

ĐIỀU KHIỂN MÁY PHÁT ĐIỆN CẢM ỨNG CẤP NGUỒN TỪ HAI PHÍA DÙNG PHƯƠNG PHÁP MÔ HÌNH NỘI

CONTROL OF DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR USING INTERNAL MODEL CONTROL METHOD

Hồ Anh Vũ

Đại Học Sư Phạm Kỹ Thuật Tp HCM

Dương Hoài Nghĩa

Đại Học Bách Khoa - ĐHQG Tp HCM

TÓM TẮT

Bài báo này giới thiệu hệ thống điều khiển máy phát điện cảm ứng cấp nguồn từ hai phía (DFIG) dùng phương pháp điều khiển mô hình nội (IMC). Mô hình máy phát biểu diễn trong hệ tọa độ d - q định hướng theo vector điện áp stator, và là một hệ thống tuyến tính biến thiên theo thời gian. Hệ thống điều khiển mô hình nội có những ưu điểm như sau: hệ thống điều khiển cho phép xác định chất lượng danh định và tính bền vững đối với các thay đổi của tham số mô hình thông qua bộ lọc IMC. Các kết quả mô phỏng được sử dụng để minh họa.

ABSTRACT

In this paper, we develop an internal model controller (IMC) for a doubly fed induction generator (DFIG). The plant is represented in the stator d - q reference frame and is a linear time-varying system. The main advantage of the proposed IMC controller is that it allows to specify the transfer function of the closed-loop system as well as the trade-off between the performance and the robustness of the control system. Simulation results are provided for illustration.

I. GIỚI THIỆU

Nhu cầu năng lượng tăng nhanh do chất lượng sống ngày càng cao. Những nguồn nhiên liệu để phát điện thì có giới hạn. Vì vậy, vấn đề tìm nguồn năng lượng mới an toàn, không gây ô nhiễm môi trường, và hiệu ứng nhà kính là cần thiết. Ở các nước phát triển, năng lượng gió cùng với những dạng năng lượng tái tạo khác được xem là sự lựa chọn thích hợp nhất. Ở Việt Nam, khu vực duyên hải Trung Bộ và Nam Bộ có tiềm năng về năng lượng gió rất lớn.

Máy phát DFIG ứng dụng phổ biến trong các hệ thống phát điện gió công suất cao, với các ưu điểm là dải tốc độ vận hành rộng từ dưới tốc độ đồng bộ đến trên tốc độ đồng bộ, công suất bộ chuyển đổi khoảng 30% công suất máy do đặt phía rotor [3].

Đã có nhiều bài báo đề xuất các phương pháp điều khiển như phương pháp điều khiển vector cho phép điều khiển độc lập công suất tác dụng và phản kháng [2], điều khiển trượt [4], điều khiển PI [6]. Bài báo này giới thiệu phương pháp điều khiển dùng mô hình nội cho DFIG. Ưu điểm của phương pháp này là thủ tục thiết kế đơn giản do hàm truyền đạt của hệ thống vòng kín danh định và tính bền vững có thể biểu diễn một cách đơn giản theo bộ lọc IMC [1].

Nội dung còn lại của bài báo như sau: phần II trình bày mô hình máy phát, bộ điều khiển mô hình nội trình bày ở phần III, phần IV trình bày kết quả mô phỏng, và kết luận trình bày ở phần V.

II. MÔ HÌNH MÁY PHÁT

Mô hình máy phát DFIG biểu diễn trong hệ tọa độ d-q định hướng theo vector điện áp stator [3], [4], [6]:

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{ds}}{dt} &= -a_1 i_{ds} + \omega_s i_{qs} + a_2 a_4 \Psi_{dr} \\
 &\quad + \omega_r a_2 \Psi_{qr} + a_3 v_{ds} - a_2 v_{dr} \\
 \frac{di_{qs}}{dt} &= -\omega_s i_{ds} - a_1 i_{qs} - \omega_r a_2 \Psi_{dr} \\
 &\quad + a_2 a_4 \Psi_{qr} + a_3 v_{qs} - a_2 v_{qr} \quad (1) \\
 \frac{d\Psi_{dr}}{dt} &= a_4 L_m i_{ds} - a_4 \Psi_{dr} \\
 &\quad + (\omega_s - \omega_r) \Psi_{qr} + v_{dr} \\
 \frac{d\Psi_{qr}}{dt} &= a_4 L_m i_{qs} - (\omega_s - \omega_r) \Psi_{dr} \\
 &\quad - a_4 \Psi_{qr} + v_{qr}
 \end{aligned}$$

Trong đó:

$v_d, v_q, v_{ds}, v_{dq}, i_d, i_q, i_{ds}, i_{dq}, \Psi_d, \Psi_q$ lần lượt là các thành phần của điện áp stator, điện áp rotor, dòng điện stator, dòng điện rotor và từ thông rotor trong hệ tọa độ d-q. L_m, L_s, L_r lần lượt là hồ cảm và điện cảm của stator và rotor. R_s, R_r là điện trở dây quấn

stator và rotor. $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$, $\tau_s = \frac{L_s}{R_s}$, $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$ lần lượt là hệ số từ cảm rò, thời hằng stator, thời

hằng rotor, $\omega_s = \frac{2\pi f_n}{p}$ là tốc độ góc của từ trường quay stator, với p là số đôi cực từ và f_n là tần số lưới điện, ω_r là tốc độ quay rotor. Các hệ số

$$a_1 = \frac{1}{\sigma \tau_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma \tau_r}; \quad a_2 = \frac{1-\sigma}{\sigma L_m}; \quad a_3 = \frac{1}{\sigma L_s}; \quad a_4 = \frac{1}{\tau_r}$$

Công suất tác dụng P_s và công suất phản kháng Q_s phía stator [4], [5], [6]:

$$\begin{aligned}
 P_s &= \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) \\
 Q_s &= \frac{3}{2} (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs})
 \end{aligned} \quad (2)$$

Trong hệ tọa độ d-q, ta có

$$\begin{cases} v_{ds} = V_{sm} \\ v_{qs} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Với V_{sm} là biên độ điện áp stator

Thay (3) vào (2) ta có:

$$\begin{aligned}
 P_s &= \frac{3}{2} V_{sm} i_{ds} \\
 Q_s &= -\frac{3}{2} V_{sm} i_{qs}
 \end{aligned} \quad (4)$$

Hệ thống (1) có thể viết gọn lại như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_s v_s(t) + B_r v_r(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (5)$$

Trong đó :

$$\begin{aligned} x &= [i_{ds} \ i_{qs} \ \Psi_{dr} \ \Psi_{qr}]^T ; y = [i_{ds} \ i_{qs}]^T ; \\ v_s &= [v_{ds} \ v_{qs}]^T ; v_r = [v_{dr} \ v_{qr}]^T ; \\ A &= \begin{bmatrix} -a_1 & \omega_s & a_2 a_4 & a_2 \omega_r \\ -\omega_s & -a_1 & -a_2 \omega_r & a_2 a_4 \\ a_4 L_m & 0 & -a_4 & \omega_s - \omega_r \\ 0 & a_4 L_m & \omega_r - \omega_s & -a_4 \end{bmatrix} ; B_s = \begin{bmatrix} a_3 & 0 \\ 0 & a_3 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} ; \\ B_r &= \begin{bmatrix} -a_2 & 0 \\ 0 & -a_2 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} ; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} . \end{aligned}$$

Từ (5) ta có

$$Y(s) = H_s(s)V_s(s) + H_r(s)V_r(s) \quad (6)$$

Trong đó:

$$H_s(s) = C(sI - A)^{-1}B_s \quad (7)$$

$$H_r(s) = C(sI - A)^{-1}B_r \quad (8)$$

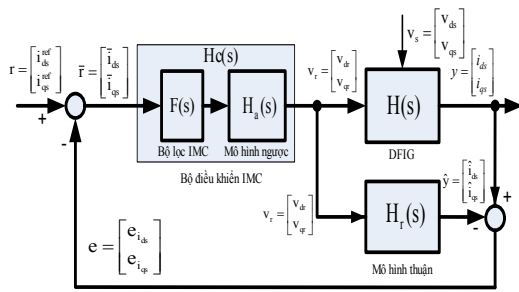
III. ĐIỀU KHIỂN MÔ HÌNH NỘI

Mục đích chính của hệ thống là điều khiển độc lập hai thành phần công suất phía stator P_s và Q_s . Từ (4), do $V_{sm} =$ hằng số, mục đích điều khiển độc lập P_s và Q_s tương đương với điều khiển độc lập hai thành phần dòng điện stator i_{ds} và i_{qs} .

Định nghĩa:

$$\begin{aligned} i_{ds}^{ref} &= \frac{2 P_s^{ref}}{3 V_{sm}} \\ i_{qs}^{ref} &= -\frac{2 Q_s^{ref}}{3 V_{sm}} \end{aligned} \quad (9)$$

Với P_s^{ref} , Q_s^{ref} là công suất tác dụng và công suất phản kháng mong muốn.



Hình 1: Hệ thống điều khiển dùng mô hình nội

Hệ thống điều khiển được mô tả ở hình 1. Trong đó, mô hình thuận $H_r(s)$ xác định bởi (8), mô hình ngược $H_a(s)$ là nghịch đảo của mô hình thuận $H_r(s)$ [7], [8].

$$H_a(s) = [H_r(s)]^{-1} \quad (10)$$

Bộ điều khiển IMC được xác định theo [7] như sau:

$$H_c(s) = [H_r(s)]^{-1} F(s) \quad (11)$$

Với $F(s)$ là hàm truyền đạt của bộ lọc IMC.

$$F(s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ T_1 s + 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ & T_2 s + 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Thời hằng T_1 và T_2 được chọn theo thời gian đáp ứng mong muốn. Nếu T_1 và T_2 nhỏ thì hệ thống đáp ứng nhanh nhưng tính bền vững thấp, T_1 và T_2 lớn thì hệ thống đáp ứng chậm nhưng tính bền vững cao [2], [7].

IV. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

4.1 Thông số thiết kế

Bộ điều khiển IMC được thiết kế với các thông số ở bảng 1.

BẢNG 1: THÔNG SỐ MÁY PHÁT DFIG

Công suất danh định	5 kW
Điện áp	220/380V
Tần số danh định	50 Hz
Số cặp cực từ	$p = 3$
Tốc độ danh định	$\omega_r = 100 \text{ rad/s}$
Mômen quán tính	$J = 0,1 \text{ kg.m}^2$
Điện trở dây quấn stator	$R_s = 0,95 \Omega$
Điện trở dây quấn rotor	$R_r = 1,8 \Omega$
Điện cảm tản stator	$L_{\sigma s} = 0,094 \text{ H}$
Điện cảm tản rotor	$L_{\sigma r} = 0,088 \text{ H}$
Hỗ cảm	$L_m = 0,082 \text{ H}$

Từ thông số máy phát DFIG ta xác định được:

$$H_r(s) = \begin{bmatrix} H_{r11} & H_{r12} \\ H_{r21} & H_{r22} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Với:

$$H_{r11} = \frac{-3,54s^3 - 72,9s - 3,9 \times 10^4 s - 5,4 \times 10^5}{s^4 + 41,2s^3 + 1,2 \times 10^4 s^2 + 3,1 \times 10^5 s + 2,32 \times 10^6} \quad H_{r12} = \frac{-16,7s^2 + 2,5 \times 10^3 s - 1,6 \times 10^5}{s^4 + 41,2s^3 + 1,2 \times 10^4 s^2 + 3,1 \times 10^5 s + 2,32 \times 10^6}$$

$$H_{r21} = \frac{16,7s^2 - 2,5 \times 10^3 s + 1,6 \times 10^5}{s^4 + 41,2s^3 + 1,2 \times 10^4 s^2 + 3,1 \times 10^5 s + 2,32 \times 10^6} \quad H_{r22} = \frac{-3,54s^3 - 72,9s - 3,9 \times 10^4 s - 5,4 \times 10^5}{s^4 + 41,2s^3 + 1,2 \times 10^4 s^2 + 3,1 \times 10^5 s + 2,32 \times 10^6}$$

Bộ lọc IMC được chọn với $T_1 = T_2 = 0,1s$, tương ứng với thời gian đáp ứng của hệ thống vòng kín danh định bằng $0,3s$. Từ (11) ta xác định được.

$$H_c(s) = \begin{bmatrix} H_{c1} & H_{c2} \\ H_{c2} & H_{c2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Với:

$$H_{r11} = \frac{-3,54s^3 - 72,9s - 3,9 \times 10^4 s - 5,4 \times 10^5}{s^4 + 41,2s^3 + 1,2 \times 10^4 s^2 + 3,1 \times 10^5 s + 2,32 \times 10^6} \quad H_{r12} = \frac{-16,7s^2 + 2,5 \times 10^3 s - 1,6 \times 10^5}{s^4 + 41,2s^3 + 1,2 \times 10^4 s^2 + 3,1 \times 10^5 s + 2,32 \times 10^6}$$

$$H_{r21} = \frac{16,7s^2 - 2,5 \times 10^3 s + 1,6 \times 10^5}{s^4 + 41,2s^3 + 1,2 \times 10^4 s^2 + 3,1 \times 10^5 s + 2,32 \times 10^6} \quad H_{r22} = \frac{-3,54s^3 - 72,9s - 3,9 \times 10^4 s - 5,4 \times 10^5}{s^4 + 41,2s^3 + 1,2 \times 10^4 s^2 + 3,1 \times 10^5 s + 2,32 \times 10^6}$$

Bộ chuyển đổi PWM phía rotor có $V_{dc} = 800V$, tần số sóng mang $f_c = 1050 \text{ Hz}$, tỉ số điều biên $m = 0,8$.

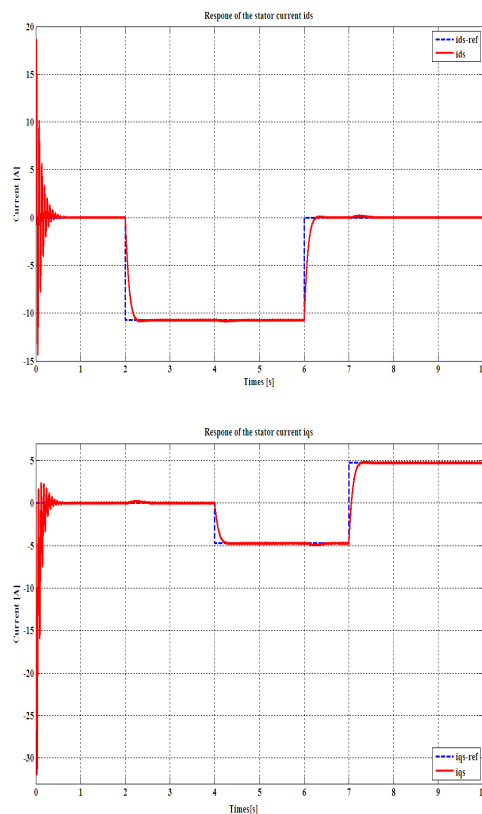
4.2 Đáp ứng danh định

Trong mô phỏng này thông số của máy phát trùng với thông số thiết kế.

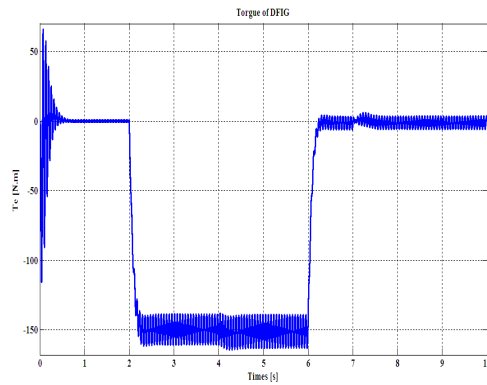
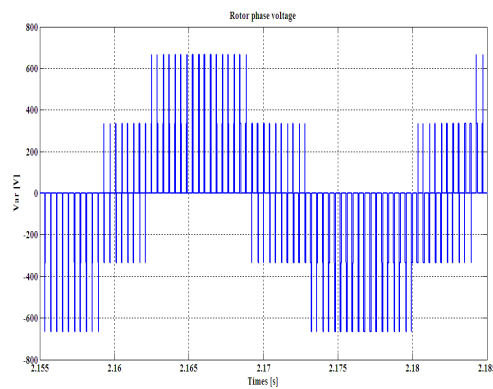
Kết quả mô phỏng được cho ở các hình 2, 3 và 4 trong đó giá trị mong muốn của i_{ds} và i_{qs} được thay đổi đột ngột tại các thời điểm 2, 4, 6 và 7 s. Ta thấy i_{ds} và i_{qs} có thể được điều khiển một cách độc lập với nhau.

Ảnh hưởng qua lại (coupling) giữa hai tín hiệu này là không đáng kể.

Hệ thống vòng kín đáp ứng như một khâu bậc 1 với thời hằng $T_1 = T_2 = 0,1 \text{ s}$ như đã chọn ở (12).



Hình 2: Dòng điện i_{ds} và i_{qs}

Hình 3: Mômen điện từ T_e Hình 4: Điện áp rotor V_{ar}

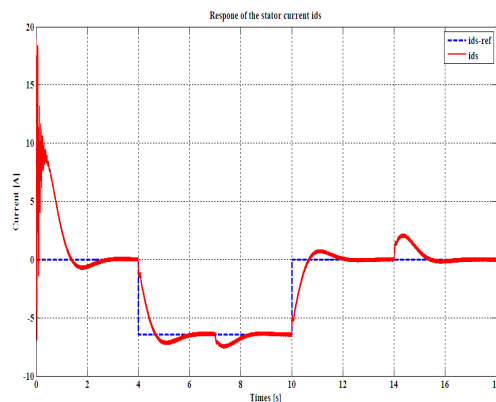
4.3 Tính Bền Vững

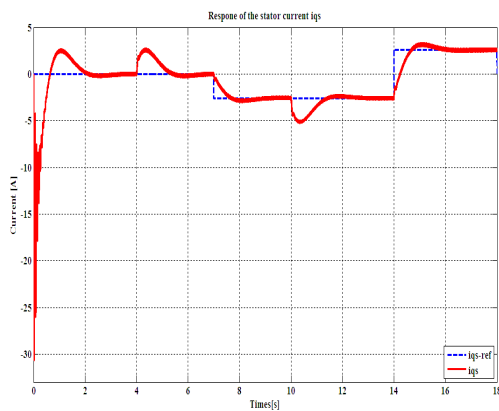
Để khảo sát ảnh hưởng của tốc độ gió lên đáp ứng của hệ thống vòng kín, các mô phỏng lần lượt được thực hiện với $\omega_r = 0$ rad/s và $\omega_r = 125$ rad/s.

Kết quả được cho ở các hình 5, 6, 7 và 8. Ta thấy do thông số máy phát khác với thông số thiết kế.

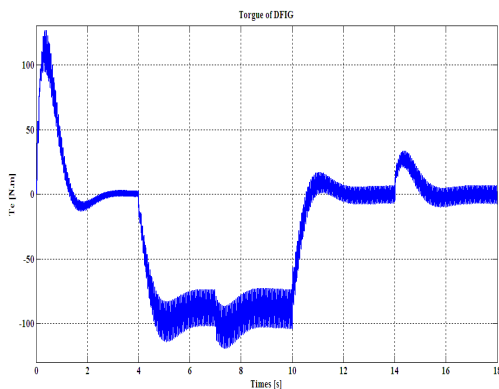
Việc điều khiển i_{ds} và i_{qs} ảnh hưởng qua lại lẫn nhau (coupling) trong quá trình quá độ.

Quá trình quá độ có xảy ra vọt lố.

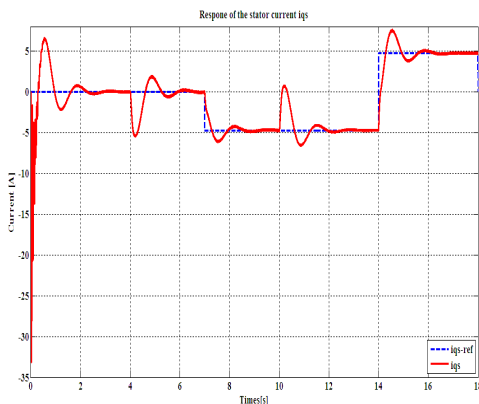
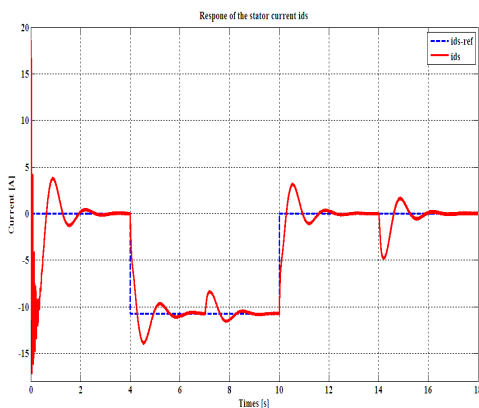




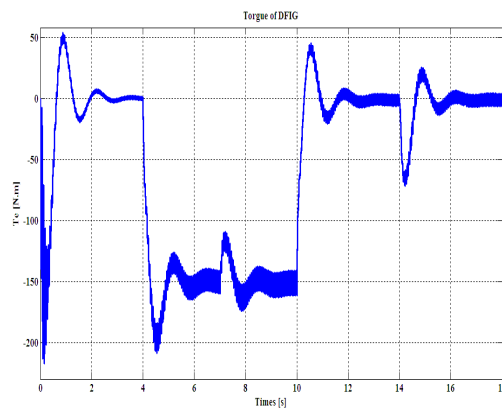
Hình 5: Dòng điện i_{ds} và i_{qs}



Hình 6: Mômen điện từ T_e



Hình 7: Dòng điện i_{ds} và i_{qs}



Hình 8: Mômen điện từ T_e

V. KẾT LUẬN

Bài báo đã giới thiệu phương pháp điều khiển dùng mô hình nội cho máy phát điện gió DFIG. Các kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống điều khiển có chất lượng danh định tốt và có tính bền vững khi tốc độ rotor thay đổi. Ưu điểm chính của phương pháp này là thủ tục thiết kế đơn giản do hàm truyền đạt của hệ thống vòng kín danh định và tính bền vững có thể biểu diễn một cách đơn giản theo bộ lọc IMC $F(s)$.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Lennart Harnefors, Hans-Peter Nee, *Model-Based Current Control of AC Machines Using the Internal Model Control Method*; IEEE Trans. Ind. Applicat, vol. 34, no. 1, February, 1998.
- M. Campi, Wee Sit Lee, Brian D. O. Anderson, *New Filter For Internal Model Control Design*; *International Journal of Robust And Nonlinear Control*, vol. 4, 757-775, 1994.
- R.Pena, J.C.Clare, G. M. Asher, "Doubly Fed Induction Generator Using Back-To-Back PWM Converters and its Application to Variable-Speed Wind-Energy Generation"; *IEEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 143, No. 3, May, 1996.
- R. Galindo, M. Cotorogea, D. Biel, "Two Families of Sliding Mode Controllers for a Doubly-Fed Induction Generator in an Isolated Generation System"; *Proceeding of*

electronic, Robotics and automative mechanics conferences, IEEE, 2006.

- S. Seman, J. Niiranen, S. Kanerva, and A. Arkkio, "Analysis of a 1.7 MVA Doubly Fed Wind-Power Induction Generator During Power Systems Disturbances"; *IEEE, Electric Power Components and Systems*, No. 30, pp199-216, 2002.
- Tapia A., Ostolaza X., Salenz J.r, *Modelling and Control of a Wind Turbine*

Driven Doubly Fed Induction Generator; IEEE Trans. on Energy Conversion 2003.

- M. Morari and E. Zafiriou, *Robust Process Control*. Prentice-Hall, 1987.
- Dương Hoài Nghĩa, *Điều Khiển Hệ Thống Đa Biến*; NXB ĐHQG Tp HCM, 2007.