

# ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG CƠ TỪ TRỞ KHÔNG SỬ DỤNG CẢM BIẾN TỐC ĐỘ

ThS. Nguyễn Thị Thương Duyên

Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

\* Email: Phanlinh.dhm@gmail.com

Tel: 0986440798

## Tóm tắt

### Từ khóa:

Ít nhất bốn từ khóa; Động cơ đồng bộ từ trở, Bộ lọc kalman mở rộng, Không cảm biến, Vị trí rôto.

Giảm bớt trọng lượng động cơ, nâng cao tốc độ, hiệu suất và độ tin cậy luôn là vấn đề mà các nhà sản xuất và chế tạo máy điện quan tâm. Động cơ từ trở là một trong các động cơ đáp ứng được các yêu cầu đó khi kết hợp thiết bị bán dẫn và điều khiển số. Trong bài báo tôi đề cập đến việc điều khiển động cơ từ trở không sử dụng cảm biến tốc độ bằng cách ứng dụng bộ lọc Kalman mở rộng để ước lượng vị trí và tốc độ rôto của động cơ ở vùng tốc độ cao dựa trên mô hình tuyến tính hóa của động cơ và thuật toán bộ lọc Kalman ứng với mô hình đầy đủ bậc 4.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Động cơ đồng bộ từ trở có cấu trúc đơn giản và vững chắc, có stato giống hết stato của động cơ không đồng bộ hay động cơ đồng bộ truyền thống, rôto dạng cực lõi và đặc, không có cuộn dây hay nam châm vĩnh cửu, phù hợp cho các ứng dụng tốc độ cao và làm việc trong môi trường nhiệt độ cao. Dễ dàng chế tạo, không có tổn thất ở rôto, giá thành rẻ hơn nhiều so với các loại động cơ khác có cùng công suất.

Với những ưu điểm nổi bật của động cơ đồng bộ từ trở như trên, trong những năm gần đây với sự phát triển mạnh mẽ của thiết bị bán dẫn công suất và điều khiển số, động cơ đồng bộ từ trở đã thu hút sự chú ý và quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu trên thế giới trong các ứng dụng truyền động tốc độ cao.

Để thực hiện điều khiển vector đối với động cơ đồng bộ từ trở, cần phải biết chính xác vị trí của rôto. Việc lắp đặt cảm biến để xác định vị trí của rôto tồn tại nhiều nhược điểm như kết cấu của hệ thống công kênh, tăng giá thành của hệ thống, độ tin cậy và hiệu suất giảm trong trường hợp thiếu chính xác của cảm biến vị trí. Hầu hết các nhà sản xuất thiết bị ứng dụng luôn tìm kiếm giải pháp để nâng cao hiệu suất và độ tin cậy, giảm tối đa chi phí sản xuất.

Điều khiển động cơ đồng bộ từ trở không sử dụng cảm biến tốc độ đã được nhiều nhà khoa học trên thế giới quan tâm nghiên cứu, nhưng hầu hết các nghiên cứu chỉ tập trung đến điều khiển ở vùng tốc độ thấp và cận không (dưới 1.000 vòng/phút). Hiện nay, rất ít công trình nghiên cứu điều khiển không cảm biến động cơ đồng bộ từ trở tốc độ cao, đặc biệt là nghiên cứu, đề xuất cho các ứng dụng trong thực tế. Với yêu cầu phát triển và công nghiệp hóa đất nước, việc nghiên cứu điều khiển không cảm biến

động cơ đồng bộ từ trở cho các ứng dụng tốc độ cao là yêu cầu cần thiết và có ý nghĩa về mặt lý thuyết cũng như đề xuất các ứng dụng trong thực tế.

## 2. ĐIỀU KHIỂN KHÔNG CẢM BIẾN ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ TỪ TRỞ

Để điều khiển vector đối với động cơ đồng bộ từ trở, chúng ta cần phải biết chính xác vị trí của rôto. Tuy nhiên việc xác định vị trí của rôto bằng cảm biến tốc độ (Encoder) sẽ tồn tại một số nhược điểm như làm tăng kính thước, tăng chi phí cho hệ truyền động.

Do đó, nhiều kỹ thuật điều khiển không cảm biến tốc độ đã được đề xuất trong những năm gần đây. Đối với động cơ đồng bộ từ trở, phương pháp điều khiển không cảm biến thường được sử dụng là dựa trên sức điện động cảm ứng mở rộng. Tuy nhiên, phương pháp này có nhược điểm là không thể áp dụng ở vùng tốc độ thấp. Một phương pháp khác cũng được sử dụng để ước lượng tốc độ đối với động cơ đồng bộ từ trở là bơm tín hiệu tần số cao. Tuy nhiên, phương pháp này lại không đáp ứng đối với vùng tốc độ cao.

Trong bài báo tôi đề cập đến việc sử dụng bộ lọc Kalman mở rộng (Extended Kalman Filter - EKF) để ước lượng tốc độ và vị trí của động cơ đồng bộ từ trở. Thực hiện điều khiển không cảm biến đối với động cơ đồng bộ từ trở tốc độ cao, tốc độ của động cơ đạt 8000 vòng/phút.

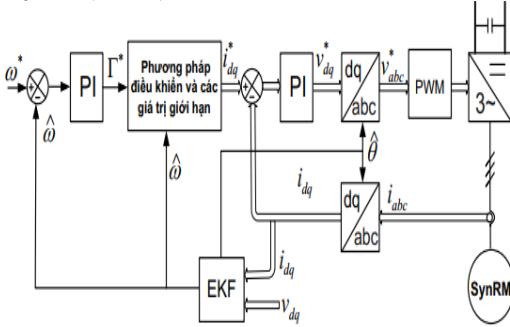
### 2.1. Nguyên lý bộ lọc Kalman mở rộng

Bộ lọc Kalman là một tập hợp các phương trình toán học cần thiết để thực hiện một phương pháp ước lượng theo nguyên lý Dự báo-Hiệu chỉnh (Predict-Correct) cho ta khả năng ước lượng các biến trạng thái của hệ thống đã xét đến ảnh hưởng của nhiễu. Bộ lọc Kalman hay còn gọi là bộ quan sát Kalman được xây dựng trên cơ sở tối ưu sao cho

phương sai của độ lệch giữa giá trị thực và giá trị ước lượng của véctor trạng thái hệ thống là nhỏ nhất, cùng với một số điều kiện được giả thiết.

Ở đây tốc độ và vị trí ước lượng của động cơ đồng bộ từ trở dựa trên mô hình phi tuyến do đó chúng ta phải thực hiện tuyến tính hóa để có thể áp dụng các công thức truy hồi của bộ lọc Kalman được gọi là bộ lọc Kalman mở rộng.

**2.2. Bộ lọc Kalman mở rộng dựa trên mô hình đầy đủ (bậc 4)**



**Hình 1. Cấu trúc điều khiển với bộ lọc Kalman mở rộng**

Điều khiển động cơ đồng bộ từ trở tốc độ cao không sử dụng cảm biến tốc độ được thực hiện dựa trên cấu trúc điều khiển được trình bày trên hình 1.

**2.2.1. Mô hình trạng thái bậc 4 của động cơ đồng bộ từ trở**

Phương trình điện áp của động cơ đồng bộ từ trở trong hệ tọa độ tựa theo từ thông rôto được viết như sau:

$$\begin{cases} v_d = R_s + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ v_q = R_s + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó:

$v_d, v_q, i_d, i_q$  là điện áp và dòng điện stato,  $R_s$  là điện trở stato,  $\omega$  là tốc độ góc của động cơ,  $L_d$  và  $L_q$  là các giá trị điện cảm theo trục d và trục q.

Vì không xác định được mômen tải, do đó với giả thiết tốc độ là hằng số trong thời gian một chu kỳ lấy mẫu ta có:

$$\frac{d\omega}{dt} = 0 \quad (2)$$

Từ các phương trình (1), (2), mô hình trạng thái tổng hợp của động cơ đồng bộ từ trở được viết lại như sau:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{v_d}{L_d} - \frac{R_s}{L_d} + \omega \frac{L_q}{L_d} i_q \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{v_q}{L_q} - \frac{R_s}{L_d} - \omega \frac{L_d}{L_d} i_d \\ \frac{d\omega}{dt} = 0 \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (3)$$

Hệ phương trình (3) là phi tuyến và có dạng tổng quát như sau:

$$\dot{x} = f(x, u)$$

Trong đó:

$$x = [i_d \ i_q \ \omega \ \theta]^T \text{ là vector trạng thái}$$

$$u = [v_d \ v_q]^T \text{ là vector đầu vào.}$$

Rời rạc hóa mô hình (3) bằng phương pháp xấp xỉ Euler đơn giản ta có mô hình rời rạc tương ứng như sau :

$$x_{k+1} = x_k + T_s f(x_k, u_k) \quad (4)$$

Trong đó:

$T_s$  là chu kỳ lấy mẫu, phải chọn rất nhỏ so với hằng số thời gian điện của mô hình động cơ. Trong các hệ truyền động điện xoay chiều ba pha hiện đại với tần số băm xung  $f_x$  và tần số trích mẫu  $1/T_s$  cao, điều kiện này có thể coi là thỏa mãn.

Từ (3), (4) ta có:

$$\begin{cases} i_{d,k+1} = i_{d,k} + T_s \frac{di_d}{dt} = (1 - T_s \frac{R_s}{L_d}) i_{d,k} + \omega T_s \frac{L_q}{L_d} i_{q,k} + T_s \frac{v_{d,k}}{L_d} \\ i_{q,k+1} = i_{q,k} + T_s \frac{di_q}{dt} = -\omega T_s \frac{L_d}{L_q} i_{q,k} + (1 - \frac{R_s}{L_q}) i_{q,k} + T_s \frac{v_{q,k}}{L_q} \\ \omega_{k+1} = \omega_k + T_s \frac{d\omega}{dt} = \omega_k \\ \theta_{k+1} = \theta_k + T_s \frac{d\theta}{dt} = \theta_k + T_s \omega_k \end{cases} \quad (5)$$

Tuyến tính hóa mô hình này quanh điểm làm việc  $x_k$ , chúng ta thu được mô hình tuyến tính hóa với các ma trận trạng thái như sau:

$$A_{4,k} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_s T_s}{L_d} & \frac{L_q T_s}{L_d} \omega_k & \frac{L_q T_s}{L_d} i_{q,k} & 0 \\ -\frac{L_d T_s}{L_q} \omega_k & 1 - \frac{R_s T_s}{L_q} & \frac{L_d T_s}{L_q} i_{d,k} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & T_s & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C_{4,k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

**2.2.2 Ước lượng tốc độ với bộ lọc Kalman mở rộng dựa trên mô hình đầy đủ (bậc 4)**

Mặc dù mô hình tuyến tính rời rạc (5) là không quan sát được nhưng có thể sử dụng mô hình này để xây dựng một bộ lọc Kalman để ước lượng các biến trạng thái của mô hình.

Thuật toán bộ lọc Kalman mở rộng được thực hiện qua hai bước như sau:

*Dự báo (Prediction):*

$$x_{k|k-1} = \begin{bmatrix} \hat{i}_{d,k|k-1} & \hat{i}_{q,k|k-1} & \hat{\omega}_{k|k-1} & \hat{\theta}_{k|k-1} \end{bmatrix}^T$$

$$\begin{cases} \hat{i}_{d,k|k-1} = \left(1 - T_s \frac{R_s}{L_d}\right) \hat{i}_{d,k-1|k-1} + \hat{\omega}_{k-1|k-1} T_s \frac{L_q}{L_d} \hat{i}_{q,k-1|k-1} + T_s \frac{v_{d,k-1}}{L_d} \\ \hat{i}_{q,k|k-1} = -\hat{\omega}_{k-1|k-1} T_s \frac{L_d}{L_q} \hat{i}_{d,k-1|k-1} + \left(1 - \frac{R_s}{L_q}\right) \hat{i}_{q,k-1|k-1} + T_s \frac{v_{q,k-1}}{L_q} \\ \hat{\omega}_{k|k-1} = \hat{\omega}_{k-1|k-1} \\ \hat{\theta}_{k|k-1} = \hat{\theta}_{k-1|k-1} + T_s \hat{\omega}_{k-1|k-1} \end{cases} \quad (8)$$

$$P_{k|k-1} = A_{4,k-1} P_{k-1|k-1} A_{4,k-1}^T + Q_{4,k-1} \quad (9)$$

Trong đó:

$$A_{4,k-1} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_s T_s}{L_d} & \frac{L_q T_s}{L_d} \omega_{k-1|k-1} & \frac{L_q T_s}{L_d} i_{q,k-1|k-1} & 0 \\ -\frac{L_d T_s}{L_q} \omega_{k-1|k-1} & 1 - \frac{R_s T_s}{L_q} & \frac{L_d T_s}{L_q} i_{d,k-1|k-1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & T_s & 1 \end{bmatrix}$$

*Hiệu chỉnh (Correction):*

$$x_{k|k} = \begin{bmatrix} \hat{i}_{d,k|k} & \hat{i}_{q,k|k} & \hat{\omega}_{k|k} & \hat{\theta}_{k|k} \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

$$K_k = P_{k|k-1} C_{4,k}^T \left[ C_{4,k} P_{k|k-1} C_{4,k}^T + R_k \right]^{-1}$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - C_{4,k} \hat{x}_{k|k-1}) \quad (11)$$

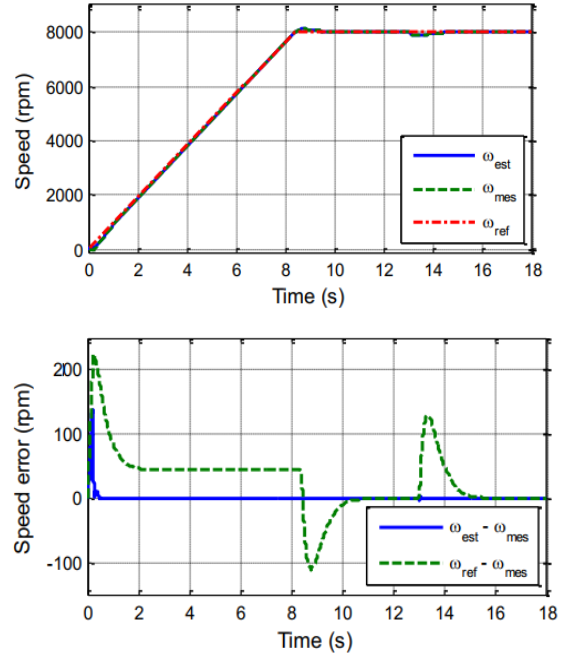
$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k C_{4,k} P_{k|k-1}$$

**2.2.3. Kết quả mô phỏng**

Kết quả mô phỏng điều khiển không cảm biến tốc độ động cơ đồng bộ từ trở với các thông số (tốc độ định mức: 8000v/p; công suất định mức: 15kW; số cặp cực: 1; điện trở stato: 80mΩ; điện cảm trục d: 4,45mH; điện cảm trục q: 1,38mH; mômen quán tính: 0,016kg.m<sup>2</sup>) dựa trên mô hình

tuyến tính hóa của động cơ và thuật toán bộ lọc Kalman mở rộng ứng với mô hình đầy đủ bậc 4.

Hình 2 trình bày kết quả mô phỏng với đáp ứng tốc độ đối với mô hình bậc 4, khi động cơ khởi động không tải với tốc độ đặt là 8.000 vòng/phút.

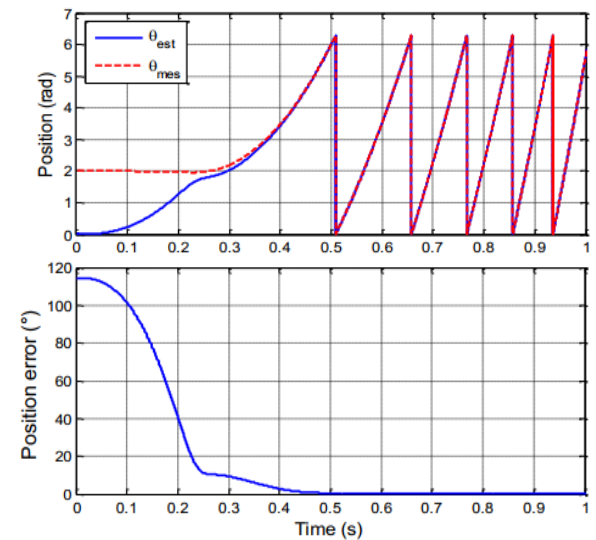


**Hình 2.** Đáp ứng tốc độ ước lượng với mô hình bậc 4

Tốc độ ước lượng bám theo tốc độ của động cơ sau thời gian khoảng 0,4s và sai số tốc độ bằng không.

Ở chế độ xác lập, tốc độ ước lượng và tốc độ động cơ bám theo sát tốc độ đặt.

Vị trí ước lượng hội tụ ngay về giá trị đo sau thời gian 0,4s (hình 3)

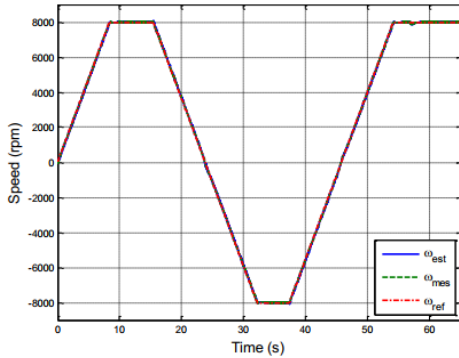


**Hình 3.** Đáp ứng vị trí ước lượng với mô hình bậc 4

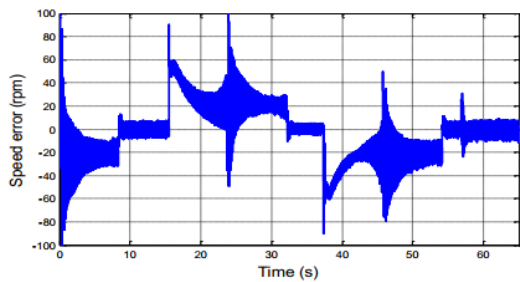
Hiệu quả của bộ ước lượng phụ thuộc vào việc lựa chọn các ma trận hiệp phương sai (R và Q)

được sử dụng trong bộ lọc Kalman mở rộng. Hiện nay, hầu như chưa có một phương pháp nào để có thể chọn các ma trận này một cách tối ưu nhất mà chủ yếu chọn theo phương pháp thử nghiệm. Trong mô phỏng này, ma trận hiệp phương sai được chọn thử nghiệm và mô phỏng nhiều lần bằng cách thay đổi giá trị của các ma trận và xem xét sự ảnh hưởng của nó đến đáp ứng của các biến trạng thái.

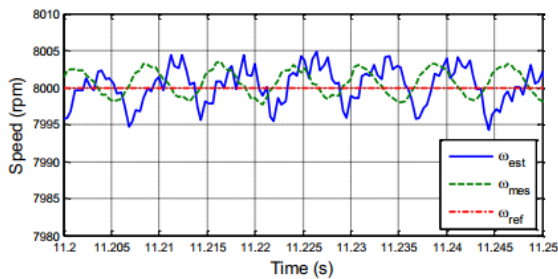
**2.2.4. Kết quả thực nghiệm**



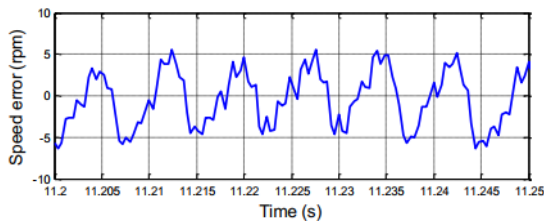
**Hình 4.** Tốc độ ước lượng và tốc độ đo thực nghiệm



**Hình 5.** Sai số tốc độ ước lượng và tốc độ đo



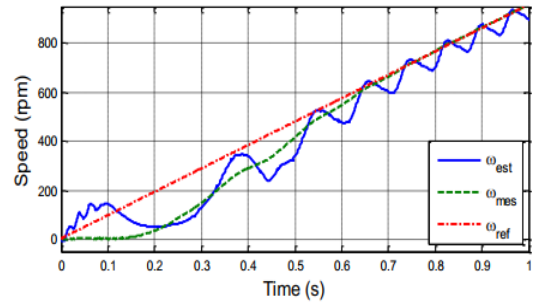
**Hình 6.** Tốc độ động cơ ở chế độ xác lập



**Hình 7.** Sai số ước lượng ở chế độ xác lập

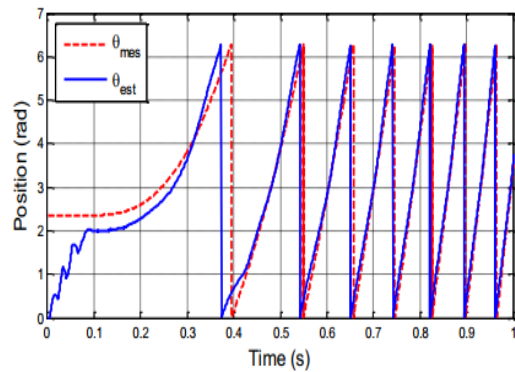
Ở chế độ xác lập, tốc độ ước lượng luôn bám theo giá trị đo, sai số lớn nhất là 5 vòng/phút, điều này cho thấy giá trị ước lượng của bộ lọc Kalman

bậc 4 là tương đối chính xác. Tốc độ và vị trí của rôto lúc khởi động như trên hình 8 và hình 9, chúng ta nhận thấy rằng vị trí ước lượng hội tụ rất nhanh về giá trị đo (sau khoảng 0,8s).

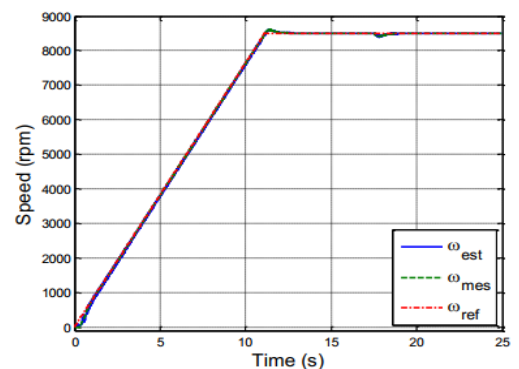


**Hình 8.** Tốc độ lúc khởi động

Khi thực hiện thí nghiệm với một tốc độ đặt lớn hơn 8000 vòng/phút với gia tốc góc 100 rad/s<sup>2</sup>, thì bộ ước lượng không đáp ứng và hệ thống mất ổn định. Nếu giảm gia tốc góc là 80rad/s<sup>2</sup> đồng thời thử nghiệm với một tốc độ đặt 8500rad/s, hệ thống vẫn ổn định, tốc độ ước lượng bám sát tốc độ đo như được trình bày trên hình 10, sai số tốc độ ước lượng được thể hiện trên hình 11, tuy nhiên động cơ cũng chỉ hoạt động với tốc độ tối đa 8500vòng/phút (trong vùng điều khiển tối ưu M/I), nếu thử nghiệm với tốc độ lớn hơn động cơ sẽ chuyển sang hoạt động trong vùng điều khiển M/ψ, lúc này quá trình chuyển đổi giữa hai phương pháp điều khiển xảy ra, bộ ước lượng vị trí và tốc độ có sai số lớn và hệ thống mất ổn định.

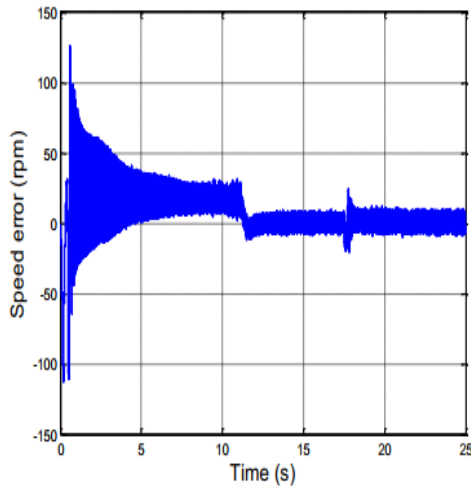


**Hình 9.** Vị trí rôto lúc khởi động



**Hình 10.** Tốc độ thử nghiệm 8500 vòng/phút

## TÀI LIỆU THAM KHẢO



Hình 11. Sai số tốc độ ước lượng

### 3. KẾT LUẬN

Qua các kết quả thu được từ mô phỏng và thực nghiệm, chúng ta nhận thấy rằng bộ lọc Kalman mở rộng đã đáp ứng rất tốt vị trí và tốc độ ước lượng dựa trên mô hình đầy đủ bậc 4 của động cơ đồng bộ từ trở thay thế cho bộ cảm biến đặt trên rôto của động cơ. Điều này đã đáp ứng việc giảm thiểu khối lượng của động cơ góp phần nâng cao chất lượng hệ truyền động tốc độ cao trong công nghiệp.

- [1] N. Bianchi, S. Bolognani, and F. Luise (2006), 'High Speed Drive Using a Slotless PM Motor', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 4, pp. 1083-1090.
- [2] A. Arkkio, T. Jokinen, and E. Lantto (2005), 'Induction and Permanent-Magnet Synchronous Machines for High-Speed Applications', *Proc. Eighth Int. Conf. Electr. Mach. Syst.*, pp. 871-876.
- [3] A. Binder and T. Schneider (2007), 'High-speed inverter-fed AC drives', *IEEE Electr. Mach. Power Electron. Int. Aegean Conf.*, pp. 9-16.
- [4] M. El Hadi Zaïm (2009), 'High-Speed Solid Rotor Synchronous Reluctance Machine Design and Optimization', *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 3, pp. 1796-1799.
- [5] M. E. Zaim (2001), 'Design and Performance of the Solid Rotor Reluctance Machines', *Electr. Power Components Syst.*, vol. 29, no. 12, pp. 1161-1174.
- [6] S. Ichikawa, M. Tomita, S. Doki, and S. Okuma (2006), 'Sensorless Control of Synchronous Reluctance Motors Based on Extended EMF Models Considering Magnetic Saturation With Online Parameter Identification', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 5, pp. 1264-1274.