

## ĐIỀU KHIỂN CỰC TIỂU HÓA ĐỘ NHẤP NHÔ MÔMEN CHO ĐỘNG CƠ TỪ TRỞ THAY ĐỔI

### TORQUE-RIPPLE MINIMIZATION IN SWITCHED RELUCTANCE MOTORS

Lê Quốc Dũng

*Trường Đại học Điện lực*

**Tóm tắt:** Với các đặc tính vốn có như cấu tạo đơn giản, không có góp, giá thành thấp, động cơ từ trở thay đổi (Switched Reluctance Motor - SRM) là một sự lựa chọn khả thi cho các ứng dụng phổ biến có đòi hỏi điều chỉnh tốc độ. Nhược điểm chính của SRM là sự nhấp nhô mômen cao hơn khi so sánh với các động cơ thông thường, điều đó đã tạo ra độ ồn và độ rung. Nguồn gốc của sự nhấp nhô mômen trong SRM là vì nó có đặc tính sinh mômen phi tuyến cao và rời rạc. Bài báo này sẽ đưa ra một phương pháp điều khiển điện tử để cực tiểu hóa độ nhấp nhô mômen cho SRM ở chế độ hoạt động tốc độ thấp. Độ nhấp nhô mômen trong suốt quá trình chuyển mạch sẽ được cực tiểu hóa bằng cách cho hai pha đồng dẫn và cùng sinh mômen trong vùng được xác định trước.

**Từ khóa:** Động cơ từ trở, SRM, cực tiểu hoá mômen, nhấp nhô mômen.

**Abstract:** Switched reluctance motor (SRM) is a new candidate for various general-purpose adjustable-speed applications thanks to its inherent attributes such as simplicity, ruggedness, and low cost. The primary disadvantage of a SRM is its higher torque-ripple, which contributes to acoustic noise and vibration in comparison with conventional machines. The origin of torque pulsations in a SRM is due to the highly non-linear and discrete nature of torque production mechanism. This paper presents an electronic control method for torque-ripple minimization in low-speed operation mode. The torque pulsations during commutation are minimized by simultaneous conduction of two positive torque producing phases over an extended predefined region.

**Keywords:** Switched reluctance motors, SRM, torque-ripple minimization, torque-ripple.

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

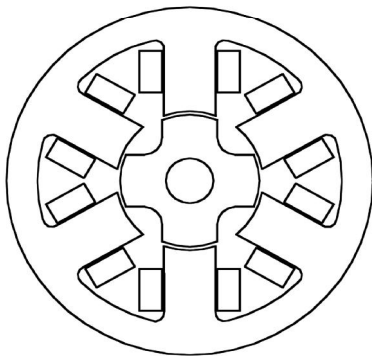
Động cơ từ trở thay đổi (SRM) là loại

động cơ điện được biết đến từ những năm 1890. Tuy nhiên ngay từ khi mới ra đời, SRM không được quan tâm phát

triển do có những nhược điểm như: độ nhấp nhô mô men lớn, gây ra nhiều tiếng ồn, khó thực hiện việc điều khiển... Những năm gần đây, do công nghệ bán dẫn và vi điều khiển phát triển, thu được nhiều tiến bộ đáng kể thì người ta mới bắt đầu quan tâm trở lại với động cơ này. Hiện nay, SRM được nhiều kỹ sư và nhà nghiên cứu trên thế giới rất quan tâm.

## 2. CẤU TẠO VÀ NGUYÊN LÝ LÀM VIỆC CỦA SRM

### 2.1. Cấu tạo



Hình 1. Cấu tạo cắt ngang SRM 6/4

Động cơ từ trở thay đổi có một số đặc điểm chính về cấu tạo như sau:

- Cả rotor và stator đều có các cực lồi ra, do đó người ta còn gọi là động cơ lồi kép (double salient);
- Stator của động cơ từ trở thay đổi có cấu tạo bởi nhiều cực từ chứa các cuộn dây tập trung. Rotor được chế tạo bằng vật liệu sắt từ có xẻ răng với tổng số răng bao giờ cũng ít hơn tổng số cực từ của stator;
- Các cuộn dây trên các cực đối xứng xuyên tâm của stator được nối nối tiếp hoặc song song để tạo thành một pha của động cơ;

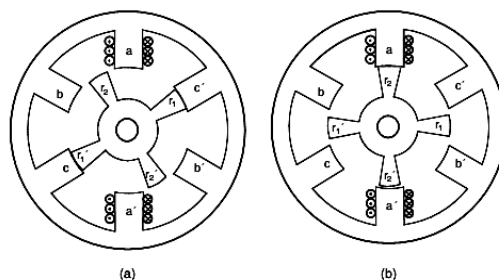
- Cả stator và rotor đều được làm từ các lá thép mỏng ghép cách điện để hạn chế dòng Fuco;
- Động cơ từ trở thay đổi có một số cấu hình phổ biến như sau: 8/6 (tức là stator có 8 cực lồi còn rotor có 6 răng (hình 1), 6/4, 10/6, 12/6,...

### 2.2. Nguyên lý hoạt động

Trước khi đi vào tìm hiểu nguyên lý hoạt động của động cơ từ trở ta xem xét 2 khái niệm quan trọng, đó là:

- Vị trí đồng trục (Aligned position);
- Vị trí lệch trục (Unaligned position).

Như đã thể hiện trên hình 1, ta thấy khi hai cực lồi của stator và rotor nằm ở vị trí mà trục của chúng trùng nhau thì người ta gọi đó là “vị trí đồng trục” (vị trí mà độ từ cảm sinh ra giữa cực từ của stator và răng của rotor là lớn nhất), còn khi hai cực của stator và rotor nằm lệch nhau hoàn toàn và không có phần thiết diện nào chồng lên nhau thì gọi đó là “vị trí lệch trục” (vị trí mà độ từ cảm giữa cực từ của stator và rotor là bé nhất).



Hình 2. Nguyên lý hoạt động

Lấy ví dụ là động cơ từ trở thay đổi 6/4 (như hình 2) ta tìm hiểu cách hoạt động của động cơ này. Giả sử các cực  $r_1$  và

$r_1'$  của rotor và cực c, c' của stator đang ở vị trí đồng trục (hình 2a). Trước tiên ta đưa dòng điện kích thích vào cuộn dây pha A, dòng điện này sẽ sinh ra một từ thông móc vòng qua các cực a và a' và các cực  $r_2$  và  $r_2'$  của rotor một cách tương ứng.

Do rotor luôn có xu hướng quay về phía mà độ tự cảm lớn nhất hay từ trở nhỏ nhất nên rotor lúc này sẽ quay hướng đến vị trí đồng trục của a, a' và  $r_2, r_2'$ . Khi chúng đã ở vị trí này thì dòng điện kích thích pha A bị ngắt và vị trí các cực như thấy ở hình 2b. Bây giờ ta đưa dòng điện kích thích vào cuộn dây của pha B, dòng này lại sinh ra một từ thông móc vòng qua các cực b, b' và  $r_1, r_1'$  một cách tương ứng, rotor lại được kéo quay theo chiều kim đồng hồ đưa  $r_1, r_1'$  hướng về vị trí thẳng hàng với b và b'. Khi đến vị trí này ta lại ngắt dòng cấp cho pha B. Tiếp tục chuyển sang cấp dòng cho pha C thì  $r_2, r_2'$  lại quay theo chiều kim đồng hồ hướng về c, c'. Cứ như vậy bằng việc cấp dòng điện lần lượt cho từng pha theo thứ tự A B C ta sẽ làm động cơ quay theo chiều kim đồng hồ. Muốn đảo chiều quay của động cơ ta chỉ cần đảo thứ tự cấp dòng thành A C B.

### 3. ƯU ĐIỂM CỦA SRM

- Rotor không có cuộn dây, chổi than hay vành góp nên động cơ hoạt động rất bền vững, tuổi thọ cao;
- Mômen khởi động lớn hơn nhiều so với các loại động cơ không đồng bộ;
- Độ tin cậy cao, vùng tốc độ rộng với công suất là hằng số, giá thành sản xuất thấp, đáp ứng động học nhanh;

- Không có hiện tượng quá dòng làm hỏng các van công suất do tốc độ tăng dòng cao;
- Do không có nam châm vĩnh cửu nên nhiệt độ cho phép của rotor cao hơn động cơ đồng bộ.

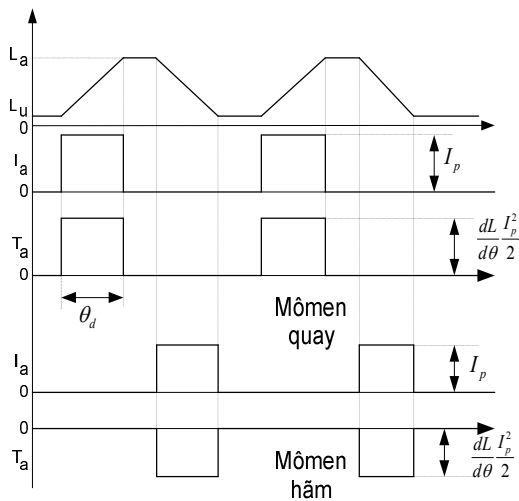
### 4. NGUYÊN TẮC ĐIỀU KHIỂN

Do chiều quay của động cơ phụ thuộc vào thứ tự phát xung, do đó chế độ làm việc của động cơ sẽ được quyết định bởi dấu của mômen. Giả sử động cơ là tuyến tính lúc đó ta có phương trình của mômen:

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta}$$

Từ phương trình trên ta dễ dàng nhận thấy rằng dấu của mômen phụ thuộc vào đại lượng  $\frac{dL}{d\theta}$ . Đối với động cơ từ

trở loại 8/6 có đặc tính điện cảm như hình 3. Dựa vào hình 3 ta thấy đặc tính điện cảm tăng trong vùng  $[-30^\circ, 0^\circ]$ , như vậy khi phát xung dòng điện trong khoảng này thì mômen sinh ra sẽ mang dấu dương. Giá trị trung bình của mômen có thể thay đổi bằng cách thay đổi độ lớn dòng điện chạy qua cuộn dây  $I_p$  hoặc là thay đổi góc dẫn của một pha  $\theta_d$ . Để đơn giản trong việc điều khiển cũng như nâng cao chất lượng điều khiển ta nên giữ góc dẫn  $\theta_d$  là hằng số và thay đổi độ lớn dòng của pha. Điều này dẫn đến yêu cầu bộ điều khiển dòng điện cần bám theo tín hiệu đặt một cách nhanh chóng, tránh rơi vào vùng sinh mômen âm.



**Hình 3. Sơ đồ nguyên lý điều khiển cơ bản cho động cơ từ trở**

Với nhược điểm là độ nhấp nhô mômen khá lớn đã ngăn cản việc ứng dụng của SRM vào thực tế. Để giảm độ nhấp nhô mômen, trong khoảng thời gian chuyển mạch, thay vì chỉ kích thích một pha ta sẽ kích thích trên hai pha để tránh việc

$$f(i_j, \theta) = -\frac{N_r}{4} \left[ (L_{\sigma}^{**}(i_j) - L_{3\phi}) \sin \left( N_r \left( \theta - (j-1) \frac{2\pi}{NN_r} \right) \right) + (L_{0^\circ}^{**}(i_j) - L_{30^\circ} - 2L_{15^\circ}^{**}(i_j)) \sin \left( 2N_r \left( \theta - (j-1) \frac{2\pi}{NN_r} \right) \right) \right]$$

Để xác định mômen cần thiết sinh ra ở mỗi pha ta dựa vào công thức:

$$T = \sum_{j=1}^N T_j = \sum_{j=1}^N f_j(\theta) T_{ref}$$

Trong đó  $f_j(\theta)$  là các hàm phân phối mômen cho pha  $j$  tại vị trí rotor  $\theta$  và  $T_{ref}$  là mômen đầu ra mong muốn. Các hàm phân phối mômen tìm ra phải thỏa

tăng và giảm dòng một cách đột ngột. Nếu gọi pha chuẩn bị ngừng dẫn là  $x$ , pha chuẩn bị dẫn là  $y$  thì mômen điện từ mà động cơ sinh ra là:

$$T_e^* = T_x^* + T_y^*$$

trong đó:

$$T_x^* = T_e^* f_x(\theta), T_y^* = T_e^* f_y(\theta)$$

với  $f_x(\theta), f_y(\theta)$  là các hàm phân phối mômen của pha  $x$  và pha  $y$ . Đó chính là các hàm của vị trí rotor. Từ lượng đặt mômen cho các pha  $x$  và pha  $y$ , ta tìm được lượng đặt dòng điện cho các pha tương ứng.

Lượng đặt dòng điện tính theo công thức:

$$i_j = \sqrt{\frac{T_j^*(\theta, i_j)}{f(i_j, \theta)}}$$

với

mãn các điều kiện sau trong giai đoạn chuyển mạch:

$$* \sum_{j=1}^4 f_j(\theta) = 1$$

$$* f_j(\theta) = f_j \left( \theta + \frac{\pi}{3} \right)$$

$$* f_j(\theta) = f_k \left( \theta - (j-k) \frac{\pi}{12} \right)$$

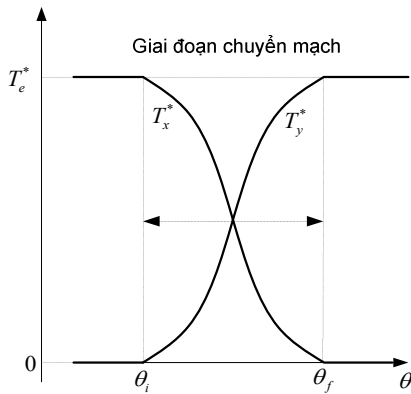
Có rất nhiều hàm thỏa mãn yêu cầu

trên, tác giả xin trình bày một phương pháp chọn hàm như sau: Đối với động cơ từ trở 8/6 khoảng đặc tính điện cảm tăng và giảm của mỗi pha trong khoảng  $\pi/6$ . Do đó ta chọn góc dẫn của một pha là  $\pi/8$ . Điều đó có nghĩa là:  $\theta_{off} - \theta_{on} = \pi/8$ , trong đó  $\theta_{on}$  và  $\theta_{off}$  lần

lượt là các góc mở và góc dẫn đối với một pha. Khoảng hai pha cùng dẫn dòng là  $\pi/24$ . Trong suốt khoảng hai pha cùng dẫn, mômen tổng được phân phối đến hai pha theo hàm cos của vị trí rotor. Cụ thể đối với pha  $j$  như sau:

$$f_j(\theta) = \begin{cases} 0.5 - 0.5 \cos 24(\theta - \theta_{on,j}) & \theta_{on,j} \leq \theta < \theta_{on,j} + \pi/24 \\ 1 & \theta_{on,j} + \pi/24 \leq \theta < \theta_{off,j} - \pi/24 \\ 0.5 + 0.5 \cos 24(\theta - \theta_{on,j} - \pi/24) & \theta_{off,j} - \pi/24 \leq \theta < \theta_{off,j} \\ 0 & \text{other} \end{cases}$$

Góc  $\theta_{on}, \theta_{off}$  cho pha A ở các góc phân tử được cho bởi bảng 1.



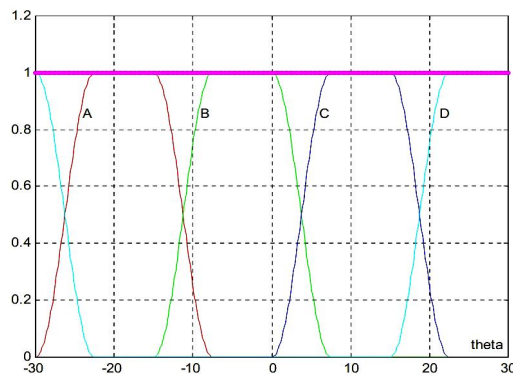
**Hình 4. Phương pháp giảm nhấp nhô mômen sử dụng hai pha cùng dẫn**

**Bảng 1. Góc đóng mở cho pha A**

	I	II	III	IV
$\theta_{on,A}$	$-30^\circ$	$5^\circ$	$7.5^\circ$	$-27.5^\circ$
$\theta_{off,A}$	$-7.5^\circ$	$27.5^\circ$	$30^\circ$	$-5^\circ$

Góc đóng mở cho các pha kế tiếp nhận được bằng cách dịch pha đi một góc  $\pi/12$ .

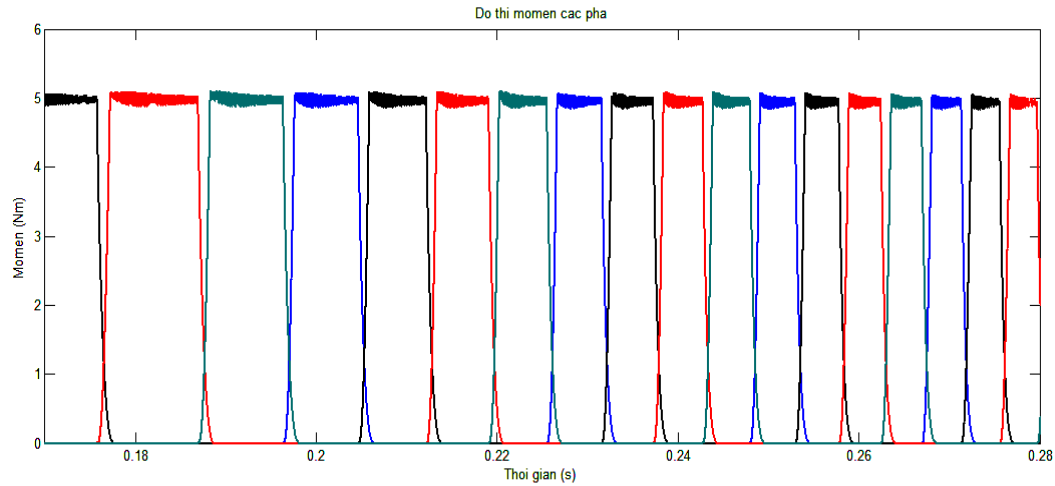
Phương pháp dẫn dòng trên hai pha để sinh ra mômen trên cả hai pha là một phương pháp rất quan trọng giảm độ nhấp nhô mômen. Ở đây, hàm phân phối mômen trong mỗi pha dựa theo vị trí rotor và góc đóng/mở đặt trước. Do đó từ giá trị mômen đặt, hàm sẽ phân phối thành các mômen cho từng pha tại từng thời điểm thích hợp. Từ giá trị mômen cho từng pha đó, dựa vào đặc tính điện cảm của động cơ mà ta tính ra giá trị dòng điện thích hợp để đưa vào bộ biến đổi để tạo tín hiệu phát xung nhằm duy trì dòng điện theo giá trị mong muốn.



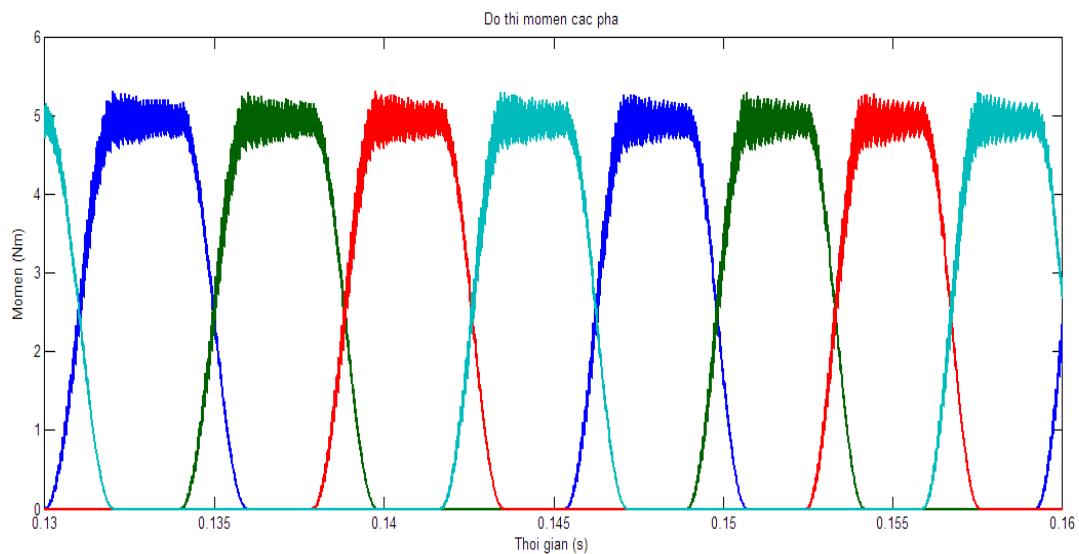
**Hình 5. Phân phối mômen cho chế độ động cơ quay thuận**

## 5. KẾT QUẢ KIỂM CHỨNG BẰNG PHẦN MỀM MATLAB - SIMULINK TRƯỚC VÀ SAU KHI ÁP DỤNG PHƯƠNG PHÁP GIẢM NHẤP NHÔ MÔMEN

### 5.1. Mômen các pha

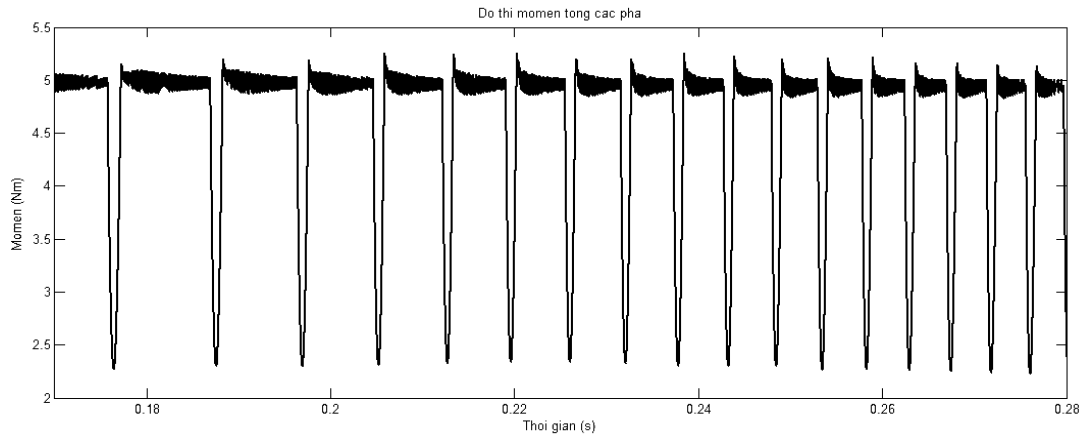


Hình 6. Mômen các pha khi chưa áp dụng phương pháp giảm nhấp nhô mômen

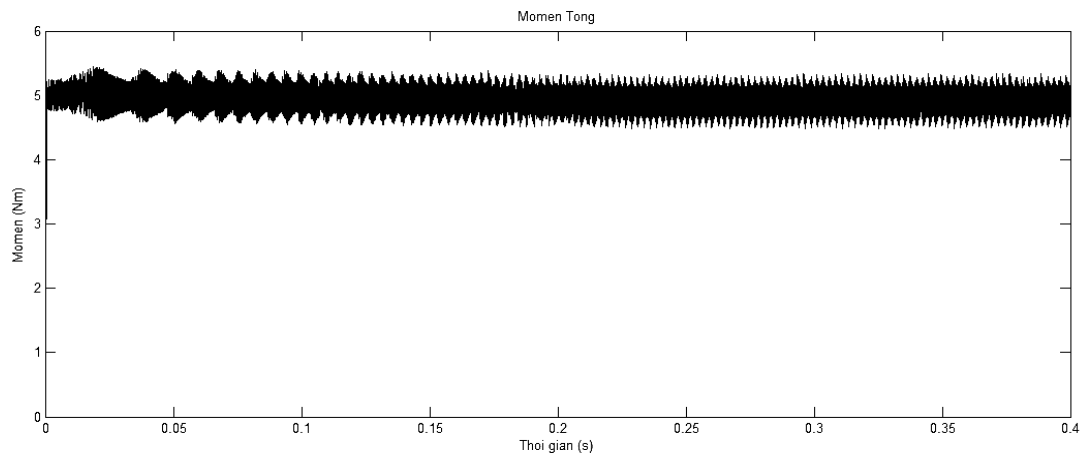


Hình 7. Mômen các pha khi áp dụng phương pháp giảm nhấp nhô mômen

## 5.2. Mômen tổng các pha



**Hình 8. Mômen tổng các pha khi chưa áp dụng phương pháp giảm nhấp nhô mômen**



**Hình 9. Mômen tổng các pha khi áp dụng phương pháp giảm nhấp nhô mômen**

Kết quả mô phỏng đã kiểm chứng lại một lần nữa các thuật toán đặt ra ở trên là hoàn toàn chính xác. Mômen tổng các pha khi áp dụng phương pháp giảm nhấp nhô mômen đã đạt tới độ bằng phẳng nhất định. Với đáp ứng như trên, động cơ từ trở hoàn toàn thích hợp để có thể sử dụng trong các ứng dụng công nghiệp hoặc dân dụng.

Thông số động cơ khi mô phỏng như sau:

- Tốc độ đặt: 100 rad/s;
- Mômen giới hạn của động cơ: 10 Nm;
- Dòng điện giới hạn: 22 A;
- Điện áp một chiều: 400 V;
- Thời gian đáp ứng: 0.5 s;
- Mômen tải: 5 Nm.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R. Krishnan. Switched Reluctance Motor Driver Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Application - CRC Press LLC - 2001.
- [2] Iqbal Husain , M. Ehsani. Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control - IEEE transactions on power electronics, vol.11, No 1, January 1996.
- [3] Lu Wenzhe. Modeling and Control of Switched Reluctance Machines for Electro-Mechanical Brake Systems - The Ohio State University - 2005.
- [4] Mohamad S.Islam, Iqbal Hussain, Robert J.Viellette, and Celal Batur. Design and performance Analysis of sliding - mode observers for sensorless operation of switched reluctance motors - IEEE transation on control system technology, vol 11- 2003.
- [5] Iqbal Hussain, Sameer Sodhi, Mehrdad Ehsani. A sliding mode observer based controller for switched reluctance motor drivers - Texas A&M University - 1997.
- [6] J.E. Slotine, J.K. Hedrick and E.A. Miasawa. On sliding obsercers for nonlinear system, ASEM J Dun,Syst vol 19 - 1987.
- [7] Sayeed Mir, Member, IEEE, Iqbal Husain, Member, IEEE, and Malik E. Elbuluk, Senior Member, IEEE. Switched Reluctance Motor Modeling with On-Line Parameter Identification, IEEE transation on industry application, Vol.34. No 4, July/August 1998.
- [8] Iqbal Hussain, Member, IEEE, and Mehrdad Ehsani, Senior Member, IEEE. Rotor Position Sensing in Switched Reluctance Motor Drives by Measuring Mutuallu Induced Voltages, IEEE transation on industry application, Vol.30. No 3, May/June 1994.
- [9] Miller, T.J.E. McGilp, M. Dept. of Electron. & Electr. Eng., Glasgow Univ. Nonlinear theory of the switched reluctance motor for rapidcomputer-aided design, Electric Power Applications, IEE Proceedings B, November 1990.
- [10] Lawrenson, P.J. Stephenson, J.M. Fulton, N.N. Blenkinsop, P.T. Corda, J. University of Leeds, Department of Electrical and Electronic Engineering, Leeds, UK. Variable-speed switched reluctance motors, Electric Power Applications, IEE Proceedings B, July 1980.
- [11] Rahman, K.M. Fahimi, B. Suresh, G. Rajarathnam, A.V. Ehsani, M. Dept. of Electr. Eng., Texas A&M Univ., College Station, TX. Advantages of switched reluctance



motor applications to EV and HEV: design and control issues , Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE, 12-15 Oct 1998.

- [12] Cheok, A.D. Fukuda, Y. Dept. of Electr. & Comput. Eng., Nat. Univ. of Singapore. A new torque and flux control method for switched reluctance motordrives , Power Electronics, IEEE Transactions on Volume: 17, Issue: 4.
- [13] Bose, Bimal K. Miller, Timothy J. E. Szczesny, Paul M. Bicknell, William H. General Electric Research and Development Center, Building 37-380, 1 River Road, Schenectady, NY 12345. Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor, Industry Applications, IEEE Transactions on July 1986 Volume: IA-22, Issue: 4.

### **Giới thiệu tác giả:**



**Tác giả Lê Quốc Dũng** tốt nghiệp đại học Khoa Điện chuyên ngành tự động hóa năm 2007, nhận bằng cao học chuyên ngành tự động hóa năm 2009 tại Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội. Từ năm 2007 đến nay tác giả là giảng viên Khoa Công nghệ tự động - Trường Đại học Điện lực.