

ĐIỀU KHIỂN PHÂN NHÁNH VÀ HỖN Độn TRONG MÔ HÌNH ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU

CONTROL OF BIFURCATION AND CHAOS IN THE MODEL OF THE PERMANENT-MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Nguyễn Lê Hòa¹, Lê Tiến Dũng¹, Nguyễn Hoàng Mai¹, Đoàn Quang Vinh²

¹Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; Email: nglehoa @dut.udn.vn

²Đại học Đà Nẵng; Email: dqvinh@ac.dun.vn

Tóm tắt - Bài báo này đề cập đến vấn đề điều khiển sự phân nhánh và chuyển động hỗn độn trong mô hình động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu làm việc ở chế độ quay tự do. Bằng việc xây dựng giản đồ phân nhánh và tính toán số mũ Lyapunov lớn nhất, kết quả thu được đã chỉ ra rằng động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu thể hiện sự phân nhánh Pitchfork và phân nhánh Hopf cũng như xuất hiện sự chuyển động hỗn độn khi tham số của nó nằm trong một phạm vi nhất định. Trên cơ sở đó, bài báo đã đề xuất phương pháp điều khiển phản hồi động nhằm dịch chuyển điểm phân nhánh Hopf đến một vị trí mới và do đó đã mở rộng phạm vi ổn định của điểm cân bằng cũng như loại bỏ được sự xuất hiện của chuyển động hỗn độn trong miền biến thiên theo yêu cầu của tham số động cơ.

Từ khóa - động cơ ĐB-NCVC; sự phân nhánh; chuyển động hỗn độn; giản đồ phân nhánh; số mũ Lyapunov; điều khiển phản hồi động; bộ lọc washout.

1. Giới thiệu chung

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (ĐB-NCVC) được sử dụng nhiều trong các ứng dụng 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 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 [1-3]. Khi động cơ làm việc ở trạng thái chuyển động hỗn độn thì mô-men sẽ thay đổi một cách ngẫu nhiên, tốc độ của động cơ sẽ biến thiên trong một phạm vi rộng, do đó sẽ ảnh hưởng nghiêm trọng đến chất lượng làm việc và thậm chí phá hỏng cả hệ thống truyền động. 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 Y. và Chau K.T. 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 [4]. Bên cạnh đó, 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 như phương pháp điều khiển trượt thích nghi [5], phương pháp điều khiển phi tuyến backstepping [6], phương pháp gán số mũ Lyapunov [7].

Bài báo này, trước tiên sẽ khảo sát đặc tính động lực học của động cơ ĐB-NCVC: sự ổn định của điểm cân bằng và sự hình thành của hiện tượng phân nhánh Pitchfork và phân nhánh Hopf; đề xuất một số phương pháp để nhận biết sự xuất hiện của chuyển động hỗn độn. Sau đó, tác giả sẽ

Abstract - This paper addresses the problem of control bifurcation and chaos in the model of permanent-magnet synchronous motors in the unforced mode. By constructing the bifurcation diagram and calculating the largest Lyapunov exponent, we found that the permanent-magnet synchronous motor can undergo Pitchfork and Hopf bifurcations as well as exhibit chaotic behavior when its parameter lies in a certain area. Also, the paper proposes a dynamic feedback control to relocate a Hopf bifurcation point to a new desired position. As a result of the control action, the stable range of equilibria can be extended as well as the chaotic behavior can be avoided in the desired range of the motor's parameter.

Key words - permanent-magnet synchronous motor; bifurcation; chaotic behavior; bifurcation diagram; Lyapunov exponent; dynamic feedback control; washout filter.

đề xuất một phương pháp điều khiển phản hồi động dựa trên bộ lọc washout để dịch chuyển điểm phân nhánh Hopf trong mô hình động cơ ĐB-NCVC đến vị trí mới nhằm mục đích mở rộng miền ổn định của điểm cân bằng cũng như loại bỏ sự xuất hiện của chuyển động hỗn độn trong miền biến thiên có thể của tham số động cơ.

2. Đặc tính động lực học của động cơ ĐB-NCVC

2.1. Mô hình của động cơ ĐB-NCVC

Mô hình của động cơ ĐB-NCVC trong hệ tọa độ d - q được mô tả như sau [1, 2].

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d}(u_d - Ri_d + \omega L_q i_q), \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q}(u_q - Ri_q - \omega L_d i_d + \omega \psi_r), \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}[n_p \psi_r i_q + n_p (L_d - L_q) i_d i_q - T_L - \beta \omega] \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó, ω (rad/s) là tốc độ của động cơ; i_d (A) và i_q (A) lần lượt là dòng điện stator theo phương d và q ; u_d (V) và u_q (V) tương ứng là điện áp trên stator theo phương d và q ; T_L (Nm) là mô-men tải; J (Kg m^2) là mô-men quán tính; L_d (mH) và L_q (mH) lần lượt là điện cảm của stator theo phương d và q ; R (Ω) là điện trở cuộn dây stator; ψ_r (Wb) là từ thông của nam châm; β (Nrad $^{-1}$ s) là hệ số giảm chấn nhớt và n_p là số đôi cực của động cơ.

Theo [1], ta thực hiện phép biến đổi affine các biến trạng thái và phép lấy tỷ lệ trực thời gian như sau:

$$\begin{cases} \mathbf{x} = \Gamma \tilde{\mathbf{x}}, \\ t = \tau \tilde{t}. \end{cases} \quad (2)$$

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

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} b\kappa & 0 & 0 \\ 0 & \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1/\tau \end{bmatrix}; b = \frac{L_q}{L_d}; \kappa = \frac{\beta}{n_p \tau \psi_r}; \tau = \frac{L_q}{R}.$$

Khi đó, hệ phương trình (1) được biến đổi về dạng sau:

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{i}_d}{dt} = -\frac{L_q}{L_d} \tilde{i}_d + \tilde{i}_q \tilde{\omega} + \tilde{u}_d, \\ \frac{d\tilde{i}_q}{dt} = -\tilde{i}_q - \tilde{i}_d \tilde{\omega} + \mu \tilde{\omega} + \tilde{u}_q, \\ \frac{d\tilde{\omega}}{dt} = \sigma(\tilde{i}_q - \tilde{\omega}) + \varepsilon \tilde{i}_d \tilde{i}_q - \tilde{T}_L. \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó, các tham số trong hệ phương trình (3) được xác định như sau:

$$\mu = \frac{n_p \psi_r^2}{R\beta}; \quad \sigma = \frac{L_q \beta}{RJ}; \quad \varepsilon = \frac{L_q \beta^2 (L_d - L_q)}{L_d J n_p \psi_r^2};$$

$$\tilde{u}_d = \frac{n_p \psi_r L_q}{\beta R^2} u_d; \quad \tilde{u}_q = \frac{n_p \psi_r L_q}{\beta R^2} u_q, \quad \tilde{T}_L = \frac{L_q}{JR^2} T_L.$$

Nếu khe hở không khí là tròn thì ta có thể viết $L_d = L_q = L$. Ngoài ra, trong phạm vi bài báo này ta chỉ xét động cơ ở chế độ quay tự do, nghĩa là khi không có ngoại lực tác dụng lên động cơ, tức là $\tilde{u}_d = \tilde{u}_q = 0$ và $\tilde{T}_L = 0$. Chế độ hoạt động này của động cơ được hiểu là sau một chu kỳ hoạt động, động cơ được ngắt ra khỏi nguồn cấp và chạy không tải. Với những giả thiết trên, mô hình của động cơ ĐB-NCVC được rút gọn về dạng.

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{i}_d}{dt} = -\tilde{i}_d + \tilde{i}_q \tilde{\omega}, \\ \frac{d\tilde{i}_q}{dt} = -\tilde{i}_q - \tilde{i}_d \tilde{\omega} + \mu \tilde{\omega}, \\ \frac{d\tilde{\omega}}{dt} = \sigma(\tilde{i}_q - \tilde{\omega}). \end{cases} \quad (4)$$

2.2. Sự phân nhánh trong mô hình động cơ ĐB-NCVC

Hiện tượng phân nhánh là sự thay đổi các điểm cân bằng (hoặc các quỹ đạo tuần hoàn) hoặc tính chất ổn định của chúng gây nên bởi sự biến thiên của một hay nhiều tham số. Các tham số này gọi là các tham số phân nhánh. Ở đây, tham số phân nhánh được lựa chọn là tham số μ . Như đã được chỉ ra ở trên thì $\mu = n_p \psi_r^2 / R\beta$, nghĩa là khi có sự thay đổi của điện trở cuộn dây R , hệ số giảm chấn nhớt β và từ thông của nam châm ψ_r thì sẽ làm cho tham số μ thay đổi. Để khảo sát sự phân nhánh trong mô hình động cơ ĐB-NCVC, ta tiến hành xác định các điểm cân bằng cũng như tính chất ổn định của chúng.

Gọi $(\tilde{i}_d^e, \tilde{i}_q^e, \tilde{\omega}^e)$ là điểm cân bằng của hệ (4). Khi đó, ta có:

$$\begin{cases} -\tilde{i}_d^e + \tilde{i}_q^e \tilde{\omega}^e = 0, \\ -\tilde{i}_q^e - \tilde{i}_d^e \tilde{\omega}^e + \mu \tilde{\omega}^e = 0, \\ \tilde{i}_q^e - \tilde{\omega}^e = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Giải hệ (5) ta thu được kết quả sau:

(i) $0 < \mu \leq 1$: Hệ (5) có duy nhất một điểm cân bằng tại $E_0(0, 0, 0)$.

(ii) $\mu > 1$: Ngoài điểm cân bằng E_0 , hệ (5) còn xuất hiện thêm hai điểm cân bằng khác đối xứng nhau $E_1(\mu-1, \sqrt{\mu-1}, \sqrt{\mu-1})$; $E_2(\mu-1, -\sqrt{\mu-1}, -\sqrt{\mu-1})$.

Ma trận Jacobian của hệ (4) sẽ là:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} -1 & \tilde{\omega} & \tilde{i}_q \\ -\tilde{\omega} & -1 & \mu - \tilde{i}_d \\ 0 & \sigma & -\sigma \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Trước hết ta xét sự ổn định của điểm cân bằng E_0 . Tuyến tính hóa ma trận Jacobian xung quanh điểm cân bằng E_0 , ta được.

$$\mathbf{J}|_{E_0} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & \mu \\ 0 & \sigma & -\sigma \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Phương trình đặc trưng tương ứng sẽ là:

$$P(\lambda)|_{E_0} = \det(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{J}|_{E_0}) = (\lambda + 1)[\lambda^2 + (1 + \sigma)\lambda + \sigma(1 - \mu)] = 0 \quad (8)$$

Chú ý rằng phương trình $\lambda^2 + (1 + \sigma)\lambda + \sigma(1 - \mu) = 0$ có $\Delta = (\sigma - 1)^2 + 4\mu > 0$ với $\mu > 0$. Do đó sẽ có hai nghiệm thực λ_2, λ_3 , trong đó $\lambda_2 + \lambda_3 = -(1 + \sigma) < 0$ và $\lambda_2 \lambda_3 = \sigma(1 - \mu)$. Từ đây ta thấy rằng khi $0 < \mu < 1$ thì phương trình (8) sẽ có 3 nghiệm thực âm, nghĩa là điểm cân bằng E_0 là ổn định. Khi $\mu > 1$ thì phương trình (8) sẽ tồn tại một nghiệm thực dương, nghĩa là điểm cân bằng E_0 là không ổn định.

Từ kết quả phân tích ở trên, ta đi đến kết luận: 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 [8] thì hệ thống (4) xuất hiện điểm phân nhánh Pitchfork tại $\mu = 1$.

Tiếp theo, ta xét sự ổn định của điểm cân bằng E_1 và E_2 . Do E_1 và E_2 là đối xứng nhau do đó tính chất ổn định của chúng sẽ giống nhau, vì vậy ở đây ta chỉ cần khảo sát sự ổn định của E_1 . Tuyến tính hóa ma trận Jacobian (6) xung quanh E_1 , ta được.

$$\mathbf{J}|_{E_1} = \begin{bmatrix} -1 & \sqrt{\mu-1} & \sqrt{\mu-1} \\ -\sqrt{\mu-1} & -1 & 1 \\ 0 & \sigma & -\sigma \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Phương trình đặc trưng tương ứng sẽ có dạng:

$$P(\lambda)_{E_1} = \det(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{J}|_{E_1})$$

$$= \lambda^3 + (2 + \sigma)\lambda^2 + (\sigma + \mu)\lambda + 2\sigma(\mu - 1) = 0 \quad (10)$$

Sự phân nhánh của E_1 và E_2 nếu có sẽ xảy ra khi nghiệm của phương trình đặc trưng (10) có dạng $\lambda = 0$ hoặc $\lambda = j\omega$. Nhận thấy với $\lambda = 0$ thì $\mu = 1$, tức là ứng với điểm phân nhánh Pitchfork đã xét ở trên. Do vậy, ở đây ta thay $\lambda = j\omega$ vào phương trình (10) rồi cân bằng phần thực và phần ảo, ta thu được giá trị tới hạn của μ như sau:

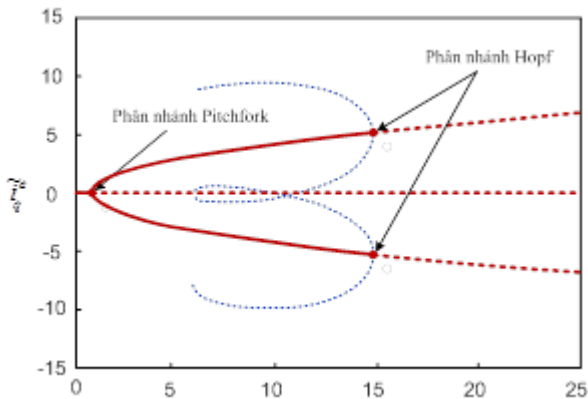
$$\mu = \mu_h = \frac{\sigma(\sigma + 4)}{\sigma - 2}. \quad (11)$$

Tại $\mu = \mu_h$, phương trình đặc trưng (10) sẽ có một cặp nghiệm phức thuần ảo và một nghiệm thực âm, cụ thể như sau:

$$\lambda_1 = -(\sigma + 2), \quad \lambda_{2,3} = \pm j\sqrt{\frac{2\sigma(\sigma + 1)}{\sigma - 2}}$$

Do đó, theo lý thuyết về sự phân nhánh [8], tại $\mu = \mu_h$ hệ thống (4) sẽ xuất hiện điểm phân nhánh Hopf. Ngoài ra, ta cũng dễ kiểm chứng rằng với $\mu < \mu_h$ thì hai điểm cân bằng E_1 và E_2 là ổn định và khi $\mu > \mu_h$ thì cả ba điểm cân bằng đều không ổn định.

Để kiểm chứng sự phân nhánh trong mô hình động cơ ĐB-NCVC cũng như để minh họa cho các kết quả tiếp theo. Trong bài báo này, các tham số của động cơ ĐB-NCVC được chọn như sau [2]: $L_d = L_q = L = 14.25\text{mH}$; $R = 0.9\Omega$; $n_p = 1$; $J = 4.7 \times 10^{-5} \text{Kgm}^2$; $\beta = 0.0162 \text{N/rad/s}$. Với tập tham số này, ta tính được $\sigma = 5.46$. Theo (11), điểm phân nhánh Hopf sẽ xuất hiện tại $\mu_h = 14.93$. Giản đồ phân nhánh mô tả sự thay đổi của $\tilde{i}_q^e$ khi cho μ biến thiên được mô tả như trong Hình 1. Trong đó, đường đậm, nét liền biểu diễn các điểm cân bằng ổn định, đường đậm, nét đứt mô tả các điểm cân bằng không ổn định. Đường mảnh, nét đứt mô tả các chu trình tới hạn không ổn định. Các giản đồ phân nhánh trong bài báo này được xây dựng trên gói phần mềm có tên là XPPAUT [9].



Hình 1. Giản đồ phân nhánh mô tả sự biến thiên của $\tilde{i}_q^e$ theo tham số μ .

2.3. Chuyển động hỗn độn trong mô hình động cơ ĐB-NCVC

Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng chuyển động hỗn độn

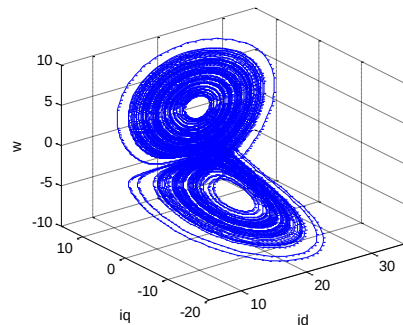
có thể xuất hiện trong mô hình động cơ ĐB-NCVC khi tham số μ có giá trị nhất định [1-3]. Các đặc trưng của chuyển động hỗn độn đó là: (i) Không có tính chu kỳ: quỹ đạo của nó không bị lặp lại do đó không thể dự đoán được các chuyển động trong tương lai, (ii) Rất nhạy với sự thay đổi điều kiện đầu: một sự thay đổi nhỏ trong điều kiện đầu có thể tạo ra sự khác biệt lớn của quỹ đạo chuyển động. Đáp ứng thời gian đặc trưng cho chuyển động hỗn độn là sự hình thành tập hút lạ như được mô tả như trong Hình 2. Kết quả mô phỏng này ứng $\mu = 20$ và điều kiện đầu $(\tilde{i}_d^0, \tilde{i}_q^0, \tilde{\omega}^0) = (0.01, 0.01, 0.01)$.

Trong bài báo này, để khảo sát sự xuất hiện của chuyển động hỗn độn trong mô hình động cơ ĐB-NCVC cũng như nhận biết miền giá trị của tham số μ mà ở đó chuyển động hỗn độn xuất hiện, phương pháp giản đồ phân nhánh và việc tính toán số mũ Lyapunov lớn nhất được sử dụng.

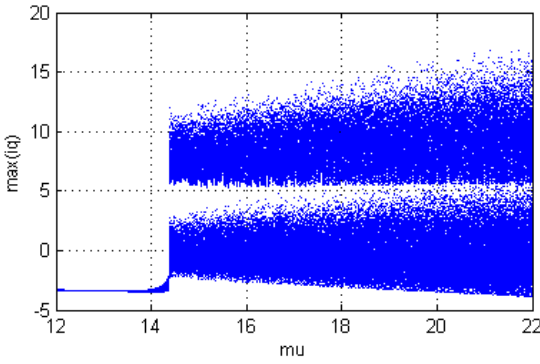
Giản đồ phân nhánh mô tả sự thay đổi định tính trong các quỹ đạo chuyển động của hệ thống khi tham số phân nhánh biến thiên. Ở đây, giản đồ phân nhánh được xây dựng để tính toán các giá trị cực đại của quỹ đạo chuyển động của $\tilde{i}_q$ khi cho tham số μ biến thiên. Kết quả tính toán được thể hiện như trong Hình 3. Từ hình vẽ, ta thấy rằng động cơ ĐB-NCVC sẽ thể hiện tính chất hỗn độn khi $\mu > 14,3$.

Số mũ Lyapunov là đại lượng thể hiện tốc độ phân ly theo hàm mũ của hai quỹ đạo chuyển động xuất phát từ các điều kiện đầu gần nhau. Khi trong hệ thống có xuất hiện chuyển động hỗn độn, thì giá trị của số mũ Lyapunov lớn nhất ($\lambda_{\max}$) được sử dụng như là một tham số để phát hiện sự xuất hiện của chuyển động hỗn độn. Theo đó, nếu $\lambda_{\max} > 0$ thì hệ thống sẽ xuất hiện chuyển động hỗn độn [10]. Trong bài báo này, thuật toán để tính số mũ Lyapunov lớn nhất được viết trên nền Matlab dựa theo phương pháp được trình bày trong [11].

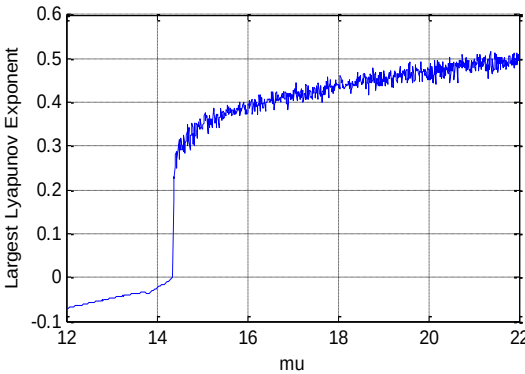
Kết quả tính toán thu được ở Hình 4 thể hiện rõ ràng $\lambda_{\max}$ đổi dấu từ âm sang dương khi tham số μ vượt qua giá trị ngưỡng $\mu_{ng} = 14,3$. Khi μ càng tăng thì giá trị của $\lambda_{\max}$ càng lớn, tính chất hỗn độn của hệ thống càng tăng. Kết quả này cũng thể hiện sự phù hợp với giản đồ phân nhánh như trong Hình 3.



Hình 2. Tập hút lạ đặc trưng cho tính chất hỗn độn của động cơ ĐB-NCVC khi $\mu = 20$.



Hình 3. Giản đồ phân nhánh mô tả sự biến thiên của $\max(\tilde{i}_q)$ theo tham số μ .



Hình 4. Sự biến thiên của số mũ Lyapunov lớn nhất theo tham số μ .

3. Điều khiển phân nhánh Hopf

Từ kết quả phân tích ở trên ta thấy rằng mô hình động cơ ĐB-NCVC xuất hiện sự phân nhánh Hopf tại $\mu = \mu_h$. Khi $\mu > \mu_h$ thì tất cả các điểm cân bằng đều mất ổn định, đồng thời tại đó, ta quan sát được sự xuất hiện của chuyển động hỗn độn như được chỉ ra trong Phần 2. Trong phần này tác giả sẽ đề xuất phương pháp điều khiển nhằm mục đích dịch chuyển điểm phân nhánh Hopf sang vị trí mới ứng với $\mu > \mu_h$, tức là mở rộng phạm vi ổn định của các điểm cân bằng, và do đó hy vọng sẽ loại bỏ được sự xuất hiện của chuyển động hỗn độn trong phạm vi biến thiên có thể của μ .

3.1. Điều kiện xuất hiện của điểm phân nhánh Hopf

Xét hệ thống phi tuyến dạng tổng quát như sau:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mu), \quad (12)$$

$$\mathbf{f} : R^{n+1} \rightarrow R^n, \quad \mathbf{x} \in R^n, \quad \mu \in R$$

Trong đó, $\mathbf{x}$ là vec-tơ trạng thái, μ là tham số biến thiên và được gọi là tham số phân nhánh. Giả thiết hệ thống (12) có điểm cân bằng tại $\mathbf{x} = \mathbf{x}^e$ ứng với $\mu = \mu^e$, nghĩa là $\mathbf{f}(\mathbf{x}^e, \mu^e) = 0$. Gọi $\mathbf{J}(\mathbf{x}^e, \mu^e)$ là ma trận Jacobian của hệ (12) tại điểm cân bằng. Khi đó, hệ thống (12) sẽ xuất hiện điểm phân nhánh Hopf tại $\mu = \mu^e$ nếu các điều kiện sau được thỏa mãn [8, 12].

(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 μ biến thiên từ lân cận μ^{e-} đến μ^{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.

Khi sử dụng các điều kiện trên trong việc thiết kế bộ điều khiển nhằm mục đích dịch chuyển điểm phân nhánh Hopf đến một vị trí khác ứng với giá trị nào đó của μ , thì nhiệm vụ đặt ra là phải biểu diễn được dưới dạng giải tích một cách tường minh tất cả giá trị riêng của ma trận Jacobian theo các tham số của bộ điều khiển. Đối với các hệ thống bậc cao thì nhiệm vụ đó là rất khó khăn và thậm chí là không thể thực hiện được. Do đó, Liu W.M. [13] đã đề xuất các điều kiện tương đương thay thế cho các điều kiện (i) và (ii). Các điều kiện tương đương này được mô tả theo các hệ số của đa thức đặc tính thay cho việc mô tả theo giá trị riêng của ma trận Jacobian như ở trên.

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:

$$\begin{aligned} P(\lambda; \mu^e) &= \det(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{J}(\mathbf{x}^e, \mu)) \\ &= p_0(\mu^e)\lambda^n + p_1(\mu^e)\lambda^{n-1} + \dots + p_n(\mu^e) \end{aligned} \quad (13)$$

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

$$\mathbf{H}_n = \begin{bmatrix} p_1(\mu^e) & p_0(\mu^e) & \dots & 0 \\ p_3(\mu^e) & p_2(\mu^e) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{2n-1}(\mu^e) & p_{2n-2}(\mu^e) & \dots & p_n(\mu^e) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

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:

$$(i') \begin{cases} p_n(\mu^e) > 0, \\ \Delta_i(\mu^e) = \det(\mathbf{H}_i(\mu^e)) > 0, \quad i = 1, \dots, n-2, \\ \Delta_{n-1}(\mu^e) = \det(\mathbf{H}_{n-1}(\mu^e)) = 0. \end{cases} \quad (15)$$

$$(ii') \quad \left. \frac{d(\Delta_{n-1}(\mu))}{d\mu} \right|_{\mu=\mu^e} \neq 0 \quad (16)$$

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 động dựa trên bộ lọc washout để dịch chuyển điểm phân nhánh Hopf trong mô hình (4) từ vị trí ban đầu ứng với $\mu = 14,93$ sang vị trí mới ứng với $\mu = 25$. Việc lựa chọn giá trị $\mu = 25$ chỉ nhằm mục đích minh họa tinh thần của phương pháp đề xuất. Ở đây, tín hiệu được điều khiển ta chọn là dòng điện $\tilde{i}_d$, khi đó luật điều khiển dựa trên bộ lọc washout được đề xuất như sau [14]:

$$\frac{dx}{dt} = \tilde{i}_d - \alpha x = y, \quad (17a)$$

$$u = ky. \quad (17b)$$

Phương trình (17a) là phương trình mô tả bộ lọc washout với x là biến trạng thái, y là đầu ra của bộ lọc, $\tilde{i}_d$ đóng vai trò là đầu vào của bộ lọc và $\alpha > 0$ là nghịch đảo hằng số thời gian của bộ lọc. Phương trình (17b) gọi là hàm điều khiển với k là tham số điều khiển. Chú ý rằng với luật điều khiển mô tả ở trong phương trình (17) thì khi $dx/dt = 0$ sẽ dẫn đến $u = 0$, điều đó có nghĩa là tín hiệu điều khiển sẽ không làm thay đổi điểm cân bằng ban đầu của hệ thống.

Kết hợp phương trình (17) với phương trình (4), ta thu được hệ phương trình mô tả hệ thống điều khiển vòng kín như sau:

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{i}_d}{dt} = -\tilde{i}_d + \tilde{i}_q\tilde{\omega} + k(\tilde{i}_d - \alpha x), \\ \frac{d\tilde{i}_q}{dt} = -\tilde{i}_q - \tilde{i}_d\tilde{\omega} + \mu\tilde{\omega}, \\ \frac{d\tilde{\omega}}{dt} = \sigma(\tilde{i}_q - \tilde{\omega}), \\ \frac{dx}{dt} = \tilde{i}_d - \alpha x. \end{cases} \quad (18)$$

Ở đây, ta chọn $\alpha = 0,5$. Vấn đề còn lại là đi tìm tham số điều khiển k sao cho hệ thống (18) xuất hiện điểm phân nhánh Hopf tại giá trị $\mu = 25$. Tại $\mu = 25$, điểm cân bằng của hệ thống (18) 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:

$$\mathbf{J}^e = \begin{bmatrix} k-1 & \pm 4,9 & \pm 4,9 & -0,5k \\ \mp 4,9 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 5,46 & -5,46 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -0,5 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

và đa thức đặc tính tương ứng:

$$\begin{aligned} P(\lambda; k) &= \det(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{J}^e) \\ &= p_0\lambda^4 + p_1\lambda^3 + p_2\lambda^2 + p_3\lambda + p_4, \end{aligned} \quad (20)$$

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

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

$$\mathbf{H}_4 = \begin{bmatrix} p_1 & p_0 & 0 & 0 \\ p_3 & p_2 & p_1 & p_0 \\ 0 & p_4 & p_3 & p_2 \\ 0 & 0 & 0 & p_4 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 7,96 - k & 1 & 0 & 0 \\ 277,425 & 34,2 - 6,46k & 7,96 - k & 1 \\ 0 & 131,094 & 277,425 & 34,2 - 6,46k \\ 0 & 0 & 0 & 131,094 \end{bmatrix}$$

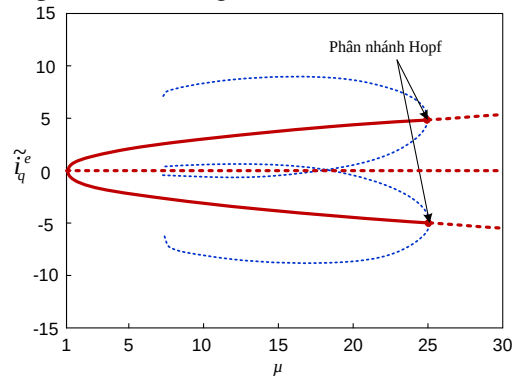
Điều kiện (15) khi đó trở thành:

$$\begin{cases} p_4 = 131,094 > 0, \\ \Delta_1 = \det(\mathbf{H}_1) = 7,96 - k > 0, \\ \Delta_2 = \det(\mathbf{H}_2) = 6,46k^2 - 85,622k - 5,193 > 0, \\ \Delta_3 = \det(\mathbf{H}_3) = 1661,1k^2 - 21667k - 9747,5 = 0. \end{cases} \quad (21)$$

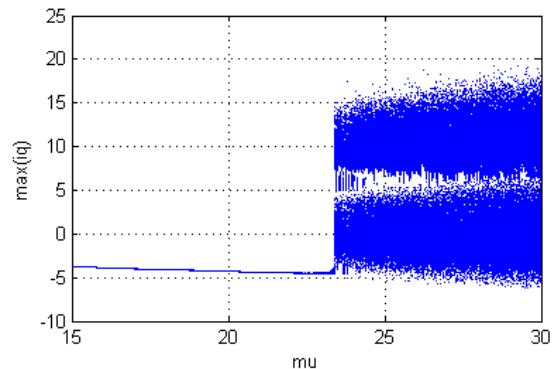
Giải hệ trên ta thu được $k = -0,4354$. Với giá trị này của k dễ dàng kiểm tra điều kiện (16) cũng được thỏa mãn.

Hình 5 là giản đồ phân nhánh của điểm cân bằng $\tilde{i}_q^e$ theo tham số μ cho hệ thống điều khiển vòng kín được mô tả như trong (18). 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.

Để minh họa tác dụng của bộ điều khiển lên đặc tính hỗn độn của động cơ, giản đồ phân nhánh của $\max(\tilde{i}_q)$ theo tham số μ được tính toán lại cho hệ thống (18). Ta thu được kết quả ở Hình 6. So sánh với kết quả khi chưa có bộ điều khiển (Hình 3) 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 $\mu = 23,5$. Kết quả này chứng minh rằng thông qua 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 μ . Ở đây miền biến thiên của tham số μ là xung quanh giá trị ngưỡng μ_h được xác định bởi biểu thức (11), bởi vì khi μ vượt qua giá trị ngưỡng μ_h thì sẽ làm xuất hiện sự phân nhánh Hopf trong đặc tính động lực học của động cơ.



Hình 5. Giản đồ phân nhánh mô tả sự biến thiên của $\tilde{i}_q^e$ theo μ khi có tín hiệu điều khiển.



Hình 6. Giản đồ phân nhánh mô tả sự biến thiên của $\max(\tilde{i}_q)$ theo μ khi có tín hiệu điều khiển.

4. Kết luận

Trong bài báo này, các tác giả đã tiến hành khảo sát đặc tính động lực học của động cơ ĐB-NCVC. Kết quả khảo sát đã chỉ ra rằng động cơ ĐB-NCVC có thể thể hiện tính chất phân nhánh và tính chất hỗn độn khi tham số của nó nằm trong một phạm vi nhất định. Sự xuất hiện của tính chất hỗn độn là không mong muốn trong quá trình làm việc của động cơ. Từ đó, các tác giả đã đề xuất phương pháp điều khiển phản hồi động cho phép dịch chuyển điểm phân nhánh 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.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hemati N. and Kwatny H., "Bifurcation of equilibria and chaos in permanent magnet machines", *Proceeding of the 32nd Conference on Decision and Control*, Texas, 1993.
- [2] 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, 2002, pp. 383-387.
- [3] Jing Z., Yu C., and Chen G., "Complex dynamics in a permanent magnet synchronous motor model", *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 22, No. 4, 2004, pp. 831-848.
- [4] Gao Y. and Chau K.T., "Design of permanent magnets to avoid chaos in PM synchronous machines", *IEEE Transaction on*
- Magnetics*, vol. 39, No. 5, 2003, pp. 2995-2997.
- [5] Choi H. H., "Adaptive control of a chaotic permagnet magnet synchronous motor", *Nonlinear Dynamics*, vol. 69, 2012, pp. 1311-1322.
- [6] Harb A. M., "Nonlinear chaos control in permagnet magnet reluctance machine", *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 19, 2004, pp. 1217-1224.
- [7] Ataei M., Kiyomarsi A., and Ghorbani B., "Control of chaos in permanent magnet synchronous motor by using optimal Lyapunov exponent placement", *Physics Letters A*, vol. 374, No. 41, 2010, pp. 4226-4230.
- [8] Khalil H.K., *Nonlinear systems*, 3rd Edition, Prentice Hall, 2001.
- [9] Ermentrout B., "Simulating, analyzing, and animating dynamical systems: a guide to XPPAUT for researchers and students", *SIAM, Philadelphia*, 2002.
- [10] Bask M. and Gencay R., "Testing chaotic dynamics via Lyapunov exponents", *Physica D*, vol. 114, No. 1-2, 1998, pp. 1-2.
- [11] Wolf A., Swift J.B., Swinney H.L., and Vastano J.A., "Determining Lyapunov exponents from a time series", *Physica D*, vol. 16, No. 3, 1985, pp. 285-317.
- [12] Nguyen L.H., Hong K.-S., "Hopf bifurcation control via a dynamic state-feedback control", *Physics Letters A*, vol. 376, 2012, pp. 442-446.
- [13] Liu W.M., "Criterion of Hopf bifurcations without using eigenvalues", *J. of Mathematical Analysis and Applications*, vol. 182, 1994, pp. 250-256.
- [14] Hassouned M.A., Lee H.C., and Abed E. H., "Washout filters in feedback control: Benefits, limitations, and extensions", *Technical Research Report, ISR*, 2004.

(BBT nhận bài: 16/09/2014, phản biện xong: 09/10/2014)