

XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN VÀ MÔ PHỎNG ĐỘNG CƠ TỪ TRỞ CÓ KỂ ĐẾN ẢNH HƯỞNG CỦA HỖ CẢM

BUILDING MATHEMATICAL MODEL AND SIMULATION OF SWITCHED RELUCTANCE MOTOR CONCERNING MUTUAL INDUCTANCE EFFECTS

Đinh Hải Linh, Bùi Minh Định

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội; hailinh.vfu@gmail.com, dinh.buiminh@gmail.com

Tóm tắt - Động cơ từ trở là loại động cơ có đặc tính phi tuyến, momen phụ thuộc vào độ biến thiên điện cảm. Có nhiều nghiên cứu trước đây, khi xây dựng mô hình toán cho động cơ từ trở SRM thì thường bỏ qua ảnh hưởng hồ cảm giữa các pha dây quấn hoặc giả sử hồ cảm giữa các pha là như nhau. Tuy nhiên, thực tế hồ cảm giữa các pha dây quấn là khác nhau do mỗi pha dây quấn luôn được đóng cắt lần lượt. Hồ cảm giữa các pha có ảnh hưởng nhất định đến chất lượng momen của động cơ và gây khó khăn cho việc điều khiển động cơ. Bài báo tác giả xây dựng mô hình toán của động cơ SRM có xét đến tác động của hồ cảm trên các pha dây quấn. Kết quả mô phỏng thu được dựa trên phương pháp phân tích FEM và mô phỏng trên Matlab simulink. Kết quả sẽ phản ánh chính xác đặc tính dòng điện, từ thông và momen của động cơ SRM.

Từ khóa - Động cơ từ trở; hồ cảm; mô phỏng; FEM

Abstract - characteristics and electromagnetic torque that depends on various inductance. Many articles have investigated and simulated the mathematical modelling of SRM without mutual inductances between phases or consider the mutual inductance between phases is equal. However, the mutual inductance has strong influence on electromagnetic torque and its accurate control method. A new mathematical modelling of switched reluctance motor concerning mutual inductance effects is presented in this paper. The simulation results are shown by using MATLAB Simulink software and FEM. Those results will clearly show the phase current, flux linkage and torque waveform of SRM motor.

Key words - Switched reluctance motor (SRM); mutual inductance; simulation; FEM

1. Đặt vấn đề

Động cơ từ trở là loại động cơ có nhiều ưu điểm như kết cấu đơn giản, không sử dụng chổi than hay nam châm vĩnh cửu, có thể làm việc ở dải tốc độ cao, hiệu suất cao, không cần bảo trì, rất thích hợp dùng cho xe điện. Tuy nhiên, động cơ SRM có nhược điểm là momen đập mạch cao, độ rung ồn lớn, có tính chất phi tuyến. Để xác định phương pháp điều khiển tối thiểu hóa sự nhấp nhô momen và rung ồn cho động cơ thì cần xây dựng mô hình động cơ một cách chính xác.

Hiện nay, động cơ từ trở (SRM) là loại động cơ còn mới mẻ ở Việt Nam, có ít các công trình nghiên cứu về loại động cơ này. Các nghiên cứu chủ yếu là về các phương pháp điều khiển động cơ và xây dựng mô hình động cơ để điều khiển thường bỏ qua ảnh hưởng hồ cảm giữa các pha [1, 2, 3] hoặc giả thiết rằng hồ cảm giữa các pha là như nhau [4]. Do vậy, cần đưa ra mô hình chính xác của động cơ có kể đến hồ cảm giữa các pha, làm cơ sở cho các nghiên cứu thiết kế, chế tạo mạch điều khiển động cơ một cách phù hợp nhất.

Trong bài báo, tác giả đã xây dựng mô hình tính toán của động cơ có xét đến hồ cảm giữa các pha và sử dụng Matlab, phần mềm ansys Maxwell để phân tích các đặc tính làm việc của động cơ SRM.

2. Kết quả nghiên cứu và khảo sát

2.1. Thông số động cơ và xây dựng mô hình toán động cơ từ trở SRM

2.1.1. Thông số động cơ SRM

Động cơ SRM ba pha 6/4- 2,2kW được tính toán thiết kế sơ bộ theo [1]. Ta được các thông số của động cơ như trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số động cơ khảo sát

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Công suất	2.2	kW
Số cực stato/rotor	6/4	
Góc cực stato/rotor	30°/32°	-
Khe hở không khí	0,5	mm
Bán kính ngoài rotor	44,5	mm
Bán kính ngoài stator	97	mm
Bán kính trục	20,5	mm
Chiều cao cực stator	28	mm
Chiều cao cực rotor	9,3	mm
Bề dày gông stator	24	mm
Chiều dài lõi thép	180	mm
Số vòng dây trên một cực	80	vòng
Tốc độ	1500	Vòng/phút
Vật liệu	M600-A50	-
Điện áp	220	VDC

2.1.2. Xây dựng mô hình toán cho động cơ

a. Mô hình một pha động cơ

Phương trình cân bằng điện áp trên một pha dây quấn của động cơ SRM được biểu diễn như trong biểu thức (1) [1; 2]:

$$v = R_s i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (1)$$

Trong đó: v là điện áp trên một pha dây quấn;

i là dòng điện trên mỗi pha dây quấn;

R_s điện trở của một pha dây quấn;

λ là từ thông liên kết trên một pha dây quấn;

θ là vị trí góc rotor.

Từ thông liên kết trên mỗi pha dây quấn [1, 2]:

$$\lambda(\theta, i) = L(\theta, i) \cdot i \quad (2)$$

Viết được phương trình đầy đủ điện áp như sau:

$$\begin{aligned} v &= R_s i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \frac{di}{dt} + \frac{d\lambda(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \\ &= R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \end{aligned} \quad (3)$$

Biểu thức (3) cho thấy, điện áp trên mỗi pha của động cơ gồm 3 thành phần: sụt áp trên điện trở R_s , điện trên thành phần tự cảm của cuộn dây (biến thiên theo dòng điện và vị trí rotor), và giá trị sức phản điện động e của động cơ.

b. Mô hình ba pha động cơ

Từ phương trình điện áp trên một pha ta xây dựng được phương trình điện áp trên 3 pha dây như biểu thức (4):

$$\begin{aligned} u_a &= R_s i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \\ u_b &= R_s i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \\ u_c &= R_s i_c + \frac{d\lambda_c}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

Phương trình từ thông các pha dây quấn:

$$\begin{aligned} \lambda_a &= L_a(\theta, i_a) i_a + M_{ab}(\theta, i_b) i_b + M_{ac}(\theta, i_c) i_c \\ \lambda_b &= L_b(\theta, i_b) i_b + M_{ba}(\theta, i_a) i_a + M_{bc}(\theta, i_c) i_c \\ \lambda_c &= L_c(\theta, i_c) i_c + M_{cb}(\theta, i_b) i_b + M_{ca}(\theta, i_a) i_a \end{aligned} \quad (5)$$

Sự biến thiên từ thông trên các pha là:

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda_a}{dt} &= \frac{d(L_a(\theta, i_a) i_a + M_{ab}(\theta, i_b) i_b + M_{ac}(\theta, i_c) i_c)}{dt} \\ &= \frac{L_a(\theta, i_a) di_a}{dt} + \frac{M_{ab}(\theta, i_b) di_b}{dt} + \frac{M_{ac}(\theta, i_c) di_c}{dt} \\ &\quad + \frac{i_a dL_a(\theta, i_a)}{dt} + \frac{i_b dM_{ab}(\theta, i_b)}{dt} + \frac{i_c dM_{ac}(\theta, i_c)}{dt} \\ \frac{d\lambda_b}{dt} &= \frac{L_b(\theta, i_b) di_b}{dt} + \frac{M_{ba}(\theta, i_a) di_a}{dt} + \frac{M_{bc}(\theta, i_c) di_c}{dt} \\ &\quad + \frac{i_b dL_b(\theta, i_b)}{dt} + \frac{i_a dM_{ba}(\theta, i_a)}{dt} + \frac{i_c dM_{bc}(\theta, i_c)}{dt} \\ \frac{d\lambda_c}{dt} &= \frac{L_c(\theta, i_c) di_c}{dt} + \frac{M_{ca}(\theta, i_a) di_a}{dt} + \frac{M_{cb}(\theta, i_b) di_b}{dt} \\ &\quad + \frac{i_c dL_c(\theta, i_c)}{dt} + \frac{i_a dM_{ca}(\theta, i_a)}{dt} + \frac{i_b dM_{cb}(\theta, i_b)}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

Viết lại phương trình (4) dưới dạng ma trận và thay phương trình (5), (6) vào ta được kết quả như (7):

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$+ \omega \begin{bmatrix} \frac{dL_a}{d\theta} & \frac{dM_{ab}}{d\theta} & \frac{dM_{ac}}{d\theta} \\ \frac{dM_{ba}}{d\theta} & \frac{dL_b}{d\theta} & \frac{dM_{bc}}{d\theta} \\ \frac{dM_{ca}}{d\theta} & \frac{dM_{cb}}{d\theta} & \frac{dL_c}{d\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Trong đó:

u_a, u_b, u_c là điện áp đặt vào pha A, pha B, pha C.

$\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ là từ thông liên kết trên từng pha A, B, C.

R_s là điện trở dây quấn một pha của động cơ.

L_a, L_b, L_c là điện cảm của pha A, pha B, pha C.

M_{ab}, M_{ac} : là hồ cảm do cuộn dây pha B, pha C tác động lên cuộn dây pha A.

M_{ba}, M_{bc} là hồ cảm do cuộn dây pha A, pha C tác động lên cuộn dây pha B.

M_{ca}, M_{cb} là hồ cảm do cuộn dây pha A, pha B tác động lên cuộn dây pha C.

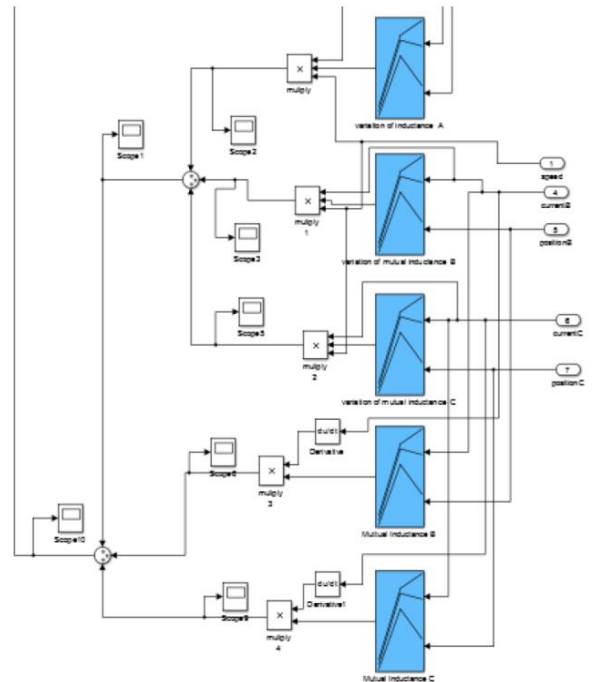
i_a, i_b, i_c là dòng điện chạy qua cuộn dây pha A, pha B, pha C.

2.2. Mô hình hóa và mô phỏng động cơ sử dụng Matlab/simulink

Từ phương trình (7), ta xây dựng được mô hình động cơ SRM trên Matlab/Simulink.

Mô hình động cơ gồm 5 đầu vào bao gồm: Vị trí rotor, tốc độ quay rotor, điện áp pha A, B, C; và 4 thành phần đầu ra là: Khối dịch vị trí các góc pha và 3 khối mô hình dòng từng pha động cơ.

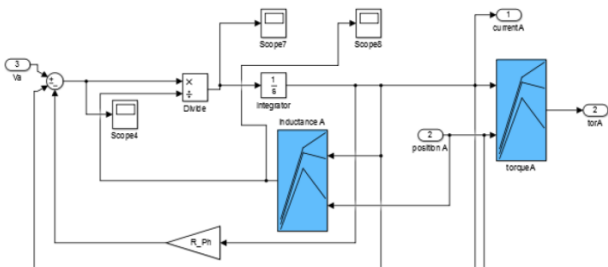
Để xét ảnh hưởng của hồ cảm giữa các pha dây quấn ta cần xây dựng mô hình hồ cảm trên từng pha của động cơ (Hình 1).



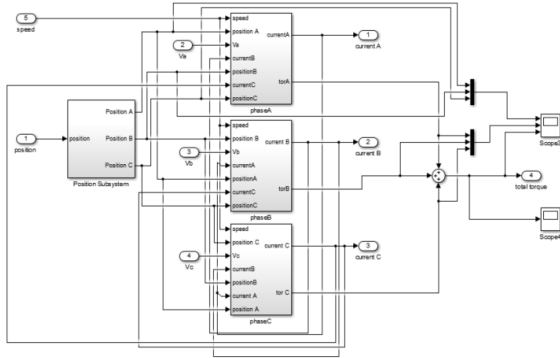
Hình 1. Mô hình động cơ có xét đến hồ cảm trên một pha của động cơ

Mô hình tính toán điện cảm và momen trên một pha của động cơ được xây dựng như Hình 2.

Tổng hợp mô hình của ba pha ta được mô hình 3 pha đầy đủ của động cơ như Hình 3.



Hình 2. Mô hình tính toán điện cảm và momen một pha của động cơ SRM

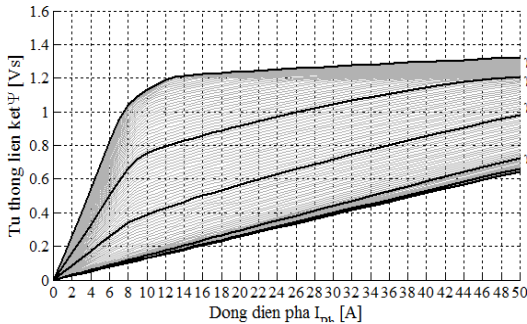


Hình 3. Mô hình 3 pha động cơ SRM

2.3. Kết quả phân tích mô phỏng trên Matlab/ simulink

Sau khi xây dựng mô hình động cơ trên Simulink, ta thực hiện lập trình trên m-file để thiết lập, tính toán nhằm khởi tạo các thông số cần thiết. Kết quả tính toán thu được như sau:

- Đồ thị quan hệ từ thông – dòng điện – vị trí góc quay. Các vị trí góc quay của rotor từ 0° , 5° , 10° , 20° , 30° , 45° cũng trùng với các góc 90° , 85° , 80° , 70° , 60° , 45° .

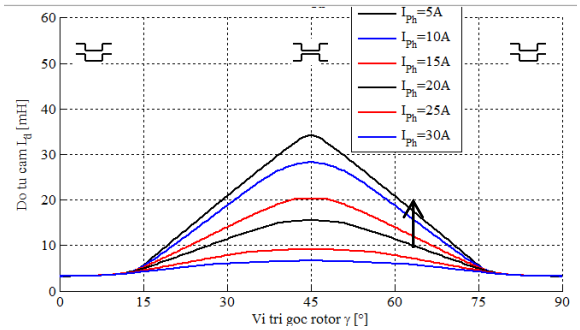


Hình 4. Đặc tính từ thông theo dòng điện và vị trí góc quay của rotor

- Đặc tính độ tự cảm theo vị trí góc quay rotor và dòng điện, ứng với các giá trị dòng điện từ 5A đến 30A (theo chiều mũi tên từ dưới lên), Hình 5.

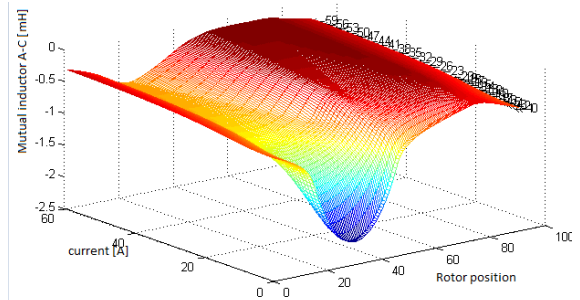
Kết quả Hình 5 cho thấy, giá trị của điện cảm tăng khi vị trí của rotor nằm trong vùng từ 0° đến 45° . Trong vùng này mômen của động cơ dương. Từ 45° đến 90° thì giá trị điện cảm giảm, trong vùng này mômen động cơ sinh ra âm. Do vậy, động cơ có bốn vùng làm việc tương ứng với từng chế độ hoạt động của động cơ, góc phần tư thứ 1,3 là chế độ động cơ và góc phần tư thứ 2,4 là chế độ máy phát.

Chạy mô hình động cơ trên simulink, để thấy rõ sự tương tác hồ cảm giữa các pha của động cơ ở nhiều giá trị dòng điện khác nhau, tác giả đặt các giá trị dòng điện lên đến 60A, lớn gấp hai lần so với dòng điện tính toán là 30A.



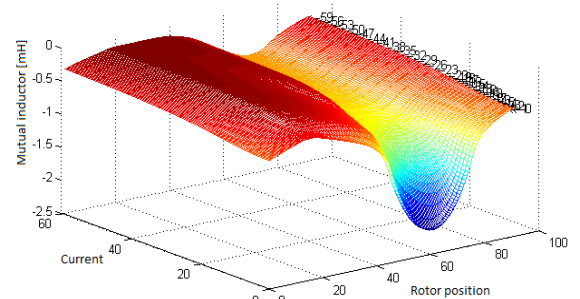
Hình 5. Đặc tính độ tự cảm theo vị trí góc quay rotor và dòng điện

- Hồ cảm của pha C tác động lên pha A (Hình 6).



Hình 6. Hồ cảm pha C tác động lên pha A

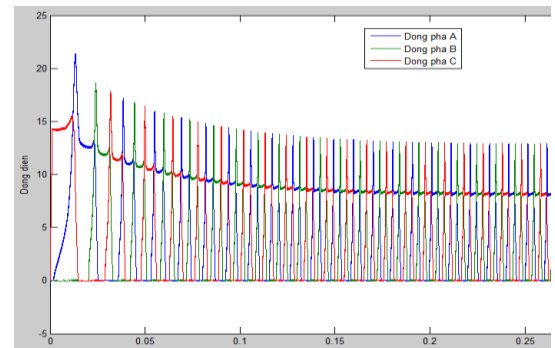
- Hồ cảm của pha B tác động lên pha A



Hình 7. Hồ cảm pha B tác động lên pha A

Kết quả biểu diễn trên Hình 6, 7 cho thấy, hồ cảm giữa các pha của động cơ là quan hệ phi tuyến theo vị trí của rotor và dòng điện. Giá trị hồ cảm này khá nhỏ nhưng vẫn có tác động đáng kể tới từ thông sinh ra ở các pha.

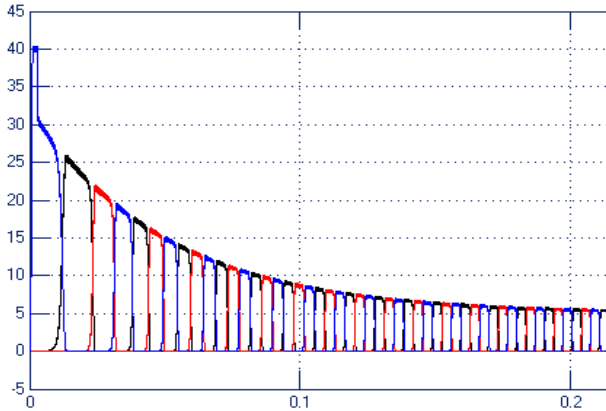
- Dòng điện trên các pha của động cơ



Hình 8. Dòng điện ba pha động cơ

Kết quả Hình 8 cho thấy, dòng điện khi động cơ đạt tốc độ ổn định là khoảng 12A. Và mỗi pha có dòng điện đỉnh không lớn, khoảng 20A nên luôn đảm bảo được sự làm việc của các van bán dẫn.

- Đặc tính momen theo thời gian trên từng pha của động cơ.

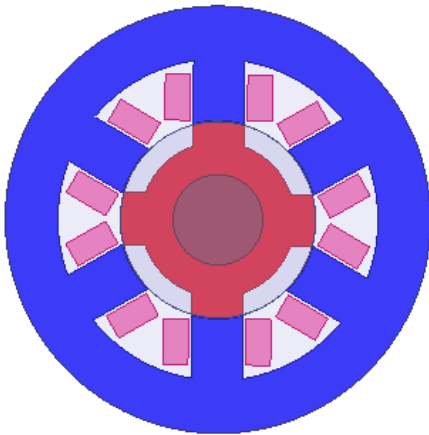


Hình 9. Đặc tính momen các pha theo thời gian

Kết quả Hình 9 cho thấy, mô men một pha trung bình của động cơ đạt khoảng 14Nm và dạng sóng mô men có độ nhấp nhô mô men lớn. Do vậy, bộ điều khiển động cơ cần có phương pháp điều chỉnh để giảm sự nhấp nhô mô men.

2.4. Phân tích và mô phỏng động cơ sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn FEM

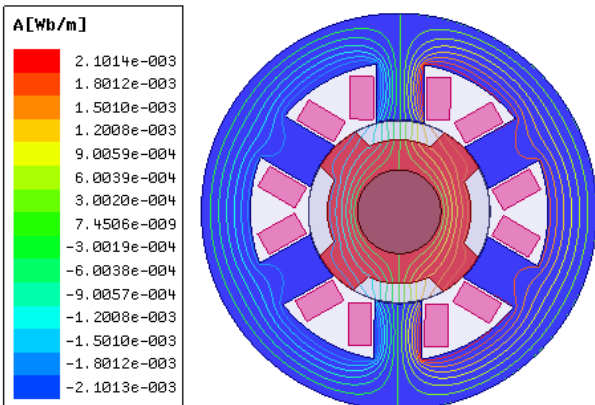
Mô Hình 2D của động cơ được xây dựng như Hình 10.



Hình 10. Mô hình 2D của động cơ SRM

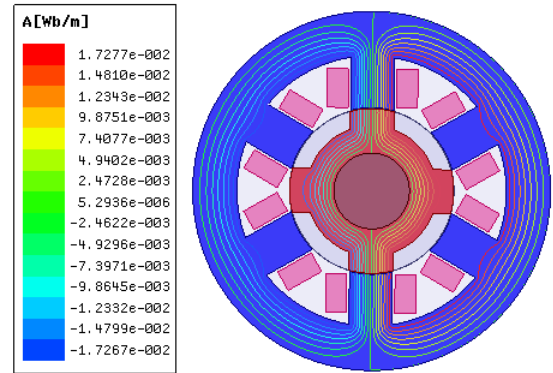
Kết quả phân tích mô Hình 2D sử dụng FEM như sau:

- Đường đi của từ thông liên kết một pha ở vị trí lệch trục hoàn toàn



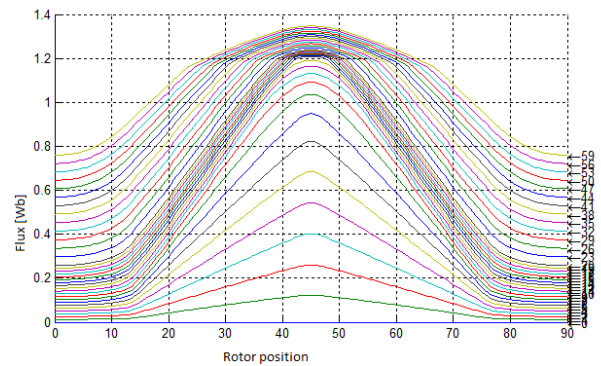
Hình 11. Đường đi của từ thông ở vị trí lệch trục hoàn toàn

- Đường đi của từ thông liên kết một pha ở vị trí đồng trục hoàn toàn, Hình 12.



Hình 12. Đường đi của từ thông ở vị trí đồng trục hoàn toàn

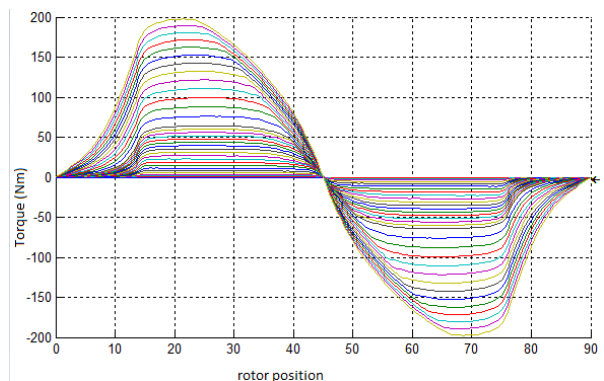
- Từ thông liên kết theo vị trí góc rotor và dòng điện



Hình 13. Đặc tính từ thông liên kết theo vị trí góc rotor và dòng điện

Kết quả Hình 13 cho thấy, tại vị trí 0° so với vị trí lệch trục hoàn toàn thì từ thông là nhỏ nhất. Từ thông tăng dần khi vị trí rotor càng gần vị trí đồng trục. Dòng điện tăng thì từ thông tăng tại bất kỳ vị trí nào của rotor. Tại vị trí đồng trục, khoảng cách từ thông thu hẹp khi dòng điện tăng do hiện tượng phi tuyến của đường cong B-H. Khi từ thông đạt đến trạng thái bão hòa thì dòng điện tăng nhưng từ thông thì không đổi.

Kết quả Hình 14 thể hiện, momen của động cơ SRM phụ thuộc vào vị trí rotor và dòng điện. Momen dương sinh ra khi rotor nằm trong góc từ 0° đến 45° so với vị trí lệch trục hoàn toàn. Mômen âm sinh ra khi rotor nằm trong góc từ 45° đến 90° so với vị trí lệch trục hoàn toàn.



Hình 14. Đặc tính momen theo vị trí góc quay của rotor và dòng điện

3. Kết luận

Mô hình toán đầy đủ có xét đến hồ cảm trên từng pha của động cơ từ trở SRM đã được xây dựng và mô phỏng. Kết quả phân tích thể hiện, ảnh hưởng hồ cảm giữa các pha của động cơ là phi tuyến theo vị trí của rotor và dòng điện. Mặc dù so với điện cảm các pha của động cơ SRM thì giá trị hồ cảm này là nhỏ nhưng thành phần hồ cảm này vẫn có tác động đáng kể tới từ thông sinh ra ở các pha, qua đó tác động đến dòng điện và gây khó khăn trong việc điều khiển dòng. Kết quả mô hình toán và mô phỏng từ bài báo, giúp ích cho các nhà thiết kế đánh giá được đặc tính làm việc của SRM và đưa ra các phương pháp điều khiển phù hợp để đạt được đặc tính tốt nhất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R. Krishnan, *Switched Reluctance Motor Drives*, CRC Press LLC, 2001.
- [2] T.J.E. Miller, *Switched Reluctance Motors and Their Control*, Magna Physics, Oxford, 1992.
- [3] Ta Cao Minh, *Real-Time Simulation and Control of Reluctance Motor Drives for High Speed Operation with Reduced Torque Ripple*, Australia Conference, 2011.
- [4] V. L. Do, Minh Cao Ta, "Modeling, Simulation and Control of Reluctance Motor Drives for High Speed Operation", *2009 IEEE Conversion Congress Exposition – ECCE 2009*, San Jose, California, USA, Sept. 2009.
- [5] Nguyễn Phùng Quang, *MATLAB & Simulink dành cho kỹ sư điều khiển tự động*, NXB Khoa học và kỹ thuật, 2006.

(BBT nhận bài: 22/02/2019, hoàn tất thủ tục phản biện xong: 23/7/2019)