

DOI:10.22144/ctu.jvn.2023.126

KHẢO SÁT SỰ PHÂN BỐ LỰC TỪ TRONG ĐỘNG CƠ TỪ TRỞ CHUYỂN MẠCH MỚI

Phí Hoàng Nhã^{1*} và Đỗ Thái Công²

¹Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Tập đoàn Điện lực Việt Nam

*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Phí Hoàng Nhã (email: nhaph@hau.edu.vn)

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 22/11/2022

Ngày nhận bài sửa: 14/12/2022

Ngày duyệt đăng: 04/01/2023

Title:

Surveying the distribution of magnetic force in the new switched reluctance motor

Từ khóa:

Phân bố lực, lực từ, mô hình lực từ, SRM, động cơ từ trở chuyển mạch

Keywords:

Force distribution, force magnetic, magnetic force model, SRM, switched reluctance motor

ABSTRACT

The magnetic force distribution significantly affects electric devices' working characteristics, especially in switched reluctance motors. This distributed magnetic force determines the torque and efficiency of the motor. The examination of the magnetic distribution as well as the magnetic force is a necessary scientific matter. Therefore, two magnetic models, including the Ampere model and the virtual work principle are used to analyze and calculate the distributed magnetic force in the switched reluctance motor presented in this paper. Furthermore, switched reluctance motor which has new structure is also proposed to evaluate and compare the magnetic force distribution with the prototype switching reluctance motor structure. The survey results show that the magnetic force distributed in the two models is equivalent. The magnetic force distribution on the new switched reluctance motor structure is improved compared to the prototype motor structure.

TÓM TẮT

Sự phân bố lực từ ảnh hưởng không nhỏ tới đặc tính làm việc của các thiết bị điện từ, nhất là trong động cơ từ trở chuyển mạch. Lực từ phân bố này quyết định đến mô men và hiệu suất của động cơ. Việc kiểm tra sự phân bố từ cũng như lực từ là vấn đề khoa học cần thiết. Do đó, hai mô hình từ gồm mô hình Ampere và mô hình dựa trên nguyên lý công ảo được dùng để phân tích, tính toán lực từ phân bố trong động cơ từ trở chuyển mạch được trình bày trong bài báo này. Hơn nữa, động cơ từ trở chuyển mạch có cấu trúc mới cũng được đưa ra để đánh giá, so sánh sự phân bố lực từ với cấu trúc động cơ từ trở chuyển mạch nguyên mẫu. Kết quả khảo sát cho thấy lực từ được phân bố theo hai mô hình là tương đương nhau và lực từ phân bố trên cấu trúc động cơ từ trở chuyển mạch mới được cải thiện hơn so với cấu trúc động cơ nguyên mẫu.

1. GIỚI THIỆU

Thông thường, sự phân bố lực từ trong các thiết bị điện từ là đồng đều và đối xứng, hình thành các ngẫu lực cân bằng và tự triệt tiêu lẫn nhau (Garrigan et al., 1999; Anwar et al., 2000). Tuy nhiên, do tính

thiếu đồng nhất trong vật liệu, sự phân bố lực từ trở nên mất cân bằng. Chính sự mất cân bằng này gây nên rung động và tiếng ồn, thậm chí làm biến dạng thiết bị. Vì vậy, đánh giá và phân tích sự phân bố lực từ trong các thiết bị điện từ là vấn đề cần thiết. Hiện

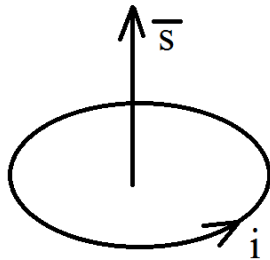
nay, có nhiều mô hình từ khác nhau được công bố (Se et al., 2004; Thomas & Wolfgang, 2010; Hongbiao et al., 2015; Elmar et al., 2015; Tetbirt et al., 2016; Sasaki et al., 2022; Yuning et al., 2022) dùng để khảo sát quá trình hình thành và phân bố lực từ trong các thiết bị điện.

Bên cạnh đó, động cơ từ trở chuyển mạch (Switched reluctance motor-SRM) với nhiều ưu điểm nổi trội được ứng dụng nhiều trong các phương tiện giao thông, nhất là xe điện. Đây là động cơ có từ rất lâu, nhưng mới được quan tâm nghiên cứu trở lại trong các năm gần đây (Ahn & Lukman, 2018; Li et al., 2019; Lin, 2019; Sun et al., 2019; Bilgin et al., 2020; Chithrabhanu & Vasudevan, 2021; Valencia et al., 2021; Sasaki et al., 2022). Trong bài báo này, một vài phương pháp tính toán lực từ dựa trên các mô hình từ đã công bố được sử dụng để khảo sát sự phân bố lực từ trên động cơ từ trở chuyển mạch. Bởi SRM thuộc thiết bị máy điện quay, là đối tượng chịu ảnh hưởng rõ rệt bởi sự phân bố lực từ trường. Sự rung ồn do mô men đập mạch trong SRM kết hợp với rung ồn do sự phân bố lực từ mất cân bằng trở thành vấn đề không nhỏ đối với loại động cơ này (Chai et al., 2010; Jian & Tunhyun, 2010; Wang & Park, 2011; Van et al., 2012).

Đồng thời, trong nghiên cứu Nhã et al. (2018), một cấu trúc SRM mới đề xuất, được sử dụng nhằm đánh giá sự thay đổi của lực từ phân bố trong động cơ. Sự phân bố lực từ dùng các mô hình từ khác nhau cho hai cấu trúc động cơ từ trở chuyển mạch được mô phỏng và đánh giá với nhiều trường hợp khác nhau.

2. PHÂN BỐ LỰC DỰA TRÊN MÔ HÌNH AMPERE

Biểu diễn mật độ lực từ và ngẫu lực từ được dựa trên cơ sở của lực và ngẫu lực tác động lên ngẫu cực nguyên tố trong vùng không có vật liệu từ tính và dòng điện (véc tơ mô men từ ban đầu $\bar{M} = 0$, véc tơ mật độ dòng điện $\bar{J} = 0$).



Hình 1. Mô hình Ampere

Trong mô hình Ampere (Vandeveldel & Melkebeek, 2001), một lưỡng cực từ được biểu diễn bằng một mạch dòng điện với dòng điện i và diện tích véc tơ \bar{s} , như Hình 1, ở đó véc tơ mô men từ \bar{m} được biểu diễn:

$$\bar{m} = \mu_0 i \bar{s} \tag{1}$$

Độ từ hóa vĩ mô $\mu_0 \bar{M}$ (với μ_0 là độ từ hóa không khí) được đại diện bởi mật độ dòng từ hóa tương đương \bar{J}_t :

$$\bar{J}_t = \nabla \cdot \bar{M} \tag{2}$$

trong đó ∇ : gradient

Trong mô hình Ampere, cảm ứng từ \bar{B} là trường cơ bản, được tạo ra bởi dòng điện \bar{J} và dòng từ hóa tương đương \bar{J}_t theo:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \frac{\bar{B}}{\mu_0} &= \bar{J} + \bar{J}_t \\ \nabla \times \bar{B} &= 0 \end{aligned} \tag{3}$$

Và ảnh hưởng đến lực (trên mỗi đơn vị độ dài) trên mỗi dòng điện \bar{i} :

$$\bar{F} = \bar{i} \cdot \bar{B} \tag{4}$$

Theo lực tác dụng lên dòng điện (4), lực và ngẫu lực hoạt động dựa trên ngẫu cực nguyên tố \bar{m} (hình 1) trong không khí, được tìm thấy:

$$\bar{F}_s = \frac{1}{\mu_0} (\nabla \cdot \bar{B}_n) \cdot \bar{m} \tag{5}$$

$$\bar{C}_s = \frac{1}{\mu_0} \bar{m} \cdot \bar{B}_n \tag{6}$$

Trong đó cảm ứng ngoài \bar{B}_n được định nghĩa tương tự véc tơ cường độ từ trường ngoài \bar{H}_n . Chỉ đơn giản thay thế \bar{m} và \bar{B}_n bằng $\mu_0 \bar{M}$ và \bar{B} tương ứng và cộng thêm mật độ lực vào mật độ dòng điện \bar{J} , theo đó mật độ lực và ngẫu lực thu được:

$$\bar{f}_s = \bar{J} \cdot \bar{B} + (\nabla \cdot \bar{B}) \cdot \bar{M} = \nabla \cdot \bar{T}_s \tag{7}$$

$$\bar{c}_s = \bar{M} \cdot \bar{B} \tag{8}$$

ở đó:

$$\overline{T_s} = \overline{B.H} - \frac{\mu_0}{2} (H^2 - M^2) \overline{I} \quad (9)$$

Tương tự với mật độ lực và ngẫu lực dựa trên mô hình Chu (Vandeveldel & Melkebeek, 2001), phương trình (7) và (8) các biểu thức chỉ có thể được xem như mật độ lực và ngẫu lực ảo, có thể được sử dụng cho tính toán mô men và lực tổng.

3. PHÂN BỐ LỰC DỰA TRÊN NGUYÊN LÝ CÔNG ẢO

Nguyên lý làm việc công ảo thường được sử dụng để tính toán mật độ lực từ, được chỉ định thêm bởi chỉ số “ao”. Mật độ lực từ thu được bằng cách xem xét sự dịch chuyển ảo của một phần vô tận của vật từ hóa và công việc tương ứng được thực hiện bởi nguồn điện ngoài và sự biến đổi của năng lượng từ tính (Vandeveldel & Melkebeek, 2001; Robert et al., 2007; Xu & Ou, 2015).

Trong vật liệu tuyến tính đẳng hướng, ứng dụng cục bộ của nguyên lý làm việc ảo dẫn đến mật độ lực, nếu từ thẩm được giả định là độc lập với biến dạng (Hirsinger & Billardon, 1995):

$$\overline{f_{ao}} = \overline{J.B} - \frac{1}{2} H^2 \overline{\nabla \mu} = \overline{\nabla.T_{ao}} \quad (10)$$

ở đó:

$$\overline{T_{ao}} = \overline{B.H} - \frac{1}{2} \overline{B.H.I} \quad (11)$$

với:

μ là độ từ hóa vật liệu; \overline{I} là véc tơ dòng điện

Trong trường hợp vật liệu tuyến tính, đẳng hướng, đồng nhất và dòng tự do, mật độ lực từ biến mất bên trong vật liệu và dẫn đến mật độ lực bề mặt bình thường tại các ranh giới giữa các phương tiện khác nhau, nơi $\overline{\nabla \mu}$ hiển thị một số ít (Reyne et al., 1987; Ren, 1994). Bản chất của sự phân bố lực từ thu được bằng cách sử dụng nguyên lý làm việc ảo, tức là một lực kéo bề mặt bình thường có thể dễ dàng được giải thích. Nếu từ thẩm được giả định là không bị ảnh hưởng bởi biến dạng, hệ thống từ trường và do đó năng lượng từ hóa không bị thay đổi bởi sự dịch chuyển ảo của một thể tích bên trong vật liệu. Do đó, mật độ lực từ bên trong vật liệu biến mất. Mặt khác, bởi sự dịch chuyển ảo của bề mặt ranh giới trong hướng bình thường, vật liệu như được

thay thế bằng vật liệu từ thẩm khác, dẫn đến sự biến đổi của năng lượng từ và do đó kéo theo bề mặt từ.

Trong vật liệu đẳng hướng phi tuyến, mật độ lực từ được theo (Hirsinger & Billardon, 1995):

$$\overline{f_{ao}} = \overline{J.B} - \int_0^H H \cdot \overline{\nabla \mu} dH = \overline{\nabla} \cdot \left(\overline{B.H} - \int_0^H B dH \overline{I} \right) \quad (12)$$

Ở đó, $\int_0^H B dH$ được gọi là mật độ năng lượng từ đồng nhất. Ngay cả trong môi trường đồng nhất, một vài lực thể tích có thể xuất hiện trong trường hợp này, như một sự dịch chuyển ảo của một thể tích là một sự trao đổi của vật liệu rõ ràng của các điều kiện bão hòa có thể khác nhau.

Rõ ràng là khi áp dụng nguyên lý làm việc ảo, sự phụ thuộc của từ thẩm μ vào biến dạng phải được tính toán. Bằng cách xem xét sự phụ thuộc của μ vào mật độ khối lượng, mật độ lực từ thu được như sau, bao gồm mật độ từ hóa (Reyne et al., 1987; Ren, 1994):

$$\begin{aligned} \overline{f_{ao}} &= \overline{J.B} - \frac{1}{2} H^2 \overline{\nabla \mu} + \overline{\nabla} \cdot \left(\frac{1}{2} H^2 \frac{\partial \mu}{\partial q} q \right) \\ &= \overline{\nabla} \cdot \left(\overline{B.H} - \frac{1}{2} \overline{B.H.I} + \frac{1}{2} H^2 \frac{\partial \mu}{\partial q} q \overline{I} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

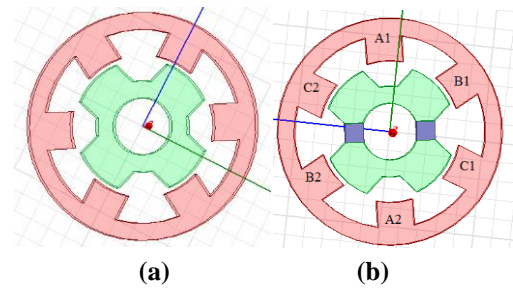
q là mật độ điện tích và:

$$\overline{f_{ao}} = \overline{\nabla} \cdot \left(\overline{B.H} - \int_0^H \left(\mu - \frac{\partial \mu}{\partial q} q \right) H dH \overline{I} \right) \quad (14)$$

Cho vật liệu tuyến tính và phi tuyến tương ứng.

4. ĐỘNG CƠ TỪ TRỞ CHUYỂN MẠCH CẤU TRÚC MỚI

Động cơ từ trở chuyển mạch truyền thống có cấu tạo gồm stator và rotor, như Hình (2a) là loại SRM 6 cực stator và 4 cực rotor. Tùy theo số cực của rotor và stator mà người ta có các loại động cơ từ trở chuyển mạch 6/4, 8/6, 10/8,... cả stator và rotor của động cơ từ trở chuyển mạch đều là loại cực lỗi. Stator của động cơ được gắn cố định với vỏ, trên các cực đối diện của nó được quấn các cuộn dây giống như stator của động cơ một chiều hay động cơ xoay chiều ba pha. Rotor của động cơ là phần di động, có thể quay quanh trục stator. Tuy nhiên, trên rotor không có cuộn dây nào. Cấu tạo của rotor đơn giản chỉ là lõi thép được ghép bởi các lá thép mỏng và chia làm các cực đối diện nhau.



Hình 2. Cấu trúc của SRM nguyên mẫu (a) và SRM cấu trúc mới (b)

Một sự thay đổi trong cấu trúc động cơ từ trở chuyển mạch được đề xuất (Nhã và ctv., 2018). Cấu trúc SRM mới có stator không đổi gồm 6 cực, chỉ cấu trúc rotor được cải tiến, như Hình (2b). Hai miếng nhôm nguyên khối được ghép vào vị trí gông rotor, thay thế vật liệu sắt từ tại vị trí đó. Hình (2b) cho thấy nguyên lý hoạt động của động cơ. Khi pha A1 và A2 của cuộn dây được kích thích, cả hai cực stator của cuộn dây pha A1 và A2 được từ hóa và rotor quay ngược chiều kim đồng hồ 30 độ. Sau đó, rotor quay liên tục với việc chuyển kích thích thành pha B1 và B2, sau đó là C1 và C2. Thông số động cơ được thể hiện trong Bảng 1.

Cấu trúc SRM mới này làm thay đổi hướng đi của từ thông so với SRM truyền thống và làm thay đổi sự phân bố lực trong động cơ (Nhã và ctv., 2018). Nó được kỳ vọng sẽ làm giảm tổn hao dòng điện xoáy trong khối rotor, tiêu giảm lực xuyên tâm, từ đó giảm được rung ồn và nâng cao đặc tính mô men.

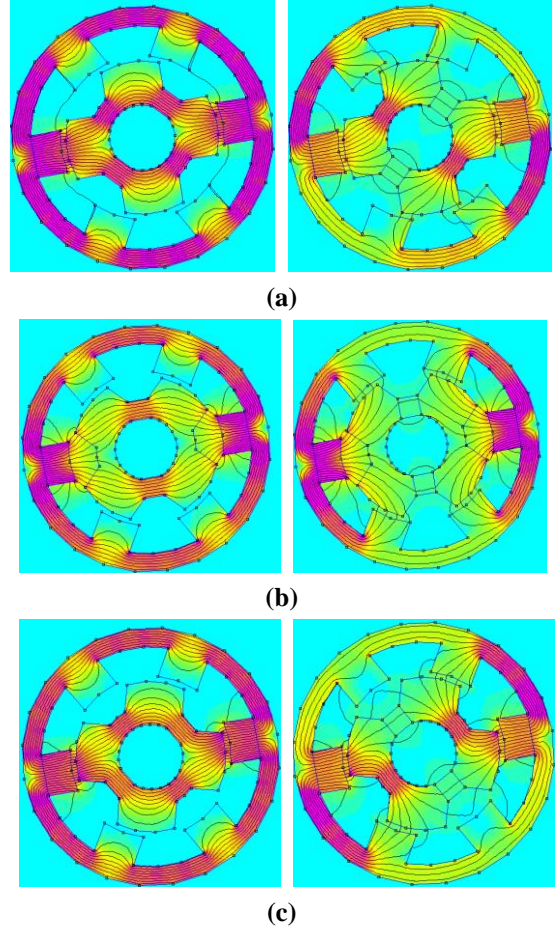
Bảng 1. Thông số động cơ SRM

Số cực stator, cực rotor	6/4	Góc cực stator, rotor (độ)	20/24
Đường kính ngoài (mm)	190	Đường kính trong (mm)	89,7
Đường kính trục (mm)	28	Độ dày gông stator, rotor (mm)	12,5
Chiều dài cực stator (mm)	77,2	Chiều dài cực rotor (mm)	59,5
Khe hở không khí (mm)	0,3	Đường kính rotor (mm)	100

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Để minh họa sự phân bố lực từ trong động cơ từ trở chuyển mạch, phương pháp tính toán lực được thực hiện bằng cách sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn 2D và 3D áp dụng cho SRM truyền thống và SRM mới thông qua công cụ mô phỏng là phần mềm FEMM và Ansys Maxwell. Hình 3 hiển thị mật độ từ thông trong rotor và stator của động cơ trong

ba trường hợp: cực stator và rotor thẳng hàng (Hình 3a); không thẳng hàng (Hình 3b); chông chéo (Hình 3c). Sự phân bố đường sức từ trong động cơ sẽ quyết định đến sự phân bố cũng như giá trị lực từ sinh ra. Với cấu trúc SRM mới, sự phân bố của đường sức từ khác với SRM truyền thống, tập trung ở vùng sinh lực từ, chứ không phân đều như trong cấu trúc SRM cũ.

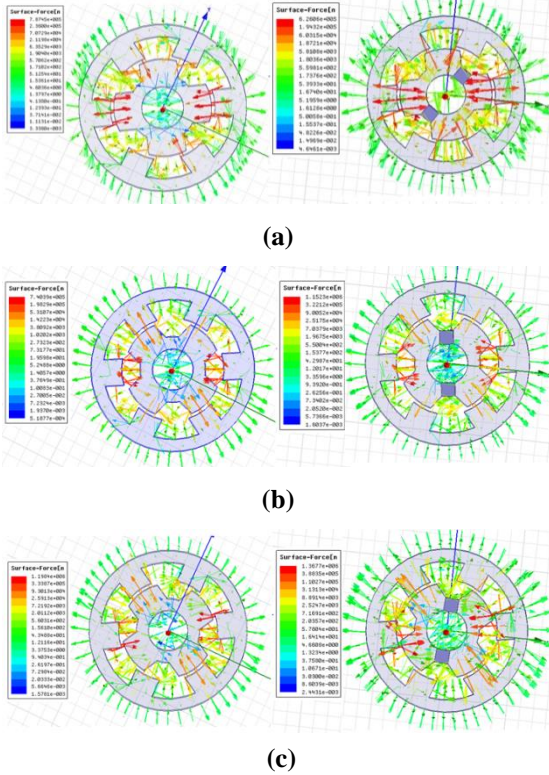


Hình 3. Phân bố từ thông trong SRM nguyên mẫu và SRM cấu trúc mới

Ghi chú: (a) cực stator, rotor thẳng hàng, (b) cực stator, rotor không thẳng hàng, (c) cực stator, rotor chông chéo

Hình 4 biểu diễn sự phân bố lực từ theo mô hình Ampere với các trường hợp như Hình 3. Kết quả cho thấy mật độ lực từ được phân bố tương đối đồng đều, các ngẫu lực sinh ra có tính đối xứng. Ở cấu trúc SRM mới, sự phân bố lực từ tập trung ở hai cực stator cạnh nhau, phát huy tối đa giá trị lực tiếp tuyến, góp phần nâng cao mô men quay so với sự phân bố lực từ trên SRM truyền thống. Giá trị lực từ tối đa được cho trong Bảng 1. Ở đó, vị trí cực rotor và stator thẳng hàng, giá trị lực từ tối đa của SRM mới nhỏ

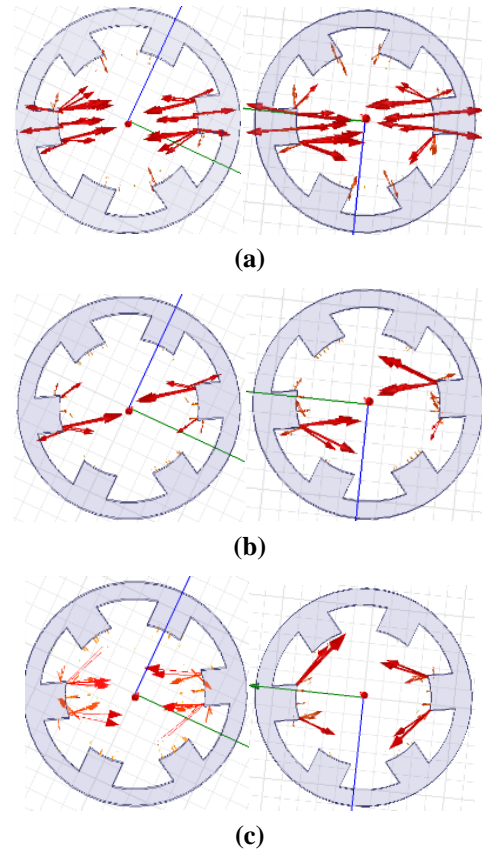
hơn không đáng kể so với SRM truyền thống. Điều này không ảnh hưởng nhiều đến mô men sinh ra, bởi tại vị trí cực này, lực xuyên tâm là đáng kể. Hai vị trí khi cực stator và rotor không thẳng hàng hay chùng chéo, đây là vị trí mà lực sinh ra quyết định đến mô men quay của động cơ. Kết quả cho thấy SRM mới có giá trị lực tối đa vượt trội so với SRM cũ.



Hình 4. Sự phân bố lực f_s (7) trong SRM nguyên mẫu và SRM cấu trúc mới

Ghi chú: (a) cực stator, rotor thẳng hàng, (b) cực stator, rotor không thẳng hàng, (c) cực stator, rotor chùng chéo

Hình 5 biểu diễn sự phân bố lực từ theo mô hình nguyên lý công ảo. Lực từ lớn nhất được biểu diễn theo phương và chiều ở cực stator, nơi sinh ra lực và mô men quay. Cả hai mô hình biểu diễn sự phân bố lực từ cơ bản là tương đương khi lựa chọn B hay H làm từ trường kích thích.



Hình 5. Sự phân bố lực $f_{\lambda 0}$ (10) trong SRM nguyên mẫu và SRM cấu trúc mới

Ghi chú: (a) cực stator, rotor thẳng hàng, (b) cực stator, rotor không thẳng hàng, (c) cực stator, rotor chùng chéo

Bảng 2. Giá trị lực từ lớn nhất trong động cơ từ trở chuyển mạch ở cực stator

		Lực từ lớn nhất	Lực từ trung bình
Cực rotor, stator thẳng hàng	SRM truyền thống	$7.8745 \times 10^5 \text{ Nm}^2$	$9.1362 \times 10^4 \text{ Nm}^2$
	SRM cấu trúc mới	$6.2606 \times 10^5 \text{ Nm}^2$	$8.7591 \times 10^4 \text{ Nm}^2$
Cực rotor, stator không thẳng hàng	SRM truyền thống	$11.984 \times 10^5 \text{ Nm}^2$	$6.371 \times 10^4 \text{ Nm}^2$
	SRM cấu trúc mới	$13.677 \times 10^5 \text{ Nm}^2$	$9.588 \times 10^4 \text{ Nm}^2$
Cực stator, rotor chùng chéo	SRM truyền thống	$7.4039 \times 10^5 \text{ Nm}^2$	$9.413 \times 10^4 \text{ Nm}^2$
	SRM cấu trúc mới	$11.523 \times 10^5 \text{ Nm}^2$	$12.339 \times 10^4 \text{ Nm}^2$

Dựa trên mô hình biểu diễn phân bố lực từ, động cơ từ trở chuyển mạch với cấu trúc rotor mới bước đầu thể hiện được tính khả thi trong việc cải thiện lực từ và mô men. Kết quả công bố là kết quả phân

tích, đánh giá bước đầu, những phân tích về các giá trị nâng cao hiệu suất của động cơ từ trở chuyển mạch kiểu mới sẽ được công bố trong những nghiên cứu tiếp theo.

7. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày phương pháp tính toán lực từ phân bố theo hai mô hình khác nhau. Một cấu trúc động cơ từ trở chuyển mạch mới được đề xuất và đánh giá sự phân bố lực từ theo hai mô hình này. Kết

quả sơ bộ cho thấy lực từ được phân bố theo hai mô hình là tương đương nhưng sự phân bố lực ở hai cấu trúc SRM khác nhau đáng kể. Lực từ tạo ra ở SRM cấu trúc mới lớn hơn so với ở SRM nguyên mẫu, dẫn đến khả năng nâng cao mô men và hiệu suất cho động cơ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Ahn, J. W., & Lukman, G. F. (2018). Switched reluctance motor: Research trends and overview. *CES Trans. Electr. Mach. Syst.*, 2(4), 339–347. <https://doi.org/10.30941/CESTEMS.2018.00043>
- Anwar, M. N., & Husain, I. (2000). Radial Force Calculation and Acoustic Noise Prediction in Switched Reluctance Machines. *IEEE*, 36(6), 1589 – 1597. <https://doi.org/10.1109/28.887210>
- Bilgin, B., Howey, B., Callegaro, A. D., Liang, J., Kordic, M., Taylor, J. & Emadi, A. (2020). Making the case for switched reluctance motors for propulsion applications. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 69(7), 7172–7186. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2993725>
- Chai, J. Y., & Liaw, C. M. (2010). Reduction of speed ripple and vibration for switched reluctance motor drive via intelligent current profiling. *IET electric Power Applications*, 4(5), 380–396.
- Sasaki, H., Hidaka, Y. & Igarasgi, H. (2022). Prediction of IPM machine torque characteristic using deep learning based on magnetic field distribution. *IEEE Access*, 10, 60814–60822. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2009.0061>
- Chithrabhanu, A., & Vasudevan, K. (2021). Current Sharing Function Based Torque Ripple Reduction Strategy for Switched reluctance motor drives. *IEEE 12th Energy Conversion Congress & Expositive Asia*. <https://doi.org/10.1109/ECCE-Asia49820.2021.9479354>
- Elmar, K., Keywan, R., Valentina, B., Nils, P., Detlef P., John P., & Ottmar, E.. (2015) Introduction to the Ampere model intercomparison studies on the economics of climate stabilization. *Technological Forecasting & Social Change*, 90, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2014.10.012>
- Garrigan, N. R., Soong, W. L., Stephens, C. M., Storace, A., & Lipo, T. A. (1999). Radian force characteristics of a switched reluctance machine. *IEEE*, 2250-2258. <https://doi.org/10.1109/IAS.1999.799158>
- Hirsinger, L., & Billardon, R. (1995). Magneto-elastic finite element analysis including magnetic forces and magnetostriction effects. *IEEE Trans. Magn.*, 31, 1877–1880. Garrigan, N. R., Soong, W. L., Charles, M. S., Albert, S. & Thomas, A. L. (1999). Radial Force Characteristics of a Switched Reluctance Machine. *IEEE*, 2250 – 2258. <https://doi.org/10.1109hy/20.376404>
- Hongbiao, H., Yunkai, G., Yongzhen, Z., Sanming, D., & He, L. (2015). Effect of magnetic field distribution of friction surface on friction and wear properties of 45 steel in DC magnetic field. *Wear*, 328, 422-435. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.062>
- Jian, L., & Tunhyun, C. (2010). Dynamic reduction of unbalanced magnetic force and vibration in Switched Reluctance Motor by the parallel paths in windings. *Mathematics and Computer in Simulation*, 81, 407-419. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2010.08.009>
- Li, S., Zhang, S., Habetler, T. G., & Harley, R. G. (2019). Modeling, design optimization, and applications of switched reluctance machines—A review. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 55(3), 2660–2681. <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2897965>
- Lin, C. H. (2019). Adaptive nonlinear backstepping control using mended recurrent Romanovski polynomials neural network and mended particle swarm optimization for switched reluctance motor drive system. *Trans. Inst. Meas. Control*, 41(14), 4114-4128. <https://doi.org/10.1177/0142331219851920>
- Nhã, P. H., Phi, P. H., & Thùy, Đ. Q. (2018). Mô hình mạch từ trở tương đương trong động cơ từ trở kiểu mới. *Tạp chí Nghiên cứu KH&CN Quân sự*, 54, 67-74.
- Reyne, G., Sabonnadiere, J. C., Coulomb, J. L., & Brissonneau, P. (1987). A survey of the main aspects of magnetic forces and mechanical behavior of ferromagnetic materials under magnetization. *IEEE Trans. Magn.*, 23, 3765-3767. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1987.1065518>
- Ren, Z. (1994). Comparison of different force calculation methods in 3D finite element modeling. *IEEE Trans. Magn.*, 30, 3471–3474. <https://doi.org/10.1109/20.312686>
- Robert, M., Landis, C. M. & Salomon, M. A. (2007). A principle of virtual work for combined electrostatic and mechanical loading of materials. *International journal of non-linear mechanics*, 42, 831-838. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2007.03.008>
- Se, H. L., San, J. H., Hong, S. C., Joon, H. L. & Han, P. (2004). Magnetic force distributions in saturated magnetic system using magnetic charge method and other methods. *IEEE Transactions on*

- Applied Superconductivity*, 14(2), 682-685.
<https://doi.org/10.1109/TASC.2004.830029>
- Sun, J., Cao, G. Z., Huang, S. D., Peng, Y., He, J. & Qian, Q. Q. (2019). Sliding mode observer based position estimation for sensorless control of the planar switched reluctance motor. *IEEE Sccess*, 7, 61034-61045.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2913702>
- Thomas, P., & Wolfgang, M. (2010). A comparison of different magnetic force distributions with respect to mechanical deformations using a hybrid calculation method. *2010 ursl international symposium on electromagnetic theory*, 898-901.
- Tetbirt, A., Bouaziz, M. N., & Tahar Abbas, M. (2016). Numerical study of magnetic effect on the velocity distribution field in a macro/micro-scale of micropolar and viscous fluid in vertical channel. *Journal of Molecular Liquids*, 216, 203-110. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.12.088>
- Valencia, D., Tarvirdilu, R., Garcia, C., Rodriguez, J. & Emadi, A. (2021). Vision, Challenges, and Future trends of model predictive control in switched reluctance motor drives. *IEEE*, 9, 69926-69937.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3078366>
- Vandevelde, L., & Melkebeek, J. A. (2001). A survey of magnetic force distributions based on different magnetization models and on the virtual work principle. *IEEE Trans. Magn*, 37,3405-3409.
<https://doi.org/10.1109/20.952624>
- Van, M., Kasper, K., Doncker, R. W., & Hameyer, K. (2012). Material parameters for the structural dynamic simulation of electrical machines. *Proceedings-20th International Conference on Electrical Machines*, 2994-3000.
- Wang, H., Lee, D., & Park, T. (2011). Hybrid stator-pole switched reluctance motor to improve radial force for bearingless application. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1371-1376.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.09.035>
- Xu, X., & Ou, J. (2015). Force identification of dynamic systems using virtual work principle. *Journal of Sound and Vibration*, 337,71-94.
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.10.005>
- Yuning, S., Hang, W., Zhongyong, L. & Shoujiang, L. (2022). Simulation study on magnetic field distribution of PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(78), 33439-33452.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.228>