

# Nhận diện và điều khiển hỗn loạn cho động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu

## Chaos detection and control for permanent magnet synchronous motor

Cồ Như Văn<sup>1\*</sup>, Nguyễn Phùng Quang<sup>2</sup>, Nguyễn Thanh Hải<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Giao thông vận tải

<sup>2</sup>Đại học Bách khoa Hà Nội

\*Corresponding author E-mail: [vancn@utc.edu.vn](mailto:vancn@utc.edu.vn)

DOI: <https://doi.org/10.64032/mca.v29i3.317>

### Abstract

Permanent magnet synchronous motor (PMSM) can exhibit chaotic behavior when certain parameters reach critical values. This chaos can significantly impair the performance of the PMSM and potentially jeopardize the safe operation of the power system if not addressed promptly. Since system parameters can change during operation, the PMSM can enter a chaotic state at any moment. Therefore, the first step is determining whether the system is experiencing chaos, followed by implementing control measures to eliminate this chaotic behavior. This paper proposes an online observer designed to detect chaotic behavior as soon as it occurs in the PMSM. Additionally, a chaotic controller based on state feedback is developed to counteract the chaotic behavior. Through mathematical analysis and simulation results, the paper demonstrates that the observer can successfully identify chaos, triggering the chaos controller automatically when such behavior is detected. This process helps stabilize the system quickly.

**Keywords:** PMSM, EKF observer, Lyapunov exponent, chaos detection, chaos control

### Các ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$\bar{i}_d, \bar{i}_q$	A	Dòng điện trục $d, q$
$\bar{\omega}$	rad/s	Vận tốc góc rotor
$\bar{t}$	s	Thời gian
$\bar{u}_d, \bar{u}_q$	V	Điện áp theo trục $d, q$
$\bar{T}_L$	N.m	Mô men tải
$R$	$\Omega$	Điện trở cuộn dây stator
$L_d, L_q$	H	Độ tự cảm cuộn dây theo trục $d, q$
$B$	N.m/ rad/s	Hệ số giảm chấn
$J$	Kg.m	Mô men quán tính
$n_p$	2	Số đôi cực

### Tóm tắt

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) được biết đến là có biểu hiện hành vi hỗn loạn khi các tham số của nó đạt đến giá trị nhất định, điều này sẽ làm giảm hiệu suất của PMSM một cách đáng kể, có thể đe dọa đến hoạt động an toàn của hệ thống điện nếu như hành vi hỗn loạn này không sớm được triệt tiêu. Trong suốt quá trình hoạt động của PMSM, các tham số của hệ thống có thể biến đổi, khiến PMSM có thể rơi vào hiện tượng hỗn loạn ở thời điểm bất kỳ, do đó mà nhiệm vụ trước tiên là cần sớm nhận diện hệ rơi vào trạng thái hỗn loạn, từ đó điều khiển để triệt tiêu hành vi hỗn loạn đó. Nghiên cứu này đề xuất bộ quan sát online để nhận diện hành vi hỗn loạn, kịp thời phát hiện ra hiện tượng hỗn loạn khi nó xuất hiện trong PMSM. Tiếp đó, bộ điều khiển hỗn loạn được thiết kế dựa trên phân hồi trạng thái để triệt tiêu hành vi hỗn loạn. Thông qua phân tích toán học và từ các kết quả mô phỏng cho thấy hành vi hỗn loạn được nhận

diện từ bộ quan sát, khi xác định PMSM rơi vào hỗn loạn thì bộ điều khiển hỗn loạn tự động được kích hoạt. Từ đó hành vi hỗn loạn đã được triệt tiêu, giúp cho PMSM sớm ổn định trở lại.

### 1. Tổng quan

Với sự phát triển của vật liệu nam châm vĩnh cửu và công nghệ điện tử công suất, nhiều ngành công nghiệp đã áp dụng PMSM làm thành phần truyền động chính. Do tỷ lệ mô-men xoắn trên thể tích cao và hiệu suất cùng với việc bảo trì thấp [1], [2] nên PMSM đã được sử dụng phổ thông trong truyền động động cơ, điển hình trong lĩnh vực xe điện đang phát triển theo cấp số nhân thì loại động cơ này đã được ứng dụng rộng rãi và thể hiện được các ưu điểm vượt trội. Tuy nhiên, PMSM được xác định là đa biến, phi tuyến và liên kết mạnh (là điều kiện cần của hệ chuyển động hỗn loạn), đồng thời PMSM chứa nhiều tham số, thường xuyên làm việc trong môi trường khắc nghiệt, do vậy mà các tham số của hệ có thể biến đổi theo tuổi thọ, theo nhiệt độ, các tác động từ tải,... khi các tham số này đạt đến giới hạn nhất định thì PMSM sẽ rơi vào trạng thái hỗn loạn.

Hỗn loạn có lợi trong một số lĩnh vực, tuy nhiên trong hệ thống truyền động điện thì hầu như nó mang lại những kết quả không mong muốn, có thể tự duy trì trạng thái, ảnh hưởng xấu đến chất lượng của hệ thống, thậm chí làm hệ thống bị phá hủy. Đây là hiện tượng chỉ xảy ra với hệ phi tuyến, nhạy cảm với điều kiện ban đầu, không tuần hoàn nhưng tuân theo quy luật nhất định không giống với nhiễu. Các dao động hỗn loạn xuất hiện không tuần hoàn, gây ra một môi cơ học do dao động không đều, điều này làm giảm hiệu suất hoặc thậm chí phá hủy hệ thống. Hiện tượng hỗn loạn là nguồn gốc gây ra lỗi hệ thống truyền động điện, như vậy việc phát hiện hệ thống bị hỗn loạn chính là phương pháp để dự báo sớm về nguy cơ hệ thống có thể xảy ra lỗi. Nhiệm vụ phát hiện lỗi kịp thời hoặc lý tưởng là phát hiện trong giai đoạn đầu phát triển của sự cố

sẽ tránh được những thiệt hại có thể gây ra đối với hệ thống, cho phép bảo trì kịp thời thay vì theo kế hoạch, từ đó không chỉ nâng cao độ tin cậy và chất lượng hoạt động mà còn góp phần giảm chi phí vận hành và bảo trì, đồng thời tăng hiệu quả của hệ thống.

Hành vi hỗn loạn của PMSM là không mong muốn vì nó gây mất ổn định của hệ thống và thậm chí khiến hệ thống truyền động bị phá hủy [3]. Do đó, kiểm soát hỗn loạn với mục đích ngăn chặn hành vi hỗn loạn không mong muốn của PMSM là cần thiết và cấp bách, điều này đã thu hút sự chú ý ngày càng tăng nhằm cải thiện hơn nữa hiệu suất và khả năng làm việc tin cậy của hệ thống truyền động PMSM nói chung [4]-[12], ứng dụng cho xe điện nói riêng [13], [14] và đã đạt được những kết quả đáng ghi nhận. Tài liệu [9] dựa trên PMSM với bộ điều khiển PI, đã thực hiện một số kịch bản khiến PMSM hỗn loạn bằng việc đưa các tác động đầu vào. Để ngăn chặn hiện tượng hỗn loạn, tác giả trong [9] đã sử dụng phương pháp điều khiển dựa trên nhiều đầu vào tương đương (EID). Nghiên cứu [10] thiết kế bộ điều khiển thích nghi thời gian hữu hạn, [11] trình bày bộ điều khiển dựa trên thích nghi và chế độ trượt để điều khiển hỗn loạn cho PMSM, cả [10] và [11] đã ngăn chặn được hiện tượng hỗn loạn cho PMSM với sự bất định của tham số và nhiễu tác động. Tuy nhiên cả 2 phương pháp này bộ điều khiển hỗn loạn được kích hoạt ngay từ đầu, do vậy mà sẽ làm giảm chất lượng làm việc của hệ. Đồng thời, do thuật toán phức tạp nên đòi hỏi cấu hình cao từ phần cứng của bộ điều khiển. Nghiên cứu gần đây [12] đã thực hiện mô phỏng hiện tượng hỗn loạn của PMSM xảy ra khi các tham số của hệ có giá trị là  $\sigma=5.46$  và  $\gamma=20$ , từ đó các tác giả đã đề xuất một phương pháp điều khiển chế độ trượt dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov để kiểm soát và ngăn chặn hành vi hỗn loạn. Các nghiên cứu [5] và [7] cũng như nhiều nghiên cứu khác đã đánh giá hỗn loạn đối với PMSM khi tham số của nó đạt đến giá trị nhất định (cụ thể là bộ tham số  $\sigma = 5.46$  và  $\gamma = 20$ ), từ đó các nghiên cứu đã xây dựng bộ điều khiển hỗn loạn dựa trên những phương pháp khác nhau để triệt tiêu hiện tượng hỗn loạn.

Dẫu vậy, hầu như các công bố trước đây mới dừng lại ở việc thực hiện offline, các nghiên cứu đó dựa trên bộ tham số gây hỗn loạn cho PMSM, từ đó thiết kế bộ điều khiển (với bộ tham số gây hỗn loạn đã có đó) để triệt tiêu hành vi hỗn loạn. Tuy nhiên, PMSM chứa nhiều tham số, với bất kỳ sự biến đổi của nó sẽ khiến cho các tham số đại diện là  $\sigma$  và  $\gamma$  biến đổi sang những giá trị khác nhau và có thể làm cho PMSM rơi vào hỗn loạn. Việc xác định cụ thể và triệt để từng bộ tham số  $\sigma$  và  $\gamma$  khiến cho PMSM hỗn loạn một mặt sẽ rất khó khăn, phức tạp và không triệt để được nếu như thực hiện theo các phương pháp trước đây; mặt khác là ta cũng khó có thể xác định được khi nào PMSM xảy ra hỗn loạn trong suốt quá trình làm việc. Do vậy, ta không nhất thiết phải xác định chính xác hiện tượng hỗn loạn xuất phát từ sự thay đổi của tham số cụ thể nào, nhiệm vụ chính là cần nhận biết lúc nào thì hỗn loạn xuất hiện, từ đó đưa tín hiệu điều khiển (từ bộ điều khiển hỗn loạn) để dập tắt hiện tượng hỗn loạn, sớm phát hiện tiềm ẩn rủi ro đến hệ thống, ngăn chặn hỏng hóc tổng thể, nhằm nâng cao độ tin cậy và khả năng làm việc bền lâu của hệ thống.

Các nhiệm vụ trên sẽ được thực hiện trong những nội dung tiếp theo của bài báo, cụ thể: mô hình hoá PMSM dưới dạng tổng quát có xét đến thành phần hỗn loạn sẽ được phân tích và thực hiện tại nội dung 2; nội dung 3 sẽ thiết kế bộ quan sát biến trạng thái và thành phần hỗn loạn, tiếp đó là xây dựng

module phần mềm tính số mũ Lyapunov online, để có thể nhận diện hỗn loạn trong suốt quá trình hoạt động của hệ thống. Khi hệ thống được xác định là hỗn loạn thì bộ điều khiển hỗn loạn sẽ tự động được kích hoạt để sớm triệt tiêu hành vi hỗn loạn đó, nhiệm vụ thiết kế bộ điều khiển hỗn loạn này sẽ được thực hiện tại nội dung 4. Nội dung 5 sẽ triển khai mô phỏng để chứng minh hiệu quả của các thuật toán mà nghiên cứu này đã đề xuất. Và cuối cùng là các kết luận của bài báo được đưa ra tại nội dung số 6.

## 2. Mô hình hoá của PMSM có xét đến thành phần hỗn loạn

Mô hình của PMSM trên trục tọa độ dq có thể được mô tả như sau [15]-[17].

$$\begin{cases} \frac{d\bar{i}_d}{dt} = -\frac{R}{L_d}\bar{i}_d + \frac{L_q}{L_d}\bar{\omega}\bar{i}_q + \frac{1}{L_d}\bar{u}_d \\ \frac{d\bar{i}_q}{dt} = -\frac{R}{L_q}\bar{i}_q - \frac{L_d}{L_q}\bar{\omega}\bar{i}_d - \frac{\psi_r}{L_q}\bar{\omega} + \frac{1}{L_q}\bar{u}_q \\ \frac{d\bar{\omega}}{dt} = \frac{n_p}{J}(L_d - L_q)\bar{i}_d\bar{i}_q + \frac{n_p}{J}\psi_r\bar{i}_q - \frac{B}{J}\bar{\omega} - \frac{1}{J}\bar{T}_L \end{cases} \quad (1)$$

Để đỡ phức tạp trong việc nghiên cứu động lực học của PMSM, ta thực hiện phép biến đổi afin [12]  $x = \bar{x} / \tau$ , phép biến đổi theo thời gian  $t = \bar{t} / \tau$

$$\text{với: } x = \begin{bmatrix} i_d & i_q & \omega \end{bmatrix}^T, \bar{x} = \begin{bmatrix} \bar{i}_d & \bar{i}_q & \bar{\omega} \end{bmatrix}^T,$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_d & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_q & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_q}{L_d}k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & \tau \end{bmatrix};$$

trong đó  $\tau=L_d/R$ ,  $k = B / (n_p \tau \psi_r)$

Bằng cách giải quyết vấn đề điều khiển của PMSM với khe hở không khí trơn tru, người ta thấy rằng độ tự cảm của cuộn dây ở trục  $d$  và trục  $q$  bằng nhau ( $L = L_d = L_q$ ).

Từ đó ta có thể chuẩn hoá mô hình toán học (1) thành mô hình (2) sau đây:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -i_d + i_q\omega + u_d \\ \frac{di_q}{dt} = -i_q - i_d\omega - \gamma\omega + u_q \\ \frac{d\omega}{dt} = \sigma(i_q - \omega) - T_L \end{cases} \quad (2)$$

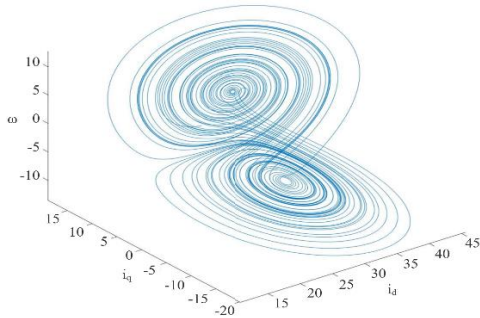
Với:  $\omega = \bar{\omega}\tau$ ,  $i_d = \bar{i}_d / k$ ,  $i_q = \bar{i}_q / k$ ,  $\gamma = \psi_r / (kL)$ ,

$$\sigma = B\tau / J, T_L = \tau^2 \bar{T}_L / J, u_d = \bar{u}_d / (kR), u_q = \bar{u}_q / (kR)$$

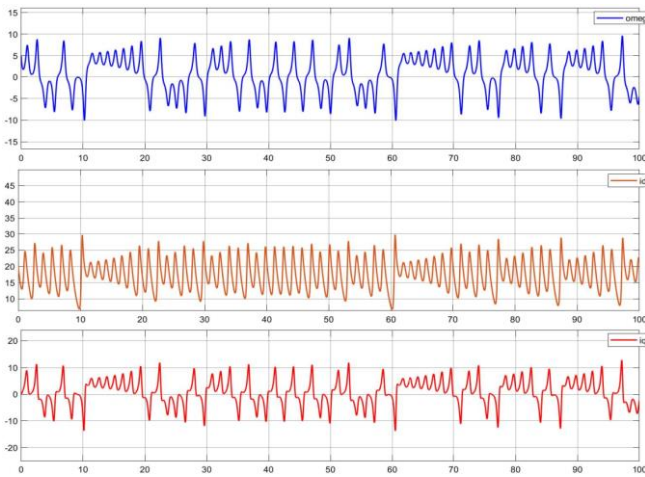
trong đó:  $i_d$  và  $i_q$  là dòng điện stator chuẩn hoá trên trục  $d$  và  $q$  tương ứng,  $\omega$  là vận tốc góc chuẩn hoá của rotor,  $u_d$  và  $u_q$  là điện áp stator chuẩn hoá trên trục  $d$  và  $q$  tương ứng,  $T_L$  Mô men tải chuẩn hoá,  $\sigma$  và  $\gamma$  là các tham số của hệ thống.

Hầu như các công bố trước đây đều thực hiện mô phỏng hành vi hỗn loạn của PMSM dựa trên bộ tham số  $\sigma = 5.46$  và

$\gamma = 20$  [6], hoặc nghiên cứu [18] chỉ ra khi  $\gamma = 17$  thì PMSM xảy ra hỗn loạn (Hình 1 và Hình 2). Từ đó các nghiên cứu đã thiết kế bộ điều khiển bằng những phương pháp khác nhau để triệt tiêu hỗn loạn và cũng đã đem lại những kết quả nhất định.



Hình 1: Chân dung pha ba chiều của hệ thống



Hình 2: Hành vi của các biến trạng thái  $\omega, i_d, i_q$  theo thời gian

Như đã phân tích ở trên, PMSM chứa nhiều tham số và trong suốt quá trình vận hành của nó thì các tham số có thể bị thay đổi. Với bất kỳ sự biến đổi của tham số nào đó (có thể 1 hoặc nhiều tham số thay đổi) thì đều có nguy cơ khiến PMSM rơi vào hành vi hỗn loạn, trong đó với  $\sigma = 5.46$  và  $\gamma = 20$  chỉ là 1 bộ tham số trong rất nhiều các bộ tham số khiến PMSM hỗn loạn, việc tìm ra triệt để được từng bộ tham số đó là không khả thi. Do vậy mà cần có phương pháp tổng quát để có thể nhận diện triệt để được hành vi hỗn loạn của PMSM.

Sự biến đổi tham số nội tại hoặc các tác động ngoại vi vào hệ thống động lực được coi là đầu vào chưa xác định đối với hệ thống [19], [20]. Trong quá trình vận hành của PMSM, với sự biến đổi của tham số nào đó sẽ khiến cho  $\gamma, \sigma$  thay đổi sang những giá trị khác. Ta định nghĩa lượng thay đổi đó tương ứng là  $z_1$  và  $z_2$ , ở trạng thái hoạt động bình thường thì  $z_1$  và  $z_2$  sẽ có cùng giá trị là 0, khi tham số nào đó của PMSM thay đổi thì  $z_1$  và  $z_2$  sẽ khác 0, nếu  $z_1$  và  $z_2$  đạt đến giá trị nhất định thì PMSM sẽ rơi vào hành vi hỗn loạn, vậy nên ta có thể coi  $z_1$  và  $z_2$  là các thành phần hỗn loạn. Khi đó mô hình hoá PMSM có xét đến thành phần hỗn loạn được mô tả như sau:

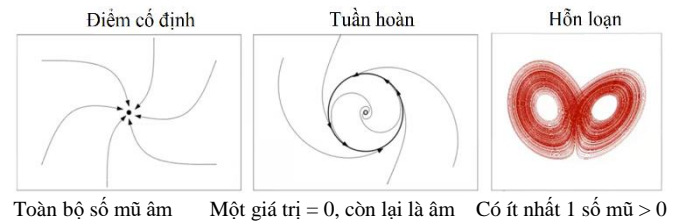
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_1 + x_2 x_3 + u_d \\ \dot{x}_2 = -x_2 - x_1 x_3 - (\gamma + z_1)x_3 + u_q \\ \dot{x}_3 = (\sigma + z_2)(x_2 - x_3) - T_L \end{cases} \quad (3)$$

Mô hình (3) sẽ được sử dụng để thực hiện nhận diện hành vi hỗn loạn và thiết kế bộ điều khiển để triệt tiêu hành vi hỗn

loạn khi nó xảy ra. Các nhiệm vụ này sẽ lần lượt được thực hiện ở các nội dung sau đây.

### 3. Nhận diện hành vi hỗn loạn

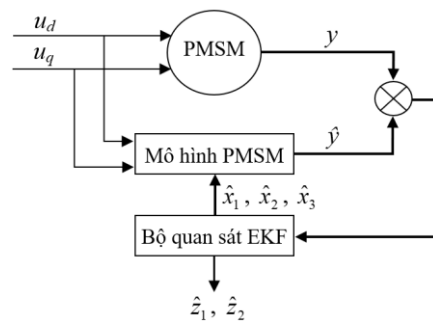
Hành vi hỗn loạn có thể được nhận diện thông qua một số phương pháp, trong đó, mỗi quan tâm chính tập trung vào số mũ Lyapunov, nó mang lại xác nhận về sự hiện diện của hỗn loạn trong dữ liệu được quan sát. Số mũ Lyapunov, đo tốc độ phân kỳ hoặc hội tụ trung bình của hai quỹ đạo gần nhau, là thước đo hữu ích về tính ổn định của một hệ động lực và là chuẩn đoán động học hữu ích nhất cho các hệ thống hỗn loạn. Trên thực tế, bất kỳ hệ thống nào chứa ít nhất một số mũ Lyapunov dương đều được xác định là hỗn loạn, với độ lớn của số mũ xác định thang thời gian cho khả năng dự đoán [21]-[25], có thể biểu diễn trực quan như Hình 3.



Hình 3: Quỹ đạo của hệ thống tương ứng với giá trị của các số mũ Lyapunov

Phương pháp Jacobian được sử dụng để tính số mũ Lyapunov, trong đó ma trận Jacobian được xác định từ mô hình PMSM. Để nhận diện hành vi hỗn loạn trong suốt quá trình PMSM hoạt động thì số mũ Lyapunov cần liên tục được tính toán (thông qua module phần mềm tính số mũ Lyapunov online). Do vậy mà ta cần xây dựng bộ quan sát để có thể ước lượng được các thành phần hỗn loạn  $z_1, z_2$ , từ đó cập nhật chúng vào module phần mềm tính số mũ Lyapunov. Dựa vào giá trị của các số mũ Lyapunov đó ta có thể xác định được hệ thống có bị hỗn loạn hoặc không.

Để có được ước tính tham số chính xác hơn cho PMSM, có thể sử dụng các phương pháp như mạng nơ-ron, thuật toán di truyền, Luenberger observer, bộ lọc Kalman mở rộng (EKF), đây là những phương án hiệu quả và hiệu suất cao để theo dõi biến thiên tham số, cũng có thể được sử dụng để ước tính tham số và trạng thái của PMSM theo thời gian thực [26]-[28]. Trong đó EKF được đánh giá là có khả năng tối ưu và có sự hội tụ tốt hơn [29]. Mô hình EKF có thể được mô tả như Hình 4 sau đây:



Hình 4: Mô hình PMSM với bộ EKF ước tính các thành phần hỗn loạn

Khi xét đến thành phần nhiễu trạng thái và nhiễu đo lường, thì (3) có thể được viết dưới dạng tổng quát như (4)

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, z, u, w) \\ y = h(x, v) \end{cases} \quad (4)$$

trong đó:  $x = (i_d, i_q, \omega)$  là vector trạng thái,  $z = (z_1, z_2)$

là các thành phần hỗn loạn,  $u = (u_d, u_q, T_L)$  là vector đầu vào hệ thống,  $f(x)$  là hàm biểu thị các phương trình động của hệ thống phi tuyến,  $w$  là nhiễu quá trình (trạng thái),  $v$  là nhiễu đo lường.

Hệ thống phi tuyến tính thời gian liên tục (4) được biểu diễn trong miền rời rạc (sử dụng phương pháp Euler ngược) theo công thức sau:

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}, z_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1}) \\ y_k = h(x_{k-1}, v_{k-1}) \end{cases} \quad (5)$$

Thuật toán EKF để ước tính biến trạng thái  $(i_d, i_q, \omega)$  và thành phần hỗn loạn  $(z_1, z_2)$  được thực hiện như sau:

### Bước 1: Dự báo

$$\hat{x}_{k|k-1} = f(\hat{x}_{k-1|k-1}, \hat{z}_{k-2|k-1}, u_{k-1|k-1}) \quad (6)$$

### Bước 2: Tính ma trận khuếch đại $L$ và $S$

$$P_{k|k-1} = J_k P_{k-1|k-1} J_k^T + Q_k \quad (7)$$

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \quad (8)$$

$$L_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1} \quad (9)$$

với  $P_{k|k-1}$  là hiệp phương sai ước lượng dự đoán ở bước thứ  $k-1$ ;  $J$  là ma trận Jacobian của hàm  $f$  theo  $x$ ,  $H$  là ma trận Jacobian của hàm đo lường  $h$ .  $Q_k$  và  $R_k$  là ma trận hiệp phương sai tương ứng của  $w$  và  $v$ .

Xác định ma trận  $J$ : rời rạc hóa (3) bằng cách áp dụng phương pháp Euler ngược, ta thu được:

$$\begin{cases} x_1(k) = x_1(k-1) + \Delta t \begin{pmatrix} -x_1(k-1) + x_2(k-1)x_3(k-1) \\ +u_d(k-1) \end{pmatrix} \\ x_2(k) = x_2(k-1) + \Delta t \begin{pmatrix} -x_2(k-1) - x_1(k-1)x_3(k-1) \\ -(\gamma + z_1(k-1))x_3(k-1) + u_q(k-1) \end{pmatrix} \\ x_3(k) = x_3(k-1) + \Delta t \begin{pmatrix} x_2(k-1) \\ x_3(k-1) \end{pmatrix} - T_L(k-1) \end{cases} \quad (10)$$

Trong đó chỉ số  $k$  và  $k-1$  lần lượt biểu thị các thời điểm  $t=k\Delta t$  và  $t=(k-1)\Delta t$ ;  $\Delta t$  là thời gian trích mẫu.

Từ đó ta thu được ma trận  $J$  như sau:

$$J_k = \begin{bmatrix} 1-\Delta t & x_3(k-1)\Delta t & x_2(k-1)\Delta t \\ -x_3(k-1)\Delta t & 1-\Delta t & -\Delta t((\gamma + z_1(k-1)) + x_1(k-1)) \\ 0 & (\sigma + z_2(k-1))\Delta t & 1 - (\sigma + z_2(k-1))\Delta t \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$H_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; Q_k = 10^{-2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; R_k = 10^{-4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

### Bước 3: Cập nhật

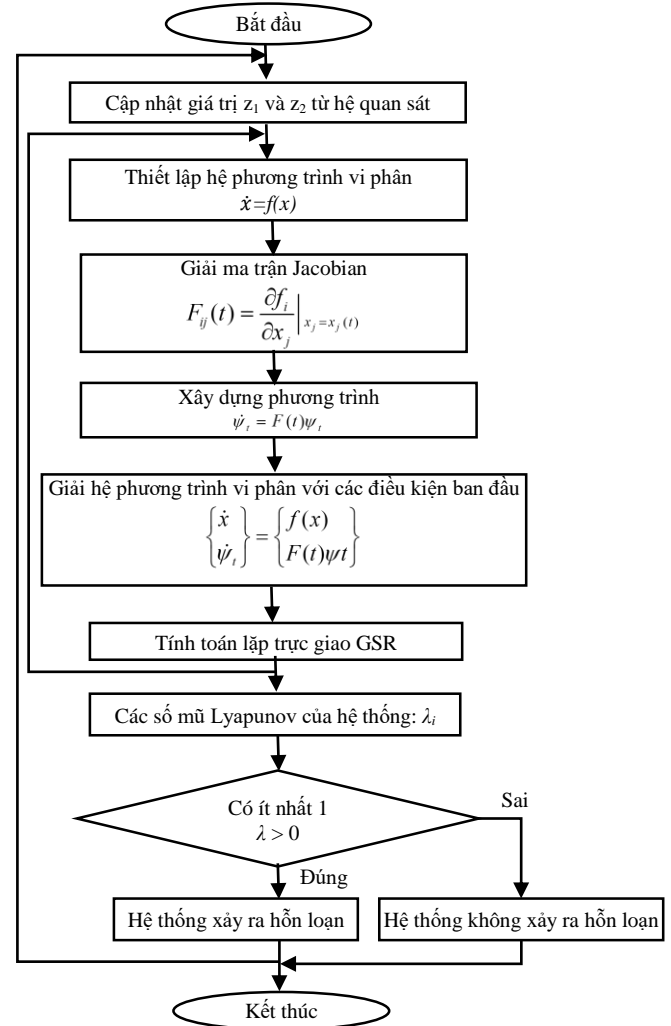
$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + L_k (y_k - h_k(\hat{x}_{k|k-1})) \quad (13)$$

$$\hat{z}_{k-1|k} = \hat{z}_{k-1|k-1} + S_k (y_k - h_k(\hat{x}_{k|k-1})) \quad (14)$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - L_k H_k P_{k|k-1} \quad (15)$$

Từ (14) ta có thể xác định được các thành phần bất định  $z_1$  và  $z_2$ , các giá trị này được cập nhật vào (3), hệ (3) này sẽ được đưa vào module phần mềm tính số mũ Lyapunov.

Vận dụng phương pháp tính số mũ Lyapunov từ [30], ta xây dựng được thuật toán tính số mũ Lyapunov online - từ việc cập nhật giá trị  $z_1$  và  $z_2$  được thực hiện như Hình 5.



Hình 5: Thuật toán tính số mũ Lyapunov

Hệ (3) bao gồm 3 biến trạng thái, kết quả tính từ phần mềm sẽ cho ra 3 giá trị số mũ Lyapunov tương ứng. Từ giá trị của các số mũ Lyapunov đó, ta có thể xác định được hành vi hỗn loạn của hệ thống có xuất hiện hay không. Nếu có ít nhất 1 số mũ Lyapunov là dương thì có thể khẳng định là hệ đã rơi vào hiện tượng hỗn loạn, từ đó kích hoạt bộ điều khiển hỗn loạn để triệt tiêu hiện tượng hỗn loạn này. Bộ điều khiển hỗn loạn sẽ được trình bày tại nội dung 4 sau đây.

## 4. Thiết kế bộ điều khiển triệt tiêu hành vi hỗn loạn

Hành vi hỗn loạn sẽ gây ra dao động không liên tục của dòng điện stato, điện áp stato, tốc độ góc, mô-men xoắn điện từ không đều và sự bất ổn của hệ thống. Do đó, hành vi hỗn loạn chắc chắn không được chấp nhận trong hầu hết các hệ truyền động điện. Điều này thúc đẩy các nhà nghiên cứu đưa ra nhiều phương pháp điều khiển hỗn loạn và đã đem lại

những hiệu quả nhất định. Phương pháp điều khiển phản hồi trạng thái được coi là một trong những phương pháp kinh điển [31], [32], được áp dụng trong việc điều khiển cho nhiều đối tượng cũng như chiến lược điều khiển khác nhau. Với việc vận dụng vào điều khiển hỗn loạn, phương pháp điều khiển phản hồi trạng thái đã được áp dụng khá rộng rãi cho đối tượng là máy điện [25], [33].

Từ hệ (3) với giá trị của các thành phần  $z_1$  và  $z_2$  đã được ước lượng từ hệ quan sát, ta có thể tìm được điểm cân bằng là  $\bar{x} = [\bar{x}_1 \quad \bar{x}_2 \quad \bar{x}_3]^T$

Khi hệ thống xảy ra hiện tượng hỗn loạn,  $z_1$  và  $z_2$  sẽ đạt đến giá trị và có đặc tính nhất định, và khi đó điểm cân bằng trên là không ổn định, với tính chất của hỗn loạn là "các quỹ đạo đi lang thang mãi mãi trong một miền giới nội, mà không đi tới một điểm cố định nào hoặc một quỹ đạo kín nào". Để đưa quỹ đạo về điểm cân bằng, ta sử dụng luật điều khiển phản hồi trạng thái sau:

$$u_1 = -k_1(x_1 - \bar{x}_1); u_2 = -k_2(x_2 - \bar{x}_2) \quad (16)$$

Ghép các điều khiển trên lần lượt vào các phương trình của đối tượng (3) ta nhận được phương trình hệ kín sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_1 + x_2 x_3 + u_d - k_1(x_1 - \bar{x}_1) \\ \dot{x}_2 = -x_2 - x_1 x_3 - (\gamma + z_1)x_3 + u_q - k_2(x_2 - \bar{x}_2) \\ \dot{x}_3 = (\sigma + z_2)(x_2 - x_3) - T_L \end{cases} \quad (17)$$

Điểm dừng của hệ thống kín (17) chính là điểm cân bằng  $\bar{x}$  của hệ (3). Tuyến tính hoá (17) quanh điểm dừng, từ đó ta tìm được ma trận Jacobian như sau:

$$A = \begin{bmatrix} -1-k_1 & \bar{x}_3 & \bar{x}_2 \\ -\bar{x}_3 & -1-k_2 & -\bar{x}_1 - \gamma - z_1 \\ 0 & \sigma + z_2 & -(\sigma + z_2) \end{bmatrix} \quad (18)$$

Phương trình đặc trưng của hệ như (19)

$$\begin{aligned} |\lambda I - A| &= \begin{vmatrix} \lambda + 1 + k_1 & -\bar{x}_3 & -\bar{x}_2 \\ \bar{x}_3 & \lambda + 1 + k_2 & \bar{x}_1 + \gamma + z_1 \\ 0 & -\sigma - z_2 & \lambda + (\sigma + z_2) \end{vmatrix} \\ &= \lambda^3 + (k_1 + k_2 + 2 + \sigma + z_2)\lambda^2 + \\ &\quad \left[ (1+k_1)(1+k_2 + \sigma + z_2) + (1+k_2)(\sigma + z_2) + \right. \\ &\quad \left. (\sigma + z_2)(\bar{x}_1 + \gamma + z_1) + \bar{x}_3^2 \right] \lambda + \\ &\quad \left\{ \begin{aligned} &(\sigma + z_2)\bar{x}_3^2 + \bar{x}_2\bar{x}_3(\sigma + z_2) + (1+k_1) \\ &\left[ (1+k_2)(\sigma + z_2) + (\sigma + z_2)(\bar{x}_1 + \gamma + z_1) \right] \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

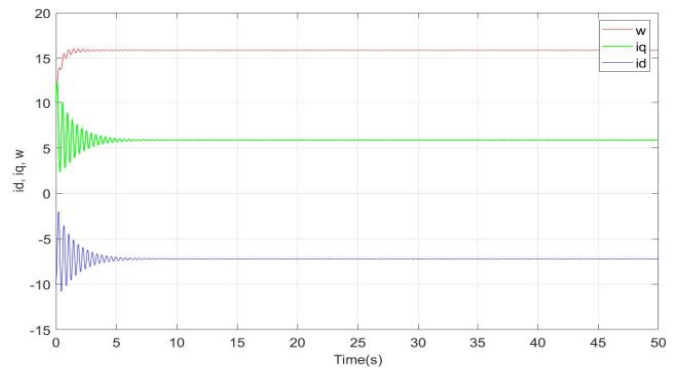
Theo tiêu chuẩn ổn định Routh-Hurwitz, để hệ thống ổn định cần thỏa mãn các điều kiện sau đây:

$$\begin{aligned} (k_1 + k_2 + 2 + \sigma + z_2) &> 0 \\ (1+k_1)(1+k_2 + \sigma + z_2) + (1+k_2)(\sigma + z_2) + (\sigma + z_2)(\bar{x}_1 + \gamma + z_1) + \bar{x}_3^2 &> 0 \\ (\sigma + z_2)\bar{x}_3^2 + \bar{x}_2\bar{x}_3(\sigma + z_2) + (1+k_1) \left[ \begin{aligned} &(1+k_2)(\sigma + z_2) + \\ &(\sigma + z_2)(\bar{x}_1 + \gamma + z_1) \end{aligned} \right] &> 0 \quad (20) \\ (k_1 + k_2 + 2 + \sigma + z_2) \left[ \begin{aligned} &(1+k_1)(1+k_2 + \sigma + z_2) + (1+k_2)(\sigma + z_2) + \\ &(\sigma + z_2)(\bar{x}_1 + \gamma + z_1) + \bar{x}_3^2 \end{aligned} \right] \\ - \left\{ \begin{aligned} &(\sigma + z_2)\bar{x}_3^2 + \bar{x}_2\bar{x}_3(\sigma + z_2) + (1+k_1) \left[ \begin{aligned} &(1+k_2)(\sigma + z_2) + \\ &(\sigma + z_2)(\bar{x}_1 + \gamma + z_1) \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\} &> 0 \end{aligned}$$

Như vậy ta có thể lựa chọn được các tham số  $k_1, k_2$  từ các điều kiện (20), khi các điều kiện ở (20) được thỏa mãn thì hành vi hỗn loạn sẽ bị triệt tiêu, hệ thống ổn định trở lại.

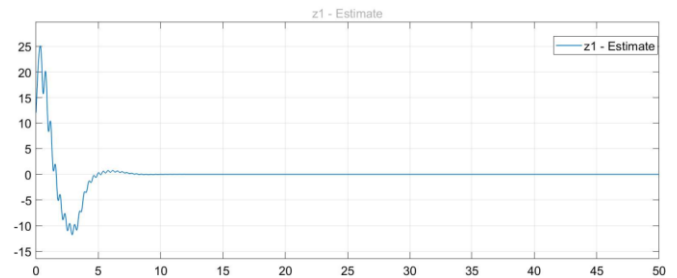
## 5. Kết quả mô phỏng

Để có thể thấy rõ được hiệu quả của khâu nhận diện và điều khiển triệt tiêu hỗn loạn, nghiên cứu này triển khai mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink. Kịch bản mô phỏng cơ bản gồm ba giai đoạn: lần đầu thực hiện mô phỏng trong trường hợp PMSM hoạt động ở trạng thái bình thường; giai đoạn hai sẽ tiến hành mô phỏng khi PMSM rơi vào hành vi hỗn loạn; cuối cùng là điều khiển để triệt tiêu hành vi hỗn loạn.

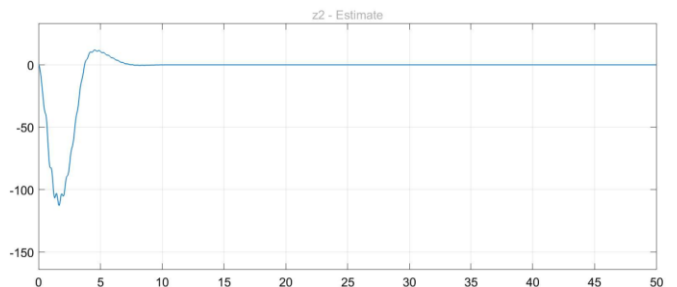


Hình 6: Vận tốc góc  $\omega$ , dòng điện  $i_d$  và dòng điện  $i_q$  theo thời gian

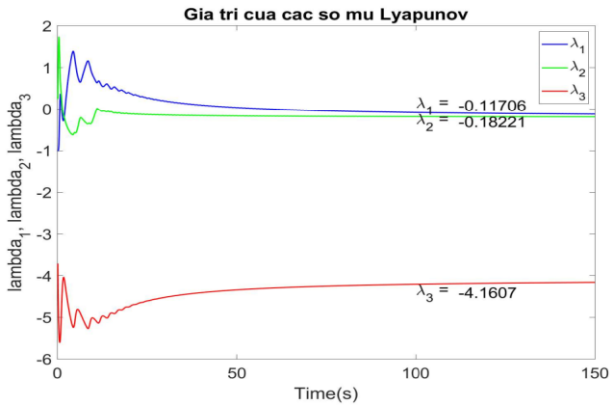
Ở trạng thái bình thường của PMSM, các biến trạng thái  $\omega, i_d, i_q$  (Hình 6) thể hiện ổn định ngay sau khi khởi động khoảng 6 giây. Hình 7 và Hình 8 là giá trị  $z_1$  và  $z_2$  được ước tính từ bộ quan sát EKF, các thành phần hỗn loạn cũng sớm tiến tới giá trị 0, điều này thể hiện đúng là khi chưa có sự biến đổi của tham số nào đó thì sẽ không tồn tại hai thành phần này. Kết quả tính các số mũ Lyapunov từ Hình 9 cho thấy cả 3 số mũ đều mang dấu âm, như vậy hệ không xảy ra hỗn loạn mà đang hoạt động ổn định.



Hình 7: Giá trị của  $z_1$  (a) được ước tính khi PMSM ở trạng thái bình thường



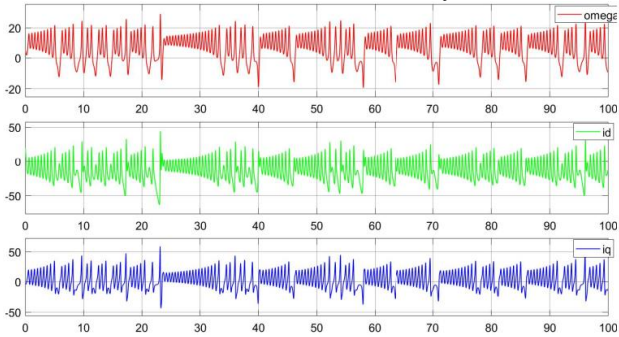
Hình 8: Giá trị của  $z_2$  (b) được ước tính khi PMSM ở trạng thái bình thường



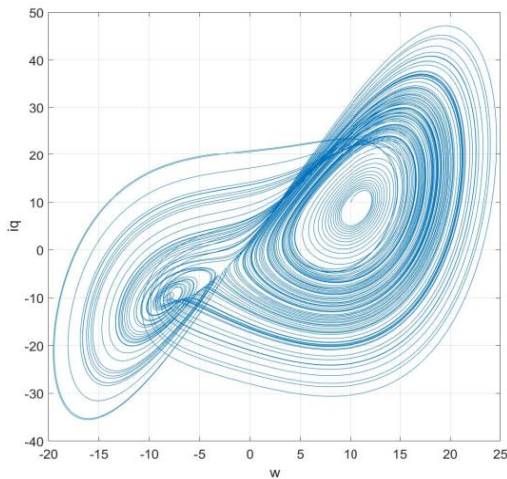
**Hình 9:** Đồ thị biểu diễn giá trị của các số mũ Lyapunov được tính khi PMSM ở trạng thái bình thường

Bước tiếp theo, nghiên cứu này thực hiện biến đổi tham số của PMSM để hành vi hỗn loạn của hệ xuất hiện. Từ kết quả mô phỏng ở Hình 10 cho thấy các biến trạng thái  $\omega$ ,  $i_d$  và  $i_q$  dao động dữ dội, quỹ đạo không lặp lại trạng thái quá khứ, đồng thời từ mặt phẳng pha (Hình 11, Hình 12) và không gian pha (Hình 13) cho thấy quỹ đạo của hệ bị hút vào tập hút, quỹ đạo đi lang thang trong không gian giới nội, điều đó cho thấy hệ có dấu hiệu của hiện tượng hỗn loạn.

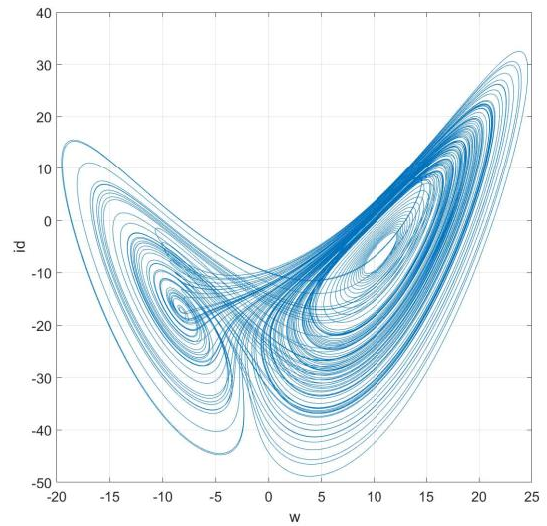
Sự biến đổi của tham số cũng đã khiến cho các thành phần hỗn loạn  $z_1$  và  $z_2$  đạt đến giá trị và có đặc tính nhất định (Hình 14 và Hình 15). Các giá trị  $z_1$  và  $z_2$  được ước lượng này (từ bộ quan sát EKF), sẽ được cập nhật vào module phần mềm tính số mũ Lyapunov. Kết quả tính số mũ Lyapunov ở Hình 16 cho thấy luôn có một số mũ Lyapunov mang giá trị là dương, điều này có thể khẳng định rằng PMSM đã xảy ra hỗn loạn và cần điều khiển để triệt tiêu hành vi hỗn loạn này.



**Hình 10:** Hành vi của các biến trạng thái  $\omega$ ,  $i_d$ ,  $i_q$  theo thời gian

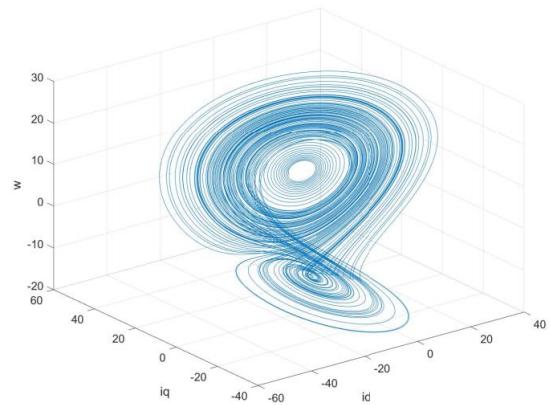


**Hình 11:** Mặt phẳng pha của  $\omega$  và  $i_q$

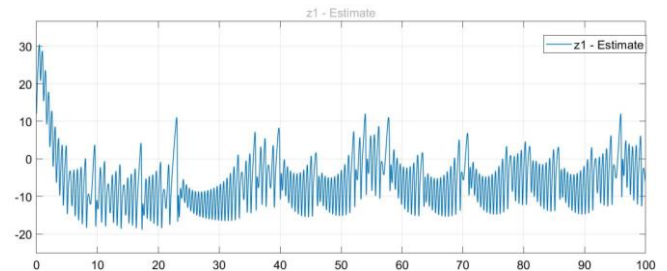


(b)

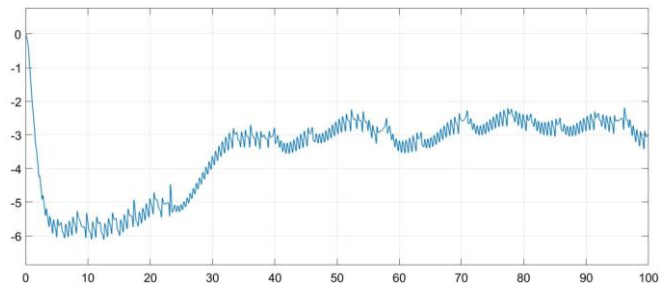
**Hình 12:** Mặt phẳng pha của  $\omega$  và  $i_d$



**Hình 13:** Không gian pha của  $\omega$ ,  $i_d$ ,  $i_q$

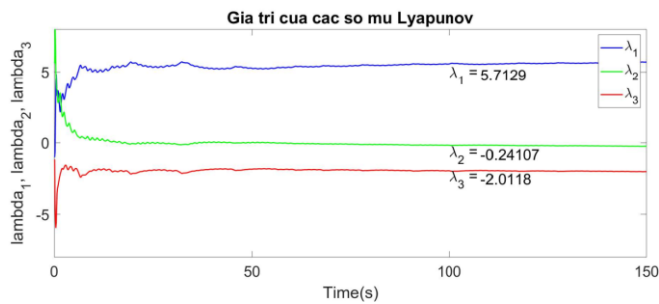


**Hình 14:** Giá trị của  $z_1$  được ước tính khi PMSM ở trạng thái hỗn loạn

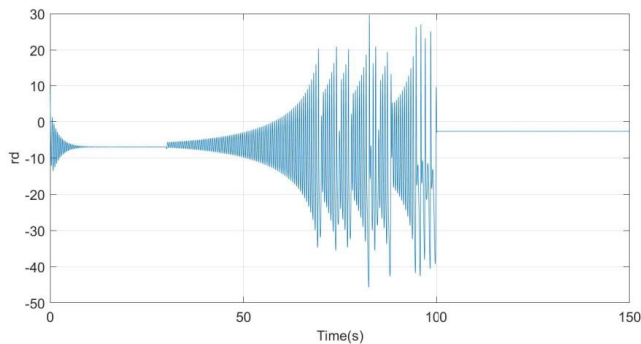


**Hình 15:** Giá trị của  $z_2$  được ước tính khi PMSM ở trạng thái hỗn loạn

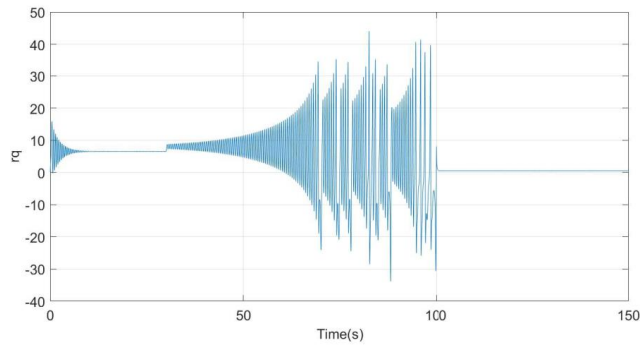
Khi PMSM được nhận diện là đã rơi vào hỗn loạn (vì có ít nhất 1 số mũ Lyapunov mang giá trị dương) thì bộ điều khiển phản hồi trạng thái (được xây dựng tại nội dung 4) sẽ tự động được kích hoạt để triệt tiêu hiện tượng hỗn loạn này.



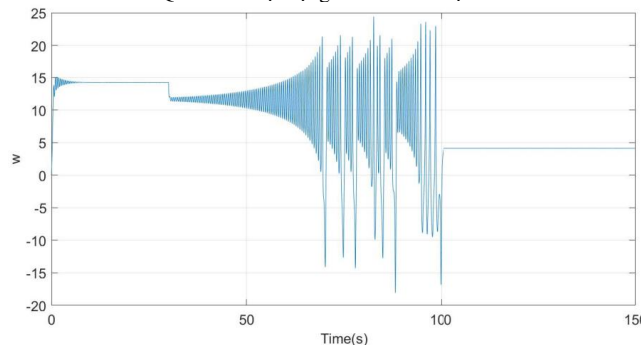
**Hình 16:** Giá trị của các số mũ Lyapunov khi PMSM ở trạng thái hỗn loạn



**Hình 17:** Quá trình hoạt động ổn định của PMSM



**Hình 18:** Quá trình hoạt động rơi vào hỗn loạn của PMSM



**Hình 19:** Quá trình hoạt động ổn định trở lại của PMSM

Để có thể thấy rõ được hiệu quả của việc điều khiển hỗn loạn, kịch bản mô phỏng được thực hiện là: khi PMSM đang làm việc bình thường (ổn định), tại giây thứ 30 xuất hiện hành vi hỗn loạn, bộ điều khiển hỗn loạn được kích hoạt tại thời điểm 100s. Từ kết quả mô phỏng tại Hình 17, Hình 18 và Hình 19 cho thấy, ngay sau khi bộ điều khiển hỗn loạn được kích hoạt thì hành vi hỗn loạn đã nhanh chóng bị triệt tiêu, đưa hệ ổn định trở lại. Thời điểm kích hoạt bộ điều khiển hỗn loạn có thể được thực hiện ngay sau khi nhận diện được hệ có hành vi hỗn loạn, để có thể dễ quan sát được hành vi hỗn loạn và hoạt động ổn định của PMSM, ở mô phỏng này, bộ điều khiển hỗn loạn được kích hoạt sau 70s kể từ khi hỗn loạn xuất hiện.

## 6. Kết luận

Nghiên cứu này đã đề xuất phương pháp nhận diện hành vi hỗn loạn cho PMSM dựa trên bộ quan sát EKF kết hợp với module phần mềm tính số mũ Lyapunov (là phương pháp nhận diện động chứ không phải là nhận diện tĩnh mà hầu như các công bố trước đây thường làm), từ đó có thể kịp thời nhận diện được hành vi hỗn loạn trong suốt quá trình hệ thống hoạt động. Tiếp đó, nghiên cứu đã xây dựng bộ điều khiển hỗn loạn dựa trên phương pháp phản hồi trạng thái, đây là phương pháp ít phức tạp và có hiệu quả cao đối với nhiệm vụ triệt tiêu hành vi hỗn loạn. Thông qua kết quả mô phỏng cho thấy, bộ quan sát đã kịp thời nhận diện được hành vi hỗn loạn của PMSM. Từ đó bộ điều khiển hỗn loạn đã được kích hoạt, hành vi hỗn loạn đã sớm được triệt tiêu ngay sau đó, đưa PMSM trở lại trạng thái hoạt động ổn định, điều này sẽ giúp nâng cao chất lượng và độ tin cậy trong suốt quá trình hoạt động của hệ thống.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Qiu H, Tang B, Wang R, Zhang G, Yang C, Cui G (2016) *Optimization and calculation of equivalent thermal network method in the temperature field research of permanent magnet servo motor*. Recent Adv Electr Electron Eng, vol. 9, no. 3, pp. 241–248
- [2] Yuanzi D, Soon LK, Xiuli G (2001) *Digital control of a permanent magnet synchronous motor drive without mechanical sensors*. Electr Power Compon Systems, vol. 29, no. 1, pp. 459–477
- [3] Wang L, Fan J, Wang Z, Zhan B, Li J (2016) *Dynamic analysis and control of a permanent magnet synchronous motor with external perturbation*. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, vol. 138, no. 1, pp. 011003–011009, doi: 10.1115/1.4031726
- [4] Mohammad Tahmasbi (2023) *Chaos control in networked permanent magnet synchronous motor using Lyapunov-based model predictive subject to data loss*. Engineering Reports, vol. 6, no. 5, doi: 10.1002/eng2.12765
- [5] Luo S, Wang J, Zhen S, Qian Q (2014) *Output feedback adaptive dynamic surface control of permanent magnet synchronous motor with uncertain time delays via RBFNN*. Discrete Dynamics in Nature and Society, pp. 1–12, doi: 10.1155/2014/315634
- [6] Ton Duc Do, Y Nhu Do, Pham Duc Dai (2017) *A robust suboptimal control system design of chaotic PMSMs*, vol. 100, pp. 1455–1466 doi: 10.1007/s00202-017-0603-6
- [7] Chen X, Hu J, Peng Z, Yuan C (2017) *Bifurcation and chaos analysis of torsional vibration in a PMSM-based driven system considering electromechanically coupled effect*. Nonlinear Dyn, vol. 88, no.1, pp. 277–292, doi: 10.1007/s11071-017-3419-z
- [8] Wu Y, Li G (2018) *Adaptive disturbance compensation finite control set optimal control for PMSM systems based on sliding mode extended state observer*. Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 98, no. 1, pp. 402–414, doi: 10.1016/j.ymsp.2017.05.007
- [9] Xiang Yin et al (2020) *Chaos Suppression in Speed Control for Permanent-Magnet-Synchronous-Motor Drive System*. Journal of the Franklin Institute, vol. 357, no. 18, pp. 13283-13303, doi: 10.1016/j.jfranklin.2020.05.007
- [10] Qijia Yao, et al (2023) *Fixed-Time Adaptive Chaotic Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Subject to Unknown Parameters and Perturbations*. Mathematics vol. 11, no. 14, doi: 10.3390/math11143182
- [11] Abolfazl Karimi, Hamidreza Akbari, Somaye Mousavi, and Zohre Beheshtipour (2023) *Design of an adaptive terminal sliding mode to control the PMSM chaos phenomenon*. Systems science & Control engineering: an open access journal, vol.11, no. 01, doi: 10.1080/21642583.2023.2207593
- [12] Mohammad Yousefzadeh, Hussein Eliasi, and Morteza Jalilirad (2023) *Dynamic Modeling and Chaos Suppression of the Permanent*

- Magnet Synchronous Motor Drive with Sliding Mode Control*. Journal of Electronics and Electrical Engineering, vol. 2, no. 2, pp: 177-189, doi: <https://doi.org/10.37256/jeee.2220233484>
- [13] Shun-Chang Chang, Bao-Chau Lin, and Yeou-Feng Lue (2011) *Dither signal effects on quenching chaos of a permanent magnet synchronous motor in electric vehicles*. Journal of Vibration and Control, vol. 17, no. 12, doi: 10.1177/1077546310395
- [14] Kolsi Hela et al (2024) *Optimal Design of a PMSM for Electric Vehicle Using Chaotic Particle Swarm Optimization*. IEEE Access, vol. 12, pp. 170273-170294, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3497580
- [15] Zhong L, Jin Bae P, Young Hoon J, Bo Z, Guanrong C (2002) *Bifurcation and chaos in a permanent-magnet synchronous motor*. IEEE Trans Circuits Syst I Fundam Theory Appl. IEEE Transactions on Circuits and Systems I Fundamental Theory and Applications, vol. 49, no. 3, doi: 383–387. doi:10.1109/81.989176
- [16] Iqbal A. and Singh G. K. (2019) *Chaos control of permanent magnet synchronous motor using simple controllers*. Transactions of the Institute of Measurement and Control, vol. 41, no. 8, pp. 2352-2364
- [17] Luo S., and Gao R. (2018) *Chaos control of the permanent magnet synchronous motor with time-varying delay by using adaptive sliding mode control based on DSC*. J. of the Franklin Ins, vol. 355, no. 10, pp. 4147-4163, doi: 10.1016/j.jfranklin.2018.04.031
- [18] Yaolin Huang (2015) *Controlling Chaos in Permanent Magnet Synchronous Motor*. Chemical Engineering Transactions, vol. 46, pp. 1183-1188, doi: 10.3303/CET1546198
- [19] Silvio Simani, Cesare Fantuzzi and Ron J.Patton (2002) *Model – base fault diagnosis in dynamic systems using identification techniques*. Springer Science & Business Media.
- [20] Steven X. Ding (2013) *Model-based Fault Diagnosis Techniques Design Schemes, Algorithms, and Tools*. Advances in Industrial Control, Springer.
- [21] C. E. Meador (2011) *Numerical Calculation of Lyapunov Exponents for Three-Dimensional Systems of Ordinary Differential Equations*. Marshall University
- [22] X. Zeng, R. Eykholt, and R. A. Pielke (1991) *Estimating the Lyapunov-Exponent Spectrum from Short Time Series of Low Precision*. American Physical Society, doi: 10.1103/PhysRevLett.66.3229
- [23] Nakita K. Andrews (2021) *Numerical Approximation of Lyapunov Exponents and its Applications in Control Systems*. Electronic Theses and Dissertations, Georgia Southern University
- [24] Van CN, Hai NT, Quang NP (2023) *Chaos phenomenon in wind power generation system using doubly-fed induction generator*. Measurement, Control, and Automation, vol. 2, no. 1, pp: 2-10
- [25] Van CN, Quang NP, Hai NT (2023) *Evaluation of the possibility of chaos for doubly-fed induction generator in wind power generation system*. International Journal of Power Electronics and Drive Systems vol. 14, no. 4, pp: 1965-1975, doi: 10.11591/ijpeds.v14.i4.pp1965-1975
- [26] J.W. Jiang, Z. Chen, Y.H. Wang, T. Peng, S.L. Zhu, L.M. Shi (2019) *Parameter Estimation for PMSM based on a Back Propagation Neural Network Optimized by Chaotic Artificial Fish Swarm Algorithm*. International Journal of Computers Communications & Control, vol. 14, no. 6, pp. 615-632, doi: 10.15837/ijccc.2019.6.3705
- [27] Zwartbol, Arnout; Dong, Jianning; Bauer, Pavol; Polinder, Henk. (2019) *Online parameter estimation of PMSM in EV powertrain Including thermal measurements*. IEEE Transportation Electrification Conference and Expo. Doi. 10.1109/ITEC.2019.8790461
- [28] Liu, K.; Zhu, Z.Q.; Stone, D.A.(2013) *Parameter Estimation for Condition Monitoring of PMSM Stator Winding and Rotor Permanent Magnets*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 12, pp. 5902-5913, doi: 10.1109/TIE.2013.2238874
- [29] Rachid Kerid, Hicham Bourouina, Reda Yahiaoui (2018) *Parameter identification of PMSM using EKF with temperature variation tracking in automotive application*. Periodicals of Engineering and Natural Sciences, vol. 6, no. 2, pp.109 – 119, doi: 10.21533/pen.v6i2.168
- [30] Fanyu Meng, Shuming Shi, Boshi Zhang, Minghui Bai & Nan Lin (2022) *Analysis for global characteristics of Lyapunov exponents in vehicle plane motion system*, Scientific Reports vol. 12, no. 1, doi: 10.1038/s41598-022-13411-x.
- [31] Quang NP, Dittrich JA (2015) *Vector Control of Three-Phase AC Machines – System Development in the Practice*, 2nd Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [32] Lê Hùng Lân, Nguyễn Văn Tiêm (2013) *Hệ thống điều khiển nhiều chiều và phi tuyến*, Nhà xuất bản Giao thông vận tải
- [33] Ren H, Liu D (2006) *Nonlinear feedback control of chaos in permanent magnet synchronous motor*. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 53, no. 1, pp. 45-50, doi: 10.1109/TCSII.2005.854592