

ĐẶC ĐIỂM HỖN LOẠN CỦA CÁC HỆ TRUYỀN ĐỘNG ĐIỆN QUA VÍ DỤ TRUYỀN ĐỘNG KHÔNG ĐỒNG BỘ XOAY CHIỀU BA PHA

CHAOTIC CHARACTERISTICS OF ELECTRIC DRIVE SYSTEMS EVALUATED BY ASYNCHRONOUS THREE PHASE AC MOTORS

Đỗ Hoàng Ngân Mi¹, Lê Tiến Dũng², Nguyễn Phùng Quang³

¹Trường Đại học Đông Á; midhn@donga.edu.vn

²Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng; ltdung@dut.udn.vn

³Trường Đại học Bách khoa Hà Nội; quang.nguyenphung@hust.edu.vn

Tóm tắt - Bài báo trình bày tổng quan về hỗn loạn - trạng thái tồn tại trong các hệ phi tuyến, thường được gọi bằng thuật ngữ 'chaos'. Hệ thống chaos vẫn tuân theo các định luật, nhưng khó đoán trước do tính nhạy cảm với các điều kiện ban đầu. Nghiên cứu dẫn dắt tìm hiểu về hành vi hỗn loạn đã được các nhà khoa học khám phá trong các hệ truyền động điện. Từ đó đưa ra một ví dụ cụ thể về đối tượng động cơ không đồng bộ rotor lồng sóc để tiến hành phân tích và mô phỏng, phát hiện ra hiện tượng hỗn loạn trong đối tượng thông qua đáp ứng thời gian, biểu đồ pha và số mũ Lyapunov. Từ đó rút ra nhận định tham số đối tượng IM thay đổi (có thể là điện trở; điện cảm; điện cảm tản hai phía rotor, stator; hồ cảm; ...) làm ảnh hưởng đến chất lượng điều khiển và có thể khiến hệ thống rơi vào vùng làm việc hỗn loạn.

Từ khóa - động cơ không đồng bộ; lý thuyết hỗn loạn; phân nhánh; mũ Lyapunov; tập hút; biểu đồ pha; ma trận Jacobian.

1. Giới thiệu về hỗn loạn

Như đã biết, nếu nghiệm của hệ động lực bị giam hãm trong một miền giới hạn trong không gian trạng thái sẽ là một trong hai trạng thái: một là trạng thái ổn định do mất năng lượng hay tiêu tán bởi ma sát, hai là trạng thái dao động tuần hoàn. Tuy nhiên, trong thực tế còn tồn tại trạng thái phức tạp, không phải hai dạng trên. Đó là vào năm 1873 [1], James Clerk Maxwell khi nghiên cứu về chuyển động của các phân tử khí đã cho rằng những thay đổi rất nhỏ trong vị trí ban đầu của các hạt (phân tử, nguyên tử, electron...) sẽ dẫn đến những thay đổi rất lớn trong quỹ đạo chuyển động của hạt. Đến năm 1890, Henri Poincaré nghiên cứu bài toán ba vật thể đã nhận ra hành vi nhạy cảm với điều kiện ban đầu. Năm 1972, nhà khí tượng học Edward Norton Lorenz đã giới thiệu trước Hiệp hội Phát triển Khoa học Hoa Kỳ hiện tượng nhạy cảm với điều kiện ban đầu với cái tên "hiệu ứng cánh bướm". Cho đến năm 1975, Tien Yien Li và James A. Yorke đã đưa ra thuật ngữ Chaos (hỗn loạn) trong bài báo "Trạng thái thứ ba". Và phải đến những thập niên cuối thế kỷ 20, lý thuyết hỗn loạn mới bắt đầu được đưa vào tìm hiểu trong các hệ thống truyền động.

Trong bài báo này, các tác giả tổng hợp và trình bày ngắn gọn, dễ hiểu từ những khái niệm cơ bản nhất về hỗn loạn, đến các tính chất của hiện tượng hỗn loạn trong hệ thống truyền động điện - một lĩnh vực nghiên cứu còn mới mẻ với các nhà nghiên cứu trong nước. Bên cạnh đó, dựa trên việc tổng hợp các nghiên cứu trên thế giới trong gần ba thập kỷ gần đây về hiện tượng hỗn loạn, bài báo phân tích các phương pháp điều khiển hỗn loạn trong các hệ truyền động điện, làm rõ một phần đặc điểm hỗn loạn của đối tượng IM. Sau đó, qua ví dụ minh

Abstract - The study introduces an overview of chaos in nonlinear systems. Chaos is governed by deterministic laws but is so unpredictable because its sensitivity depends on initial conditions. Chaotic behaviors in electric drive systems have been explored by scientists. The investigation into chaos in electric drive systems can be categorized as three themes, namely the analysis of chaotic phenomena, the control of chaotic behaviors, and the application of chaotic characteristics. Then the analysis and simulation of a squirrel cage induction motor detects chaos through time plot, phase diagram and Lyapunov exponents. Therefore, the sensitivity to parameter variations of induction motors (resistance; inductance; stator and rotor leakage reactance; mutual inductance) affects the quality of controller and can be the cause of the chaotic system.

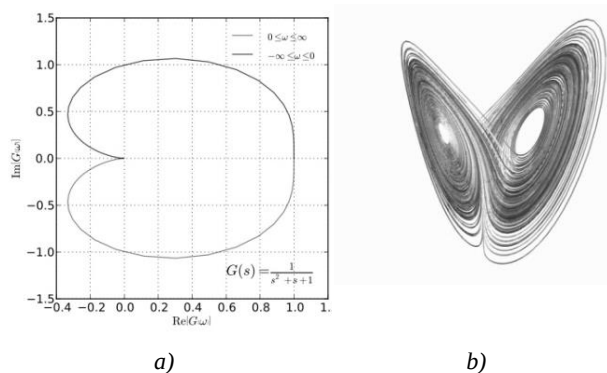
Key words - IM; Chaos theory; bifurcation; Lyapunov exponents; strange attractors; phase trajectory; Jacobian matrix.

họa cụ thể, bài báo sẽ trình bày mô phỏng dựa trên ý tưởng của bài báo [18] nhưng có bổ sung đáp ứng thời gian và số mũ Lyapunov để làm rõ vùng làm hỗn loạn của tham số T_L và điều chỉnh tham số thích hợp để hệ thống trở về trạng thái ổn định.

2. Tổng quan về hỗn loạn trong các hệ truyền động điện

Theo từ điển Oxford do John Simpson và Michael Proffitt biên tập, hỗn loạn là "hành vi của hệ thống tuân theo các định luật xác định nhưng khó đoán trước như nhiều, đặc biệt nhạy cảm với sự thay đổi nhỏ của các tham số hoặc phụ thuộc vào các biến độc lập". Như vậy, hỗn loạn có tính chất [2]:

- Chỉ xảy ra trong các hệ thống phi tuyến.
- Nhạy cảm với điều kiện ban đầu.
- Không tuần hoàn nhưng tuân theo quy luật xác định và có tập hút lạ như Hình 1b.



Hình 1. Biểu đồ pha của a) Hệ điều hòa; b) Hệ hỗn loạn Lorenz với các giá trị $r = 28$, $\sigma = 10$, $b = \frac{8}{3}$ [2]

Nhìn chung, hỗn loạn có vẻ giống nhiều vì không có trật tự và trông giống ngẫu nhiên nhưng lại là một hiện tượng hoàn toàn xác định, điều này được chứng minh qua hằng số Feigenbaum - tỉ lệ giữa các điểm phân nhánh và khả năng xác định đầu ra chính xác nếu biết được các điều kiện ban đầu. Chính vì vậy, nhận định ra trạng thái hỗn loạn tránh nhầm lẫn với nhiều thực sự quan trọng, giúp cho việc điều khiển đối tượng có thể tốt hơn trong thời gian làm việc dài hạn.

Dựa trên các nghiên cứu trước đây, trong gần ba thập kỷ về hỗn loạn trong hệ truyền động, bài báo tổng hợp ba nhóm các phương pháp điều khiển khác nhau cho các đối tượng cụ thể đã được đề xuất để ổn định hành vi hỗn loạn:

2.1. Nhóm phương pháp điều khiển thời gian liên tục:

- Phương pháp không phản hồi: thay đổi hành vi của hệ thống phi tuyến bằng phương pháp áp đặt đầu vào hoặc kích thích bên ngoài, ổn định trạng thái cân bằng hoặc quỹ đạo mong muốn: rung lắc cơ khí (Blekhman, 2000) [3], ...

- Phương pháp Ott-Grebogi-Yorke (OGY) [4]: sử dụng mô hình hệ thống rời rạc dựa trên sự tuyến tính của sơ đồ Poincaré $S = \{x: s(x)=0\}$ để thiết kế bộ điều khiển. Phương pháp áp dụng cho các trường hợp thực nghiệm các đối tượng không có sẵn hệ động lực học, đánh giá thời gian tác động lên đối tượng đang làm việc và ảnh hưởng tiếng ồn trong khoảng trễ T hình thành tọa độ vector $X(t) = [z(t), z(t-T), z(t-2T), \dots, z(t-kT)]$; ...

- Phương pháp điều khiển tuyến tính và phi tuyến: sử dụng bộ lọc washout cho PMSM [5]; phương pháp OPCL của Jackson và Grosu [6] kiểm soát hỗn loạn đối tượng có dạng: $\dot{x}(t) = f(x(t)) + B(u)$ với $\dim x = \dim u$ kết hợp với “phản hồi Hubler”: $u(t) = B^{-1}[\dot{x}_*(t) - f(x_*(t)) - K(x - x_*(t))]$; ...

- Phương pháp không phản hồi: Rajasekar, Murali và Lakshmanan [7] ngăn chặn chuyển động hỗn loạn một cách đơn giản bằng cách chuyển đổi hệ thống động lực vào một quỹ đạo định kỳ; ...

- Phương pháp trì hoãn phản hồi: Cho đối tượng PMSM [8]; ...

2.2. Nhóm phương pháp thời gian gián đoạn: với tình thần thích mẫu và phản hồi, phân tích tính ổn định trong trường hợp hệ thống hỗn loạn: áp dụng cho đối tượng PMSM [9], ...

2.3. Nhóm các phương pháp khác

- Phương pháp nơ ron thích nghi: cho PMSM [10]; ...
- Phương pháp mờ trượt: cho máy phát đồng bộ [11]; ...
- Phương pháp điều khiển mờ thích nghi: cho PMSM [12]; ...

- Phương pháp thích nghi: cho đối tượng PMSM [13]; ...

Một trong những phương pháp trên đã ổn định hành vi hỗn loạn trong hệ truyền động AC và DC cho những đối tượng khác nhau. Riêng hệ truyền động AC, đối tượng hệ truyền động PMSM, được nghiên cứu sâu các phương pháp trượt thích nghi, phương pháp điều khiển phi tuyến cuộn chiều, phương pháp điều khiển phản hồi phi tuyến, phương pháp gán số mũ Lyapunov, ... để ổn định hiện tượng hỗn loạn. Trong khi đó các nghiên cứu về hỗn loạn trong hệ

truyền động sử dụng động cơ IM còn bỏ trống nhiều vấn đề chưa được giải quyết triệt để.

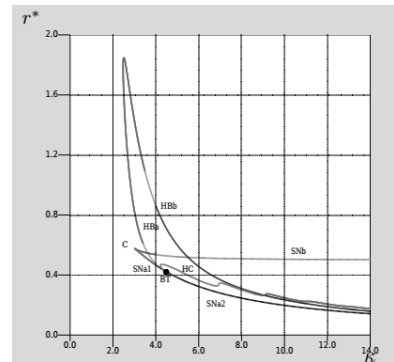
Để làm rõ một vài đặc điểm hỗn loạn đối tượng nghiên cứu của bài báo, trước tiên cần phân tích qua các nghiên cứu đi trước:

- Nghiên cứu của Romeu Reginatto, Francisco Salas, Francisco Gordillo và Javier Aracil [14] chỉ ra phân nhánh trong điều khiển FOC đối tượng IM qua hệ phương trình:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -c_1 x_1 - \frac{kc_1}{u_2^0} x_2 x_4 + c_2 x_4 \\ \dot{x}_2 = \frac{kc_1}{u_2^0} x_1 x_4 - c_1 x_2 + c_2 u_2^0 \\ \dot{x}_3 = -c_4 \left[c_5 (x_2 x_4 - x_1 u_2^0) - T_L - \frac{c_3}{c_4} \omega_{ref} \right] - c_3 x_3 \\ \dot{x}_4 = -k_p c_4 \left[c_5 (x_2 x_4 - x_1 u_2^0) - T_L - \frac{c_3}{c_4} \omega_{ref} \right] + (k_i - k_p c_3) x_3 \end{cases} \quad (1)$$

Điểm cân bằng được xác định bởi phương trình:

$$kr^3 - r^* k^2 r^2 + kr - r^* = 0 \quad (2)$$



Hình 2. Phân nhánh trong mặt phẳng (k, r^*) [14]

Phân vùng phân nhánh gây ra bởi hằng số thời gian rotor (Hình 2), nhìn nhận ảnh hưởng của sự thay đổi tham số này lên hệ truyền động. Trong đó: BT: phân nhánh Bogdanov-Takens, HB: phân nhánh Hopf, SN: phân nhánh yên ngựa, C: phân nhánh cusp, HC: kết nối Homocilic. Có thể nói đối tượng IM có tất cả các dạng phân nhánh cơ bản.

- Nghiên cứu của Francisco Gordillo và các đồng nghiệp [15] với hệ động lực:

$$\dot{x} = f(x, \mu) \quad (3)$$

Với $x \in \mathbb{R}^n$ và $\mu \in \mathbb{R}$ có điểm cân bằng tại x^0 , với $\mu = \mu_0$ thì $f(x^0, \mu^0) = 0$.

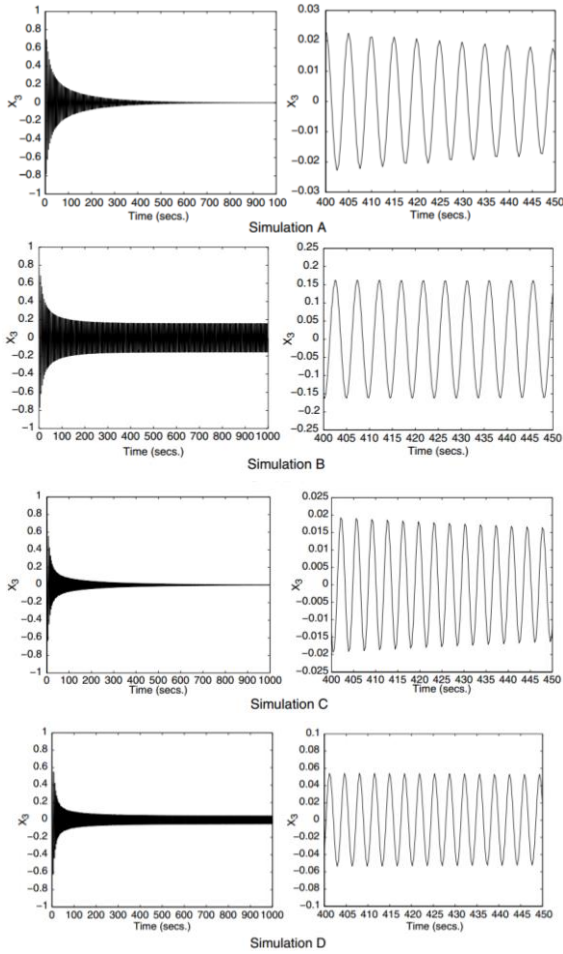
Gọi $A(\mu) = D_x f(x^0(\mu), \mu)$ là ma trận Jacobian của hệ thống tại điểm cân bằng có nghiệm $\lambda(\mu^0) = \pm j\omega$ tại điểm (x^0, μ^0) xuất hiện đường tròn giới hạn. Trong trường hợp không tải, $T_L = 0$ hệ chỉ có một điểm cân bằng $x^0 = (x_1^0, x_2^0, x_3^0, x_4^0) = (\frac{c_2}{c_1} u_2^0, 0, 0, 0)$.

Trường hợp có tải $T_L \neq 0$ hệ sẽ có 3 điểm cân bằng và xây dựng ma trận Jacobian phức tạp. Để dễ mô phỏng bài báo chọn tham số cho 4 trường hợp:

Trường hợp	k_p	T_L	k	Hành vi
A	0,1	0	1,65	Ổn định
B	0,1	0	1,8	Đường tròn giới hạn
C	0,15	0,2	3,7	Ổn định
D	0,15	0,2	3,9	Đường tròn giới hạn

Với $c_1 = 4, c_2 = 4, c_4 = 1, c_5 = 1$ và $u_2^0 = 1$ và các nghiên cứu cũng đã chứng minh nếu $k < 3$ hệ chỉ có một điểm cân bằng và đảm bảo các điều kiện để hệ ổn định, ngoài điều kiện đó hệ sẽ mất ổn định, xuất hiện đường

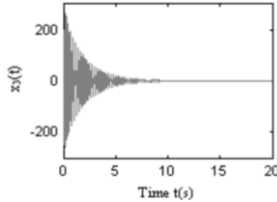
tròn giới hạn do xuất hiện phân nhánh Hopf. Kết quả mô phỏng Hình 3 [15]:



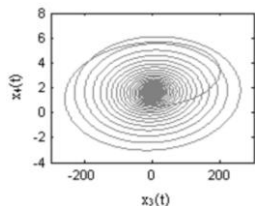
Hình 3. Kết quả mô phỏng trong trường hợp A, B, C, D [15]

Bằng cách điều chỉnh tốc độ thông qua khâu PI vòng ngoài dập tắt các dao động tự duy trì xuất hiện trong IM.

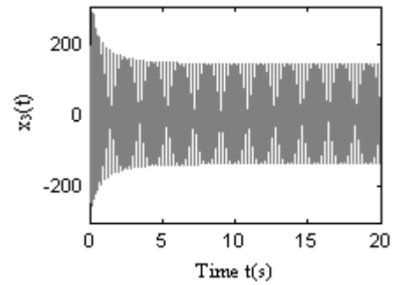
- Nghiên cứu Yongyao Lu, Hongmei Li, Wensheng Li [16] đã chạy mô phỏng với hệ tương tự (1), trong hai trường hợp nhận được kết quả (Hình 7) biểu diễn một đường tròn giới hạn mà quỹ đạo hệ thống phân tán khi $t \rightarrow \infty$ không hội tụ về lân cận đường tròn thể hiện chất lượng của hệ thống phụ thuộc vào điều kiện ban đầu.



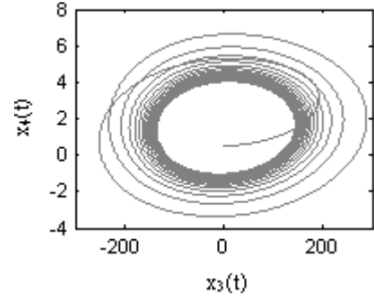
Hình 4. Đáp ứng thời gian của x_3 theo thời gian với tham số $k_p = 0,001$; $k_i = 0,5$; $k = 1,2$ [16]



Hình 5. Điểm cân bằng ổn định của mặt phẳng pha giữa x_3 và x_4 với $k = 1,2$ [16]



Hình 6. Đáp ứng thời gian của x_3 theo thời gian với tham số $k_p = 0,001$; $k_i = 0,5$; $k = 1,5$ [16]



Hình 7. Đường tròn giới hạn của mặt phẳng pha giữa x_3 và x_4 với $k = 1,5$ [16].

Nghiên cứu đề xuất phương pháp phản hồi trễ thời gian để kiểm soát phân nhánh Hopf với bộ điều khiển: $x'_4 = k(x_4(t - \tau) - x_4(t))$ giúp ngăn chặn hiệu quả sự xuất hiện của dao động tự duy trì do hiện tượng hỗn loạn gây ra.

3. Ví dụ minh họa: Truyền động điện không đồng bộ xoay chiều ba pha

Tham số của IM có thể thay đổi do tác động của nhiệt độ, tuổi thọ, lỗi ước tính và các nguyên nhân môi trường khác, ... Các tham số này (điện trở; điện cảm; điện cảm tản hai phía rotor, stator; hồ cảm) thay đổi ảnh hưởng đến các chất lượng điều khiển FOC và đến vùng tham số nhất định có thể dẫn đến hiện tượng hỗn loạn. Để có cái nhìn tổng quan về hỗn loạn trong IM bài báo thực hiện mô phỏng mô hình IM [17] [18]:

$$\begin{cases} \dot{\phi}_{rq} = -\frac{R_r}{L_r} \phi_{rq} - \omega_{sl} \phi_{rd} + \frac{L_m}{L_r} R_r i_{sq} \\ \dot{\phi}_{rd} = -\frac{R_r}{L_r} \phi_{rd} + \omega_{sl} \phi_{rq} + \frac{L_m}{L_r} R_r i_{sd} \\ \dot{\omega}_r = -\frac{R\omega}{J} \omega_r + \frac{1}{J} \left[\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} n_p (i_{sq} \phi_{rd} - i_{sd} \phi_{rq}) - T_L \right] \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{Đặt } c_1 = \frac{R_r}{L_r}, c_2 = \frac{L_m}{L_r} R_r, c_3 = \frac{R\omega}{J}, c_4 = \frac{1}{J},$$

$$c_5 = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} n_p, x_1 = \phi_{rq},$$

$$x_2 = \phi_{rd}, \omega_{sl} = \omega_s - \omega, u_1 = \omega_{sl}, u_2 = i_{sd}, x_4 = i_{sq}.$$

Thuật toán điều khiển RFOC với vòng lặp PI:

$$\begin{cases} u_1 = \hat{c}_1 \frac{u_3}{u_2} \\ u_2 = u_2^0 \\ x_4 = K_p(\omega_{ref} - \omega_r) + K_i \int_0^t (\omega_{ref}(\zeta) - \omega_r(\zeta)) d\zeta \end{cases} \quad (5)$$

Với $\hat{c}_1$ là ước lượng hằng số rotor c_1 , u_2^0 là hằng số đặt dòng rotor (hằng số thiết kế). Trong thời gian làm việc của hệ thống, hằng số thời gian thay đổi ảnh hưởng đến chất

lượng điều khiển. Với hệ số hằng số thời gian rotor $k = \frac{c_1}{c_1}$, rõ ràng nhiệm vụ điều khiển là cho k đạt giá trị bằng 1.

Đặt $x_3 = \omega_{ref} - \omega_r$ là chênh lệch giữa tốc độ đặt và tốc độ cơ, từ (4) và (5) ta có:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -c_1 x_1 - \frac{kc_1}{u_2^0} x_2 x_4 + c_2 x_4 \\ \dot{x}_2 = \frac{kc_1}{u_2^0} x_1 x_4 - c_1 x_2 + c_2 u_2^0 \\ \dot{x}_3 = c_4 \left[c_5 (x_2 x_4 - x_1 u_2^0) - T_L - \frac{c_3}{c_4} \omega_{ref} \right] - c_3 x_3 \\ \dot{x}_4 = -k_p c_4 \left[c_5 (x_2 x_4 - x_1 u_2^0) - T_L - \frac{c_3}{c_4} \omega_{ref} \right] + (k_i - k_p c_3) x_3 \end{cases} \quad (6)$$

Để thuận tiện cho việc phân tích đặc tính động lực học của IM, bài báo chọn tham số theo [18]:

$$c_1 = 13,67; c_2 = 1,56; c_3 = 0,59; c_4 = 1176;$$

$$c_5 = 2,86; u_2^0 = 4; k_p = 0,001; k_i = 1; k = 1,5;$$

$$T_L = 0,5; \omega_{ref} = 181,1 \text{ và trạng thái ban đầu:}$$

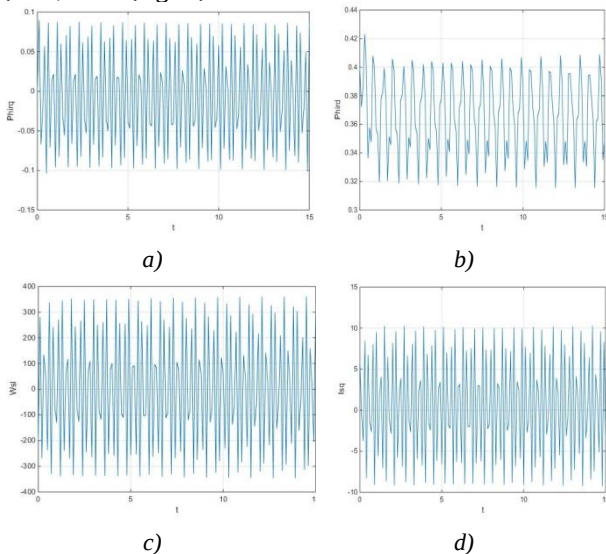
$$x_1 = 0; x_2 = 0,4; x_3 = -200; x_4 = 6.$$

Suy ra hệ (6) có 3 điểm cân bằng: $E_1(-0,017; 0,455; 0; 0,304)$, $E_2(-0,022-0,182i; 0,184+0,021i; 0; 0,187-3,981i)$ và $E_3=(-0,022+0,182i; 0,184-0,021i; 0; 0,187+3,981i)$. Nhưng chỉ tồn tại điểm cân bằng thực duy nhất tại $E_1(-0,017; 0,455; 0; 0,304)$. Từ đây ta tìm các giá trị riêng:

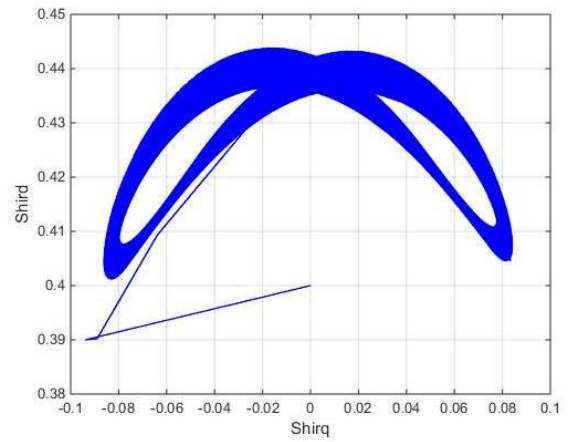
$$|\lambda I - J_{E_1}| = \lambda^4 - 29,46033\lambda^3 - 1787,89895\lambda^2 - 52681,22288\lambda - 427469,94484 \quad (7)$$

Phương trình (7) có 2 nghiệm thực có giá trị âm: $\lambda_1 = -18,98038$; $\lambda_2 = -13,77937$ và 2 nghiệm phức có phần thực dương: $\lambda_3 = 1,64971-40,39465i$; $\lambda_4 = 1,64971+40,39465i$ và theo tiêu chuẩn Routh-Hurwitz là hệ không ổn định.

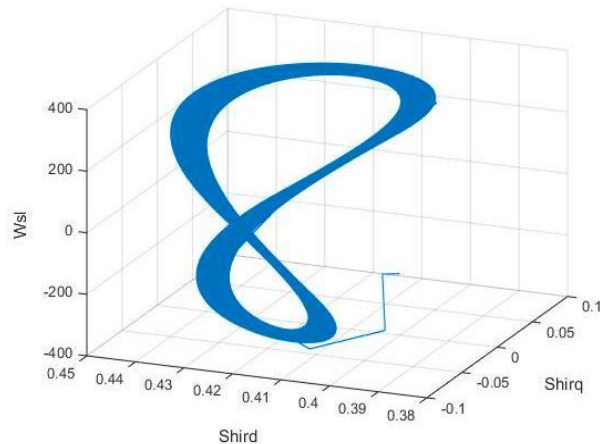
Bài báo chạy mô phỏng 300 giây, kết quả phân tích ở trên thu được đáp ứng thời gian có những hành vi vô cùng phức tạp của ϕ_{rq} , ϕ_{rd} , ω_{sl} , i_{sq} . Để dễ quan sát trích mẫu 15 giây, dao động các biến trạng thái này tự duy trì với biên độ lớn, dao động mạnh:



Hình 10. Đáp ứng thời gian: a) ϕ_{rq} , b) ϕ_{rd} , c) ω_{sl} , d) i_{sq}



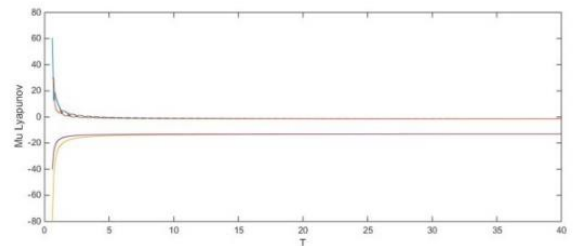
a)



b)

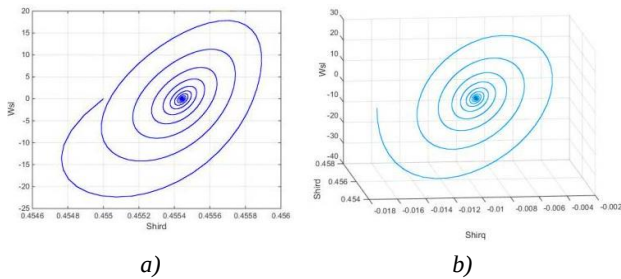
Hình 11. Biểu đồ pha giữa a) ϕ_{rq} và ϕ_{rd} ; b) ϕ_{rq} , ϕ_{rd} và ω_{sl}

Hệ thống IM trong vùng tham số trên là hệ hao tán ($\nabla \cdot V < 0$), vì vậy từ vị trí bất kỳ đều sẽ bị hút vào “tập hút” có hình dạng đặc biệt giống cánh bướm (Hình 11) và thể hiện tính chất hỗn loạn ở đáp ứng thời gian (Hình 10). Tiếp tục khảo sát số mũ Lyapunov – một tham số định lượng hỗn loạn (Hình 12), bài báo thu được kết quả số mũ Lyapunov lớn nhất mang giá trị dương khi T_L nằm trong khoảng (0; 3,2).

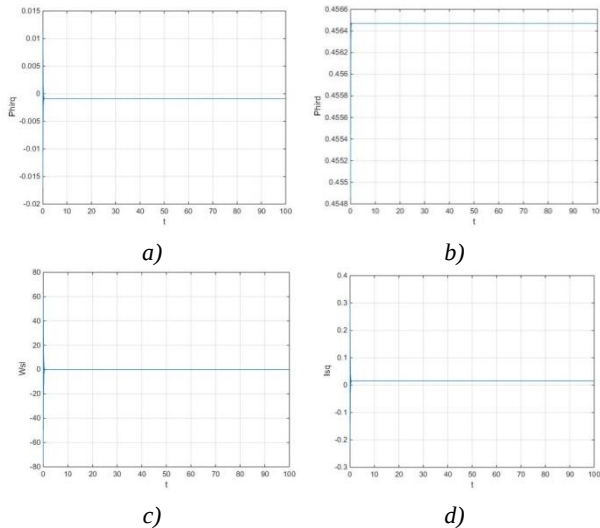


Hình 12. Sự biến thiên của số mũ Lyapunov theo tham số T_L .

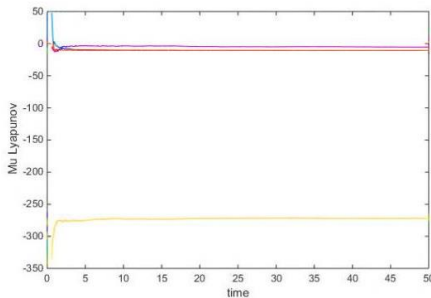
Tiếp tục thực hiện điều chỉnh tham số hệ thống làm việc trong vùng ổn định L_r giảm 20 lần và $T_L > 4N.m$ thu được đáp ứng thời gian của các biến trạng thái ϕ_{rq} , ϕ_{rd} , ω_{sl} , i_{sq} nhanh chóng đạt giá trị của điểm cân bằng (Hình 14) và biểu diễn biểu đồ pha là đường xoắn ốc không có hình dáng tập hút lạ (Hình 13). Lúc này số mũ Lyapunov thu được đều mang giá trị âm (Hình 15).



Hình 13. Biểu đồ pha giữa a) ω_{sl} và ϕ_{rd} ; b) ϕ_{rq}, ϕ_{rd} và ω_{sl}



Hình 14. Đáp ứng thời gian trong trường hợp L_r giảm 20 lần và $T_L > 4N.m$: a) ϕ_{rq} , b) ϕ_{rd} , c) ω_{sl} , d) i_{sq} .



Hình 15. Sự biến thiên của số mũ Lyapunov trong vùng tham số ổn định

4. Kết luận

Dựa trên mô phỏng hệ thống IM trong hai trường hợp, bài báo hướng đến xác định vùng tham số ổn định của hệ thống. Đây là cơ sở để hệ thống hoạt động ổn định trong thời gian làm việc dài hạn. Vì vậy, yêu cầu đặt ra để tránh hiện tượng hỗn loạn xảy ra với hệ truyền động IM là tìm ra phương pháp điều khiển đơn giản, linh hoạt nhanh chóng

điều khiển các tham số làm việc và các biến trạng thái vào bên trong “vùng làm việc an toàn”, loại bỏ dao động không mong muốn để có thể nâng cao chất lượng điều khiển trong thời gian làm việc dài hạn, đây sẽ là cơ sở cho các nghiên cứu chuyên sâu hơn sau này của tác giả.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K. T. Chau and Z. Wang, “Chaos in AC Drive Systems”, in *Chaos in Electric Drive Systems*, John Wiley & Sons, 2011, pp. 113–143.
- [2] N. V. Đạo, T. K. Chi, and N. Dũng, *Nhập môn động lực học phi tuyến và chuyển động hỗn loạn*, 2005.
- [3] I. I. Blekhnman, *Vibrational mechanics: nonlinear dynamic effects, general approach, applications*. World Scientific, 2000.
- [4] A. Alasty and H. Salarieh, “Controlling the chaos using fuzzy estimation of OGY and Pyragas controllers”, *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 26, no. 2, 2005, pp. 379–392.
- [5] C.-L. Li, “Chaotic control of permanent magnet synchronous motor based on washout filter technique”, *Acta Phys. Sin.*, 2009, pp. 8134–8138.
- [6] A. Jackson, “An open-plus-closed-loop (OPCL) control of complex dynamic systems”, *Phys. D Nonlinear Phenom.*, vol. 85, 1995, pp. 1–9.
- [7] S. Rajasekar, K. Murali, and M. Lakshmanan, “Control of chaos by nonfeedback methods in a simple electronic circuit system and the FitzHugh-Nagumo equation”, *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 8, no. 9, 1997, pp. 1545–1558.
- [8] H. P. Ren, D. Liu, and J. Li, “Delay feedback control of chaos in permanent magnet synchronous motor”, *Proc. Csee*, vol. 6, no. 33, 2003.
- [9] C. L. J. Yu, P. Shi, H. Yu, B. Chen, “Approximation-Based Discrete-Time Adaptive Position Tracking Control for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors”, *IEEE*, vol. 45, no. 7, 2015, pp. 1363–1371.
- [10] J. Yu, H. Yu, B. Chen, J. Gao, and Y. Qin, “Direct adaptive neural control of chaos in the permanent magnet synchronous motor”, *Springer.*, vol. 70, no. 3, 2012.
- [11] L. Meiju, P. Zailin, and W. Xiuhua, “Fuzzy sliding mode variable structure control for chaos oscillation of synchronous generator”, *Electr. Power Autom. Equip.*, vol. 29, no. 7, 2009, pp. 85–88.
- [12] S. P. J. Yu, J. Gao, Y. Ma, H. Yu, “Robust Adaptive Fuzzy Control of Chaos in the Permanent Magnet Synchronous Motor”, *Discret. Dyn. Nat. Soc.*, vol. 2010, 2010, p. 13.
- [13] D. Q. Wei, X. S. Luo, B. H. Wang, and J. Q. Fang, “Robust adaptive dynamic surface control of chaos in permanent magnet synchronous motor”, *Phys. Lett. Sect. A Gen. At. Solid State Phys.*, vol. 363, no. 1–2, 2007, pp. 71–77.
- [14] R. Reginatto, F. Salas, F. Gordillo, and J. Aracil, “Zero-Hopf Bifurcation in Indirect Field Oriented Control of Induction Motors”, *IFAC Proc. Vol.*, vol. 39, no. 8, 2006, pp. 309–314.
- [15] F. Gordillo, F. Salas, R. Ortega, and J. Aracil, “Hopf bifurcation in indirect field-oriented control of induction motors”, *Automatica*, vol. 38, no. 5, 2002, pp. 829–835.
- [16] Y. Lu, H. Li, and W. Li, “Hopf bifurcation and its control in an induction motor system with indirect field oriented control”, *IEEE Conf. Ind. Electron. Appl.*, vol. 5, no. 2, 2009, pp. 3438–3441.
- [17] N. P. Quang and J.-A. Dittich, “Vector Control of Three-Phase AC Machines - System Development in the Practice”, 2nd ed. Springer, 2015.
- [18] W. Perruquetti and J.-P. Barbot, “Chapter 13: Indirect field oriented control of induction motors: A Hopf bifurcation analysis”, in *Chaos in Automatic Control*, CRC Press, 2005, pp. 481–502.

(BBT nhận bài: 18/7/2018, hoàn tất thủ tục phản biện: 08/11/2018)