

## XÂY DỰNG MÔ HÌNH PHẢN HỒI TRẠNG THÁI ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ

**Nguyễn Thị Thu Hiền\* , Lê Hồng Thu, Vũ Thị Oanh**

*Trường Đại học Công nghệ Thông tin và Truyền thông – Đại học Thái Nguyên*

### TÓM TẮT

Ngày nay trong thời kỳ công nghiệp hóa hiện đại hóa các dây chuyền sản xuất, động cơ không đồng bộ rotor lồng sóc đang được sử dụng rộng rãi do có cấu tạo đơn giản, giá thành rẻ, dễ chế tạo, quá trình vận hành an toàn và tin cậy. Trong phạm vi bài báo này nhóm tác giả đã nghiên cứu phương pháp điều khiển phản hồi trạng thái và kiểm nghiệm được ứng dụng của phương pháp này vào động cơ không đồng bộ ba pha rotor lồng sóc. Kết quả cho thấy khi động cơ mang tính chất tuyến tính thì thời gian xác lập là nhanh hơn so với khi động cơ mang tính phi tuyến. Phương pháp này cho thấy tính linh hoạt toàn diện và đối tượng điều khiển đang sử dụng rộng rãi nhất hiện nay. Đây sẽ là cơ sở để xây dựng các hệ thống điều khiển có chất lượng cao về độ chính xác, ổn định và thỏa mãn đối với các hệ thống truyền động có yêu cầu nghiêm ngặt về mặt động học.

**Từ khóa:** *Điều khiển tự động; động cơ không đồng bộ rotor lồng sóc; phản hồi trạng thái; điều khiển; tuyến tính hóa.*

*Ngày nhận bài: 31/5/2019; Ngày hoàn thiện: 01/7/2019; Ngày đăng: 26/7/2019*

## BUILDING THE STATUS FEEDBACK MODEL FOR MOTOR CONTROL WITHOUT SYNCHRONIZATION

**Nguyen Thi Thu Hien\* , Le Hong Thu, Vu Thi Oanh**

*University of Information and Communication Technology - TNU*

### ABSTRACT

Nowaday, in the period of industrialization and modernization of production lines, Asynchronous rotor squirrel cage motors are widely used due to its simple structure, low cost, easy to manufacture, safe and reliable operation process. Within the scope of this article, the authors have researched the method of controlling state feed back and have tested the applications of this method in asynchronous rotor squirrel cage motors. The results showed that the energy is linear, so the setting time is faster than the nonlinear energy. This method showed the most flexible and widely used control objects. The results would be a good basis for building high quality control systems about accuracy, stability and satisfaction for drive systems with strict dynamical requirements.

**Keywords:** *Automatic control; asynchronous rotor rotor squirrel; status feedback; control; linearization*

*Received: 31/5/2019; Revised: 01/7/2019; Published: 26/7/2019*

\* Corresponding author. Email: [ntthien@ictu.edu.vn](mailto:ntthien@ictu.edu.vn)

**1. Mở đầu**

Động cơ không đồng bộ (ĐC KĐB) rotor lồng sóc có ưu nhược điểm như: cấu tạo đơn giản, dễ chế tạo, vận hành tin cậy an toàn và giá thành rẻ nhưng vấn đề điều khiển lại gặp rất nhiều khó khăn do tính phi tuyến của ĐC KĐB. Để động cơ làm việc một cách chính xác và ổn định có nhiều phương pháp điều khiển khác nhau như dùng phương pháp điều khiển PID kinh điển, có thể kết hợp PID với bộ điều khiển mờ... để tạo ra một bộ điều khiển đảm bảo được yêu cầu công nghệ. Tuy nhiên mỗi phương pháp đều có ưu điểm và nhược điểm, nhưng đều chung một mục đích là đảm bảo được là hệ điều khiển phải đơn giản, ổn định, chính xác, chi phí thấp và cho hiệu quả cao. Phương pháp này sử dụng các tín hiệu ở đầu ra phản hồi về để điều khiển động cơ sao cho động cơ vận hành theo đúng yêu cầu công nghệ đã đặt ra, đáp ứng nhanh các tín hiệu đầu vào, loại bỏ được các tín hiệu nhiễu trong hệ thống. [1]

Nội dung nghiên cứu của bài viết đã phân nào khẳng định kết quả đạt được khi áp dụng phương pháp này trên hệ truyền động ĐC KĐB rotor lồng sóc khi hệ mang tính chất tuyến tính và phi tuyến.

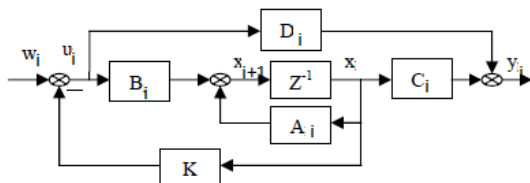
**2. Phương pháp phản hồi trạng thái**

**2.1. Phương pháp phản hồi trạng thái cho hệ tuyến tính**

Ta có hệ phương trình trạng thái

$$\begin{aligned} x(i) &= A(i)x(i) + B(i)u(i) \\ y(i) &= C(i)x(i) + D(i)u(i) \end{aligned} \tag{1}$$

Từ hệ phương trình ta có sơ đồ cấu trúc phản hồi trạng thái như sau



**Hình 1.** Mô hình điều khiển phản hồi trạng thái  
Với:  $u(i) = w(i) - K x(i)$  (2)

$$w(i) = 0$$

thay (2) vào (1) ta được:

$$x(i+1) = (A(i) - B(i)K)x(i) + B(i)w(i) \tag{3}$$

$$y = (C(i) - D(i)K)x(i) + D(i)w(i)$$

Ta phải thiết kế K sao cho ma trận  $[A(i) - B(i)K]$  nhận n giá trị  $s_i$  với  $i=1,2,\dots,n$ , đã chọn trước từ yêu cầu về chất lượng cần có của hệ thống.

**2.2. Phương pháp phản hồi trạng thái cho hệ phi tuyến [2]**

Xét hệ phi tuyến được mô tả bởi phương trình trạng thái như sau:

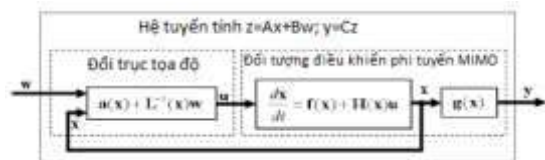
$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x) + H(x)u = f(x) + \sum_{i=1}^m h_i(x)u_i \\ y = g(x) \end{cases} \tag{4}$$

Trong đó

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}; u = \begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{pmatrix}; g(x) = \begin{pmatrix} g_1(x) \\ \vdots \\ g_m(x) \end{pmatrix}$$

$$H(x) = (h_1(x), h_2(x), \dots, h_m(x))$$

Thiết kế bộ điều khiển phản hồi trạng thái cho hệ phi tuyến (4) ta thực hiện tuyến tính hóa chính xác. Từ đó ta có được mô hình tuyến tính hóa chính xác hệ phi tuyến như sau:



**Hình 2.** Điều khiển tuyến tính hóa chính xác quan hệ vào ra hệ phi tuyến MIMO

**3. Xây dựng mô hình toán học ĐC KĐB rotor lồng sóc [3], [4]**

**3.1. Mô hình trạng thái liên tục trên hệ trục tọa độ dq**

Ta có phương trình

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \left( \frac{1}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{T_s} \right) i_d + \omega i_q + \left( \frac{1-\sigma}{\sigma L_s} \right) \psi_{rd} + \left( \frac{1-\sigma}{\sigma} \right) \omega \psi_{rq} + \left( \frac{1}{\sigma L_s} \right) u_{id} \\ \frac{di_q}{dt} &= -\omega i_d - \left( \frac{1}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{T_s} \right) i_q - \left( \frac{1-\sigma}{\sigma} \right) \omega \psi_{rd} + \left( \frac{1-\sigma}{\sigma L_s} \right) \psi_{rq} + \left( \frac{1}{\sigma L_s} \right) u_{iq} \\ \frac{d\psi_{rd}}{dt} &= \frac{1}{T_s} i_d - \frac{1}{T_s} \psi_{rd} + (\omega_1 - \omega) \psi_{rq} \\ \frac{d\psi_{rq}}{dt} &= \frac{1}{T_s} i_q - (\omega_1 - \omega) \psi_{rd} - \frac{1}{T_s} \psi_{rq} \end{aligned} \tag{5}$$

Trong đó:

$$\psi_{rd} = \frac{\psi_{rd}}{L_m}, \psi_{rq} = \frac{\psi_{rq}}{L_m}$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad \text{Hệ số từ tán toàn phần}$$

$$T_s = \frac{L_s}{R_s}, T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad \text{Hằng số thời gian stator, rotor}$$

Từ hệ (5) ta có thể viết lại mô hình trạng thái dưới dạng sau:

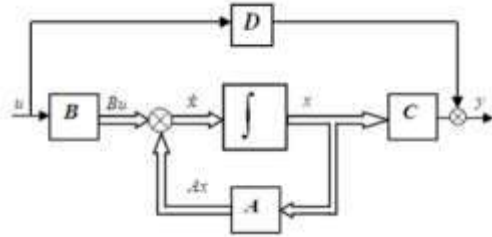
$$\begin{cases} \frac{dz}{dt} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó các ma trận

$$A = \begin{pmatrix} -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{T_r}\right) & \omega_s & \frac{1-\sigma}{\sigma T_s} & \frac{1-\sigma}{\sigma} \omega_s \\ -\omega_s & -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{T_r}\right) & -\frac{1-\sigma}{\sigma} \omega_s & \frac{1-\sigma}{\sigma T_s} \\ \frac{1}{T_r} & 0 & \frac{1}{T_r} & -(\omega_s - \omega) \\ 0 & \frac{1}{T_r} & -(\omega_s - \omega) & \frac{1}{T_r} \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; D = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Ta có mô hình cấu trúc trạng thái liên tục của ĐC KĐB trên hệ tọa độ dq như hình 3 dưới đây.



Hình 3. Mô hình trạng thái liên tục của ĐC KĐB trên hệ tọa độ dq

### 3.2. Mô hình trạng thái gián đoạn trên hệ trục tọa độ dq

Ta có hệ phương trình trạng thái gián đoạn

$$x(i+1) = A(i)x(i) + B(i)u(i) \quad (7)$$

$$y(i) = C(i)x(i) + D(i)u(i)$$

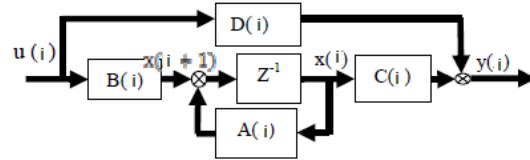
Với các biến đầu vào  $u_{sd}$ ,  $u_{sq}$  và  $\omega_s$  là hằng số trong phạm vi chu kỳ trích mẫu T

Với các ma trận trạng thái như sau:

$$A(i) = \begin{pmatrix} 1 - \frac{T}{\sigma} \left( \frac{1}{T_s} + \frac{1-\sigma}{T_r} \right) & \omega_s T & \frac{1-\sigma T}{\sigma T_s} & \frac{1-\sigma}{\sigma} \omega T \\ -\omega_s T & 1 - \frac{T}{\sigma} \left( \frac{1}{T_s} + \frac{1-\sigma}{T_r} \right) & -\frac{1-\sigma}{\sigma} \omega T & \frac{1-\sigma T}{\sigma T_s} \\ \frac{T}{T_r} & 0 & 1 - \frac{1}{T_r} & (\omega_s - \omega) T \\ 0 & \frac{T}{T_r} & -(\omega_s - \omega) T & 1 - \frac{T}{T_r} \end{pmatrix}$$

$$B(i) = \begin{pmatrix} \frac{T}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{T}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}; C(i) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; D(i) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Ta có mô hình hệ phương trình trạng thái gián đoạn của ĐC KĐB được mô tả như hình 4.



Hình 4. Mô hình trạng thái gián đoạn của ĐC KĐB trên hệ tọa độ dq

## 4. Thiết kế bộ phản hồi trạng thái điều khiển ĐC KĐB

### 4.1. Thiết kế bộ điều khiển phản hồi trạng thái điều khiển ĐC KĐB 3 pha mang tính chất tuyến tính

Xét khi  $\omega$  thay đổi quanh điểm làm việc. Khi động cơ chạy với momen tải  $m_c = 50(N.m)$ , ta đo được tốc độ  $\omega_s = 314,1593 \text{ rad/s}$ ,  $\omega = 303,6873 \text{ rad/s}$

Ta tìm được các ma trận A(i), B(i), C(i), D(i).

Thông số của ĐC KĐB như sau:

$P_{dm} = 0,37 \text{ kw}$ ,  $n = 3000 \text{ v/p}$ ,  $\eta = 70\%$ ,  $\cos\phi = 0,8$ ,  $2p = 2$ . Thay các thông số của động cơ vào hệ phương trình trạng thái của động cơ ta có:

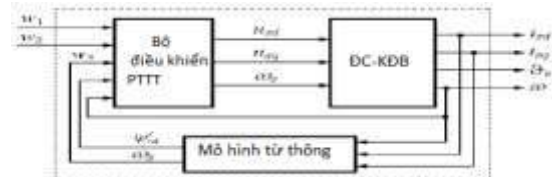
$$x(i+1) = \begin{pmatrix} 0,2811 & 0,9425 & 0,3507 & 18,4303 \\ -0,9425 & 0,2811 & -18,4303 & 0,3507 \\ 0,0174 & 0 & 0,9826 & 0,0314 \\ 0 & 0,0174 & -0,0314 & 0,9826 \end{pmatrix} x(i) + \begin{pmatrix} 0,4986 & 0 \\ 0 & 0,4986 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} u(i) \quad (8)$$

$$y(i) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} x(i) + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} u(i)$$

### 4.2. Thiết kế bộ điều khiển phản hồi trạng thái điều khiển ĐC KĐB 3 pha mang tính chất phi tuyến

#### 4.2.1. Tuyến tính hóa chính xác mô hình ĐC KĐB

Mô hình trạng thái của ĐC KĐB sau đã tuyến tính hóa.



Hình 5. Sơ đồ cấu trúc của đối tượng ĐC KĐB sau khi thực hiện tuyến tính hóa chính xác

Mô hình tuyến tính thu được sau khi đã tuyến tính hóa chính xác như sau:

$$Y(x) = \begin{pmatrix} \frac{1}{s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{s} \end{pmatrix} \text{ hay có thể viết } \begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = w_1 \\ \frac{di_{sq}}{dt} = w_2 \\ \frac{dv_s}{dt} = w_3 \end{cases}$$

**4.2.2. Cấu trúc điều khiển tách kênh trực tiếp**  
Sau khi đã thực hiện tuyến tính hóa chính xác. Ta tách mô hình động cơ thành 2 thành phần: Thành phần tạo từ thông (dòng  $i_{sd}$ ), thành phần tạo momen (dòng  $i_{sq}$ ).

Mô hình phần điện (tạo từ thông)

$$\begin{cases} \dot{i}_{sd} = w_1 \\ \dot{\Psi}_{rd} = \frac{1}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \Psi_{rd} \end{cases} \quad (9)$$

Đặt các biến trạng thái và các ma trận

$$\begin{cases} x_1 = \begin{pmatrix} i_{sd} \\ \Psi_{rd} \end{pmatrix}; u_1 = (w_1); y_1 = (i_{sd}) \\ A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{T_r} & -\frac{1}{T_r} \end{pmatrix}; B_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}; C_1 = (1 \ 0) \end{cases} \quad (10)$$

Mô hình (10) được viết lại dưới dạng mô hình trạng thái phần điện như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 u_1 \\ y_1 = C_1 x_1 \end{cases} \quad (11)$$

Mô hình phần cơ (tạo momen)

$$\begin{cases} \dot{m}_M = k w_2 \\ \dot{\omega} = \frac{z_p}{J} (m_M - m_C) \end{cases} \quad (12)$$

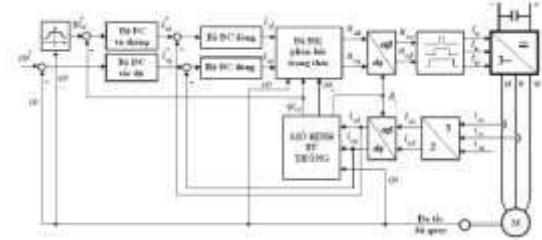
Đặt các biến trạng thái và các ma trận:

$$\begin{cases} x_2 = \begin{pmatrix} m_M \\ \omega \end{pmatrix}; u_2 = (w_2); y_2 = (m_M); n_2 = m_C \\ A_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{z_p}{J} & 0 \end{pmatrix}; B_2 = \begin{pmatrix} k \\ 0 \end{pmatrix}; C_2 = (1 \ 0); D_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{z_p}{J} \end{pmatrix} \end{cases}$$

Mô hình (12) được viết lại dưới dạng mô hình trạng thái phần cơ như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = A_2 x_2 + B_2 u_2 + D_2 n_2 \\ y_2 = C_2 x_2 \end{cases} \quad (13)$$

Dựa trên những kết quả đó ta thay thế bộ điều chỉnh dòng hai chiều trong sơ đồ cấu trúc hệ truyền động tựa theo từ thông roto kinh điển bằng một khâu phản hồi trạng thái. Từ đó ta có sơ đồ cấu trúc điều khiển tách kênh của ĐC KĐB dưới đây:



**Hình 6.** Cấu trúc điều khiển tách kênh trực tiếp của ĐC KĐB

### 4.3. Tổng hợp các bộ điều khiển [5]

#### 4.3.1. Tổng hợp bộ điều chỉnh dòng điện $R_{i_{sq}}$ và bộ điều chỉnh tốc độ $R_{\omega}$

Giả thiết điều chỉnh tốc độ động cơ ở mức dưới tốc độ định mức. Tổng hợp mạch vòng điều khiển gồm các khâu điều chỉnh tốc độ và khâu điều chỉnh dòng, khi đó ta coi khâu nghịch lưu có quán tính rất nhỏ  $T_{nl} = 0,0017(s)$ .

Từ đó ta có được bộ điều khiển dòng và tốc độ như sau:

$$R_{i_{sq}} = \frac{\frac{1}{D} s + 1}{2 \frac{K_{nl}}{\sigma L_s D} T_{nl} s} = \frac{s + D}{2 \frac{K_{nl}}{\sigma L_s} T_{nl} s} \quad (14)$$

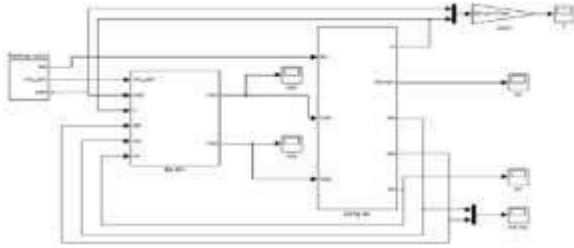
$$R_{\omega} = \frac{1 + 2(T_{nl} + 2T_C)s}{C 8 T_C^2 s} \quad (15)$$

#### 4.3.2. Tổng hợp bộ điều chỉnh $R_{i_{sd}}$

Khi bắt đầu khởi động ta khởi động ĐC KĐB như máy điện một chiều sau khi đã ổn định việc cấp nguồn phía kích từ  $i_{sd}$  ta mới cấp momen quay  $i_{sq}$ . Ta có thể bỏ qua ảnh hưởng của phản ứng trong quá trình khởi động khi đó ta có bộ điều khiển dòng điện:

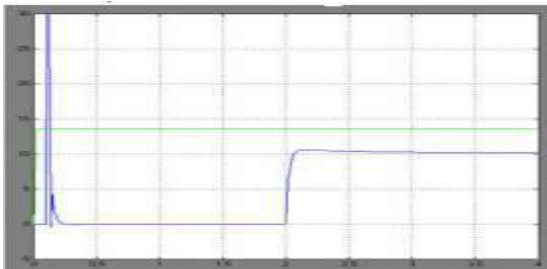
$$R_{i_{sd}} = \frac{(1 + T_{\sigma} s)}{2 K_{nl} \frac{T_{\sigma}}{\sigma L_s} T_{nl} s} \quad (16)$$

Đến đây ta đã xây dựng được mô hình mô phỏng phản hồi trạng thái hệ phi tuyến



**Hình 7.** Sơ đồ mô phỏng phản hồi trạng thái hệ phi tuyến

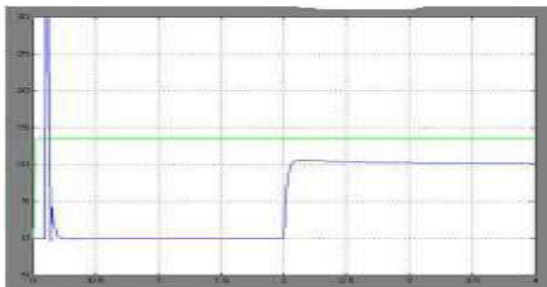
Sử dụng phần mềm Matlab ta sẽ thu được dạng sóng của hai thành phần tạo momen dòng  $i_{sq}$  và thành phần tạo từ thông dòng  $i_{sd}$ , như dạng hình 8.



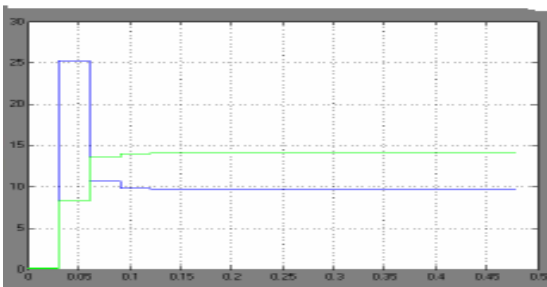
**Hình 8.** Mô phỏng dòng điện  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$

Qua kết quả mô phỏng ta thấy dòng khi bắt đầu khởi động tăng nhanh, dòng  $i_{sd}$  đạt giá trị xác lập, còn dòng  $i_{sq}=0$ . Khi bắt đầu có tải dòng  $i_{sq}$  tăng dần và đạt giá trị xác lập.

So sánh kết quả mô phỏng dòng điện  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  của hệ phi tuyến và hệ tuyến tính ta có kết quả như hình 9, hình 10



**Hình 9.** Mô phỏng dòng điện  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  phi tuyến



**Hình 10.** Mô phỏng dòng điện  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  tuyến tính

Trong đó dòng  $i_{sq}$  là thành phần tạo momen và dòng  $i_{sd}$  là thành phần tạo từ thông

Dòng điện  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  ở 2 hình 9 và hình 10 cho thấy khi khởi động và đóng tải vào dòng điện thay đổi. Ở hình 9 cho thấy dòng điện đạt giá trị xác lập nhanh hơn nhưng giá trị xác lập cả hai mô hình đều đạt kết quả như nhau.

## 5. Kết luận

Nghiên cứu này đã giải quyết được một số vấn đề sau:

Nghiên cứu mô hình trạng thái của động cơ không đồng bộ trên hệ trục tọa độ dq, phân tích bản chất của động cơ

Nghiên cứu về phương pháp phản hồi trạng thái và xây dựng bộ điều khiển phản hồi trạng thái cho hệ tuyến tính và hệ phi tuyến

Bộ điều khiển phản hồi trạng thái có khả năng ứng dụng tốt cho ĐC KĐB với các kết quả nhận được là:

Hai thành phần tạo momen dòng  $i_{sq}$  và thành phần tạo từ thông dòng  $i_{sd}$ , ban đầu có dao động và đạt giá trị xác lập gần giống nhau.

Với mô hình phản hồi trạng thái hệ tuyến tính hệ đạt được giá trị xác lập nhanh trong khoảng 0,15s và nhanh hơn mô hình trạng thái hệ phi tuyến.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Vũ Gia Hạnh, Trần Khánh Hà, Phan Tử Thụ, Nguyễn Văn Sáu, *Máy điện 2*, Nxb Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội, 2003.
- [2]. GS. TS Nguyễn Doãn Phước, *Phân tích và điều khiển hệ phi tuyến*, Nhà xuất bản Bách khoa, Hà Nội, 2012.
- [3]. Hoàng Đức Hùng, *Điều khiển thích nghi hằng số thời gian Rotor của động cơ không đồng bộ 3 pha rotor lồng sóc*, Đà Nẵng, 2011
- [4]. Bùi Quốc Khánh, Nguyễn Văn Liễn, Phạm Quốc Hải, Dương Văn Nghi, *Điều chỉnh tự động truyền động điện*, Nxb Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2004.
- [5]. Phạm Tâm Thành, Nguyễn Phùng Quang, *Điều khiển tốc độ động cơ không đồng bộ rotor lồng sóc dựa trên cấu trúc tách kênh trực tiếp*, CD tuyển tập Hội nghị cơ điện tử toàn quốc lần thứ 6, VCM – 2012, tr. 202-209 Hà Nội, 2012.

