TẠP CHÍ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ NĂNG LƯỢNG - TRƯỜNG ĐẠI HỌC ĐIỆN LỰC
(ISSN: 1859 - 4557)

SỰ THAY ĐỔI CỦA MÔ MEN TRUNG BÌNH THEO GÓC CỰC STATOR, GÓC CỰC ROTOR VÀ VẬT LIỆU CỦA ĐỘNG CƠ TỪ TRỞ

THE VARIABLES IN TORQUE AVERAGE AND TORQUE RIPPLE BY STATOR/ ROTOR POLE ANGLE AND MATERIAL OF SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Đinh Hải Lĩnh[1,2*], Bùi Minh Định[1], Nguyễn Thế Công[1], Phạm Văn Bình[1], Nguyễn Thị Linh[3]

Đại học Bách Khoa Hà Nội[1], Đại học Lâm nghiệp[2], Đại học Điện Lực[3]

Ngày nhận bài: 14/5/21, Ngày chấp nhận đăng: 27/10/21, Phản biện: PGS. TS Phạm Tuấn Thành

Tóm tắt:

Bài báo phân tích ảnh hưởng của góc cực stator, góc cực rotor và vật liệu đến mô men trung bình của động cơ từ trở. Mô hình động cơ từ trở ba pha 6/4 và 12/8 với vật liệu là M270 _35A và M19_24G được lựa chọn để phân tích. Mô hình 2D của động cơ từ trở 6/4 và 12/8 được xây dựng và phân tích bằng Ansys Maxwell. Thay đổi góc cực stator và góc cực rotor của động cơ từ trở bằng cách thay đổi tỉ số góc cực stator/ bước cực stator, tỉ số góc cực rotor/ bước cực rotor của động cơ từ trở ba pha 6/4 và 12/8. Kết quả nhận được cho thấy sự thay đổi về vật liệu thì chỉ biên độ của đặc tính mô men tĩnh thay đổi, vị trí điểm cực đại của mô men trung bình không dịch chuyển khi thay đổi góc cực staor, rotor. Góc cực stator và rotor là yếu tố quyết định đến mô men trung bình và hiệu suất của động cơ từ trở. Giá trị của mô men trung bình lớn nhất khi có tỉ số góc cực stator/ bước cực stator là 0.5. Và khi đó mô men trung bình đạt giá trị lớn nhất khi tỉ số góc cực rotor/ bước cực rotor là 0.3 với động cơ từ trở 6/4 và 0.4 với động cơ từ trở 12/8.

Từ khóa:

Động cơ từ trở, góc cực stator, góc cực rotor, mô men trung bình, vật liệu

Abstract:

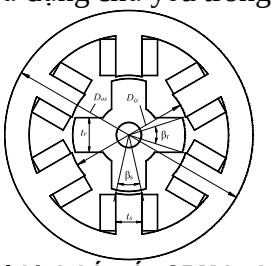
This paper will analyze influence of stator, rotor embrace and on average torque of SRM. The Switched reluctance motor of three phase 6/4 and 12/8 with magnetic steel material M270_35A and M19_24G has been selected to build model. The 2D SRM simulation of 6/4 and 12/8 was implement by Anasys Maxwell.The stator and rotor pole angle of three phase 6/4 and 12/8 can be changed by rotor and stator embrace. The results were shown that the changes of material are not so move to position of point maximum of average torque, only changes the amplitude of the torque characteristic. The stator pole angle and rotor pole angle parameters have significant on average torque and efficiency. Maximum torque will be achieved at stator embrace ratio of 0.5 and maximum average torque is maximum at 0.3 with SRM 6/4 and 0.4 with SRM 12/8.

Keywords:

Switched reluctance motor, Pole stator angle, Pole rotor angle, Torque average, Material.

1. MỞ ĐẦU

Động cơ từ trở (SRM) là một loại động cơ điện có cấu tạo của rotor và stator đều có dạng cực lồi, trên stator có dây quấn tương tự như dây quấn kích từ của động cơ một chiều, rotor không có dây quấn hay nam châm. Với cấu tạo đặc biệt này, động cơ SRM rất bền vững về cơ khí, cho phép thiết kế ở dải tốc độ rất cao ; mô men khởi động lớn. SRM có một số cấu trúc phổ biến như: 6/4 (6 cực stator, 4 cực rotor), 8/6, 10/6, 12/8,…. [1]. Với cấu trúc 6/4 hay 12/8 thì bộ điều khiển chỉ có ba pha điều khiển, đây là loại SRM sử dụng chủ yếu trong thực tế.



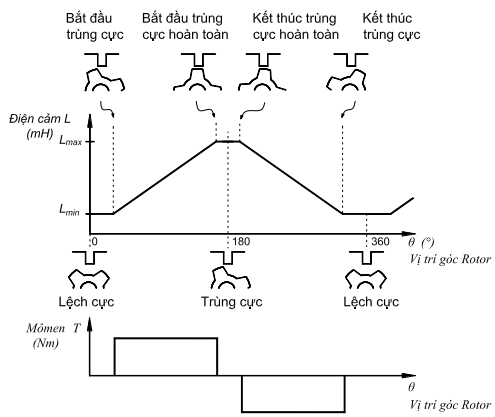
Hình 1. Mô hình kết cấu SRM loại 6/4 và ký hiệu các góc cực stator β_s, góc cực rotor β_r.

Công suất cơ học của động cơ SRM được tạo ra trên nguyên lý biến đổi mô men từ trở. Độ lớn của mô men phụ thuộc vào bề rộng cực stator và rotor. Động cơ này có nhược điểm là độ ồn lớn, độ nhấp nhô mô men cao. Trong quá trình tính toán thiết kế SRM góc cực stator và rotor là thông số cần tính chọn kỹ lưỡng để có tối đa hóa mô men trung bình, giảm thiểu nhấp nhô momen. Góc cực stator, rotor cũng là yếu tố quyết định đến mô men khởi động của động cơ SRM [2]. Đã có các nghiên cứu nghiên cứu giải pháp tối đa hóa mô men trung bình và giảm thiểu nhấp nhô mô men trên cơ sở tối ưu hóa chiều cao cực stator, bề dầy gông stator [3] ; hình dạng cực stator cho mô hình động cơ SRM 8/6 [4][5] ; tối ưu hóa góc cực stator, rotor sử dụng thuật toán tối ưu GA [6][7][8]. Tuy nhiên các nghiên cứu chỉ sử dụng thuật toán tối ưu cho từng kết cấu cụ thể của động cơ SRM mà chưa đưa ra được đề xuất lựa chọn giá trị góc cực stator/ rotor để có được giá trị mô men trung bình lớn nhất. Việc tính chọn bề rộng cực rotor, stator chưa có nghiên cứu nào có chỉ ra sự thay đổi của mô men trung bình khi thay đổi vật liệu và thay đổi góc cực stator/ rotor. Trong bài báo tác giả phân tích tác động của góc cực stator, rotor và vật liệu đến mô men trung bình của động cơ. Kết quả phân tích là cơ sở để lựa chọn bề rộng cực stator, rotor và vật liệu phù hợp cho từng kết cấu của động cơ từ trở SRM 6/4 hay 12/8 để có mô men trung bình là cao nhất.

2. MÔ MEN CỦA ĐỘNG CƠ TỪ TRỞ

Động cơ hoạt động trên nguyên lý cấp dòng điện cho từng pha dây quấn ; dòng điện được chuyển mạch – đóng và cắt điện nhờ các khóa bán dẫn. Ở chế độ động cơ dòng điện được đóng cắt theo sườn lên của điện cảm.

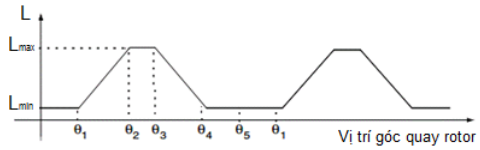
Khi dòng điện được đưa vào trong từng pha thì làm cho rotor quay. Sự dịch chuyển của rotor động cơ SRM có 4 vị trí quan trọng là vị trí cực rotor bắt đầu trùng cực stator, bắt đầu trùng cực hoàn toàn, kết thúc trùng cực hoàn toàn, kết thúc trùng cực (hình 2) [1].



Hình 2. Đặc tính điện cảm tại các vị trí đặc biệt.

Khi rotor ở vị trí lệch trục hoàn toàn so với cực stator thì điện cảm có giá trị nhỏ nhất $\boldsymbol{L_{min}}$ (được ký hiệu là $\boldsymbol{L_u}$ với ý nghĩa là điện cảm tại vị trí lệch trục hoàn toàn), khi rotor ở vị trí đồng trục với cực stator thì lúc này điện cảm có giá trị lớn nhất $\boldsymbol{L_{max}}$

(được kí hiệu là $\boldsymbol{L_a}$ với ý nghĩa là rotor tại vị trí đồng trục hoàn toàn) [1].



Hình 3. Đặc tính điện cảm theo vị trí góc rotor.

Trong suốt quá trình rotor quay từ vị trí lệch trục hoàn toàn tới vị trí cực rotor và stator bắt đầu đồng trục với nhau thì điện cảm của động cơ hầu như không đổi ở giá trị $\boldsymbol{L_{min}}$. Khi cực rotor và stator bắt đầu gối lên nhau, điện cảm động cơ tăng dần theo mức độ đồng trục giữa chúng và đạt giá trị lớn nhất $\boldsymbol{L_{max}}$ khi chúng đồng trục hoàn toàn. Mô men của động cơ được sinh ra trong quá trình điện cảm biến thiên từ vị trí lệch trục hoàn toàn đến vị trí đồng trục hoàn toàn [1][2][5]

$$T_k = \frac{1}{2}.i_k^2.\frac{dL}{d\theta} \qquad (1)$$

Trong đó T_k là mô men trên một pha dây quấn; θ là vị trí góc quay của rotor.

L là điện cảm của SRM. Điện cảm L của SRM luôn biến thiên theo vị trí góc rotor có dạng tuần hoàn với chu kì là một bước cực rotor $2\pi/N_r$ (Nr là số cực rotor).

$$L(\theta) = \begin{cases} L_{\min} & 0<\theta \le \theta_1 \\ \dfrac{L_{max}-L_{\min}}{\beta_s}.\left(\theta - \left[\dfrac{\pi}{N_r} - \dfrac{\beta_r+\beta_s}{2}\right]\right) + L_{\min} & \theta_1<\theta \le \theta_2 \\ L_{max} & \theta_2<\theta \le \theta_3 \\ -\dfrac{L_{max}-L_{\min}}{\beta_s}.\left(\theta - \left[\dfrac{\pi}{N_r} + \dfrac{\beta_r-\beta_s}{2}\right]\right) + L_{max} & \theta_3<\theta \le \theta_4 \\ L_{\min} & \theta_4<\theta \le \dfrac{2\pi}{N_r} \end{cases} \qquad (2)$$

Trong đó : Nr là số cực rotor; β_s là góc cực stator; β_r là góc cực rotor; L_{min} là giá trị điện cảm tại vị trí lệch trục hoàn toàn; L_{max} là giá trị điện cảm tại vị trí đồng trục hoàn toàn

Giá trị mômen trung bình của SRM được tính như sau [7]:

$$T_{avg} = \frac{1}{\tau_k}\int_0^{\tau_k}\sum_{k=1}^{m} T_k(\theta,i)\,dt \qquad (3)$$

Trong đó: T_{avg} gọi là mômen trung bình

T_k là mômen trên pha dây quấn thứ k

τ_k là chu kỳ của dòng điện pha

m là số pha của động cơ SRM.

3. LỰA CHỌN GÓC CỰC STATOR VÀ GÓC CỰC ROTOR

Góc cực stator và góc cực rotor là thông số quan trọng khi tính toán thiết kế động cơ từ trở SRM. Góc cực rotor lớn làm tăng trọng lượng rotor, tăng tổn hao sắt từ trên rotor, nếu góc cực rotor quá nhỏ thì động cơ khó khởi động. Do vậy bề rộng cực stator βs và bề rộng cực rotor βr thỏa mãn các điều kiện biên [1].

$$\begin{cases} \min(\beta_s,\beta_r) \ge \dfrac{2\pi}{m.N_r} \\ \beta_r \ge \beta_s \\ \beta_s + \beta_r < \dfrac{2\pi}{N_r} \end{cases} \qquad (4)$$

Với động cơ SRM 6/4 ta có các điều kiện biên của góc cực rotor, stator là :

Min $(\beta_S, \beta_R) \ge 360^0/m.N_R = 360^0/3.4 = 30^0$

Và $(\beta_S + \beta_R) \le 360^0/N_R = 360^0/4 = 90^0$

Với động cơ SRM 12/8 ta có các điều kiện biên của góc cực rotor, stator là:

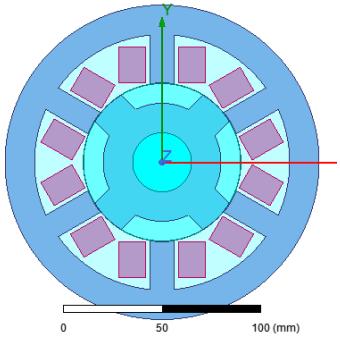
Min $(\beta_S, \beta_R) \ge 360^0/m.N_R = 360^0/3.8 = 15^0$

$(\beta_S + \beta_R) \le 360^0/N_R = 360^0/8 = 45^0$

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

4.1. Xét với động cơ SRM 6/4

Mô hình 2D động cơ từ trở (hình 4) sử dụng phần mềm ansys maxwell để phân tích và mô phỏng.



Hình 4. Mô hình 2D động cơ SRM 6/4

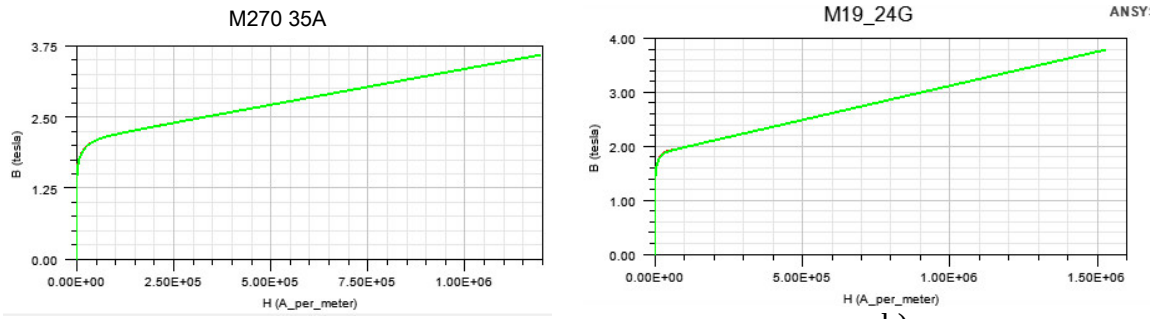
Bảng 1. Thông số kích thước cơ bản của động cơ SRM 6/4

Thông số	Giá trị
Khe hở không khí	0.4 mm
Đường kính ngoài stator	160 mm
Chiều cao cực stator	24.6 mm
Đường kính ngoài rotor	80 mm
Đường kính trục	30 mm
Bề dầy gông rotor	15 mm
Bề dầy gông từ stator	15 mm
Chiều dài động cơ	80 mm
Số vòng dây/1 cực	11 vòng
Công suất	30 kW
Điện áp nguồn 1 chiều	250 V

Đặt biến a_s = góc cực stator/ bước cực stator ; a_r = góc cực rotor/ bước cực rotor.

$$a_s = \frac{\beta_s}{\tau_s};\ a_r = \frac{\beta_r}{\tau_r} \qquad (5)$$

Vật liệu dùng cho động cơ là thép M19-24G và M270-35A. Đặc tính B-H của vật liệu như trong hình 5.

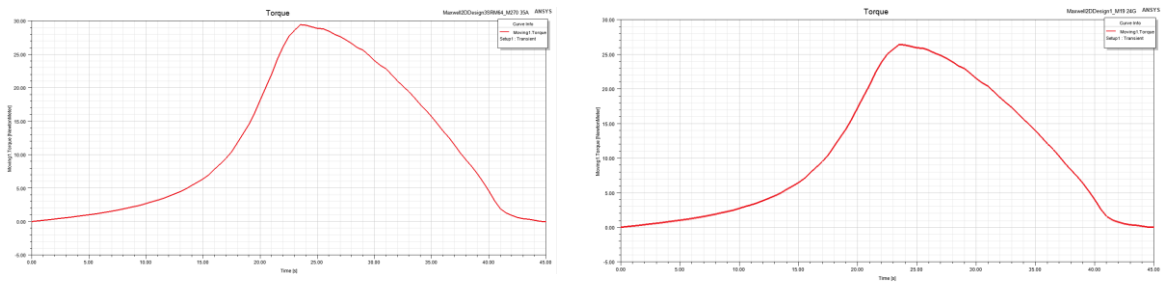


a) b)

Hình 5. Đặc tính B-H của vật liệu M270 35A (a) và M19-24G (b)

Mô phỏng động cơ từ trở SRM 6/4 với hai biến là a_s và a_r và với từng vật liệu M270_35A và M19_24G thu được kết quả như hình 6÷10.

Đặc tính mô men tĩnh và từ thông của động cơ SRM.

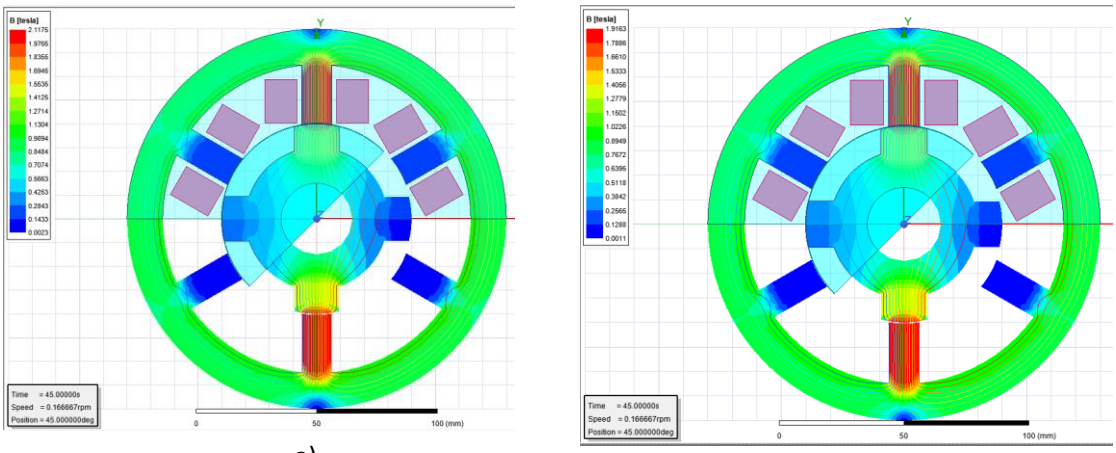


a) b)

Hình 6. Đặc tính mô men tĩnh động cơ SRM 6/4 với vật liệu M270 35A (a) và M19-24G (b)

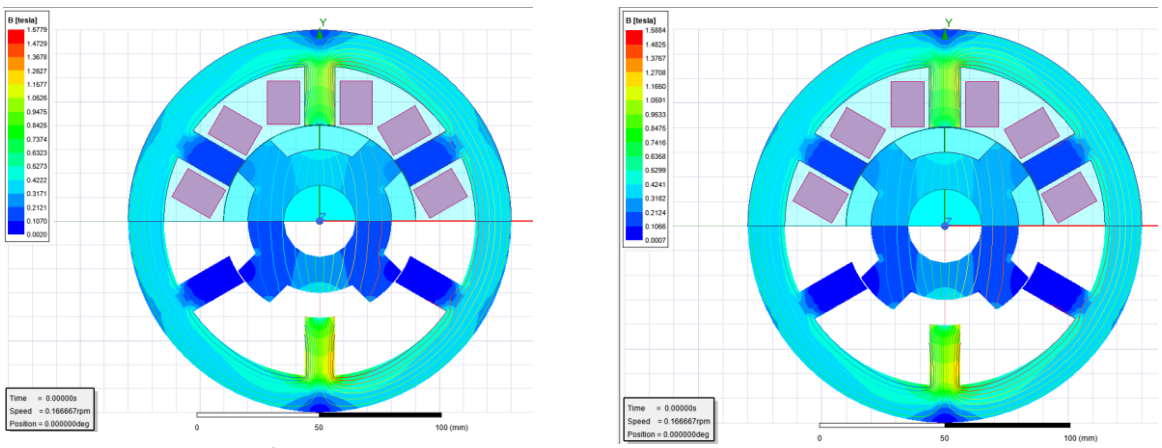
Kết quả hình 6 cho thấy khi sử dụng vật liệu M270_35A và M 19_24G thì hình dáng đặc tính mô men tĩnh của động cơ SRM không thay đổi, chỉ khác nhau về biên độ. Với vật liệu M270_35A thì đặc tính mô men tĩnh có biên độ 29.5Nm và với vật liệu M19_24G thì mô men tĩnh có biên độ là 26.5 Nm.

Từ thông và đường đi của từ thông tại vị trí đồng trục hoàn toàn và lệch trục hoàn toàn (hình 7,8);



a) b)

Hình 7. Từ thông của động cơ SRM 6/4 tại vị trí đồng trục hoàn toàn với vật liệu M270 35A (a) và M19-24G (b)

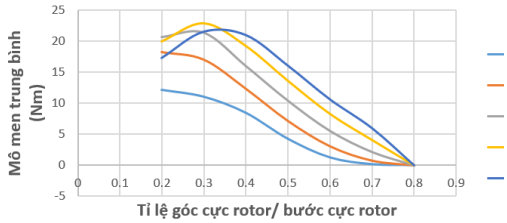


a) b)

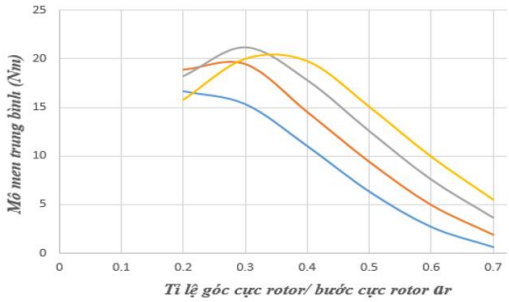
Hình 8. Từ thông của động cơ SRM 6/4 tại vị trí lệch trục hoàn toàn với vật liệu M270 35A (a) và M19-24G (b)

Do vật liệu M270-35A có mật độ từ cảm B cao hơn vật liệu M19_24G nên từ thông trong vật liệu M270-35A cao hơn. Tại vị trí đồng trục, với vật liệu M270-35A từ thông trên cực stator là 2.1T còn với vật liệu M19_24G thì có B =1.9T.

- Mô men trung bình theo góc cực stator và rotor.



Hình 9. Mô men trung bình theo sự thay đổi góc cực rotor và stator SRM6/4_M270 35A



Hình 10. Đồ thị mô men trung bình theo sự thay đổi góc cực rotor và stator SRM6/4_M19 24G

Kết quả hình 9, 10 cho thấy khi thay đổi vật liệu M27_35A và vật liệu M19_24G thì đồ thị mô men trung bình theo tỉ lệ góc cực rotor/ bước cực rotor ứng với các trường hợp cực stator khác nhau thì dạng đồ thị không thay đổi, chỉ thay đổi về biên độ. Vị trí các điểm cực trị cũng không thay đổi. Trong các trường hợp góc cực của stator khác nhau thì chỉ có trường hợp tỉ lệ góc cực stator/ bước cực stator a_s =0.5 thì giá trị cực đại của mô men trung bình là cao nhất : 22.90Nm với vật liệu M270_35A và 21.15Nm với vật liệu M19_24G. Với bất kỳ giá trị nào của góc cực stator thì các điểm cực đại của mô men trung bình nằm trong khoảng a_r =0.28÷ 0.36. Trường hợp a_s =0.5 thì mô men trung bình đạt giá trị cực đại tại a_r = 0.30.

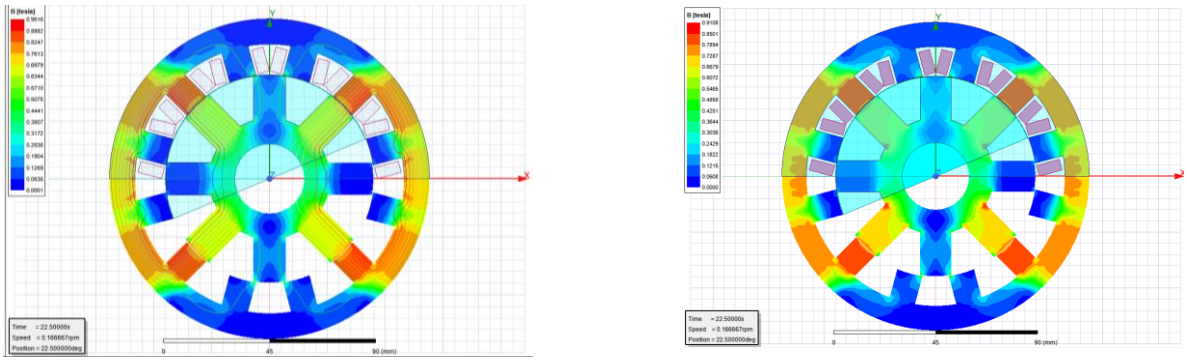
4.2. Xét với mô hình động cơ SRM 12/8

Chọn động cơ SRM 12/8 có kích thước cơ bản như trong bảng 3. Kết quả phân tích được thể hiện trên hình 10,11,12.

Bảng 3. Thông số kích thước cơ bản của động cơ SRM 12/8

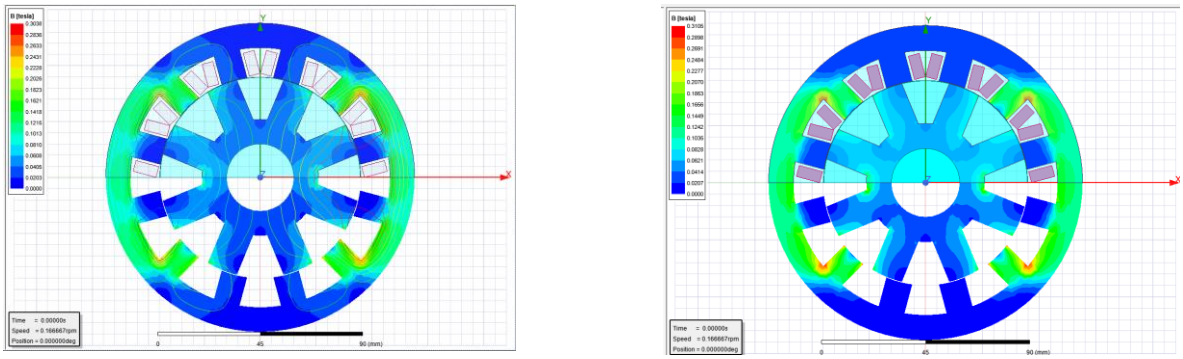
Thông số	Giá trị
Khe hở không khí	0.3mm
Đường kính ngoài stator	138mm
Đường kính ngoài rotor	89.4mm
Đường kính trục	30mm
Bề dầy gông rotor	11mm
Bề dầy gông từ stator	11mm
Chiều dài động cơ	84mm
Số vòng dây/ cực	11 vòng
Điện áp nguồn	250VDC
Công suất	1500W

Từ thông và đường đi của từ thông tại vị trí đồng trục hoàn toàn và lệch trục hoàn toàn.



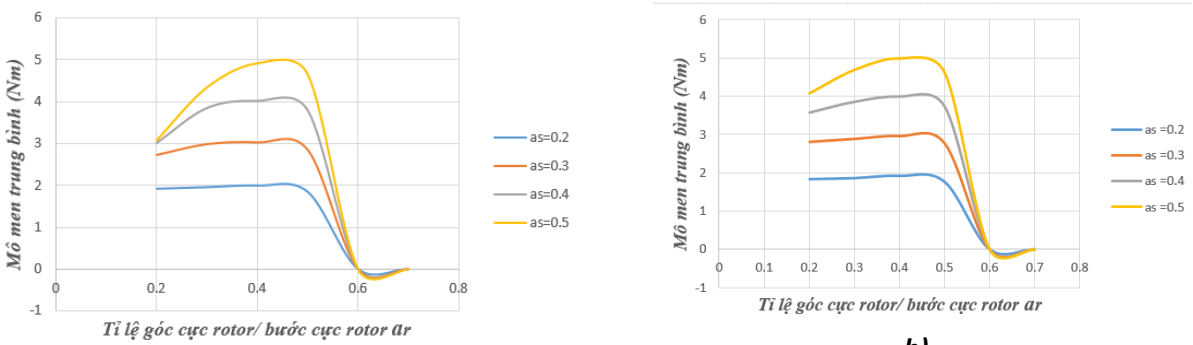
a) b)

Hình 11. Từ thông của động cơ SRM 12/8 tại vị trí đồng trục hoàn toàn với vật liệu M270 35A (a) và M19-24G (b)



a) b)

Hình 12. Từ thông của động cơ SRM 6/4 tại vị trí lệch trục hoàn toàn với vật liệu M270 35A (a) và M19-24G (b)



a) *b)*

Hình 13. Đồ thị mô men trung bình theo sự thay đổi góc cực rotor và stator SRM 12/8_M270 35A (a) và M19_24G (b)

Từ hình 13 ta thấy: mô men trung bình động cơ SRM 12/8 thay đổi một cách phu tuyến theo góc cực stator a_s và góc cực rotor a_r; mô men trung bình đạt giá trị cực đại ứng với giá trị $a_s = 0.5$ và $a_r = 0.4$. Với vật liệu M27_35A và vật liệu M19_24G thì hình dáng đồ thị mô men trung chỉ thay đổi về biên độ, sự tăng giảm mô men trung bình theo góc cực stator, rotor thay đổi không đáng kể. Vị trí các điểm cực trị cũng không thay đổi. Trong các trường hợp góc cực của stator khác nhau thì chỉ có trường hợp tỉ lệ góc cực stator/ bước cực stator a_s =0.5 thì giá trị cực đại của mô men trung bình là cao nhất : 5.0 Nm ứng với vật liệu M270_35A và bằng 4.9 Nm ứng với vật liệu M19_24G. Với vật liệu M270 35A và M19 24G thì mô men trung bình có giá trị cực đại khi góc cực rotor nằm trong khoảng $a_r = 0.4 \div 0.5$.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã phân tích ảnh hưởng của vật liệu và góc cực stator/ rotor đến mô men trung bình của động cơ từ trở SRM 6/4 và 12/8. Với vật liệu M270_35A hay M19_24G thì động cơ từ trở SRM 6/4 và 12/8 đều có hình dáng đặc tính mô men tĩnh, mô men trung bình không thay đổi. Sự thay đổi vật liệu chỉ làm thay đổi biên độ đặc tính mô men tĩnh và giá trị cực đại của mô men trung bình. Với động cơ SRM 6/4, thay đổi góc cực stator thì trong trường hợp tỉ lệ góc cực stator/ bước cực stator a_s =0.5 thì có giá trị mô men trung bình cao nhất. Ứng với trường hợp a_s =0.5, thay đổi góc cực rotor thì mô men trung bình đạt

cực đại tại điểm a_r =0.3. Với động cơ SRM 12/8 thì cũng giống với SRM 6/4, đường mô men trung bình khi thay đổi góc cực stator đạt giá trị cao nhất khi a_s =0.5 và ứng với trường hợp a_s =0.5, thay đổi góc cực rotor thì mô men trung bình đạt cực đại tại điểm a_r =0.4.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] R. Krishnan, *Switched reluctance motor drives: Modeling, simulation, analysis, design, and applications*. 2017.

[2] J. Han, B. Ge, K. Zhang, Y. Wang, and C. Wang, "Influence of control and structure parameters on the starting performance of a 12/8 pole switched reluctance motor," *Energies*, vol. 13, no. 14, 2020, doi: 10.3390/en13143744.

[3] G. K. Ptakh, D. A. Zvezdunov, and R. R. Mustafaev, "Selection of stator yoke height of traction switched reluctance motor," *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 - Proceedings*, pp. 0–3, 2016, doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911513.

[4] "choi2007- tối ưu dạng cực stator and rotor srm de giam tieng on.pdf." .

[5] W. A. Aljaism, "Switched reluctance motor: Design, simulation and control," *researchdirect.uws.edu.au/islandora/object/uws:3650/datastream/PDF/view*, pp. 1–193, 2007.

[6] R. T. Naayagi and V. Kamaraj, "Optimum Pole Arcs for Switched Reluctance Machine with Reduced Ripple," *2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems*, vol. 1, pp. 761–764, 2005, doi: 10.1109/PEDS.2005.1619787.

[7] N. K. Sheth and K. R. Rajagopal, "Optimum pole arcs for a switched reluctance motor for higher torque with reduced ripple," *Intermag 2003 - Program of the 2003 IEEE International Magnetics Conference*, no. January 2015, 2003, doi: 10.1109/INTMAG.2003.1230356.

[8] V. Rallabandi, J. Wu, P. Zhou, D. G. Dorrell, and D. M. Ionel, "Optimal Design of a Switched Reluctance Motor with Magnetically Disconnected Rotor Modules Using a Design of Experiments Differential Evolution FEA-Based Method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, no. 11, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/TMAG.2018.2850744.

Giới thiệu tác giả:

Tác giả Đinh Hải Lĩnh tốt nghiệp đại học và nhận bằng Thạc sĩ tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội ngành kỹ thuật điện vào các năm 2007 và 2010. Hiện nay tác giả đang là nghiên cứu sinh tại viện Điện – Đại học Bách Khoa Hà Nội và công tác tại Khoa Cơ điện & Công trình, Đại học Lâm Nghiệp.

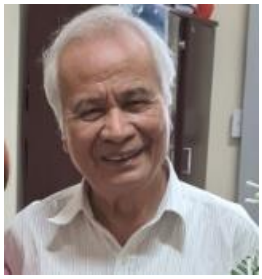
Lĩnh vực nghiên cứu: tính toán thiết kế động cơ điện, phân tích mô phỏng máy điện.

Tác giả Bùi Minh Định tốt nghiệp đại học và nhận bằng Thạc sĩ tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội ngành kỹ thuật điện vào các năm 2003 và 2009 tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, bằng Tiến sĩ chuyên ngành kĩ thuật điện 2014 tại Đức. Tác giả hiện là giảng viên Viện Điện- Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội.

Lĩnh vực nghiên cứu: thiết kế, tính toán, mô phỏng máy điện, giải pháp thiết kế tối ưu máy điện, công nghệ chế tạo máy điện; máy điện hiệu suất cao.

Tác giả Nguyễn Thế Công công tác tại trường Đại học Bách khoa Hà Nội. Ông nhận bằng Tiến sĩ Kỹ thuật điện năm 1994 tại Viện Bách khoa Grenoble, Pháp.

Lĩnh vực nghiên cứu: động cơ truyền động thẳng, nguồn đóng cắt, phong điện, năng lượng mặt trời



Tác giả Phạm Văn Bình là PGS. TS chuyên ngành Kỹ thuật điện, tại Viện Điện Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, ông nhận bằng TS chuyên ngành kỹ thuật điện tại Tiệp Khắc.

Lĩnh vực nghiên cứu: thiết kế chế tạo động cơ điện, máy biến áp.

Tác giả Nguyễn Thị Linh nhận bằng tốt nghiệp đại học chuyên ngành kỹ sư điện – Thiết bị điện, điện tử tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2007, bảo vệ luận án Thạc sĩ năm 2010 tại tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội. Tác giả hiện là giảng viên Khoa Kỹ thuật điện- Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: ứng dụng các giải pháp điều khiển hiện đại trong hệ thống điện.