

Hiện tượng hỗn loạn trong hệ thống phát điện sức gió dùng máy phát không đồng bộ nguồn kép

Chaos phenomenon in wind power generation system using doubly-fed induction generator

Cò Như Văn^{1,2*}, Nguyễn Thanh Hải¹, Nguyễn Phùng Quang²

¹Trường Đại học Giao thông vận tải

²Đại học Bách khoa Hà Nội

*Corresponding author E-mail: vancn@utc.edu.vn

Abstract

Chaotic behavior is beneficial in some areas, but in electric drive systems, it almost gives undesirable results, which can lead to self-oscillation, affect the quality of the systems, and even destroys the system. This is a phenomenon that only occurs with nonlinear dynamical systems, sensitive to initial conditions and aperiodic but it is governed by deterministic laws, unlike random perturbations. DFIG system is complex, multivariable, and strongly nonlinear, when operating under certain conditions, the system may fall into a chaotic behavior, which causes disadvantages for the system. Therefore, the first and most important task is to identify the cause of DFIG's chaos. Based on the method of theoretical analysis and through simulation, this study determines the chaotic phenomenon for DFIG when the parameter of stator winding changes to a certain value. It will serve as a basis for parameterizing the system, building a control algorithm to eliminate this phenomenon, and improving the operating quality of the system.

Keywords: Bifurcation, chaos theory, equilibrium, DFIG, Lyapunov exponents, Jacobian matrix.

Các ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
T_r, T_s	s	hằng số thời gian rotor và stator
L_m, L_r, L_s	H	hỗ cảm, điện cảm rotor, điện cảm stator
σ		Hệ số tản toàn phần trực của stator
$\omega, \omega_r, \omega_s$	rad/s	vận tốc góc cơ, mạch rotor và mạch stator
$\mathbf{i}_s, \mathbf{i}_r$	A	Vector of stator, rotor current
$i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}$	A	dq components of the stator, rotor current
$\mathbf{u}_s, \mathbf{u}_r$	V	Vector of stator, rotor voltage
$u_{rd}, u_{rq}, u_{sd}, u_{sq}$	V	dq components of the stator, rotor voltage
Ψ_s, Ψ_r	Wb	Vector of rotor, stator flux
$\Psi_{rd}, \Psi_{rq}, \Psi_{sd}, \Psi_{sq}$	Wb	dq components of the rotor, stator flux
U	V	Điện áp lưới
f	Hz	Tần số lưới
n_p		Số đôi cực
T_L	N.m	Mô men xoắn
J	Kg.m ²	Mô men quán tính
D	N.m/rad/s	Hệ số giảm chấn

Tóm tắt

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 tuân hoàn nhưng tuân theo quy luật nhất định không giống với nhiễu. DFIG được đánh giá là hệ đa biến, phi tuyến mạnh và có cấu trúc phức tạp, khi hoạt động trong điều kiện cụ thể nào đó, hệ thống có thể rơi vào trạng thái hỗn loạn, chúng gây ra những bất lợi cho hệ thống. Do vậy, nhiệm vụ đầu tiên và quan trọng đó là cần xác định được nguyên nhân khiến DFIG xảy ra hỗn loạn. Dựa trên phương pháp phân tích lý thuyết và thông qua mô phỏng, nghiên cứu này xác định hiện tượng hỗn loạn đối với DFIG khi tham số của cuộn dây stator thay đổi đến một giá trị nhất định. Từ đó, làm cơ sở tham số hóa hệ thống, nhằm xây dựng thuật toán điều khiển để triệt tiêu hiện tượng hỗn loạn, nâng cao chất lượng hoạt động của hệ thống.

1. Tổng quan về hỗn loạn và ứng dụng trong điều khiển

Một hệ động lực có chuyển động hỗn loạn cần có những điều kiện [1-2]:

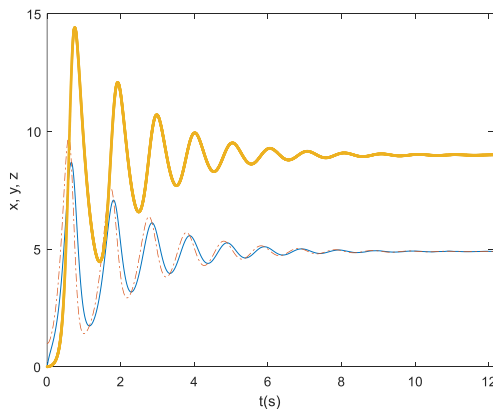
- Hệ có ít nhất ba biến độc lập;
 - Phương trình chuyển động phải có những số hạng phi tuyến.
- Ngoài ra, không gian pha của hệ phải có số chiều không ít hơn ba để đảm bảo sự tồn tại của những quỹ đạo phân kỳ, bị giam hãm trong một miền hữu hạn của không gian các biến động lực và đảm bảo tính duy nhất của quỹ đạo.

Các quỹ đạo bị hút vào tập hút, nhưng chúng không ổn định trên tập hút đó và nhạy cảm với các điều kiện ban đầu, một khi đã ở trong tập hút lạ, điểm pha bị giam hãm trong đó, có thể tiếp cận gần tùy ý một điểm nào đó của tập hút nhưng không bao giờ lặp lại y hệt ở một thời điểm về sau. Quỹ đạo pha không ổn định ở đâu trên tập hút lạ, nhưng nhìn toàn cục thì tập hút này lại rất ổn định (Hình 3). Những vấn đề đó được thể hiện rất rõ bởi hệ các phương trình vi phân do nhà khí tượng học Edward Lorenz [1][3] trong phương trình (1) dưới đây:

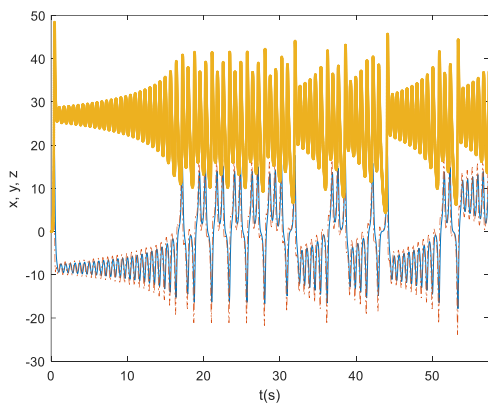
$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \sigma(y - x) \\ \frac{dy}{dt} = x(\rho - z) - y \\ \frac{dz}{dt} = xy - \beta z \end{cases} \quad (1)$$

Với x, y, z , là các biến và ba tham số σ, ρ, β . Ta thấy phương trình (1) thể hiện rõ tính phi tuyến (là điều kiện cần của hệ chuyển động hỗn loạn).

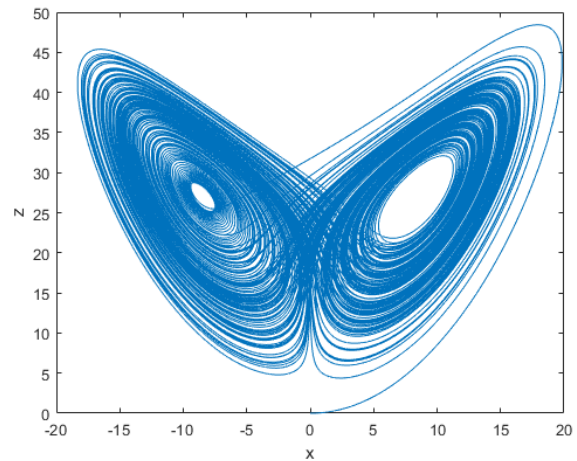
Ở điều kiện bình thường, hệ thống ổn định (Hình 1). Khi các tham số σ, ρ, β của hệ thống thay đổi đến một giá trị nhất định thì hiện tượng hỗn loạn xuất hiện (Hình 2, Hình 3).



Hình 1: Trạng thái của hệ thống theo miền thời gian với các tham số $\sigma = 10, \rho = 8/3, \beta = 10$.



Hình 2: Trạng thái của hệ thống theo miền thời gian với các tham số $\sigma = 10, \rho = 8/3, \beta = 28$.



Hình 3: Quỹ đạo pha của hệ thống với các tham số $\sigma = 10, \rho = 8/3, \beta = 28$.

Hình 3 cho thấy: quỹ đạo xuất phát từ gốc tọa độ (điểm khởi đầu tại $x = 0, z = 0$) vòng qua bên phải rồi lao vào tâm của một điểm xoắn ốc bên trái, sau đó quỹ đạo quay trở về phía bên phải, thực hiện xoắn ốc một thời gian rồi lại quay về phía bên trái thực hiện xoắn ốc, quá trình này cứ tiếp diễn mãi mãi và quỹ đạo không khi nào tự cắt mình (trong không gian ba chiều). Đồng thời thể hiện rõ ràng 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, chúng bị hút vào một vật thể hình học phức tạp được gọi là tập hút lạ (strange attractor), đó là chính là hiện tượng hỗn loạn [2].

Vận dụng hỗn loạn vào điều khiển:

Hệ động lực hỗn loạn là một trong những phương pháp phát triển chung nhất của hệ thống phi tuyến, các chế độ hỗn loạn hiện diện nhiều trong tự nhiên cũng như trong các thiết bị được tạo bởi con người, hỗn loạn có lợi khi nó làm tăng tốc độ phản ứng hóa học bằng cách tăng cường trộn, cung cấp một cơ chế mạnh mẽ để truyền nhiệt và khối lượng [3]. Tuy nhiên, trong nhiều tình huống, sự hỗn loạn là một hiện tượng không mong muốn, ví dụ dẫn đến sự mệt mỏi cơ học tăng thêm đối với các dao động không đều, khả năng hấp thụ năng lượng không đối lưu trong một chế độ hỗn loạn có thể dẫn đến các thông số hệ thống vượt quá mức an toàn.

Trước hết chúng ta cần lưu ý rằng, trong các hệ động lực tuyến tính không bao giờ xảy ra hiện tượng hỗn loạn. Vì vậy khi nói đến hỗn loạn là nói đến các hệ phi tuyến. Song, không phải trong hệ phi tuyến nào cũng có chuyển động hỗn loạn. Có những phương pháp nhận biết hỗn loạn khác nhau như: phương pháp phân tích Fourier, các đáp ứng thời gian, biểu đồ pha, biểu đồ phân nhánh giá trị lớn nhất của biến trạng thái theo thời gian và số mũ Lyapunov lớn nhất được sử dụng để minh họa cho hành vi hỗn loạn khi thay đổi trị số đặc trưng. Từ đó rút ra vùng làm việc hỗn loạn của đối tượng, đề xuất phương pháp điều khiển để đưa hệ thống về trạng thái làm việc ổn định, dập tắt các dao động tự duy trì với biên độ cao và thay đổi bất thường.

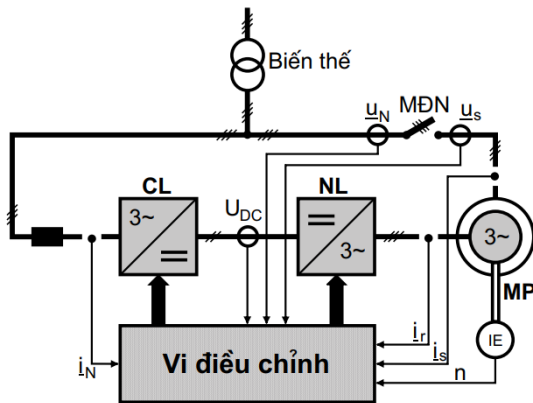
Gần đây, việc nghiên cứu về hiện tượng hỗn loạn truyền động cho máy điện đã nhận được nhiều sự quan tâm, điển hình là các nghiên cứu [4-9], đã cho phép hiểu rõ hơn về các hoạt động động lực học của hệ thống, có thể đem đến một số thông tin hữu ích cho công việc thiết kế và điều khiển hệ thống trên thực tế.

Tuy nhiên, đối với hệ thống phát điện sức gió sử dụng máy phát không đồng bộ nguồn kép thì mới chỉ lác đác một vài nghiên cứu được công bố, chưa bao phủ hết được các vấn đề gây ra hỗn loạn cho DFIG, trong khi DFIG được coi là một hệ thống đa biến, phi tuyến, kết hợp chặt chẽ với nhau, hệ thống chịu nhiều tác động từ bên ngoài và phức tạp hơn nhiều so với truyền động điện đơn giản, do vậy hệ thống có thể rơi vào trạng thái làm việc hỗn loạn trong những điều kiện nhất định.

Một số nguyên nhân dẫn đến hiện tượng hỗn loạn cho DFIG sẽ được trình bày trong nghiên cứu này. Tiếp đó, để tường minh hơn, bài báo sẽ chứng minh hiện tượng hỗn loạn xảy ra đối với DFIG khi tham số cuộn dây stator thay đổi đến một giá trị nhất định, lỗi này được coi là phổ biến nhất đối với DFIG [10-12]. Kết quả được thể hiện dựa trên phân tích cơ sở lý thuyết và mô phỏng, các nội dung nghiên cứu tiếp theo của bài báo được tổ chức như sau: cấu trúc và mô hình toán học của DFIG sẽ được trình bày tại mục 2, mục số 3 sẽ phân tích và mô phỏng về hiện tượng hỗn loạn đối với DFIG khi tham số điện trở và điện cảm của stator thay đổi đến một giá trị nhất định. Cuối cùng là phần kết luận sẽ được trình bày tại mục 4.

2. Cấu trúc và mô hình toán học của DFIG

Sự thâm nhập của năng lượng gió đang gia tăng nhanh chóng trong ngành sản xuất năng lượng ngày nay. Đặc biệt, DFIG đã trở thành một lựa chọn rất phổ biến trong các trang trại gió (chiếm khoảng 50% thị trường phát điện sức gió [13]), do có một số ưu điểm như: chi phí đầu tư thấp, có thể vận hành với tốc độ gió thay đổi, điều khiển linh hoạt,...

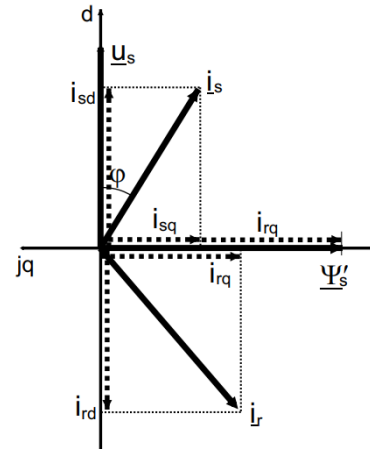


Hình 4: Cấu trúc của DFIG trong hệ thống phát điện sức gió [14]

CL: Chỉnh lưu
NL: Nghịch lưu
MĐN: Máy đóng ngắt

Từ cấu trúc trên Hình 4 ta thấy, DFIG trong hệ thống phát điện có ưu điểm nổi bật là stator được nối trực tiếp với lưới điện, còn rotor nối với lưới qua thiết bị điện tử công suất điều khiển được, do vậy mà công suất thiết bị điều khiển nhỏ hơn rất nhiều công suất máy phát (trong dải tốc độ giới hạn thì công suất của bộ biến đổi chỉ bằng 30% công suất phát lên lưới [14-17]) và dòng năng lượng thu được chảy trực tiếp từ stator sang lưới, điều này rất hấp dẫn về mặt kinh tế, đặc biệt khi công suất của máy phát lớn.

Về kỹ thuật điều khiển, DFIG cho phép điều khiển độc lập công suất tác dụng và công suất phản kháng, điều này được thể hiện rõ ở Hình 5 và các phương trình sau:



Hình 5: Biểu đồ vector của DFIG trong hệ tọa độ tựa theo điện áp lưới [18].

Theo hình 5, khi $u_{sq} = 0$, công suất tác dụng và công suất phản kháng qua thành phần phản ứng là i_{sd} và i_{sq} [18]:

$$P = \frac{3}{2} u_{sd} i_{sd} \quad (2)$$

$$Q = \frac{3}{2} u_{sd} i_{sq} \quad (3)$$

Phương trình từ thông rotor và stator [18]:

$$\begin{cases} \psi_s = L_s i_s + L_m i_r \\ \psi_r = L_m i_s + L_r i_r \end{cases} \quad (4)$$

Trong hệ tọa độ tựa theo điện áp lưới, phương trình (4) có thể viết lại như sau:

$$\begin{cases} \psi'_{sd} = \frac{L_s}{L_m} i_{sd} + i_{rd} \approx 0 \\ \psi'_{sq} = \frac{L_s}{L_m} i_{sq} + i_{rq} \approx |\psi'_s| \end{cases} \quad (5)$$

Trong đó: $\psi'_{sd} = \psi_s / L_m$

Do vậy, các thành phần dòng điện được xác định như sau:

$$\begin{cases} i_{sd} = -\frac{L_m}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = \frac{L_m}{L_s} (\psi'_{sq} - i_{rq}) \end{cases} \quad (6)$$

Đối với máy phát công suất lớn thì $L_s/L_m \approx 1$, phương trình (5) được đơn giản hóa như sau:

$$\begin{cases} i_{sd} + i_{rd} \approx 0 \\ i_{sq} + i_{rq} \approx |\psi'_s| = \psi'_{sq} \end{cases} \quad (7)$$

Thay vào (2) và (3) ta được:

$$P = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_{sd} i_{rd} \quad (8)$$

$$Q = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_{sd} (\psi'_{sq} - i_{rq}) \quad (9)$$

Hệ phương trình biểu diễn mối quan hệ giữa cường độ dòng điện thành phần của rotor và từ thông stator trên hệ tọa độ dq của DFIG được viết như sau [18]:

$$\begin{cases} \frac{di_{rd}}{dt} = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{1-\sigma}{T_s} \right) i_{rd} + \omega_r i_{rq} + \\ \frac{1-\sigma}{\sigma} \left(\frac{1}{T_s} \psi'_{sd} - \omega \psi'_{sq} \right) + \frac{1}{\sigma L_r} u_{rd} - \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} u_{sd} \\ \frac{di_{rq}}{dt} = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{1-\sigma}{T_s} \right) i_{rq} - \omega_r i_{rd} + \\ \frac{1-\sigma}{\sigma} \left(\frac{1}{T_s} \psi'_{sq} + \omega \psi'_{sd} \right) + \frac{1}{\sigma L_r} u_{rq} - \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} u_{sq} \\ \frac{d\psi'_{sd}}{dt} = \frac{1}{T_s} i_{rd} - \frac{1}{T_s} \psi'_{sd} + \omega_s \psi'_{sq} + \frac{1}{L_m} u_{sd} \\ \frac{d\psi'_{sq}}{dt} = \frac{1}{T_s} i_{rq} - \frac{1}{T_s} \psi'_{sq} - \omega_s \psi'_{sd} + \frac{1}{L_m} u_{sq} \end{cases} \quad (10)$$

Với: $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$; $T_s = L_s / R_s$; $T_r = L_r / R_r$

Từ hệ phương trình (10) ta thấy rõ bản chất phi tuyến và đa biến của DFIG. Như vậy, theo lý thuyết hỗn loạn thì DFIG có thể xảy ra hỗn loạn khi các tham số của hệ thống đạt đến một giá trị nhất định. Để làm rõ về vấn đề hỗn loạn đối với DFIG, nội dung 3 dưới đây sẽ thực hiện chi tiết và đầy đủ.

3. Hiện tượng hỗn loạn đối với DFIG

3.1. Một số nguyên nhân khiến DFIG xảy ra hiện tượng hỗn loạn

Bên cạnh những ưu điểm thì DFIG cũng thể hiện một số nhược điểm nhất định như: cấu trúc của DFIG phức tạp, là hệ đa biến, phi tuyến, kỹ thuật điều khiển khó khăn. Do môi trường làm việc khắc nghiệt của các trang trại gió, nên các tham số của DFIG có thể thay đổi theo nhiệt độ, tuổi thọ, các điều kiện phụ tải,... đồng thời DFIG cũng dễ bị các lỗi như: lỗi hộp số, lỗi bộ biến đổi công suất, lỗi cuộn dây stator, lỗi cuộn dây rotor, lỗi cổ góp, lỗi cảm biến đo tốc độ,... từ đó dẫn đến hệ thống có thể rơi vào trạng thái làm việc hỗn loạn dẫn đến chất lượng làm việc của hệ thống kém, và là nguyên nhân dẫn đến các sự cố, hỏng hóc.

Nghiên cứu về vấn đề hỗn loạn đối với máy điện nói chung thì đã có khá nhiều công trình nghiên cứu được đưa ra

và mang lại những kết quả nhất định. Tuy nhiên, nghiên cứu về vấn đề hỗn loạn đối với DFIG, theo điều tra nghiên cứu của nhóm tác giả, cho đến nay số lượng công trình được công bố với số lượng còn rất hạn chế. Một số nguyên nhân gây ra hiện tượng hỗn loạn đối với DFIG được chỉ ra bởi các nghiên cứu cụ thể như sau:

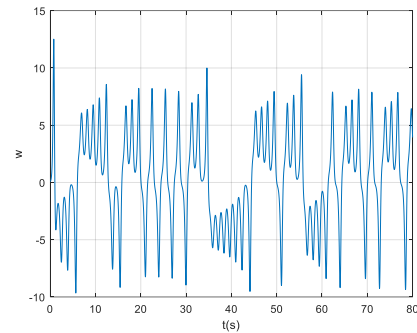
- Hiện tượng hỗn loạn xuất hiện dưới điều kiện làm việc của hệ thống. Nghiên cứu [19] chỉ ra rằng khi lưới yếu và tải không cân bằng, với điều kiện làm việc ở tốc độ gió thấp (6m/s) thì hệ thống làm việc ổn định, tuy nhiên, khi tốc độ gió tăng lên (13 m/s) thì sự phân nhánh đã diễn ra, và là nguy cơ dẫn đến hiện tượng hỗn loạn trong hệ thống nếu tốc độ gió tăng thêm.

- Hiện tượng hỗn loạn khi các tham số của hệ thống thay đổi: Công trình nghiên cứu [20] xuất phát từ hệ phương trình từ hệ phương trình (11)

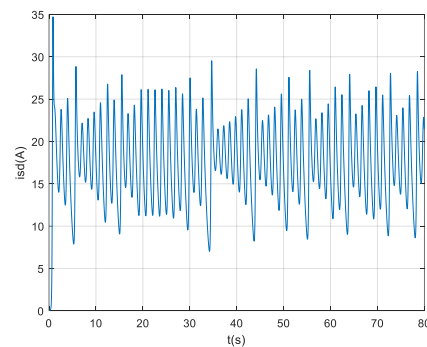
$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = -i_{sd} + \omega i_{sq} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = -i_{sq} + \omega i_{sd} + \gamma \omega \\ \frac{d\omega}{dt} = \sigma (i_{sq} - \omega) \end{cases} \quad (11)$$

Với σ và γ là các tham số của hệ thống, u_{sd} , u_{sq} , i_{sd} , i_{sq} tương ứng là điện áp và cường độ dòng điện thành phần của stator.

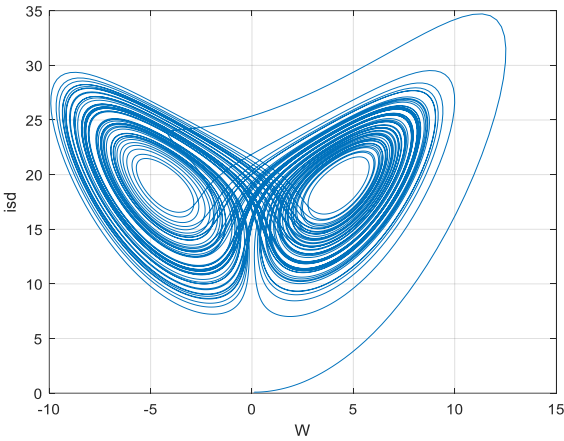
Trong trường hợp $u_{sd}(0) = u_{sq}(0) = T_L(0) = 0$; $\sigma = 5.46$; $\gamma = 20$; $(i_{sd}, i_{sq}, \omega)^T = (0.01, 0.01, 0.01)^T$ thì hệ thống sẽ trở nên hỗn loạn, điều đó được thể hiện rõ trên Hình 6, Hình 7 và Hình 8 như sau:



Hình 6: Đồ thị biểu diễn sự hỗn loạn của tốc độ rotor theo thời gian.



Hình 7: Đồ thị biểu diễn sự hỗn loạn của cường độ dòng điện i_{sd} theo thời gian khi DFIG xảy ra hỗn loạn.



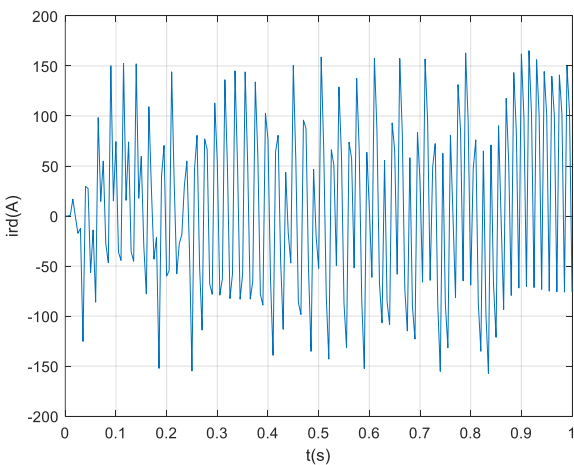
Hình 8: Mặt phẳng pha của i_{sq} và ω ở trạng thái DFIG xảy ra sự cố.

Tiếp đó, công trình nghiên cứu tiêu biểu gần đây của nhóm tác giả Dan Jiang, Wenxin Yu, Junnian Wang, Guoliang Zhong, Zuanbo Zhou [21]. Ở chế độ bình thường, bằng phương pháp phân tích lý thuyết của thử nghiệm 0-1 đã chứng minh hệ thống là ổn định với bộ tham số cho như Bảng 1.

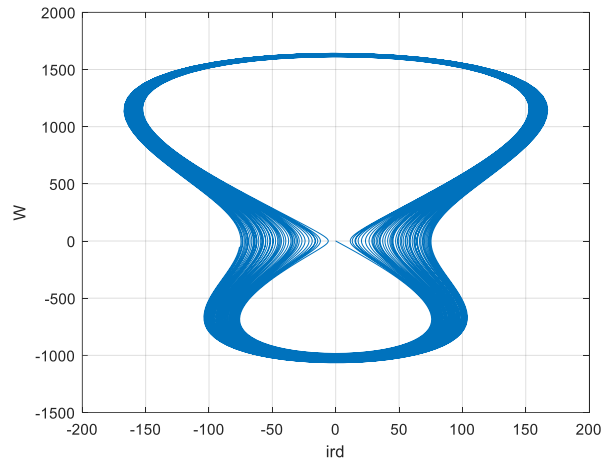
Bảng 1: Tham số của hệ thống [18]:

Điện áp lưới (V)	220
Tần số lưới (HZ)	50
Điện áp liên kết DC (V)	600
Tốc độ gió (m/s)	6
Mô men quán tính (kg.m ²)	0.01
Hệ số giảm chấn (Nm/rad/s)	0
Công suất máy (VA)	3730
Số đôi cực	2
R_s (Ω)	1
R_r (Ω)	1
L_s (H)	0.083
L_r (H)	0.08
L_m (H)	0.0515

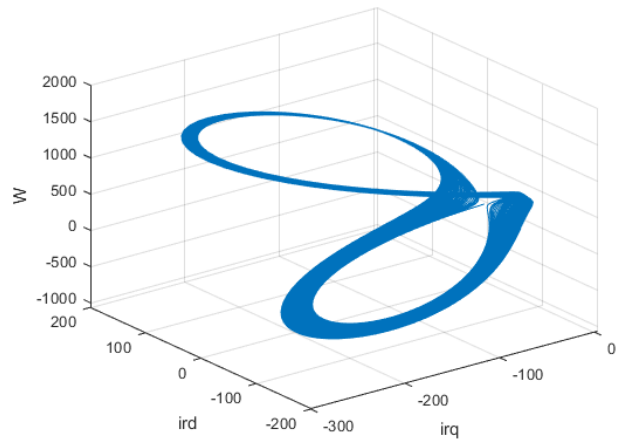
Trong trường hợp khi xảy ra sự cố, các điện trở stator và điện trở rotor có giá trị $R_s = R_r = 0.02\Omega$, đồng thời lỗi cảm biến đo tốc độ rotor: $\omega_0 = 2\omega$. Khi đó, cường độ dòng điện và tốc độ rotor dao động dữ dội, hiện tượng hỗn loạn xuất hiện, được biểu thị qua các hình: Hình 9, Hình 10 và Hình 11 dưới đây:



Hình 9: Đồ thị biểu diễn sự hỗn loạn của cường độ dòng điện i_{rd} theo thời gian.



Hình 10: Mặt phẳng pha của i_{rd} và ω ở trạng thái làm việc hỗn loạn



Hình 11: Không gian pha giữa i_{rd} , i_{rq} và ω ở trạng thái làm việc hỗn loạn

Các nghiên cứu trên đã chỉ ra rằng, dưới một điều kiện hoạt động nhất định thì DFIG có thể xảy ra hỗn loạn. Tuy nhiên, nghiên cứu [19] và [20] đánh giá hiện tượng đó dựa trên mô phỏng trên máy tính mà chưa đánh giá trên cơ sở lý thuyết vững chắc. Nghiên cứu [22] đã phân tích về hiện tượng hỗn loạn và đưa ra một số nguyên nhân làm cho hệ thống DFIG xảy ra hỗn loạn. Nghiên cứu [20] chưa đưa ra được điều kiện cụ thể về sự thay đổi của tham số nào trong hệ thống dẫn đến DFIG xảy ra hỗn loạn. Công trình [21] đã nghiên cứu khá chắc chắn đó là dựa trên phân tích lý thuyết (thuật toán kiểm tra 0-1) và qua mô phỏng để đánh giá tính ổn định và hỗn loạn của hệ thống, đồng thời nghiên cứu cũng đưa ra được điều kiện cụ thể của bộ tham số đưa hệ thống DFIG xảy ra hỗn loạn. Tuy nhiên, điều kiện xảy ra 3 lỗi đồng thời (lỗi cuộn dây stator, lỗi cuộn dây rotor và lỗi cảm biến đo tốc độ rotor) là hiếm xảy ra trên thực tế.

Để làm rõ hơn về hiện tượng hỗn loạn đối với DFIG, nội dung dưới đây dựa trên cơ sở phân tích lý thuyết và mô phỏng để xác định hiện tượng hỗn loạn xảy ra đối với DFIG khi tham số của cuộn dây stator thay đổi đến một giá trị nhất định. Đây là điều kiện dễ xảy ra trong quá trình làm việc của hệ thống.

3.2. Xác định hiện tượng hỗn loạn của DFIG dựa trên cơ sở phân tích lý thuyết và mô phỏng

Từ phương trình chuyển động của rotor [23], [24]

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{n_p}{J} \left(T_E - T_L - \frac{B}{n_p} \omega \right) \quad (12)$$

$$T_E = \frac{3}{2} n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (13)$$

Phương pháp điều khiển là tựa theo vector điện áp lưới nên ta có $\Psi_{sd} = 0$, $\Psi_{sq} = \Psi_s$ và từ hệ phương trình (6) ta có thể viết lại phương trình (12) như sau:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{n_p}{J} \left(\frac{3 n_p L_m \Psi_s}{2 L_s} i_{rd} - \frac{B}{n_p} \omega - T_L \right) \quad (14)$$

Từ 2 phương trình đầu của hệ phương trình (10) và phương trình (14) ta thu được hệ phương trình biểu diễn cường độ dòng điện thành phần rotor và tốc độ rotor của DFIG như sau:

$$\begin{cases} \frac{di_{rd}}{dt} = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{1-\sigma}{T_s} \right) i_{rd} + \omega_r i_{rq} + \\ \frac{1-\sigma}{\sigma} \left(\frac{1}{T_s} \psi'_{sd} - \omega \psi'_{sq} \right) + \frac{1}{\sigma L_r} u_{rd} - \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} u_{sd} \\ \frac{di_{rd}}{dt} = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{1-\sigma}{T_s} \right) i_{rq} - \omega_r i_{rd} + \\ \frac{1-\sigma}{\sigma} \left(\frac{1}{T_s} \psi'_{sq} + \omega \psi'_{sd} \right) + \frac{1}{\sigma L_r} u_{rq} - \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} u_{sq} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{n_p}{J} \left(\frac{3 n_p L_m \Psi_s}{2 L_s} i_{rd} - \frac{B}{n_p} \omega - T_L \right) \end{cases} \quad (15)$$

Phương pháp điều khiển tựa theo điện áp lưới nên:

$$\Psi_{sd} = 0, \Psi_{sq} = \Psi_s, u_{sd} = u_s, u_{sq} = 0, \psi'_{sq} = \Psi_{sq} / L_m,$$

$$\psi'_{sd} = \Psi_{sd} / L_m, \omega_r = \omega_s - \omega \quad (\omega_s = 2\pi f).$$

Do đó (15) được viết lại như sau:

$$\begin{cases} \frac{di_{rd}}{dt} = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{1-\sigma}{T_s} \right) i_{rd} + (\omega_s - \omega) i_{rq} - \\ \frac{1-\sigma}{\sigma} \omega \frac{\Psi_s}{L_m} + \frac{1}{\sigma L_r} u_{rd} - \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} u_{sd} \\ \frac{di_{rd}}{dt} = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{1-\sigma}{T_s} \right) i_{rq} - (\omega_s - \omega) i_{rd} + \\ \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{1}{T_s} \frac{\Psi_s}{L_m} + \frac{1}{\sigma L_r} u_{rq} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{n_p}{J} \left(\frac{3 n_p L_m \Psi_s}{2 L_s} i_{rd} - \frac{B}{n_p} \omega - T_L \right) \end{cases} \quad (16)$$

Đặt:

$$x_1 = i_{rd}, x_2 = i_{rq}, x_3 = \omega,$$

$$c_1 = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{1-\sigma}{T_s} \right), c_2 = \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{\Psi_s}{L_m}, c_3 = \frac{1}{\sigma L_r},$$

$$c_4 = \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} u_s, c_5 = \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{1}{T_s} \frac{\Psi_s}{L_m}, c_6 = \frac{1}{\sigma L_r},$$

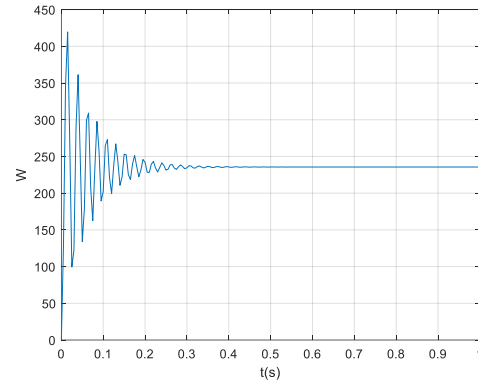
$$c_7 = \frac{3 n_p}{2 J} \frac{n_p L_m \Psi_s}{L_s}, c_8 = \frac{B}{J}, c_9 = \frac{n_p}{J}$$

Từ đó phương trình (16) có dạng như (17) sau:

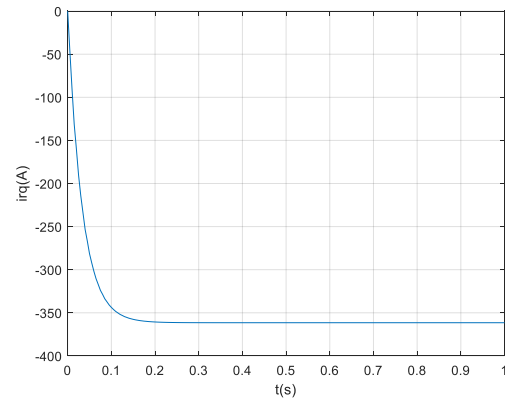
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = c_1 x_1 + (\omega_s - x_3) x_2 - c_2 x_3 + c_3 u_{rd} - c_4 \\ \dot{x}_2 = c_1 x_2 - (\omega_s - x_3) x_1 + c_5 + c_6 u_{rq} \\ \dot{x}_3 = c_7 x_1 - c_8 x_3 - c_9 T_L \end{cases} \quad (17)$$

Tham số của hệ thống được lấy từ [25]: $P = 1.5\text{MW}$; $U = 690$ (V); $R_s = 2,139(\text{m}\Omega)$; $L_s = 4,05(\text{mH})$; $R_r = 2,139(\text{m}\Omega)$; $L_r = 4,09(\text{mH})$; $L_m = 4(\text{mH})$; với $f = 50(\text{Hz})$; $J = 2(\text{kg.m}^2)$; $n_p = 3$; $D = 0$; $T_L = 0$.

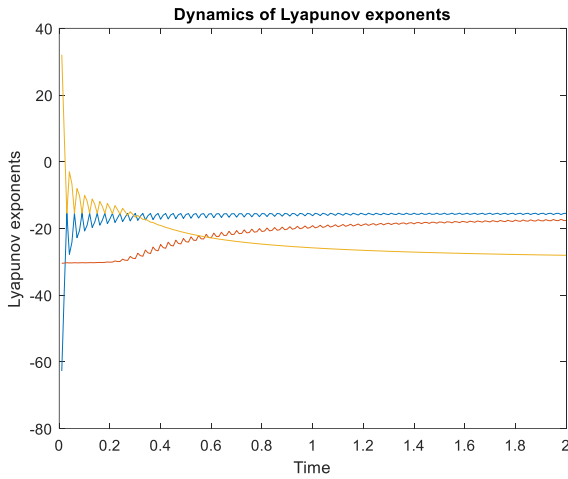
Đánh giá trạng thái làm việc của hệ thống với bộ tham số ở điều kiện làm việc bình thường, có được các kết quả được thể hiện ở Hình 12, Hình 13, Hình 14:



Hình 12: Đáp ứng thời gian của ω khi hệ thống làm việc ở điều kiện bình thường.



Hình 13: Đáp ứng thời gian của i_{rq} khi hệ thống làm việc ở điều kiện bình thường



Hình 14: Sự biến thiên của số mũ Lyapunov theo thời gian khi hệ thống làm việc ở điều kiện bình thường.

Ta thấy, với các tham số ở trạng thái hoạt động bình thường của hệ thống thì kết quả mô phỏng cho thấy ban đầu hệ thống xuất hiện dao động, tuy nhiên chỉ một thời gian rất ngắn thì hệ đã trở về trạng thái hoạt động ổn định.

Tiếp theo, ta đánh giá hoạt động của hệ thống trong trường hợp lỗi cuộn dây stator dẫn đến điện trở và điện cảm thay đổi sang một giá trị khác (các tham số khác của hệ thống không thay đổi): $R_s = 1,5m\Omega$; $L_s = 3.5mH$;

❖ Dựa trên cơ sở phân tích lý thuyết, để đánh giá tính ổn định của hệ thống, ta thực hiện như sau:

Điểm cân bằng của hệ được xác định khi đạo hàm của chúng bằng không. Từ hệ (17), điểm cân bằng của hệ xác định được như (18):

$$\begin{cases} \bar{x}_1 = \frac{c_9}{c_7} T_L \\ \bar{x}_2 = (\omega_s - \bar{x}_3) \frac{c_9}{c_1 c_7} T_L - \frac{c_5}{c_1} \\ \frac{c_9 T_L}{c_1 c_7} \bar{x}_3^2 + \left(\frac{c_5}{c_1} - c_2 - \frac{2\omega_s c_9 T_L}{c_1 c_7} \right) \bar{x}_3 + \\ \frac{c_9 T_L}{c_1 c_7} \omega_s^2 - \frac{\omega_s c_5}{c_1} - c_4 + \frac{c_1 c_9 T_L}{c_7} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

Thay các tham số và giải (18), ta có được điểm cân bằng: $E_1(0; -1439; 235,4)$

Tuyến tính hóa hệ (17) quanh điểm dừng, ta tìm được ma trận Jacobian:

$$J_E = \begin{bmatrix} c_1 & (\omega_s - \bar{x}_3) & -c_2 - \bar{x}_2 \\ -(\omega_s - \bar{x}_3) & c_1 & \bar{x}_1 \\ c_7 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\det|\lambda I - J_E| = \begin{vmatrix} \lambda - c_1 & -(\omega_s - \bar{x}_3) & c_2 + \bar{x}_2 \\ (\omega_s - \bar{x}_3) & \lambda - c_1 & -\bar{x}_1 \\ -c_7 & 0 & \lambda \end{vmatrix}$$

$$\begin{aligned} &= \lambda^3 - 2c_1\lambda^2 + [c_1^2 + (\omega_s - \bar{x}_3)^2 + c_7(c_2 + \bar{x}_2)]\lambda - \\ & c_1 c_7 (c_2 + \bar{x}_2) - c_7 \bar{x}_1 (\omega_s - \bar{x}_3) \\ &= \lambda^3 - 2c_1\lambda^2 + [c_1^2 + (\omega_s - \bar{x}_3)^2 + c_7(c_2 + \bar{x}_2)]\lambda - \\ & c_1 c_7 (c_2 + \bar{x}_2) - c_7 \bar{x}_1 (\omega_s - \bar{x}_3) \end{aligned}$$

Sự ổn định của các điểm cân bằng được xác định bởi các giá trị riêng của ma trận Jacobian được đánh giá tại điểm cân bằng

$$\det|\lambda I - J_E| = 0$$

$$\begin{aligned} &\lambda^3 - 2c_1\lambda^2 + [c_1^2 + (\omega_s - \bar{x}_3)^2 + c_7(c_2 + \bar{x}_2)]\lambda - \\ & c_1 c_7 (c_2 + \bar{x}_2) - c_7 \bar{x}_1 (\omega_s - \bar{x}_3) = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

Thay các tham số của hệ thống vào (18) ta được giá trị của c_1 như sau:

$$c_1 = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{1-\sigma}{T_s} \right) = 3.34$$

vì $c_1 = 3.34 > 0$ nên hệ số thứ 2 của hương trình đặc trưng (19): $-2c_1 < 0$, do vậy theo tiêu chuẩn Hurwitz thì điểm cân bằng này không ổn định.

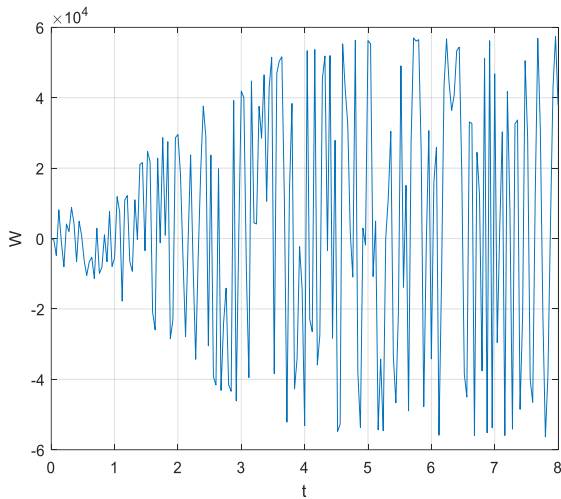
Như vậy, khi tham số của cuộn dây stator thay đổi đến giá trị như trên thì hệ thống không ổn định. Tiếp theo ta xác định số mũ Lyapunov để xác định hệ có xảy ra hỗn loạn hay không. Từ hệ (17) cùng với bộ tham số đã cho, số mũ Lyapunov tính được như sau:

Bảng 2: Sự biến thiên của số mũ Lyapunov

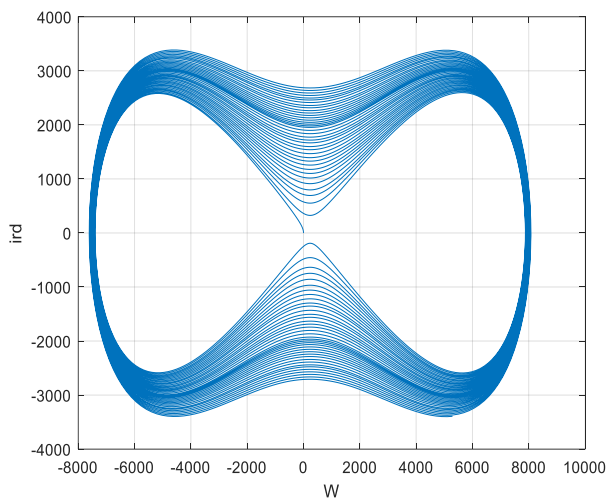
Time	λ_1	λ_2	λ_3
0.05	3806.086	3.252	-685.689
0.10	3807.193	3.233	-646.147
0.15	3807.562	3.227	-690.443
0.20	3807.746	3.223	-717.382
0.25	3807.856	3.221	-702.143
0.30	3807.931	3.220	-687.982
0.35	3807.983	3.219	-681.753
0.40	3808.023	3.219	-680.341
0.45	3808.053	3.218	-683.131
0.50	3808.078	3.218	-680.302

Ta thấy, hệ luôn tồn tại 2 số mũ Lyapunov mang giá trị dương. Do đó, với điều kiện hoạt động trên thì hệ xảy ra hiện tượng hỗn loạn.

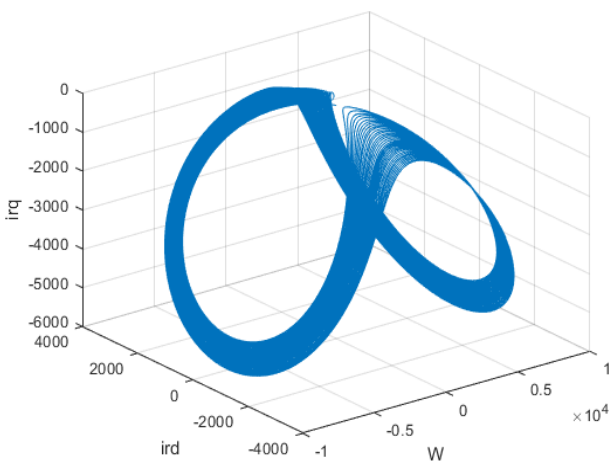
❖ Hiện tượng hỗn loạn được xác định thông qua mô phỏng: từ bộ tham số của hệ thống và trong trường hợp lỗi cuộn dây stator, mô phỏng hệ thống trên phần mềm matlab, ta có kết quả như dưới đây:



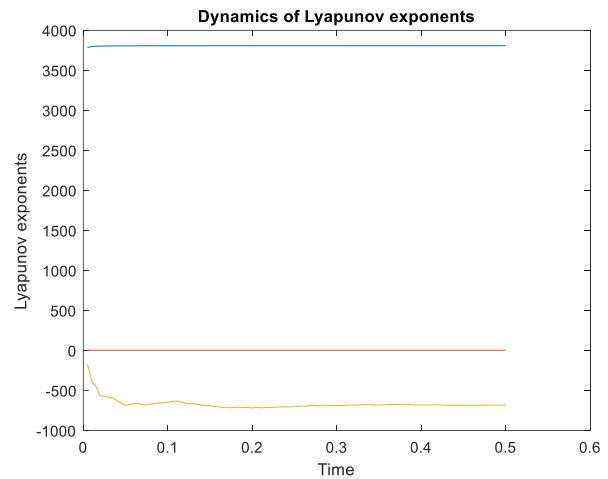
Hình 15: Đáp ứng thời gian của ω .



Hình 16: Biểu đồ pha giữa i_{rd} và i_{rq} .



Hình 17: Không gian pha giữa i_{rd} , i_{rq} và ω .



Hình 18: Sự biến thiên của số mũ Lyapunov theo thời gian.

Theo kết quả mô phỏng ở trên ta thấy quỹ đạo pha của hệ thống không ổn định (Hình 16) tuy nhiên chúng bị giam hãm và bị hút vào điểm cân bằng (Hình 17) nhưng không bao giờ lặp lại y hệt ở một thời điểm về sau, đây chính là biểu hiện của hiện tượng hỗn loạn. Đồng thời kết quả mô phỏng theo thời gian thì số mũ Lyapunov luôn có 2 giá trị dương (Hình 18), do vậy hệ thống là hỗn loạn khi giá trị điện trở và điện cảm của cuộn dây stator thay đổi đến một giá trị nhất định.

4. Kết luận

Cấu trúc của DFIG phức tạp, là hệ đa biến, phi tuyến và kỹ thuật điều khiển khó khăn. Do môi trường làm việc khắc nghiệt của các trang trại gió, DFIG rất dễ bị các lỗi như: lỗi hộp số, lỗi bộ biến đổi công suất, lỗi cuộn dây stator, lỗi cuộn dây rotor, lỗi cô góp, lỗi cảm biến đo tốc độ,... hệ có thể rơi vào trạng thái làm việc hỗn loạn, dẫn đến chất lượng làm việc của hệ thống kém, thậm chí là bị phá hủy.

Như đã nêu ở trên, hiện tượng hỗn loạn là có hại cho hệ thống DFIG, tuy nhiên đến nay mới chỉ lác đác một vài nghiên cứu và chưa bao phủ hết được các vấn đề về hỗn loạn đối với DFIG. Như vậy, nhiệm vụ nghiên cứu xác định được các vấn đề hỗn loạn trong hệ thống DFIG là quan trọng cho việc thiết kế bộ điều khiển cho hệ thống.

Bài báo đã phân tích một số nguyên nhân khiến DFIG rơi vào trạng thái làm việc hỗn loạn. Đồng thời, thông qua phân tích dựa trên cơ sở lý thuyết và qua mô phỏng đã minh chứng sự hỗn loạn đối với hệ thống khi các tham số của cuộn dây stator thay đổi đến một giá trị nhất định. Xác định được vùng làm việc gây ra hỗn loạn của hệ thống, từ đó thuận lợi cho việc tham số hóa hệ thống, vận dụng các thuật toán điều khiển để xây dựng bộ điều khiển nhằm tránh hoặc triệt tiêu sự hỗn loạn đó, giúp hệ thống làm việc tin cậy và có chất lượng tốt hơn.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin gửi lời cảm ơn đến Ban lãnh đạo và các chuyên gia thuộc Viện Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa - Đại học Bách khoa Hà Nội đã luôn hỗ trợ trong quá trình nghiên cứu tại đây. Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong Đề tài mã số T2022-DT-003.

Tài liệu tham khảo

- [1] Chau KT, Zheng Wang (2011) *Chaos in Electric Driver Systems – Analysis, Control and Application*. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd
- [2] Đạo NV, Chi TK, Dũng N(2005) *Nhập môn động lực học phi tuyến và chuyển động hỗn loạn*. NXB ĐH Quốc gia Hà Nội
- [3] Guanrong Chen, Xinghuo Yu (2003). *Chaos Control – Theory and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- [4] Hòa NL, Dũng LT, Mai NH, Vinh ĐQ (2014) *Điều khiển phân nhánh và hỗn loạn trong mô hình động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu*. Tạp chí KH&CN Đại học Đà Nẵng, quyển 1, số 11(84), pp.15-20
- [5] My ĐHN, Dũng LT, Quang NP, Dịch NQ (2018) *Đặc điểm hỗn loạn của hệ truyền động không đồng bộ xoay chiều ba pha điều khiển tựa theo từ thông rotor*. Chuyên san Đo lường, Điều khiển và Tự động hóa, vol. 21, no. 3, pp. 3-9
- [6] My ĐHN, Dũng LT, Quang NP (2019) *Điều khiển trượt thích nghi triệt tiêu trạng thái hỗn loạn của hệ truyền động không đồng bộ xoay chiều ba pha điều khiển tựa theo từ thông rotor*. Hội nghị - Triển lãm quốc tế lần thứ 5 về Điều khiển và Tự động hóa (VCCA), ISBN: 978-604-95-0875-2
- [7] Ghambar Ali Alamdar, Saeed Balochian (2019) *Chaos Control of Permanent Magnet Synchronous Generator via Sliding Mode Controller*. Majlesi Journal of Electrical Engineering, vol. 13, no. 01
- [8] Zhong Li, Jin Bae Park, Young Hoon Joo, Bo Zhang, and Guanrong Chen (2002) *Bifurcations and Chaos in a Permanent-Magnet Synchronous Motor*. IEEE transactions on circuits and systems, vol. 49, no. 3, pp. 383-387
- [9] Manal Messadi, Karim Kemih, Malek Ghanes, Adel Mellit (2015) *Predictive control of a chaotic permanent magnet synchronous generator in a wind turbine system*. Chinese Physical Society and IOP Publishing, vol. 24, no. 1
- [10] Imane Idrissi, Rachid El Bachtiri, Houcine Chafouk, and Maha Khanfara(2019) *Fault Diagnosis of Stator Inter-Turn Short Circuit in Doubly Fed Induction Generator of Wind Turbine*. 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT'19), Paris, France
- [11] Kuichao Ma, Jiangsheng Zhu, Mohsen Soltani, Amin Hajizadeh, and Zhe Chen (2020) *Inter-Turn Short-Circuit Fault Ride-Through for DFIG Wind Turbines*. 21st IFAC World Congress 2020 - Berlin, Germany, pp.12757–12762
- [12] Mellah H, Arslan S, Sahraoui H, Hemsas KE, and Kamel S (2022) *The Effect of Stator Inter-Turn Short-Circuit Fault on DFIG Performance Using FEM*. Engineering, Technology & Applied Science Research, vol. 12, no. 3, pp.8688-8693
- [13] Liserre M, Cardenas R, Molinas M, and Rodriguez J (2011) *Overview of multi MW wind turbines and wind parks*. IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 58, no. 4, pp. 1081–1095
- [14] Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Nguyễn Phùng Quang (1998) *Máy điện dị bộ nguồn kép dùng làm máy phát trong hệ thống phát điện chạy sức gió: Các thuật toán điều chỉnh bảo đảm phân ly giữa mômen và hệ số công suất*. The 3rd Vietnam Conference on Automation (VICA3), pp. 413-437
- [15] Quang NP (2014) *General overview of control problems in wind power plants*. Journal of Computer Science and Cybernetics, vol. 30, no. 4, pp. 313-334
- [16] Muller S, Deicke M, and De Doncker RW (2002) *Doubly fed induction generator systems for wind turbines*. IEEE Ind. Appl.Mag, vol. 08, no.03, pp. 26-33
- [17] Pena R, Clare JC, Asher GM (1996) *Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation*. IEE Proceedings-Electric Power Applications, vol. 143, no. 03, pp. 231-241
- [18] Quang NP, Dittrich JA (2015) *Vector Control of Three-Phase AC Machines – System Development in the Practice*. 2nd Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [19] Li Z, Wong SC, Chi K.TSE, Chu G (2010) *Bifurcation in wind energy generation systems*. International Journal of Bifurcation and Chaos, vol. 20, no. 11, pp. 3795–3800
- [20] Xue H, Wang Y (2010) *Fuzzy Optimal Control of Doubly Fed Induction Wind Power Generator Systems*. International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)
- [21] Jiang D, Yu W, Wang J, Zhong G, Zhou Z (2020) *Dynamic Analysis of DFIG Fault Detection and its Suppression Using Sliding Mode Control*. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 11, no. 01, pp. 643-656
- [22] Văn CN, Hải NT, Quang NP (2021) *Hệ thống phát điện sức gió dùng máy phát không đồng bộ nguồn kép và nguy cơ xảy ra hỗn loạn*. Hội nghị - Triển lãm quốc tế lần thứ 6 về Điều khiển và Tự động hóa (VCCA)
- [23] Yu WX, Jiang D, Wang JN, và các cộng sự (2020) *Rotor-current-based fault detection for doubly-fed induction generator using new sliding mode observer*. Transactions of the Institute of Measurement and Control, vol.42, no. 16, pp. 3110-3122
- [24] Yang L, Ma X, Dai D (2009) *Hopf bifurcation in doubly fed induction generator under vector control*. Chaos, Solitons and Fractals, vol. 41, no. 05, pp. 2741–2749
- [25] Dehong Xu, Frede Blaabjerg, Wenjie Chen, Nan Zhu (2018) *Advanced control of doubly fed induction generator for wind power systems*. IEEE Press Series on Power and Energy Systems