

ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ KHÔNG CẦN CẢM BIẾN TỐC ĐỘ SỬ DỤNG LỌC KALMAN TRONG CẤU TRÚC CÓ TÁCH KÊNH TRỰC TIẾP

SPEED SENSORLESS CONTROL OF INDUCTION MOTORS USING KALMAN FILTER IN STRUCTURES WITH DIRECT DECOUPLING

Nguyễn Đình Hiếu, Nguyễn Phùng Quang

Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội

TÓM TẮT

Bài viết giới thiệu một cấu trúc điều khiển tốc độ quay động cơ không đồng bộ rotor lồng sóc không sử dụng cảm biến tốc độ áp dụng nguyên lý lọc Kalman. Hệ thống điều khiển được xây dựng theo phương pháp tựa theo từ thông rotor với cấu trúc có tách kênh trực tiếp. Bộ lọc Kalman thứ nhất sẽ ước lượng từ thông rotor. Sau đó tốc độ quay của động cơ sẽ được bộ lọc Kalman thứ hai ước lượng dựa trên giá trị từ thông thu được ở trên. Việc mô phỏng kiểm chứng được thực hiện trên nền phần mềm Matlab & Simulink và PLECS. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp điều khiển này đảm bảo được tính ổn định của hệ thống, độ chính xác của việc ước lượng từ thông và tốc độ quay là khá tốt ở cả quá trình đóng tải và đảo chiều.

ABSTRACT

The paper presents a speed sensorless control structure for induction motors with squirrel-cage rotor using Kalman filter algorithm. The control system is designed by using the method rotor flux orientation with direct decoupling structure. The first Kalman filter is used to estimate the rotor flux. Then speed is estimated by the second Kalman filter using the estimated flux. The validation is carried out by simulation with the software Mathlab & Simulink and PLECS. The simulation results show that this speed sensorless control method preserves the system stability, and the accuracy of rotor flux and speed estimation are good in both load imposition and speed reversal process.

Chữ viết tắt

ĐCKĐB	Động cơ không đồng bộ
TTHCX	Tuyến tính hóa chính xác
T ⁴ R	Tựa theo từ thông rotor

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong các hệ thống truyền động sử dụng ĐCKĐB hiện đại đều yêu cầu có đường phản hồi tốc độ của động cơ, do đó việc sử dụng cảm biến tốc độ gần như là một điều tất yếu. Tuy nhiên điều đó có thể làm giảm độ tin cậy của hệ thống đặc biệt trong những môi trường không thân thiện và làm giảm lợi thế của các hệ truyền động sử dụng ĐCKĐB. Chính vì thế đã dẫn đến ý tưởng loại bỏ khâu đo tốc độ quay trong hệ thống.

Các phương pháp để giải quyết vấn đề “điều khiển không cần đo tốc độ quay” rất phong phú và đa dạng. Tuy nhiên, như chúng ta đã biết các hệ điều chỉnh T⁴R đã được ứng dụng rất rộng rãi trong thực tế. Vì vậy, cần thiết

phải tìm hiểu, thiết kế những phương pháp để có thể áp dụng, cài đặt nó một cách dễ dàng và ít tốn kém vào các hệ điều chỉnh T⁴R đang được bán trên thị trường.

Ngoài ra, ĐCKĐB có hai đặc tính phi tuyến mà người làm điều khiển cần phải chú ý đó là cấu trúc phi tuyến và tham số phi tuyến.

Trong tài liệu [1], các tác giả đã chỉ ra rằng đặc tính phi tuyến thứ nhất chỉ có thể khắc phục được bằng phương pháp điều khiển phi tuyến, còn đặc tính phi tuyến thứ hai sẽ được xử lý bằng phương pháp nhận dạng và thích nghi. Và phương pháp điều khiển phi tuyến được các tác giả lựa chọn là TTHCX.

Bài viết này giới thiệu phương pháp điều khiển mà không cần đo tốc độ quay theo nguyên lý lọc Kalman trên nền hệ điều chỉnh T⁴R với cấu trúc có tách kênh trực tiếp trong [1, 2].

II. PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN SPEED SENSORLESS THEO NGUYÊN LÝ LỌC KALMAN

2.1 Nguyên lý lọc Kalman

Theo [3] nguyên lý lọc Kalman là một nguyên lý “dự báo – hiệu chỉnh” sử dụng thuật toán hồi quy để ước lượng biến trạng thái của hệ thống đã xét đến ảnh hưởng của nhiễu đo cũng như nhiễu hệ thống.

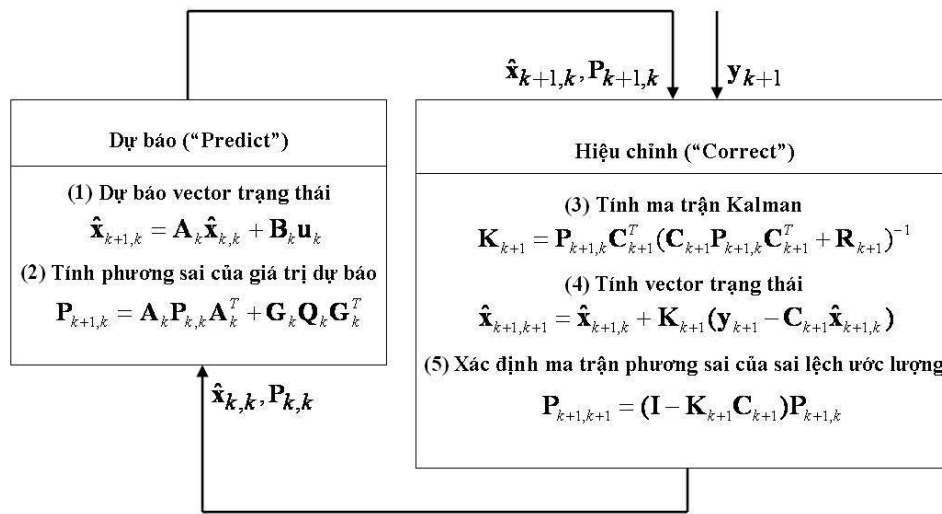
Xét một hệ tuyến tính với không gian trạng thái như sau:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k + \mathbf{G}_k \xi_k \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{x}_k + \eta_k \end{cases} \quad (1)$$

với: $\mathbf{u}_k, \mathbf{x}_k, \mathbf{y}_k$ lần lượt là vector đầu vào, vector trạng thái và vector đầu ra của hệ thống; $\mathbf{A}_k, \mathbf{B}_k, \mathbf{C}_k, \mathbf{G}_k$ là các ma trận hằng.

ξ_k, η_k là vector nhiễu trạng thái và vector nhiễu đo được giả thiết là nhiễu trắng Gaussian có kỳ vọng 0 với $Var(\xi_k) = \mathbf{Q}_k$, $Var(\eta_k) = \mathbf{P}_k$ là các ma trận xác định dương và $E(\xi_k \eta_l^T) = E(\mathbf{x}_0 \xi_k^T) = E(\mathbf{x}_0 \eta_k^T) = 0$.

Để ước lượng các biến trạng thái của hệ, bộ lọc Kalman thực hiện hai quá trình hồi quy: “dự báo” và “hiệu chỉnh”.



Hình 1. Thuật toán cơ bản của nguyên lý lọc Kalman

Trong đó:

$\hat{\mathbf{x}}_0 = E(\mathbf{x}_0)$ là điểm bắt đầu thực hiện thuật toán được hiểu như là giá trị ước lượng ban đầu của vector trạng thái.

$\hat{\mathbf{x}}_{k+1,k}$ là giá trị ngoại suy của $\mathbf{x}_{k+1}$ từ giá trị ước lượng trước đó $\hat{\mathbf{x}}_k$.

$\hat{\mathbf{x}}_{k+1,k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1}$ là giá trị ước lượng của $\mathbf{x}_{k+1}$ theo nguyên lý Kalman từ $\mathbf{y}_{k+1}$.

$\mathbf{P}_{k+1,k+1} = \mathbf{P}_{k+1} = Var(\mathbf{e}_{k+1})$ là ma trận phương sai của sai lệch $\mathbf{e}_{k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1} - \mathbf{x}_{k+1}$

$\mathbf{K}$ là ma trận Kalman. $\mathbf{K}$ được xác định sao cho

$$J_{\mathbf{x}} = \sum E(\mathbf{e}^T \mathbf{e}) \text{ min } (\mathbf{e} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})$$

2.2 Mô hình trạng thái của ĐCKĐB

Theo [2] sau khi TTHCX mô hình dòng của ĐCKĐB ta thu được mô hình dòng mới có đặc tính tuyến tính là:

$$\begin{cases} \dot{i}_{sd} = w_1 \\ \dot{i}_{sq} = w_2 \end{cases} \quad (2)$$

Ta sử dụng thêm các phương trình của từ thông và mômen là:

$$\dot{\psi}'_{rd} = \frac{1}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \dot{\psi}'_{rd} \quad (3)$$

$$m_M = \frac{3}{2} z_p \frac{L_m^2}{L_r} \dot{\psi}'_{rd} i_{sq} = \frac{3}{2} z_p \frac{L_m^2}{L_r} \dot{\psi}'_{rd} i_{sq} \quad (4)$$

$$\frac{J}{z_p} \dot{\omega} = m_M - m_w \quad (5)$$

Cùng với kết quả thu được sau khi TTHCX: sự tách kênh hoàn toàn giữa thành phần tạo từ thông (trục d) và thành phần tạo mômen (trục q), ta có 2 mô hình trạng thái con là:

- Phần điện:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{B}_1 \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{y}_1 = \mathbf{C}_1 \mathbf{x}_1 \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó

$$\mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ \dot{\psi}'_{rd} \end{bmatrix}; \mathbf{u}_1 = [w_1]; \mathbf{y}_1 = [i_{sd}]$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{T_r} & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix}; \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{C}_1 = [1 \quad 0]$$

- Phần cơ:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{A}_2 \mathbf{x}_2 + \mathbf{B}_2 \mathbf{u}_2 + \mathbf{D}_2 \mathbf{n}_2 \\ \mathbf{y}_2 = \mathbf{C}_2 \mathbf{x}_2 \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó :

$$\mathbf{x}_2 = \begin{bmatrix} m_M \\ \omega \end{bmatrix}; \mathbf{u}_2 = [w_2]; \mathbf{y}_2 = [m_M]; \mathbf{n}_2 = [m_w]$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{z_p}{J} & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} k \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{C}_2 = [1 \quad 0]; \mathbf{D}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{z_p}{J} \end{bmatrix}$$

2.3 Áp dụng nguyên lý lọc Kalman cho ĐCKĐB

Để ước lượng từ thông và tốc độ quay của động cơ ta cần tiến hành các bước như sau:

- Giám đoạn hóa mô hình trạng thái của các hệ con.
- Xác định các ma trận phương sai $\mathbf{G}_i; \mathbf{R}_i; \mathbf{P}_i; \mathbf{Q}_i$ ($i=1,2$).
- Thực hiện thuật toán theo nguyên lý lọc Kalman và hiệu chỉnh.

1. Giám đoạn hóa mô hình trạng thái

Theo [4] khi tiến hành giám đoạn hóa mô hình trạng thái sử dụng phương pháp tích phân gần đúng Euler ta có :

$$\mathbf{A}_d = \mathbf{I} + \mathbf{A}T \quad \mathbf{B}_d = \mathbf{B}T \quad \mathbf{C}_d = \mathbf{C}$$

trong đó $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ là ma trận của mô hình trạng thái liên tục; $\mathbf{A}_d, \mathbf{B}_d, \mathbf{C}_d$ là ma trận của mô hình trạng thái giám đoạn; $\mathbf{I}$ là ma trận đơn vị và T là chu kỳ trích mẫu. Từ đó ta thu được mô hình trạng thái giám đoạn của các hệ con là:

Phần điện:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_1(k+1) = \mathbf{A}_{d1} \mathbf{x}_1(k) + \mathbf{B}_{d1} \mathbf{u}_1(k) \\ \mathbf{y}_1(k) = \mathbf{C}_{d1} \mathbf{x}_1(k) \end{cases} \quad (8)$$

Trong đó:

$$\mathbf{x}_1(k) = \begin{bmatrix} i_{sd}(k) \\ \dot{\psi}'_{rd}(k) \end{bmatrix}; \mathbf{u}_1(k) = [w_1(k)]; \mathbf{y}_1(k) = [i_{sd}(k)]$$

$$\mathbf{A}_{d1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{T}{T_r} & 1 - \frac{T}{T_r} \end{bmatrix}; \mathbf{B}_{d1} = \begin{bmatrix} T \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{C}_{d1} = [1 \quad 0]$$

Phần cơ :

$$\begin{cases} \mathbf{x}_2(k+1) = \mathbf{A}_{d2} \mathbf{x}_2(k) + \mathbf{B}_{d2} \mathbf{u}_2(k) + \mathbf{D}_{d2} \mathbf{n}_2(k) \\ \mathbf{y}_2(k) = \mathbf{C}_{d2} \mathbf{x}_2(k) \end{cases} \quad (9)$$

Trong đó :

$$\mathbf{x}_2(k) = \begin{bmatrix} m_M(k) \\ \omega(k) \end{bmatrix}; \mathbf{u}_2(k) = [w_2(k)]$$

$$\mathbf{y}_2(k) = [m_M(k)]; \mathbf{n}_2(k) = [m_w(k)]$$

$$\mathbf{A}_{d2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{Tz_p}{J} & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_{d2} = \begin{bmatrix} kT \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{C}_{d2} = [1 \quad 0]$$

và coi mômen tải m_w là nhiễu.

2. Xác định các ma trận phương sai

Thông thường các ma trận đều được chọn có dạng đường chéo.

Theo [5] các ma trận phương sai $\mathbf{G}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}, \mathbf{P}$ luôn được xác định bằng quá trình thử và sửa lỗi (trial-and-error process). Giá trị của các ma trận đó sẽ được chọn sao cho bình phương sai lệch giữa tốc độ ước lượng và tốc độ thực của động cơ là nhỏ nhất. Cũng trong tài liệu này, các tác giả cũng nói rằng việc chỉnh định bằng tay bộ lọc Kalman sử dụng quá trình thử và sửa lỗi để xác định các ma trận phương sai được thực hiện khá đơn giản. Tuy nhiên quá trình đó tốn nhiều thời gian và kết quả phụ thuộc rất nhiều vào sự nỗ lực và kinh nghiệm của người vận hành. Nếu như sự phân bố nhiễu luôn không biết được, thì không thể suy ra được mối quan hệ chung giữa giá trị các phần tử của ma trận với chất lượng của bộ lọc Kalman phục vụ cho việc xác định các ma trận đó để đạt được kết quả ước lượng tốc độ tốt nhất.

Ngoài ra theo [6] ta sẽ phải chọn $\mathbf{Q}$ có giá trị nhỏ hơn $\mathbf{R}$ để quá trình quá độ nhanh hơn.

3. Thực hiện thuật toán

Trong [7] các tác giả đã đưa ra giải pháp: sử dụng mô hình con phần điện để ước lượng giá trị từ thông còn mô hình con phần cơ phục vụ việc tính toán tốc độ. Dòng điện stator sẽ được đo, sau đó chuyển sang hệ tọa độ dq. Từ thành phần dòng i_{sd} và w_1 ta sẽ tính được từ thông ψ'_{rd} . Từ thành phần dòng i_{sq} và giá trị từ thông ψ'_{rd} tính được ta sẽ thu được giá trị mômen động cơ m_M . Với giá trị mômen này cùng w_2 ta sẽ tính được tốc độ quay ω với việc coi mômen tải m_w là nhiễu của việc xác định m_M .

- Ước lượng từ thông từ mô hình con phần điện

Thuật giải:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_0 = E(\mathbf{x}_0) \\ \mathbf{P}_{0,0} = Var(\mathbf{x}_0) \\ \hat{\mathbf{x}}_{k,k-1} = \mathbf{A}_{d1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1,k-1} + \mathbf{B}_{d1} \mathbf{u}_{k-1} \\ \mathbf{P}_{k,k-1} = \mathbf{A}_{d1} \mathbf{P}_{k-1,k-1} \mathbf{A}_{d1}^T + \mathbf{G}_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{G}_{k-1}^T \\ \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{C}_{d1}^T (\mathbf{C}_{d1} \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{C}_{d1}^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \\ \mathbf{P}_{k,k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{C}_{d1}) \mathbf{P}_{k,k-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k,k} = \hat{\mathbf{x}}_{k,k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{C}_{d1} \hat{\mathbf{x}}_{k,k-1}) \\ k = 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (10)$$

Trong đó :

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} i_{sd}(k) \\ \psi'_{rd}(k) \end{bmatrix}; \mathbf{u}_k = [w_1(k)]; \mathbf{y}_k = [i_{sd}(k)]$$

Chọn các ma trận phương sai :

$$\mathbf{P}(0) = \mathbf{P}_{0,0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{R} = [10^{-3}];$$

$$\mathbf{G} = \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 10^{-6} & 0 \\ 0 & 10^{-6} \end{bmatrix}$$

- Ước lượng tốc độ từ mô hình con phần cơ :

Thuật giải:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_0 = E(\mathbf{x}_0) \\ \mathbf{P}_{0,0} = Var(\mathbf{x}_0) \\ \hat{\mathbf{x}}_{k,k-1} = \mathbf{A}_{d2} \hat{\mathbf{x}}_{k-1,k-1} + \mathbf{B}_{d2} \mathbf{u}_{k-1} \\ \mathbf{P}_{k,k-1} = \mathbf{A}_{d2} \mathbf{P}_{k-1,k-1} \mathbf{A}_{d2}^T + \mathbf{G}_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{G}_{k-1}^T \\ \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{C}_{d2}^T (\mathbf{C}_{d2} \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{C}_{d2}^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \\ \mathbf{P}_{k,k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{C}_{d2}) \mathbf{P}_{k,k-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k,k} = \hat{\mathbf{x}}_{k,k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{C}_{d2} \hat{\mathbf{x}}_{k,k-1}) \\ k = 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (11)$$

Trong đó:

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} m_M(k) \\ \omega(k) \end{bmatrix}; \mathbf{u}_k = [w_2(k)]; \mathbf{y}_k = [m_M(k)]$$

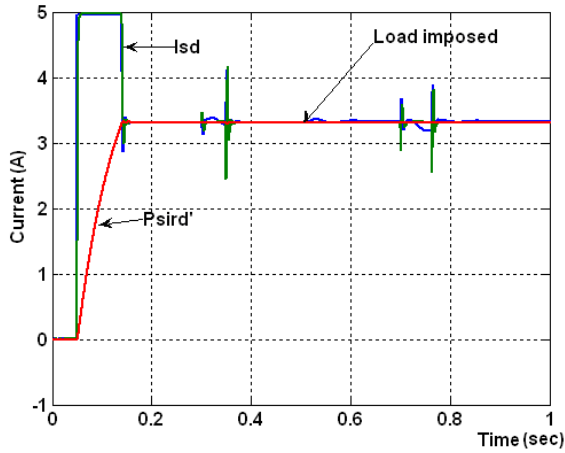
Chọn các ma trận phương sai :

$$\mathbf{P}(0) = \mathbf{P}_{0,0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{R} = [200]$$

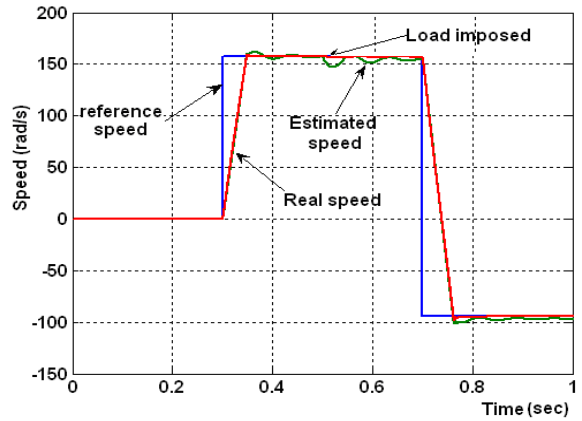
$$\mathbf{G} = \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 10^{-6} & 0 \\ 0 & 10^{-2} \end{bmatrix}$$

Kết quả mô phỏng

Quá trình mô phỏng phương pháp điều khiển speed sensorless theo nguyên lý lọc Kalman được thực hiện trên Matlab & Simulink và Plescs.

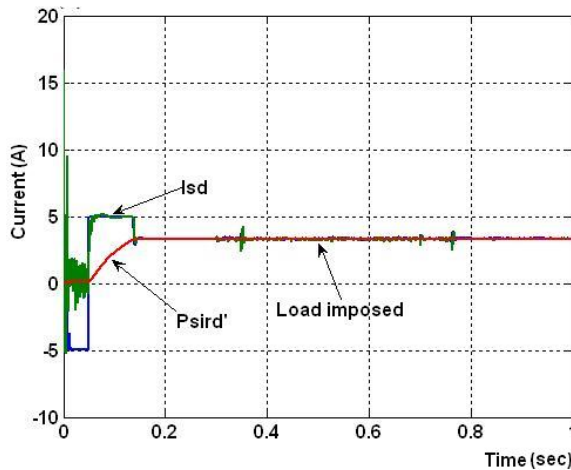


(a) Dòng i_{sd} và từ thông ψ'_{rd}

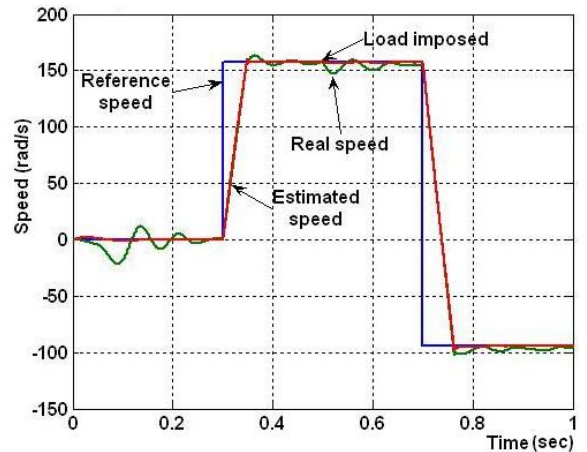


(b) Tốc độ quay ω

Hình 2. Kết quả mô phỏng trong trường hợp vận hành lý tưởng



(a) Dòng i_{sd} và từ thông ψ'_{rd}



(b) Tốc độ quay ω

Hình 3. Kết quả mô phỏng trong trường hợp vận hành có nhiễu

KẾT LUẬN

Bài báo giới thiệu phương pháp điều khiển không sử dụng cảm biến tốc độ của ĐCKĐB. Hệ thống điều chỉnh được xây dựng theo phương pháp *tựa theo từ thông rotor sử dụng cấu trúc tách kênh trực tiếp*. Cấu trúc tách kênh trực tiếp là *cấu trúc điều khiển phi tuyến, được thiết kế theo phương pháp tuyến tính hóa*

chính xác có bản chất là chuyển hệ tọa độ trạng thái.

Kết quả mô phỏng đã cho thấy triển vọng tốt đẹp để đưa phương pháp điều khiển không dùng cảm biến vào thực tế công nghiệp. Phương pháp thiết kế theo nguyên lý lọc Kalman đã được đề xuất có khá nhiều ưu điểm như khả năng kháng nhiễu mạnh, dễ mở rộng và còn có thể cho phép ước lượng đồng thời

nhiều biến trạng thái hoặc/và kết hợp với việc nhận dạng, thích nghi tham số.

Tuy nhiên việc tồn tại sai lệch tĩnh, khối lượng tính toán lớn vẫn còn là những điểm gợn của phương pháp cần được xem xét. Những khó

khăn ở dải tốc độ thấp của truyền động không dùng cảm biến cũng chưa khắc phục được, đây là một vấn đề còn để ngỏ, cần được nghiên cứu sâu thêm nữa.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. *Nguyễn Phùng Quang, Andreas Dittrich*; Vector Control of Three-Phase AC Machines; pp. 97-101; Springer; 1st edition; 2008.
2. *Dương Hoài Nam, Nguyễn Phùng Quang*; Chuyên san “Kỹ thuật điều khiển tự động” - tạp chí Tự động hoá ngày nay, số 11, trang 10-15 (2004).
3. *C.K.Chui, G.Chen*; Kalman filtering with Real-time applications; trang 20-48; Springer; 2nd edition; 1991.
4. *Nguyễn Phùng Quang, Andreas Dittrich*; Truyền động điện thông minh; trang 47-52; NXB KH&KT; in lần 2; 2004.
5. *K.L.Shi, T.F.Chan, Y.K.Wong, S.L.Ho*; Speed estimation of an Induction motor drive using an optimized extended Kalman filter; IEEE Trans. On IE; Vol. 49; No. 1; February 2002
6. *Salomon Chavez Velaquez, Ruben Alejos Palomares, Alfredo Nava Segura*; Speed estimation for an Induction motor using the extended Kalman Filter; IEEE Computer Society CONIELECOM; 2004.
7. *Kanungo Barada Mohanty, Amit Patra*; Flux and speed estimation in decoupled induction motor drive using Kalman Filter; Procc. of 29th National System Conference (NSC); IIT Mumbai; Dec. 2005; trang 1-9.

Địa chỉ liên hệ: Nguyễn Đình Hiếu - Tel: 0912814385, Email: hieund1985@gmail.com
Khoa Điện, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội
Số 1, Đại Cồ Việt, Hà Nội