

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG**

**BÁO CÁO TỔNG KẾT**

**ĐỀ TÀI KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ  
CẤP ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG**

**KHẢO SÁT, ĐIỀU KHIỂN ĐẶC TÍNH HỖN ĐỘNG  
VÀ SỰ PHÂN NHÁNH TRONG ĐỘNG CƠ  
ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU**

**Mã số: Đ2013-02-82-BS**

**Chủ nhiệm đề tài: TS. Nguyễn Lê Hòa**

**Đà Nẵng, 11/2014**

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG**

**BÁO CÁO TỔNG KẾT**

**ĐỀ TÀI KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ  
CẤP ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG**

**KHẢO SÁT, ĐIỀU KHIỂN ĐẶC TÍNH HỖN ĐỘNG  
VÀ SỰ PHÂN NHÁNH TRONG ĐỘNG CƠ  
ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU**

**Mã số: Đ2013-02-82-BS**

**Xác nhận của cơ quan chủ trì đề tài**  
*(ký, họ và tên, đóng dấu)*

**Chủ nhiệm đề tài**  
*(ký, họ và tên)*

**TS. Nguyễn Lê Hòa**

**Đà Nẵng, 11/2014**

## **DANH SÁCH THÀNH VIÊN THAM GIA NGHIÊN CỨU ĐỀ TÀI**

<b>TT</b>	<b>Họ và tên</b>	<b>Đơn vị công tác</b>
1	TS. Nguyễn Hoàng Mai	Khoa Điện-Trường ĐH Bách Khoa
2	TS. Lê Tiến Dũng	Khoa Điện-Trường ĐH Bách Khoa

# MỤC LỤC

	<i>Trang</i>
<b>Thông tin kết quả nghiên cứu bằng tiếng Việt</b>	<b>5</b>
<b>Thông tin kết quả nghiên cứu bằng tiếng Anh</b>	<b>8</b>
<b>Mở đầu</b>	<b>10</b>
<b>Chương 1. Đặc tính động lực học trong động cơ ĐB-NCVC</b>	<b>12</b>
1.1. Giới thiệu về động cơ ĐB-NCVC	12
1.2. Mô hình động cơ ĐB-NCVC	12
1.3. Điểm cân bằng và sự phân nhánh	14
<b>Chương 2. Khảo sát chuyển động hỗn độn trong động cơ ĐB-NCVC</b>	<b>15</b>
2.1. Chuyển động hỗn độn trong các hệ thống truyền động	15
2.2. Các phương pháp phân tích chuyển động hỗn độn	15
2.3. Đặc tính hỗn độn trong mô hình động cơ ĐB-NCVC	18
<b>Chương 3. Điều khiển phân nhánh Hopf trong động cơ ĐB-NCVC</b>	<b>17</b>
3.1. Phân nhánh Hopf	17
3.2. Điều khiển phân nhánh Hopf thông qua bộ lọc washout	18
<b>Kết luận và kiến nghị</b>	<b>21</b>
<b>Tài liệu tham khảo</b>	<b>22</b>

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG  
**TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA**

**THÔNG TIN KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU**

**1. Thông tin chung:**

- Tên đề tài: Khảo sát, điều khiển đặc tính hỗn độn và sự phân nhánh trong động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu
- Mã số: Đ2013-02-82-BS
- Chủ nhiệm: TS. Nguyễn Lê Hòa
- Thành viên tham gia:
  1. TS. Nguyễn Hoàng Mai      Khoa Điện, Đại học Bách Khoa
  2. TS. Lê Tiến Dũng          Khoa Điện, Đại học Bách Khoa
- Cơ quan chủ trì: Trường Đại học Bách Khoa
- Thời gian thực hiện: Từ 12/2013 đến 11/2014

**2. Mục tiêu:**

Nghiên cứu khảo sát đặc tính hỗn loạn của động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (ĐB-NCVC) và đề xuất phương pháp điều khiển để ổn định hóa tính chất hỗn độn cho động cơ nhằm mục đích cao độ tin cậy, sự an toàn và mở rộng phạm vi ứng dụng cho loại động cơ này trong thực tế.

**3. Tính mới và sáng tạo:**

Bằng việc áp dụng các phương pháp phân tích chuyển động hỗn độn, đặc biệt là phương pháp số mũ Lyapunov và phương pháp giản đồ phân nhánh, đề tài này đã cung cấp một bức tranh tổng quan về tính chất hỗn độn trong mô hình động cơ ĐB-NCVC. Ngoài ra, kết quả thu được của đề tài này đã thể hiện bằng việc sử dụng bộ lọc washout như một luật điều khiển phản hồi trạng thái động để dịch chuyển điểm phân nhánh Hopf trong đặc tính động học của động cơ đến một vị trí mới đã cho phép loại bỏ được sự xuất hiện của đặc tính hỗn độn trong miền biến thiên của tham số động cơ.

**4. Tóm tắt kết quả nghiên cứu:**

Động cơ ĐB-NCVC được sử dụng nhiều trong các ứng dụng trong công nghiệp vì nó có những tính năng ưu việt như kích thước nhỏ gọn, cấu tạo đơn giản, hiệu suất cao và mật độ công suất lớn. Tuy nhiên, nhiều kết quả nghiên

cứu đã chỉ ra rằng, khi tham số động cơ vượt qua giá trị ngưỡng nào đó thì sẽ xuất hiện sự dao động hỗn độn và sự phân nhánh trong đặc tính động học của động cơ ĐB-NCVC. Vì vậy, làm thế nào để không xuất hiện chuyển động hỗn độn trong suốt quá trình làm việc của động cơ là vấn đề thực sự cấp bách hiện nay. Trên cơ sở đó, đề tài này đã đề cập đến vấn đề khảo sát và điều khiển đặc tính hỗn độn trong mô hình động cơ ĐB-NCVC. Kết quả thu được của đề tài có thể tóm tắt như sau:

- Dẫn ra mô hình toán học của động cơ ĐB-NCVC trong hệ tọa độ  $d-q$ .
- Chỉ ra rằng khi tham số của động cơ thay đổi thì có sự xuất hiện của hiện tượng phân nhánh Pitchfork, phân nhánh Hopf và đặc biệt là tính chất hỗn độn trong đặc tính động học của động cơ.
- Giới thiệu một số phương pháp để nhận biết sự xuất hiện của chuyển động hỗn độn. Từ đó, cung cấp một bức tranh tổng thể về tính chất hỗn độn trong mô hình động cơ ĐB-NCVC
- Đề xuất luật điều khiển phản hồi trạng thái động dựa trên bộ lọc washout để loại bỏ sự xuất hiện của chuyển động hỗn độn.

## 5. Tên sản phẩm:

Bài báo đăng trên Tạp chí Khoa học công nghệ, Đại học Đà Nẵng

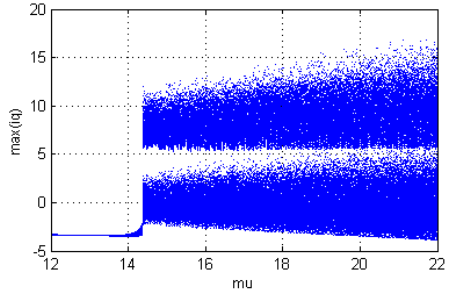
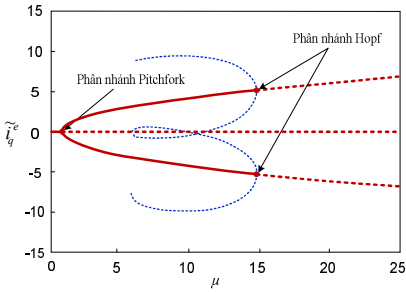
## 6. Hiệu quả, phương thức chuyển giao kết quả nghiên cứu và khả năng áp dụng:

Với việc hoàn thành đề tài này sẽ cung cấp kiến thức sâu hơn, đầy đủ hơn về đặc tính động học của động cơ ĐB-NCVC, có thể làm tư liệu nghiên cứu cho sinh viên, học viên cao học, nghiên cứu sinh và cán bộ nghiên cứu trẻ trong lĩnh vực Tự động hóa. Đồng thời, với kết quả thu được của đề tài sẽ cung cấp cho người thiết kế những kết quả mới phục vụ trong việc nâng cao chất lượng làm việc, độ an toàn và mở rộng khả năng ứng dụng của loại động cơ ĐB-NCVC trong thực tế. Toàn bộ kết quả nghiên cứu của đề tài sẽ được ứng dụng tại khoa Điện, trường Đại học Bách Khoa để làm tài liệu tham khảo cho sinh viên, học viên cao học và nghiên cứu sinh.

## 7. Hình ảnh, sơ đồ minh họa chính

Mô hình động cơ ĐB-NCVC

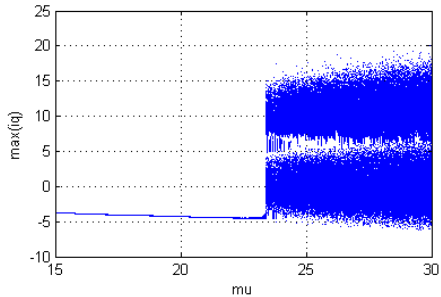
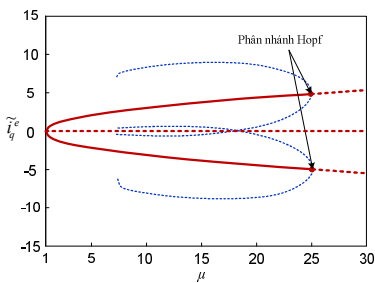
$$\frac{d\tilde{i}_d}{dt} = -\tilde{i}_d + \tilde{i}_q \tilde{\omega}, \quad \frac{d\tilde{i}_q}{dt} = -\tilde{i}_q - \tilde{i}_d \tilde{\omega}, \quad \frac{d\tilde{\omega}}{dt} = \sigma(\tilde{i}_q - \tilde{\omega}).$$



*Sự phân nhánh (trái) và đặc tính hỗn độn (phải) trong động cơ khi chưa có tín hiệu điều khiển.*

Mô hình động cơ với luật điều khiển phản hồi trạng thái động:

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{i}_d}{dt} &= -\tilde{i}_d + \tilde{i}_q \tilde{\omega} + k(\tilde{i}_d - \alpha x), & \frac{d\tilde{i}_q}{dt} &= -\tilde{i}_q - \tilde{i}_d \tilde{\omega} + \mu \tilde{\omega}, \\ \frac{d\tilde{\omega}}{dt} &= \sigma(\tilde{i}_q - \tilde{\omega}), & \frac{dx}{dt} &= \tilde{i}_d - \alpha x. \end{aligned}$$



*Sự phân nhánh (trái) và đặc tính hỗn độn (phải) trong động cơ khi có tín hiệu điều khiển.*

**Cơ quan Chủ trì**

*(ký, họ và tên, đóng dấu)*

Ngày 20 tháng 11 năm 2014

**Chủ nhiệm đề tài**

*(ký, họ và tên)*

**TS. Nguyễn Lê Hòa**

# INFORMATION ON RESEARCH RESULTS

## 1. General information:

Project title: Investigation and control of chaos and bifurcation in the permanent magnet synchronous motors

Code number: Đ2013-02-82-BS

Project Leader: Dr. Nguyen Le Hoa

Coordinators:

1. Dr. Nguyen Hoang Mai          Dept. Electrical Engineering, DUT

2. Dr. Le Tien Dung                Dept. Electrical Engineering, DUT

Implementing institution: University of Science and Technology-The University of Danang

Duration: from December, 2013 to November, 2014

## 2. Objective(s):

- Investigate chaotic dynamics in the permanent magnet synchronous motor (PMSM).
- Propose a new control law to stabilize the chaotic trajectory to improve the stability, safety as well as to extend the application range for PMSMs.

## 3. Creativeness and innovativeness:

By using chaotic analysis methods, especially, by constructing the bifurcation diagram and calculating the largest Lyapunov exponent, the obtained results in this project provide a global picture of chaotic dynamics in the model of PMSM. Also, the dynamic state feedback control law based on the washout filter was proposed for the first time to relocate the Hopf bifurcation point in the PMSM model. As a result, the chaotic behavior can be avoided in wide range of the motor's parameter.

## 4. Research results:

The PMSMs are intensively used in many industrial applications because of its compact size, simple structure, high efficiency, and high power density. The diverse applications of PMSMs call for more attention to its safety and stability, so that the normal operation of those electromechanical systems can be maintained. However, many studies have shown that the PMSM can exhibit chaotic behaviors when its parameters lie in a certain range. In chaos, the



motor torque will change randomly and the motor speed will oscillate. This is not acceptable in practical applications. Therefore, controlling chaos in the PMSM is getting more attention.

This project addresses the problem of investigation and control of chaos in the PMSM. The obtained results can be summarized as follows:

- Derive the mathematical  $d-q$  model of the PMSMs
- The analysis results show that the PMSM can undergo a Pitchfork and Hopf bifurcations, and especially exhibits chaotic behavior.
- Introduce some analysis methods for detection of chaos. Also, provide a global picture of chaos in the PMSM.
- Propose a dynamic state feedback control law to eliminate chaotic behavior in the PMSM.

### **5. Products:**

01 article published by Journal of Science and Technology-The University of Danang

### **6. Effects, transfer alternatives of research results and applicability:**

The obtained results in this project provide in more detail the dynamic behavior of the PMSMs that can be used as a reference for bachelor, master, and Ph.D. students as well as for lecturers working on the field of automation and control. Also, the obtained results in this project are expected to help engineers to improve the performance and the safety of the PMSM drive systems.

The research results of this project will be used as a reference at Department of Electrical Engineering, University of Science and Technology-The University of Danang.

# MỞ ĐẦU

## Tổng quan về tình hình nghiên cứu của đề tài

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (ĐB-NCVC) được sử dụng nhiều trong các ứng dụng trong công nghiệp vì nó có những tính năng ưu việt như kích thước nhỏ gọn, cấu tạo đơn giản, hiệu suất cao và mật độ công suất lớn. Vì sự đa dạng trong ứng dụng của loại động cơ này nên đã thu hút nhiều nghiên cứu về việc nâng cao tính ổn định và độ an toàn cho các hệ thống cơ điện sử dụng động cơ ĐB-NCVC. Tuy nhiên, nhiều kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng, khi tham số động cơ vượt qua giá trị ngưỡng nào đó thì sẽ xuất hiện sự dao động hỗn độn và sự phân nhánh trong đặc tính động học của động cơ ĐB-NCVC [Hemati & Kwanty, 1993; Li et al., 2002; Jing & Chen, 2004]. Vì vậy, làm thế nào để không xuất hiện chuyển động hỗn độn trong suốt quá trình làm việc của động cơ là vấn đề đang thu hút được sự quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu hiện nay. Về mặt chế tạo, Gao và Chau đã chỉ ra rằng để loại bỏ sự xuất hiện của chuyển động hỗn độn thì kích thước của nam châm vĩnh cửu phải không được vượt qua giá trị cho phép [Gao & Chau, 2003]. Bên cạnh đó, với sự phát triển của kỹ thuật điều khiển hiện đại, một số phương pháp điều khiển cũng đã được đề xuất nhằm khống chế chuyển động hỗn độn trong mô hình của động cơ ĐB-NCVC [Harb, 2004; Atefi et al., 2010; Loria, 2009; Choi, 2012].

Việt Nam là một nước có nền công nghiệp đang phát triển nên vấn đề nghiên cứu, ứng dụng động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu vào trong các hệ thống truyền động, hệ thống servo... đã được đề cập đến trong rất nhiều các công trình nghiên cứu, các luận văn tiến sĩ, thạc sĩ. Tuy nhiên, theo hiểu biết của các tác giả thì hiện nay chưa có một công trình nghiên cứu nào ở trong nước đề cập đến hiện tượng chuyển động hỗn độn trong mô hình của động cơ ĐB-NCVC.

## Tính cấp thiết của đề tài

Mặc dù sự xuất hiện của chuyển động hỗn độn trong mô hình động cơ ĐB-NCVC đã đề cập đến trong các công trình nghiên cứu đã chỉ ra ở trên. Tuy nhiên, chưa có một công trình nghiên cứu nào đưa ra được bức tranh tổng thể về đặc tính hỗn độn trong mô hình của động cơ ĐB-NCVC, bao gồm phân tích cơ chế hình thành chuyển động hỗn độn, phạm vi biến thiên của tham số mà ở

đó đặc tính hỗn độn xuất hiện... Ngoài ra, các phương pháp điều khiển được đề xuất chỉ tập trung vào vấn đề ổn định hóa các chuyển động hỗn độn mà chưa có phương pháp điều khiển nào đề cập đến việc điều khiển cơ chế hình thành của chuyển động hỗn độn trong mô hình động cơ. Do đó, vấn đề nhận biết đặc tính hỗn loạn, khảo sát cơ chế hình thành hình thành của nó cũng như làm thế nào để khống chế đặc tính hỗn loạn trong động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu là những nhiệm vụ quan trọng và cấp thiết hiện nay.

### **Mục tiêu của đề tài**

- Khảo sát đặc tính động lực học của động cơ ĐB-NCVC, từ đó chỉ ra cơ chế hình thành của chuyển động hỗn độn
- Đề ra phương pháp để nhận biết sự xuất hiện của chuyển động hỗn độn trong mô hình của động cơ
- Đề xuất luật điều khiển để khống chế chuyển động hỗn độn

### **Phương pháp nghiên cứu**

Phân tích chuyển động hỗn độn:

- Phân tích đáp ứng thời gian.
- Phân tích biểu đồ pha.
- Phương pháp tính toán số mũ Lyapunov.
- Phân tích giản đồ phân nhánh.

Phương pháp điều khiển hỗn độn và phân nhánh

- Phương pháp phản hồi trạng thái động dựa trên bộ lọc washout.

### **Đối tượng và phạm vi nghiên cứu**

Đối tượng nghiên cứu của đề tài này là mô hình toán học mô tả động lực học của động cơ ĐB-NCVC.

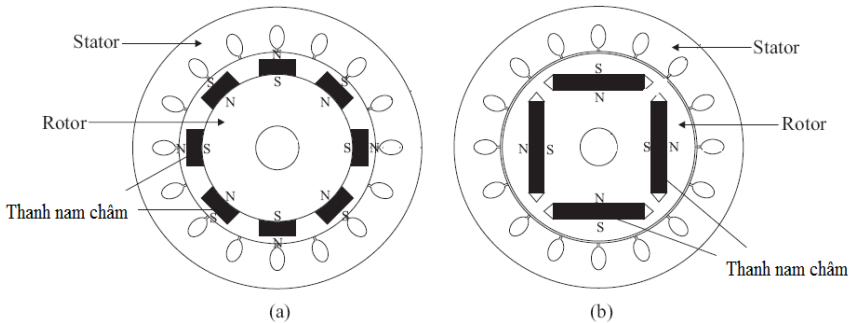
Ngoài ra, việc thiết lập mô hình cho động cơ ĐB-NCVC thì các giả thiết sau được sử dụng:

- Điện áp sinh ra bởi các cuộn dây stator có dạng điều hòa, bỏ qua các sóng hài trong khe hở không khí.
- Bỏ qua hiện tượng bão hòa của nam châm và sự thay đổi tham số động cơ.
- Dòng kích từ sinh ra là không đổi.

# CHƯƠNG 1. ĐẶC TÍNH ĐỘNG LỰC HỌC ĐỘNG CƠ ĐB-NCVC

## 1.1. Giới thiệu về động cơ ĐB-NCVC

Động cơ ĐB-NCVC là một máy điện quay trong đó phần tĩnh (stator) bao gồm 3 cuộn dây được đặt đối xứng nhau (lệch nhau  $120^\circ$  trong không gian). Phần quay là rotor trên đó có gắn các thanh nam châm vĩnh cửu. Tùy thuộc vào cách bố trí các thanh nam châm trên rotor mà người ta phân thành hai loại: Rotor cực ẩn có các thanh nam châm được đặt phía bên trong rotor; rotor cực lộ có các thanh nam châm được đặt ở trên bề mặt của rotor như được mô tả trong hình 1.1.



Hình 1.1. Mặt cắt ngang của rotor: (a) Rotor cực lộ và (b) Rotor cực ẩn.

## 1.2. Mô hình động cơ ĐB-NCVC

### 1.2.1. Phương cân bằng áp:

Phương trình cân bằng điện áp trên các cuộn dây stator sẽ có dạng:

$$u_a = R_s i_a + \frac{d\psi_a}{dt}, \quad (1.1a)$$

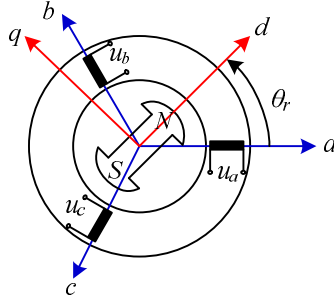
$$u_b = R_s i_b + \frac{d\psi_b}{dt}, \quad (1.1b)$$

$$u_c = R_s i_c + \frac{d\psi_c}{dt}. \quad (1.1c)$$

Phương trình cân bằng áp trên hệ tọa độ  $d$ - $q$  (hình 1.2)

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q, \quad (1.2a)$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \psi_r \quad (1.2b)$$



Hình 1.2. Mô hình mặt cắt ngang trực của động cơ cùng các hệ tọa độ.

### 1.2.2. Phương trình cân bằng mô men

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} n_p \psi_r i_q + \frac{3}{2} n_p (L_d - L_q) \dot{i}_d i_q - \beta \omega - T_L. \quad (1.3)$$

### 1.2.3. Mô hình toán động cơ ĐB-NCVC trong hệ tọa độ $d$ - $q$

Kết hợp (1.2) và (1.3), ta có.

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (u_d - R_s i_d + \omega L_q i_q), \quad (1.4a)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (u_q - R_s i_q - \omega L_d i_d + \omega \psi_r), \quad (1.4b)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \left[ \frac{3}{2} n_p \psi_r i_q + \frac{3}{2} n_p (L_d - L_q) \dot{i}_d i_q - T_L - \beta \omega \right]. \quad (1.4c)$$

Để thuận tiện hơn trong việc khảo sát các đặc tính động lực học của động cơ, ở đây ta thực hiện phép biến đổi affine sau [Hemati and Kwanty, 1993].

$$\begin{cases} \mathbf{x} = \mathbf{\Gamma} \tilde{\mathbf{x}}, \\ t = \tau \tilde{t}. \end{cases} \quad (1.5)$$

Trong đó:  $\mathbf{x} = [i_d \quad i_q \quad \omega]^T$ ,  $\tilde{\mathbf{x}} = [\tilde{i}_d \quad \tilde{i}_q \quad \tilde{\omega}]^T$

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} b\kappa & 0 & 0 \\ 0 & \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1/\tau \end{bmatrix}, \quad b = \frac{L_q}{L_d}, \quad \kappa = \frac{\beta}{n_p \tau \psi_r}, \quad \tau = \frac{L_q}{R_s}. \quad (1.6)$$

Khi đó, hệ phương trình (1.4) được biến đổi về dạng sau:

$$\frac{d\tilde{i}_d}{d\tilde{t}} = -\frac{L_q}{L_d} \tilde{i}_d + \tilde{i}_q \tilde{\omega} + \tilde{u}_d, \quad (1.7a)$$

$$\frac{d\tilde{i}_q}{d\tilde{t}} = -\tilde{i}_q - \tilde{i}_d\tilde{\omega} + \mu\tilde{\omega} + \tilde{u}_q, \quad (1.7b)$$

$$\frac{d\tilde{\omega}}{d\tilde{t}} = \sigma(\tilde{i}_q - \tilde{\omega}) + \varepsilon\tilde{i}_d\tilde{i}_q - \tilde{T}_L. \quad (1.7c)$$

### 1.3. Điểm cân bằng và sự phân nhánh

Xét trường hợp khi  $\tilde{T}_L = \tilde{u}_d = \tilde{u}_q = 0$ ,  $L_d = L_q = L$ .

Khi đó, điểm cân bằng của hệ (1.7) được xác định bởi:

$$\begin{aligned} \tilde{i}_d &= \frac{\mu\tilde{\omega}^2}{1+\tilde{\omega}^2}, \quad \tilde{i}_q = \frac{\tilde{\omega}\mu}{1+\tilde{\omega}^2}, \\ \tilde{\omega}[\sigma\tilde{\omega}^4 + \sigma(2-\mu)\tilde{\omega}^2 + \sigma(1-\mu)] &= 0. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Giải hệ phương trình (1.8), ta thu được kết quả như sau:

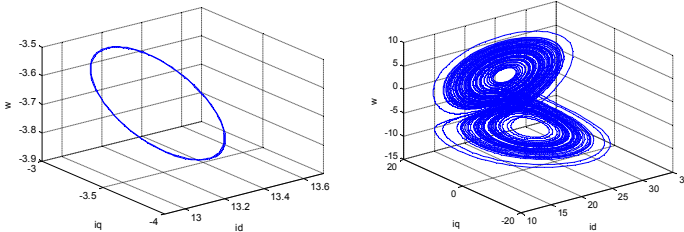
- $0 < \mu \leq 1$ : Hệ (1.8) có duy nhất một điểm cân bằng tại  $E_0(0, 0, 0)$ .
- $\mu > 1$ : Ngoài điểm cân bằng  $E_0$ , hệ (1.8) còn xuất hiện thêm hai điểm cân bằng khác đối xứng nhau:

$$E_1(\mu-1, \sqrt{\mu-1}, \sqrt{\mu-1}) \quad \text{và} \quad E_2(\mu-1, -\sqrt{\mu-1}, -\sqrt{\mu-1}).$$

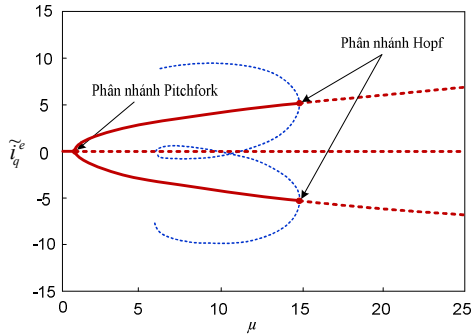
Bằng việc khảo sát sự ổn định của các điểm cân bằng trên, ta có kết quả:

- Tại  $\mu = 1$  điểm cân bằng  $E_0$  sẽ chuyển từ ổn định sang không ổn định, đồng thời tại đó hệ thống sẽ xuất hiện thêm 2 điểm cân bằng mới đối xứng nhau  $E_1, E_2$ . Do đó, theo lý thuyết về sự phân nhánh [Khalli, 2001] thì hệ thống (1.8) xuất hiện điểm phân nhánh Pitchfork tại  $\mu = 1$ .
- Tại  $\mu = \mu_h = \frac{\sigma(\sigma+4)}{\sigma-2}$  hệ thống (1.8) sẽ xuất hiện điểm phân nhánh Hopf.

Ngoài ra, khi  $\mu < \mu_h$  thì  $E_1$  và  $E_2$  là ổn định và khi  $\mu > \mu_h$  thì cả ba điểm cân bằng đều không ổn định.



Hình 1.3. Giản đồ pha của hệ thống khi  $\mu = 14,1$  (trái) và khi  $\mu = 23$  (phải).



Hình 1.4. Giản đồ phân nhánh mô tả sự biến thiên của  $\tilde{i}_q^e$  theo tham số  $\mu$ .

## CHƯƠNG 2. KHẢO SÁT CHUYỂN ĐỘNG HỖN ĐỘNG TRONG MÔ HÌNH ĐỘNG CƠ ĐB-NCVC

### 2.1. Chuyển động hỗn độn trong các hệ thống truyền động

#### 2.1.1. Khái niệm về chuyển động hỗn độn

Theo định nghĩa của từ điển tiếng Anh Oxford, thì khái niệm chuyển động hỗn độn được hiểu là “hành vi của một hệ thống được mô tả bởi những luật xác định nhưng đáp ứng của nó xuất hiện ngẫu nhiên, không thể dự đoán được và rất nhạy cảm với sự thay đổi của tham số hoặc nó phụ thuộc vào một số lượng lớn các biến độc lập”.

#### 2.1.2. Chuyển động hỗn độn trong các hệ thống truyền động

Các kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng chuyển động hỗn độn có thể xuất hiện trong hệ truyền động động cơ một chiều [Chau et al., 1997], mô hình của động cơ DC không chổi than nam châm vĩnh cửu [Hemati, 1994], mô hình động cơ xoay chiều không chổi than nam châm vĩnh cửu [Hemati and Wang, 1993; Li et al., 2002].

### 2.2 Các phương pháp phân tích chuyển động hỗn độn

#### 2.2.1. Đáp ứng thời gian

#### 2.2.2. Biểu đồ pha

#### 2.2.3. Bản đồ Poincaré

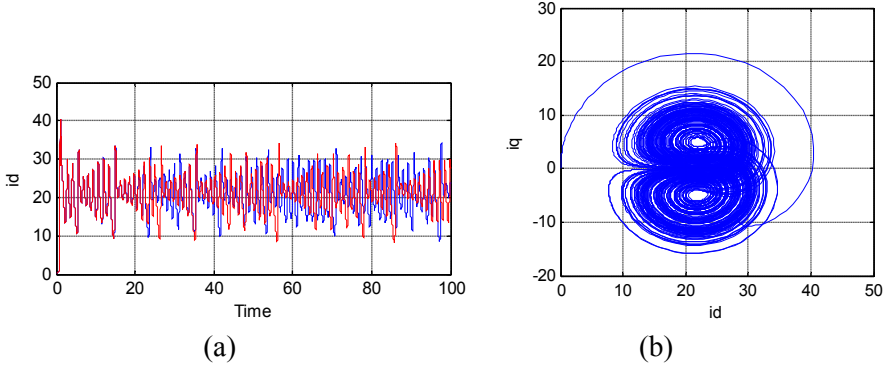
#### 2.2.4. Số mũ Lyapunov

#### 2.2.5. Giản đồ phân nhánh

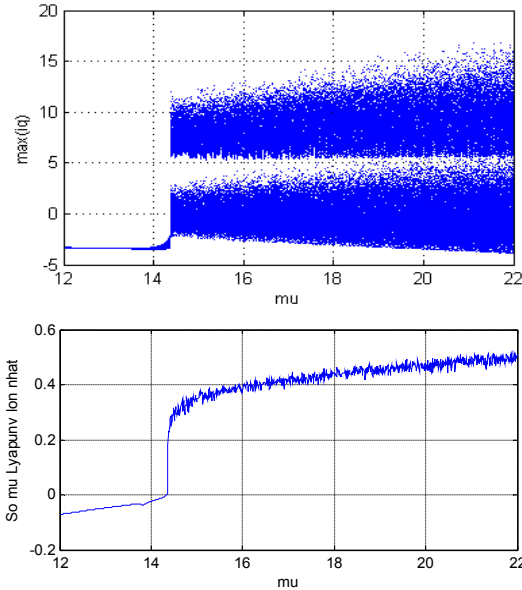
### 2.3. Đặc tính hỗn độn trong mô hình động cơ ĐB-NCVC

Trong phần này sẽ tập trung khảo sát tính chất hỗn độn trong mô hình động cơ đồng bộ NCV. Ở đây ta chỉ xét trường hợp  $\tilde{u}_d = \tilde{u}_q = \tilde{T}_L = 0$ . Khi đó, phương trình mô tả động lực học của động cơ được viết như sau:

$$\frac{d\tilde{i}_d}{dt} = -\tilde{i}_d + \tilde{i}_q \tilde{\omega} + \tilde{u}_d, \quad \frac{d\tilde{i}_q}{dt} = -\tilde{i}_q - \tilde{i}_d \tilde{\omega} + \mu \tilde{\omega}, \quad \frac{d\tilde{\omega}}{dt} = \sigma(\tilde{i}_q - \tilde{\omega}). \quad (2.1)$$



Hình 2.1. Đặc tính hỗn độn trong mô hình động cơ ĐB-NCVC khi  $\mu = 23$ : (a) đáp thời gian của dòng  $i_d$ , (b) Biểu đồ pha  $i_d$ - $i_q$ .



Hình 2.2. Sự biến thiên của số mũ Lyapunov lớn nhất (trên) và giản đồ phân nhánh (dưới) theo tham số  $\mu$ .



**Kết luận:** Từ giản đồ phân nhánh, ta thấy rằng động cơ ĐB-NCVC sẽ thể hiện tính chất hỗn độn khi  $\mu > 14,3$ . Ngoài ra, từ đồ thị số mũ Lyapunov lớn nhất ta thấy  $\lambda_{\max}$  đổi dấu từ âm sang dương khi tham số  $\mu$  vượt qua giá trị ngưỡng  $\mu_{ng} = 14,3$ . Khi  $\mu$  càng tăng thì giá trị của  $\lambda_{\max}$  càng lớn, mức độ hỗn độn của hệ thống càng tăng.

## CHƯƠNG 3. ĐIỀU KHIỂN PHÂN NHÁNH HOPF TRONG MÔ HÌNH ĐỘNG CƠ ĐB-NCVC

### 3.1. Phân nhánh Hopf

#### 3.1.1. Khái niệm:

Phân nhánh Hopf (hay còn gọi là phân nhánh Andronov-Hopf) là sự thay đổi trong đặc tính động lực học của một hệ thống được mô tả bởi hệ phương trình vi phân, ở đó một chu trình giới hạn (limit cycle) sẽ được sinh ra hoặc mất đi từ một điểm cân bằng khi một tham số của hệ thống (gọi là tham số phân nhánh) biến thiên qua một giá trị tới hạn (critical value).

#### 3.1.2. Điều kiện để xuất hiện điểm phân nhánh Hopf

Xét hệ thống như sau:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{x}}{dt} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mu), \\ \mathbf{f} : R^{n+1} &\rightarrow R^n, \quad \mathbf{x} \in R^n, \quad \mu \in R \end{aligned} \tag{3.1}$$

Hệ thống (3.1) sẽ xuất hiện điểm phân nhánh Hopf tại  $\mu = \mu^e$  nếu các điều kiện sau được thỏa mãn [Khalil, 2001, Nguyen and Hong, 2012].

- (i) Ma trận Jacobian  $\mathbf{J}(\mathbf{x}^e, \mu^e)$  có một cặp giá trị riêng thuần ảo  $\lambda(\mu^e) = \pm j\xi$  và tất cả các giá trị riêng còn lại có phần thực âm.
- (ii) Khi  $\mu$  biến thiên từ lân cận  $\mu^{e-}$  đến  $\mu^{e+}$  thì giá trị riêng  $\lambda(\mu^e)$  đi qua trục ảo với tốc độ khác không, nghĩa là  $\lambda(\mu^{e-})$  và  $\lambda(\mu^{e+})$  ngược dấu nhau.

*Điều kiện tương đương đề xuất bởi Liu [Liu, 1994].*

Gọi  $P(\lambda, \mu^e)$  là đa thức đặc tính của ma trận Jacobian  $\mathbf{J}(\mathbf{x}^e, \mu^e)$ , khi đó ta có:

$$P(\lambda; \mu^e) = \det(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{J}(\mathbf{x}^e, \mu)) = p_0(\mu^e)\lambda^n + p_1(\mu^e)\lambda^{n-1} + \dots + p_n(\mu^e). \tag{3.2}$$

Thành lập ma trận  $\mathbf{H}_n$  như sau:

$$\mathbf{H}_n = \begin{bmatrix} p_1(\mu^e) & p_0(\mu^e) & \cdots & 0 \\ p_3(\mu^e) & p_2(\mu^e) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{2n-1}(\mu^e) & p_{2n-2}(\mu^e) & \cdots & p_n(\mu^e) \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

trong đó,  $p_i(\mu^e) = 0$  khi  $i < 0$  hoặc  $i > n$ . Khi đó, điều kiện để xuất hiện điểm phân nhánh Hopf (i) và (ii) sẽ tương đương với các điều kiện sau:

$$(i') \begin{cases} p_n(\mu^e) > 0, \\ \Delta_i(\mu^e) = \det(\mathbf{H}_i(\mu^e)) > 0, \quad i = 1, \dots, n-2, \\ \Delta_{n-1}(\mu^e) = \det(\mathbf{H}_{n-1}(\mu^e)) = 0. \end{cases} \quad (3.4)$$

$$(ii') \quad \left. \frac{d(\Delta_{n-1}(\mu))}{d\mu} \right|_{\mu=\mu^e} \neq 0. \quad (3.5)$$

### 3.2. Điều khiển phân nhánh Hopf thông qua bộ lọc washout

Trong phần này đề xuất phương pháp thiết kế luật điều khiển phản hồi trạng thái động dựa trên bộ lọc washout để dịch chuyển điểm phân nhánh Hopf trong mô hình (2.1) từ vị trí ban đầu ứng với  $\mu = 14,93$  sang vị trí mới ứng với  $\mu = 25$ . Tức là sẽ mở rộng phạm vi ổn định của điểm cân bằng, do đó sẽ loại bỏ được hiện tượng hỗn loạn trong đặc tính của động cơ trong miền biến thiên có thể của  $\mu$ . Luật điều khiển dựa trên bộ lọc washout được đề xuất như sau:

$$\frac{dx}{dt} = \tilde{i}_d - \alpha x = y, \quad u = ky. \quad (3.6b)$$

Kết hợp phương trình (2.1) với phương trình (3.6), ta thu được hệ phương trình mô tả hệ thống điều khiển vòng kín như sau:

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{i}_d}{d\tilde{t}} &= -\tilde{i}_d + \tilde{i}_q \tilde{\omega} + k(\tilde{i}_d - \alpha x), \\ \frac{d\tilde{i}_q}{d\tilde{t}} &= -\tilde{i}_q - \tilde{i}_d \tilde{\omega} + \mu \tilde{\omega}, \\ \frac{d\tilde{\omega}}{d\tilde{t}} &= \sigma(\tilde{i}_q - \tilde{\omega}), \\ \frac{dx}{dt} &= \tilde{i}_d - \alpha x. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Ở đây ta chọn  $\alpha = 0,5$ . Tại giá trị  $\mu = 25$ , điểm cân bằng của hệ thống (3.7) sẽ là  $(\tilde{i}_d^e, \tilde{i}_q^e, \tilde{\omega}^e, x^e) = (24, \pm 4,9, \pm 4,9, 50)$ . Từ đó, ta tính được ma trận Jacobian tại điểm cân bằng

$$\mathbf{J}^e = \begin{bmatrix} k-1 & \pm 4,9 & \pm 4,9 & -0,5k \\ \mp 4,9 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 5,46 & -5,46 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -0,5 \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Và đa thức đặc trưng thu được sẽ là:

$$P(\lambda; k) = \det(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{J}^e) = p_0 \lambda^4 + p_1 \lambda^3 + p_2 \lambda^2 + p_3 \lambda + p_4, \quad (3.9)$$

Trong đó:  $p_0 = 1$ ,  $p_1 = 7,96 - k$ ,  $p_2 = 34,2 - 6,46k$ ,  
 $p_3 = 277,425$ ,  $p_4 = 131,094$

Từ đó, ta thành lập được ma trận  $\mathbf{H}_4$  như sau:

$$\mathbf{H}_4 = \begin{bmatrix} p_1 & p_0 & 0 & 0 \\ p_3 & p_2 & p_1 & p_0 \\ 0 & p_4 & p_3 & p_2 \\ 0 & 0 & 0 & p_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7,96 - k & 1 & 0 & 0 \\ 277,425 & 34,2 - 6,46k & 7,96 - k & 1 \\ 0 & 131,094 & 277,425 & 34,2 - 6,46k \\ 0 & 0 & 0 & 131,094 \end{bmatrix}$$

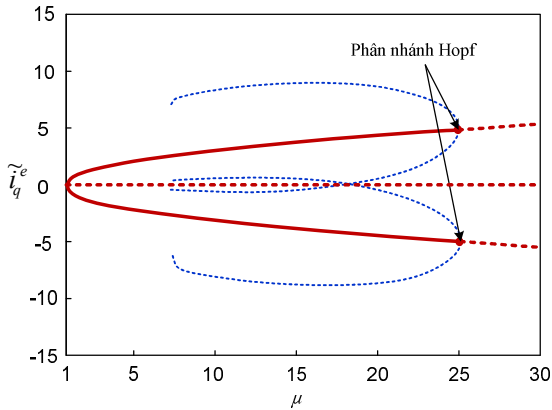
Điều kiện (3.4) khi đó trở thành

$$\begin{cases} p_4 = 131,094 > 0, \\ \Delta_1 = \det(\mathbf{H}_1) = 7,96 - k > 0, \\ \Delta_2 = \det(\mathbf{H}_2) = 6,46k^2 - 85,622k - 5,193 > 0, \\ \Delta_3 = \det(\mathbf{H}_3) = 1661,1k^2 - 21667k - 9747,5 = 0. \end{cases} \quad (3.10)$$

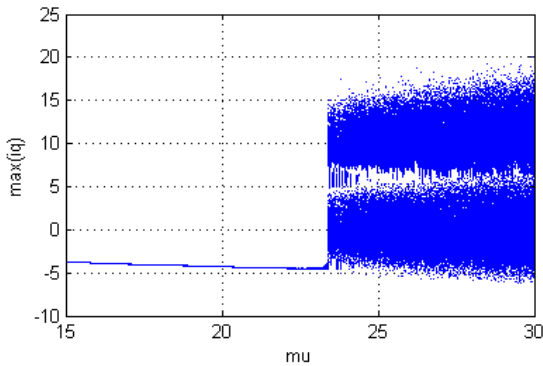
Giải hệ (3.10) ta thu được  $k = -0,4354$ . Với giá trị này của  $k$  dễ dàng kiểm tra điều kiện (3.5) cũng được thỏa mãn.

Hình 3.1 là giản đồ phân nhánh của điểm cân bằng  $\tilde{i}_q^e$  theo tham số  $\mu$  cho hệ thống điều khiển vòng kín được mô tả như trong (3.7). Từ hình vẽ ta thấy rằng dưới tác dụng của bộ điều khiển, điểm phân nhánh Hopf đã được dịch chuyển tới vị trí mới ứng với  $\mu = 25$ , nghĩa là phạm vi ổn định của điểm cân bằng đã được mở rộng. Hình 3.2 mô tả giản đồ phân nhánh của  $\max(\tilde{i}_q)$  theo  $\mu$  của hệ thống điều khiển vòng kín (3.7). Từ hình vẽ ta thấy rằng dưới tác

dụng của bộ điều khiển thì điểm xuất hiện chuyển động hỗn độn đã được dịch chuyển từ giá trị  $\mu = 14,3$  sang giá trị  $\mu = 23,5$ .



Hình 3.1. Giản đồ phân nhánh mô tả sự biến thiên của  $\tilde{i}_q^e$  theo  $\mu$  khi có tín hiệu điều khiển.



Hình 3.2. Giản đồ phân nhánh mô tả sự biến thiên của  $\max(\tilde{i}_q)$  theo  $\mu$  khi có tín hiệu điều khiển.

**Kết luận:** Bằng việc điều khiển để dịch chuyển điểm phân nhánh Hopf, ta có thể loại bỏ được sự xuất hiện của chuyển động hỗn độn trong một miền biến thiên theo yêu cầu của tham số  $\mu$ . Ở đây miền biến thiên của tham số  $\mu$  là xung quanh giá trị ngưỡng  $\mu_h$  bởi vì khi  $\mu$  vượt qua giá trị ngưỡng  $\mu_h$  thì sẽ làm xuất hiện sự phân nhánh Hopf trong đặc tính động lực học của động cơ.

## KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

### Kết luận

Trong báo cáo này, nhóm tác giả đã đề cập vấn đề về việc khảo sát đặc tính hỗn độn trong mô hình động cơ ĐB-NCVC. Trên cơ sở mô hình của động cơ trong hệ tọa độ  $d-q$ , đặc tính động lực học của động cơ đã được khảo sát chi tiết. Kết quả thu được đã chỉ ra rằng khi tham số động cơ ở trong một miền xác định thì động cơ thể hiện sự phân nhánh trong đặc tính động học (phân nhánh Pitchfork, phân nhánh Hopf), đặc biệt là sự xuất hiện của hiện tượng hỗn loạn trong đáp ứng đầu ra của động cơ. Đối với các hệ thống truyền động thì sự xuất hiện đặc tính hỗn độn là không mong muốn, do đó việc khống chế, loại bỏ đặc tính hỗn độn trong mô hình động cơ là một yêu cầu cấp thiết. Trên nhu cầu đó, các tác giả đã đề xuất phương pháp điều khiển phản hồi động dựa trên bộ lọc washout cho phép dịch chuyển điểm phân nhánh Hopf đến một vị trí mới nhằm mục đích mở rộng miền ổn định của các điểm cân bằng cũng như loại bỏ được sự xuất hiện của chuyển động hỗn độn trong miền biến thiên có thể của tham số động cơ. Kết quả mô phỏng đã chứng minh tính hiệu quả của bộ điều khiển được thiết kế, đáp ứng yêu cầu đặt ra.

### Kiến nghị

Các hệ thống truyền động sử dụng động cơ ĐB-NCVC được sử dụng rất nhiều trong các ứng dụng thực tế. Tuy nhiên, tính an toàn, độ tin cậy của các hệ thống này liên quan đến sự xuất hiện hiện tượng hỗn độn trong đặc tính động cơ chưa thực sự được quan tâm. Do đó, kết quả thu được từ đề tài này sẽ là tài liệu hữu ích cho các nhà nghiên cứu, các kỹ sư trong lĩnh vực Tự động hóa.

### Hướng phát triển

Một số hướng phát triển của đề tài trong tương lai bao gồm:

- Khảo sát chi tiết hơn đặc tính động lực học của hệ truyền động xoay chiều sử dụng động cơ ĐB-NCVC trong đó có kể đến cả khâu nguồn cấp (mạch công suất)
- Trên cơ sở đó, xây dựng mô hình thực tế để kiểm nghiệm lại những kết quả thu được từ lý thuyết.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Ataei M., Kiyoumars A., and Ghorbani B., “Control of chaos in permanent magnet synchronous motor by using optimal Lyapunov exponent placement”, *Physics Letters A*, vol. 374, pp. 4226-4230, 2010.
- [2] Chandana Pereca P.D., *Sensorless control of permanent magnet synchronous motor*, Ph.D. thesis, Faculty of Engineering & Science, Aalborg University, 2002.
- [3] Chau K.T. and Wang Z., *Chaos in Electric Drive Systems*, John Wiley & Son, 2011.
- [4] Chau K.T., Chen J.H., Chan C.C., and Pong J.K.H., “Chaotic behavior in a simple DC drive”, *Power Electronics Specialists Conference*, vol. 1, pp. 473-479, 1997.
- [5] Choi H. H., “Adaptive control of a chaotic permanent magnet synchronous motor”, *Nonlinear Dynamics*, vol. 69, pp. 1311-1322, 2012.
- [6] Ermentrout B., “Simulating, analyzing, and animating dynamical systems: a guide to XPPAUT for researchers and students”, *SIAM, Philadelphia*, 2002.
- [7] Gao Y. and Chau K.T., “Design of permanent magnets to avoid chaos in PM synchronous machines”, *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 39, pp. 2995-2997, 2003.
- [8] Harb A. M., “Nonlinear chaos control in permagnet magnet reluctance machine”, *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 19, pp. 1217-1224, 2004.
- [9] Hassouned M.A., Lee H.C., and Abed E. H., “Washout filters in feedback control: Benefits, limitations, and extensions”, *Technical Research Report, ISR*, 2004.
- [10] Hemati N., “Strange attractors in brushless DC motor”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 41, pp. 40-45, 1994.
- [11] Hemati N. and Kwatny H., “Bifurcation of equilibria and chaos in permanent magnet machines”, *Proceeding of the 32<sup>nd</sup> Conference on Decision and Control*, Texas, 1993.
- [12] Jing Z., Yu C., and Chen G., “Complex dynamics in a permanent magnet synchronous motor model”, *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 22, pp. 831-848, 2004.
- [13] Khalil H.K., *Nonlinear systems*, 3<sup>rd</sup> Edition, Prentice Hall, 2001.

- [14] Krause P.C., Wasynczuk O., and Sudhoff S.D., *Analysis of Electric Machinery*, IEEE Press, 1995.
- [15] Li Z., Park J.B., Joo Y. H., Zhang B., and Chen G., “Bifurcations and chaos in a permanent magnet synchronous motor”, *IEEE Transaction on Circuits & Systems*, vol. 49, pp. 383-387, 2002.
- [16] Liu W.M., “Criterion of Hopf bifurcations without using eigenvalues”, *J. of Mathematical Analysis and Applications*, vol. 182, pp. 250-256, 1994.
- [17] Loria A., “Robust linear control of (chaotic) permanent magnet synchronous motors with uncertainties”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 56, pp. 2109-2122, 2009.
- [18] Nguyen L.H., Hong K.-S., “Hopf bifurcation control via a dynamic state-feedback control”, *Physics Letters A*, vol. 376, pp. 442-446, 2012.
- [19] Rosenstein, M.T., Collins, J.J., and De Luca, C.J., “A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets”, *Physica D*, vol. 65, pp. 117–134, 1993.
- [20] Shimada, I. and Nagashima, T., “A numerical approach to ergodic problem of dissipative dynamical systems”, *Progress of Theoretical Physics*, vol. 61, pp. 1605–1616, 1979.