

## PHƯƠNG PHÁP TRỊ RIÊNG TRONG PHÂN TÍCH HIỆN TƯỢNG CỘNG HƯỞNG DƯỚI ĐỒNG BỘ. ÁP DỤNG CHO MÔ HÌNH IEEE FIRST BENCHMARK

**Lê Đức Tùng**

*Viện Điện - Trường Đại học Bách khoa Hà Nội*

### TÓM TẮT

Cộng hưởng dưới đồng bộ (Subsynchronous resonance- SSR) là một sự cố cực kỳ nguy hiểm trong hệ thống điện. Hiện tượng này có thể xuất hiện trong các hệ thống điện do tương tác của hệ thống tuabin-máy phát và lưới điện truyền tải có lắp đặt tụ bù dọc. Bài báo này trình bày phương thức áp dụng phương pháp trị riêng trong tính toán, phân tích SSR. Cơ sở lý thuyết của phương pháp trị riêng trong nghiên cứu SSR được giới thiệu chi tiết. Từ đó, tác giả áp dụng phương pháp trong phân tích, đánh giá SSR với một mô hình lưới điện chuẩn của IEEE.

**Từ khóa:** *Hệ thống điện; cộng hưởng dưới đồng bộ; lưới điện truyền tải; phương pháp trị riêng; hệ tuabin – máy phát; mô hình chuẩn IEEE first benchmark.*

*Ngày nhận bài: 07/4/2020; Ngày hoàn thiện: 12/5/2020; Ngày đăng: 20/5/2020*

## EIGENVALUE METHOD FOR SUBSYNCHRONOUS RESONANCE ANALYSIS. APPLICATION FOR IEEE FIRST BENCHMARK MODEL

**Le Duc Tung**

*School of Electrical Engineering, Hanoi University of Science and Technology*

### ABSTRACT

Subsynchronous resonance (SSR) is an extremely dangerous problem in the electrical power system. This phenomenon can occur in electrical systems due to the interaction of the turbine shaft and the transmission grid with series capacitors installation. This paper presents the eigenvalue method for SSR analysis. The theoretical basis is presented in detail. Since, we have applied this method for analysis and evaluation of SSR with a standard IEEE model.

**Keywords:** *Electrical power system; subsynchronous resonance; transmission line; eigenvalue method; turbine – generator system; IEEE first benchmark model.*

*Received: 07/4/2020; Revised: 12/5/2020; Published: 20/5/2020*

## 1. Giới thiệu

Hiện tượng cộng hưởng dưới đồng bộ được ghi nhận trên thế giới lần đầu tiên bắt nguồn từ các sự cố tại nhà máy nhiệt điện Mohave, Hoa Kỳ vào hai năm liên tiếp 1970, 1971 [1]. Sự cố cộng hưởng xảy ra là do quá trình trao đổi năng lượng không ngừng giữa phần điện (lưới điện truyền tải có lắp đặt tụ bù dọc) và phần cơ (hệ tuabin – máy phát điện) tại các tần số nhỏ hơn tần số đồng bộ, có thể gây tổn hại nghiêm trọng đến các đoạn trục nối của tuabin. Các đoạn trục trong hệ thống cơ khí có thể bị gãy và các khớp nối cơ giữa các phần khác nhau của trục cũng sẽ bị hư hỏng nặng nề. Ngoài ra, các thiết bị thông thường để kiểm soát và bảo vệ hệ thống không thể phát hiện được sự cố SSR. Các ước tính về thiệt hại do SSR tại nhà máy nhiệt điện Navajo cho thấy khi xảy ra sự cố nhà máy sẽ bị tê liệt hoàn toàn, thiệt hại về kinh tế khoảng một tỷ đô la trong vòng hai tháng [2].

Khi nghiên cứu về SSR, việc thực hiện các thí nghiệm hay thực nghiệm là không thể. Các nhà nghiên cứu tập trung vào ba phương pháp chính để phân tích hiện tượng cộng hưởng dưới đồng bộ: Phương pháp quét tần số, phương pháp mô phỏng miền thời gian và phương pháp trị riêng [3]-[8].

Phương pháp quét tần số được sử dụng để nghiên cứu sơ bộ hiện tượng SSR với kích thước lưới lớn gồm nhiều nhà máy. Cơ sở của phương pháp này là tính toán nhiều lần trở kháng và cảm kháng tương đương nhìn từ một điểm vào hệ thống theo những tần số khác nhau [3], [4]. Phương pháp này cho phép xác định được các nhà máy có xác suất xảy ra SSR. Tuy nhiên việc phân tích chi tiết sự cố trong từng nhà máy lại không thể thực hiện bằng phương pháp quét tần số.

Phương pháp mô phỏng miền thời gian thực sử dụng các mô hình đầy đủ ba pha của các phần tử trong hệ thống, thường có sẵn trong các phần mềm mô phỏng. Sau đó mô phỏng toàn hệ thống được thực hiện và đưa ra các

kết quả dưới dạng đồ thị theo thời gian thực [5]-[7]. Phương pháp này có ưu điểm là biểu thị kết quả trực quan, thích hợp để phân tích diễn biến của sự cố theo thời gian, nhưng sẽ phức tạp nếu phải xây dựng mô hình của phần tử mới, không có sẵn.

Phương pháp trị riêng dựa trên việc tuyến tính hoá các phương trình vi phân mô tả hệ thống [8]. Tiếp theo, bằng cách đánh giá trị riêng và véc-tơ riêng của ma trận trạng thái, người ta sẽ phân tích được hiện tượng SSR. Phương pháp trị riêng có nhược điểm là khó đánh giá hệ thống kích thước lớn, nhưng lại có ưu điểm là tính được chính xác tần số dao động và thể hiện rõ được mức độ tắt dần của các dao động đó một cách đơn giản. Có một số nghiên cứu sử dụng phương pháp trị riêng trong đánh giá sơ bộ SSR. Tuy nhiên vẫn chưa có một phân tích đánh giá một cách tổng quát, từ cơ sở lý thuyết đến áp dụng tính toán cho một lưới điện cụ thể.

Trong bài báo này, tác giả trình bày phương pháp trị riêng để nghiên cứu và phân tích hiện tượng SSR. Từ phân tích lý thuyết đến phương thức áp dụng để đánh giá sự cố SSR. Phần tiếp theo của bài báo sẽ giới thiệu cơ sở lý thuyết của phương pháp trị riêng trong phân tích ổn định hệ thống. Phần 3 trình bày nguyên lý áp dụng của phương pháp này trong nghiên cứu hiện tượng SSR. Ví dụ tính toán cho mô hình chuẩn IEEE cũng được phân tích và đánh giá.

## 2. Phương pháp trị riêng trong phân tích ổn định hệ thống điện

### 2.1. Cơ sở lý thuyết của phương pháp

Một hệ thống cô lập, không chịu tác động của ngoại lực có thể được mô tả bởi hệ các phương trình vi phân [9], [10]:

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n); i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

Điểm cân bằng  $\alpha=(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$  của hệ thống ứng với nghiệm của hệ phương trình:

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0; i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Với giả thiết xuất hiện các kích động vô cùng bé, do đó có thể xấp xỉ hóa hệ phương trình vi

phân chuyển động (1) thành hệ phương trình vi phân tuyến tính. Hệ vừa được xấp xỉ mô tả đúng tính chất chuyển động của hệ thống xung quanh điểm cân bằng.

Bằng cách lấy thành phần bậc nhất trong khai triển Taylor các hàm về phải của (1), ta thu được phương trình vi phân đã được tuyến tính hóa:

$$\Delta \dot{x}_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \Delta x_j. \quad (3)$$

Các đạo hàm riêng  $\partial f_i / \partial x_j$  là trị số xác định tại điểm cân bằng  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$  phụ thuộc chế độ làm việc của hệ thống. Các thành phần  $\Delta x_i$  sẽ thành biến của hệ, biểu thị độ lệch chuyển động khỏi điểm cân bằng.

Việc nghiên cứu tính ổn định theo phương trình (3) thuận lợi hơn nhiều so với phương trình (1). Lyapunov đã đưa ra các quy tắc áp dụng như sau [9], [10]:

- Nếu hệ chuyển động theo hệ phương trình vi phân đã tuyến tính hóa (3) có ổn định tiệm cận thì hệ thống ban đầu, chuyển động theo (1) cũng ổn định tiệm cận (với kích động bé).

- Nếu hệ thống chuyển động theo hệ phương trình vi phân đã tuyến tính hóa (3) không ổn định thì hệ thống ban đầu chuyển động theo (1) cũng không ổn định.

- Các trường hợp còn lại phương pháp không kết luận được, cần xét thêm thành phần bậc cao trong khai triển hoặc các tiêu chuẩn khác.

Áp dụng vào hệ thống điện, các phần tử của hệ thống điện như đường dây điện, máy biến áp, máy phát, tuabin... phải được mô hình hóa và tuyến tính hóa thành dạng hệ phương trình vi phân tuyến tính hệ số hằng có dạng [9], [10]:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= \mathbf{A} \cdot \Delta x + \mathbf{B} \cdot \Delta u \\ \Delta y &= \mathbf{C} \cdot \Delta x + \mathbf{D} \cdot \Delta u \end{aligned} \quad (4)$$

Trong đó:

$\Delta x$  là véc-tơ trạng thái kích thước  $n$

$\Delta u$  là véc-tơ đầu vào kích thước  $r$

$\Delta y$  là véc-tơ đầu ra kích thước  $m$

$\mathbf{A}$  là ma trận trạng thái của hệ thống ( $n \times n$ )

$\mathbf{B}$  là ma trận đầu vào hay ma trận điều khiển ( $n \times r$ )

$\mathbf{C}$  là ma trận đầu ra ( $m \times n$ )

$\mathbf{D}$  ma trận kích thước ( $m \times r$ )

Như vậy, ta có thể đánh giá ổn định hệ thống điện bằng cách đánh giá tính ổn định hệ thống được biểu diễn bằng hệ phương trình (4) [9].

## 2.2. Trị riêng và véc-tơ riêng

Giá trị riêng của một ma trận được xác định bởi hệ số  $\lambda$  mà ở đó tồn tại các nghiệm của phương trình:

$$\mathbf{A} \cdot \Phi = \lambda \cdot \Phi \quad (5)$$

với  $\Phi$  là véc-tơ riêng ( $n \times 1$ ) của ma trận  $\mathbf{A}$ .

Để tìm giá trị riêng, ta phải giải phương trình:

$$\det(\mathbf{A} - \lambda \cdot \mathbf{I}) = 0 \quad (6)$$

Khai triển định thức cho ta  $n$  nghiệm  $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n]$  là các giá trị riêng của ma trận  $\mathbf{A}$ . Giá trị riêng có thể là số thực hoặc là các cặp liên hợp phức.

Tương ứng với mỗi giá trị riêng  $\lambda_i$ , véc-tơ  $n$  hàng  $\Phi_i$  thỏa mãn phương trình (5) được gọi là véc-tơ riêng bên phải của ma trận  $\mathbf{A}$ . Vì vậy, ta có:

$$\mathbf{A} \cdot \Phi_i = \lambda_i \cdot \Phi_i; \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

Véc-tơ riêng  $\Phi_i$  có dạng:

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} \phi_{i1} \\ \phi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{in} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

## 2.3. Phân tích ổn định dựa vào giá trị riêng

Sự ổn định khi có kích động nhỏ (Ổn định tĩnh) của một hệ thống được đánh giá dựa trên nghiệm của phương trình trạng thái của hệ thống hay nói theo cách khác nó được đánh giá dựa trên giá trị riêng của ma trận trạng thái  $\mathbf{A}$  theo phương pháp Lyapunov.

Phương trình vi phân tuyến tính (4) có nghiệm thứ  $i$  được xác định bởi biểu thức:

$$x_i(t) = \phi_{i1} c_1 e^{\lambda_1 t} + \phi_{i2} c_2 e^{\lambda_2 t} + \dots + \phi_{in} c_n e^{\lambda_n t} \quad (9)$$

với  $c_1, c_2, \dots, c_n$  là các hằng số.

Đặc trưng phụ thuộc thời gian của mỗi chế độ tương tác  $e^{\lambda_i t}$  tương ứng với một giá trị riêng  $\lambda_i$ . Vì vậy, sự ổn định của hệ thống được đánh giá bởi các giá trị riêng như sau:

- Giá trị riêng là số thực tương ứng với chế độ không dao động.
- Giá trị riêng là số phức xảy ra theo các cặp liên hợp, và mỗi cặp liên hợp tương ứng với một chế độ dao động. Thành phần thực của giá trị riêng cho ta độ tắt dần của dao động và thành phần ảo cho ta tần số của dao động.
- Giá trị riêng có phần thực âm mô tả chế độ tắt dần. Biên độ càng lớn thì tắt dần càng nhanh.
- Giá trị riêng có phần thực dương mô tả chế độ mất ổn định.

Như vậy, với một cặp liên hợp của giá trị riêng:

$$\lambda = \sigma \pm j\omega. \tag{10}$$

Tần số của dao động được xác định bởi:

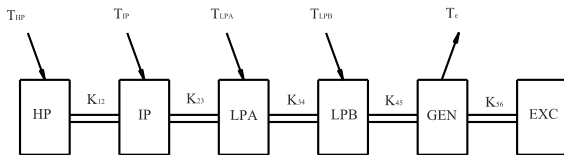
$$f = \omega/2\pi. \tag{11}$$

Hệ số cản biểu thị tốc độ tắt dần của dao động được xác định:

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \tag{12}$$

### 3. Áp dụng phương pháp trị riêng phân tích hiện tượng cộng hưởng dưới đồng bộ

#### 3.1. Hệ phương trình mô tả trục tuabin-máy phát



Hình 1. Sơ đồ trục tuabin-máy phát

Xét hệ tuabin máy phát gồm  $n$  khối như hình 1. Phương trình chuyển động của trục tuabin được biểu diễn tổng quát dưới dạng [5], [6], [9]:

$$\frac{2}{\omega_0} \mathbf{H} \cdot \ddot{\theta} + \mathbf{D} \cdot \dot{\theta} + \mathbf{K} \cdot \theta = \mathbf{T} \tag{13}$$

Trong đó:

$\theta$ : Véc-tơ ( $n \times 1$ ) biểu diễn góc xoắn.

$\mathbf{H}$ : Ma trận hằng số quán tính ( $n \times n$ ), là một ma trận đường chéo mà trong đó các thành phần đường chéo là các hằng số quán tính của mỗi khối rotor trong hệ đơn vị tương đối.

$\mathbf{D}$ : Ma trận hệ số cản ( $n \times n$ ).

$\mathbf{K}$ : Ma trận độ cứng ( $n \times n$ ).

$\mathbf{T}$ : Véc-tơ ( $n \times 1$ ) là mô-men ngoài, tác động lên từng khối của hệ trục tuabin – máy phát.

Thông thường hệ số cản của hệ trục tuabin – máy phát điện rất nhỏ. Do đó, tần số tự nhiên của hệ trong trường hợp xét đến hệ số cản hay không xét đến hệ số cản gần như tương đương nhau. Vì vậy, để đơn giản cho việc tính toán tần số tự nhiên của hệ trục tuabin – máy phát điện, cũng như xét đến trường hợp nguy hiểm nhất, chúng ta coi các hệ số cản bằng 0, phương trình (13) được viết lại như sau:

$$\ddot{\theta} + \frac{\omega_0}{2} \mathbf{H}^{-1} \mathbf{K} \theta = \frac{\omega_0}{2} \mathbf{H}^{-1} \mathbf{T} \tag{14}$$

Xét với kích động nhỏ, khai triển Taylor hai vế, lấy thành phần vi phân bậc 1, ta thu được:

$$\Delta \ddot{\theta} + \frac{\omega_0}{2} \mathbf{H}^{-1} \mathbf{K} \Delta \theta = 0 \tag{15}$$

Đặt  $\Delta \omega = \Delta \dot{\theta}$ , hệ phương trình (15) trở thành:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{2} \mathbf{H}^{-1} \mathbf{K} \Delta \theta \\ \Delta \dot{\theta} = \Delta \omega \end{cases} \tag{16}$$

Như vậy với các biến trạng thái là:  $\mathbf{x} = [\Delta \theta_i, \Delta \omega_i]$ , ma trận trạng thái của hệ thống trục tuabin – máy phát điện sẽ có dạng:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{\omega_0}{2} \mathbf{H}^{-1} \mathbf{K} & 0 \end{bmatrix} \tag{17}$$

Trị riêng là nghiệm của phương trình trạng thái của hệ thống tuabin là định thức của ma trận  $[\mathbf{A} - \lambda \cdot \mathbf{I}]$ . Các tần số tự nhiên  $\omega_m$  của hệ thống trục tuabin – máy phát điện là phần ảo của các trị riêng.

Nghiệm theo thời gian của biến trạng thái thứ  $i$  của phương trình vi phân tuyến tính hệ trục tuabin – máy phát điện được cho bởi biểu thức sau:

$$\theta_{mi}(t) = \bar{Q}_{i1}c_1e^{-\lambda_1t} + \bar{Q}_{i2}c_2e^{-\lambda_2t} + \dots + \bar{Q}_{in}c_n e^{-\lambda_n t} \quad (18)$$

Đặt  $z(t) = c_k e^{-\lambda_k t}$ , với  $k=1, 2, \dots, n$ ; phương trình (19) trở thành:

$$\theta_{mi}(t) = [\bar{Q}_{i1} \bar{Q}_{i2} \dots \bar{Q}_{in}] z(t) \quad (19)$$

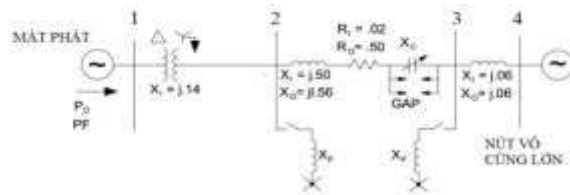
Trong đó:

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  : Giá trị riêng của ma trận trạng thái của hệ trục tuabin – máy phát.

$\bar{Q}_{i1}, \bar{Q}_{i2}, \dots, \bar{Q}_{in}$ : Các véc-tơ riêng bên phải tương ứng với các giá trị riêng của biến trạng thái thứ  $i$ .

Từ phương trình (19), ta thấy dạng dao động của hệ trục tuabin – máy phát điện được xây dựng dựa trên ma trận véc-tơ riêng bên phải  $\bar{Q}$  của ma trận trạng thái của hệ thống.

**3.2. Phương pháp trị riêng phân tích SSR với mô hình IEEE First BenchMark**



**Hình 2.** Sơ đồ mô hình First BenchMark

Mô hình chuẩn First BenchMark (FBM) được IEEE đưa ra nhằm mục đích nghiên cứu hiện tượng cộng hưởng dưới đồng bộ (Hình 2). Việc nghiên cứu trên mô hình chuẩn rất thuận lợi vì thông số đã cho phù hợp với thông số thực tế, hơn nữa IEEE cũng đã đưa ra kết quả nghiên cứu sơ bộ, từ đó giúp cho các nhà nghiên cứu có cơ sở để so sánh và kiểm tra kết quả làm tiền đề cho các nghiên cứu tiếp theo [11].

Mô hình này gồm một máy phát, tuabin gồm 6 khối HP, IP, LPA, LPB, GEN và EXC, nối tiếp với một máy biến áp tăng áp, một đường dây có gắn tụ bù dọc và cuối cùng là nút vô cùng lớn.

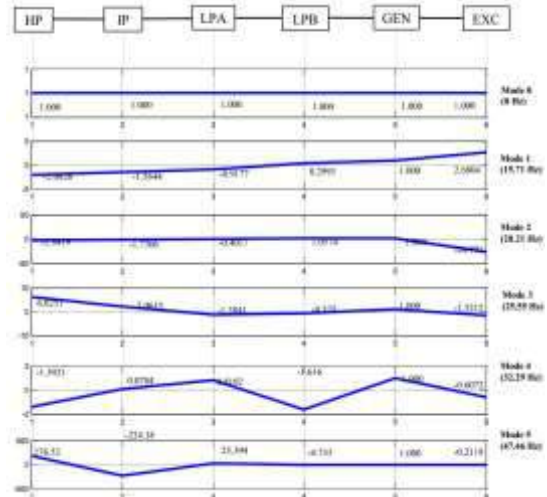
Dựa trên thông số trục tuabin [11], ta xác định được các tần số dao động tự nhiên (Bảng 1) và véc-tơ riêng (Bảng 2, Hình 3). Các tần số này nằm trong khoảng từ 15-47Hz và nhỏ hơn tần số đồng bộ.

**Bảng 1.** Tần số dao động tự nhiên của đoạn trục tuabin

Chế độ (Mode)	Phần ảo của trị riêng	Tần số dao động (Hz)
Mode 1	98,71	15,71
Mode 2	126,98	20,21
Mode 3	160,53	25,55
Mode 4	202,88	32,29
Mode 5	298,19	47,46

**Bảng 2.** Các giá trị của véc-tơ riêng Q sau khi biến đổi

Mode 0	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
1	-2,083	-2,942	6,025	-1,392	176,52
1	-1,564	-1,731	2,061	0,070	-224,18
1	-0,918	-0,402	-1,384	0,810	25,394
1	0,299	1,057	-0,575	-1,616	-4,733
1	1	1	1	1	1
1	2,680	-26,771	-1,521	-0,607	-0,212



**Hình 3.** Hình dạng các chế độ (Mode)

Hình dạng các chế độ cho ta biết những khối nào sẽ dao động ngược chiều với khối nào, từ đó có thể đưa ra vị trí bị xoắn trên trục. Ngoài ra độ chênh lệch giữa các thành phần véc-tơ riêng còn thể hiện chênh lệch biên độ dao động của từng khối so với các khối còn lại.

*Mode 0:* Dao động của toàn bộ khối trục tuabin là cùng chiều với nhau. Đây là chế độ làm việc xác lập bình thường của trục tuabin.

*Mode 1:* Ta nhận thấy đồ thị có một lần cắt trục hoành. Dấu của véc-tơ riêng giữa hai khối LPB và LPA ngược nhau. Điều này có nghĩa là khi dao động có tần số 15,71 Hz thì chiều dao động của các khối HP, IP và LPA

sẽ ngược chiều với các khối LPB, GEN và EXC. Hay nói cách khác, trục tuabin sẽ bị xoắn tại trục nối giữa LPB-LPA nếu SSR xảy ra khi tần số dao động có giá trị gần bằng 15,71 Hz.

*Mode 2:* Trục bị xoắn tại hai đoạn trục LPA-LPB và GEN-EXC. Thành phần biên độ tương ứng với khối EXC có giá trị lớn hơn nhiều so với các khối khác. Như vậy khi cộng hưởng ở Mode 2, trục tuabin bị xoắn mạnh tại trục nối giữa GEN-EXC.

*Mode 3:* Trục bị vặn xoắn tại ba đoạn trục IP-LPA; LPB-GEN và GEN-EXC.

*Mode 4:* Trục bị vặn xoắn tại bốn đoạn trục HP-IP, LPA-LPB, LPB-GEN, GEN-EXC.

*Mode 5:* Trục tuabin bị vặn xoắn tại cả năm đoạn trục.

**Bảng 3.** Kết quả tính trị riêng (bù 74,2%)

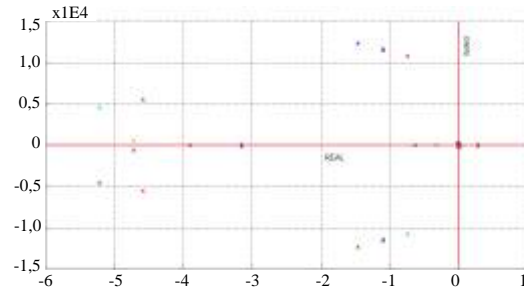
Bậc của trị riêng	Phần thực	Phần ảo	Tần số (Hz)	Mode
1,2	-1,467	±12323	1961,27	
3,4	-0,743	± 10776	1715,05	
5,6	-1,110	± 11686	1859,88	
7,8	-1,092	±11455	1823,12	
9,10	-4,581	±5534	880,76	
11,12	-5,213	± 4578,3	728,66	
13,14	-4,713	± 622,73	99,11	
15,16	0	±298,18	47,46	Mode 5
17,18	-0,028	±202,79	32,28	Mode 4
19,20	-0,013	± 160,34	25,52	Mode 3
21,22	-3,155	±130,21	20,72	$f_m$
23,24	0,277	± 127,41	20,28	Mode 2
25,26	0,027	± 99,98	15,91	Mode 1
27	-33,015	0	0	
28	-20,440	0	0	
29,30	-0,640	± 10,44	1,66	
31	-3,893	0	0	
32	-0,328	0	0	

Dựa vào hệ phương trình vi phân mô tả FBM, ta có thể tuyến tính hóa và xây dựng ma trận trạng thái **A** của toàn hệ thống [5], [6]. Phân tích trị riêng và véc-tơ riêng của ma trận **A** với từng dung lượng bù khác nhau cho phép chúng ta xác định được các trường hợp bù gây ra cộng hưởng tần số dưới đồng bộ.

- Với trường hợp bù 74,2%, tính toán cho kết quả như bảng 3 và hình 4.

Nhìn vào bảng 3, ta nhận thấy có hai cặp trị riêng ứng với các tần số lần lượt là 15,91 (Hz) và 20,28 (Hz) (tương ứng Mode 1 và Mode 2) có phần thực dương (bên trái trục ảo). Vậy hệ thống không ổn định, khi có kích động sẽ gây ra hiện tượng SSR.

Ngoài ra, dựa vào bảng trị riêng ta có thể đưa ra được dung lượng bù gây ra cộng hưởng cùng với giá trị tần số điện  $f_e$  và tần số phụ  $f_m = f_0 - f_e$  gây ra bởi tụ bù dọc trên lưới. Để tìm được tần số này, ta sẽ cho dung lượng tụ bù dọc tăng dần sau đó quan sát các tần số của phần ảo và phần thực của các trị riêng. Tần số phụ sẽ được tính từ trị riêng nào có phần ảo thay đổi theo dung lượng bù. Trong quá trình tăng giá trị bù dọc, khi tần số phụ này gần bằng với một trong các tần số dao động tự nhiên (các Mode) của trục tuabin - máy phát điện thì lúc đó trị riêng của hệ thống sẽ có thành phần phần thực dương, hiện tượng SSR xảy ra. Như vậy, chúng ta có thể xác định được dung lượng bù nguy hiểm (có thể gây ra SSR). Áp dụng vào mô hình FBM, chúng ta xác định được tần số phụ ứng với trường hợp bù 74,2% là 20,72 Hz (có giá trị gần với tần số Mode 2).



**Hình 4.** Biểu diễn trị riêng trên mặt phẳng (bù 74,2%)

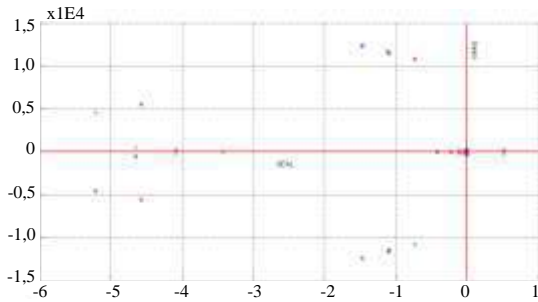
Như vậy dựa vào phương pháp trị riêng, ta đã xác định được SSR đã xảy ra và xảy ra ở Mode 2. Kết quả này tương đồng với kết quả thực hiện bằng mô phỏng thời gian thực trong [11].

- Phân tích tương tự với trường hợp bù 40%, ta nhận thấy có một cặp trị riêng có phần thực dương và tần số phụ có giá trị gần với Mode

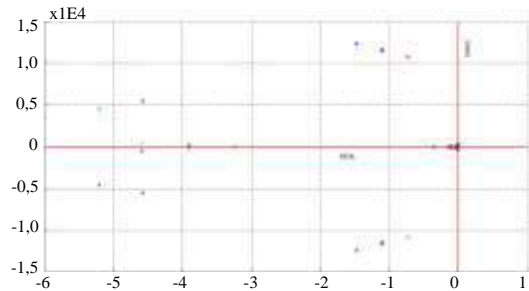
4. Như vậy, SSR sẽ xảy ra và xảy ra ở Mode 4 nếu bù với dung lượng 40% (bảng 4, hình 5).

**Bảng 4.** Kết quả tính trị riêng gần với Mode 4 (bù 40%)

Phần thực	Phần ảo	Tần số (Hz)	Mode
0,504	±202,04	32,16	Mode 4
-4,084	±196,78	31,31	$f_m$



**Hình 5.** Biểu diễn trị riêng lên mặt phẳng (bù 40%)



**Hình 6.** Biểu diễn trị riêng lên mặt phẳng (bù 20%)

- Với trường hợp bù 20%, tiến hành tính toán tương tự, ta được tất cả các trị riêng đều nằm bên trái trục ảo (hình 6). Như vậy sự cố SSR đã không xảy ra với dung lượng bù này.

#### 4. Kết luận

Bài báo này trình bày phương pháp trị riêng, áp dụng cho nghiên cứu hiện tượng cộng hưởng dưới đồng bộ. Tác giả đã giới thiệu cơ sở lý thuyết và nguyên lý của phương pháp. Thông qua việc tính toán, phân tích cụ thể cho mô hình chuẩn IEEE, tác giả đã minh chứng được khả năng áp dụng của phương pháp. Ngoài ra, đánh giá ổn định hệ thống với các dung lượng bù khác nhau sẽ giúp cho chúng ta xác định được tỷ lệ bù dọc có thể gây ra sự cố SSR trong hệ thống điện. Trong phạm vi nội dung của bài báo, tác giả cũng chưa đề cập đến các phương pháp giảm thiểu và loại bỏ hiện tượng SSR. Các nghiên cứu này sẽ tiếp tục được đầu tư thực hiện và giới thiệu trong các bài báo tiếp theo.

#### Lời cảm ơn

Tác giả gửi lời cảm ơn đến sinh viên Lê Gia Thi (Bộ môn Hệ thống điện, viện Điện, trường Đại học Bách khoa Hà Nội) vì những hỗ trợ tính toán kết quả trong bài báo.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1]. D. N. Walker, C. E. J. Bowler, and R. L. Jackson, "Results of subsynchronous resonance test at Mohave," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 94, no. 5, pp. 1878-1889, Sept. 1975.
- [2]. R. G. Farmer, A. L. Schwalb, and E. Katz, "Navajo project report on subsynchronous resonance analysis and solutions," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 96, no. 4, pp. 1226-1232, 1977.
- [3]. M. El-Marsafawy, "Use of frequency-scan techniques for subsynchronous-resonance analysis of a practical series-capacitor compensated AC network," *IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 130, no. 1, pp. 28-40, 1983.
- [4]. S. Gupta, A. Moharana, and R. K. Varma, "Frequency scanning study of subsynchronous resonance in power systems," in Proc. 26th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Regina, SK, 2013, pp. 1-6.
- [5]. D. T. Le, "Simulation of IEEE BENCHMARK Models by ATP/EMTP for Subsynchronous Resonance Studies," (in Vietnamese), *Journal of Science & Technology Technical Universities*, vol. 1, pp. 1-5, 2016.
- [6]. N. M. Truong, D. T. Le, and H. V. Nguyen, "Modeling and simulation of Thermal Turbine – Generators in Matlab environment for Subsynchronous resonance Analysis," (in Vietnamese), *DU Journal of Science and Technology*, vol. 5, no. 114, pp. 61-65, 2017.
- [7]. T. V. Dinh, H. A. Nguyen, and C. Q. Le, "Selection of Facts device to prevent Subsynchronous resonance at Vung Ang I, II Thermal Power Plants," (in Vietnamese), *DU Journal of Science and Technology*, vol. 7, no. 92, pp. 71-75, 2015.
- [8]. E. H. Allen, J. W. Chapman, and M. D. Ilic, "Eigenvalue analysis of the stabilizing effects of feedback linearizing control on

- 
- subsynchronous resonance," in Proceedings of International Conference on Control Applications, Albany, NY, USA, 1995, pp. 395-402.
- [9]. P. Kundur, *Power System Stability and Control*. Mc Graw Hill, Inc., 1994.
- [10]. V. U. La, *Power System Stability and Control*. Science & Technology Publishing, 2001.
- [11]. "First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 96, no. 5, pp. 1565-1572, 1977.