MÔ HÌNH HÓA, MÔ PHỎNG VÀ ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG CƠ TỪ TRỞ ĐỒNG BỘ TỐC ĐỘ CAO

MODELLING, SIMULATION AND CONTROL OF HIGH SPEED SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTORS

Nguyễn Đức Quận

Trường Cao đẳng Công nghệ, Đại học Đà Nẵng; nguyenducquan06@gmail.com

Tóm tắt - Bài báo trình bày một phương pháp tiếp cận mới để điều khiển động cơ từ trở đồng bộ tốc độ cao. Sau khi mô hình hóa, xác định các thông số và mô phỏng động cơ, chúng tôi đề xuất một chiến lược điều khiển tối ưu nhằm đảm bảo tạo ra mô men tối đa, đặc biệt là ở vùng suy giảm từ thông. Trong phương pháp này, véc tơ dòng điện được điều khiển trực tiếp. Ở vùng tốc độ thấp (vùng mô men không đổi), sử dụng chiến lược điều khiển tối ưu môment/dòng điện (M/I), ở vùng tốc độ cao (vùng suy giảm từ thông), sử dụng chiến lược điều khiển tối ưu môment/từ thông (M/Ψ). Hệ thống truyền động hoạt động trong phạm vi giới hạn điệp áp và giới hạn dòng điện của động cơ. Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm đã được thực hiện trên động cơ từ trở đồng bộ tại Phòng thí nghiệm IREENA (Institut de Recherche en Energie Electrique de Nantes Atlantique), Đại học Nantes.

Từ khóa - động cơ từ trở đồng bộ; tốc độ cao; mô hình hóa; mô phỏng; suy giảm từ thông

Abstract - In this paper, a new approach to control high speed synchronous reluctance motors is presented. After modeling, identification of parameters and simulation, we propose an optimal control strategy that ensures the production of maximum torque, especially in the field-weakening region. In this method, the current vector is controlled directly. The Maximum Torque Per Amper (MTPA) operation is used in below the base speed (constant torque region) and Maximum Torque Per Weber (MTPW) operation is used in above the base speed (field-weakening region). The drive operates within the voltage and current limits of the motor. The simulation and experimental results have been verified on a prototype synchronous reluctance motor at IREENA Laboratory (Institut de Recherche en Energie Electrique de Nantes Atlantique), the University of Nantes

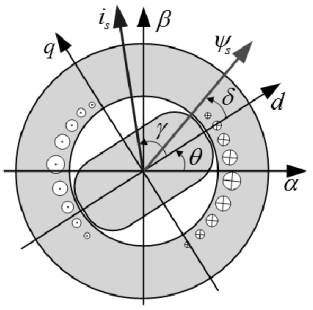
Key words - synchronous reluctance motor; high-speed; modeling; simulation; field-weakening

1. Đặt vấn đề

Động cơ từ trở đồng bộ (Synchronous reluctance motor) bắt đầu được nghiên cứu vào đầu những năm 1920 [1], [2] với sự khám phá ra khái niệm mô men từ trở. Các nghiên cứu đầu tiên về loại động cơ này được thực hiện bởi J. K. Kostko vào năm 1923 [3].

Động cơ từ trở đồng bộ (ĐCTTĐB) có nhiều ưu điểm do cấu trúc đơn giản và vững chắc. Stator của ĐCTTĐB giống hệt stator của động cơ không đồng bộ hay động cơ đồng bộ truyền thống; rotor dạng cực lồi và đặc, không có cuộn dây hay nam châm vĩnh cửu, phù hợp cho các ứng dụng tốc độ cao và môi trường nhiệt độ cao. Do cấu trúc đơn giản, nên dễ dàng chế tạo, giá thành rẻ hơn so với các loại động cơ khác cùng công suất. Nguyên lý hoạt động của nó dựa trên sự bất đối xứng từ [4], [5]. Hiện nay, ĐCTTĐB hoạt động trong một dải công suất rộng: từ 750W đến 120kW và tốc độ từ 3000 vòng/phút đến 54.000 vòng/phút [6].

ĐCTTĐB được đặc trưng bởi hệ số lồi của rotor L_d/L_q, trong đó L_d là điện cảm của stator theo trục d, L_q là điện cảm theo trục q trong hệ tọa độ chuyển đổi Park (Hình 1).



Hình 1. *Hệ tọa độ cố định αβ và hệ tọa độ quay dq*

Từ phương trình mô men của động cơ với p cặp cực $\Gamma = \frac{3p}{2}\left(L_d - L_q\right)i_d i_q$, chúng ta nhận thấy rằng việc điều khiển mô men động cơ trở thành điều khiển đồng thời hai dòng điện i_d và i_q trong hệ tọa độ chuyển đổi Park, việc chọn lựa phương pháp điều khiển thông qua việc lựa chọn dòng điện tham chiếu i_d^*, i_q^* [7]. Có nhiều phương pháp điều khiển với các tiêu chí tối ưu khác nhau như: tối ưu mô men, tối ưu hiệu suất hay tối ưu hệ số công suất [8]. Trong bài báo này, chúng tôi thực hiện một chiến lược điều khiển kết hợp nhằm đạt được hiệu suất tối đa đối với ĐCTTĐB tốc độ cao. Ở tốc độ thấp, để có được khả năng tăng tốc của động cơ, thực hiện với phương pháp điều khiển tối ưu M/I (MTPA), để đạt được một tốc độ cao hơn mà không đòi hỏi điện áp một chiều của biến tần quá lớn, phương pháp điều khiển tối ưu M/Ψ(MTPW) là cần thiết. Các chiến lược điều khiển này đối với ĐCTTĐB tốc độ cao đã thử nghiệm qua mô phỏng và thí nghiệm tại phòng thí nghiệm IREENA.

2. Mô hình động cơ từ trở đồng bộ

2.1. Phương trình điện áp trong hệ tọa độ abc

Với các giả thiết thông thường, mô hình ĐCTTĐB trong hệ tọa độ cố định stator được mô tả như sau [9]:

$$[V_{abc}] = [R_s][I_{abc}] + \frac{d}{dt}[\Psi_{abc}] \quad (1)$$

với: $[V_{abc}] = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}; [I_{abc}] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; [\Psi_{abc}] = \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix}$

$$[\Psi_{abc}][L][I_{abc}] \quad (2)$$

Với [L] là ma trận điện cảm, ma trận điện cảm này phụ thuộc vào vị trí góc θ được biểu diễn trên Hình 1.

$$[L]=\begin{bmatrix} L_a(\theta) & M_{ab}(\theta) & M_{ac}(\theta) \\ M_{ba}(\theta) & L_b(\theta) & M_{bc}(\theta) \\ M_{ca}(\theta) & M_{cb}(\theta) & L_c(\theta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Trong đó, các hệ số điện cảm L_x và hỗ cảm M_{xy} biểu diễn như sau:

$$L_a(\theta)=L_f+L_0+L_2cos(2\theta)$$

$$L_b(\theta)=L_f+L_0+L_2\cos\left(2\theta+\frac{2\pi}{3}\right)$$

$$L_c(\theta)=L_f+L_0+L_2cos\left(2\theta-\frac{2\pi}{3}\right)$$

$$M_{ab}(\theta)=M_{ba}(\theta)=M_0+M_2cos\left(2\theta-\frac{2\pi}{3}\right)$$

$$M_{ac}(\theta)=M_{ca}(\theta)=M_0+M_2cos\left(2\theta+\frac{2\pi}{3}\right)$$

$$M_{bc}(\theta)=M_{cb}(\theta)=M_0+M_2cos(2\theta)$$

với: $M_0=-\frac{1}{2}L_0 et M_2=L_2$

2.2. Phương trình điện áp trong hệ tọa độ quay d-q

Nếu chuyển tất cả các đại lượng ở (1) sang hệ tọa độ quay d-q thông qua phép biến đổi Park (**Hình 1**), chúng ta sẽ được phương trình điện áp như sau [7]:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} R_s & -N_p\Omega L_q \\ N_p\Omega L_d & R_s \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix}\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

với: $\begin{cases} L_d=L_f+\frac{3}{2}(L_0+L_2) \\ L_q=L_f+\frac{3}{2}(L_0-L_2) \end{cases}$

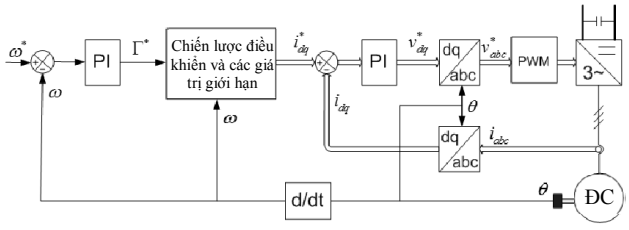
Phương trình mô men và phương trình động học của động cơ được viết như sau:

$$\Gamma=\frac{3}{2}N_p(L_d-L_q)i_di_q \quad (5)$$

$$J\frac{d\Omega}{dt}+F\Omega=\Gamma-\Gamma_r \quad (6)$$

3. Cấu trúc điều khiển

Sơ đồ khối cấu trúc điều khiển véc tơ ĐCTTĐB được trình bày như trên **Hình 2**, gồm các cấp điều khiển: cấp trong cùng là vòng điều khiển dòng điện sử dụng bộ điều khiển PI. Cấp thứ 2 là xác định giá trị dòng điện tham chiếu i_d^* và i_q^* theo giá trị của mô men và các giá trị giới hạn của dòng điện và điện áp. Cấp cuối cùng là vòng điều khiển tốc độ cũng sử dụng bộ điều khiển PI.



Hình 2. *Sơ đồ cấu trúc điều khiển*

4. Chiến lược điều khiển động cơ từ trở đồng bộ

Phương pháp điều khiển véc tơ sẽ được sử dụng trong bài báo này, một chiến lược điều khiển kết hợp đã được thực hiện: Ở vùng tốc độ thấp (trong giai đoạn động cơ tăng tốc) sử dụng phương pháp điều khiển tối ưu M/I (MTPA) và được chuyển sang phương pháp điều khiển tối ưu M/Ψ (MTPW) khi động cơ hoạt động ở tốc độ cao. Hoạt động của bộ điều khiển trong phạm vi giới hạn của dòng điện và điện áp cho phép. Để có được một giá trị mô men cực đại, chúng ta phải đi tìm những giá trị tối ưu của dòng điện tham chiếu i_d^* và i_q^* theo tốc độ của động cơ đồng thời tuân thủ giới hạn của dòng điện và xét đến vấn đề bảo hòa điện áp nguồn cấp (**Hình 6**).

4.1. Giới hạn dòng điện và điện áp

Trước khi giới thiệu các chiến lược điều khiển khác nhau, chúng ta cần xét đến các giới hạn của dòng điện và điện áp.

Giới hạn của véc tơ dòng điện:

$$\|i_s\|=\sqrt{i_d^2+i_q^2}\le i_{sm} \quad (7)$$

Quỹ đạo của giới hạn dòng điện là đường tròn có bán kính i_{sm} trong mặt phẳng i_d-i_q.

Tương tự cho giới hạn của điện áp nguồn cấp của động cơ, ta có:

$$\|v_s\|=\sqrt{v_d^2+v_q^2}\le v_{sm} \quad (8)$$

Nếu bỏ qua điện trở stator, ở chế độ xác lập từ phương trình (4) ta có:

$$\begin{cases} v_d=-\omega L_q i_q \\ v_q=\omega L_d i_d \end{cases}\Rightarrow v_s^2=\omega^2L_d^2i_d^2+\omega^2L_q^2i_q^2 \quad (9)$$

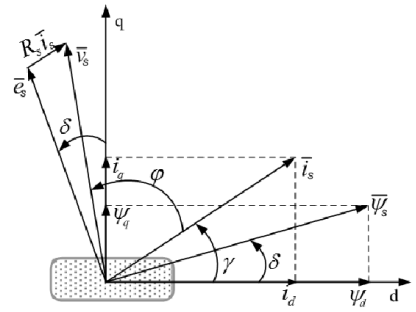
Chúng ta thu được giới hạn của điện áp là những đường e-lip tương ứng với giá trị của điện áp v_s và tốc độ ω của động cơ.

$$\frac{{v_s}^2}{\omega^2}={\Psi_s}^2=L_d^2\left(i_d^2+\left(\frac{L_q}{L_d}\right)^2i_q^2\right) \quad (10)$$

4.2. Phương pháp điều khiển tối ưu M/I (MTPA)

Phương pháp này rất phù hợp để khởi động động cơ và trong trường hợp động cơ làm việc ở tốc độ thấp. Biểu thức mô men điện từ của động cơ được viết như sau:

$$\Gamma=\frac{3}{2}N_p(L_d-L_q)i_di_q=\frac{3}{4}N_p(L_d-L_q)i_s^2sin(2\gamma) \quad (11)$$

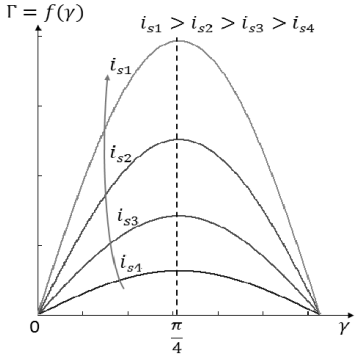


Hình 3. *Dòng điện vàt ừ thông trong hệ tọa độ d-q*

Theo Hình 3 ta có: $i_d=i_s\cos(\gamma)$ và $i_q=i_s\sin(\gamma)$.

Với một giá trị mô đun i_s xác định, giá trị tuyệt đối của mô men đạt cực đại khi góc $\gamma=\pm\frac{\pi}{4}$ (Hình 4), khí đó giá trị dòng điện tham chiếu $i_d^*=|i_q^*|$.

$$i_d^*=\sqrt{\frac{2|\Gamma^*|}{3N_p(L_d-L_q)}}\text{ và }i_q^*=i_d^*sign(\Gamma^*) \quad (12)$$



Hình 4. *Quỹ tích của mô men với mỗi giá trị của dòng điện*

4.3. Phương pháp điều khiển tối ưu M/Ψ (MTPW)

Phương pháp điều khiển tối ưu M/Ψ được sử dụng khi chúng ta không thể áp dụng phương pháp tối ưu M/I để có được mô men cực đại do giới hạn của điện áp khi tốc độ tăng cao. Biểu thức mô men điện từ của động cơ có thể được viết lại như sau:

$$\Gamma = \frac{3}{2}N_p(\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) = \frac{3}{2}N_p\left(\frac{\Psi_d\Psi_q}{L_q} - \frac{\Psi_d\Psi_q}{L_d}\right) \quad (13)$$

Ta có: $\Psi_d = \frac{E_q}{\omega} = \frac{Ecos(\delta)}{\omega}; \Psi_q = \frac{-E_q}{\omega} = \frac{Esin(\delta)}{\omega}$ (**Hình 3**)

Do đó, biểu thức mô men có thể viết lại như sau:

$$\Gamma = \frac{3}{4}N_p\left(\frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d}\right)\left(\frac{E}{\omega}\right)^2 sin(2\delta) \quad (14)$$

Nếu bỏ qua điện trở stator, biểu thức mô men theo điện áp stator là:

$$\Gamma = \frac{3}{4}N_p\left(\frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d}\right)\left(\frac{v_s}{\omega}\right)^2 sin(2\delta) \quad (15)$$

Với $tan(\delta) = \frac{\Psi_q}{\Psi_d} = \frac{L_q i_q}{L_d i_d} = \frac{1}{\xi}tan(\gamma)$

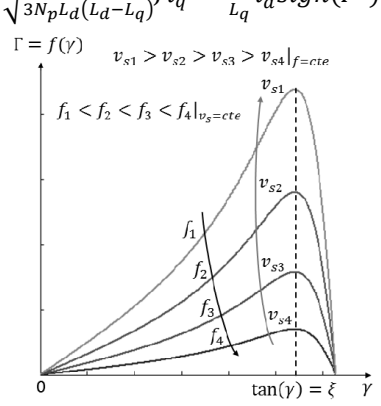
$\xi = \frac{L_d}{L_q}$: hệ số lồi của rotor

Chúng ta sẽ có biểu thức mô men sau cùng như sau:

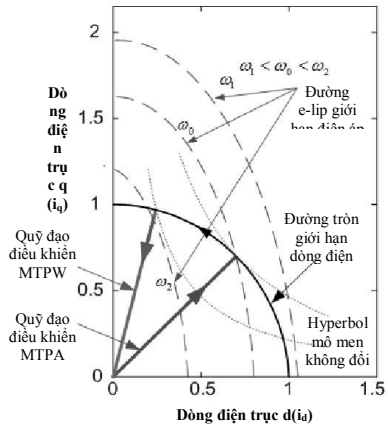
$$\Gamma = \frac{3}{4}N_p\left(\frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d}\right)\left(\frac{v_s}{\omega}\right)^2 sin\left(2tan^{-1}(\frac{tan(\gamma)}{\xi})\right) \quad (16)$$

Chúng ta sẽ thu được giá trị mô men cực đại với mỗi giá trị của từ thông $\Psi_s = \frac{v_s}{\omega}$ tương ứng với $\delta = \pm\frac{\pi}{4}$ hay $\tan(\gamma) = \pm\,\xi$ (Hình 5) và $\psi_d = |\psi_q|$, khi đó giá trị tham chiếu của dòng điện:

$$i_d^* = \sqrt{\frac{2L_q|\Gamma^*|}{3N_pL_d(L_d - L_q)}}; i_q^* = \frac{L_d}{L_q}i_d^* sign(\Gamma^*) \quad (17)$$



Hình 5. *Quỹ tích của mô men với mỗi giá trị của từ thông*



Hình 6. *Quỹ đạo điều khiển và các giới hạn dòng và áp*

5. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm

Trong phần này chúng tôi sẽ trình bày các kết quả mô phỏng và thực nghiệm đã được thực hiện trên ĐCTTĐB có công suất 15kW, tốc độ 20.000 vòng/phút tại phòng thí nghiệm IREENA, Đại học Nantes (**Hình 9**).

Chúng tôi đã thực hiện các thử nghiệm cho động cơ khởi động không tải và cho mang tải ở tốc độ cao, đầu tiên sẽ thực hiện bằng mô phỏng bởi phần mềm matlab-simulink và sau đó thực hiện thí nghiệm trên động cơ với cùng một giá trị đặt tốc độ để so sánh kết quả mô phỏng và thí nghiệm. Để đảm bảo an toàn trong thí nghiệm này, chúng tôi đã giới hạn việc thí nghiệm với một tốc độ tối đa là 15.000 vòng/phút. Để kiểm tra động cơ hoạt động ở chiến lược điều khiển MTPW, chúng tôi đã giảm giá trị giới hạn điện áp cho động cơ xuống giá trị 110V thay vì 230V. Khi đó động có sẽ làm việc ở chiến lược điều khiển MTPW từ 8.700 vòng/phút thay vì sẽ làm việc ở 17.700 vòng/phút.

5.1. Kết quả mô phỏng

Sơ đồ nguyên lý hệ thống điều khiển véc tơ vòng kín ĐCTTĐB được trình bày như trên **Hình 2**, các tham số của động cơ được trình bày trong Bảng 1.

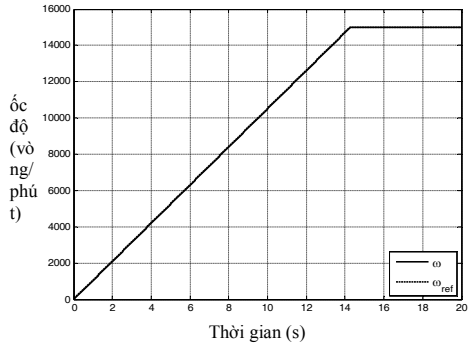
Hình 7 trình bày các đáp ứng tốc độ, đáp ứng dòng điện, đáp ứng mô men và đáp ứng điện áp cho một tín hiệu tốc độ đặt là 15.000 vòng /phút.Để khởi động một động cơ tốc độ cao, chúng tôi đã thực hiện khởi động với một độ dốc là 110 rad/s^2. Động cơ tăng tốc từ 0 đến giá trị đặt 15.000 vòng/phút với khoảng thời gian 14s.

Ở chế động khởi động và trong vùng tốc độ thấp, sử dụng phương pháp điều khiển tối ưu M/I để có được mô men tối đa trên giá trị dòng điện đặt theo công thức (12) với i_d=i_q.

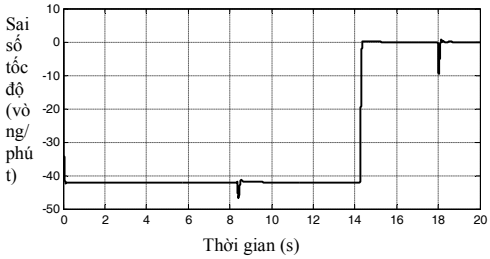
Khi tốc độ đạt 8.700 vòng/phút, bộ điều khiển sẽ chuyển từ phương pháp tối ưu M/I sang phương pháp điều khiển tối ưu M/Ψ và giá trị đặt của dòng điện được xác định bởi công thức (17). Quá trình quá độ xảy ra khi chuyển đổi giữa 2 phương pháp điều khiển, dòng i_d giảm và tăng dòng i_q. Tốc độ động cơ tiếp tục tăng đến giá trị đặt 15.000 vòng/phút. Trong suốt quá trình tăng tốc, tốc độ của động cơ luôn bám theo giá trị đặt với sai số tốc độ là 42 vòng/phút. Khi tốc độ động cơ đạt đến giá trị xác lập, sai số tốc độ sẽ trở về 0 (**Hình 7**b).

Tại thời điểm t=18s, áp vào động cơ một mô men tải

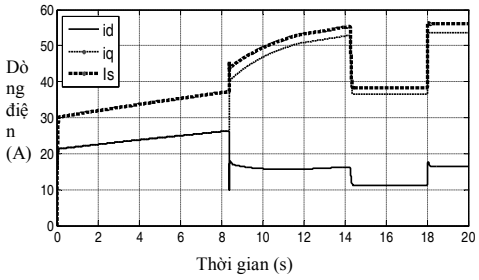
với giá trị bằng 2Nm, giá trị sụt tốc tại thời điểm mang tải khoảng 10 vòng/phút và trở về giá trị tốc độ đặt sau thời gian khoảng chừng 0.12s.



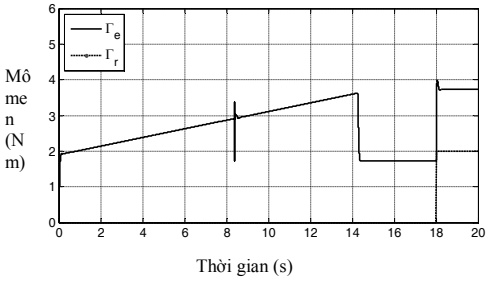
Đáp ứng tốc độ



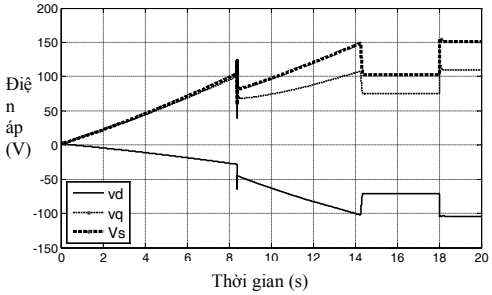
Sai số tốc độ



Đáp ứng dòng điện

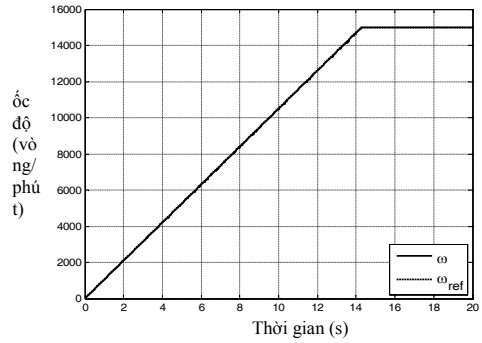


Đáp ứng mô men

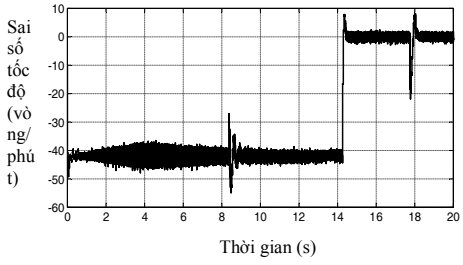


Đáp ứng điện áp

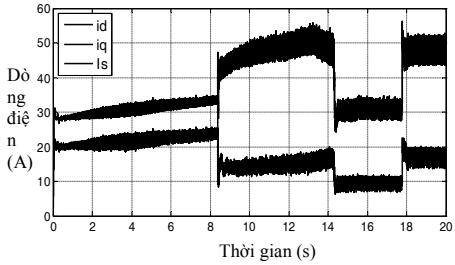
Hình 7. *Đáp ứng hệ thống với tốc độ đặt 15.000 (v/p)*



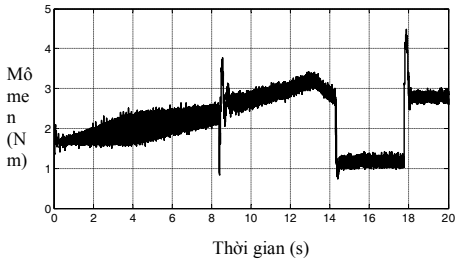
Tốc độ động cơ và giá trị đặt



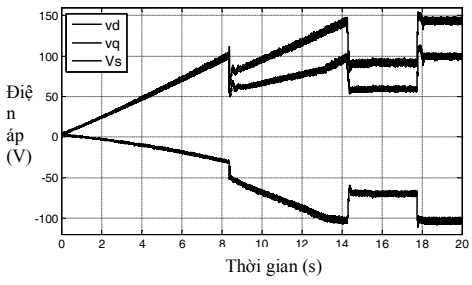
Sai số tốc độ đo và giá trị đặt



Giá trị đo của dòng điện



Giá trị mô men của động cơ



Giá trị đo của điện áp

Hình 8. *Khởi động động cơ với tốc độ đặt 15.000 (v/p)*

5.2. Kết quả thực nghiệm

Để thực hiện các kết quả thực nghiệm, chúng tôi đã tiến hành làm thí nghiệm trên bàn thí nghiệm điều khiển động cơ tốc độ cao như trên **Hình 9**, trên bàn thí nghiệm này bao gồm một động cơ đồng bộ NCVC (làm việc như

một phụ tải) kết nối trực tiếp với một ĐCTTĐB. Động cơ này được cấp nguồn bởi một biến tần ba pha, phần điều khiển sử dụng card DSP DS1005 thực hiện điều khiển thời gian thực. Chúng tôi đã thực hiện các thí nghiệm hoàn toàn giống các giá trị của quá trình mô phỏng, để so sánh kết quả mô phỏng và kết quả thực nghiệm.

Trên Hình 8 trình bày các kết quả thí nghiệm, động cơ khởi động với một giá trị đặt tốc độ 15.000 vòng/phút với độ dốc như ở trường hợp mô phỏng là 110rad/s^2. Chúng ta có thể thấy là kết quả này rất gần với kết quả mô phỏng, giá trị sai số tốc độ trung bình trong quá trình khởi động khoảng 42 vòng/phút và bằng 0 khi ở tốc độ xác lập, có một chút dao động tốc độ (khoảng 2 vòng/phút). Tương tự như thực hiện ở phần mô phỏng, quá trình động cơ khởi động và tăng tốc đến 8.700 vòng/phút với phương pháp điều khiển tối ưu M/I, chúng ta thấy rằng dòng i_d luôn có giá trị bằng dòng i_q. Tiếp theo đó i_d sẽ giảm và dòng i_q tăng lên tương ứng với phương pháp điều khiển tối ưu M/Ψ, giá trị đo của dòng điện có nhiễu, nhưng giá trị trung bình của nó có dạng tương tự như ở quá trình mô phỏng. Tại thời điểm khoảng 18s, áp vào động cơ một giá trị mô men tải bằng 2Nm, sụt tốc trong quá trình quá độ khoảng 20 vòng/phút với khoảng thời gian 0.3s, chúng ta có thể khẳng định rằng bộ điều khiển tốc độ kháng nhiễu rất tốt.

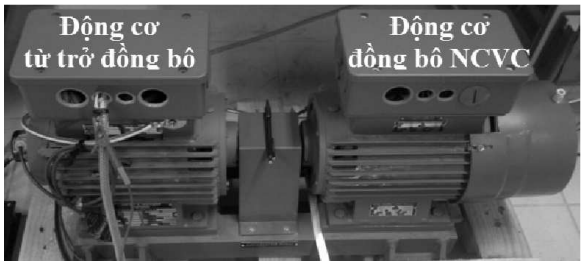
6. Kết luận

Trong bài báo này, việc nghiên cứu điều khiển véc tơ ĐCTTĐB có xét đến các giới hạn dòng điện và điện áp của động cơ đã được trình bày. Nhằm đạt được mô men tối đa trên toàn dải tốc độ, đặc biệt là ở vùng tốc độ cao (vùng điều khiển suy giảm từ thông), mà không cần cung cấp điện áp một chiều cho biến tần quá lớn, một bộ điều khiển kết hợp giữa hai phương pháp điều khiển tối ưu M/I và điều khiển tối ưu M/Ψ đã được thực hiện. Ở giai đoạn động cơ khởi động và bắt đầu tăng tốc, sử dụng phương pháp điều khiển tối ưu M/I. Khi động cơ hoạt động ở tốc độ cao, do giới hạn về điện áp, phương pháp điều khiển tối ưu M/Ψ được thực hiện. Các phương pháp điều khiển này đã được kiểm chứng bằng mô phỏng và thực nghiệm trên động cơ thí nghiệm. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy quá trình quá độ chuyển đổi giữa 2 phương pháp điều khiển là khá trơn. Đối với thực nghiệm, do tốc độ động cơ sẽ có dao động nhẹ (2 vòng/phút), vì vậy để thực hiện việc chuyển đổi chắc chắn, chúng tôi đã sử dụng một bộ chuyển đổi trễ tốc độ.

Đối với hệ truyền động tốc độ cao, sử dụng cảm biến để xác định vị trí của rotor là một nhược điểm, nhằm nâng cao độ tin cậy, giảm sự cồng kềnh và giá thành của hệ thống. Điều khiển ĐCTTĐB tốc độ cao không sử dụng cảm biến tốc độ là cần thiết, đây cũng là hướng nghiên cứu tiếp theo của tác giả.

Bảng 1. *Tham số động cơ từ trở đồng bộ*

Tham số	Giá trị
Tốc độ định mức	20.000 vòng/phút
Công suất định mức	15 kW
Số cặp cực	1
Dòng điện định mức	40 A
Điện áp pha định mức	230 V
Điện trở stator	120 mΩ
Điện cảm trục d	4,1 mH
Điện cảm trục q	1,3 mH
Mômen quán tính(cả 2 động cơ)	1,6 10^{-2} kg.m^2
Hệ số ma sát (cả 2 động cơ)	1,1 10^{-3} N.m.s/rad



Hình 9. *Bàn thí nghiệm ĐCTTĐB tốc độ cao*

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] A. Vagati, "The synchronous reluctance solution: a new alternative in A. C. drives", *IEEE, IECON'94 (Bolagna)*, 1994.

[2] T. A. Lipo, T. J. E. Miller, A. Vagati, I. Boldea, L. Malesani, and T. Fukao, "Synchronous reluctance drivers", *Tutor. Present. IEEE-IAS Annu. Meet.*, 1994.

[3] J. K. Kostko, "Polyphase Reaction Synchronous Motors", *J. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 42, pp. 1162–1168, 1923.

[4] M. Correvon, "Conversion electromagnetique", in *Cours Systèmes électromécaniques*, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion Du canton de Vaud, 2008, pp. 1–26.

[5] F. Meibody-Tabar, "Etude d'une machine synchrone à réluctance variable pour des applications à grande vitesse", Thèse de Doctorat, Institute National Polytechnique de Lorraine, 1986.

[6] J.-D. Park, C. Kalev, and H. F. Hofmann, "Control of High-Speed Solid-Rotor Synchronous Reluctance Motor/Generator for Flywheel-Based Uninterruptible Power Supplies", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 8, pp. 3038–3046, Aug. 2008.

[7] R. E. Betz, R. Lagerquist, M. Jovanovic, T. J. E. Miller, and R. H. Middleton, "Control of Synchronous Reluctance Machines", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 29, no. 6, pp. 1110–1122, 1993.

[8] Y. Inoue, S. Morimoto, and M. Sanada, "A Novel Control Scheme for Maximum Power Operation of Synchronous Reluctance Motors Including Maximum Torque Per Flux Control", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 1, pp. 115–121, Jan. 2011.

[9] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Rotor position detection scheme for synchronous reluctance motor based on current measurements", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, no. 4, pp. 860–868, 1995.

(BBT nhận bài: 21/07/2015, phản biện xong: 24/08/2015)