

# Nghiên cứu xác định tần số và dạng dao động kết cấu trụ điện gió trong điều kiện vận hành

Research on determining the frequency and mode shape of wind turbine tower under operating conditions

> PGS.TS KHÚC ĐĂNG TÙNG\*, THS NGUYỄN TIẾN PHÁT, PGS.TS LÊ BÁ DANH, THS NGUYỄN HÙNG SƠN

Khoa Xây dựng Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

\*Email: tungkd@huce.edu.vn

## TÓM TẮT

Xác định tần số và dạng dao động của kết cấu trụ điện gió trong điều kiện vận hành thực tế thường khá khó khăn, do kết cấu chịu nhiều dao động kích thích từ cánh quạt và hệ thống rotor. Các dao động kích thích này luôn thay đổi do phụ thuộc vào tốc độ và hướng gió, và thường có phổ tần số trùng lặp với một số tần số dao động riêng của kết cấu. Bài báo này nghiên cứu các phương pháp nhận dạng tần số như FFT, FDD, SSI-Cov và SSI-Data dựa trên kết quả đo đạc gia tốc trực tiếp từ một trụ điện gió trên đất liền trong điều kiện thực tế. Các kết quả nhận dạng được so sánh và đánh giá nhằm lựa chọn được phương pháp phù hợp cho kết cấu trụ điện gió phổ biến đang được khai thác tại Việt Nam.

**Từ khóa:** Trụ điện gió, tần số dao động, quan trắc, SSI-Cov.

## ABSTRACT

Determining the frequency and mode shape of wind turbine towers under operating conditions is often quite difficult because the structure is subjected to many excitation oscillations from the blades and rotor system. These excitation oscillations are always changing due to wind speed and direction; and often have a frequency spectrum that overlaps with some natural frequencies of the structure. This paper studies some frequency identification methods such as FFT, FDD, SSI-Cov and SSI-Data based on the results of direct acceleration measurements from a real onshore wind turbine tower. The identification results are compared and evaluated to select a suitable method for the common wind power towers being used in Vietnam.

**Keywords:** Wind turbine tower, natural frequency, monitoring, SSI-Cov.

## 1. GIỚI THIỆU CHUNG

Trong bối cảnh thúc đẩy phát triển năng lượng tái tạo tại Việt Nam, các nhà máy điện gió đã và đang được triển khai rộng rãi trên

cả đất liền và ngoài khơi. Trong các giải pháp kết cấu, tháp trụ điện gió bằng thép được sử dụng phổ biến nhờ khả năng chịu lực cao, có thể nâng đỡ toàn bộ cụm thiết bị gồm cánh quạt, trục rotor và buồng máy. Loại tháp này có ưu điểm trọng lượng nhẹ, thi công nhanh và chi phí hợp lý, do đó hiện được áp dụng cho hầu hết các nhà máy điện gió tại Việt Nam.

Trong quá trình vận hành, kết cấu trụ điện gió phải chịu tác động đồng thời của nhiều loại tải trọng phức tạp như tải trọng bản thân, tải trọng gió, tải trọng quán tính quay của cánh quạt và các tải trọng cực đoan khác trong điều kiện gió bão hoặc sự cố khẩn cấp. Những tác động này sẽ tạo ra các dao động cưỡng bức liên tục gây nên nhiều hiện tượng bất lợi cho kết cấu thép của trụ tháp như hiện tượng mỏi, hiện tượng tự lỏng bu lông liên kết. Đặc biệt hơn nữa, nếu các dao động cưỡng bức trong quá trình vận hành được lặp theo một tần số gần với tần số dao động riêng của kết cấu trụ tháp, hiện tượng cộng hưởng sẽ xuất hiện và tạo ra các dao động có biên độ tăng đột biến, gây hư hỏng trục rotor, các thiết bị phát điện trong buồng máy, gây cánh quạt hoặc có thể sập đổ toàn bộ trụ điện gió. Vì vậy, việc quan trắc các tham số động học của trụ điện gió trong giai đoạn vận hành là cần thiết để nắm bắt tình trạng làm việc của kết cấu tháp tương ứng với mỗi vùng gió cụ thể tại từng nhà máy, nhằm tránh hiện tượng cộng hưởng cũng như các trạng thái hoạt động bất lợi khác.

Trong những năm gần đây, các nghiên cứu triển khai công tác quan trắc kết cấu trụ điện gió được quan tâm và bắt đầu đạt được một số kết quả. Pagnini và cộng sự [1] sử dụng dữ liệu gia tốc gắn trên một trụ điện gió để xác định được tần số dao động riêng và tỷ số tắt dần. Cunha và cộng sự [2] cũng thực hiện một nghiên cứu đo đạc kết cấu trụ điện gió trong vòng một năm và phát hiện tần số dao động kết cấu còn phụ thuộc vào các điều kiện của môi trường. Hiện tượng cộng hưởng trong kết cấu trụ điện gió có công suất 5 MW cũng đã được Hu và cộng sự [3] nghiên cứu. Song và cộng sự [4] phát triển phương pháp nhận dạng dao động tự động cho tuabin gió ngoài khơi. Các nghiên cứu kể trên tập trung sử dụng các phương pháp nhận dạng cơ bản dựa trên nền phân tích FFT và chưa có đánh giá liên quan đến điều kiện vận hành. Một số các phương pháp phân tích ứng xử động năng cao cũng đã được thử nghiệm như Kim và cộng sự [5] lựa chọn phương pháp Frequency Domain Decomposition (FDD) để nhận dạng dao động của một trụ điện gió ngoài khơi, chỉ ra được xu hướng giảm tần số khi tốc độ gió tăng. Hines và cộng sự [6] áp dụng thành công phương pháp Stochastic Subspace Identification (SSI-Cov) nhằm xác định được các dạng dao động bậc cao của trụ điện gió. Các nghiên cứu đều cho thấy công tác xác định được tần số dao động của kết cấu trụ điện gió ở điều

kiện vận hành khá khó khăn, nhiều tần số dao động không được nhận dạng hoặc bị nhiễu bởi các dao động của cánh quạt hoặc thiết bị quay khác. Nghiên cứu cũng cho thấy các tần số dao động thấp nằm sát nhau, phổ dao động bị chồng lấn và tiềm ẩn nhiều nguy cơ xảy ra hiện tượng cộng hưởng khi điều kiện vận hành thay đổi.

Tại Việt Nam, mặc dù các dự án nhà máy điện gió đang được phát triển rộng khắp, các nghiên cứu về quan trắc và đánh giá kết cấu trụ điện gió trong điều kiện vận hành thực tế vẫn còn hạn chế. Có thể nhận thấy rằng tần số dao động của trụ điện gió phụ thuộc đáng kể vào điều kiện gió tại từng vị trí cụ thể, do đó việc áp dụng các kết quả và số liệu nghiên cứu từ nước ngoài vào điều kiện Việt Nam còn nhiều hạn chế. Xuất phát từ thực trạng này, bài báo bước đầu tiến hành thử nghiệm, đánh giá và so sánh hiệu quả của một số phương pháp xác định tần số và dạng dao động của trụ điện gió trong điều kiện vận hành tại một dự án thực tế. Việc xác định được các tham số động học này là tiền đề cho các phân tích nhằm tránh hiện tượng cộng hưởng, cũng như cho việc đánh giá sức khỏe kết cấu của trụ điện gió trong các nghiên cứu tiếp theo.

**2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT**

**2.1. Mô hình kết cấu và phương trình động học**

Trụ điện gió thường được chế tạo bằng thép hàn, mặt cắt ngang trụ tháp có dạng vành khăn. Sơ đồ kết cấu trụ điện gió được xem như cột ngầm tại chân móng và mang tải tập trung của cụm thiết bị bao gồm cánh quạt, trục rotor và buồng máy trên đỉnh. Các trụ điện gió hiện đại thường có chiều cao từ 80 đến 150 m, với đường kính chân tháp khoảng 4 - 5 m và đường kính đỉnh khoảng 3 - 3,5 m.

Để đơn giản hóa phân tích lý thuyết, trụ điện gió được mô hình hóa như dầm công xôn. Với tỷ lệ chiều cao trên đường kính lớn hơn 10, dầm công xôn này đủ mảnh để bỏ qua biến dạng cắt; khi đó cho phép xây dựng công thức xác định tần số riêng và dạng dao động theo lý thuyết chính xác để so sánh với kết quả thí nghiệm.

Theo giả thiết Euler-Bernoulli, phương trình dao động tự do của trụ tuabin gió được viết dưới dạng:

$$EI(z) \frac{\partial^4 w(z, t)}{\partial z^4} + m(z) \frac{\partial^2 w(z, t)}{\partial t^2} = 0 \tag{1}$$

Trong đó,  $w(z, t)$  là chuyển vị ngang tại vị trí  $z$  và thời điểm  $t$ ,  $EI(z)$  là độ cứng uốn thay đổi theo chiều cao,  $m(z)$  khối lượng phân bố theo chiều cao

Với nghiệm dao động điều hòa:

$$w_n(z, t) = \phi_n(z) \cdot q_n(t) \tag{2}$$

Trong đó:  $\phi_n(z)$  là dạng dao động riêng (mode shape),  $q_n(t)$  là biên độ dao động phụ thuộc thời gian và có dạng  $q_n(t) = A_n \cos(\omega_n t) + B_n \sin(\omega_n t)$ ,  $\omega_n$  là tần số dao động riêng của hệ.

**2.2. Kết quả tần số dao động riêng theo lý thuyết**

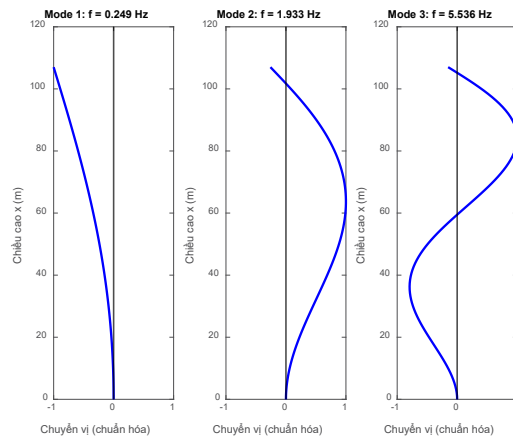
Trụ điện gió được quan trắc trong nghiên cứu này là loại phổ biến được lắp đặt trên đất liền tại Việt Nam, có công suất 3,8 MW. Tháp có chiều cao 107 m được lắp dựng từ năm mô đun sử dụng liên kết mặt bích thông qua hệ thống bu lông cường độ cao. Các thông số cơ bản của trụ điện gió này được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Các thông số cơ bản về kết cấu và chế độ hoạt động của trụ điện gió

Thông số	Giá trị
Chiều cao tháp	107 m
Số cánh quạt	3
Đường kính cánh	117 m
Tổng trọng lượng cụm thiết bị	150 tấn
Tốc độ gió định mức	11,5 m/s
Tốc độ gió khởi động	3,5 m/s
Tốc độ gió ngắt	25 m/s
Tốc độ quay giới hạn	15 vòng/phút = 0,25 Hz

Với các thông số cơ bản như trên, tần số dao động tự nhiên của trụ tháp của ba dạng dao động đầu tiên như sau: dạng dao động 1 có tần số  $f = 0,249$  Hz, dạng dao động 2 có tần số  $f = 1,933$  Hz, dạng dao động 3 có tần số  $f = 5,536$  Hz (Hình 1). Có thể thấy rằng tần số dao động riêng đầu tiên có giá trị rất sát với tần số kích thích đầu tiên của hệ thống quay bao gồm cánh quạt và rotor (1P) tại tốc độ lớn nhất (1P = 0,25 Hz). Tuy nhiên, đây là giá trị 1P giới hạn và được điều khiển không xảy ra trong thực tế vận hành.

Dạng dao động uốn cơ bản xuất hiện ở khoảng 0,249 Hz là phù hợp với dải 0,2–0,5 Hz được báo cáo trong các nghiên cứu khác về các trụ điện gió có chiều cao tương tự. Ba dạng dao động khác chủ yếu biểu thị dao động uốn theo hướng chính (fore-aft) và hướng bên (side-side), trong khi các dạng dao động cao hơn có thể bao gồm dao động xoắn hoặc dao động cục bộ.

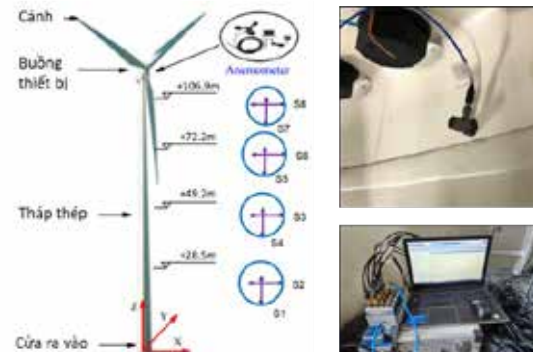


Hình 1. Ba dạng dao động đầu tiên của trụ điện gió theo lý thuyết

**3. THÍ NGHIỆM NGOÀI HIỆN TRƯỜNG**

**3.1. Sơ đồ bố trí thí nghiệm**

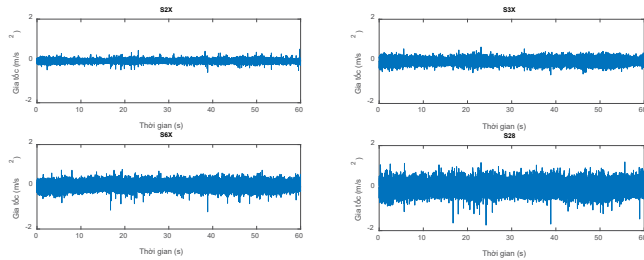
Để thu thập được các ứng xử động của trụ điện gió ở điều kiện vận hành, hệ thống gồm 8 cảm biến gia tốc đã được lắp đặt tại các cao độ 28,5 m, 49,2 m, 72,2 m và 106,9 m ở mặt trong của thành tháp. Hệ tọa độ được thiết lập với gốc tại tâm tháp, trong đó hai phương ngang vuông góc lần lượt được quy ước là trục X và trục Y, còn phương thẳng đứng dọc theo chiều cao tháp được ký hiệu là trục Z. Theo bố trí này, các cảm biến S2, S3, S6 và S8 được sử dụng để ghi nhận dao động theo phương X, trong khi các cảm biến S1, S4, S5 và S7 đo dao động theo phương Y (Hình 2). Tuy nhiên, trong quá trình đo đạc, cảm biến S7 đặt tại đỉnh tháp theo phương Y bị hỏng, dẫn đến việc khó đảm bảo độ chính xác trong việc xác định dạng dao động theo phương này. Do đó, nghiên cứu này tập trung phân tích đặc trưng tần số và dạng dao động uốn chủ yếu theo phương X; các dạng dao động xoắn sẽ khó có thể nhận dạng thành công.



Hình 2. Sơ đồ bố trí cảm biến và hệ thống thu thập dữ liệu

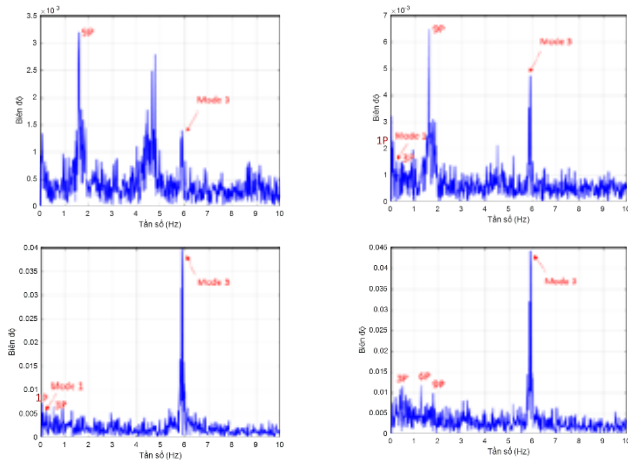
### 3.2. Nhận dạng tần số sử dụng phương pháp cơ bản

Dữ liệu gia tốc từ các cảm biến được thu thập trong vòng một ngày theo các múi giờ khác nhau để có thể đánh giá sự ảnh hưởng của tốc độ gió khác nhau (theo các múi giờ khác nhau) tới kết quả đo. Tốc độ quay của rotor trong ngày đo đặc được thu thập từ hệ thống SCADA của trụ điện gió, có giá trị biến thiên từ 7,15 đến 11,5 vòng/phút. Khi đó tần số kích thích do hệ thống quay 1P nằm trong khoảng 0,12-0,192 Hz. Với loại trụ điện gió đang quan trắc có 3 cánh quạt, các bội số 3 lần của P như 3P, 6P, 9P ... sẽ có thể được hình thành và tạo ra các dao động kích thích có các tần số tương ứng. Hình 3 minh hoạ mẫu dữ liệu thô được thu thập trực tiếp từ các cảm biến S2, S3, S6 và S8 được bố trí lần lượt từ dưới lên trên; thời điểm thu thập tốc độ quay của rotor là 11,5 vòng/phút hay tần số 1P là 0,192 Hz. Sơ bộ có thể thấy chất lượng dữ liệu khá ổn định, cường độ dao động của kết cấu trụ điện gió tăng dần từ mặt cắt gần sát đáy tháp (cao độ +28,5 m) lên trên đỉnh tháp (cao độ +106,9 m) là phù hợp với lý thuyết.



Hình 3. Dữ liệu gia tốc của các cảm biến

Giai đoạn đầu tiên, các kết quả đo gia tốc được phân tích nhanh sử dụng phương pháp biến đổi Fourier (FFT) nhằm đánh giá khả năng xác định các đặc trưng dao động của hệ bằng phân tích cơ bản. Theo phân tích FFT, chỉ cần dựa trên thông số của một cảm biến để xác định tần số dao động. Tuy nhiên, do có nhiều cảm biến được gắn vào kết cấu, phân tích được thực hiện tại tất cả 4 cao độ mặt cắt nhằm đánh giá vị trí tối ưu có thể thu thập được nhiều tần số dao động nhất. Chú ý rằng không thể xác định được dạng dao động qua phân tích cơ bản này.



Hình 4. Biểu đồ FFT của dữ liệu gia tốc

Hình 4 thể hiện kết quả phân tích FFT của các bộ dữ liệu gia tốc minh hoạ trên Hình 3. Có thể thấy rằng các biểu đồ phân tích từ bốn cảm biến gia tốc đều đưa ra một giá trị tần số nổi bật có giá trị khoảng 5,8 Hz, khá sát với giá trị tần số dao động riêng 3 của trụ điện gió là 5,536 Hz. Bên cạnh đó, tần số kích thích 9P (1,728 Hz) cũng có thể quan sát thấy rõ ràng tại 3 cảm biến, và tần số kích thích 6P (1,152 Hz) được quan sát thấy tại 1 cảm biến. Do giá trị tần số dao động riêng 2 của trụ điện gió (1,93 Hz) khá sát với tần số kích thích 9P, tần số dao động riêng 2 hầu như không nhận diện được do hiện tượng chồng lấn phổ. Hiện tượng chồng lấn phổ cũng xảy ra tương

tự với nhóm các tần số sát nhau bao gồm: dao động riêng số 1 của trụ điện gió (0,249 Hz), tần số kích thích 1P (0,192 Hz) và 3P (0,576 Hz). Như vậy, việc sử dụng phương pháp cơ bản phân tích FFT sẽ kém hiệu quả cho việc phân tách các tần số dao động sát nhau. Ngoài ra như đã trình bày ở trên, việc sử dụng phương pháp này sẽ không thể xác định được dạng dao động của kết cấu. Các nhược điểm này hy vọng sẽ được giải quyết phần nào khi sử dụng các phương pháp phân tích nâng cao ở phần sau.

### 3.3. Nhận dạng tần số và dạng dao động sử dụng các phương pháp nâng cao

Các tham số động học như tần số dao động, dạng dao động, tỷ số cản có thể được xác định thông qua phân tích dữ liệu động bao gồm gia tốc, vận tốc, ứng suất hoặc chuyển vị động thông qua một số các phương pháp nâng cao bao gồm phương pháp peak-picking [7], phương pháp ARX [8], thuật toán hiện thực tổng quát (GRA) [9], phân tích phân rã miền tần số (FDD) [10], nhận dạng không gian con ngẫu nhiên điều khiển bởi hiệp phương sai (SSI-Cov) [11], và nhận dạng không gian con ngẫu nhiên điều khiển bởi dữ liệu (SSI-Data) [12]. Trong số các phương pháp trên, phương pháp SSI-Cov, SSI-Data và FDD là những phương pháp nhận dạng khá hiệu quả chỉ dựa vào dữ liệu thu thập được trực tiếp từ kết cấu mà không cần quan tâm đến dữ liệu của tải trọng kích thích, phù hợp với kết cấu trụ điện gió khi không thể xác định được đầy đủ và chính xác tải trọng gió tác động lên hệ kết cấu trụ điện gió và cánh quạt.

#### 3.3.1. Nhóm phương pháp nhận dạng không gian con ngẫu nhiên

Phương pháp nhận dạng không gian con ngẫu nhiên SSI-Cov và SSI-Data đều có khả năng trích xuất các đặc trưng động học của kết cấu, bao gồm tần số dao động riêng, tỷ số cản, và dạng dao động từ dữ liệu đo gia tốc. Hệ thống được mô tả bởi mô hình trạng thái tuyến tính bất biến theo thời gian (LTI) như Eq. (3)-(4).

$$x_{k+1} = Ax_k + w_k \quad (3)$$

$$y_k = Cx_k + v_k \quad (4)$$

trong đó,  $x_k$  là vector trạng thái của hệ thống tại thời điểm  $k$ ,  $y_k$  là vector đo đầu ra,  $A$  và  $C$  lần lượt là ma trận chuyển trạng thái và quan sát;  $w_k, v_k$  là nhiễu trắng ngẫu nhiên.

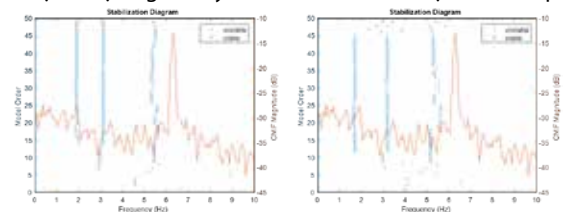
SSI-Cov khai thác ma trận hiệp phương sai của dữ liệu đo để xây dựng ma trận Hankel, sau đó thực hiện phân tích giá trị suy biến (SVD).

$$R_{yy}(\tau) = E[y_k y_{k-\tau}^T] \quad (5)$$

$$H = U\Sigma V^T \quad (6)$$

trong đó, ma trận  $U$  chứa thông tin về không gian trạng thái; các giá trị trong  $\Sigma$  đại diện cho năng lượng của từng mode; các thành phần  $U, \Sigma$  và  $V$  được sử dụng để ước lượng ma trận trạng thái  $A$ , từ đó xác định được tần số dao động riêng, tỷ số cản, và dạng dao.

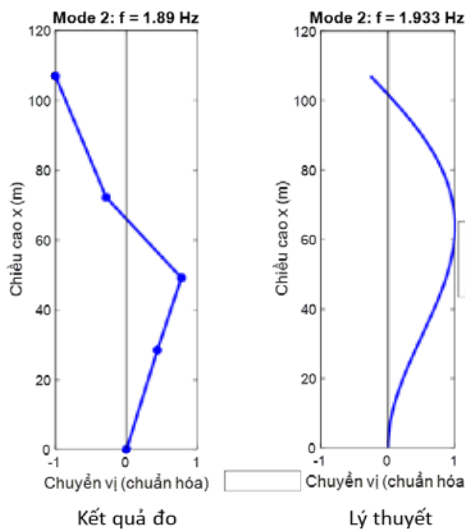
Trong khi SSI-Cov dựa trên phân tích ma trận hiệp phương sai để xác định các trạng thái dao động, SSI-Data khai thác trực tiếp dữ liệu thời gian đo được, cho phép mô hình hóa ứng xử động học của hệ mà không cần tiền xử lý hiệp phương sai. Về cơ bản, SSI-Data vẫn tuân theo cùng khung lý thuyết mô hình không gian trạng thái, nhưng phương pháp này xây dựng ma trận Hankel trực tiếp từ dữ liệu đo  $y_k$  và áp dụng phân tích giá trị suy biến (SVD) để tách tín hiệu chính khỏi nhiễu. Điểm mạnh của SSI-Data là khả năng làm việc trực tiếp với dữ liệu đo ngắn hạn và phù hợp hơn cho việc phân tích các bộ dữ liệu ngắn, tuy nhiên đòi hỏi mức độ nhiễu thấp.



Hình 5. Biểu đồ ổn định khi phân tích bằng SSI-Cov (trái), và SSI-Data (phải)

Hình 5 thể hiện kết quả khi phân tích bằng cả hai phương pháp SSI-Cov và SSI-Data. Từ biểu đồ ổn định của phương pháp SSI-Cov có thể thấy rằng tần số dao động dạng 2 và tần số dao động dạng 3 của kết cấu (tương ứng là 1,89 Hz và 5,37 Hz) được phát hiện và ổn định. Kết quả này khá sát với kết quả được tính toán lý thuyết là 1,93 Hz và 5,53 Hz. Trong khi đó, kết quả khi phân tích bằng SSI-Data cho thấy thuật toán đã phát hiện ra hai tần số dao động ổn định có giá trị tương ứng là 1,71 Hz và 5,27 Hz. Mặc dù tần số có giá trị 5,27 Hz cơ bản khá sát với tần số dao động dạng 3 theo lý thuyết, tần số có giá trị 1,71 Hz có lẽ là tần số kích thích 9P (có giá trị 1,73 Hz) đã bị nhiễu vào trong dữ liệu thu thập được. Bên cạnh đó, hàm chỉ thị chế độ phức (CMIF) cho thấy rằng độ ổn định của kết quả tính toán từ phương pháp SSI-Cov tốt hơn phương pháp SSI-Data, đặc biệt tại tần số dao động dạng 3. Điều này cũng dễ hiểu khi phương pháp SSI-Data khá nhạy cảm với dữ liệu bị nhiễu, vốn là một đặc điểm quan trọng của dữ liệu đo đạc từ trụ điện gió ở trạng thái vận hành. Cả hai phương pháp đều không thể nhận diện được tần số dao động dạng 1.

Từ các phân tích trên, nhóm tác giả đã lựa chọn phương pháp SSI-Cov để xác định dạng dao động của kết cấu. Do số lượng các cảm biến lắp đặt hạn chế (bốn cảm biến trên dọc chiều cao của trụ tháp), chỉ dạng dao động dạng 2 được phát hiện và kết quả được thể hiện trên Hình 6. So sánh dạng dao động 2 xác định từ kết quả đo và kết quả lý thuyết cho thấy hình dạng cũng chỉ ở mức độ tạm chấp nhận, điều này có thể lý giải do số lượng cảm biến khá hạn chế nên không thể nhận dạng được chính xác các dạng dao động bậc cao.



Hình 6. Dạng dao động 2 của kết cấu xác định theo phương pháp SSI-Cov

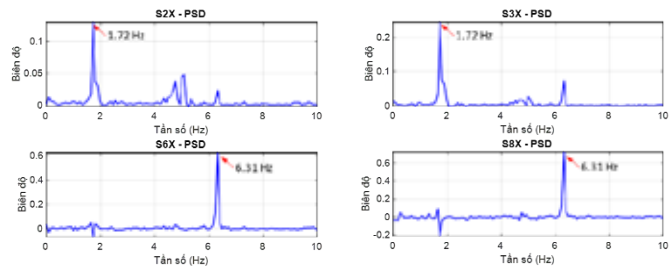
### 3.3.2. Phương pháp phân tích phân rã miền tần số

Phương pháp phân tích phân rã miền tần số (FDD) là một kỹ thuật nhận dạng các tham số động học nằm cùng nhóm với phương pháp SSI khi chỉ cần sử dụng dữ liệu đo đạc được từ kết cấu, thường là dữ liệu gia tốc. Phương pháp này dựa trên phân tích ma trận mật độ phổ công suất (Power Spectral Density - PSD) của dữ liệu đo đầu ra, được biểu diễn dưới dạng phân tích giá trị suy biến.

$$S_{yy}(f) = U(f) S(f) U^H(f) \quad (7)$$

trong đó,  $S_{yy}(f)$  là ma trận PSD,  $U(f)$  là ma trận các vector riêng biểu diễn dạng dao động, còn  $S(f)$  là ma trận đường chéo chứa các giá trị suy biến, trong đó giá trị lớn nhất tương ứng với năng lượng dạng dao động chi phối tại tần số  $f$ .

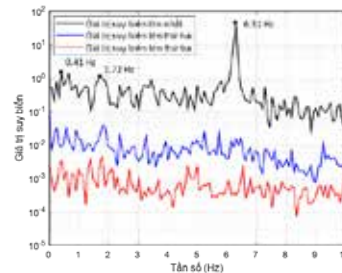
Một phiên bản cải tiến có tên gọi là Refined FDD (rFDD), phương pháp này bổ sung bước tính ma trận PSD từ hàm tương quan (correlation function) trong miền thời gian, giúp giảm nhiễu và nâng cao độ chính xác của việc trích xuất mode dao động.



Hình 7. Biểu đồ phổ công suất của từng cảm biến

Hình 7 thể hiện kết quả tính toán ma trận PSD của các cảm biến. Kết quả cho thấy với cảm biến S2X và S3X thì tần số 1.72 Hz xuất hiện rõ ràng, còn với cảm biến S6X và S8X thì tần số 6.31 Hz lại nổi bật lên. Tiếp theo, các tần số dao động riêng của kết cấu được xác định thông qua các đỉnh (peaks) trên phổ giá trị suy biến tương ứng với giá trị kỳ dị lớn nhất của ma trận  $S(f)$ . Tại các tần số này, dạng dao động riêng được trích xuất từ cột tương ứng của ma trận vector suy biến  $U(f)$ .

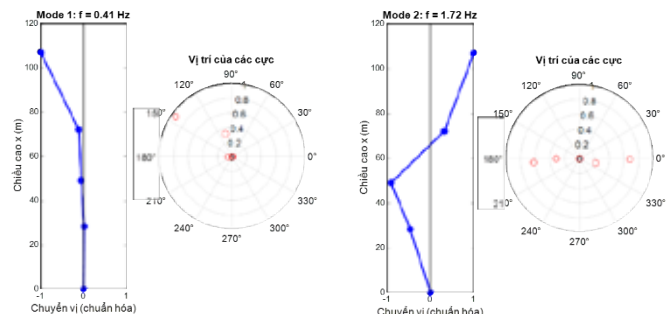
Hình 8 thể hiện phổ giá trị suy biến của 3 giá trị suy biến lớn nhất. Trong đó, giá trị suy biến thứ nhất thể hiện thành phần năng lượng dao động chi phối nhất tại mỗi tần số; và do đó được sử dụng để xác định tần số và dạng dao động chính của kết cấu. Ngược lại, các giá trị suy biến thứ hai và thứ ba chỉ mang ý nghĩa đáng kể khi tồn tại các mode dao động gần nhau hoặc trùng tần số, chúng được dùng để tách biệt các dạng dao động, tần số gần nhau đó một cách chính xác hơn.



Hình 8. Biểu đồ phổ giá trị suy biến

Hình 7 và Hình 8 thể hiện kết quả khi phân tích bằng phương pháp FDD đã cho thấy tần số dạng dao động số 2, số 3 của kết cấu lần lượt là 1,72 Hz và 6,31 Hz. Tương tự với kết quả từ nhóm hai phương pháp SSI và phân tích FFT, tần số dạng dao động 1 (0,249 Hz theo lý thuyết) rất khó có thể xác định mặc dù tại khu vực này có xuất hiện đỉnh tương ứng tại vị trí 0,41 Hz.

Kết quả của của 2 dạng dao động 1 và 2 của kết cấu xác định theo phương pháp FDD (Hình 9) có thể khẳng định thêm rằng giá trị tần số bậc 1 là khó xác định (không ổn định) khi mà có các tọa độ cực không thẳng hàng. Còn về dạng dao động thứ 2 cho thấy hình dạng tương đồng với phương pháp SSI-Cov đồng thời các tọa độ cực khá thẳng hàng.



Hình 9. Dạng dao động 1 và 2 của kết cấu xác định theo phương pháp FDD

Kết quả phân tích từ các phương pháp FDD, SSI-Cov và SSI-Data được tổng hợp và so sánh như Bảng 2 dưới đây. So với lý thuyết, sai lệch của SSI-Cov và SSI-Data đều dưới 10%, trong khi FDD có sai lệch lớn hơn, đặc biệt ở tần số dao động 3. Trong ba phương pháp, SSI-Cov thể hiện độ ổn định cao nhất khi đã tách được tần số dao động riêng của kết cấu trụ tháp ra khỏi các tần số kích thích của thiết bị quay (nP). Phương pháp này cũng thành công khi xác định được dạng dao động 2 khá gần với kết quả theo lý thuyết. Cả ba phương pháp trên đều không thể xác định được rõ ràng tần số của dạng dao động 1 do vấn đề chống lẫn phổ dao động của dạng dao động này với hai dạng dao động kích thích của thiết bị quay là 1P và 3P. Việc xác định được dạng dao động này có thể đòi hỏi sử dụng loại cảm biến phù hợp hơn với các dao động có tần số thấp, ví dụ như cảm biến đo chuyển vị động hoặc vận tốc.

Bảng 2. So sánh kết quả các phương pháp phân tích dữ liệu và lý thuyết

Dạng dao động	SSI-Cov (Hz)	SSI-Data (Hz)	FDD (Hz)	Lý thuyết (Hz)
1	-	-	0,41 (Không rõ ràng)	0,249
2	1,89	1,71 (trùng tần số 9P)	1,72 (trùng tần số 9P)	1,933
3	5,37	5,27	6,31	5,536

#### 4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Trong nghiên cứu này, một hệ thống quan trắc đánh giá kết cấu trụ điện gió được triển khai trên một tuabin có công suất 3,8 MW đặt trên đất liền tại Việt Nam. Hệ thống bao gồm 8 cảm biến gia tốc đặt tại bốn cao độ khác nhau từ chân tháp lên đỉnh tháp. Xuất phát từ thực tế công tác xác định tần số dao động của kết cấu trụ điện gió trong quá trình vận hành khá khó khăn và phức tạp do kết cấu chịu nhiều tác động kích thích quay từ cánh quạt và rotor. Trong khi đó, việc xác định được tần số dao động và dạng dao động của kết cấu trụ điện gió có thể giúp công tác vận hành tránh được hiện tượng cộng hưởng cũng như giúp phát hiện được các thay đổi về độ cứng của kết cấu cũng như cơ cấu quay phát điện, báo hiệu sớm các hư hỏng. Dựa trên dữ liệu thực tế đo được, nhóm tác giả đã tiến hành phân tích dao động, nhận dạng tham số động học bằng một số các phương pháp khác nhau nhằm đưa ra phương pháp hiệu quả nhất với loại hình kết cấu trụ điện gió. Một số kết luận chính có thể tóm tắt như sau:

- Ba tần số dao động riêng đầu tiên của kết cấu trụ điện gió có công suất 3,8 MW, chiều cao 107 m được xác định theo lý thuyết lần lượt là 0,249 Hz - 1,933 Hz - 5,536 Hz. Kết quả này phù hợp với kết quả của nhiều nghiên cứu khác cũng như nằm trong phạm vi khuyến cáo của các thiết kế kết cấu trụ điện gió bằng thép.
- Một số phương pháp phân tích dữ liệu đo đạc đã được áp dụng bao gồm FFT, SSI-Cov, SSI-Data và FDD. Nhìn chung các phương pháp đều có thể xác định được dạng dao động 2 và 3 của kết cấu trụ điện gió. Trong số các phương pháp này, SSI-Cov là thuật toán mang lại kết quả có độ chính xác và ổn định nhất, khá sát với kết quả tính toán lý thuyết.
- Các phương pháp thử nghiệm đều chưa thể phát hiện được tần số dao động 1 do hiện tượng chống lẫn phổ dao động của dạng dao động này với hai dạng dao động kích thích của thiết bị quay là 1P và 3P. Việc xác định được dạng dao động này sẽ đòi hỏi một loại cảm biến phù hợp hơn với các dao động có tần số thấp.
- Cũng do phát hiện sự chống lẫn tần số dao động 1 và hai tần số dao động kích thích từ thiết bị quay 1P và 3P, tiềm ẩn khả năng

kết cấu trụ điện gió xuất hiện hiện tượng cộng hưởng, đặc biệt khi tốc độ gió lớn dẫn đến tốc độ quay của cánh quạt lớn. Vì vậy, việc quan trắc dài hạn hơn là cần thiết, đặc biệt tại các mùa có tốc độ gió lớn tùy thuộc vào vị trí địa lý cụ thể của từng trang trại điện gió, để sớm có các chiến lược vận hành hợp lý.

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Xây dựng thông qua đề tài “Nghiên cứu xây dựng hướng dẫn quan trắc phục vụ đánh giá kết cấu trụ điện gió trên đất liền tại Việt Nam”, mã số: RD 27-24.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. L. Pagnini, G. Piccardo, M. P. Repetto. (2018). Full scale behavior of a small size vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*, 127, 41-55.
- [2]. A. Cunha, G. Oliveira, F. Magalhães, E. Caetano. (2015). One year of continuous dynamic monitoring of a wind turbine.
- [3]. W.-H. Hu và cs. (2020). Resonance monitoring of a horizontal wind turbine by strain-based automated operational modal analysis. *Energies*, 13(3), 579.
- [4]. J. Song và cs. Automated Modal Identification of Offshore Wind Turbine Structure Under Mixed Harmonic and Random Excitations. Ming-Gang and Wang, Li-Ji and SHU, Zhenru and Zhou, Kang, Automated Modal Identification of Offshore Wind Turbine Structure Under Mixed Harmonic and Random Excitations.
- [5]. W. Kim, J.-H. Yi, J.-T. Kim, J.-H. Park. (2017). Vibration-based structural health assessment of a wind turbine tower using a wind turbine model. *Procedia Engineering*, 188, 333-339.
- [6]. E. M. Hines và cs. (2023). Structural instrumentation and monitoring of the block island offshore wind farm. *Renewable Energy*, 202, 1032-1045.
- [7]. D. E. Hudson. (1995). Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering, by Anil K. Chopra, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995. No. of pages: xxviii+ 761, ISBN 0-13-855214-2. In: Wiley Online Library.
- [8]. B. Peeters. (2000). System identification and damage detection in civil engineering.
- [9]. R. A. De Callafon, B. Moaveni, J. P. Conte, X. He, E. Udd. (2008). General realization algorithm for modal identification of linear dynamic systems. *Journal of engineering mechanics*, 134(9), 712-722.
- [10]. R. Brincker, L. Zhang, P. Andersen. (2000). Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition. Paper presented at the IMAC 18: Proceedings of the International Modal Analysis Conference (IMAC), San Antonio, Texas, USA, February 7-10, 2000.
- [11]. T. J. Matarazzo, S. N. Pakzad. (2016). STRIDE for structural identification using expectation maximization: iterative output-only method for modal identification. *Journal of Engineering Mechanics*, 142(4), 04015109.
- [12]. P. Van Overschee, B. De Moor. (2012). Subspace identification for linear systems: Theory-Implementation-Applications. Springer Science & Business Media.