

PHƯƠNG PHÁP ƯỚC LƯỢNG HẲNG SỐ MÔMEN CỦA MÁY ĐIỆN ĐỒNG BỘ KÍCH THÍCH NAM CHÂM VĨNH CỬU DỰA TRÊN BỘ QUAN SÁT PHI TUYẾN

A METHOD FOR THE ESTIMATION OF TORQUE CONSTANT OF PERMANENT
MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE BASED ON A NONLINEAR OBSERVER

Vũ Hoàng Giang

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 22/04/2019, Ngày chấp nhận đăng: 30/07/2019, Phản biện: PGS.TS. Lê Văn Doanh

Tóm tắt:

Trong bài báo này, một phương pháp mới được đề xuất để ước lượng hằng số mômen của máy điện đồng bộ kích thích nam châm vĩnh cửu (MĐĐB-KTVC) dựa trên bộ quan sát phi tuyến cục bộ. Mô hình MĐĐB-KTVC làm việc trong vòng kín với bộ điều khiển tốc độ được lựa chọn để phân tích toán học. Một cấu trúc phù hợp của bộ quan sát được thiết lập dựa trên phép đo dòng điện stato có xét đến mục tiêu ước lượng hằng số mômen. Sau đó, thông số của bộ quan sát đã được tính toán và kiểm chứng thông qua mô phỏng khi MĐĐB-KTVC làm việc trong sơ đồ điều khiển mômen và điều khiển tốc độ. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ quan sát có đáp ứng nhanh và cung cấp thông tin hữu ích cho bộ điều khiển khi hằng số mômen thay đổi, xác nhận tính hợp lệ của phương pháp đề xuất.

Từ khóa:

Hằng số mômen, máy điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu, ước lượng trạng thái, quan sát phi tuyến, xác định thông số.

Abstract:

In this paper, a new method is proposed for the estimation of torque constant of permanent magnet synchronous machine (PMSM) that is based on a locally nonlinear observer. The PMSM operating in a closed loop with the speed control is selected to analyse. On the basis of stator current measurement and taking into account the purpose of estimating the torque constant, an appropriate structure of the observer is established. The observer parameters are then calculated and evaluated via simulation when the machine operates in either torque or speed control. Simulation results demonstrate the performance of observer with robust responses, which provide valuable information to the controller when the torque constant changes, that confirm the proposed method.

Keywords:

Torque constant; permanent magnet synchronous machine, state estimation, nonlinear observation, parameter identification.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Máy điện đồng bộ kích thích nam châm vĩnh cửu được sử dụng rộng rãi trong

những lĩnh vực hiện nay. So với máy điện xoay chiều kiểu dây quấn, MĐĐB-KTVC có mật độ năng lượng cao nên có kích

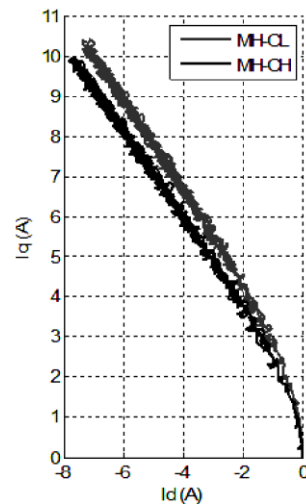
thước nhỏ gọn hơn với cùng công suất cho trước. Các máy điện này cũng có quán tính rôto nhỏ hơn nên có ưu thế trong các ứng dụng đòi hỏi đáp ứng nhanh. Hơn nữa, việc sử dụng các bộ biến đổi công suất làm cho hệ thống có đáp ứng nhanh hơn so với các hệ thống có cơ cấu cơ khí.

Điều khiển MĐĐB-KTVC với yêu cầu cao đòi hỏi thông tin chính xác về thông số trong mô hình toàn học của chúng. Thông tin này cho phép các bộ điều khiển tối ưu hóa hoạt động và hiệu suất của bộ truyền động tương ứng và có thể đáp ứng nhanh với các thay đổi có thể xảy ra đối với mô hình của máy. Các thông số chính của mô hình toán học MĐĐB-KTVC viết trong hệ tọa độ đồng bộ d-q bao gồm hằng số mômen, điện trở stato và điện cảm theo các trục d và q. Các thông số có thể thay đổi trong quá trình vận hành máy do tính chất phi tuyến của vật liệu làm nam châm vĩnh cửu, dễ chịu tác động bởi nhiệt độ vận hành và điểm làm việc.

Trong các thông số kể trên, hằng số mômen có ảnh hưởng đến tính toán điều khiển liên quan đến mômen của máy trong nhiều sơ đồ điều khiển khác nhau như sơ đồ điều khiển tối đa hóa mômen theo dòng điện (MTPC), sơ đồ điều khiển hạn chế từ thông rôto (FW), sơ đồ điều khiển tối đa hóa mômen theo điện áp (MTPV) và các sơ đồ điều khiển các thông số khác như dòng điện hay tốc độ rôto. Hơn nữa thông tin về giá trị của thông số còn rất hữu ích trong chẩn đoán sự cố của hệ thống [1].

Hình 1 minh họa kết quả so sánh quỹ đạo

của dòng điện của máy trong hệ tọa độ dq (i_d, i_q) trong sơ đồ điều khiển tốc độ. Có thể quan sát thấy sự khác biệt của quỹ đạo giữa hai trường hợp, đường MH-CL: thông số của bộ điều khiển và của máy giống nhau; và đường MH-CH: thông số của bộ điều khiển và máy lệch nhau với hằng số mômen của máy điện giảm 30%.



Hình 1. Sự thay đổi hằng số mômen trong điều khiển tối đa tỷ số mômen/dòng điện (max Torque/Ampere) [1]

Đây là dẫn chứng điển hình cho thấy thông tin về hằng số mômen có tác động lớn đến độ chính xác của quá trình điều khiển.

Trong các nghiên cứu vừa qua, nhiều phương pháp khác nhau đã được áp dụng để ước lượng thông số của MĐĐB-KTVC trong miền thời gian thực (online) hoặc ở trạng thái dựa trên dữ liệu lưu trữ trong các bộ nhớ với các bảng tra (look-up table). Các phương pháp thường gặp bao gồm: phương pháp phần tử hữu hạn [2], phương pháp dựa trên thuật toán bình phương cực tiểu đệ quy [1], phương pháp sử dụng hệ thống thích nghi tham chiếu

theo mô hình mẫu (MRAS) [3], phương pháp sử dụng bộ quan sát trượt (sliding mode observer) [4] phương pháp sử dụng bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) [5]. Ngoài ra, một nghiên cứu rất thú vị gần đây dựa trên mô hình với độ gợn sóng (ripple) của dòng điện stato cho phép ước lượng các thông số của MĐĐB-KTVC [6].

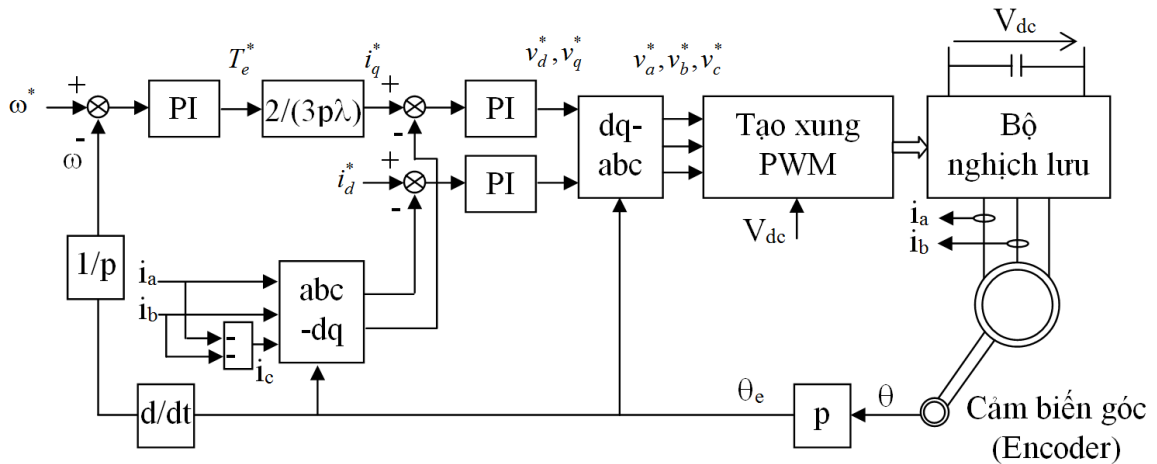
Mô hình của MĐĐB-KTVC được đánh giá là đơn giản so với nhiều loại máy điện khác như máy điện đồng bộ rôto dây quấn hay máy điện không đồng bộ nhưng vẫn thuộc nhóm mô hình phi tuyến. Do đó trong quan sát trạng thái và thông số, việc lựa chọn cấu trúc và thông số phù hợp đóng vai trò quyết định đến chất lượng quan sát. Bộ quan sát có cấu trúc tổng quát đề xuất trong [7] gần đây được áp dụng trong nhiều nghiên cứu trong ước

lượng trạng thái của hệ thống và ứng dụng trong điều khiển không cảm biến.

Trong nghiên cứu này, tác giả đề xuất ứng dụng bộ quan sát để ước lượng hằng số mômen của MĐĐB-KTVC. Bộ quan sát được thiết kế dựa trên phép đo dòng điện stato sẵn có trong hầu hết các hệ thống sử dụng MĐĐB-KTVC có điều khiển.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG MÁY ĐIỆN ĐỒNG BỘ KÍCH THÍCH NAM CHÂM VĨNH CỬU VỚI BỘ ĐIỀU KHIỂN TỐC ĐỘ

Sơ đồ của hệ thống có điều khiển sử dụng MĐĐB-KTVC được thể hiện trên hình 2. Trong đó có hai vòng điều khiển: vòng điều khiển ngoài cho tốc độ quay của rôto và vòng điều khiển trong cho dòng điện stato.



Hình 2. Sơ đồ mạch điều khiển MĐĐB-KTVC [8]

Thông số của các bộ điều khiển tốc độ quay và dòng điện tương ứng là $(k_{p\omega}, k_{i\omega})$ và (k_{pi}, k_{ii}) .

Mô hình toán học thu gọn của MĐĐB-KTVC trong hệ tọa độ đồng bộ (dq) được mô tả bởi hệ phương trình sau [9], [8]:

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -\frac{R_s i_d}{L_d} + \frac{p\omega L_q i_q}{L_d} + \frac{v_d}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} &= -\frac{R_s i_q}{L_q} - \frac{p\omega L_d i_d}{L_q} - \frac{p\omega \lambda}{L_q} + \frac{v_q}{L_q} \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} (T_e - F_v \omega - T_m) \end{aligned} \quad (1)$$

trong đó: i_d, i_q : thành phần dòng điện stato theo các trục d và q;

v_d, v_q : thành phần điện áp stato theo các trục d và q;

ω : tốc độ góc của rôto;

λ : biên độ của từ thông của rôto cảm ứng sang các pha của stato;

R_s : điện trở của cuộn dây stato;

L_d, L_q : điện cảm theo các trục d và q; p: số cặp cực.

T_e : mômen điện từ, được tính như sau:

$$T_e = 1.5p \left[\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right];$$

θ : góc rôto; T_m : mômen cơ trên trục của máy điện; J : hằng số quán tính; và F_v : hệ số ma sát.

Phương trình mô tả bộ điều khiển tốc độ và dòng điện được viết tương ứng bởi phương trình (2) và (3) [8].

$$\begin{cases} \frac{dz_1}{dt} = \omega^* - \omega \\ y_\omega = k_{p\omega} (\omega^* - \omega) + k_{i\omega} z_1 \\ i_q^* = T_e^* \cdot \frac{2}{3p\lambda} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{dz_2}{dt} = i_d^* - i_d \\ v_d^* = k_{pi} (i_d^* - i_d) + k_{ii} z_2 \\ \frac{dz_3}{dt} = i_q^* - i_q \\ v_q^* = k_{pi} (i_q^* - i_q) + k_{ii} z_3 \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó, các biến trạng thái z_1, z_2 , và z_3 được sử dụng để mô tả hệ thống có điều khiển. Giá trị đặt của thành phần dòng

điện theo trục d lấy bằng 0: $i_d^* = 0$; thành phần dòng điện theo trục q thu được từ phương trình (2). Các giá trị v_d^*, v_q^* tính được từ (3) được đưa vào bộ tạo xung để điều khiển bộ nghịch lưu của bộ truyền động. Do bộ nghịch lưu có hằng số quán tính nhỏ hơn nhiều so với hằng số quán tính của toàn hệ thống nên có thể coi

$$v_d = v_d^* \text{ và } v_q = v_q^*$$

Hệ phương trình (1), (2) và (3) là mô hình của máy điện làm việc trong vòng kín với chức năng điều khiển tốc độ.

3. XÁC ĐỊNH CẤU TRÚC VÀ THÔNG SỐ CỦA BỘ QUAN SÁT

Cấu trúc tổng quát của bộ quan sát phi tuyến được áp dụng trong phần này được đề xuất bởi [7]. Vấn đề quan trọng trong ứng dụng bộ quan sát này vào đối tượng cụ thể là đưa mô hình hệ thống về dạng thuộc lớp hệ phi tuyến thỏa mãn các điều kiện quan sát được với cấu trúc bộ quan sát tương ứng. Hơn nữa, lựa chọn thông số cũng rất quan trọng và mang tính quyết định đến đáp ứng của bộ quan sát.

Trên cơ sở mô hình hệ thống đã trình bày trong mục 2, mục này đưa mô hình về dạng cấu trúc phù hợp. Theo đó hệ thống được lựa chọn có cấu trúc như sau:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} X = A.X + B = F(u, X) \\ y = C.X \end{cases} \quad (4)$$

hay

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \\ y = C.X = X_1 \end{cases} \quad (5)$$

trong đó:

$$X_1 = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}, X_2 = \lambda, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{v_d}{L_d} \\ \frac{v_q}{L_q} \\ 0 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} -R_s & \frac{p\omega L_q}{L_d} & 0 \\ -\frac{p\omega L_d}{L_q} & -R_s & -\frac{p\omega}{L_q} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Các điện áp v_d, v_q được tính toán dựa vào các phương trình (2) và (3). Tốc độ quay ω có thể thu được từ phương trình thứ ba của (1) hoặc lấy từ phản hồi của hệ thống điều khiển.

Tiếp theo, các điều kiện để áp dụng cấu trúc bộ quan sát trong [7] sẽ được xác nhận dưới đây.

$$\text{Ta có } A_{12} = \frac{\partial F_1(X)}{\partial X_2} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{p\omega}{L_q} \end{bmatrix} \text{ có hạng 1}$$

với $\omega \neq 0$. Điều kiện *hình nón lồi* thỏa mãn vì với chiều quay không đổi, tốc độ ω có dấu không đổi thì ma trận A_{12} có quỹ đạo nằm ở một nửa mặt phẳng tọa độ. Cuối cùng, hệ thống điều khiển tốc độ của MĐĐB-KTVC là một hệ vật lý có thông số làm việc hữu hạn nên thỏa mãn điều kiện *toàn cục Lipschitz*.

Vậy bộ quan sát cho hệ thống (4) có dạng:

$$\frac{d\hat{X}}{dt} = F(u, X) + \Delta_\alpha K(C\hat{X} - y) \quad (6)$$

trong đó K : ma trận hệ số; Δ_α : ma trận đường chéo:

$$\Delta_\alpha = \begin{pmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \alpha^2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Tính toán ma trận K dựa trên bất đẳng thức đối với ma trận định nghĩa dương đối xứng ta thu được:

$$K = \begin{bmatrix} -26 & 0 \\ 0 & -25520 \\ 0 & 345 \end{bmatrix}$$

“Tune” giá trị α thu được $\alpha = 0,1$.

Trong mục tiếp theo, mô phỏng sẽ được thực hiện để đánh giá hoạt động của bộ quan sát.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Hai mô phỏng được phát triển bao gồm:

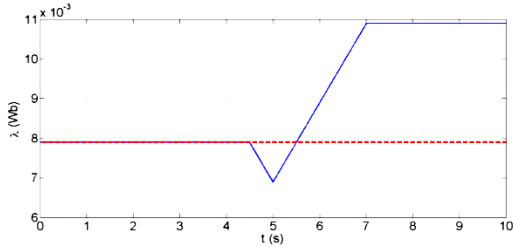
- Mô phỏng hệ thống trong hai trường hợp ứng với hằng số mômen khác nhau;
- Mô phỏng ước lượng hằng số mômen và cập nhật cho hệ thống điều khiển.

4.1. Mô phỏng khi hằng số mômen sai lệch

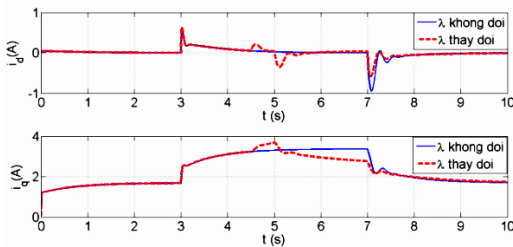
Mô phỏng MĐĐB-KTVC làm việc trong vòng kín với bộ điều khiển dòng điện theo giá trị đặt của mômen điện T_{ref} (đường nét chấm gạch trên hình 5). Kết quả mô phỏng được thể hiện trên các hình 3, 4 và 5. Trong đó các đường nét liền ứng với trường hợp λ không đổi, đường nét đứt ứng với trường hợp máy điện có λ thay đổi ($t = 4,5-10$ s) nhưng bộ điều khiển vẫn sử dụng giá trị λ không đổi.

Có thể thấy sự thay đổi của λ gây ra sai lệch trong dòng điện stato. Hơn nữa mômen điện trong hình 5 (đường nét đứt)

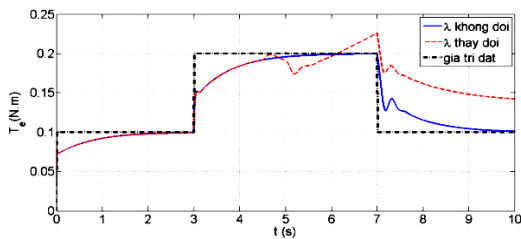
không đáp ứng theo giá trị đặt (đường nét chấm gạch).



Hình 3. Mô phỏng quan sát tốc độ rôto



Hình 4. Sai lệch dòng điện do sự thay đổi của hằng số mômen



Hình 5. Sai lệch dòng điện do sự thay đổi của hằng số mômen

Đây là minh chứng xác nhận lại sự ảnh hưởng của hằng số mômen tới độ chính xác trong điều khiển đã đề cập ở mục 1. Từ đó có thể thấy việc cập nhật thông tin về hằng số mômen khi có bất kỳ sự thay đổi nào là rất cần thiết cho hoạt động chung của hệ thống.

4.2. Mô phỏng ước lượng hằng số mômen

Mục này giới thiệu kết quả mô phỏng chính của nghiên cứu, ở đó nhờ việc sử dụng bộ quan sát, thông tin về hằng số mômen liên tục được cập nhật cho hệ thống điều khiển. Mô phỏng được phát

triển dựa trên các điều kiện sau:

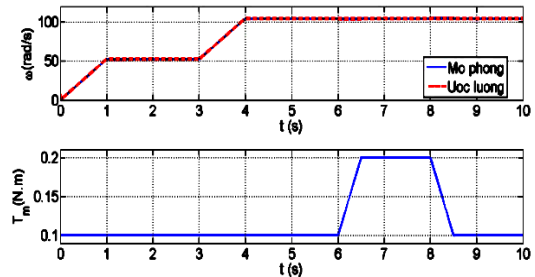
- Thông số của máy điện và bộ điều khiển cho trong phụ lục.
- Các điều kiện đầu của hệ thống và bộ quan sát được cho lần lượt như sau:

$$[i_d \ i_q \ \omega \ z_1 \ z_2 \ z_3] = [0, 0, 0, 0, 0, 0]$$

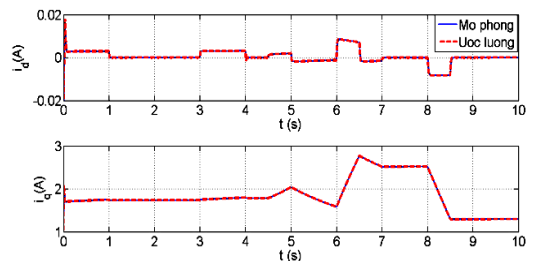
$$[\hat{i}_d \ \hat{i}_q \ \hat{\omega} \ \hat{z}_1 \ \hat{z}_2 \ \hat{z}_3 \ \hat{\lambda}]$$

$$= [0, 0.1, 0, 10, 0, 0, 0.01]$$

MĐĐB-KTVC được mô phỏng trong 10 s với tải thay đổi theo thời gian như trên hình 5 (hình dưới). Tốc độ điều khiển thu được đáp ứng tốt như trên hình 6 (hình trên). Dòng điện mô phỏng và ước lượng được so sánh như thể hiện trên hình 7.



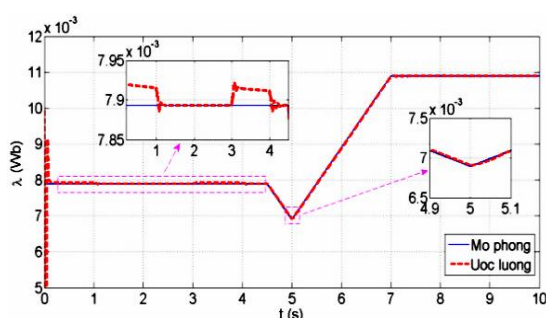
Hình 6. Kết quả ước lượng tốc độ quay và dạng mômen cơ



Hình 7. Kết quả mô phỏng và ước lượng của dòng điện

Kết quả ước lượng hằng số mômen được thể hiện trên hình 8. Có thể thấy trong điều kiện làm việc biến động như khi có sự thay đổi về giá trị đặt của tốc độ hay sự thay đổi về mômen cơ, giá trị quan sát của

hằng số mômen (đường nét đứt) có thể thu được rất chính xác so với giá trị thực tế biến thiên (đường nét liền). Đây là minh chứng xác nhận phương pháp ước lượng hằng số mômen đã đề xuất có khả năng đáp ứng nhanh và chính xác trong các chế độ làm việc khác nhau của hệ thống và có thể cung cấp thông tin trực tuyến cho bộ điều khiển.



Hình 8. Kết quả quan sát hằng số mômen

Thông tin về hằng số mômen không những đem lại lợi ích trong điều khiển máy điện mà còn có thể rất hữu ích trong phát hiện sự cố, cảnh báo sự thay đổi theo chiều hướng có thể dẫn đến tình trạng nam châm vĩnh cửu mất từ tính ở nhiệt độ cao vượt qua ngưỡng nhiệt độ Curie [10] của vật liệu chế tạo.

5. KẾT LUẬN

Hệ thống sử dụng MĐĐB-KTVC đã được

mô tả dưới dạng hệ phi tuyến có thể quan sát cục bộ với hệ số ma trận quan sát là hằng số để ước lượng hằng số mômen. Kết quả quan sát thu được có đáp ứng tốt trong cả hai chế độ xác lập và quá độ. Giá trị của hằng số mômen có thể sử dụng trong miền thời gian thực để cập nhật cho hệ thống điều khiển nhằm có được đáp ứng điều khiển tốt.

Bên cạnh hằng số mômen, các thông số khác như điện trở, điện cảm trong mô hình của MĐĐB-KTVC cũng rất nhạy cảm với các điều kiện khác nhau như nhiệt độ làm việc đòi hỏi các nghiên cứu tiếp theo trong ước lượng các thông số này dựa trên các bộ quan sát có cấu trúc phù hợp.

PHỤ LỤC

Thông số của MĐĐB-KTVC Hurst, DMA0204024B101: Số đôi cực $p = 5$; điện áp định mức: 20,12 V; dòng điện định mức: 3,42 A; mômen tải cực đại: 0,2259 N.m; $R_s = 0,57\Omega$; $L_s = 0,64$ mH; $J = 1,7721 \cdot 10^{-5}$ N.m/rad/s²; $\lambda = 0,0078933$ Wb.

Thông số của các bộ điều khiển: Bộ điều khiển tốc độ: $k_{p\omega} = 0,006$; $k_{i\omega} = 0,6$. Bộ điều khiển dòng điện: $k_{pi} = 1$, $k_{ii} = 10$.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S.J. Underwood and I. Husain, "Online parameter estimation and adaptive control of permanent-magnet synchronous machines," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 7, pp. 2435-2443, 2010.
- [2] C.C. Hwang and Y.H. Cho, "Effects of leakage flux on magnetic fields of interior permanent magnet synchronous motors," IEEE transactions on magnetics, vol. 37, no. 4, pp. 3021-3024, 2001.
- [3] O.C. Kivanc and S.B. Ozturk., "Sensorless PMSM drive based on stator feedforward voltage estimation improved with MRAS multiparameter estimation," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 23, no. 3, pp. 1326-1337, 2018.

- [4] Y.S. Han, J.S. Choi and Y.S. Kim, "Sensorless PMSM drive with a sliding mode control based adaptive speed and stator resistance estimator," IEEE Transactions on magnetics, vol. 36, no. 5, pp. 3588-3591, 2000.
- [5] Y. Shi, K. Sun, L. Huang and Y. Li, "Online identification of permanent magnet flux based on extended Kalman filter for IPMSM drive with position sensorless control," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 11, pp. 4169-4178, 2011.
- [6] K. Choi, Y. Kim, K.S. Kim and S.K. Kim, "Using the Stator Current Ripple Model for Real-Time Estimation of Full Parameters of a Permanent Magnet Synchronous Motor," IEEE Access 7, pp. 33369-33379, 2019.
- [7] H. Hammouri and M. Farza, "Nonlinear observers for locally uniformly observable systems," ESAIM. COCV, vol. 9, pp. 353-370, 2003.
- [8] H.G. Vũ, "Ước lượng tốc độ quay và mômen cơ của máy điện đồng bộ kích thích nam châm vĩnh cửu dựa trên bộ quan sát phi tuyến đều", Tạp chí Khoa học và Công nghệ năng lượng, Trường Đại học Điện lực, vol. 11, pp. 26-32, 2016.
- [9] R. Krishnan, Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives, Taylor & Francis, 2009.
- [10] D. Jiles, Introduction to magnetism and magnetic materials, CRC press, 2015.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Vũ Hoàng Giang tốt nghiệp đại học và nhận bằng Thạc sĩ tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội vào các năm 2002 và 2005. Năm 2014 nhận bằng Tiến sĩ ngành kỹ thuật điện tại Trường Đại học Claude Bernard Lyon 1, Cộng hòa Pháp. Hiện nay tác giả công tác tại Trường Đại học Điện lực.

Hướng nghiên cứu chính: chẩn đoán hư hỏng trong máy điện, ước lượng thông số của máy điện, điều khiển máy điện và các bộ biến đổi sử dụng thiết bị điện tử công suất, ứng dụng của các bộ biến đổi trong lưới điện thông minh.

