

BỘ QUAN SÁT TỐC ĐỘ SỬ DỤNG LOGIC MỜ CHO HỆ TRUYỀN ĐỘNG SPIM HIỆU SUẤT CAO

SPEED OBSERVER USING FUZZY LOGIC FOR HIGH-PERFORMANCE SPIM DRIVES

Phạm Thúy Ngọc¹, Nguyễn Hữu Khương², Đồng Văn Hướng²

¹Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh

²Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

Tóm tắt: Bài báo này đề xuất một cơ chế thích nghi sử dụng logic mờ thay thế bộ điều khiển PI cổ điển trong bộ quan sát tốc độ sử dụng phương pháp thích nghi mô hình mẫu dựa theo từ thông rotor cho điều khiển vector không cảm biến hệ truyền động động cơ không đồng bộ sáu pha. Bộ điều khiển logic mờ được đề xuất như một bộ tối ưu phi tuyến nhằm cực tiểu tín hiệu điều chỉnh tốc độ cho bộ quan sát. Hiệu suất giữa bộ quan sát tốc độ MRAS thông thường sử dụng bộ điều khiển PI và bộ quan sát tốc độ sử dụng logic mờ đề xuất được khảo sát, đánh giá trong các chế độ làm việc khác nhau. Các kết quả mô phỏng đã chứng minh rằng hiệu suất của bộ quan sát đề xuất và của hệ truyền động cải thiện đáng kể đặc biệt ở dải tốc độ thấp và tốc độ bằng không. Bộ quan sát đề xuất có đáp ứng động tốt, độ chính xác cao trong cả quá trình quá độ và xác lập.

Từ khóa: Truyền động động cơ không đồng bộ sáu pha, điều khiển không cảm biến, bộ quan sát tốc độ MRAS, logic mờ.

Chỉ số phân loại: 2.2

Abstract: In this paper, an adaptation mechanism using fuzzy logic (FL) is proposed that replaces the classical PI controller used in the Rotor Flux based on MRAS speed observer for sensorless control of six phase induction motor drives. FL is proposed as a nonlinear optimization to minimize the speed turning signal for the observer. The performance of the MRAS observer using the conventional PI controller and the proposed FL controller have been verified and evaluated in the different working modes, especially at the low and near zero speed range. Simulation results have demonstrated that the performance of the proposed MRAS observer is significantly improved especially at low and near zero speed range. FL_MRAS observer has good dynamic response, high precision in both the transient and steady modes.

Keywords: Six phase induction motor drives, sensorless control, MRAS speed observer, fuzzy logic.

Classification number: 2.2

1. Giới thiệu

Trên thế giới, truyền động của động cơ nhiều pha đã được tập trung nghiên cứu và phát triển trong một vài thập kỷ gần đây. So với hệ truyền động sử dụng động cơ ba pha truyền thống hệ truyền động nhiều pha có nhiều ưu điểm như: Giảm dòng và công suất trên mỗi pha, giảm biên độ và tăng tần số xung động mô men, giảm tổn hao trên rotor, tỉ trọng mô men trên dòng điện cao. Hệ truyền động này cũng được đánh giá làm việc an toàn, tin cậy, khả năng chịu sự cố cao hơn so với hệ ba pha truyền thống. Do những ưu điểm của hệ truyền động nhiều pha mà ngày nay nó được xem xét và áp dụng cho các ứng dụng công suất lớn hoặc những hệ truyền động đòi hỏi làm việc tin cậy, an toàn cao

như ô tô điện, hàng không, tàu biển, trong lĩnh vực quân sự và hạt nhân. Có rất nhiều loại động cơ nhiều pha, động cơ không đồng bộ sáu pha (SPIM) là một trong những loại động cơ được ứng dụng phổ biến nhất.

Với các kỹ thuật điều khiển không cảm biến được tập trung nghiên cứu và phát triển cho các hệ truyền động SPIM trong các ứng dụng công nghiệp có hiệu suất cao, MRAS là chiến lược được sử dụng phổ biến do thực hiện đơn giản và khối lượng tính toán ít hơn các phương pháp khác. Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng so với bộ quan sát tốc độ dùng Kalman Fiter, độ phức tạp tính toán của bộ quan sát tốc độ dùng MRAS ít hơn với tỷ lệ 1:20 [1], [2]. Sự quan tâm đặc biệt đã được dành cho MRAS từ thông

(RF_MRAS) khi áp dụng cho các hệ truyền động SPIM không cảm biến [2 - 5]. Tuy nhiên, phương pháp này bị ảnh hưởng bởi: Độ nhạy tham số của động cơ, các vấn đề tích phân thuần túy, điều kiện ban đầu [6], ảnh hưởng từ sai số đo và tính phi tuyến của biến tần [2,3], [7], [8]. Những vấn đề trên làm giảm hiệu suất của bộ quan sát, đặc biệt ở dải tốc độ thấp và lân cận không [4]. Áp dụng cho một hệ truyền động điều khiển vectơ ba pha, tốc độ đảo chiều qua không được chứng minh có thể đáp ứng quá độ tốt [2], [8]. Tuy nhiên, hoạt động ở tốc độ thấp dưới 2Hz trong thời gian dài có hiệu suất rất thấp không đáp ứng được yêu cầu của hệ truyền động [6,7]. Cải tiến bộ quan sát tốc độ RF_MRAS với mô hình thích nghi sử dụng mô hình dự báo [9], kết quả khảo sát ở tốc độ 10 vòng/phút được khảo sát tuy nhiên khi có tải sai số ước lượng tốc độ lớn. Mô hình bộ quan sát tốc độ RF_MRAS được thay bằng bộ quan sát MRAS mô men [10], tốc độ dưới 15rad/s được khảo sát, hiệu suất ước lượng khá tốt khi không tải nhưng khi làm việc với 25% tải định mức hiệu suất ở vùng tốc độ thấp giảm đáng kể, sai số ước lượng lớn. Tốc độ dưới 2.5 rad/s không được khảo sát.

Các phương pháp cải tiến hiệu suất của bộ quan sát tốc độ RF_MRAS đã được công bố phần lớn sử dụng bộ điều khiển PI tuyến tính với các hệ số cố định. Trong bài báo này, một cơ chế thích nghi sử dụng FL thay thế bộ điều khiển PI cổ điển. FL được xem như một bộ tối ưu phi tuyến nhằm cực tiểu tín hiệu điều chỉnh tốc độ cho bộ quan sát. Hiệu suất giữa bộ quan sát tốc độ MRAS thông thường sử dụng bộ điều khiển PI và bộ quan sát sử dụng FL được khảo sát, đánh giá chi tiết ở các chế độ làm việc khác nhau đặc biệt tại vùng tốc độ thấp và lân cận không. Các kết quả mô phỏng đã chứng minh hiệu suất của bộ quan sát được cải thiện đáng kể, nhất là ở dải tốc độ thấp. Bộ quan sát đề xuất có độ chính xác cao trong cả quá trình quá độ và xác lập.

2. Mô hình hệ thống

2.1. Mô hình hệ truyền động SPIM

Để mô hình hóa SPIM có thể biểu diễn bằng các trạng thái không gian, dựa trên cách

tiếp cận véc tơ không gian và hệ tham chiếu động. Mô hình này được biểu diễn như sau:

$$[u]_{\alpha\beta} = [G] \frac{d}{dt} [x]_{\alpha\beta} + [F] [x]_{\alpha\beta} \quad (1)$$

Trong đó:

$[u]_{\alpha\beta} = [u_{\alpha s} \ u_{\beta s} \ 0 \ 0]^T$: Đại diện cho các véc tơ đầu vào; $[x]_{\alpha\beta} = [i_{\alpha s} \ i_{\beta s} \ i_{\alpha r} \ i_{\beta r}]$: Biểu thị các véc tơ trạng thái, các ma trận $[F]$ và $[G]$ được xác định:

$$[F] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & \omega_r L_m & R_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & 0 & -\omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[G] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

Trong đó:

ω_r : Vận tốc góc của rotor; $R_s, L_s = L_{is} + L_m, R_r, L_r = L_{lr} + L_m$ và L_m là các thông số của SPIM.

Phần cơ của hệ truyền động được biểu diễn bởi các phương trình sau:

$$T_e = 3P(\Psi_{\beta r} i_{\alpha r} - \Psi_{\alpha r} i_{\beta r}) \quad (4)$$

$$J_i \frac{d}{dt} \omega_r + B_i \omega_r = P(T_e - T_L) \quad (5)$$

Trong đó:

T_L, T_e : Mô men tải, mô men điện từ,

J_i, B_i : Hệ số quán tính, hệ số ma sát,

P : Số cặp cực, $\Psi_{\alpha\beta r}$: Từ thông rotor.

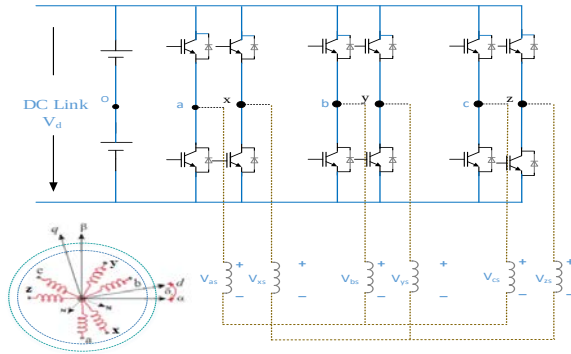
Hệ truyền động được nghiên cứu bao gồm SPIM được cấp nguồn thông qua một biến tần nguồn áp sáu pha (Hình 1). Áp dụng kỹ thuật véc tơ không gian, không gian sáu chiều ban đầu của máy được chuyển thành ba không gian hai chiều trong không gian con ($\alpha - \beta$), ($x - y$) và ($z_1 - z_2$). Sự chuyển đổi này đạt được bằng ma trận chuyển đổi 6 x 6 như sau:

$$T_6 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \\ 1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Ma trận chuyển đổi được sử dụng đại diện cho hệ tham chiếu cố định ($\alpha - \beta$) trong hệ tham chiếu động ($d - q$). Ma trận này được cho bởi:

$$T_{dq} = \begin{bmatrix} \cos(\delta_r) & -\sin(\delta_r) \\ \sin(\delta_r) & \cos(\delta_r) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Trong đó: δ_r là vị trí góc quay rotor.



Hình 1. Sơ đồ tổng quát hệ truyền động SPIM.

2.2. Bộ quan sát tốc độ FL_MRAS

2.2.1. Bộ quan sát tốc độ PI_MRAS

Bộ quan sát tốc độ PI_MRAS thông thường được chỉ ra trên hình 2. Trong đó mô hình tham chiếu thường sử dụng mô hình điện áp (VM). Từ thông rotor được cho bởi:

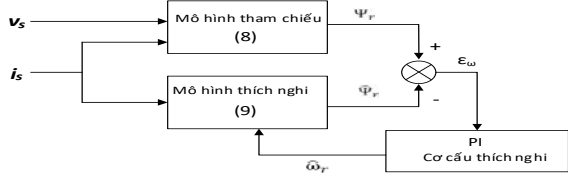
$$p\psi_{rD} = (v_{sD} - R_s i_{sD} - \sigma L_s p i_{sD}) \frac{L_m}{L_r} \quad (8)$$

$$p\psi_{rQ} = (v_{sQ} - R_s i_{sQ} - \sigma L_s p i_{sQ}) \frac{L_m}{L_r}$$

Mô hình thích nghi sử dụng mô hình dòng (CM), Các thành phần từ thông rotor được xác định:

$$p\hat{\psi}_{rD} = \frac{L_m}{T_r} i_{sD} - \frac{1}{T_r} \psi_{rD} - \hat{\omega}_r \psi_{rQ} \quad (9)$$

$$p\hat{\psi}_{rQ} = \frac{L_m}{T_r} i_{sQ} - \frac{1}{T_r} \psi_{rQ} + \hat{\omega}_r \psi_{rD}$$



Hình 2. Bộ quan sát MRAS sử dụng bộ điều khiển PI

Dựa trên lý thuyết ổn định của Popov, cơ chế thích nghi có thể được thiết kế để tạo ra giá trị của tốc độ ước lượng được thực hiện bằng cách cực tiểu sai số giữa từ thông tham chiếu và từ thông ước lượng sử dụng bộ điều khiển PI [6]. Tín hiệu điều chỉnh tốc độ và tốc độ ước lượng được biểu diễn:

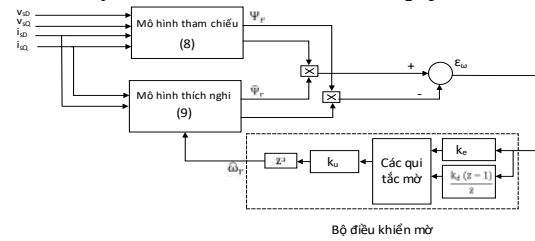
$$e_\omega = \psi_{rQ} \hat{\psi}_{rD} - \psi_{rD} \hat{\psi}_{rQ} \quad (10)$$

$$\hat{\omega}_r = \left(k_p + \frac{k_i}{p} \right) e_\omega \quad (11)$$

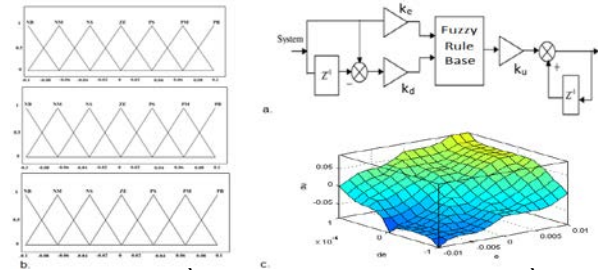
2.2.2. Bộ quan sát MRAS sử dụng FL

Trong bộ quan sát đề xuất, FL thay thế cho cơ cấu thích nghi ở MRAS thông thường và sử dụng mô hình Mamdani, trong đó đầu vào là tín hiệu điều chỉnh tốc độ (10) và vi phân tín hiệu điều chỉnh tốc độ. Hai đầu vào này được nhân với hai hệ số K_1 và K_2 tương ứng. Đầu ra của bộ điều khiển được nhân với hệ số K_3 để tạo ra giá trị thực tế của tốc độ

quan sát. Cuối cùng, khâu tích phân được thực hiện để tạo ra giá trị của tốc độ ước tính. Kỹ thuật thử sai được sử dụng để điều chỉnh những hệ số này nhằm đảm bảo hiệu suất tối ưu của bộ điều khiển. Mỗi biến của FL có bảy hàm thành viên. Các tập mờ sau đây được sử dụng: NB = NEGATIVE BIG, NS = NEGATIVE SMALL, NM = NEGATIVE MEDIUM, ZE = ZERO, PS = POSITIVE SMALL, PM = POSITIVE MEDIUM, PB = POSITIVE BIG. Bộ quan sát tốc độ MRAS với cơ chế ước lượng tốc độ FL được trình bày trong hình 3, các hàm thành viên của FL được thể hiện trong hình 4. Bảng 1 cho thấy cơ sở luật mờ với 49 quy tắc.



Hình 3. Bộ quan sát MRAS sử dụng FL



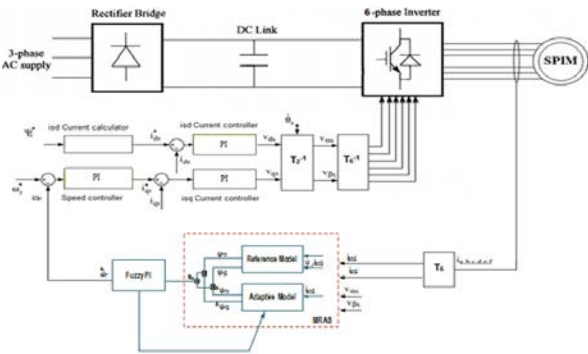
Hình 4. a) Sơ đồ của FLC, b) Hàm chức năng đầu vào và đầu ra bộ điều khiển mờ, c) Mật độ điều khiển.

Bảng 1. Cơ sở luật mờ.

đ/e e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NM	NM	NS	NS	NS	ZE
NM	NM	NM	NS	NS	NS	ZE	PS
NS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
PM	NS	ZE	PS	PS	PM	PM	PM
PB	ZE	PS	PS	PM	PM	PB	PB

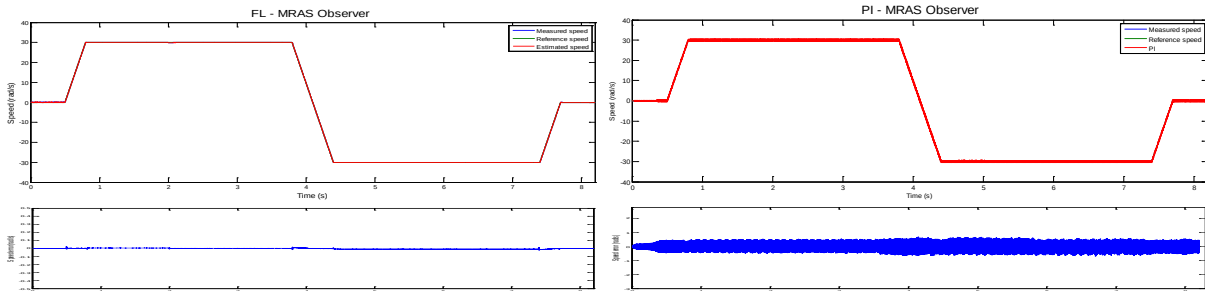
3. Mô phỏng và thảo luận

Để kiểm chứng và đánh giá hiệu suất của bộ quan sát tốc độ đề xuất, một hệ truyền động điều khiển véc tơ không cảm biến SPIM như hình 5 được mô phỏng khảo sát hoạt động ở các chế độ khác nhau đặc biệt ở dải tốc độ thấp và tốc độ gần không thông qua phần mềm mô phỏng Matlab - Simulink. Các thông số của SPIM: 1HP, 6_Phases, 220V, 50 Hz, 4 poles, 1450 rpm, $R_s = 10.1\Omega$, $R_r = 9.8546\Omega$, $L_s = 0.833457$ H, $L_r = 0.8308$ H, $L_m = 0.783106$ H, $J = 0.0088$ kg.m².



Hình 5. Điều khiển không cảm biến cho truyền động SPIM sử dụng bộ quan sát FL_MRAS.

3.1. Hiệu suất động của bộ quan sát:



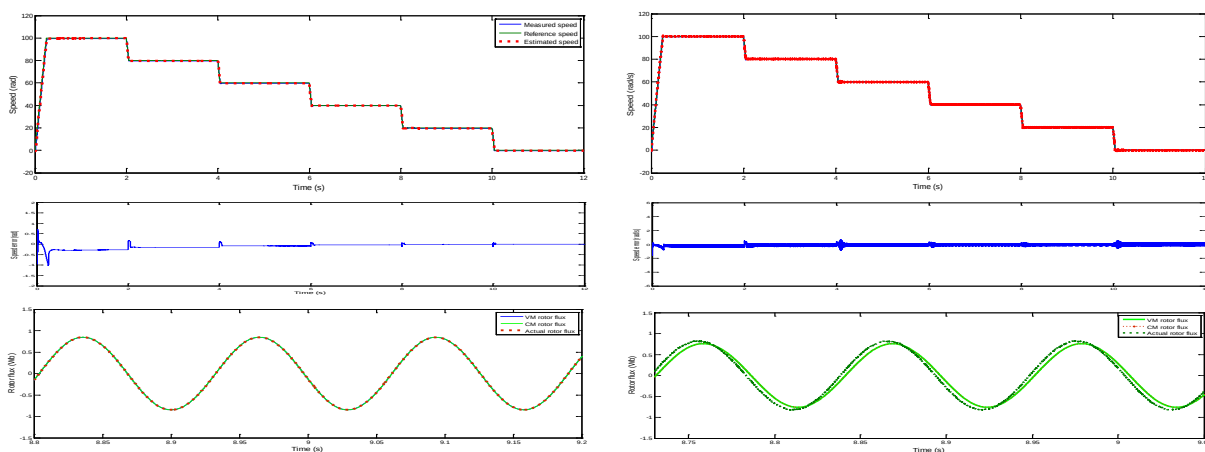
Hình 6. Đáp ứng tốc độ của hệ, sai số giữa tốc độ ước lượng và tốc độ đo của hệ truyền động SPIM không cảm biến sử dụng bộ quan sát FL_MRAS và PI_MRAS.

3.2. Hiệu suất của bộ quan sát trong dải tốc độ trung bình và thấp:

Hệ truyền động được khảo sát với các mức tham chiếu tốc độ giảm từ 100 rad/s về 0, 50% tải định mức. Quan sát hình 7 ta thấy hiệu suất của bộ quan sát FL_MRAS khá tốt. Sai số ước lượng tức thời luôn rất nhỏ, ngoại trừ tại một số thời điểm diễn ra sự thay đổi tốc độ, tuy nhiên, khi đó sai số này không

Trong phần mô phỏng này, hiệu suất động của bộ quan sát sử dụng FL_MRAS và PI_MRAS truyền thống được khảo sát ở chế độ đảo chiều quay từ -30 đến 30 (rad/s), 12% tải định mức được đóng vào tại 2(s). Hình 6 cho thấy quá trình đảo chiều diễn ra trong thời gian nhỏ hơn 1s, đáp ứng mô men là tức thời đối với bộ quan sát sử dụng FL_MRAS. Với cùng điều kiện khảo sát, bộ quan sát tốc độ sử dụng FL_MRAS có sai số không vượt quá 0.2 rad/s trong khi bộ quan sát PI_MRAS có sai số lớn hơn (~ 1rad/s).

vượt quá 1rad/s. Bộ quan sát sử dụng PI_MRAS có hiệu suất kém hơn, tốc độ ước lượng có biên độ dao động lớn, tăng dần khi làm việc ở vùng tốc độ thấp. Các giá trị từ thông được nhận dạng từ CM và VM để cung cấp cho cơ cấu thích nghi của PI_MRAS có hiện tượng trôi DC so với từ thông máy. Tuy nhiên, với FL_MRAS từ thông do CM và VM tạo ra bằng từ thông máy.



Hình 7. Tốc độ đặt, tốc độ ước lượng, tốc độ đo; Sai số tốc độ ước lượng; Từ thông thực của động cơ và từ thông rotor được nhận dạng bằng CM, VM ở dải tốc độ trung bình và thấp sử dụng: a. FL_MRAS; b. PI_MRAS.

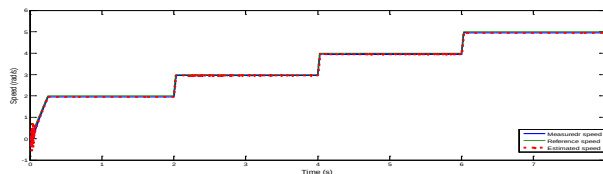
3.3. Hiệu suất của bộ quan sát ở dải tốc độ rất thấp và không:

Khảo sát hiệu suất của bộ quan sát tốc độ

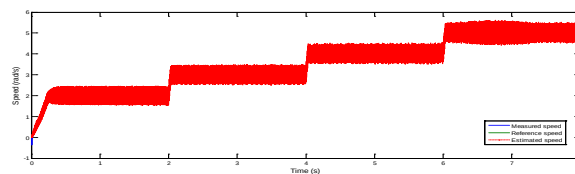
FL_MRAS với tốc độ yêu cầu tăng từ không đến 5 rad/s, 20% tải định mức. Hình 8.b cho thấy tốc độ ước lượng của bộ quan sát

PI_MRAS có biên độ dao động lớn, sai số trong điều kiện làm việc xác lập cao. Trong khi đó, hiệu suất của bộ quan sát sử dụng FL_MRAS hình 8.a được cải thiện tốt, tốc độ ước lượng có biên độ dao động nhỏ, hội tụ nhanh về tốc độ thực của động cơ. Hình 9.a,b

khảo sát bộ quan sát đề xuất trong trường hợp động cơ không tải và 12% tải định mức ở dải tốc độ rất thấp. Ta thấy dạng sóng tốc độ khảo sát ở cả hai trường hợp là tương tự, tốc độ ước lượng bám khá tốt tốc độ thực. Bộ quan sát và hệ truyền động làm việc ổn định.

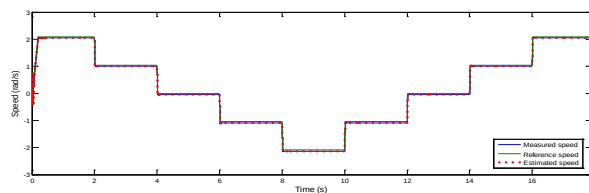
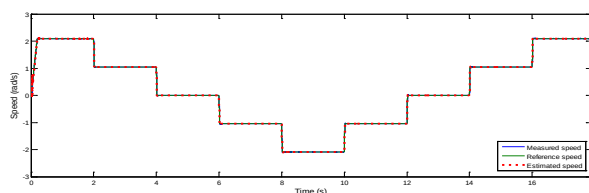


a.



b.

Hình 8. Tốc độ đặt, tốc độ ước lượng, tốc độ đo và sai số tốc độ ước lượng của bộ quan sát ở dải tốc độ thấp sử dụng bộ quan sát: a. FL_MRAS; b. PI_MRAS.



Hình 9. Tốc độ đặt, tốc độ ước lượng, tốc độ đo của bộ quan sát sử dụng FL_MRAS làm việc với tốc độ rất thấp và tốc độ không a. Trường hợp không tải; b. Trường hợp mang 12% tải định mức

4. Kết luận

Bài báo trình bày bộ nhận dạng tốc độ sử dụng FL_MRAS cho điều khiển không cảm biến hệ SPIM. Hiệu suất của bộ quan sát được kiểm chứng thông qua các kết quả mô phỏng trong phần 3, tốc độ dưới 2rad/s đã được khảo sát, bộ quan sát có hiệu suất cao hơn so với những nghiên cứu được công bố gần đây [9-11]. Các kết quả mô phỏng đã chứng minh rằng bộ quan sát có đáp ứng động tốt, độ chính xác cao trong cả quá trình quá độ và xác lập đặc biệt trong dải tốc độ thấp và tốc độ lân cận không. Hệ truyền động SPIM làm việc ổn định, tin cậy □

Tài liệu tham khảo

- [1] R. Blasco-Gimenez, G. M. Asher, M. Sumner, and K. J. Bradley, "Dynamic performance limitations for MRAS based sensorless induction motor drives" IEE Proceedings Electric Applications, vol. 143, no. 2, pp. 113-122, 1996.
- [2] J. W. Finch and D. Giaouris, "Controlled AC Electrical Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.55, pp.481 - 491. 2008.
- [3] J.Holtz and J.Quan, "Drift and parameter compensated flux estimator for persistent zero stator frequency operation of sensorless controlled induction motors," IEEE Transactions on Industry Applications, vol.39, no.4, pp.1052- 1060, 2003.
- [4] Maurizio Cirrincione, Marcello Pucci, Giansalvo Cirrincione, Gérard-André Capolino, "Sensorless Control of Induction Motors by Reduced Order Observer With MCA EXIN + Based Adaptive Speed Estimation", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.54, no.1, Feb. 2007.
- [5] M. Rashed and A. F. Stronach, "A stable back-EMF MRAS-based sensorless low speed induction motor drive insensitive to stator resistance variation," IEE Proceedings Electric Power Applications, vol. 151, pp. 685-693, 2004.
- [6] P.Vas, Sensorless Vector and Direct torque control New York: Oxford University Press, 1998.
- [7] J. Holtz, "Sensorless control of induction motor drives," Proc. of the IEEE, vol. 90, no. 8, pp. 1359-1394, August 2002.
- [8] C. Schauder, "Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 28, 1054-1061, 1992
- [9] Yaman B. Zbede, Shady M. Gadoue and David J. Atkinson, "Model Predictive MRAS Estimator for Sensorless Induction Motor Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics 2016.
- [10] Andrew N. Smith, Shady M. Gadoue and John W. Finch, "Improved Rotor Flux Estimation at Low Speeds for Torque MRAS-Based Sensorless Induction Motor Drives" IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 31, no. 1, March 2016
- [11] Binying Ye, Maurizio Cirrincione, Marcello Pucci, Giansalvo Cirrincione, "Sensorless Control of Induction Motors by the MSA based MUSIC technique", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, 2015.

Ngày nhận bài: 18/12/2017

Ngày chuyển phản biện: 21/12/2017

Ngày hoàn thành sửa bài: 12/1/2018

Ngày chấp nhận đăng: 19/1/2018