

## SO SÁNH KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN TRỰC TIẾP MÔ-MEN VÀ PHƯƠNG PHÁP ĐỊNH HƯỚNG TRƯỜNG CHO ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ

### A COMPARATIVE STUDY BETWEEN DIRECT TORQUE CONTROL TECHNIQUE AND FIELD ORIENTED CONTROL METHOD FOR INDUCTION MOTOR

Huỳnh Thanh Tường<sup>1</sup>, Nguyễn Thuận Hải Đăng<sup>2</sup>, Lương Hoài Thương<sup>3</sup>,  
 Nguyễn Thanh Ngọc<sup>4</sup>, Nguyễn Trường Kỳ<sup>5</sup>, Thạch Thị SoChet<sup>6</sup>

<sup>1,3,4,5,6</sup> Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long, Việt Nam

<sup>2</sup> Trường Trung cấp nghề - GDTX Tháp Mười, Việt Nam

Ngày toà soạn nhận bài 17/01/2019, ngày phản biện đánh giá 27/3/2019, ngày chấp nhận đăng 20/9/2019

#### TÓM TẮT

Động cơ không đồng bộ ba pha được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp vì các ưu điểm như cấu tạo đơn giản, chắc chắn, vận hành tin cậy, ít bảo trì sửa chữa, giá thành thấp, hiệu suất cao. Bài báo trình bày nghiên cứu so sánh điều khiển tốc độ định hướng từ thông (FOC) và điều khiển trực tiếp mô-men xoắn (DTC) của động cơ không đồng bộ sử dụng bộ quan sát từ thông có khả năng thích nghi. Các đặc điểm chính của điều khiển FOC và điều khiển DTC được nghiên cứu bằng mô phỏng, tập trung vào những thuận lợi và bất lợi của chúng. Hiệu suất của hai phương pháp điều khiển này được đánh giá dựa trên mô-men xoắn, dòng điện gợn sóng, đáp ứng nhất thời đối với sự thay đổi mô-men tải. Tuy nhiên, chúng ta có thể quan sát sự chuyển biến nhẹ của điều khiển DTC so với điều khiển FOC liên quan đến hiệu suất điều khiển từ thông động và sự phức tạp của việc thực hiện. Vì vậy, sự lựa chọn điều khiển DTC hoặc FOC sẽ phụ thuộc chủ yếu vào các yêu cầu cụ thể của ứng dụng.

**Từ khóa:** điều khiển phi tuyến; điều khiển trực tiếp mômen; điều khiển vector; định hướng trường; động cơ không đồng bộ.

#### ABSTRACT

Three-phase induction motors are widely used in industry because of their advantages such as simple structure, solid, reliable operation, low maintenance and repairs, low-cost and high efficiency. This paper presents a comparative study of field-oriented control (FOC) and direct torque control (DTC) of induction motors using an adaptive flux observer. The main characteristics of field-oriented control and direct torque control schemes are studied by simulation, emphasizing their advantages and disadvantages. The performances of the two control schemes are evaluated in terms of torque, current ripples and transient responses to load torque variations. We can nevertheless observe a slight advance of the DTC scheme compared to FOC scheme regarding the dynamic flux control performance and the implementation complexity. Consequently, the choice of one or the other scheme will depend mainly on specific requirements of the application.

**Keywords:** Nonlinear control; Direct torque control; Vector control; Field orientation; Asynchronous motor.

#### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ [1]

Cùng với sự phát triển ngày càng lớn mạnh của các ngành công nghiệp, đặc biệt là

ngành điều khiển tự động, yêu cầu chất lượng đối với các loại máy móc ngày càng cao: cơ cấu máy móc đòi hỏi phải đạt độ nhanh, nhạy, chính xác cao, năng lượng phải được

sử dụng có hiệu quả. Động cơ không đồng bộ chính thức được công nhận từ những năm 1970 tuy nhiên chúng không được sử dụng rộng rãi bởi vì có những khó khăn mà chúng mang lại: khó điều khiển và chất lượng thấp. Tuy nhiên, cùng với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ chế tạo các linh kiện bán dẫn công suất và các bộ vi xử lý có khả năng xử lý mạnh mẽ, những khó khăn đó đã được khắc phục. Với những ưu điểm của mình, động cơ không đồng bộ đang được xem là một trong những giải pháp cho những vấn đề đã nêu ở trên. Một số ưu điểm nổi bật của động cơ tuyến tính: tốc độ cao, độ chính xác cao, đáp ứng nhanh, độ bền cơ học cao.

Ngày nay, cùng với sự phát triển của lý thuyết điều khiển tự động, kỹ thuật điều khiển động cơ không đồng bộ cũng thay đổi nhanh chóng. Trong lý thuyết điều khiển hiện đại, động cơ không đồng bộ ba pha được xem là một đối tượng phi tuyến (vì mô hình toán học của động cơ không đồng bộ được mô tả bằng các phương trình vi phân bậc cao). Để điều khiển động cơ một cách chính xác, ta phải áp dụng các phương pháp điều khiển phi tuyến như: điều khiển trực tiếp mô-men (direct torque control - DTC), điều khiển trượt (sliding mode control - SMC), điều khiển thụ động (passive control), điều khiển thích nghi (adaptive control)... để tác động lên mô hình toán học của động cơ.

Trong bài báo này, phương pháp điều khiển trực tiếp mô-men được sử dụng mô hình toán học của động cơ. Mục đích chính của phương pháp này là tiến hành đổi biến điều khiển sao cho ngõ ra tuyến tính với biến điều khiển mới.

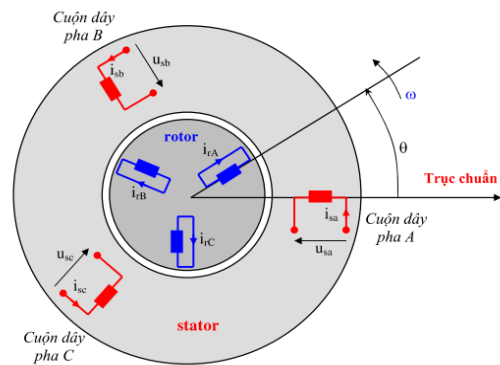
## 2. ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ BA PHA [2]

Động cơ không đồng bộ được mô tả bởi một hệ phương trình vi phân bậc cao. Với cấu trúc phân bố các cuộn dây phức tạp về mặt không gian và các mạch từ móc vòng ta phải chấp nhận một số các điều kiện sau đây khi mô hình hóa động cơ. Bỏ qua các tổn hao trong lõi sắt từ, không xét tới ảnh hưởng của tần số và thay đổi của nhiệt độ đối với điện trở, điện cảm tới các cuộn dây. Bỏ qua

bão hòa mạch từ, tự cảm và hồ cảm của mỗi cuộn dây được coi là tuyến tính. Dòng từ hóa và từ trường được phân bố hình sin trên bề mặt khe từ.

### 2.1. Xây dựng mô hình động cơ không đồng bộ ba pha

Một số qui ước các ký hiệu cho các đại lượng và các thông số của động cơ.



Hình 1. Mô hình đơn giản của động cơ không đồng bộ ba pha

Các thông số của động cơ không đồng bộ ba pha:

$R_s$ : điện trở cuộn dây stator

$R_r$ : điện trở rotor qui đổi về stator

$L_m$ : hồ cảm giữa stator và rotor

$L_{\sigma s}$ : điện kháng tản cuộn dây stator

$L_{\sigma r}$ : điện kháng tản cuộn dây rotor qui đổi về stator

$p$ : số đôi cực của động cơ

$J$ : moment quán tính cơ ( $\text{kg.m}^2$ )

Các thông số định nghĩa thêm:

$L_s = L_m + L_{\sigma s}$  điện cảm stator

$L_r = L_m + L_{\sigma r}$  điện cảm rotor

$T_s = \frac{L_s}{R_s}$  hằng số thời gian stator

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$  hằng số thời gian rotor

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$  hệ số từ tản tổng

$T_{\text{samp}}$  chu kỳ lấy mẫu

Từ hệ qui chiếu rotor quy về hệ qui chiếu stator theo các phương trình:

$$\vec{i}_r^r = \vec{i}_r^s e^{-j\theta} \quad (1)$$

$$\vec{\psi}_r^r = \vec{\psi}_r^s e^{-j\theta} \quad (2)$$

Từ hai phương trình trên ta có:

$$0 = R_r \vec{i}_r^s + \frac{d\vec{\psi}_r^s}{dt} - j\omega \vec{\psi}_r^s \quad (3)$$

Vậy từ các phương trình trên ta có hệ phương trình:

$$\vec{u}_s^s = R_s \cdot \vec{i}_s^s + \frac{d\vec{\psi}_s^s}{dt} \quad (4a)$$

$$0 = R_r \vec{i}_r^s + \frac{d\vec{\psi}_r^s}{dt} - j\omega \vec{\psi}_r^s \quad (4b)$$

$$\vec{\psi}_s^s = L_s \vec{i}_s^s + L_m \vec{i}_r^s \quad (4c)$$

$$\vec{\psi}_r^s = L_m \vec{i}_s^s + L_r \vec{i}_r^s \quad (4d)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (\vec{\psi}_s^s \times \vec{i}_s^s) = -\frac{3}{2} p (\vec{\psi}_r^s \times \vec{i}_r^s) \quad (4e)$$

$$T_e = T_L + \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} \quad (4f)$$

Để xác định dòng điện stator và từ thông rotor, từ (4c) và (4d) có:

$$\vec{i}_r^s = \frac{1}{L_r} \left( \vec{\psi}_r^s - L_m \vec{i}_s^s \right) \quad (5)$$

$$\vec{\psi}_s^s = L_s \vec{i}_s^s + \frac{L_m}{L_r} \left( \vec{\psi}_r^s - L_m \vec{i}_s^s \right) \quad (6)$$

Thay (5), (6) vào (4a, b),

Phương trình (4a, b) trở thành:

$$\vec{u}_s^s = R_s \cdot \vec{i}_s^s + \sigma L_s \frac{d\vec{i}_s^s}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\vec{\psi}_r^s}{dt} \quad (7)$$

$$0 = -\frac{L_m}{T_r} \vec{i}_s^s + \left( \frac{1}{T_r} - j\omega \right) \vec{\psi}_r^s + \frac{d\vec{\psi}_r^s}{dt} \quad (8)$$

Suy ra

$$\frac{d\vec{\psi}_r^s}{dt} = \frac{L_m}{T_r} \vec{i}_s^s - \left( \frac{1}{T_r} - j\omega \right) \vec{\psi}_r^s \quad (9)$$

Thay từ thông từ (9) vào (7) ta được:

$$\frac{d\vec{i}_s^s}{dt} = -\left( \frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r} \right) \vec{i}_s^s + \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} \left( \frac{1}{T_r} - j\omega \right) \vec{\psi}_r^s + \frac{1}{\sigma L_s} \vec{u}_s^s \quad (10)$$

$$\frac{d\vec{\psi}_r^s}{dt} = \frac{L_m}{T_r} \vec{i}_s^s - \left( \frac{1}{T_r} - j\omega \right) \vec{\psi}_r^s \quad (11)$$

Chuyển sang dạng các thành phần của vector trên hai trục tọa độ:

$$\frac{di_{s\alpha}}{dt} = -\left( \frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r} \right) i_{s\alpha} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r L_m} \psi_{r\alpha} + \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} \omega \psi_{r\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\alpha} \quad (12)$$

$$\frac{di_{s\beta}}{dt} = -\left( \frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r} \right) i_{s\beta} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r L_m} \psi_{r\beta} - \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} \omega \psi_{r\alpha} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\beta} \quad (12)$$

$$\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\alpha} - \frac{1}{T_r} \psi_{r\alpha} - \omega \psi_{r\beta} \quad (4d)$$

$$\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{s\beta} - \frac{1}{T_r} \psi_{r\beta} + \omega \psi_{r\alpha}$$

Thay các thành phần của vector từ thông rotor và dòng stator ta được:

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}) \quad (13)$$

### 3. ĐIỀU KHIỂN ĐỊNH HƯỚNG TỪ THÔNG ROTOR [3], [4], [5]

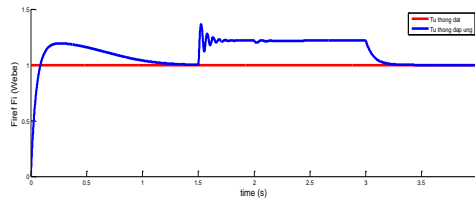
#### 3.1. Điều khiển định hướng từ thông rotor động cơ không đồng bộ

Phương pháp điều khiển gián tiếp: trong phương pháp điều khiển gián tiếp thì góc  $\theta$  được tính toán dựa trên tốc độ trượt và thông tin về tốc độ động cơ. Ta thấy đặc tính của phương pháp này phụ thuộc rất nhiều vào việc xác định chính xác các thông số động cơ. Phương pháp FOC đơn giản hơn phương pháp trực tiếp DTC. Điều khiển định hướng từ trường đạt được việc thay đổi mô-men và từ thông dẫn đến việc điều khiển được từ

thông và mô-men tương tự như động cơ DC kích từ độc lập. Định hướng được từ thông tối ưu được mô-men. Điều khiển vòng kín mô-men được điều khiển gián tiếp.

### 3.2. Kết quả mô phỏng FOC

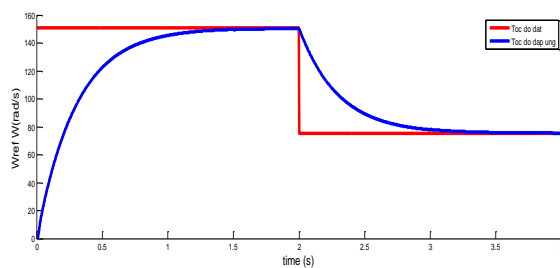
#### 3.2.1. Từ thông của động cơ



Hình 2. Từ thông của động cơ

Hình 2 so sánh từ thông đặt trước và từ thông đo được trực tiếp từ động cơ. Kết quả mô phỏng cho thấy, đáp ứng của từ thông thực tế có độ vọt lố 30 %.

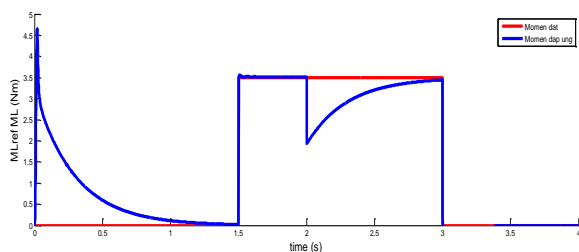
#### 3.2.2. Tốc độ của động cơ



Hình 3. Tốc độ của động cơ

Hình 3 so sánh tốc độ đặt trước và tốc độ đo được trực tiếp từ động cơ. Kết quả mô phỏng cho thấy, đáp ứng của tốc độ thực tế không có độ vọt lố.

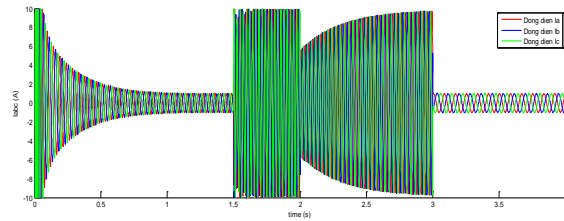
#### 3.2.3. Mô-men của động cơ



Hình 4. Mô-men của động cơ

Hình 4 so sánh mô-men đặt trước và mô-men đo được trực tiếp từ động cơ. Kết quả mô phỏng cho thấy, đáp ứng của mô-men thực tế có độ vọt lố 0.3 % (tại 2s là lúc đảo chiều quay động cơ).

#### 3.2.4. Dòng điện ba pha của động cơ



Hình 5. Dòng điện ba pha của động cơ

Hình 5 so sánh dòng điện đặt trước và dòng điện đo được trực tiếp từ động cơ. Dòng điện khởi động bằng 4 lần dòng xác lập (0-1giây: quá trình khởi động 40A; 1-1,5 giây: quá trình định mức 10A).

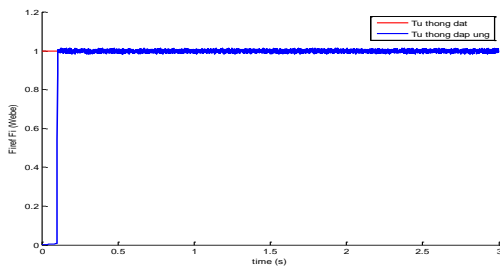
### 4. PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN TRỰC TIẾP MÔ-MEN (DTC) [6], [7], [8], [9]

#### 4.1. Điều khiển trực tiếp mô-men động cơ không đồng bộ

DTC là phương pháp điều khiển trực tiếp từ thông và mô-men. Hai đại lượng được đo là điện áp và dòng điện stator. Điện áp đo là điện áp một chiều sau chỉnh lưu. Tín hiệu điện áp và dòng điện là đầu vào mô hình động cơ, để từ đó tính ra giá trị của từ thông và mô-men. Hai bộ so sánh các giá trị này với các giá trị đầu ra của hai bộ điều khiển. Dựa vào các giá trị đầu ra này, logic đóng mở xác định vị trí van đóng mở tối ưu. Vị trí van đóng mở làm thay đổi điện áp và dòng điện, nó lại ảnh hưởng tới mô-men và từ thông. Do đó, mỗi điện áp xung được xác định riêng rẽ. Hệ thống không sử dụng cảm biến tốc độ. Điều khiển mô-men và độ lớn từ thông có thể thực hiện bằng cách tác động trên thành tiếp tuyến và hướng tâm tương ứng của véc tơ không gian độ liên kết từ thông stator trong quỹ đạo của nó. Hai thành phần đó tỉ lệ trực tiếp với các thành phần của cùng véc tơ không gian điện áp trong cùng hướng. Các véc tơ điện áp được chọn lựa dựa trên sai lệch của từ thông và mô-men điện từ, với các giá trị đặt. Tùy thuộc vào trạng thái sai lệch của từ thông và mô-men điện từ, một véc tơ điện áp tối ưu đã định trước được chọn để điều chỉnh đại lượng về đúng với lượng đặt. Đáp ứng nhanh mô-men, ít phụ thuộc vào tham số động cơ.

## 4.2. Kết quả mô phỏng DTC

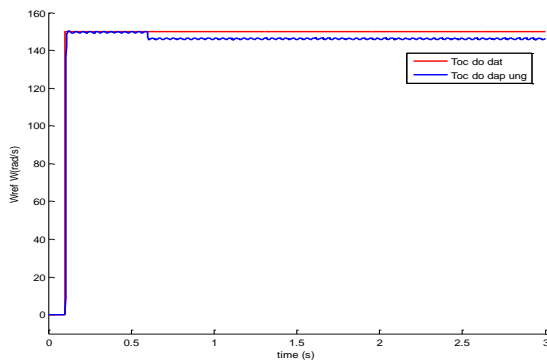
### 4.2.1. Từ thông của động cơ:



Hình 6. Từ thông của động cơ

Hình 6 so sánh từ thông đặt trước và từ thông đo được trực tiếp từ động cơ. Kết quả mô phỏng cho thấy, đáp ứng của từ thông thực tế có độ vọt lố 10 %.

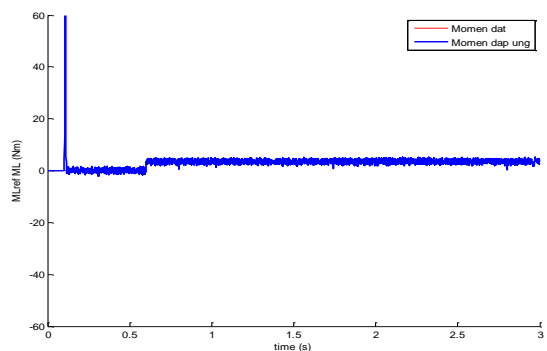
### 4.2.2. Tốc độ của động cơ:



Hình 7. Tốc độ của động cơ

Hình 7 so sánh tốc độ đặt trước và tốc độ đo được trực tiếp từ động cơ. Kết quả mô phỏng cho thấy, đáp ứng của tốc độ thực tế không có độ vọt lố (tại 0.6s là lúc có tải nên tốc độ thay đổi đột ngột).

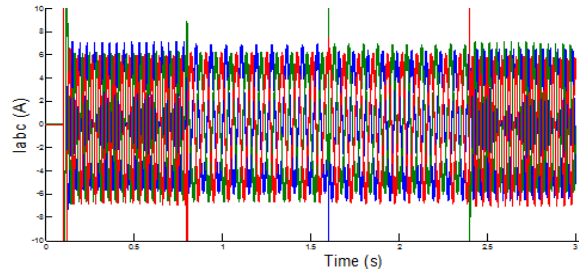
### 4.2.3. Mô-men của động cơ:



Hình 8. Mô-men của động cơ

Hình 8 so sánh mô-men đặt trước và mô-men đo được trực tiếp từ động cơ. Kết quả mô phỏng cho thấy, đáp ứng của mô-men thực tế có độ vọt lố 0.2 % (tại 0.6s là lúc có tải nên mô-men thay đổi đột ngột).

### 4.2.4. Dòng điện ba pha của động cơ



Hình 9. Dòng điện ba pha của động cơ

Hình 9 so sánh dòng điện khởi động và dòng điện đo được trực tiếp từ động cơ. Dòng điện khởi động bằng 2 lần dòng xác lập (0-0.2giây: quá trình khởi động 12A; 0.2-3 giây: quá trình định mức 6A).

## 5. SO SÁNH KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

### 5.1. So sánh

Bảng 1. So sánh đáp ứng DTC và FOC

Đáp ứng	FOC		DTC	
	Thời gian (s)	Độ vọt lố (%)	Thời gian (s)	Độ vọt lố (%)
Từ thông	0,3	30	0,1	10
Tốc độ	1,2	0	0,1	0
Mô-men	0,01	0,3	0,1	0,2
Dòng điện	1	300	0,2	100

### 5.2. Nhận xét

Bảng 2. Nhận xét hai phương pháp DTC và FOC

FOC	DTC
+ Từ thông vọt lố 30% (khoảng 0,3 giây). Như vậy đáp ứng từ thông đạt yêu cầu.	+ Từ thông vọt lố 10% (khoảng 0,1 giây). Như vậy đáp ứng từ thông đạt yêu cầu.
+ Tốc độ không vọt lố. Như vậy đáp ứng của tốc độ đạt yêu cầu, không có sai số tĩnh.	+ Tốc độ không vọt lố. Như vậy đáp ứng của tốc độ đạt yêu cầu, không có sai số tĩnh.

<p>+ Mô-men vọt ló 0,3% khoảng thời gian 0,01 giây. Mô-men của động cơ tăng theo mô-men tải đến giá trị đặt (3,5 N.m) với độ vọt ló cho phép.</p> <p>+ Dòng điện ba pha của động cơ tăng đến 40 (A) trong quá trình khởi động trong khoảng thời gian 0,1 giây. Sau đó, dòng điện xác lập tại giá trị 10 (A). Như vậy, dòng khởi động bằng 4 lần dòng xác lập.</p>	<p>+ Mô-men vọt ló 0,2% khoảng thời gian 0,1 giây. Mô-men của động cơ tăng theo mô-men tải đến giá trị đặt (3,5 N.m) với độ vọt ló cho phép.</p> <p>+ Dòng điện ba pha của động cơ tăng đến 12 (A) trong quá trình khởi động trong khoảng thời gian 0,1 giây. Sau đó, dòng điện xác lập tại giá trị 6 (A). Như vậy, dòng khởi động bằng 2 lần dòng xác lập.</p>
---	---

Qua kết quả mô phỏng trên Simulink/Matlab cho thấy phương pháp DTC đạt yêu cầu. Dòng điện và từ thông của động cơ đáp ứng nhanh, không vọt ló, không dao động. Mô-men, tốc độ động cơ bám khá sát giá trị đặt. Dòng điện khởi động bằng hai lần dòng xác lập. Bài báo này thành công góp phần kiểm chứng và phát triển phương pháp DTC và FOC, một phương pháp điều khiển linh hoạt, toàn diện trong không gian trạng thái vào đối tượng điều khiển đang được sử dụng rộng rãi hiện nay là động cơ không đồng bộ ba pha rotor lồng sóc. 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 hệ thống truyền động có yêu cầu nghiêm ngặt về mặt động học. Hướng phát triển của đề tài: thực hiện trên hệ thực.

## 6. KẾT LUẬN

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Phùng Quang, “Điều khiển tự động truyền động điện xoay chiều ba pha”, nhà xuất bản giáo dục, 1996.
- [2] Nguyễn Phùng Quang, “Matlab & Simulink”, NXB Khoa học và kỹ thuật Hà Nội, 2008.
- [3] Trần Công Bình, “Hệ Thống Điều Khiển Số”, NXB Đại Học Bách Khoa TP.HCM, 2007.
- [4] Yan Y, Wang S, Xia C, et al. “Hybrid control setmodel predictive control for field-oriented control of VSI-PMSM”. IEEE Trans Energy Convers; 31(4): 1622–1633, 2016.
- [5] Uddin MN, Zou H, Azevedo F. “Online loss-minimization-based adaptive flux observer for direct torque and flux control of PMSM drive”. IEEE Trans Ind Appl; 52(1): 425–431, 2016.
- [6] Zhang, Y.; Gao, J.; Qu, C. “Relationship Between Two Direct Power Control Methods for PWM Rectifiers Under Unbalanced Network”. IEEE Trans. Power Electron, 12: 186–197, 2016.
- [7] Wang, F.; Zhang, Z.; Davari, S.A.; Fotouhi, R.; Khaburi, D.A.; Rodriguez, J.; Kennel, R. An “Encoderless Predictive Torque Control for an Induction Machine With a Revised Prediction Model and EFOSMO”. IEEE Trans. Ind. Electron, 61: 6635–6644, 2014.
- [8] Preindl, M.; Bolognani, S. “Model Predictive Direct Torque Control With Finite Control Set for PMSM Drive Systems”, Part 1: Maximum Torque Per Ampere Operation. IEEE Trans. Ind. Inform, 56: 1003–1015, 2013.
- [9] Wang, F.; Davari, S.A.; Chen, Z.; Zhang, Z.; Khaburi, D.A.; Rodriguez, J.; Kennel, R. Finite “Control Set Model Predictive Torque Control of Induction Machine with a Robust Adaptive Observer”. IEEE Trans. Ind. Electron, 58: 1089–1099, 2016.

#### Tác giả chịu trách nhiệm bài viết:

Huỳnh Thanh Tường  
 Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long  
 Email: tuonght@vlute.edu.vn