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

ESTIMATION OF THE SPEED AND MECHANICAL TORQUE FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE BASED ON THE UNIFORMLY NONLINEAR OBSERVER

Vũ Hoàng Giang

Trường Đại học Điện lực

Tóm tắt:

Giảm thiểu số lượng các cảm biến sử dụng trong các bộ truyền động sử dụng máy điện đồng bộ kích thích nam châm vĩnh cửu mang lại nhiều lợi ích khác nhau như giảm chi phí, giảm độ phức tạp, và nâng cao độ tin cậy của hệ thống. Để thực hiện được điều đó, ước lượng trạng thái dựa trên các hiểu biết về mô hình của hệ thống được áp dụng rộng rãi nhằm thu được giá trị của các đại lượng quan trọng như tốc độ quay của roto và môMen cơ trên trục của máy điện, phục vụ cho các mục đích điều khiển, giám sát và chẩn đoán hư hỏng của bộ truyền động. Bài báo giới thiệu một ứng dụng dựa trên bộ quan sát cho hệ phi tuyến có thể quan sát được đều để ước lượng tốc độ quay của roto và môMen cơ dựa trên phép đo dòng điện stato. Quá trình thiết lập mô hình toán học của hệ thống có điều khiển và xây dựng chi tiết bộ quan sát thông số được trình bày trong nghiên cứu này. Mô phỏng trên máy tính sử dụng bộ thông số của một máy điện thực tế xác nhận tính hợp lệ của bộ quan sát được thiết kế.

Từ khóa:

Máy điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu, ước lượng trạng thái, quan sát môMen, quan sát tốc độ quay, hệ phi tuyến quan sát được đều.

Abstract:

The reduction of sensors utilized in the permanent magnet synchronous machine (PMSM) based drive brings various benefits such as low cost, less complexibility, and improved relability to the system. To obtain such purpose, state estimation based on the knowledge of model is widely applied in order to get the information of essential quantities including the rotor speed and mechanical torque, which is useful for the control, monitoring and diagnosis of the drive. This paper introduces an application of observer design for uniformly observable nonlinear system to estimate the machine speed and mechanical torque on the basis of the stator current measurement. Mathematical description of the controlled system and detailed process of designing the observer are presented in this study. Computer simulation using the parameters of a real machine confirms the performance of the developed observer.

Ngày nhận bài: 23/5/2016, ngày chấp nhận đăng: 14/9/2016, phản biện: PGS. TS. Nguyễn Văn Liễn.

Keywords:

Permanent magnet synchronous machine, state estimation, torque observation, speed observation, uniformly observable nonlinear system.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ước lượng trạng thái của mô hình máy điện đồng bộ kích thích nam châm vĩnh cửu (MĐĐB-KTVC) được quan tâm rộng rãi trong các nghiên cứu và ứng dụng liên quan. Nhiều nghiên cứu tập trung vào ước lượng tốc độ quay (hoặc góc roto) để làm phản hồi cho các hệ có điều khiển không sử dụng cảm biến tốc độ, [1], [2], [3]. Bên cạnh đó, các nghiên cứu ước lượng mômen cơ cũng được thực hiện khá phổ biến [4]-[5]. Trong đó, các tác giả tập trung vào sử dụng thuật toán bộ lọc Kalman, [4], [5]. Đặc điểm của bộ lọc Kalman là dễ sử dụng, trực quan trong xây dựng tính toán xấp xỉ, phù hợp với các bài toán ước lượng biến trạng thái trong thực tế. Tuy nhiên bộ lọc EKF gặp nhiều khó khăn đối với hệ phi tuyến mạnh và việc tính toán ma trận Jacobian có thể gặp phải sai số lớn.

Trong nghiên cứu hiện tại, tác giả đề xuất một ứng dụng mới của bộ quan sát cho hệ phi tuyến quan sát được đều để ước lượng tốc độ quay của roto và mômen cơ của MĐĐB-KTVC. Bộ quan sát được thiết kế với ma trận hệ số hằng và chỉ dựa trên đầu ra là dòng điện stato.

Bài báo được bố cục như sau. Mục 2 giới thiệu mô hình của MĐĐB-KTVC và bộ điều khiển. Cấu trúc của bộ điều khiển cho hệ phi tuyến quan sát được đều trong trường hợp tổng quát được giới thiệu trong mục 3. Sau đó, mục 4 trình bày áp dụng của bộ quan sát vào ước lượng trạng thái của MĐĐB-KTVC, kết quả mô phỏng và thảo luận. Cuối cùng các kết luận cho nghiên cứu được đưa ra trong mục 5.

2. MÔ HÌNH MÁY ĐIỆN ĐỒNG BỘ KÍCH THÍCH NAM CHÂM VĨNH CỬU VÀ BỘ ĐIỀU KHIỂN

2.1. Mô hình MĐĐB-KTVC

Mô hình toán học của MĐĐB-KTVC trong hệ tọa độ đồng bộ (dq) được biểu diễn bởi hệ phương trình sau (1) [6].

$$\begin{aligned} di_d/dt &= -R_s i_d/L_d + p\omega L_q i_q/L_d + v_d/L_d \\ di_q/dt &= -R_s i_q/L_q - p\omega L_d i_d/L_q - p\omega\lambda/L_q + v_q/L_q \\ d\omega/dt &= T_e/J - F_v\omega/J - T_m/J \\ d\theta/dt &= \omega \\ dT_m/dt &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

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 roto;

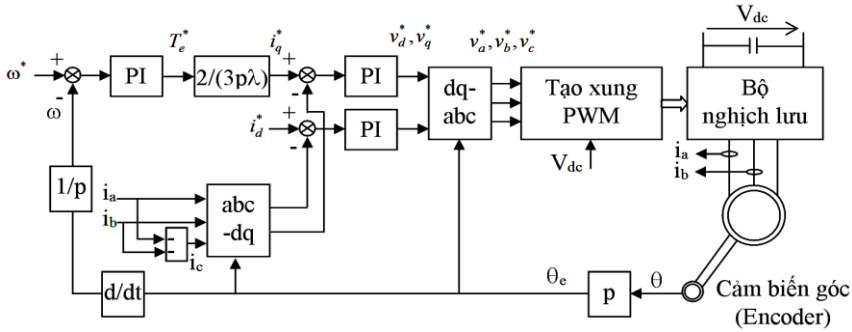
λ: biên độ của từ thông của roto cảm ứng sang các pha của stato;

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



Hình 1. Sơ đồ mạch điều khiển MĐĐB-KTVC

2.2. Mô hình của bộ điều khiển

Trong bộ truyền động, máy điện làm việc trong vòng kín có sự tham gia của bộ điều khiển. Trong nghiên cứu này, bộ điều khiển PI được sử dụng để điều chỉnh dòng điện stato và tốc độ quay. Thiết kế bộ điều khiển PI đã được giới thiệu phổ biến trong các nghiên cứu đã qua, ví dụ xem tài liệu [6][7].

Sơ đồ của mạch điều khiển MĐĐB-KTVC được thể hiện trên hình 1 với vòng điều khiển ngoài cho tốc độ quay của roto và vòng điều khiển trong cho dòng điện stato. Thông số của bộ điều khiển tốc độ quay: $k_{p\omega}$, $k_{i\omega}$ và bộ điều khiển dòng điện: k_{pi}, k_{ii} được cho trong phần Phụ lục. Theo đó, để mô tả hệ thống có điều khiển cần bổ sung thêm các phương trình trạng thái của bộ điều khiển với các biến trạng mới z_1, z_2, và z_3 như dưới đây.

Phương trình mô tả bộ điều khiển tốc độ được viết dưới dạng:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \omega^* - \omega \\ y_\omega = k_{p\omega}\left(\omega^* - \omega\right) + k_{i\omega} z_1 \\ i_q^* = T_e^* . \dfrac{2}{3p\lambda} \end{cases} \quad (2)$$

Tương tự đối với bộ điều khiển dòng điện, ta có:

$$\begin{cases} \dot{z}_2 = i_d^* - i_d \\ v_d^* = k_{pi}\left(i_d^* - i_d\right) + k_{ii} z_2 \\ \dot{z}_3 = i_q^* - i_q \\ v_q^* = k_{pi}\left(i_q^* - i_q\right) + k_{ii} z_3 \end{cases} \quad (3)$$

trong đó 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).

Hơn nữa, 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. Chú ý rằng 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: $v_d = v_d^*$ và $v_q = v_q^*$.

Kết hợp các phương trình

$d\theta / dt = \omega$

$dT_m / dt = 0$

(1), (2) và (3), mô hình của máy điện có thể viết lại dưới dạng ma trận như sau:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A.X + B = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 & F_3 & F_4 \end{bmatrix}^T \\ &= \begin{bmatrix} F_{12} & F_3 & F_4 \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (4)$$

với $X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega \\ -T_m / J \end{bmatrix}$,

$$B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

trong đó:

$a_{11} = -\frac{R_s + k_{pi}}{L_d}$, $a_{22} = -\frac{R_s}{L_q}$, $a_{13} = \frac{L_q}{L_d} pi_q$,

$a_{23} = -\left(\frac{L_d}{L_q} pi_d + \frac{\lambda p}{L_q} + \frac{2k_{pi}k_{p\omega}}{3p\lambda L_q} \right)$, $a_{33} = -\frac{F_v}{J}$,

$a_{34} = 1$, $b_1 = \frac{k_{ii} z_2}{L_d}$,

$b_2 = \frac{k_{ii} z_3}{L_q} + \frac{2k_{pi}\left(k_{i\omega} z_1 + k_{p\omega}\omega^*\right)}{3p\lambda L_q}$, $b_3 = \frac{T_e}{J}$

3. CẤU TRÚC CỦA BỘ QUAN SÁT CHO HỆ QUAN SÁT ĐƯỢC ĐỀU

Xét hệ thống được mô tả bởi phương trình có dạng, [8]:

$$\begin{cases} \dot{z} = F(u,z) \\ y = C.z \end{cases} \quad (5)$$

trong đó: $z = (z_1\ z_2\ \dots\ z_q)^T$ *là biến trạng thái;* $z_i \in \Re^{n_i}$, $n_1 \geq n_2 \geq \dots \geq n_q$, $n_1+n_2+\dots+n_q=n$ *; u là biến đầu vào có giá trị thuộc tập hợp bị chặn* $U \in \Re^m$ *;*

$F(u,z) = \left(F_1(u,z)\ \ F_2(u,z)\ \ \dots\ \ F_q(u,z)\right)^T$

với $F_i(u,z)$*, i = 1,..., q-1 được biểu diễn dưới dạng:* $F_i(u,z) = F_i(u, z_1, z_2, \dots, z_{i+1}), z_i \in \Re^{n_i}$ *thỏa mãn điều kiện về hạng ma trận sau:*

$$Rank\left(\frac{\partial F_i}{\partial z_{i+1}}(u,z) \right) = n_{i+1}, \forall u \in U, \forall z \quad (6)$$

Tác giả của nghiên cứu [8] đã chứng minh được điều kiện cần để thiết kế một bộ quan sát với hệ số hằng cho hệ (5) là:

i) Điều kiện toàn cục Lipschitz

$$\exists c > 0; \forall z, z' \in \Re^n, \forall u \in U, \quad \|F(u,z) - F(u,z')\| \leq c\|(z - z')\| \quad (7)$$

ii) Điều kiện hình nón lồi

Với $\forall k$, $1 \leq k \leq q-1$, tồn tại ma trận $S_{k,k+1}$ có kích thước $n_k \times n_{k+1}$ sao cho với mọi $(u,z) \in (U \times R^n)$

$$\frac{\partial F_k}{\partial z_{k+1}}(u,z) \in C(n_k, n_{k+1}; -1S_{k,k+1})$$

trong đó: $C(n_k, n_{k+1}; -1S_{k,k+1})$ là hình nón lồi cho bởi:

$$C(n_k, n_{k+1}; -1S_{k,k+1}) = \left\{ T \in \Im(n_k, n_{k+1}; \Re) \right\}$$

thỏa mãn $T^T S_{k,k+1} + S_{k,k+1}^T T \leq -I_{n_{k+1}}$ với $\Im(n_k, n_{k+1}; \Re)$ là không gian các ma trận thực có kích thước n_k x n_{k+1}. (8)

Nếu hai điều kiện vừa nêu thỏa mãn thì tồn tại ma trận định nghĩa dương đối xứng Q và các hằng số dương ρ, η sao cho với mọi $(u,z) \in (U \times R^n)$, ta có:

$$QA(u,z) + A(u,z)^T Q - \rho C^T C \leq \eta I \quad (9)$$

trong đó:

$$A(u,z)=\begin{pmatrix} 0 & A_{12}(u,z) & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & A_{q-1,q}(u,z) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

với $A_{k,k+1}(u,z)=\dfrac{\partial F_k}{\partial z_{k+1}}(u,z)$ là ma trận kích thước $n_i \times n_{i+1}$ và I là ma trận đơn vị với kích thước phù hợp.

Cuối cùng, theo [8], bộ quan sát cho hệ thống (5) có dạng:

$$\dot{\hat{z}} = F(u,\hat{z}) + \Delta_\alpha K(C\hat{z} - y) \qquad (10)$$

trong đó $K = Q^{-1}C^T$; Δ_α là ma trận đường chéo:

$$\Delta_\alpha = \begin{pmatrix} \alpha I_{n_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \alpha^q I_{n_q} \end{pmatrix} \qquad (11)$$

với I_{n_k} là ma trận đơn vị kích thước $n_k \times n_k$, $k = 1,2,...,q$; α là thông số cần điều chỉnh ("tune").

Trong mục tiếp theo, cấu trúc bộ quan sát đã giới thiệu trong phần này sẽ được áp dụng để ước lượng thông số cho hệ thống mô tả trong mục 2.

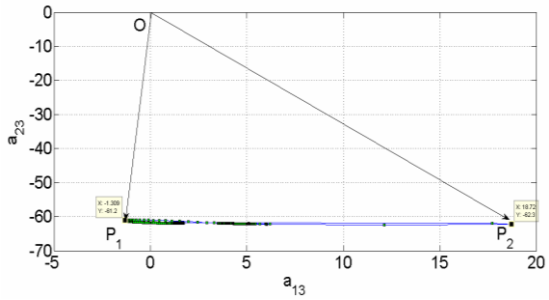
4. MÔ PHỎNG VÀ BÀN LUẬN

Trước hết cần xác nhận hệ thống ở mục 2 thỏa mãn các điều kiện cần (7) và (8) để thiết kế bộ quan sát có cấu trúc (10).

Có thể thấy hệ thống MĐĐB-KTVC là hệ vật lý có thông số làm việc hữu hạn nên điều kiện (7) đương nhiên thỏa mãn. Như vậy cần xác nhận thêm điều kiện (8) cũng thỏa mãn. Từ hệ phương trình (4), ta có: $A_{34}(u,X) = \dfrac{\partial F_3}{\partial X_4}(u,X) = a_{34}$, là hằng số. Ta cần kiểm tra thêm giá trị của $A_{12,3}(u,X) = \dfrac{\partial F_{12}}{\partial X_3}(u,X) = \begin{pmatrix} a_{13} \\ a_{23} \end{pmatrix}$ thuộc tập hợp bị chặn.

Thật vậy, mô phỏng hệ thống MĐĐB-KTVC làm việc với tốc độ quay và mômen cơ khác nhau trong vùng thông số định mức cho quỹ đạo $A_{12,3}(u,X)$ như trên hình 2.

Hình 2 cho thấy quỹ đạo của $A_{12,3}(u,X)$ được giới hạn bởi hai vectơ OP_1 và OP_2, với O(0,0), P_1(–1.3, –61.2), P_2(18.7, –62.3), và luôn nằm ở nửa dưới của mặt phẳng tọa độ. Do đó có thể khẳng định, ma trận A thuộc tập hợp bị chặn hay về mặt hình học, nó nằm trong một hình nón lồi và có dấu không đổi. Vậy điều kiện để sử dụng bộ quan sát có cấu trúc (10) thỏa mãn.



Hình 2. Quỹ đạo của $A_{1,2,3}$ (u,X)

Nội dung còn lại là tính toán ma trận hệ số K và tìm các hằng số điều chỉnh ρ, η, và α.

Ma trận hệ số K là lời giải của phương trình (9), áp dụng cho hệ thống đang xét ta có bất đẳng thức:

$$QA(u,z) + A(u,z)^T Q - \rho C^T C \le \eta I \qquad (12)$$

trong trường hợp đang nghiên cứu, ma trận C tương ứng với phép đo dòng điện stato, nghĩa là $C = [I_{2x2}, O_{2x2}]$, với I_{2x2} và

O_{2x2} tương ứng là ma trận đơn vị và ma trận không kích thước 2 × 2. Chọn η=1, ρ = 1 để giải ta có: K = [–9,1;0, –7; –2,73; –1,28]. Mô phỏng và điều chỉnh (tune) thu được giá trị α = 10.

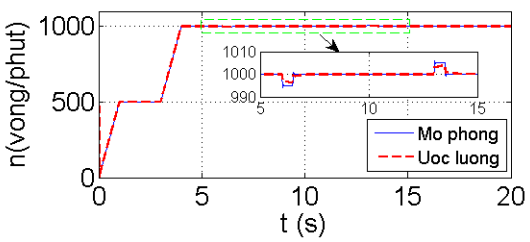
Tiếp theo, tiến hành mô phỏng hệ thống và bộ quan sát với các điều kiện đầu như sau:

$\left[i_d \quad i_q \quad \omega \quad -T_m/J \quad \theta \quad z_1 \quad z_2 \quad z_3\right]$

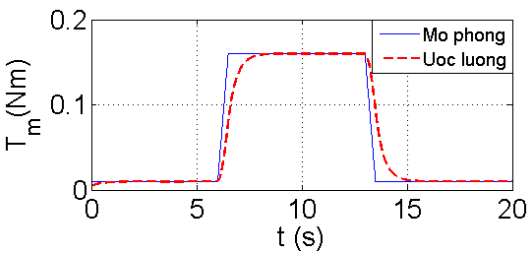
= [0, 0, 0, –0.01/J, 0, 0, 0, 0];

$\left[\hat{i}_d \quad \hat{i}_q \quad \hat{\omega} \quad -\hat{T}_m/J \quad \hat{\theta} \quad \hat{z}_1 \quad \hat{z}_2 \quad \hat{z}_3\right]$

= [1, –1, 10.5, 0, 0, 0, 0, 0];



Hình 3. Mô phỏng quan sát tốc độ roto



Hình 4. Mô phỏng quan sát mômen cơ

Các kết quả chính của mô phỏng thu được, thể hiện trên hình 3 cho tốc độ quay và hình 4 cho mômen cơ. Trong khoảng thời gian từ (0-5)s, máy điện làm việc ứng với hai tốc độ yêu cầu khác nhau là n*=500 vòng/phút và n*=1000 vòng/phút (giá trị yêu cầu của tốc độ góc tương ứng là ω* = n*.π/30, rad/s). Ước lượng tốc độ ở Hình 3 cho kết quả tốt trong quá trình quá độ và chế độ xác lập. Sau đó, mômen cơ được thay đổi trong giới hạn định mức với dạng biến thiên như trên hình 4, đủ "thử thách" đối với bộ quan sát. Kết quả quan sát là đường màu đỏ nét đứt đã hội tụ khá tốt đối với mômen cơ mô phỏng (đường nét liền) của hệ thống. Tóm lại các kết quả ước lượng có thể cung cấp thông tin tốc độ quay và mômen cơ với đáp ứng nhanh cho phép có thể sử dụng cho nhiều mục đích khác nhau, ví dụ như làm phản hồi cho điều khiển tốc độ, bù sai lệch mômen trong các bộ điều khiển, và lấy thông tin về mức độ mang tải đánh giá định lượng giá trị mômen của máy điện trong quá trình chẩn đoán hư hỏng.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã giới thiệu kết quả ứng dụng của bộ quan sát cho hệ phi tuyến quan sát được đều trong ước lượng tốc độ quay và mômen cơ của MĐĐB-KTVC.

Kết quả mô phỏng cho thấy bộ quan sát hoạt động tốt, đây là cơ sở để mở rộng kết quả nghiên cứu, sử dụng kết quả ước lượng cho các mục đích khác nhau như chẩn đoán hư hỏng hoặc làm phản hồi cho các bộ điều khiển.

6. 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 = 0,57Ω; L_s = 0,64 mH; J = 1.7721.10^{-5} N.m/rad/s^2; λ= 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] Matthias, and Erik Schaltz Preindl, "Sensorless model predictive direct current control using novel second-order PLL observer for PMSM drive systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 9, pp. 4087-4095, 2011.

[2] Hongryel, Jubum Son, and Jangmyung Lee Kim, "A high-speed sliding-mode observer for the sensorless speed control of a PMSM," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 9, pp. 4069-4077, 2011.

[3] Yongsoon, and Seung-Ki Sul Park, "Sensorless control method for PMSM based on frequency-adaptive disturbance observer," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, no. 3, pp. 143-151, 2014.

[4] Z., Yongdong, L., Fadel, M., & Xi, X. Zedong, "A rotor speed and load torque observer for PMSM based on extended Kalman filter," in *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2006, pp. 233-238.

[5] L., Fadel, M., Astier, S., & Calegari, L. Gasc, "Load torque observer for minimising torque ripple in PMSM," *Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems*, vol. 2, pp. 473-476, 2003.

[6] Zheng, Maurice Fadel, and Li Yon Gdong Zedong, "A high-performance control system of PMSM based on load torque observer," in *Power Electronics Specialists Conference*, 2007.

[7] Jin-Woo, Tae Hyun Kim, and Han Ho Choi Jung, "Speed control of a permanent magnet synchronous motor with a torque observer: a fuzzy approach," *IET Control Theory & Applications*, vol. 4, no. 12, pp. 2971-2981, 2010.

[8] Dariusz Janiszewski, "Load torque estimation in sensorless pmsm drive using unscented kalmana filter," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2011.

[9] R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives.: Taylor & Francis*, 2009.

[10] Olivier Tremblay, "*Modélisation, simulation et commande de la machine synchrone à aimants à force contre-électromotrice trapézoidale*," Ph.D. dissertation 2006.

[11] Hassan Hammouri and M Farza, "Nonlinear observers for locally uniformly observable systems," *ESAIM. COCV*, vol. 9, pp. 353-370, 2000.

Giới thiệu tác giả:

Tác giả **Vũ Hoàng Giang** tốt nghiệp đại học và thạc sĩ tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội vào các năm 2002 và 2005. Năm 2014 nhận bằng tiến sĩ kỹ thuật điện tại Trường Đại học Claude Bernard Lyon 1, Cộng hòa Pháp. Hiện đang 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.

Email: giangvh@epu.edu.vn