

ỨNG DỤNG BỘ QUAN SÁT PHI TUYẾN ĐỀU CỤC BỘ TRONG ƯỚC LƯỢNG TRẠNG THÁI CỦA ĐỘNG CƠ ĐIỆN MỘT CHIỀU KÍCH TỪ NỐI TIẾP

APPLICATION OF A LOCALLY UNIFORMLY NONLINEAR OBSERVER TO THE STATE ESTIMATION OF SERIES CONNECTED DIRECT CURRENT MOTOR

Vũ Hoàng Giang

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 27/11/2017, Ngày chấp nhận đăng: 26/2/2018, Phản biện: TS. Mai Hoàng Công Minh

Tóm tắt:

Thông tin về biến trạng thái cơ học rất cần thiết cho quá trình điều khiển và vận hành các bộ truyền động điện nói chung. Giá trị tức thời của các biến trạng thái này có thể thu được bằng cách sử dụng các cảm biến hoặc ước lượng từ các giá trị đo có sẵn. Giải pháp sau thường thu hút được nhiều sự quan tâm trong cả nghiên cứu và ứng dụng khi giảm được chi phí và tính phức tạp của hệ thống. Bài báo giới thiệu một ứng dụng của bộ quan sát trong ước lượng mômen tải và tốc độ quay của động cơ điện một chiều (ĐCMC) kích từ nối tiếp. Dựa trên mô hình phi tuyến của ĐCMC kích từ nối tiếp, mô hình hệ thống với cấu trúc dạng phi tuyến chính tắc được lựa chọn để thiết kế bộ quan sát phi tuyến. Bộ quan sát thu được có đáp ứng nhanh và có thể ước lượng được các biến trạng thái cơ học của động cơ theo dòng điện phần ứng. Mô phỏng trên máy tính cho kết quả tốt xác nhận tính hợp lệ của bộ quan sát đã được thiết kế.

Từ khóa:

Động cơ điện một chiều kích từ nối tiếp, ước lượng trạng thái, quan sát mômen; quan sát tốc độ quay, hệ phi tuyến quan sát được đều cục bộ.

Abstract:

The knowledge of mechanical state variables is essential for the control and operation of electric drives in general. Instant values of these variables can be obtained by using either sensors or estimated by utilizing observers on the basis of available measurement. The latter solution has been received much attention in both research and industrial application since it allows to reduce the cost and complexity of the system. The paper introduces an application of locally uniformly nonlinear observer to the observation of load torque and speed of series connected direct current (DC) motor. Based on the nonlinear model of series connected DC motor, the system with a canonical form is selected in order to design a nonlinear observer. The observer provides with robust responses and ability of estimating motor mechanical variables on the basis of armature current measurement. Computer simulation gives good results that confirms the performance of the developed observer.

Keywords:

Direct current motor, state estimation, torque observation, speed observation, locally uniformly observable nonlinear system.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay máy điện một chiều vẫn đóng một vai trò nhất định trong lĩnh vực có yêu cầu cao về điều chỉnh tốc độ như máy cán, giao thông vận tải, hầm mỏ, dầu khí... nhờ các ưu điểm về mômen mở máy lớn, đặc tính điều chỉnh tốc độ bằng phẳng và phạm vi điều chỉnh rộng. Trong nhóm các ĐCMC, loại có kích từ nối tiếp phù hợp với các ứng dụng có yêu cầu mômen lớn ở tốc độ thấp như cần cẩu, thang máy, băng tải, khoan dầu...[1]. Tuy nhiên, so với loại có kích từ song song hoặc kích từ bằng nam châm vĩnh cửu, loại máy điện này có mô hình phức tạp hơn do mômen điện từ tỷ lệ với bình phương của dòng điện phản ứng trong vùng chưa bão hòa. Đây là lý do cần áp dụng kiến thức về điều khiển và quan sát hệ phi tuyến cho ĐCMC kích từ nối tiếp để đáp ứng được yêu cầu về điều khiển và ước lượng thông số.

Trong các nghiên cứu về ước lượng trạng thái của ĐCMC, giống như nhiều hệ thống sử dụng máy điện khác, bộ lọc Kalman thường là một lựa chọn phổ biến. Các bộ quan sát dựa trên bộ lọc Kalman mở rộng hoặc thích nghi đã được đề xuất để ước lượng các biến trạng thái cơ học của ĐCMC [2], [3]. Nhược điểm chính của các bộ quan sát họ Kalman là đòi hỏi khối lượng tính toán lớn. Trong [4], bộ quan sát từng bước (step-by-step) ứng dụng phép sai phân trượt bậc hai đã được phát triển để quan sát tốc độ quay dựa trên phép đo dòng điện phản ứng. Trong [5], mômen tải đã được ước lượng sử

dụng trong bộ điều khiển truyền thẳng (feed-forward) thích nghi của ĐCMC cấp nguồn qua bộ biến đổi tăng áp DC-DC. Tuy nhiên đối tượng là ĐCMC kích thích nam châm vĩnh cửu thuộc nhóm có mô hình tuyến tính nên trạng thái có thể ước lượng đơn giản hơn trường hợp mô hình phi tuyến. Một nghiên cứu khá đầy đủ với nhiều loại bộ quan sát khác nhau đã được đề cập tới như bộ quan sát có hệ số hiệu chỉnh lớn (high-gain), Luenberger, và Kalman mở rộng [3]. Các bộ quan sát này được phối hợp với nhau để có thể ước lượng trạng thái với mục tiêu là khử nhiễu tốt đồng thời kết quả quan sát đủ chính xác để có thể sử dụng được. Tuy nhiên chỉ kết quả quan sát tốc độ quay được công bố và quá trình tính toán lựa chọn mô hình và thông số của bộ quan sát chưa được thể hiện chi tiết. Gần đây, bộ quan sát phi tuyến đều đã được áp dụng để ước lượng trạng thái cho máy điện đồng bộ kích thích nam châm vĩnh cửu [6]. Kết quả cho thấy khả năng quan sát biến trạng thái cơ học rất tốt với yêu cầu tối thiểu về thông số đầu ra.

Với ý tưởng mở rộng ứng dụng của bộ quan sát phi tuyến đều cục bộ, bài báo giới thiệu kết quả nghiên cứu thiết kế bộ quan sát các đại lượng cơ học bao gồm tốc độ quay và mômen tải của ĐCMC kích từ nối tiếp. Ưu điểm của bộ quan sát là có ma trận hệ số hằng và chỉ dựa trên đầu ra là dòng điện phản ứng.

Bài báo được bố cục như sau: Mục 2 giới thiệu mô hình của ĐCMC và bộ điều khiển tốc độ. Cấu trúc của bộ quan sát cho

hệ phi tuyến quan sát được đều cục bộ được tổng hợp trong mục 3. Mục 4 trình bày kết quả áp dụng của bộ quan sát phi tuyến đều cục bộ vào ước lượng trạng thái của ĐCMC, kết quả mô phỏng và thảo luận. Cuối cùng các kết luận cho nghiên cứu được đưa ra trong mục 5.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG CƠ MỘT CHIỀU VÀ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Trong nghiên cứu này, hệ thống gồm ĐCMC làm việc ở chế độ điều chỉnh tốc độ là đối tượng được lựa chọn để ước lượng thông số. Tốc độ của ĐCMC được điều khiển thông qua điện áp đầu vào với hai vòng điều khiển sử dụng bộ điều khiển kiểu tích phân tỷ lệ (PI): vòng ngoài điều khiển tốc độ và vòng trong điều khiển dòng điện, xem hình 1.

Trong đó, tốc độ yêu cầu ω_{ref} được so sánh với tốc độ phản hồi đo (ω) trong bộ điều khiển tốc độ. Tín hiệu đầu ra của bộ điều khiển tốc độ (i_{aref}) được so sánh với tín hiệu phản hồi dòng điện phản ứng (i_a) để đưa ra giá trị yêu cầu của điện áp đầu vào động cơ.

Phần tiếp theo của mục này giới thiệu mô hình của ĐCMC cùng các bộ điều khiển tốc độ và dòng điện. Mô hình máy điện một chiều kích thích nối tiếp được biểu diễn bởi hệ phương trình sau [7]:

$$\begin{cases} di_a / dt = \frac{1}{L} v - \frac{R}{L} i_a - \frac{L_{af}}{L} \omega i_a \\ d\omega / dt = \frac{L_{af}}{J} i_a^2 - \frac{F_v}{J} \omega - \frac{T_m}{J} \\ dT_m / dt = 0 \end{cases} \quad (1)$$

trong đó:

i_a là dòng điện phản ứng; v là điện áp đầu vào;

R, L tương ứng là điện trở tổng và điện cảm tổng của các cuộn dây phản ứng và cuộn kích từ; $R = R_a + R_f, L = L_a + L_f$, với R_a, L_a : thông số của cuộn dây phản ứng, R_f, L_f : thông số của cuộn dây kích từ; ω là tốc độ của động cơ;

L_{af} là hồ cảm giữa các cuộn dây phản ứng và cuộn kích từ; J là hằng số quán tính; và F_v là hệ số ma sát;

T_m là mômen cơ trên trục của động cơ.

Bộ điều khiển tốc độ được mô tả bởi các phương trình sau:

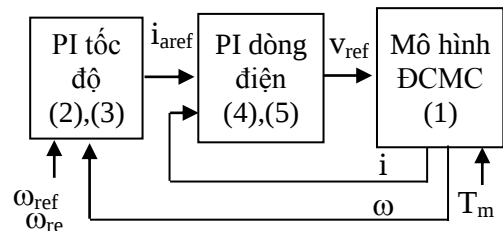
$$i_{aref} = k_{pw}(\omega_{ref} - \omega) + k_{iw}z_1 \quad (2)$$

$$dz_1 / dt = \omega_{ref} - \omega \quad (3)$$

Tương tự, bộ điều khiển dòng điện có thể biểu diễn bởi:

$$v_{ref} = k_{pi}(i_{aref} - i_a) + k_{ii}z_2 \quad (4)$$

$$dz_2 / dt = i_{aref} - i_a \quad (5)$$



Hình 1. Sơ đồ điều khiển tốc độ ĐCMC

Trong hệ thống, khâu thừa hành thực hiện điều chỉnh điện áp đặt vào động cơ thường có quán tính nhỏ so với toàn hệ thống (ví dụ: các bộ biến đổi điện tử công

suất như bộ biến đổi tăng áp hoặc giảm áp DC-DC) nên quán tính của nó có thể bỏ qua, khi đó điện áp thực đặt vào động cơ có thể coi bằng giá trị yêu cầu, nghĩa là $v = v_{ref}$. Chú ý rằng hai biến đã được bổ sung để biểu diễn mô hình của các bộ điều khiển là z_1 và z_2 được tính theo giá trị yêu cầu và giá trị phản hồi tương ứng của tốc độ và dòng điện thông qua (3) và (5) và luôn hội tụ. Hơn nữa điện áp v_{ref} có tính theo i_a , i_{aref} và z_2 hoặc có thể coi là một đầu vào của mô hình. Vì đây là một đại lượng điện nên việc đo khá đơn giản với chi phí không cao. Do đó để đơn giản phương trình (1) được chọn làm mô hình toán học của hệ thống và có thể biểu diễn như sau:

$$\dot{X} = A.X + B = [F_1 \quad F_2 \quad F_3]^T \quad (6)$$

trong đó:

$$X = [X1, X2, X3]^T = [i_a; \omega; Tm/J]^T;$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ 0 & a_{22} & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{với } a_{11} = -\frac{R}{L}; \quad a_{12} = -\frac{L_{af}}{L} i_a; \quad a_{22} = -\frac{F_v}{J};$$

$$B = [b1, b2, 0]^T;$$

$$b_1(u) = \frac{1}{L} v; \quad b_2(u, x) = \frac{L_{af}}{J} i_a^2; \quad u = v$$

Trong mục tiếp theo, hệ (6) sẽ được xác nhận về khả năng quan sát đều cục bộ, từ đó cho phép xây dựng bộ quan sát tương ứng.

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]:

$$\begin{cases} \dot{z} = F(u, z) \\ y = C.z \end{cases} \quad (7)$$

trong đó: $z = (z_1 \quad z_2 \quad \dots \quad z_q)^T$ là biến trạng thái; $z_i \in \mathcal{R}^{n_i}$, $n_1 \geq n_2 \geq \dots \geq n_q$, $n_1 + n_2 + \dots + n_q = n$, u là biến đầu vào có giá trị thuộc tập hợp bị chặn $U \in \mathcal{R}^m$. $F(u, z) = (F_1(u, z) \quad F_2(u, z) \quad \dots \quad F_q(u, z))^T$ với $F_i(u, z)$, $i = 1, \dots, q-1$ được biểu diễn dưới dạng:

$$F_i(u, z) = F_i(u, z_1, z_2, \dots, z_{i+1}), z_i \in \mathcal{R}^{n_i} \text{ thỏa mãn điều kiện về hạng ma trận sau:}$$

$$\text{Rank} \left(\frac{\partial F_i}{\partial z_{i+1}}(u, z) \right) = n_{i+1}, \quad (8)$$

$$\forall u \in U, \forall z$$

C là ma trận đầu ra của hệ (7).

Nếu hệ (7) thỏa mãn điều kiện toàn cục Lipschitz và điều kiện hình nón lồi [6], [8], thì có thể thiết kế được một bộ quan sát có hệ số hằng với cấu trúc:

$$\dot{\hat{z}} = F(u, \hat{z}) + \Delta_\alpha K (C\hat{z} - y) \quad (9)$$

trong đó Δ_α là ma trận đường chéo:

$$\Delta_\alpha = \begin{pmatrix} \alpha I_{n_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \alpha^q I_{n_q} \end{pmatrix} \quad (10)$$

với I_{n_k} là ma trận đơn vị kích thước $n_k \times n_k$, $k = 1, 2, \dots, q$; α là thông số cần điều

chỉnh ("tune").

$K = Q^{-1}C^T$, trong đó 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:

$$QA(u, z) + A(u, z)^T Q - \rho C^T C \leq \eta I \quad (11)$$

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 $A_{k,k+1}(u, z) = \frac{\partial F_k}{\partial z_{k+1}}(u, z)$ là ma trận

kích thước $n_i \times n_{i+1}$ và I là ma trận đơn vị với kích thước phù hợp.

Trong nội dung tiếp theo, cấu trúc bộ quan sát đã giới thiệu trong phần này sẽ được áp dụng cho hệ thống mô tả trong mục 2.

4. MÔ PHỎNG VÀ BÀN LUẬN

Trước hết có thể thấy hệ (6) thỏa mãn các điều kiện toàn cục Lipschitz và điều kiện hình nón lồi để thiết kế bộ quan sát có cấu trúc (9). Thật vậy hệ thống ĐCMC là hệ vật lý có thông số làm việc hữu hạn theo các thông số định mức nên điều kiện toàn cục Lipschitz đương nhiên thỏa mãn.

Mặt khác, từ hệ phương trình (6), ta có:

$$A_{23}(u, X) = \frac{\partial F_2}{\partial X_3}(u, X) = -1, \text{ là hằng số.}$$

$$A_{12}(u, X) = \frac{\partial F_1}{\partial X_2}(u, X) = a_{12} = -\frac{L_{af}}{L} i_a$$

cũng thuộc tập hợp bị chặn, cụ thể giá trị tuyệt đối lớn nhất của a_{12} ứng với giá trị lớn nhất của dòng điện phản ứng. Trong tính toán có thể chọn giá trị này bằng giá trị định mức của dòng điện phản ứng. Vậy điều kiện hình nón lồi cũng thỏa mãn.

Do đó điều kiện để sử dụng bộ quan sát có cấu trúc (9) thỏa mãn.

Phần tiếp theo giới thiệu quá trình tính toán ma trận hệ số K và các hằng số điều chỉnh: ρ, η , và α .

Ma trận hệ số K là lời giải của phương trình (11), áp dụng cho hệ thống đang xét ta có bất đẳng thức:

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

trong trường hợp đang nghiên cứu, ma trận C tương ứng với phép đo dòng điện phản ứng, nghĩa là $C = [1, 0, 0]$. Chọn $\eta = 1, \rho = 1$ để giải ta có: $K = [-65; 215; -43]$. Mô phỏng và điều chỉnh (tune) thu được giá trị $\alpha = 5$.

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

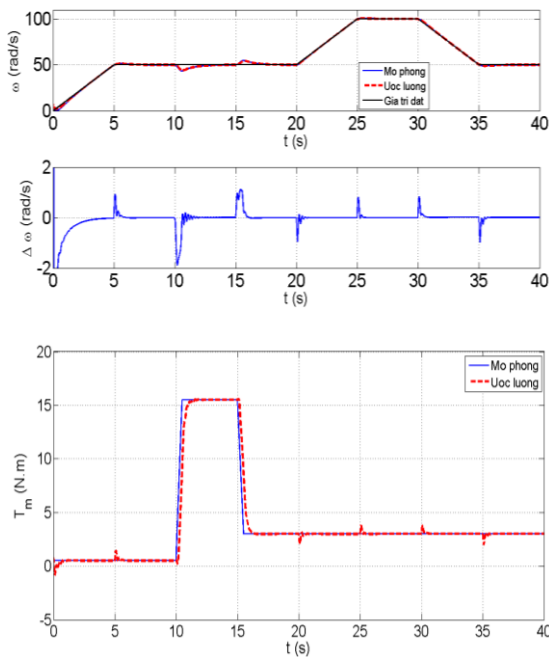
$$\begin{bmatrix} \hat{i}_a & \omega & T_m / J & \hat{z}_1 & \hat{z}_2 \end{bmatrix} = [0 \ 0 \ 0,5/J \ 0 \ 0];$$

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_a & \hat{\omega} & \hat{T}_m / J & \hat{z}_1 & \hat{z}_2 \end{bmatrix} = [5 \ 10 \ 1/J \ 1 \ -1];$$

Thông số của ĐCMC được cho trong phụ lục [6].

Các kết quả chính của mô phỏng được thể hiện trên hình 2 cho tốc độ quay (hình trên) và mômen tải (hình dưới). ĐCMC được khởi động làm việc với mômen tải

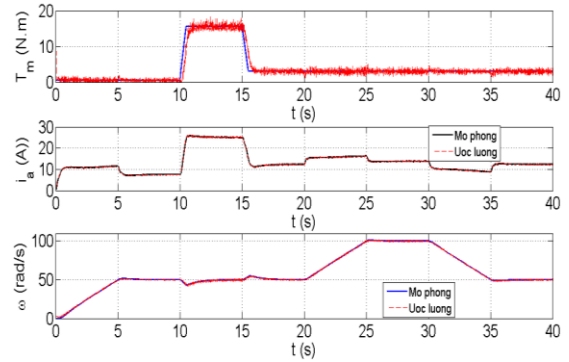
bằng 0,5N.m ở chế độ điều chỉnh tốc độ đến giá trị yêu cầu bằng 50rad/s tại $t = 5s$. Hình phía trên thể hiện đáp ứng của tốc độ quay (đường nét liền, màu xanh) theo giá trị đặt (đường nét chấm gạch màu đen) cùng với đáp ứng của tốc độ quan sát được (đường nét đứt, màu đỏ) ứng với hai giá trị yêu cầu là 50rad/s trong các khoảng thời gian (0-20)s và (35-40)s và 100rad/s trong khoảng (25-30)s. Mômen tải thay đổi trong thời gian mô phỏng như sau: $T_m = 0,5N.m$ trong (0-10)s; $T_m = 15,5N.m$ trong (10-15)s; và $I = 3N.m$ trong (15-40)s.



Hình 2. Kết quả mô phỏng quan sát tốc độ (hình trên), sai lệch quan sát tốc độ (hình giữa) và mômen tải (hình dưới)

Ước lượng tốc độ ở hình 2 cho kết quả tốt trong quá trình quá độ và chế độ xác lập với sai lệch nhỏ như được thể hiện ở hình giữa. Trong hình 2 (hình dưới), kết quả

quan sát mômen tải là đường màu đỏ nét đứt đã hội tụ khá tốt đối với mômen cơ mô phỏng (đường màu xanh, nét liền) của hệ thống.



Hình 3. Kết quả mô phỏng quan sát tốc độ (hình dưới) dựa trên dòng điện có nhiễu (hình giữa)

Trong thực tế, giới hạn về độ nhiễu trong phép đo điện hình của dòng điện là 1% [9]. Lập lại mô phỏng trên với phép đo có nhiễu 1% thu được kết như trên hình 3.

Với phép đo dòng điện có nhiễu, ước lượng tốc độ quay và mômen tải (đường nét đứt, màu đỏ) trên hình 3 đều hội tụ tới giá trị mô phỏng của các đại lượng tương ứng của ĐCMC.

Tóm lại đáp ứng của bộ quan sát nhanh trong quá trình quá độ và có sai lệch nhỏ trong chế độ xác lập (kể cả trong trường hợp phép đo dòng điện phần ứng có nhiễu) nên có thể sử dụng cho nhiều mục đích khác nhau, ví dụ như làm phản hồi cho các bộ điều khiển tốc độ, đối chiếu trong chẩn đoán hư hỏng (ví dụ hư hỏng cảm biến tốc độ), xây dựng đặc tính mômen - tốc độ của ĐCMC trong các chế độ làm việc thực tế.

5. KẾT LUẬN

Một ứng dụng của bộ quan sát phi tuyến điều cục bộ đã được áp dụng thành công trong quan sát trạng thái của ĐCMC làm việc với bộ điều chỉnh tốc độ.

Kết quả mô phỏng cho thấy đáp ứng của bộ quan sát tốt, đây là cơ sở để mở rộng kết quả nghiên cứu, sử dụng kết quả ước lượng cho các mục đích khác nhau trong quá trình vận hành và giám sát hệ thống. Với khả năng quan sát thu được, bộ quan sát phi tuyến điều cục bộ phù hợp trong ứng dụng ước lượng thông số của các hệ thống phi tuyến sử dụng máy điện.

6. PHỤ LỤC

Thông số định mức của ĐCMC:

$$U_{dm} = 220V; I_{dm} = 15A;$$

$$\omega_{dm} = 104,72\text{rad/s (1000 vòng/phút)};$$

$$T_{dm} = 27\text{N.m}; R_a = 0,6\Omega; R_f = 1,8\Omega;$$

$$L_a = 1\text{mH}; L_f = 220\text{mH};$$

$$L_{af} = K_m * L_f (K_m = 0,12); F_v = 0,02\text{N.m.s};$$

$$J = 0.2\text{N.m.s}^2;$$

Thông số của bộ điều khiển tốc độ:

$$k_{pw} = 2; k_{iw} = 0,2;$$

Thông số của bộ điều khiển dòng điện:

$$k_{pi} = 3; k_{ii} = 150.$$

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Mehta and J. Chiasson, "Nonlinear control of a series DC motor: theory and experiment," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 45, no. 1, pp. 134-141, 1998.
- [2] N. Boizot, E. Busvelle, J.P. Gauthier and J. Sachau, "Adaptive gain extended Kalman filter: Application to a series-connected DC motor," in *Conference on Systems and Control*, Marrakech, Morocco, 2007.
- [3] N. Boizot, E. Busvelle and J. Sachau, "High-gain observers and Kalman filtering in hard real-time," in *RTL 9th Workshop*, 2007.
- [4] L. Amet, M. Ghanes and J. P. Barbot, "Super Twisting based step-by-step observer for a DC series motor: experimental results," in *IEEE International Conference on Control Applications*, 2013.
- [5] J. Linares-Flores, J. Reger and H. Sira-Ramírez, "Load torque estimation and passivity-based control of a boost-converter/DC-motor combination," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 18, no. 6, pp. 1398-1405, 2010.
- [6] V. H. Giang, "Ước lượng tốc độ quay và mômen cơ của máy điện đồng bộ kích thích thích nam châm vĩnh cửu dựa trên bộ quan sát phi tuyến điều," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Năng lượng*, Trường Đại học Điện lực, vol. 11, pp. 26-32, 2016.
- [7] P. C. Krause, O. Wasynczuk and S. D. Sudhoff, *Analysis of electric machinery and drive systems*, 2nd Edition ed., I. Press, Ed., 2002.
- [8] H. Hammouri and M. Farza, "Nonlinear observers for locally uniformly observable systems," *ESAIM. COCV*, vol. 9, pp. 353-370, 2003.

- [9] 2017. [Online]. Available: <http://www.allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs/Fifty-To-Two-Hundred-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs/ACS758.aspx>

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Vũ Hoàng Giang tốt nghiệp đại học và nhận bằng Thạc sĩ chuyên ngành hệ thống điện tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội vào các năm 2002 và 2005; nhận bằng Tiến sĩ kỹ thuật điện năm 2014 tại Trường Đại học Claude Bernard Lyon 1, Cộng hòa Pháp.

Lĩnh vực nghiên cứu: 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.