

PHÂN TÍCH ĐIỆN CẢM VÀ SÓNG HÀI ĐIỆN CẢM CỦA ĐỘNG CƠ TỪ TRỞ

ANALYSIS THE INDUCTANCE AND HARMONIC INDUCTANCE OF SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Đinh Hải Lĩnh¹, Bùi Minh Định², Nguyễn Đức Bắc³, Nguyễn Thị Linh⁴

¹Trường Đại học Lâm nghiệp, ²Đại học Bách khoa Hà Nội, ³Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
⁴Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 07/4/2023 Ngày chấp nhận đăng: 30/5/2023, Phản biện: PGS.TS Lê Văn Doanh

Tóm tắt:

Động cơ từ trở (SRM) là loại động cơ điều chỉnh tốc độ được phát triển trong những năm gần đây. Nó có kết cấu đơn giản, rotor không có dây quấn hay nam châm vĩnh cửu, dễ làm mát, khả năng gia tốc lớn, hiệu suất cao; được ứng dụng nhiều trong thiết bị đo đạc, xe điện, thiết bị gia dụng... Sự biến thiên của điện cảm là nguyên tắc chính sinh ra mômen của động cơ SRM. Nghiên cứu này tập trung phân tích, tính toán điện cảm và phân tích các bậc sóng hài điện cảm khi góc cực rotor thay đổi để từ đó có thể đánh giá sơ bộ các bậc sóng hài của mômen. Mô hình toán của SRM được xây dựng trên Matlab/Simulink. Việc tính toán giải tích, phân tích điện cảm, sóng hài điện cảm thực trên Matlab kết hợp cùng với phân tích FEM trên phần mềm Motor Cad. Kết quả nghiên cứu là cơ sở giúp ích cho nhà thiết kế điện từ SRM có những điều chỉnh, lựa chọn góc cực rotor phù hợp với từng kết cấu SRM nhằm tối thiểu hóa độ nhấp nhô mômen.

Từ khóa:

Điện cảm, động cơ từ trở, độ nhấp nhô mômen, góc cực rotor, mômen, sóng hài điện cảm, sóng hài mômen.

Abstract:

Switched reluctance motor (SRM) is speed regulation motor developed in recent years. It has simple structure, not windings or permanent magnets in the rotor; easy to cool, large acceleration capacity, high efficiency; widely applied in instrumentation, electric vehicles, home appliances,.... Variation of inductance is the main principle of generation torque of SRM. This paper focuses on analyzing, calculating inductance and harmonic inductance orders of inductance of SRM with changing pole arc rotor and it is possible to preliminary evaluate the harmonics torque. The developed mathematical model is implemented in Matlab/Simulink environment. The analytical calculation, inductance analysis, harmonics inductance by Matlab, then FEM analysis by Motor Cad software. The result is the basis for the designer to has some adjustments and reasonable choices for the pole arc rotor of SRM structure to minimum the torque ripple.

Keywords:

Inductance, Switched reluctance motor, torque ripple, pole arc rotor, Torque, Harmonics inductance, Harmonics torque.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Cùng với sự phát triển mạnh mẽ về điện tử công suất, ngày nay động cơ từ trở (SRM) là một trong những động cơ đang được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực công nghiệp và sinh hoạt bởi nhiều ưu điểm như làm việc ở dải tốc độ cao, hiệu suất cao, không cần bảo trì, chi phí chế tạo thấp. Tuy nhiên động cơ SRM có nhược điểm là độ nhấp nhô mômen cao, độ rung ồn lớn. Do vậy khi tính toán thiết kế điện tử cho SRM cần phải có các giải pháp để tối thiểu hóa độ nhấp nhô mômen và tiếng ồn cho động cơ. Mômen của động cơ SRM được sinh ra dựa trên sự biến thiên của điện cảm theo dòng điện và vị trí góc quay rotor. Độ lớn của điện cảm quyết định rất lớn đến mômen của SRM. Việc tính toán, phân tích điện cảm là bước quan trọng trong tính toán thiết kế tối ưu để giảm độ nhấp nhô mômen cho SRM [1], [2]. Có các nghiên cứu nghiên cứu đáng chú ý như: Tính toán điện cảm cho động cơ SRM kết cấu 8/6 [3], SRM 4/2 [4]. Giá trị điện cảm tại mọi vị trí góc quay của rotor cũng phụ thuộc vào độ lớn của góc cực stator, góc cực rotor [5], [6], [7], [8], [9], [10]. Trong nghiên cứu này, tác giả đề xuất phương pháp phân tích, tính điện cảm theo vị trí góc quay của rotor; các sóng hài điện cảm khi góc cực rotor thay đổi.

2. MÔ HÌNH TOÁN CỦA ĐỘNG CƠ SRM TRÊN MATLAB/SIMULINK

Động cơ SRM có nhiều loại cấu trúc khác nhau về số cực stator, số cực rotor. SRM được xét đến trong nghiên cứu này là

SRM 6/4. Động cơ từ trở SRM ba pha 6/4 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 SRM

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Số cực stator/rotor	12/8	
Góc cực stator	15°	
Góc cực rotor	18°	
Khe hở không khí	0,3	mm
Đường kính ngoài stator	138	mm
Đường kính trong stator	90	mm
Đường kính ngoài rotor	89,4	mm
Đường kính trục	25	mm
Bề dày gông stator	12	mm
Bề dày gông rotor	12	mm
Chiều dài động cơ	84	mm
Số vòng dây/1 cực	12	mm
Điện áp nguồn	64	VDC
Bước cực stator	30°	
Bước cực rotor	45°	
Vật liệu	M19 24G	
Công suất	1,5	kW
Tốc độ	1500	Vòng/phút

Mô hình toán học của động cơ được xây dựng là các phương trình điện áp, từ thông và mômen trên các pha dây quấn của động cơ. Với kết cấu 12 cực stator, 8 cực rotor nên được chia làm ba pha dây quấn, mỗi pha có 4 cực stator.

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 một pha dây quấn;

R_s điện trở của một pha dây quấn; λ là từ thông trên một pha dây quấn; θ là vị trí góc rotor.

Từ thông trên mỗi pha dây quấn là [1]:

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

Phương trình điện áp được viết lại là:

$$v = R_s i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{di} \frac{di}{dt} + \frac{d\lambda(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

$$= R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta}$$

Mô hình ba pha của động cơ là 3 phương trình điện một pha ghép lại:

$$\begin{cases} V_a = R_s i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \\ V_b = R_s i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \\ V_c = R_s i_c + \frac{d\lambda_c}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó từ thông trên mỗi pha dây quấn có tính đến hồ cảm là:

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

Trong đó:

V_a, V_b, V_c là điện áp đặt vào pha A, pha B, pha C.

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

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

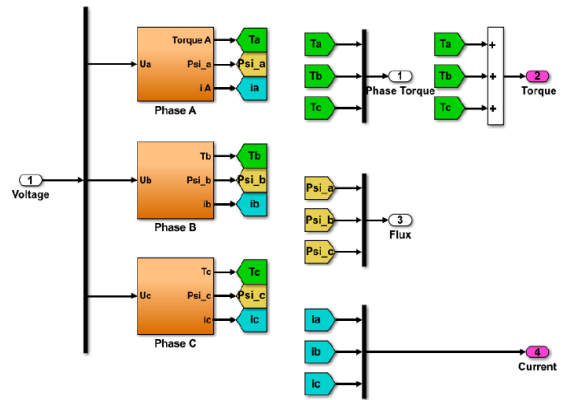
M_{ab}, M_{ac} là hồ cảm do cuộn dây pha B, pha C tác động lên cuộn dây pha A.

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

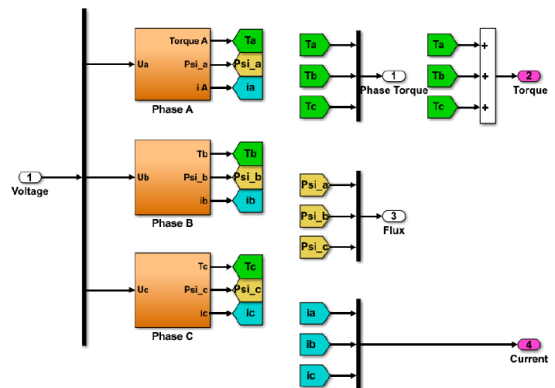
M_{ca}, M_{cb} là hồ cảm do cuộn dây pha A, pha B tác động lên cuộn dây pha C.

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

Từ mô hình toán ở trên, ta xây dựng mô hình một pha (Hình 1) của SRM trước sau đó kết hợp ba mô hình một pha để tạo thành mô hình ba pha cho động cơ (Hình 2).



Hình 1. Mô hình ba pha của SRM



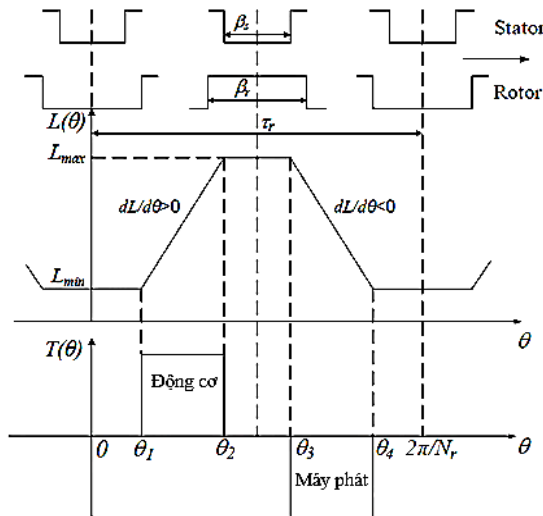
Hình 2. Mô hình ba pha của SRM

3. PHÂN TÍCH ĐIỆN CẢM KHI GÓC CỰC ROTOR THAY ĐỔI

Mômen của động cơ SRM được tạo ra trên nguyên tắc từ trở tối thiểu. Sự biến thiên của điện cảm theo vị trí góc quay rotor sẽ sinh ra mômen [1]:

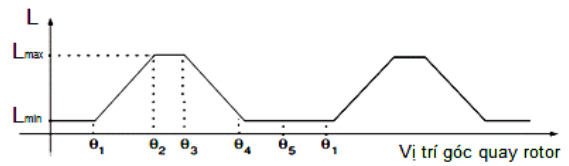
$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (6)$$

Khi điện cảm L biến thiên theo chiều dương ($dL/d\theta > 0$) thì phát sinh mômen dương (chế độ động cơ). Khi điện cảm biến thiên theo chiều âm ($dL/d\theta < 0$) thì phát sinh mômen âm (chế độ máy phát) như Hình 3.



Hình 3. Biểu diễn điện cảm theo vị trí góc rotor và nguyên lý phát sinh mômen [1]

Xét sự tuyến tính của điện cảm thì đặc tính của điện cảm L theo sự thay đổi vị trí góc quay rotor θ như Hình 3. Điện cảm được chia thành 4 vùng: vùng 1 là từ vị trí góc θ_1 đến θ_2 , vùng 2 là $\theta_2 \div \theta_3$, vùng 3: $\theta_3 \div \theta_4$, vùng 4: $\theta_4 \div \theta_5$; và sau đó điện cảm L lặp lại chu kỳ với chu kỳ $\frac{2\pi}{N_r}$. [1, 2, 5].



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

Điện cảm cực đại L_{max} là giá trị điện cảm tại vị trí đồng trục hoàn toàn và điện cảm cực tiểu L_{min} là giá trị điện cảm tại vị trí lệch trục hoàn toàn.

Các vị trí góc quay θ của rotor được tính như sau [1]:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{\pi}{N_r} - \frac{\beta_s + \beta_r}{2}; \\ \theta_2 &= \theta_1 + \beta_s = \frac{\pi}{N_r} - \frac{\beta_r - \beta_s}{2} \\ \theta_3 &= \theta_2 + (\beta_r - \beta_s) = \frac{\pi}{N_r} + \frac{\beta_r - \beta_s}{2}; \\ \theta_4 &= \theta_3 + \beta_s = \frac{\pi}{N_r} + \frac{\beta_r + \beta_s}{2}; \\ \theta_5 &= \theta_4 + \theta_1 = \frac{2\pi}{N_r} \end{aligned} \quad (7)$$

Trong đó: N_r là số cực rotor; β_r là góc cực rotor; β_s là góc cực stator.

Từ đặc tính điện cảm có thể viết biểu thức tính điện cảm $L(\theta)$ như biểu thức 8:

$$L(\theta) = \begin{cases} L_{min} & 0 < \theta \leq \theta_1 \\ \frac{L_{max} - L_{min}}{\beta_s} \cdot \left(\theta - \left[\frac{\pi}{N_r} - \frac{\beta_r + \beta_s}{2} \right] \right) + L_a & \theta_1 < \theta \leq \theta_2 \\ L_{max} & \theta_2 < \theta \leq \theta_3 \\ -\frac{L_{max} - L_{min}}{\beta_s} \cdot \left(\theta - \left[\frac{\pi}{N_r} + \frac{\beta_r - \beta_s}{2} \right] \right) + L_a & \theta_3 < \theta \leq \theta_4 \\ L_{min} & \theta_4 < \theta \leq \frac{2\pi}{N_r} \end{cases} \quad (8)$$

Các giá trị L_{max} ; L_{min} được tính toán từ mô hình toán trên Matlab. Các giá trị L_{max} , L_{min} được tính ứng với các góc cực rotor từ 16° đến 21° như trong Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả tính toán L_{\max} L_{\min} khi góc cực rotor thay đổi

β_r	16°	17°	18°	19°	20°	21°
L_{\max} (mH)	1,434	1,480	1,504	1,545	1,570	1,584
L_{\min} (mH)	0,215	0,218	0,229	0,238	0,246	0,254

Khi xét sự phi tuyến của điện cảm là xét đến các sóng hài điện cảm. Sự hình thành các sóng điện cảm này là yếu tố tạo nên các sóng hài mômen.

Để có thể xem xét được biên độ các sóng hài điện cảm cần phân tích biểu thức điện cảm L dưới dạng chuỗi Fourier như biểu thức 8:

$$L(\theta) = \frac{L_0}{2} + \sum_{n=1}^N [L_n \cdot \cos(nN_r \theta + \frac{n.2\pi}{3})] \quad (9)$$

Trong đó: L_0 là điện cảm bậc nhất, là thành phần cơ bản tạo nên giá trị điện cảm sinh ra mômen cho động cơ; L_n là các thành phần điện cảm bậc cao, là thành phần tạo nên các sóng hài của của mômen. Các giá trị L_0 và L_n được tính như sau:

$$\begin{aligned} L_0 &= \frac{N_r}{\pi} \int_0^{2\pi/N_r} L(\theta) d\theta \\ &= \frac{N_r}{\pi} \left[\int_0^{\theta_1} L(\theta) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} L(\theta) d\theta + \int_{\theta_2}^{\theta_3} L(\theta) d\theta + \int_{\theta_3}^{\theta_4} L(\theta) d\theta + \int_{\theta_4}^{2\pi/N_r} L(\theta) d\theta \right] \\ &= \frac{L_{\max} \cdot N_r \cdot \beta_r}{\pi} + \frac{L_{\min} (2\pi - N_r \beta_r)}{\pi} \end{aligned} \quad (10)$$

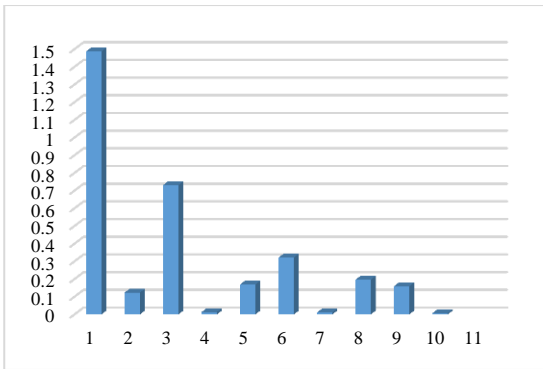
$$\begin{aligned} L_n &= \frac{N_r}{\pi} \int_0^{2\pi/N_r} L(\theta) \cos(nN_r \theta + \frac{n.2\pi}{3}) d\theta \quad (11) \\ &= \frac{N_r}{\pi} \int_0^{\theta_1} L(\theta) \cos(nN_r \theta + \frac{n.2\pi}{3}) d\theta + \\ &+ \frac{N_r}{\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} L(\theta) \cos(nN_r \theta + \frac{n.2\pi}{3}) d\theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \frac{N_r}{\pi} \int_{\theta_2}^{\theta_3} L(\theta) \cos(nN_r \theta + \frac{n.2\pi}{3}) d\theta \\ &+ \frac{N_r}{\pi} \int_{\theta_3}^{\theta_4} L(\theta) \cos(nN_r \theta + \frac{n.2\pi}{3}) d\theta \\ &+ \frac{N_r}{\pi} \int_{\theta_4}^{2\pi/N_r} L(\theta) \cos(nN_r \theta + \frac{n.2\pi}{3}) d\theta \\ &= (-1)^n \frac{4(L_{\max} - L_{\min})}{n^2 \cdot \pi N_r \cdot \beta_s} \sin\left(\frac{1}{2} n N_r \beta_r + \frac{n.2\pi}{3}\right) \\ &\times \sin\left(\frac{1}{2} n N_r \beta_s + \frac{n.2\pi}{3}\right) \\ &= (-1)^n \frac{4(L_{\max} - L_{\min})}{n^2 \cdot \pi N_r \cdot \beta_s} \\ &\times \left[\cos\left(n N_r \frac{\beta_r - \beta_s}{2}\right) - \cos\left(n N_r \frac{\beta_r + \beta_s}{2}\right) \right] \end{aligned}$$

Từ sự phân tích điện cảm ở trên cho thấy thông số góc cực stator β_s và rotor β_r là những thông số quyết định chính đến biên độ các sóng hài của điện cảm. Mặt khác mômen sinh ra trên cơ sở biến thiên của điện cảm theo vị trí góc quay của rotor. Do vậy có thể đánh giá sự thay đổi của mômen khi thay đổi góc cực stator, rotor trên cơ sở sự thay đổi của điện cảm theo góc cực stator, rotor. Với động cơ SRM 12/8, dòng điện $I = 20$ A ta tính toán được giá trị các thành phần sóng hài điện cảm như Hình 6.

Kết quả Hình 6 cho thấy điện cảm bậc một lớn nhất, là thành phần chính tạo nên mômen chính cho động cơ. Các thành phần bậc hai (L_2), bậc ba (L_3), bậc 4 (L_4)... là thành phần các sóng hài bậc cao gây nên sóng hài bậc cao cho mômen. Trong các thành phần sóng hài điện cảm

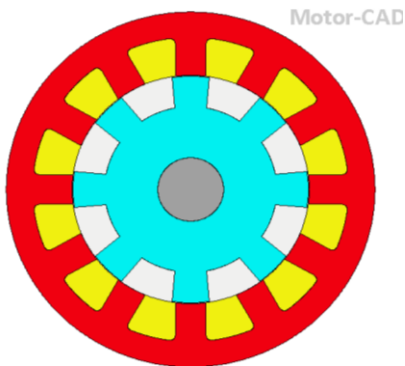
thì ta thấy sóng hài bậc 3 và bậc 6 là các sóng hài có biên độ lớn hơn cả. Do vậy cần tính toán lựa chọn góc cực rotor để triệt tiêu được các sóng hài bậc 3, bậc 6 này là chủ yếu. Theo kết quả phân tích Fourier, thông số góc cực stator và rotor ảnh hưởng lớn tới sóng hài điện cảm của SRM. Do vậy có thể đưa ra định hướng lựa chọn góc cực stator và rotor để hạn chế sóng hài bậc cao của mômen.



Hình 6. Kết quả tính toán các giá trị Ln

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

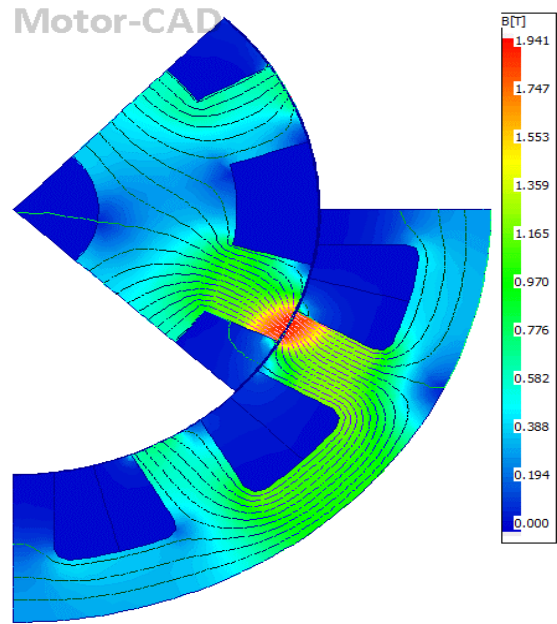
Mô hình 2D của SRM được xây dựng trên Motor Cad như Hình 7. Và kết quả phân tích FEM có từ thông như Hình 8.



Hình 7. Mô hình 2D SRM 12/8

Mật độ từ thông tại khe hở không khí lớn nhất khi cực rotor hoàn toàn trùng khớp với cực stator. Trên Hình 8, mật độ từ

thông tại khe hở không khí lớn nhất là 1,94T.

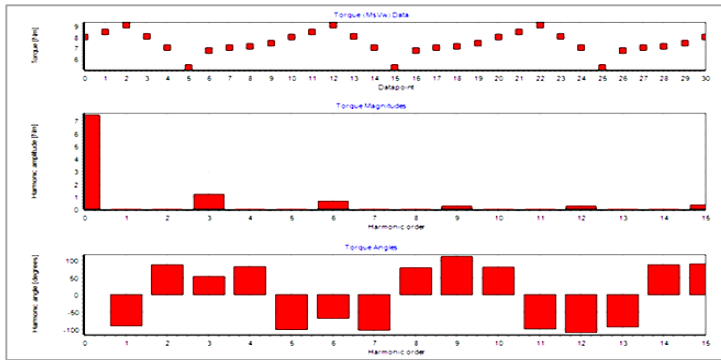


Hình 8. Mật độ từ thông SRM 12/8 với $\beta_S=15^\circ$, $\beta_R=18^\circ$

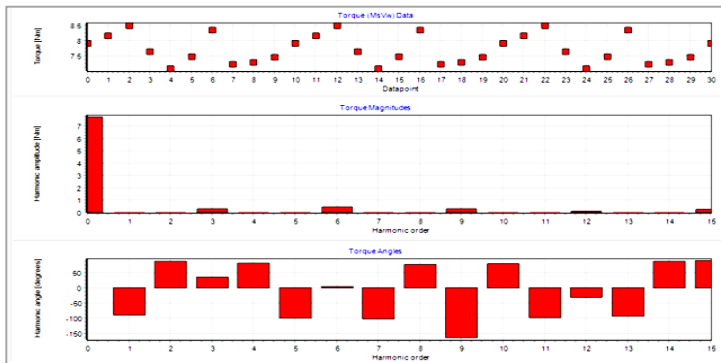
Khi mật độ từ thông tại khe hở không khí lớn nhất thì điện cảm sẽ đạt cực đại L_{max} . Mật độ từ thông tại khe hở không khí nhỏ nhất khi cực rotor và cực stator lệch trục hoàn toàn, khi đó điện cảm sẽ có giá trị nhỏ nhất L_{min} .

Kết quả phân tích các sóng hài của mômen khi thay đổi góc cực rotor như Hình 9, 10, 11.

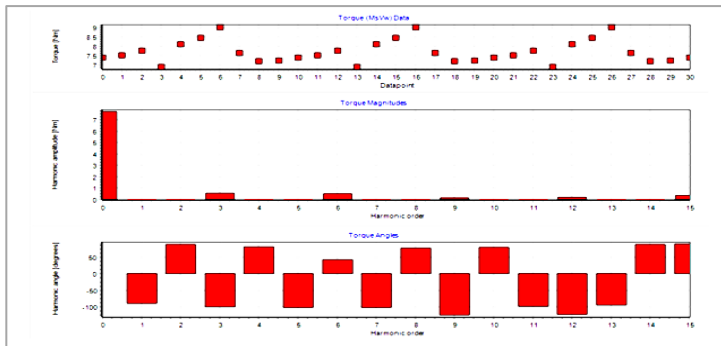
Kết quả Hình 9, 10, 11 cho thấy các sóng hài của SRM 12/8 chủ yếu là các sóng hài bậc 3, 6, 9. Kết quả này tương đồng với kết quả phân tích điện cảm ở trên. Và biên độ các sóng hài này cũng có sự biến đổi lớn khi thay đổi góc cực rotor. Khi góc cực rotor tăng dần đến khi lớn hơn góc cực stator thì biên độ các sóng hài giảm một cách phi tuyến. Kết quả ứng với góc cực stator $\beta_S=15^\circ$ và góc cực rotor $\beta_R=18^\circ$ thì biên độ sóng hài bậc 3, 6 là nhỏ nhất.



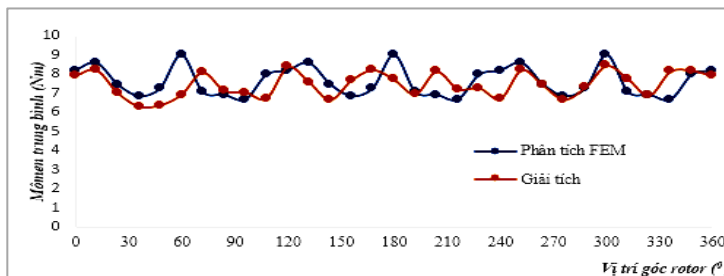
Hình 9. Biên độ và góc pha các sóng hài mômen với $\beta_s=15^\circ$, $\beta_R=16^\circ$



Hình 10. Biên độ và góc pha các sóng hài mômen với $\beta_s = 15^\circ$, $\beta_R = 18^\circ$



Hình 11. Biên độ và góc pha các sóng hài mômen với $\beta_s = 15^\circ$, $\beta_R = 20^\circ$



Hình 12. Mômen theo vị trí góc cực rotor với $\beta_s=15^\circ$, $\beta_R=18^\circ$

Kết quả đặc tính của mômen trung bình theo vị trí góc cực rotor như Hình 12.

Như vậy đặc tính mômen trung bình theo vị trí góc rotor khi tính toán giải tích đồng dạng với đặc tính mômen trung bình khi phân tích FEM.

5. KẾT LUẬN

Tính toán phân tích điện cảm, các sóng hài điện cảm theo sự thay đổi góc cực rotor đã được tính toán và phân tích mômen trên cơ sở tính toán các giá trị điện cảm khi thay đổi góc cực rotor. Góc cực rotor là thông số chính quyết định số

bậc sóng hài của điện cảm và mômen. Thay đổi độ lớn góc cực của rotor thì điện cảm thay đổi và biên độ các bậc sóng hài điện cảm cũng thay đổi theo dẫn đến hình thành các bậc sóng hài của mômen và thay đổi biên độ của sóng hài mômen theo góc cực rotor. Các bậc sóng hài chủ yếu là bội của 3: bậc 3, 6, 9. Với góc cực rotor thay đổi từ 15° đến 21° thì chỉ có trường hợp góc cực rotor 18° thì có biên độ sóng hài bậc 3, 6 của mômen là nhỏ nhất. Do vậy việc phân tích điện cảm trong quá trình tính toán thiết kế SRM là yếu tố chính để có được các thông số thiết kế tối ưu.

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] P. Naresh Kumar, and T. B. Isha, "Inductance Calculation of 8/6 Switched Reluctance Motor", 978-1-4244-1762-9/08/\$25.00 C2008 IEEE, 2008.
- [4] Sufei Li, Shen Zhang, Jie Dang, Thomas G. Habetler, Ronald G. Harley, "Calculating the Unsaturated Inductance of 4/2 Switched Reluctance Motors at Arbitrary Rotor Positions Based on Partial Differential Equations of Magnetic Potentials", IEEE, 10.1109/NAPS.2015.7335234, North American Power Symposium (NAPS) Conference, 2015 .
- [5] M.S. Naruka, D.S. Chauhan and S.N. Singh, Simplified Mathematical Model for Inductance Profile of Switched Reluctance Motor, International Journal of Industrial Electronics and Control, ISSN 0974-2220 Volume 5, Number 2, pp. 1-10, 2013.
- [6] Qinghui Li, Jing Shang, "Experimental measurement and FEM calculations of the inductance parameters in SRM", First International Conference on Pervasive Computing, Signal Processing and Applications, 2010.
- [7] X. Liu, Z.P. Pan, Z.Q. Zhu, "Analysis of Average Torque in Switched Reluctance Motor with Unipolar and Bipolar Excitations Based on an Improved Fourier Series Model", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2010
- [8] S. Misawa and I. Miki, "A Rotor Position Estimation Using Fourier Series of Phase Inductance for Switched Reluctance Motor", SPEEDAM, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2010.
- [9] Li chen, Jianhua Wu, "A Method for Calculating the Inductance of Switched Reluctance Motor Based on End Inductance Coefficient Function", 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2020.

- [10] Minjie, Zhang Qiang Gao, Xu Cai , "Analytical Inductance Calculation of an Outer Rotor Switched Reluctance Motor", 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2019.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Đinh Hải Linh tốt nghiệp đại học năm 2007; nhận bằng Thạc sĩ và bằng Tiến sĩ ngành kỹ thuật điện tại Đại học Bách khoa Hà Nội vào các năm 2010, 2022. Hiện nay tác giả công tác tại Khoa Cơ điện và Công trình, Trường Đại học Lâm nghiệp.

Hướng nghiên cứu chính: tính toán thiết kế động cơ điện, phân tích mô phỏng máy điện, chẩn đoán hư hỏng trong máy điện, đánh giá phân tích thông số của máy điện, các loại động cơ điện mới, động cơ cho xe điện.



Tác giả Bùi Minh Định tốt nghiệp đại học ngành kỹ thuật điện và nhận bằng Thạc sĩ tại Đại học Bách khoa Hà Nội vào các năm 2003 và 2009, nhận bằng Tiến sĩ ngành kỹ thuật điện năm 2014 tại Cộng hòa Liên bang Đức. Hiện nay tác giả hiện là giảng viên Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội.

Hướng nghiên cứu chính: thiết kế, tính toán, mô phỏng máy điện, giải pháp thiết kế tối ưu máy điện, công nghệ chế tạo máy điện, chẩn đoán hư hỏng trong máy điện, động cơ điện hiệu suất cao, các loại động cơ điện mới, động cơ cho xe điện.



Tác giả Nguyễn Đức Bắc tốt nghiệp đại học năm 2005, bảo vệ luận án Tiến sĩ ngành kỹ thuật điện tại Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2022. Hiện nay tác giả công tác tại Bộ môn Điện kỹ thuật, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội.

Hướng nghiên cứu chính: thiết kế tối ưu thiết bị điện, thuật toán tối ưu, nghiên cứu xe điện, năng lượng tái tạo, tiết kiệm năng lượng.



Tác giả Nguyễn Thị Linh tốt nghiệp đại học ngành thiết bị điện và điện tử năm 2007, bảo vệ luận án Thạc sĩ năm 2010 tại Đại học Bách khoa Hà Nội. Hiện nay tác giả là giảng viên Khoa Kỹ thuật điện - Trường Đại học Điện lực.

Hướng nghiên cứu chính: thiết kế máy điện, các loại động cơ điện mới, động cơ hiệu suất cao; ứng dụng các giải pháp điều khiển hiện đại trong hệ thống điện.