

# NGHIÊN CỨU GIẢM HIỆN TƯỢNG CỘNG HƯỞNG DƯỚI ĐỒNG BỘ CHO HỆ THỐNG ĐIỆN GIÓ DFIG BẰNG TCSC

## STUDY ON SUB SYNCHRONOUS RESONANCE ALLEVIATION FOR DFIG BASED WIND FARMS BY USING TCSC

Nguyễn Nhân Bôn, Tăng Hoàng Nam

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM, Việt Nam.

Ngày toà soạn nhận bài 15/12/2020, ngày phân biện đánh giá 29/12/2020, ngày chấp nhận đăng 29/03/2021.

### TÓM TẮT

Việc sử dụng các tụ bù dọc trên đường dây truyền tải sẽ giúp cải thiện công suất truyền tải trên đường dây. Tuy nhiên, việc sử dụng các tụ bù dọc có nguy cơ gây ra hiện tượng cộng hưởng dưới đồng bộ (SSR). Bài báo này trình bày cơ sở lý thuyết về SSR, các mô hình toán học của máy phát điện gió cảm ứng nguồn kép (DFIG), mô hình đường dây truyền tải có sử dụng tụ bù dọc. Một thiết bị FACTS là TCSC được sử dụng để loại bỏ SSR ở các cấp bù cao, nguyên lý hoạt động và điều khiển của TCSC cũng được trình bày trong bài báo này. Mô chuẩn đầu tiên của IEEE (IEEE FBM) được hiệu chỉnh lại với một hệ thống điện gió DFIG 100 MW để phù hợp với nghiên cứu. Kết quả bài báo được thực hiện bằng phương pháp mô phỏng theo miền thời gian trên phần Matlab/Simulink. Qua các kết quả cho thấy rằng SSR được loại bỏ một cách hiệu quả khi sử dụng TCSC ở các cấp bù cao.

**Từ khóa:** cộng hưởng dưới đồng bộ (SSR); máy phát điện gió cảm ứng nguồn kép (DFIG); tụ bù dọc; TCSC; tụ bù dọc; ảnh hưởng cảm ứng của máy phát (IGE); tương tác xoắn (TI); khuếch đại mô men xoắn (TA).

### ABSTRACT

Using series capacitors on the transmission line improves the transmission capacity. However, the use of series capacitors can cause Sub Synchronous Resonance (SSR). This paper presents the basic theories of SSR, mathematical models of double fed induction generators (DFIG), transmission line models using series capacitors. A TCSC device is used to remove SSR at high compensation levels, the principle of operation and control of TCSC is also presented in this paper. The IEEE First Benchmark model (IEEE FBM) was modified with a 100 MW DFIG wind power system to accommodate the study. The results of the paper are done by simulating the time domain on the Matlab / Simulink software. The results show that SSR is effectively eliminated when using TCSC at high compensation levels.

**Keywords:** sub synchronous resonance (SSR); double fed induction generator (DFIG); thyristor-controlled series capacitors (TCSC); induction generator effect (IGE); torque interaction (TI); torque amplification (TA).

### 1. GIỚI THIỆU

Việc sử dụng nguồn nguyên liệu hoá thạch trong các nhà máy nhiệt điện sẽ tạo ra một lượng lớn các khí thải gây hiệu ứng nhà kính và ô nhiễm không khí ảnh hưởng đến nghiêm trọng đến sức khỏe của con người. Hơn nữa, nguồn nguyên liệu hoá thạch là nguồn tài nguyên có hạn và đang dần cạn kiệt. Vì lý do này, nhiều quốc gia trên thế giới

trong đó có Việt Nam ứng dụng thêm nhiều nguồn năng lượng tái tạo (pin quang điện, gió, sinh khối,...) để tạo ra điện. Trong đó, nguồn năng lượng gió đang được phát triển một cách nhanh chóng trong thời gian gần đây.

Vì các nhà máy điện gió lớn thường đặt xa nơi các hộ dân sinh sống, nên cần phải có một đường dây truyền tải dài để kết nối với lưới điện. Việc truyền tải điện trên đường dây

dài sẽ làm giảm đi công suất truyền tải, do đó việc lắp đặt thêm các hệ thống tụ bù dọc trên đường dây truyền tải sẽ làm tăng khả năng truyền tải công suất và ổn định lưới điện với chi phí thấp hơn nhiều so với xây dựng thêm đường dây truyền tải mới. Một nghiên cứu được thực hiện bởi ABB cho thấy rằng tăng công suất đường dây truyền tải từ 1300 MW đến 2000 MW bằng cách sử dụng tụ bù dọc sẽ có giá thấp hơn 90% so với xây dựng đường dây mới [1].

Việc sử dụng tụ bù dọc có thể nâng cao công suất và tính ổn định khi truyền tải điện gió với khoảng cách xa, giảm đi việc xây dựng đường dây mới, do đó giảm tác động đến môi trường [1]. Tuy nhiên, một yếu tố cản trở việc sử dụng rộng rãi của tụ bù dọc là nguy cơ tiềm ẩn của hiện tượng cộng hưởng dưới đồng bộ (SSR) [2]. Gây hư hại trực tua bin và mất ổn định điện ở tần số dao động thấp hơn tần số của hệ thống là hậu quả của SSR, nếu không được ngăn chặn.

Trong bài báo này, TCSC được sử dụng để giảm thiểu cộng hưởng dưới đồng bộ cho hệ thống điện gió DFIG. Hiệu quả của TCSC trong việc giảm thiểu SSR được nghiên cứu trên nhiều điều kiện hoạt động. Một mô hình trực tua bin gió DFIG được kết nối với lưới điện qua đường dây được bù dọc, mô hình được lấy từ mô hình chuẩn đầu tiên của IEEE (IEEE First BenchMark – IEEE FMB) để phân tích SSR ở các mức bù dọc khác nhau và sau đó một mô hình TCSC sẽ được thêm vào hệ thống nghiên cứu, để phân tích khả năng giảm SSR. Hệ thống được mô phỏng miền thời gian bằng Matlab / Simulink. Mục tiêu bài báo là phân tích sự ảnh hưởng của cấp độ bù của tụ điện bù dọc trên đường dây truyền tải gây ra SSR cho hệ thống điện gió và hiệu quả giảm SSR của TCSC.

Tổ chức của bài báo như sau. Tổng quan và bài toán nghiên cứu được giới thiệu trong phần 1. Lý thuyết SSR về định nghĩa, phân loại và kỹ thuật nghiên cứu cộng hưởng không đồng bộ được mô tả ngắn gọn trong phần 2. Phần 3 trình bày mô hình nghiên cứu. Phần 4 trình bày mô hình và chiến lược điều khiển TCSC để giảm SSR. Phần 5 trình bày

kết quả mô phỏng miền thời gian để xác minh TCSC có hiệu quả trong việc giảm SSR. Cuối cùng, phần 6 kết luận bài báo này.

## 2. HIỆN TƯỢNG CỘNG HƯỞNG DƯỚI ĐỒNG BỘ (SSR)

SSR là hiện tượng xảy ra khi có sự trao đổi năng lượng (ở tần số thấp hơn tần số danh định của hệ thống) giữa hệ thống truyền tải điện được bù dọc và hệ thống trực tua bin-máy phát thông qua các thao tác quá độ hoặc các sự cố thoáng qua. Tần số dưới đồng bộ được xác định bởi công thức:

$$f_{er} = f_0 \sqrt{\frac{X_c}{X_{eq}}} \quad (1)$$

trong đó,  $X_c$  là điện kháng của tụ bù dọc,  $X_{eq}$  là điện kháng của đường và  $f_0$  là tần số danh định của hệ thống điện.

Hiện tượng này dẫn đến khả năng hư hỏng hệ thống trực tua bin-máy phát điện, gây ra các vết nứt trên trực tua bin, nặng hơn sẽ phá hủy trực dẫn đến hệ thống mất ổn định và có thể hệ thống điện ngưng hoạt động nếu không có các biện pháp dập tắt dao động.

Hiện tượng SSR xảy ra ở hai hình thức khác nhau. Thứ nhất, trong điều kiện quá độ là khuếch đại mô-men xoắn (TA-Torque Amplification) và loại thứ hai là điều kiện ổn định tạo nên tương tác xoắn (TI) và ảnh hưởng cảm ứng của máy phát (IGE) [3].

### 2.1 Ảnh hưởng cảm ứng của máy phát (IGE)

IGE là một hiện tượng tự kích thích. Khi lực từ động (mmf) quay được tạo ra bởi dòng điện phản ứng ở tần số dưới đồng bộ chuyển động với tốc độ  $N_s$ , chậm hơn tốc độ của rô to  $N_r$ , điện trở của rô to (ở tần số dưới đồng bộ nhìn từ các cực phản ứng) mang dấu âm, vì độ trượt “s” của máy phát cảm ứng là âm. Khi thành phần tần số dưới đồng bộ gần hoặc khớp với bất kỳ tần số cộng hưởng điện  $f_{er}$  nào, dao động xoắn và cộng hưởng điện sẽ được kích thích lẫn nhau dẫn đến SSR.

### 2.2 Tương tác xoắn (TI)

Tương tác xoắn TI xảy ra giữa hệ thống điện và trực tua bin của hệ thống, đây là một

hiện tượng cơ điện. Trục tua bin của máy phát điện có thể có một số chế xoắn cơ học cố định trong dãy tần số dưới đồng bộ. Mỗi liên hệ giữa tần số xoắn cơ học và tần số cộng hưởng điện được mô tả như sau:

$$f_{TM} = f_{sys} - f_e \quad (2)$$

trong đó,  $f_{TM}$  là tần số ở chế độ xoắn,  $f_{sys}$  là tần số hệ thống,  $f_e$  là tần số cộng hưởng điện.

Chế độ TI có thể xảy ra khi có một tác nhân bổ sung thêm tần số dưới đồng bộ, nếu độ phận giảm dao động của hệ thống không đủ lớn, thì các dao động sẽ tăng lên và hiện tượng SSR xảy ra. Các thành phần điện ở tần số dưới đồng bộ có thể tìm thấy do nhiều nguyên nhân gây ra, nhưng thông thường là do hệ thống tụ bù dọc đường dây truyền tải hoặc do những thiết bị điện tử công suất gây ra.

### 2.3 Khuếch đại mô men xoắn (TA)

Nguyên nhân chính gây ra TA là do những nhiễu loạn trong hệ thống và dòng điện quá độ. Trong hệ thống điện xoay chiều, những tác động bất chợt xảy ra (đóng / cắt đường dây, sự cố thoáng qua,...) có thể sinh ra dòng điện quá độ lớn, dòng điện quá độ này có xu hướng gây ra dao động ở tần số tự nhiên của lưới điện. Nếu không có hệ thống tụ bù dọc thì dòng điện quá độ này chỉ là dòng điện DC và nhanh chóng được dập tắt bởi thành phần giảm dao động của hệ thống. Tuy nhiên, khi có hệ thống tụ bù dọc thì dòng điện quá độ này có xu hướng dao động ở những tần số được xác định bởi công thức (1) ở trong dãy tần số dưới đồng bộ. Nếu có nhiều nhóm tụ bù dọc trên lưới điện, dòng điện quá độ sẽ có nhiều tần số dao động hơn. Tương tự như TI, nếu tần số của dòng điện dưới đồng bộ kết hợp với tần số dao động của trục tua bin máy phát, tạo ra một dao động có mô men xoắn lớn tỉ lệ với cường độ dòng điện quá độ làm phá hủy trục tua bin máy phát điện gây thiệt hại lớn cho hệ thống điện.

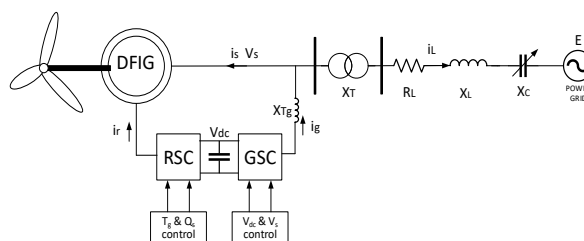
### 2.4 Các phương pháp nghiên cứu SSR

Có nhiều phương pháp để nghiên cứu cộng hưởng dưới đồng bộ trong hệ thống điện. Các phương pháp phổ biến nhất là:

- Phương pháp quét tần số (Frequency Scan).
- Phương pháp phân tích giá trị riêng (Eigenvalue analysis).
- Phân tích hệ số mô men phức hợp (Complex torque coefficient analysis).
- Phương pháp mô phỏng quá độ điện từ (Electro – magnetic transient simulation).

Mỗi phương pháp khi sử dụng sẽ có những điểm mạnh và hạn chế riêng tùy vào trường hợp phân tích [4].

## 3. MÔ HÌNH HỆ THỐNG NGHIÊN CỨU



Hình 1. Sơ đồ lưới điện IEEE FBM có tích hợp điện gió DFIG.

Hệ thống nghiên cứu dựa trên mô hình chuẩn thứ nhất của IEEE cho các nghiên cứu SSR được thể hiện trong hình 1, trong đó một hệ thống điện gió dựa trên DFIG 100 MW được kết nối với lưới 161 kV có bù dọc. Hệ thống điện gió 100 MW là một mô hình tổng hợp của 66 tổ máy tua bin gió, trong đó mỗi tổ máy có công suất định mức 1,5 MW. Trên thực tế, một tua bin gió 1,5 MW được mở rộng lên để đại diện cho hệ thống điện gió 100 MW. Sự đơn giản hóa này được dựa theo một số nghiên cứu [5-7] và cho thấy rằng một mô hình hệ thống điện gió tổng hợp là phù hợp cho các nghiên cứu động lực học hệ thống điện.

### 3.1 Mô hình khí động học tua bin gió

Mô men cơ đầu ra động của tua bin gió được biểu thị bằng phương trình sau [2]

$$T_m = \frac{1}{2\lambda} \rho A R C_p V_\omega^2 \quad (3)$$

trong đó,  $\rho$  là mật độ không khí ( $\text{kgm}^{-3}$ ),  $A$  là diện tích quét cánh quạt ( $\text{m}^2$ ),  $R$  là chiều dài

cánh quạt (m), và  $V_\omega$  là tốc độ gió (m/s),  $C_p$  là hệ số công suất của mặt cắt là một hàm tỷ lệ của góc cánh quạt  $\theta$  và tốc độ đầu cánh quạt  $\lambda$  theo phương trình sau:

$$C_p = \frac{1}{2} \left( \frac{RC_f}{\lambda} - 0.022\theta - 2 \right) e^{-0.255 \frac{RC_f}{\lambda}} \quad (4)$$

trong đó:  $C_f$  là tỉ lệ hằng số thiết kế của mặt cắt tua bin và tỉ lệ tốc độ đầu cánh quạt,  $\theta$  là tỉ lệ góc nghiêng và tốc độ đầu cánh quạt là:

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{V_\omega} \quad (5)$$

trong đó,  $\omega_m$  là là tốc độ quay của tua bin gió tính bằng rad/s.

### 3.2 Mô hình hệ thống trục tua bin – máy phát

Mô hình tua bin trong bài báo này sẽ nghiên cứu loại hai khối. Một hệ thống hai khối lượng được sử dụng phổ biến được biểu thị bởi [8]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\omega_t \\ \Delta\omega_g \\ \theta_{tg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-D_t - D_{tg}}{2H_t} & \frac{D_{tg}}{2H_t} & \frac{-K_{tg}}{2H_t} \\ \frac{D_{tg}}{2H_g} & \frac{-D_g - D_{tg}}{2H_g} & \frac{K_{tg}}{2H_g} \\ \omega_0 & -\omega_0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\omega_t \\ \Delta\omega_g \\ \theta_{tg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta T_m}{2H_t} \\ \frac{-\Delta T_g}{2H_g} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

trong đó,  $\omega_t$  và  $\omega_r$  lần lượt là tốc độ tua bin và rô to máy phát;  $T_g$  là mô men bên trong của mô hình;  $T_m$  và  $T_e$  lần lượt là mô men cơ của tua bin và mô men điện của máy phát;  $D_t$  và  $D_g$  lần lượt là hệ số tắt dần cơ học của tua bin và máy phát;  $H_t$  và  $H_g$  lần lượt là hằng số quán tính của tua bin và máy phát;  $D_{tg}$  là hệ số tắt dần của khớp nối mềm giữa hai khối trục;  $K_{tg}$  là độ cứng của trục. Các biến trạng thái liên quan đến động lực học xoắn được ký hiệu là  $X_t$ .

$$X_t = [\Delta\omega_t, \Delta\omega_r, T_g]^T \quad (7)$$

### 3.3 Mô hình máy phát điện cảm ứng

Phương trình điện áp và phương trình từ thông của động cơ cảm ứng trong hệ tọa độ quay d-q như sau [9]:

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_0 \psi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_0 \psi_{sd} \\ v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_0 - \omega_r) \psi_{rq} \\ v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_0 - \omega_r) \psi_{rd} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (9)$$

$$\omega_0 = \frac{\omega_s}{\omega_B} \quad (10)$$

trong đó,  $v_{sd}$ ,  $v_{sq}$ ,  $v_{rd}$ ,  $v_{rq}$  lần lượt là các thành phần trục d và q của điện áp stato và rô to;  $i_{rd}$ ,  $i_{rq}$  lần lượt là các thành phần trục d và q của dòng điện stato và rô to;  $\psi_{sd}$ ,  $\psi_{sq}$ ,  $\psi_{rd}$ ,  $\psi_{rq}$  lần lượt là các thành phần trục d và q của từ thông stato và rô to;  $L_s$ ,  $L_r$ ,  $L_m$  lần lượt là độ tự cảm của cuộn dây stato, độ tự cảm của dây quấn rô to và hồ cảm giữa các cuộn dây stato và rô to;  $R_s$ ,  $R_r$  lần lượt là điện trở của cuộn dây stato và rô to;  $\omega_0$  và  $\omega_r$  lần lượt là tốc độ góc của lưới điện và tốc độ góc của rô to.

Phương trình mô men điện trong hệ pu được đưa ra như sau:

$$T_e = \psi_{rd} i_{rq} - \psi_{rq} i_{rd} \quad (11)$$

### 3.4 Mô hình tụ điện liên kết DC-link

Mô hình động học của tụ điện DC-link có thể được mô tả như sau [2]:

$$C_v \frac{dv_{dc}}{dt} = P_r - P_g \quad (12)$$

$$P_r = \frac{1}{2} (v_{qr} i_{qr} + v_{dr} i_{dr}) \quad (13)$$

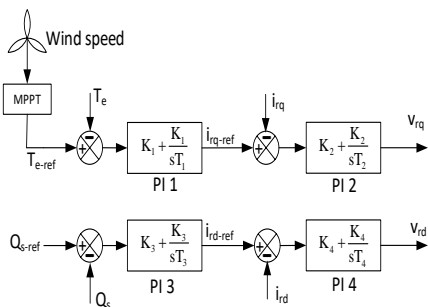
$$P_g = \frac{1}{2} (v_{qg} i_{qg} + v_{dg} i_{dg}) \quad (14)$$

trong đó,  $P_r$ ,  $P_g$  lần lượt là công suất hoạt động của RSC và GSC;  $v_{qr}$  và  $v_{dr}$  tương ứng

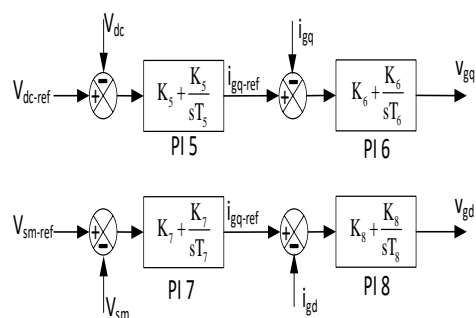
là điện áp RSC trục q và trục d;  $v_{qg}$  và  $v_{dg}$  lần lượt là điện áp GSC trục q và trục d.

### 3.5 Mô hình điều khiển RSC và GSC

Cả hai bộ điều khiển RSC và GSC đều được mô hình hóa. Các vòng lặp điều khiển được hiển thị trong Hình 2 và 3 [2].



Hình 2. Vòng lặp điều khiển RSC



Hình 3. Vòng lặp điều khiển GSC

### 3.6 Mô hình đường dây khi có bù dọc

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{cq} \\ v_{cd} \\ i_q \\ i_d \end{bmatrix} = \omega_B \begin{bmatrix} 0 & -\omega_e & X_c & 0 \\ \omega_e & 0 & 0 & X_c \\ -1 & 0 & -\frac{R_L}{X_L} & -\omega_e \\ 0 & -1 & \omega_e & -\frac{R_L}{X_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{cq} \\ v_{cd} \\ i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \omega_B \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{v_{tq} - E_{Bq}}{X_L} \\ \frac{v_{td} - E_{Bd}}{X_L} \end{bmatrix} \quad (15)$$

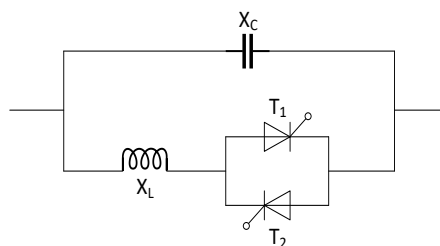
trong đó,  $v_{cq}$  và  $v_{cd}$  là điện áp trục q và trục d qua tụ điện,  $i_q$  và  $i_d$  là dòng điện trục q và trục d qua đường truyền,  $v_{tq}$  và  $v_{td}$  là điện áp trục q và trục d của thanh cái đầu cuối,  $E_{Bq}$  và  $E_{Bd}$  là điện áp trục q và trục d của bus nguồn vô hạn,  $\omega_B$  là tốc độ cơ bản (377 rad / s) và  $\omega_e$  là tốc độ hệ quy chiếu đồng bộ (377 rad/s).

Các biến trạng thái được liên kết với mạng được ký hiệu là  $X_n$  và:

$$X_n = [v_{cq}, v_{cd}, i_q, i_d]^T \quad (16)$$

### 4. ỨNG DỤNG TCSC ĐỂ GIẢM SSR

Bài báo này sẽ sử dụng tụ TCSC để giảm SSR trong cho hệ thống điện gió dựa trên DFIG. TCSC bao gồm cuộn kháng điều khiển bằng thyristor (TCR) song song với một tụ điện cố định cho mỗi pha. Cấu hình đơn giản của TCSC sẽ được trình bày trong Hình 4.



Hình 4. Cấu hình đơn giản của TCSC

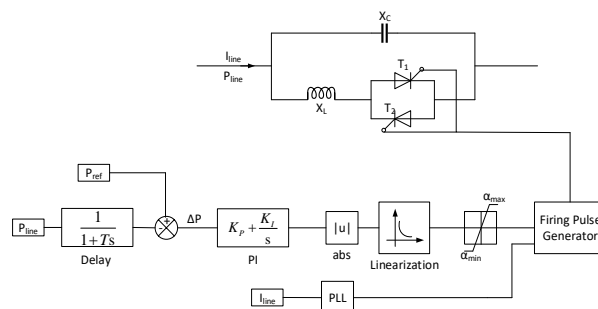
Đối với cấu hình này, điện kháng TCSC tương đương được tính theo phương trình sau [10]:

$$X_{TCSC} = X_C - \frac{X_C^2}{X_C - X_L} \frac{2 + \sin 2\beta}{\pi} + \frac{4X_C^2}{X_C - X_L} \frac{\cos^2 \beta}{k^2 - 1} \frac{k \tan k\beta - \tan \beta}{\pi} \quad (17)$$

$$\beta = \pi - \alpha \quad (18)$$

trong đó,  $\beta$  là góc dẫn của thyristor (tính khi điện áp thuận trở thành 0),  $\alpha$  là góc kích của các thyristor.

Khi các giá trị  $X_C$  và  $X_L$  của TCSC được tính toán, một sơ đồ điều khiển dòng điện vòng kín sẽ được sử dụng cho ứng dụng được đề xuất. Sơ đồ khối điều khiển của TCSC được mô tả trong Hình 5.



### Hình 5. Cấu trúc bộ điều khiển TCSC

Mục tiêu chính điều khiển TCSC là điều khiển dòng điện qua cuộn cảm bằng cách điều chỉnh góc kích đặt vào thyristor, điều này sẽ thay đổi bản chất của dạng sóng cũng như giá trị trung bình của dòng điện qua tụ điện nối tiếp và kết quả là điện áp trên thiết bị sẽ thay đổi. Do đó, việc điều chỉnh góc kích  $\alpha$  đóng một vai trò quan trọng để kiểm soát điện áp và dòng điện TCSC, hay nói cách khác là trở kháng hiệu dụng của TCSC. Dòng điện qua cuộn kháng có thể được điều khiển từ cực đại (khi thyristor ở chế độ dẫn hoàn toàn) đến không (khi thyristor ở chế độ chặn) bằng cách thay đổi độ trễ của  $\alpha$ . Vì dòng điện dây làm trễ pha so với điện áp tụ  $90^\circ$ , nên xung kích hoạt để dẫn toàn bộ thyristor sẽ được đặt ở đỉnh điện áp.

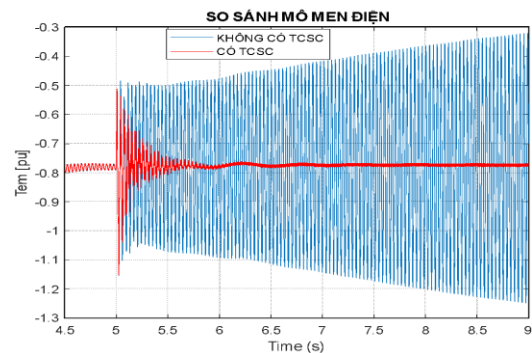
Bộ điều khiển TCSC dựa trên bộ điều chỉnh PI. Công suất đo được trên đường dây được so sánh với công suất tham chiếu và được điều khiển bằng bộ điều chỉnh PI. Sau bộ giới hạn, tín hiệu điều khiển được phân cực hóa để tạo ra một góc kích cung cấp mối quan hệ tuyến tính giữa tín hiệu TCSC và tín hiệu điều khiển. Tín hiệu này cùng với tín hiệu dòng điện đường dây sau khi qua bộ cố định pha PLL vào khối tạo xung để tạo ra xung kích cho các thyristor.

## 5. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

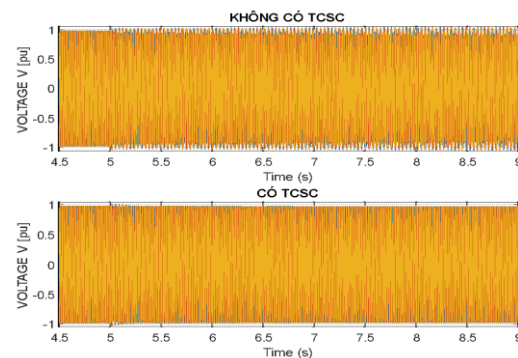
Để xác minh tính hiệu quả TCSC trong việc giảm SSR, hệ thống được nghiên cứu như trong Hình 1 được mô phỏng trong chương trình Matlab/Simulink. Trong mô phỏng, ban đầu mức bù được đặt ở mức 50%, vì ở mức bù này khi đó hệ thống ổn định, sau đó ở  $t = 5s$ , mức bù được tăng lên lần lượt là 55%, 60%, 65%, 70% trong từng trường hợp. Ở các mức bù đó gây ra sự mất ổn định vì chế độ SSR trong tụ điện bù dọc. Hình dưới đây cho thấy hiệu suất động của hệ thống bao gồm mô men điện  $T_{em}$ , điện áp của DFIG. Như được thấy trong các kết quả bên dưới, TCSC đã ngăn chặn thành công chế độ SSR và đã ổn định hệ thống điện gió.

### 5.1 Trường hợp bù 55%

Hệ thống đang chạy ổn định từ 0 - 5s với mức bù 50%. Sau 5 giây, mức bù tăng lên 55%. Hiệu suất của hệ thống được thể hiện trong Hình 6 và Hình 7. Trong trường hợp hệ thống không có TCSC (đường màu xanh), mô men điện, điện áp DFIG đang dao động và độ lớn của dao động tăng dần theo thời gian sau khi mức bù tăng lên đến 55%. Trong trường hợp hệ thống có TCSC (đường màu đỏ), mô men điện và điện áp DFIG ổn định nhanh chóng trong vòng 0,5 giây, điều này cho thấy khả năng tắt dần SSR do TCSC cung cấp trong trường hợp này là tốt.



Hình 6. Mô men điện trong trường hợp bù 55%



Hình 7. Điện áp trong trường hợp bù 55%

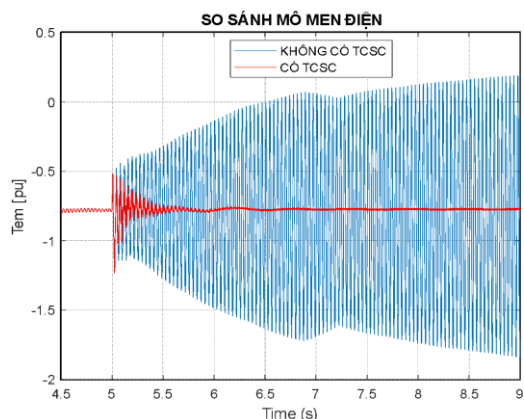
### 5.2 Trường hợp bù 60%, 65% và 70%

Kết quả mô phỏng của ba cấp bù 60%, 65%, 70% được thể hiện từ Hình 8 đến Hình 13. Tương tự như trường hợp bù 55%, khi tăng các cấp bù lên càng cao thì biên độ dao động của mô men điện sẽ càng tăng cao và nhanh hơn (biên độ mô men điện ở giây thứ 9 của bốn cấp bù được so sánh trong Bảng 1). Qua đó cho thấy ở cấp bù càng cao thì hệ thống càng mất ổn định và gây nguy hại cho hệ thống điện. Nhưng khi sử dụng TCSC thì

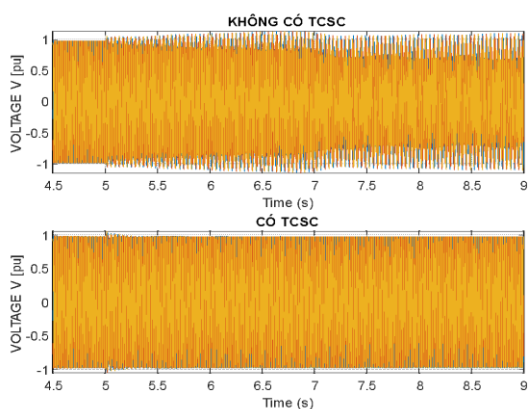
các dao động của hệ thống sẽ được dập tắt một cách nhanh chóng.

**Bảng 1.** So sánh biên độ Te ở 9s

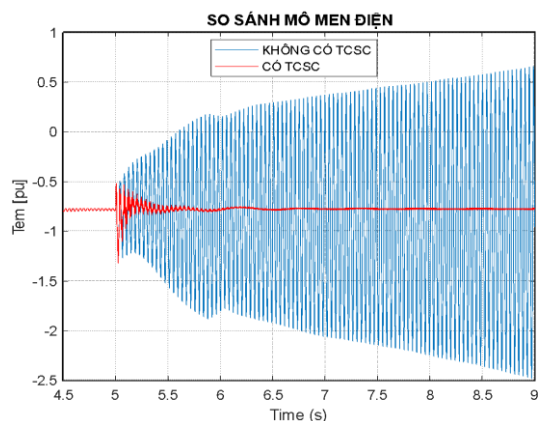
Biên độ đỉnh – đỉnh của Tem ở 9s				
Cấp bù	55%	60%	65%	70%
Tem [pu]	1.7	1.95	3.2	5.2



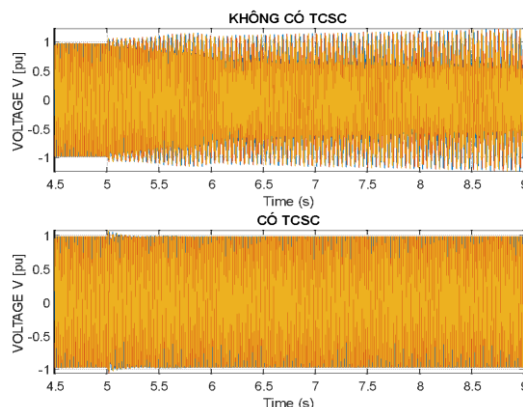
**Hình 8.** Mô men điện trong trường hợp bù 60%



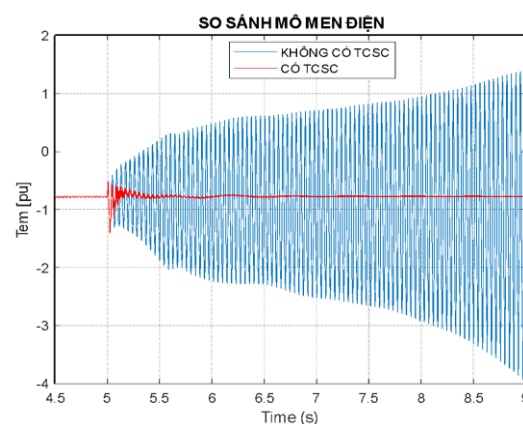
**Hình 9.** Điện áp trong trường hợp bù 60%



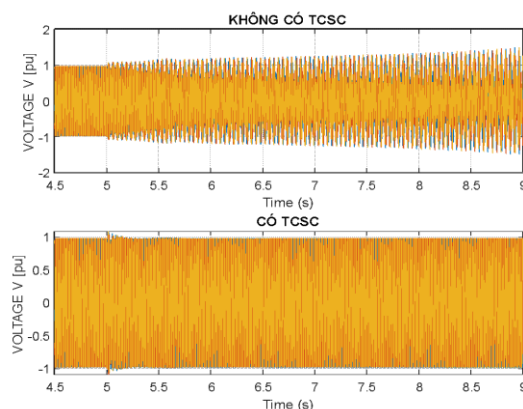
**Hình 10.** Mô men điện trong trường hợp bù 65%



**Hình 11.** Điện áp trong trường hợp bù 65%



**Hình 12.** Mô men điện trong trường hợp bù 70%



**Hình 13.** Điện áp trong trường hợp bù 70%

## 6. KẾT LUẬN

Bài báo này nghiên cứu vấn đề SSR tiềm ẩn trong các hệ thống điện gió DFIG được kết nối với các đường dây có tụ bù dọc.

Ứng thiết bị TCSC được đưa vào hệ thống nghiên cứu để loại bỏ SSR. Mô phỏng hệ thống nghiên cứu được thực hiện đối với các mức bù khác nhau bằng phần mềm Matlab / Simulink. Qua kết quả mô phỏng, ta thấy

rằng các hệ thống điện gió DFIG khi kết nối đường dây có tụ bù dọc sẽ dễ bị ảnh hưởng bởi SSR với cấp bù cao hơn và TCSC có thể loại SSR một cách hiệu quả, giúp cho hệ thống hoạt động ổn định ở các cấp bù cao.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] ‘Series compensation: boosting transmission capacity’, <http://www.abb.com/FACTS>.
- [2] H. A. Mohammadpour, A. Ghaderi, E. Santi, “Analysis of sub-synchronous resonance in doubly-fed induction generator-based wind farms interfaced with gate controlled series capacitor ,” IET Generation, Transmission & Distribution, DOI: 10.1049/ietgtd.2013.0643, Available on-line: 16 June 2014.
- [3] T. E. Chikohora and D. T. O. Oyedokun, "Sub-Synchronous Resonance (SSR) in Series Compensated Networks with High Penetration of Renewable Energy Sources," 2020 International SAUPEC/RobMech/PRASA Conference, Cape Town, South Africa, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/SAUPEC/RobMech/PRASA48453.2020.9041109.
- [4] C. He, D. Sun, L. Song, & L. Ma, Analysis of subsynchronous resonance characteristics and influence factors in a series compensated transmission system, *Energies*, 12 (17), p.3282, 2019.
- [5] X. Zhu and Z. Pan, "Study on the influencing factors and mechanism of SSR due to DFIG-based wind turbines to a series compensated transmission system," 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Edinburgh, 2017, pp. 1029-1034, doi: 10.1109/ISIE.2017.8001387.
- [6] J. Ma, L. Jiang, M. Wu, C. Zhang and F. Liu, "SSR analysis of DFIG based wind farm considering spatial distribution of wind speed," 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2016.7741740.
- [7] H. Liu, X. Xie, C. Zhang, Y. Li, H. Liu and Y. Hu, "Quantitative SSR Analysis of Series-Compensated DFIG-Based Wind Farms Using Aggregated RLC Circuit Model," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 474-483, Jan. 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2558840.
- [8] Prasanthi, E., & Shubhanga, K. N. (2016). Stability analysis of a grid connected DFIG based WECS with two-mass shaft modeling. 2016 IEEE Annual India Conference (INDICON). doi:10.1109/indicon.2016.7838953
- [9] He Y.K,Hu J.B,Xu L, Operation and Control of Grid Connected Doubly Fed Asynchronous Wind Turbine[M]. China Electric Power Press, 2011.
- [10] Zheng, Rui & Li, Gen & Liang, Jun. (2015). “Capability of TCSC on SSR Mitigation”. *Journal of Power and Energy Engineering*. 03. 232-239. 10.4236/jpee.2015.34032.

**Tác giả chịu trách nhiệm bài viết:**

TS. Nguyễn Nhân Bôn

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TPHCM

Email: bonnn@hcmute.edu.vn