theta)$, bỏ qua

Abstract - The switched reluctance motor has many advantages and gradually become a choice for high speed drive systems. In a switched reluctance motor, the force and force distribution density have a significant influence on the characteristics of the motor. The force distribution density directly impacts the process of torque formation in the motor, thereby determining the performance of the motor. The article presents the relationship between the magnetic force and the torque in the switched reluctance motor. At the same time, to improve the force distribution density in the switched reluctance motor, the authors propose a new solution: to change the rotor structure. Initial results show an increase in the force distribution density in the new switched reluctance motor, which contributes to torque enhancement.

Key words - Force distribution density; torque; switched reluctance motor; SRM; new switched reluctance motor.

hỗ cảm giữa các pha. Phương trình điện áp được đưa ra:

$$\frac{d\psi(i, \theta)}{dt} = -iR + u \Leftrightarrow u = Ri + \frac{d\psi(i, \theta)}{dt} \quad (1)$$

$$\text{Với } \psi(i, \theta) = L(i, \theta)i \quad (2)$$

Có hai khái niệm cần được phân biệt là góc cơ khí θ và góc điện ($n_R \cdot \theta$). Góc cơ khí biểu thị góc quay của vị trí rotor, góc điện hiển thị góc tính toán dòng điện và điện áp các pha. Phương trình điện áp theo dạng góc điện như sau:

$$u = Ri + \frac{d\psi(n_R \theta, i)}{dt} \quad (3)$$

Xét động cơ từ trở ba pha 6/4, mỗi pha lệch nhau một góc điện là $\theta_s = \frac{2\pi}{3n_R}$. Hệ phương trình điện áp cho các pha

như sau:

$$\begin{cases} u_a = Ri_a + \frac{d}{dt}\psi(n_R \theta_s, i_a) \\ u_b = Ri_b + \frac{d}{dt}\psi(n_R(\theta - \theta_s), i_b) \\ u_c = Ri_c + \frac{d}{dt}\psi(n_R(\theta - 2\theta_s), i_c) \end{cases} \quad (4)$$

2.2. Phương trình mô men

Phương trình mô men được xây dựng theo nguyên tắc tổng năng lượng từ trường, công thức tính mô men động cơ từ trở tại vị trí rotor bất kỳ của một cuộn dây pha như sau:

$$T(i, \theta) = \frac{\partial W'(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (5)$$

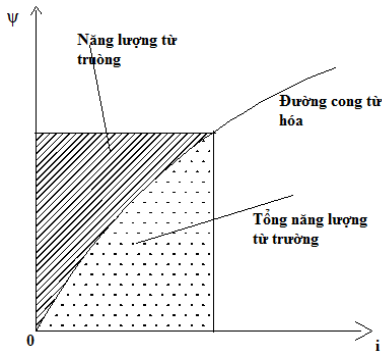
trong đó: θ là góc rotor;

i là dòng điện pha;

$W'(i, \theta)$ là tổng năng lượng từ trường.

Tổng từ trường được xác định là vùng diện tích phía dưới đường cong từ hoá như Hình 1:

$$W'(\theta, i) = \int_0^i \psi(\theta, i) di \quad (6)$$



Hình 1. Biểu đồ phân hóa năng lượng từ trường tổng

Trong trường hợp, động cơ từ trở không bị ảnh hưởng của sự bão hòa từ và điện cảm không phụ thuộc dòng điện, chỉ phụ thuộc vị trí rotor (2), mô men được sinh ra:

$$T(\theta, i) = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^i L(\theta, i) di^2 \tag{7}$$

Nếu L thay đổi tuyến tính theo vị trí rotor thì công thức tính mô men như sau:

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \tag{8}$$

Mô men của động cơ ba pha bằng tổng mô men các pha $T_e = T_a + T_b + T_c$

2.3. Phương trình cơ

Theo định lý cân bằng mô men trong động cơ:

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega}{dt} + C_{ms} \omega \tag{9}$$

trong đó: T_e là mô men tổng của động cơ;

T_l là mô men tải;

ω là tốc độ động cơ;

J là mô men quán tính;

C_{ms} là hằng số ma sát.

3. Mối quan hệ giữa lực từ và mô men trong động cơ từ trở

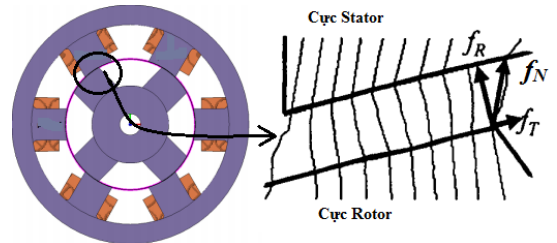
3.1. Lực từ trong động cơ từ trở

3.1.1. Vai trò của các lực

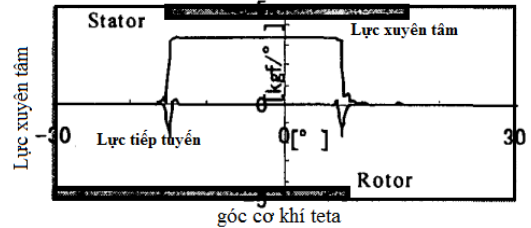
Khi cuộn dây stator của động cơ từ trở được kích thích tuần tự làm quay rotor và xuất hiện lực từ sinh ra giữa cực stator bị kích thích và cực rotor đối diện, như thể hiện ở Hình 2. Trong vùng gối chông của cực stator và rotor, đường từ thông vuông góc với mặt cực và lực điện từ hoạt động như là lực hút theo hướng xuyên tâm. Mặt khác, đường từ trường nghiêng được tìm thấy gần mép cực stator và rotor, có thể được phân tích thành các thành phần tiếp tuyến và xuyên tâm như thể hiện trong Hình 2 [6]. Các lực từ tương ứng là lực xuyên tâm f_R và lực tiếp tuyến f_T . Hai lực này hình thành nên một hợp lực f_N (theo nguyên tắc tổng hợp lực hình bình hành) hoạt động như mô men quay, làm quay rotor. Như vậy, lực tiếp tuyến có vai trò sinh ra mô men làm quay rotor và lực xuyên tâm là lực hút giữa các cực rotor, stator.

Hình 3 cho thấy phân tích phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) của phân bố lực tiếp tuyến và xuyên tâm dọc theo khe hở không khí dưới sức từ động (mmf) 600 A, ở đó cực tính của lực tiếp tuyến bị đảo ngược. Lực xuyên tâm f_R được sinh ra trong toàn bộ vùng gối chông của cực stator và rotor, và

lực tiếp tuyến f_T được sinh ra tại mép của cực stator và rotor.



Hình 2. Lực từ sinh ra giữa cực stator và rotor



Hình 3. Phân bố lực xuyên tâm và tiếp tuyến [6]

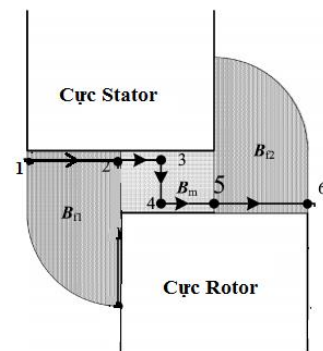
Xét về vai trò giữa lực tiếp tuyến và lực xuyên tâm, lực tiếp tuyến là lực hữu ích, còn lực xuyên tâm là lực có hại. Trong quá trình hình thành hợp lực f_N , lực tiếp tuyến càng lớn càng tốt, có tác dụng quay rotor, tăng mô men. Trong trường hợp lý tưởng $f_N = f_T$. Trái ngược với f_T , lực xuyên tâm f_R sẽ hút và giữ các cặp cực rotor, stator. Trong trường hợp lực xuyên tâm được sinh ra ở các cực đối diện không bằng nhau, lực này sẽ làm biến dạng stator, làm lệch khe hở không khí, gây mất cân bằng, tạo ra tiếng ồn. Đây là điều không mong muốn trong hoạt động của SRM.

3.1.2. Công thức tính lực từ

Việc tính toán lực xuyên tâm được dựa trên phương trình Maxwell Stress Tensor [7]. Bỏ qua sự bão hòa từ trường, giả sử các đường từ thông được xác định và phù hợp cho việc áp dụng Maxwell Stress Tensor. Cùng với sự lựa chọn thích hợp tích phân từng phần xung quanh các bề mặt cực riêng lẻ, Maxwell Stress Tensor cung cấp một tính toán trực tiếp cho các lực xuyên tâm. Theo phương trình Maxwell Stress Tensor như trong (10) và (11), lực tổng hợp F_N và lực tiếp tuyến F_T tại một cặp cực stator và rotor như sau:

$$F_N = \frac{1}{2\mu_0} \iint_s (B_N^2 - B_T^2) dA \tag{10} \quad F_T = \frac{1}{2\mu_0} \iint_s B_N B_T dA \tag{11}$$

trong đó: B_N, B_T là thành phần pháp tuyến và tiếp tuyến của mật độ từ thông, tương ứng, μ_0 là độ từ thẩm không khí lấy bằng độ từ thẩm chân không.



Hình 4. Ứng dụng của Maxwell Stress Tensor trong tính toán lực xuyên tâm và lực tiếp tuyến

Để minh họa, hãy xem xét sự phân bố của hai cực như được chỉ ra trong sơ đồ biểu diễn đơn giản của Hình 4. Giả thiết các đường sức từ trường có phân bố như trên Hình 4. Biên dạng bao quanh được lựa chọn sao cho các đường từ thông hoặc vuông góc hoặc song song với biên dạng. Dưới những điều kiện này, phương trình Maxwell Stress (10) đơn giản hóa như sau:

Với các đường từ thông vuông góc, thành phần B_T bằng 0, lực F_N là:

$$F_N = \frac{1}{2\mu_0} \iint_s B_N^2 dA \quad (12)$$

Với các đường từ thông song song, B_N bằng 0, lực F_N trở thành:

$$F_N = \frac{1}{2\mu_0} \iint_s -B_T^2 dA \quad (13)$$

Áp dụng các phương trình này cho biên dạng được xác định trong Hình 4. Kết quả theo các lực lượng xuyên tâm và tiếp tuyến tiếp hoạt động trên một cực rotor:

$$F_{radial} = \frac{L}{2\mu_0} \left(\int_1^2 B_{f1}^2 dl + \int_2^3 B_m^2 dl + \int_4^5 B_m^2 dl + \int_5^6 B_{f2}^2 dl \right) \quad (14)$$

$$= \frac{L}{2\mu_0} (B_{f1}^2 l_{12} + B_m^2 (l_{23} + l_{45}) + B_{f2}^2 l_{56})$$

$$F_{tangential} = -\frac{L}{2\mu_0} \int_3^4 B_m^2 dl = -\frac{L}{2\mu_0} B_m^2 l_{34} \quad (15)$$

trong đó, B_{f1} , B_{f2} và B_m lần lượt là từ trường bao quanh khe hở không khí 1, 2 và từ trường khe hở chính, L là chiều dài động cơ.

3.2. Mối quan hệ giữa mô men và lực từ

Theo công thức tính công suất cho động cơ điện:

$$P = mUI \cos \varphi \quad (16)$$

trong đó: m là số pha;

U là điện áp cấp cho động cơ;

I là dòng điện;

$\cos \varphi$ là hệ số công suất.

Công suất P là công có ích phụ thuộc vào dòng điện và điện áp. Theo [8], công suất tức thời một pha của động cơ được biểu diễn:

$$p_i = u_i = R_s i^2 + i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} + L(\theta, i) i \frac{di}{dt} \quad (17)$$

Công suất P cấp từ nguồn sinh ra sức điện động e , chính sức điện động e này là thành phần có ích trong động cơ, tạo mô men quay, đồng thời, tổn hao công suất trên điện trở R_s và trên điện cảm sẽ làm giảm hiệu suất động cơ. Vấn đề đặt ra là biến công suất từ lưới chuyên hóa thành sức điện động trong động cơ đạt giá trị lớn nhất, tổn hao trên điện trở và cuộn cảm càng nhỏ càng tốt.

Khi đó, mô men trên trục động cơ tính bởi công thức sau:

$$M = \frac{P}{\omega} \quad (18)$$

trong đó: M là mô men điện từ;

P là công suất;

ω là tốc độ quay.

Theo (18) khi công suất P lớn, sẽ sinh ra mô men lớn. Mặt khác, phương trình chung của mạch từ trong động cơ:

$$F = \Phi \cdot R_m = \Phi \cdot (R_{mAir} + R_{mFe}) \quad (19)$$

trong đó: F là sức từ động;

R_{mAir} là từ trở khe hở không khí;

R_{mFe} là từ trở lõi thép.

Lực từ F tỉ lệ thuận với từ thông lõi thép và từ trở. Trong SRM, nếu lực từ F sinh ra là không đổi, từ trở nhỏ dẫn đến từ thông chính lõi thép tăng.

Mặt khác, từ thông Φ và sức điện động e có mối liên hệ:

$$e = C_e \Phi n \quad (20)$$

trong đó: e là sức điện động; C_e là hệ số phụ thuộc vào kết cấu của máy và dây quấn; Φ là từ thông; n là tốc độ quay;

Như vậy, theo (18) và (20), từ thông Φ ($\Phi = B \cdot A$) tăng dẫn đến mô men M trong động cơ tăng. Từ (18) và (19), lực từ và mô men tỉ lệ thuận với nhau.

4. Mật độ phân bố lực trong động cơ từ trở mới

Mật độ phân bố lực trong động cơ là kết quả sơ bộ đánh giá độ lớn của lực từ và mô men. Từ đó quyết định hiệu suất làm việc của động cơ. Qua nghiên cứu cho thấy mối quan hệ ràng buộc giữa độ từ cảm B và lực điện từ. Độ từ cảm càng lớn dẫn tới lực từ lớn. Hơn nữa, độ từ cảm B do chính cấu trúc và vật liệu chế tạo động cơ quyết định. Vì vậy, tác giả đề xuất thay đổi cấu trúc động cơ nhằm nâng cao giá trị độ từ cảm làm việc.

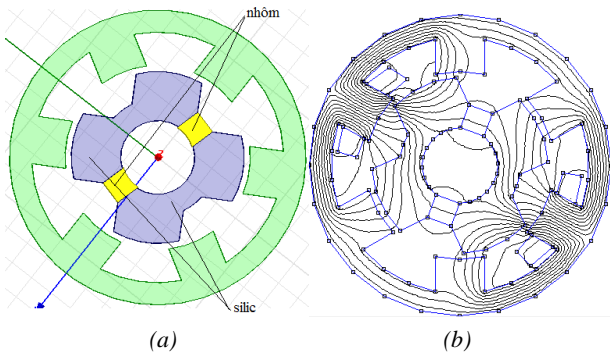
4.1. Cấu trúc động cơ từ trở mới

Động cơ từ trở mới được đề xuất có cấu trúc như Hình 5a. Stator của động cơ có cấu tạo như SRM truyền thống. Cấu trúc rotor được thay đổi: vật liệu chế tạo rotor vẫn là thép Silic thông thường nhưng sử dụng thanh nhôm nguyên khối phân chia rotor thành hai phần. Với cấu trúc này, mạch vòng từ thông trong động cơ được thay đổi. Đường đi của từ trường thay đổi, tập trung ở vùng cực stator và rotor nhiều hơn, được thể hiện đầy đủ như Hình 5b.

Thông số cấu trúc động cơ từ trở được cho trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số kích thước động cơ từ trở

| N_s/N_r (Số cực stator/rotor) | 6/4 | β_s/β_r (Góc cực stator/rotor) | 20/24 độ |
|------------------------------------|---------|---|----------|
| D_o (Đường kính ngoài stator) | 190 mm | D (Đường kính trong Stator) | 89,7 mm |
| D_{sh} (Đường kính trục) | 28 mm | y_s, y_r (Độ dày gông stator, rotor) | 12,5 mm |
| h_s (Chiều cao cực stator) | 77,2 mm | h_r (Chiều cao cực rotor) | 59,5 mm |
| g (Chiều dài khe khí) | 0,3 mm | l (Chiều dài động cơ) | 114 mm |
| D_r (Đường kính ngoài rotor) | 100 mm | Vật liệu | Silic |



Hình 5. Cấu trúc động cơ từ trở mới

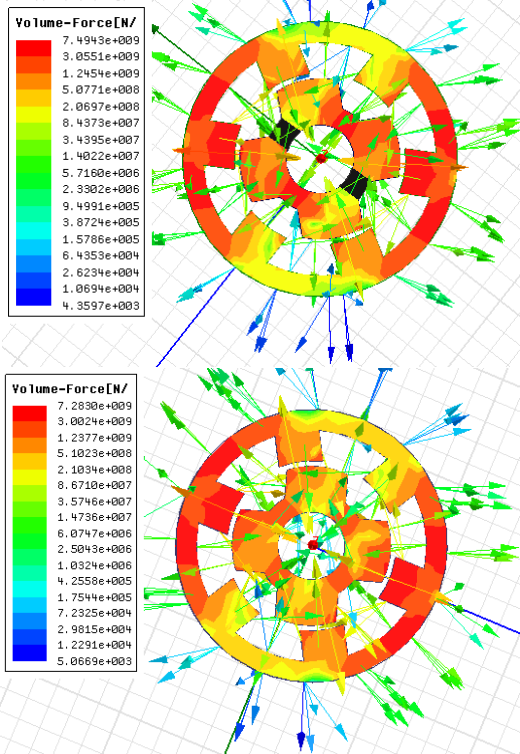
4.2. Kết quả và thảo luận

Động cơ từ trở được mô phỏng để đánh giá mật độ khối lượng lực phân bố trong động cơ là loại 6/4 cực 3 pha. Kết quả được mô phỏng mật độ phân bố lực giữa SRM truyền thống với SRM mới - cấu trúc rotor thay đổi, thể hiện trong Hình 6, 7 và Hình 8.

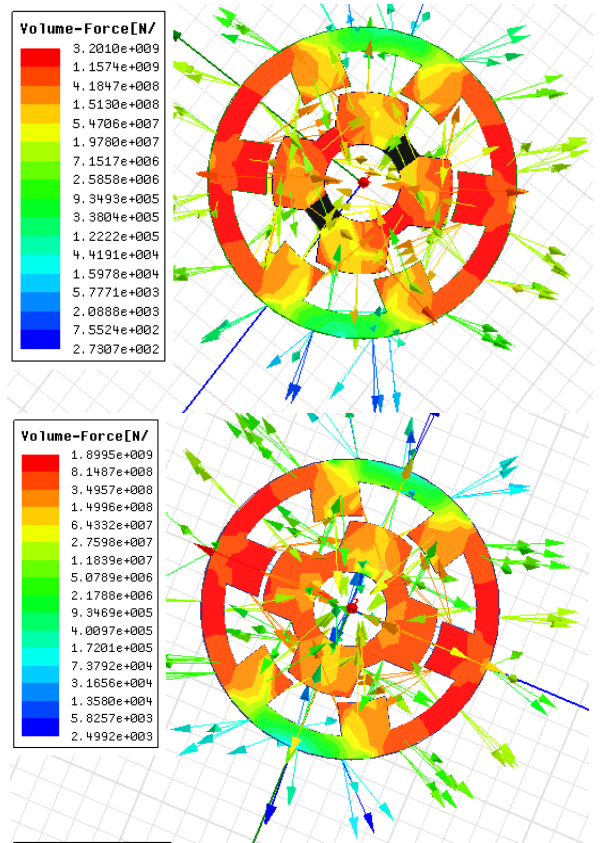
Trường hợp SRM có cực stator và rotor ở vị trí gối chông, vị trí thẳng hàng hoàn toàn và vị trí không thẳng hàng, mật độ phân bố khối lượng lực của SRM mới và SRM truyền thống cho trong Bảng 2.

Bảng 2. Giá trị lực thể tích lớn nhất trong động cơ từ trở tại các vị trí cực từ

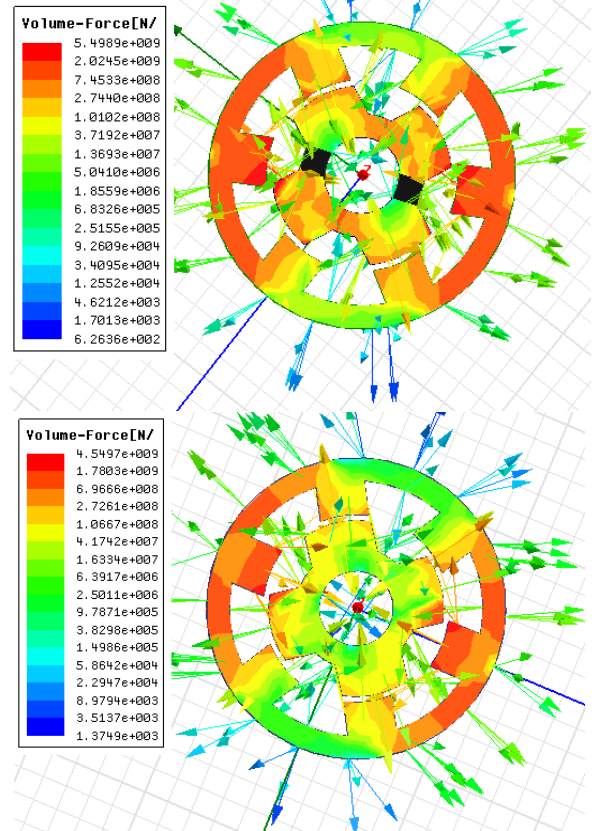
| Cực roto, stato thẳng hàng | | Cực roto, stato không thẳng hàng | | Cực stato, roto gối chông | |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| SRM truyền thống | SRM mới | SRM truyền thống | SRM mới | SRM truyền thống | SRM mới |
| $1,9 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ | $3,2 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ | $4,55 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ | $5,5 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ | $7,28 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ | $7,49 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ |



Hình 6. Lực thể tích của SRM khi cực stator và rotor gối chông nhau



Hình 7. Lực thể tích của SRM khi cực stator và rotor thẳng hàng



Hình 8. Lực thể tích của SRM khi cực stator và rotor không thẳng hàng

Kết quả mô phỏng cho thấy, SRM cấu trúc mới cho giá trị mật độ khối lượng lực cao hơn so với SRM truyền

thông. Với mật độ phân bố khối lượng lực lớn, SRM mới được dự báo sẽ đạt hiệu suất cao hơn. Kết quả của nhóm tác giả công bố là kết quả phân tích, đánh giá bước đầu, để có kết quả đánh giá đầy đủ về lực từ và mô men trong SRM mới cần xây dựng được mô hình toán mới cho động cơ và sẽ được công bố trong những nghiên cứu tiếp theo.

5. Kết luận

Bài báo trình bày những phân tích, đánh giá về mối quan hệ giữa mô men và lực từ. Lực từ và mô men tỉ lệ thuận với nhau, qua đó quyết định đến hiệu suất của động cơ từ trở. Lực từ phân bố trong SRM cấu trúc mới được so sánh với SRM cấu trúc truyền thống. Kết quả bước đầu khẳng định ưu điểm vượt trội của SRM mới trong nâng cao mật độ lực từ so với SRM cũ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Mir, M. E. Elbuluk and I. Husain, "Torque-ripple Minimization in Switched Reluctance Motors Using Adaptive Fuzzy Control", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 2, pp. 461-468, 1999.
- [2] D. S. Reay, T. C. Green and B. W. Williams, "Application of Associative Memory Neural Networks to the Control of a Switched Reluctance Motor", *IECON*, vol. 1, pp. 200-206, 1993.
- [3] Wadah Abass Aljais, *Switched reluctance motor: Design, simulation and control*, Doctor of philosophy in electrical engineer, University of Western Sydney, 2007.
- [4] Lingquan Zeng, Haiwei Yu, "Research on a novel Rotor Structure Switched Reluctance Motor", *International Conference on Applied Physics and Industrial Engineering*, Physics Procedia, vol. 24, pp. 320 – 327, 2012.
- [5] P. H. Nha, D. Q. Thuy, "Improving the Characteristics of Switched Reluctance Motor", *Automatic Control and System Engineering Journal*, vol. 18, pp. 59 - 66, 2016.
- [6] Masayuki Sanada, Shigeo Morimoto, Yoji Takeda, "Novel Rotor Pole Design of Switched Reluctance Motors to Reduce the Acoustic Noise", *IEEE*, pp. 107 – 113, 2000.
- [7] Neil R. Garrigan, Wen L. Soong, Charles M. Stephens, Albert Storace, Thomas A. Lipo, "Radial Force Characteristics of a Switched Reluctance Machine", *IEEE*, pp. 2250 – 2258, 1999.
- [8] R. Krishnan, *Switched Reluctance Motor Drives – modeling, Simulation, Analysis, Design, and Application*, Industrial Electronics Series, 2001.

(BBT nhận bài: 12/10/2018, hoàn tất thủ tục phản biện: 05/12/2018)