

DOI: <https://doi.org/10.59294/HIUJS.KHTT.2026.055>

# PHÂN TÍCH HIỆU QUẢ PHỐI HỢP SVC VÀ PSS TRONG NÂNG CAO ỔN ĐỊNH QUÁ ĐỘ HỆ THỐNG ĐIỆN

Đào Tăng Tín\*

Trường Đại học Quốc tế Hồng Bàng

## TÓM TẮT

Nghiên cứu này phân tích tác động phối hợp bộ bù VAR tĩnh (SVC) và bộ ổn định hệ thống điện (PSS) để nâng cao ổn định quá độ hệ thống truyền tải đa máy. Sử dụng mô hình Simulink với hai máy phát thủy điện (1,000 MVA, 5,000 MVA), đường dây 500 kV dài 700 km và SVC  $\pm 200$  Mvar. Phương pháp mô phỏng phasor được áp dụng với các sự cố ngắn mạch. Kết quả chỉ ra, hệ thống không có thiết bị hỗ trợ sẽ mất đồng bộ nhanh chóng. PSS hiệu quả trong việc dập dao động tần số thấp, SVC hỗ trợ ổn định điện áp và tăng khả năng truyền tải. Việc tích hợp đồng thời cả hai thiết bị mang lại hiệu quả vượt trội: dao động được dập tắt sau 10 - 20 giây, điện áp phục hồi ổn định và hệ thống duy trì đồng bộ ngay cả với sự cố nghiêm trọng. Nghiên cứu khẳng định vai trò thiết yếu của SVC và PSS trong việc nâng cao độ ổn định cho lưới điện truyền tải dài, phù hợp với hệ thống có tỷ lệ thủy điện cao như Việt Nam.

**Từ khóa:** SVC, PSS, phasor, thiết bị FACTS

## ANALYSIS OF THE COORDINATED EFFECTIVENESS OF SVC AND PSS IN ENHANCING POWER SYSTEM TRANSIENT STABILITY

Dao Tang Tin

### ABSTRACT

This study analyzes the coordinated impact of the Static VAR Compensator (SVC) and the Power System Stabilizer (PSS) on enhancing the transient stability of a multi-machine transmission system. A Simulink-based model is developed, consisting of two hydroelectric generators rated at 1,000 MVA and 5,000 MVA, a 700 km long 500 kV transmission line, and an SVC with a  $\pm 200$  Mvar rating. The phasor simulation approach is employed to investigate system behavior under short-circuit fault conditions. The results indicate that the system without supporting devices rapidly loses synchronism. While the PSS is effective in damping low-frequency oscillations, the SVC enhances voltage stability and increases power transfer capability. The simultaneous integration of both devices provides superior performance, with oscillations being effectively suppressed within 10 - 20 seconds, voltage recovery achieved smoothly, and system synchronism maintained even under severe fault scenarios. The findings confirm the essential role of SVC and PSS in improving the stability of long-distance transmission networks, particularly in power systems with a high penetration of hydropower generation such as those in Vietnam.

**Keywords:** static VAR compensator, power system stabilizer, phasor simulation, FACTS devices

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống điện Việt Nam có đặc điểm tỷ trọng nguồn thủy điện tương đối cao 30 - 40% cùng với các tuyến truyền tải 500 kV có chiều dài lớn, liên kết Bắc - Trung - Nam. Cấu trúc này làm giảm biên ổn

\* Tác giả liên hệ: Đào Tăng Tín, Email: [tindt@hiu.vn](mailto:tindt@hiu.vn)

(Ngày nhận bài: 19/01/2026; Ngày nhận bản sửa: 26/02/2026; Ngày duyệt đăng: 28/02/2026)

định quá độ, dễ phát sinh dao động công suất tần số thấp và làm tăng nguy cơ mất đồng bộ sau các sự cố nghiêm trọng. Trong điều kiện phụ tải ngày càng tăng và sự tích hợp thêm các nguồn điện mới, yêu cầu nâng cao độ tin cậy vận hành và khả năng duy trì ổn định hệ thống trở nên cấp thiết.

Các thiết bị điều khiển như Static Var Compensator (SVC) và Power System Stabilizer (PSS) đã được ứng dụng rộng rãi nhằm cải thiện ổn định điện áp và giảm dao động góc rotor. Tuy nhiên, hiệu quả phối hợp giữa hai thiết bị này trong điều kiện hệ thống truyền tải dài với thông số gần thực tế vẫn cần được đánh giá một cách hệ thống, đặc biệt trong bối cảnh vận hành đặc thù của hệ thống điện Việt Nam.

Nghiên cứu nhằm phân tích hiệu quả phối hợp của SVC và PSS trong việc nâng cao ổn định quá độ, góp phần đề xuất giải pháp kỹ thuật tăng cường độ tin cậy cho hệ thống truyền tải 500 kV. Đóng góp chính của bài báo gồm: (i) phân tích định lượng hiệu quả phối hợp SVC-PSS thông qua thời gian dập dao động và khả năng duy trì đồng bộ; (ii) làm rõ vai trò tương tác giữa hai vòng điều khiển điện áp và dập dao động; (iii) đề xuất khuyến nghị ứng dụng cho lưới truyền tải 500 kV dài tại Việt Nam.

Bố cục bài báo được tổ chức như sau: Mục 2 trình bày tổng quan nghiên cứu liên quan đến điều khiển phối hợp SVC và PSS, mục 3 đối tượng và phương pháp nghiên cứu, mục 4 kết quả nghiên cứu và bàn luận, mục 5 kết luận và hướng nghiên cứu tiếp theo.

## 2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

Ổn định quá độ của hệ thống điện đã được nghiên cứu rộng rãi trong nhiều thập kỷ. Hiệu quả riêng lẻ của PSS trong việc cải thiện hệ số tắt dần dao động rotor và của SVC trong điều khiển điện áp và hỗ trợ công suất phản kháng đã được khẳng định trong các công trình trước đây [1].

Gần đây, các hướng nghiên cứu tập trung vào tối ưu hóa tham số phối hợp giữa các thiết bị điều khiển sử dụng các thuật toán metaheuristic như Coyote Optimization Algorithm [2], Moth-Flame Optimization [3] và Rat Swarm Optimization [4]. Các nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào bài toán tối ưu tham số hoặc đánh giá trên các hệ thống chuẩn IEEE.

Tuy nhiên, các nghiên cứu đánh giá đồng thời và có hệ thống hiệu quả phối hợp SVC và PSS trên mô hình truyền tải hai máy với thông số thực tế (đường dây 500 kV dài 700 km, tải 5,000 MW) vẫn còn hạn chế. Bên cạnh đó, việc khai thác phương pháp mô phỏng phasor để phân tích ổn định quá độ dài hạn và so sánh đáp ứng hệ thống dưới các dạng sự cố ngắn mạch khác nhau (ba pha và một pha) trong bối cảnh hệ thống điện Việt Nam chưa được nghiên cứu đầy đủ [5].

Do đó, nghiên cứu này tập trung vào việc phân tích tương tác động giữa SVC và PSS trên mô hình truyền tải dài nhằm làm rõ hiệu quả phối hợp của hai thiết bị trong cải thiện ổn định hệ thống.

## 3. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 3.1. Mô hình hệ thống nghiên cứu

Hệ thống nghiên cứu là mô hình truyền tải hai máy tương đương của lưới điện 500 kV, bao gồm hai nguồn phát công suất lớn liên kết qua đường dây truyền tải dài 700 km, cung cấp tải khoảng 5,000 MW. Mô hình được xây dựng trong môi trường MATLAB/Simulink sử dụng thư viện Simscape Electrical.

Hệ thống được tích hợp: Bộ bù tĩnh SVC tại nút trung gian nhằm điều khiển điện áp và hỗ trợ công suất phản kháng. Bộ ổn định hệ thống điện PSS tích hợp trong bộ điều chỉnh kích từ của máy phát nhằm cải thiện hệ số tắt dần dao động rotor.

### 3.2. Mô hình toán học và nguyên lý điều khiển

#### 3.2.1. Cơ sở lý thuyết

**Nguyên lý hoạt động của SVC:** SVC là thiết bị FACTS dựa trên thyristor, thường cấu hình TCR (Thyristor-Controlled Reactor) kết hợp TSC (Thyristor-Switched Capacitor) hoặc cố định capacitor. SVC hoạt động như một nguồn công suất phản kháng biến thiên nhanh (thời gian đáp ứng vài chu kỳ lưới). Bộ điều khiển SVC đo liên tục điện áp nút ( $V_m$ ) và so sánh với giá trị tham chiếu ( $V_{ref}$ ). Nếu  $V_m < V_{ref}$ , SVC giảm góc mở thyristor để tăng dòng cảm, tương đương tăng công suất phản kháng

phát ra (capacitive mode). Ngược lại, nếu  $V_m > V_{ref}$ , SVC tăng góc mở để hoạt động ở chế độ cảm (inductive mode), hấp thụ Q. Độ dẫn nạp tổng B (susceptance) của SVC thay đổi liên tục trong giới hạn  $\pm B_{max}$ , giúp giữ điện áp nút gần giá trị mong muốn.

**Nguyên lý hoạt động của PSS:** PSS là bộ điều khiển phụ gắn vào hệ thống kích từ tự động (AVR). PSS sử dụng một hoặc nhiều tín hiệu đầu vào (thường là tốc độ rotor  $\Delta\omega$ , công suất điện  $P_e$ , hoặc tần số) qua các khối rửa (washout filter), bù pha (lead-lag) và giới hạn biên độ. Tín hiệu đầu vào được xử lý để tạo tín hiệu bổ sung  $V_{pss}$  đồng pha với dao động tốc độ, từ đó tạo mômen điện từ damping dương. Nguyên lý cốt lõi dựa trên lý thuyết điều khiển tuyến tính: bù pha đúng để tín hiệu PSS ngược pha với dao động không mong muốn, giảm biên độ dao động thấp tần (0.2 - 2 Hz) giữa các máy phát trong hệ thống đa máy.

SVC hoạt động như một nguồn công suất phản kháng biến thiên nhanh, là thiết bị FACTS điển hình để ổn định điện áp và nâng cao khả năng truyền tải [1]. Trong khi đó, PSS được thiết kế để tạo mômen damping dương, dập tắt hiệu quả các dao động công suất tần số thấp giữa các máy phát [2 - 6].

Nghiên cứu áp dụng phương pháp mô phỏng số trên phần mềm MATLAB/Simulink, sử dụng toolbox Simscape Electrical. Phương pháp mô phỏng phasor được lựa chọn vì ưu điểm tính toán nhanh, phù hợp để phân tích ổn định quá độ và dao động thấp tần trong khoảng thời gian dài (đến 100 giây) mà không đòi hỏi tài nguyên lớn như mô hình chi tiết (detailed model).

Quy trình nghiên cứu bao gồm các bước sau: Xây dựng và xác nhận mô hình hệ thống truyền tải dựa trên ví dụ chuẩn power\_svc\_pss của MathWorks. Thiết lập các kịch bản sự cố: ngắn mạch ba pha và một pha tại đường truyền gần nút giữa, với thời gian sự cố 100 ms (từ  $t = 5$  s đến  $t = 5.1$  s). Thay đổi cấu hình điều khiển: (i) không PSS và không SVC, (ii) chỉ có SVC, (iii) chỉ có PSS (loại Generic), (iv) kết hợp cả SVC và PSS. Thu thập dữ liệu từ các scope: Điện áp nút (pu), công suất truyền trên đường dây (MW), góc rotor và tốc độ máy phát (pu), độ dẫn nạp của SVC (pu). Phân tích định lượng: thời gian hồi phục điện áp, biên độ dao động công suất, hệ số damping và khả năng duy trì đồng bộ. Nghiên cứu áp dụng phương pháp mô phỏng số trên nền tảng MATLAB/Simulink, sử dụng mô hình chuẩn power\_svc\_pss. Mô hình toán học cho hệ thống đa máy với các bộ điều khiển được mô tả chi tiết trong các nghiên cứu kinh điển và liên quan [6 - 8].

### 3.2.2. Mô hình toán

**Mô hình động học máy phát đồng bộ:** Mô hình phi tuyến bậc 4 được sử dụng phổ biến để phân tích ổn định quá độ.

Phương trình chuyển động (Swing Equation):

$$\frac{2H_i}{\omega_s} \frac{d^2\delta_i}{dt^2} = P_{m_i} - P_{e_i} - D_i(\omega_i - \omega_s) \quad (1)$$

Hay viết dưới dạng hệ phương trình vi phân bậc nhất:

$$\begin{cases} \frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_s \\ \frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\omega_s}{2H_i} [P_{m_i} - P_{e_i} - D_i(\omega_i - \omega_s)] \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó:

$\delta_i, \omega_i$ : Góc rotor và tốc độ góc của máy phát thứ i,  $\omega_s$ : Tốc độ đồng bộ (377 rad/s cho hệ 60 Hz),  $H_i$ : Hằng số quán tính (giây),  $D_i$ : Hệ số suy giảm (damping coefficient),  $P_{m_i}$ : Công suất cơ đầu vào từ turbine (xem xét mô hình governor nếu có),  $P_{e_i}$ : Công suất điện đầu ra.

Phương trình mạch kích từ (Simplified Exciter Model):

$$T_{doi} \frac{dE_{qi}}{dt} = E_{fd_i} - E_{qi} - (X_{di} - X'_{di})I_{di} \quad (3)$$

Trong đó:

$E'_{qi}$ : Sức điện động quá độ trên trục q,  $E_{fdi}$ : Điện áp kích từ (đầu ra của hệ thống AVR+PSS),  $T'_{doi}$ : Hằng số thời gian hồ mạch kích từ,  $X_{di}$ ,  $X'_{di}$ : Điện kháng đồng bộ và quá độ trục d,  $I_{di}$ : Thành phần dòng stator trên trục d.

**Mô hình mạng điện và phương trình đại số:** Hệ thống được mô tả bằng các phương trình đại số dựa trên ma trận tổng dẫn nút (Y-bus).

$$I_{bus} = Y_{bus}V_{bus} \quad (4)$$

Trong đó, dòng điện phát vào nút  $I_i$  từ máy phát được tính từ các biến trạng thái máy phát:

$$I_i = \frac{E_i \angle \delta_i - V_i \angle \theta_i}{jX'_{di}} \quad (5)$$

Công suất điện đầu ra máy phát ( $P_{ei}$ ): Là một hàm phi tuyến của các biến trạng thái và điện áp nút:

$$P_{ei} = R\{V_i \angle \theta_i \cdot (I_i)^*\} \quad (6)$$

**Mô hình SVC (Thyristor-Controlled Reactor - TCR/FC):** SVC được mô hình hóa như một kháng biến đổi liên tục  $B_{SVC}$  song song tại nút lắp đặt k.

$$I_{SVC} = jB_{SVC}V_k \quad (7)$$

$$B_{SVC}^{min} \leq B_{SVC} \leq B_{SVC}^{max} \quad (\text{Chế độ cảm đến dung}) \quad (8)$$

Mô hình điều khiển điện áp (Bộ điều khiển PI):

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = K_I(V_{ref} - V_m) \\ B_{SVC} = K_p(V_{ref} - V_m) + x_1 \end{cases} \quad (9)$$

$V_m$ : Điện áp nút đo được (pu),  $V_{ref}$ : Điện áp tham chiếu,  $K_p$ ,  $K_I$ : Hệ số tỷ lệ và tích phân của bộ điều khiển SVC,  $x_1$ : Biến trạng thái của bộ tích phân.

Mô hình PSS (loại tín hiệu tốc độ -  $\Delta\omega$ ):

PSS là bộ điều khiển phụ bổ sung tín hiệu  $V_{pss}$  vào đầu vào hệ thống AVR.

Cấu trúc điều khiển Lead-Lag chuẩn:

$$V_{pss}(s) = K_s \left( \frac{sT_\omega}{1+sT_\omega} \right) \left( \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right) \left( \frac{1+sT_3}{1+sT_4} \right) \Delta\omega(s) \quad (10)$$

Bộ lọc Washout ( $\frac{sT_\omega}{1+sT_\omega}$ ): Loại bỏ thành phần DC, chỉ cho tín hiệu dao động đi qua, Khối bù pha Lead-Lag ( $\frac{1+sT_1}{1+sT_2}$ ,  $\frac{1+sT_3}{1+sT_4}$ ): Điều chỉnh pha để tín hiệu  $V_{pss}$  tạo ra mô-men damping tối ưu, Hệ số khuếch đại  $K_s$ : Điều chỉnh biên độ tín hiệu đầu ra.

Toàn bộ hệ thống được mô tả bằng một hệ phương trình vi phân - đại số (Differential-Algebraic Equations - DAE):

$$\dot{x} = f(x, y, u) \quad (11)$$

$$0 = g(x, y) \quad (12)$$

$x$ : Vector biến trạng thái (State Variables).

$$x = [\delta_i, \omega_i, E'_{qi}, x_{1sVC}, x_{pss1i}, x_{pss2i}, \dots]^T \quad (13)$$

Bao gồm biến máy phát, biến bộ điều khiển SVC và PSS.

$y$ : Vector biến đại số (Algebraic Variables).

$$y = [\theta_k, V_k, \dots, P_{ei}, \dots]^T \quad (14)$$

$u$ : Vector đầu vào điều khiển/tham chiếu.

$$u = [V_{ref_{svc}}, \dots]^T \quad (15)$$

f: Tập hợp các phương trình vi phân từ máy phát và bộ điều khiển.

g: Tập hợp các phương trình đại số từ mạng điện (phương trình cân bằng công suất nút).

Trong mô phỏng, sự cố được mô hình hóa bằng cách thay đổi đột ngột ma trận tổng dẫn nút  $Y_{bus}$  tại thời điểm  $t_{fault}$ , khôi phục lại sau thời gian  $t_{clear}$ . Sự thay đổi này gây lập tức tác động lên các phương trình đại số  $g(x, y) = 0$ , dẫn đến sự thay đổi đột ngột của  $P_{ei}$  và kích thích các dao động cơ - điện trong phương trình vi phân  $\dot{x} = f(x, y, u)$ . Các phương trình còn lại tuân theo mô hình chuẩn và được trình bày trong [1, 6].

**Bảng 1.** Thông số điều khiển của PSS và SVC

Thiết bị	Tham số	Giá trị
PSS (chuẩn IEEE, muốn giảm dao động mạnh hơn: Tăng $K_s$ lên 25)	$K_s$	20
	$T_w$	10 s
	T1/T2	0.1 / 0.03 s
SVC (PI controller, mức rất ổn cho hệ 500 kV)	$K_p$	40
	$K_i$	300
	Bmax/Bmin	$\pm 0.3$ pu

Các tham số được lựa chọn dựa trên khuyến nghị IEEE 421.5 và hiệu chỉnh thông qua mô phỏng nhằm đạt hệ số tắt dần dao động tối ưu và thời gian ổn định ngắn nhất, và được tinh chỉnh thông qua mô phỏng thử - sai nhằm đạt hệ số tắt dần dao động tối ưu.

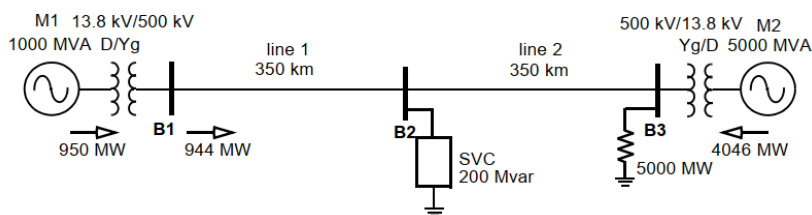
### 3.3. Bài toán

#### 3.3.1. Phân tích bài toán và thiết lập mô phỏng

Mô hình hóa một hệ thống truyền tải đơn giản chứa hai nhà máy thủy điện. Bộ bù tĩnh VAR (Static Var Compensator - SVC) và bộ ổn định hệ thống điện (Power System Stabilizers - PSS) được sử dụng để cải thiện ổn định quá độ và giảm dao động công suất của hệ thống. Phương pháp mô phỏng phasor được sử dụng để minh họa hành vi động của hệ thống. Tuy nhiên, phương pháp mô phỏng phasor cho phép mô phỏng các lưới điện phức tạp hơn.

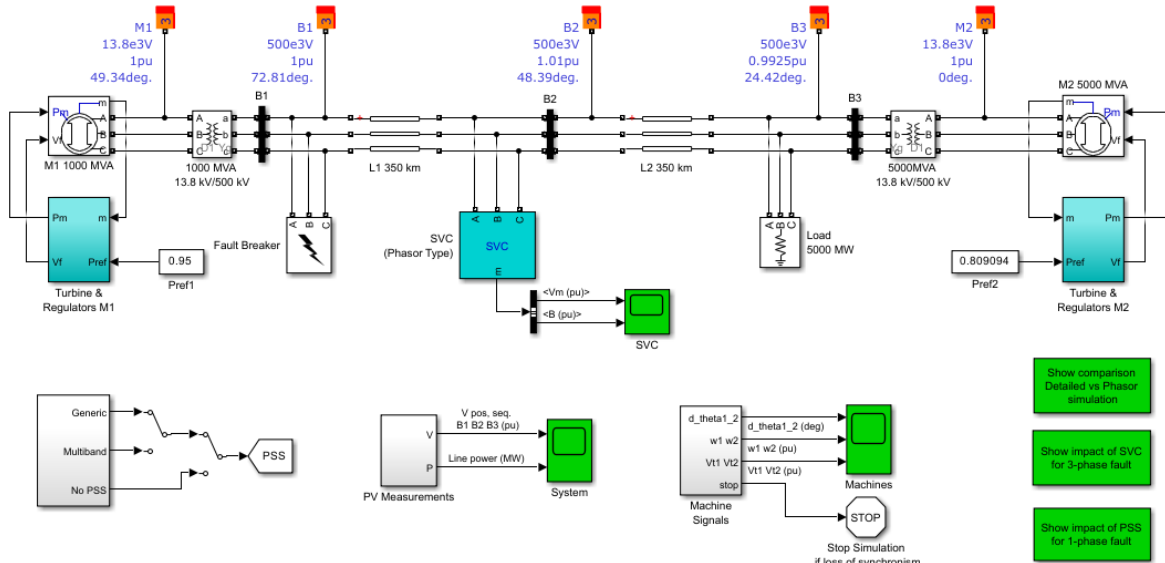
#### 3.3.2. Mô tả hệ thống truyền tải

Sơ đồ một đường đơn giản dưới đây đại diện cho một hệ thống truyền tải 500 kV đơn giản.

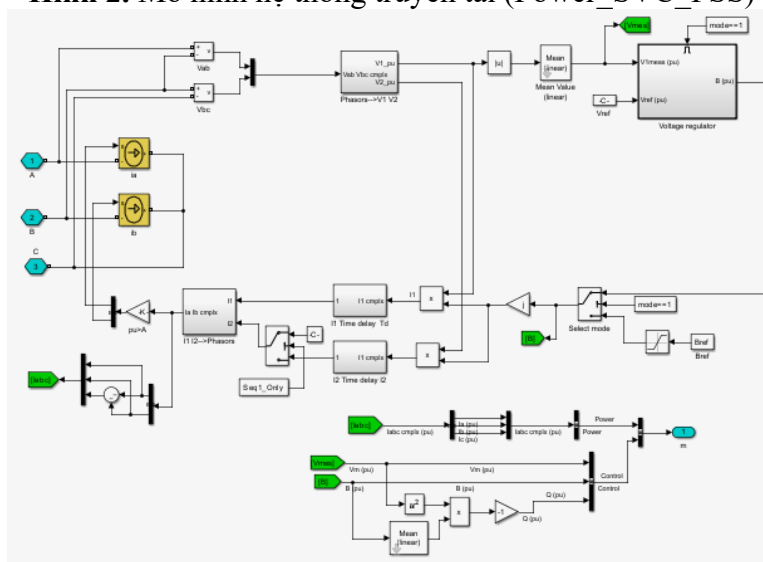


**Hình 1.** Hệ thống Truyền tải 500 kV

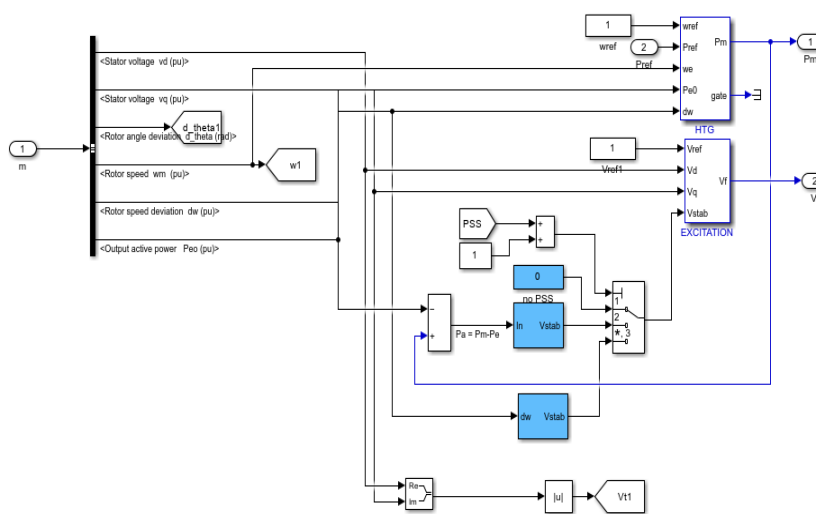
Một nhà máy phát thủy điện 1,000 MWA (M1) được kết nối với một trung tâm tải qua đường truyền dài 500 kV, 700 km. Trung tâm tải được mô hình hóa bởi một tải thuần 5000 MW. Trung tâm tải này được bù bởi một nhà máy phát 5,000 MVA ở xa (M2). Dòng công suất được tạo ra bởi nhà máy M1 là 950 MW, do đó nhà máy M2 tạo ra 4,046 MW. Công suất truyền trên đường dây gần nhà máy M1 đạt khoảng 944 MW. Để duy trì ổn định ở mức tải nặng, hệ thống được bù tại trung tâm bằng một bộ bù VAR tĩnh 200 Mvar (SVC). Hai máy phát đều được trang bị bộ điều chỉnh dao động công suất (Power Oscillation Damping - POD) nhưng chưa được trang bị PSS.



**Hình 2.** Mô hình hệ thống truyền tải (Power\_SVC\_PSS)



**Hình 3.** Mô hình bù công suất phản kháng bằng Static Var Compensator (SVC) kết hợp với Power System Stabilizer (PSS)



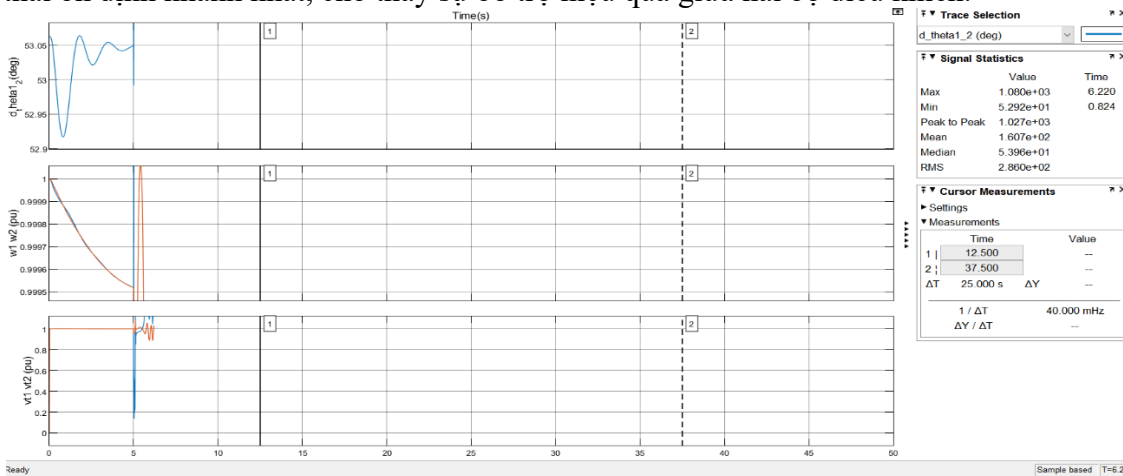
**Hình 4.** Mô hình Simulink của hệ thống điều khiển máy phát điện với PSS

### 4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ BÀN LUẬN

Các kết quả mô phỏng trong Hình 5, Hình 6 và Hình 7 minh họa rõ ràng ảnh hưởng riêng lẻ và phối hợp của SVC và PSS đến ổn định quá độ của hệ thống truyền tải hai máy. Sự cố ngắn mạch ba pha xảy ra tại thời điểm  $t = 5$  s gây ra sự suy giảm nghiêm trọng công suất điện và kích thích các dao động cơ - điện giữa các máy phát.

#### 4.1. Đáp ứng động học của máy phát

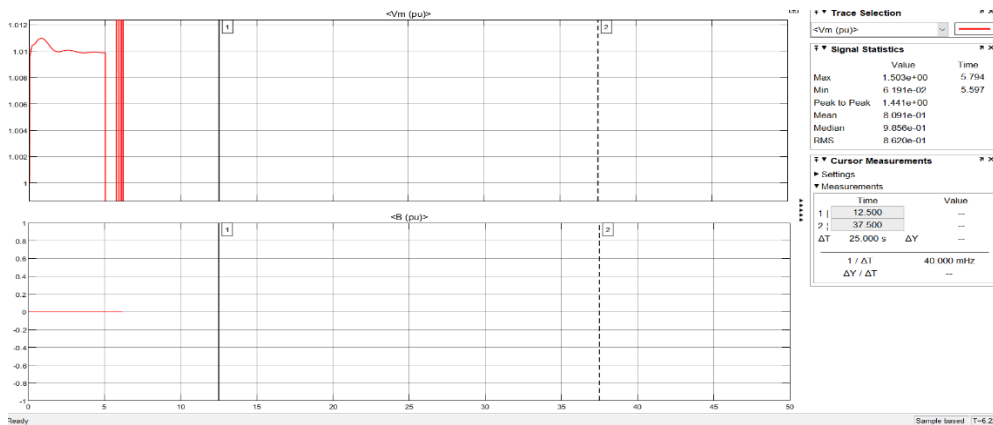
Hình 5 thể hiện đáp ứng động học của các máy phát thông qua góc rotor và tốc độ. Trong trường hợp không có thiết bị hỗ trợ, hệ thống mất đồng bộ ngay sau khi cắt sự cố, thể hiện qua góc rotor tăng không giới hạn. Khi chỉ sử dụng SVC, điện áp được cải thiện nhưng dao động góc rotor không được dập tắt hoàn toàn do thiếu mô-men damping, dẫn đến mất ổn định sau một khoảng thời gian. Trường hợp chỉ sử dụng PSS cho thấy khả năng cải thiện rõ rệt dao động thấp tần, góc rotor dao động tắt dần, tuy nhiên biên độ dao động ban đầu vẫn còn lớn do điện áp tại nút trung gian chưa được hỗ trợ đầy đủ. Khi phối hợp đồng thời SVC và PSS, biên độ dao động góc rotor giảm đáng kể và hệ thống đạt trạng thái ổn định nhanh nhất, cho thấy sự bổ trợ hiệu quả giữa hai bộ điều khiển.



Hình 5. Đáp ứng góc rotor và tốc độ máy phát

#### 4.2. Đáp ứng của SVC và ổn định điện áp

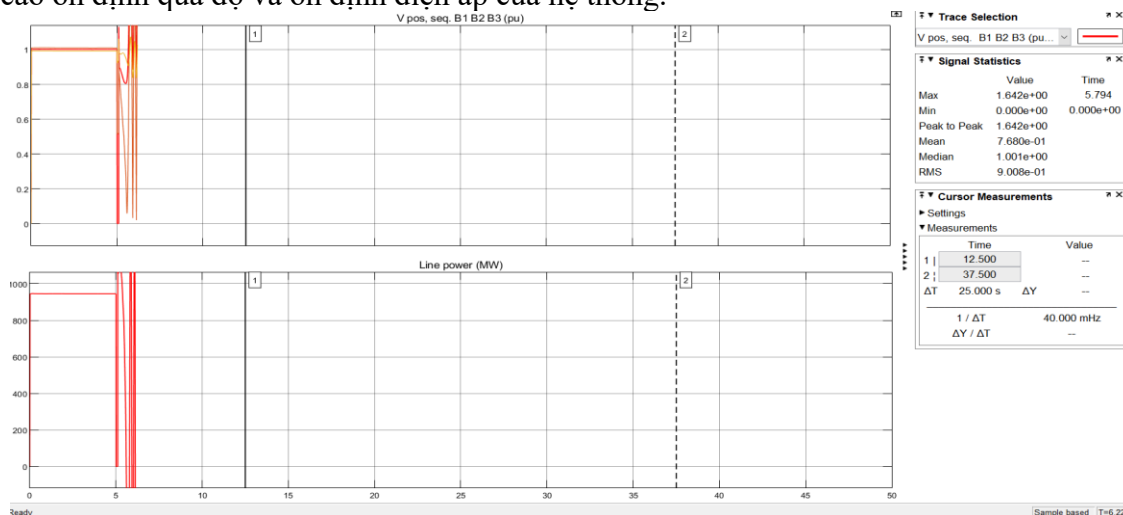
Hình 6 mô tả đáp ứng của SVC thông qua sự thay đổi độ dẫn nạp và công suất phản kháng bù. Ngay khi xảy ra sự cố, SVC nhanh chóng chuyển sang chế độ dung, phát công suất phản kháng cực đại để hỗ trợ điện áp tại nút trung gian. Sau khi sự cố được cắt, SVC tiếp tục điều chỉnh linh hoạt nhằm duy trì điện áp ổn định và giảm dao động điện áp do tương tác với các dao động công suất. Điều này khẳng định vai trò quan trọng của SVC trong việc ổn định điện áp và tạo điều kiện thuận lợi cho PSS phát huy hiệu quả damping.



Hình 6. Đáp ứng của SVC: Độ dẫn nạp ( $B_{svc}$ ) và công suất phản kháng bù ( $Q_{svc}$ )

### 4.3. Đáp ứng tổng thể hệ thống

Hình 7 trình bày đáp ứng tổng thể của hệ thống, bao gồm điện áp nút và công suất truyền tải. Trong các trường hợp không có SVC, điện áp sụt giảm sâu trong sự cố và thời gian hồi phục kéo dài. Ngược lại, các trường hợp có SVC cho thấy điện áp chỉ sụt nhẹ và nhanh chóng trở về giá trị danh định sau khi cắt sự cố. Đồng thời, công suất truyền tải trong trường hợp phối hợp SVC và PSS có biên độ dao động nhỏ nhất và thời gian ổn định ngắn nhất, phản ánh hiệu quả tổng hợp của hai thiết bị trong việc nâng cao ổn định quá độ và ổn định điện áp của hệ thống.



**Hình 7.** Đáp ứng tổng thể hệ thống: Điện áp nút trung gian (V), công suất truyền tải trên đường dây

### 4.4. Khác với mô hình power\_SVC\_PSS chuẩn của MATLAB

Vốn chỉ mang tính minh họa, mô hình trong nghiên cứu này được hiệu chỉnh để phản ánh điều kiện vận hành thực tế của lưới truyền tải 500 kV Việt Nam, bao gồm: (i) chiều dài đường dây 700 km, (ii) mức tải lớn và mất cân đối công suất giữa hai nhà máy thủy điện, (iii) đánh giá định lượng thời gian dập dao động và khả năng duy trì đồng bộ dưới các kịch bản sự cố khác nhau. Trên cơ sở đó, nghiên cứu tập trung phân tích sự tương tác động giữa vòng điều khiển điện áp của SVC và vòng điều khiển dập dao động của PSS.

Tổng hợp các kết quả cho thấy, SVC đóng vai trò chủ yếu trong việc ổn định điện áp và cải thiện điều kiện vận hành của lưới điện trong và sau sự cố, trong khi PSS cung cấp mô-men damping cần thiết để dập tắt dao động công suất thấp tần. Sự phối hợp đồng thời giữa SVC và PSS tạo ra hiệu ứng cộng hưởng, giúp hệ thống duy trì đồng bộ, giảm biên độ dao động và rút ngắn đáng kể thời gian hồi phục sau sự cố nghiêm trọng.

Kết quả mô phỏng cho thấy vòng điều khiển điện áp của SVC và vòng điều khiển damping của PSS có mối quan hệ tương hỗ. Cụ thể, việc ổn định điện áp nhanh tại nút trung gian nhờ SVC giúp giảm biên độ nhiễu điện áp tác động lên hệ thống kích từ, từ đó tạo điều kiện để PSS phát huy hiệu quả dập dao động công suất. Ngược lại, PSS làm suy giảm nhanh các dao động cơ - điện, giúp vòng điều khiển SVC tránh bị kích thích dao động thứ cấp. Điều này cho thấy hiệu quả phối hợp không chỉ là tổng hiệu quả riêng lẻ của từng thiết bị mà là sự bổ trợ động giữa hai vòng điều khiển.

**Bảng 2.** So sánh định lượng hiệu năng ổn định quá độ giữa các kịch bản điều khiển (sự cố ngắn mạch 3 pha, thời gian sự cố 100 ms)

Trường hợp	Thời gian xác lập (s)	Biên độ dao động góc rotor ban đầu	Dao động công suất	Duy trì đồng bộ
Không SVC, không PSS	Mất đồng bộ (< 3s)	Tăng không giới hạn	—	Không
Chỉ SVC	> 50 s	~580°	± 35%	Không ổn định

Trường hợp	Thời gian xác lập (s)	Biên độ dao động góc rotor ban đầu	Dao động công suất	Duy trì đồng bộ
Chỉ PSS	~35 - 40 s	~620°	± 22%	Có (biên hẹp)
<b>Kết hợp SVC + PSS</b>	<b>10 - 20 s</b>	~530° → ổn định nhanh	<b>± 8%</b>	<b>Có (mạnh)</b>

(Thời gian xác lập (settling time) được xác định khi biên độ dao động góc rotor giảm xuống dưới  $\pm 2^\circ$ ; giá trị ước lượng từ đồ thị mô phỏng).

Từ Bảng 2, có thể rút ra các nhận xét định lượng sau: (i) Kết hợp SVC+PSS rút ngắn thời gian xác lập 60 - 80% so với từng thiết bị riêng lẻ, từ trên 50 giây (chỉ SVC) và 35 - 40 giây (chỉ PSS) xuống còn 10 - 20 giây; (ii) Biên độ dao động công suất giảm từ  $\pm 35\%$  (chỉ SVC) và  $\pm 22\%$  (chỉ PSS) xuống chỉ còn  $\pm 8\%$  khi phối hợp, minh chứng định lượng cho hiệu ứng cộng hưởng (synergistic effect) giữa hai vòng điều khiển; (iii) Chỉ có kịch bản phối hợp SVC+PSS duy trì được đồng bộ ổn định với biên độ ổn định rộng ngay cả khi xảy ra sự cố 3 pha nghiêm trọng.

## 5. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

### 5.1. Kết luận

Nghiên cứu cung cấp thêm bằng chứng mô phỏng cụ thể, bổ sung cho xu hướng nghiên cứu về điều khiển phối hợp FACTS-PSS trên thế giới, đồng thời đề xuất ứng dụng thiết thực cho bài toán ổn định lưới điện truyền tải dài tại Việt Nam.

Nghiên cứu cho thấy việc phối hợp đồng thời SVC và PSS mang lại hiệu quả ổn định vượt trội so với từng thiết bị hoạt động riêng lẻ. SVC đảm nhiệm vai trò ổn định điện áp và cải thiện điều kiện vận hành của lưới truyền tải, trong khi PSS cung cấp mô-men damping cần thiết để dập tắt các dao động công suất tần số thấp. Sự phối hợp này tạo ra cơ chế hỗ trợ động giữa hai vòng điều khiển, giúp hệ thống đạt trạng thái ổn định nhanh hơn, với dao động góc rotor và công suất được dập tắt trong khoảng 10 - 20 giây, điện áp phục hồi ổn định và khả năng chịu đựng sự cố được cải thiện.

Kết quả nghiên cứu có ý nghĩa thực tiễn đối với hệ thống điện Việt Nam, nơi có tỷ trọng thủy điện cao và các tuyến truyền tải 500 kV dài chịu tải nặng. Trên cơ sở đó, nghiên cứu khuyến nghị triển khai đồng bộ các thiết bị FACTS như SVC tại các nút trung gian trọng yếu, kết hợp với việc hiệu chỉnh và duy trì hoạt động tối ưu của các bộ PSS trên các máy phát chính, nhằm nâng cao độ tin cậy và an ninh vận hành của lưới điện truyền tải.

Bên cạnh giá trị ứng dụng, nghiên cứu còn cung cấp một phân tích định lượng rõ ràng, cho thấy thời gian dập dao động được rút ngắn từ trên 50 giây xuống dưới 20 giây khi phối hợp SVC và PSS. Đồng thời, mô hình mô phỏng được xây dựng có thể sử dụng trực tiếp như một công cụ hiệu quả cho giảng dạy và nghiên cứu về ổn định hệ thống điện và thiết bị FACTS. Các hướng nghiên cứu tiếp theo có thể mở rộng sang tối ưu tham số điều khiển, tích hợp các thiết bị FACTS thế hệ mới và hệ thống điện có tỷ lệ năng lượng tái tạo cao.

### 5.2. Hướng nghiên cứu tiếp theo

Nghiên cứu được thực hiện trên mô hình hai máy tương đương, phù hợp với mục tiêu phân tích cơ chế tương tác SVC-PSS nhưng chưa phản ánh toàn bộ độ phức tạp của hệ thống đa vùng thực tế. Các giới hạn cụ thể bao gồm: (i) chưa xét tương tác đa vùng (multi-area oscillations); (ii) chưa tích hợp nguồn năng lượng tái tạo biến động (điện gió, điện mặt trời); (iii) tham số PSS và SVC được chỉnh định thủ công theo IEEE 421.5, chưa áp dụng tối ưu hóa tự động. Những hạn chế này được nhận thức rõ ràng và định hướng cho các nghiên cứu tiếp theo được trình bày dưới đây.

Ứng dụng trong quy hoạch: Cần xem xét tích hợp SVC và PSS đồng bộ trong thiết kế, nâng cấp các đường truyền tải xa 500 kV, đặc biệt ở các khu vực có tỷ trọng thủy điện cao.

Nghiên cứu tiếp theo: (a) Khảo sát hiệu quả với các loại sự cố phức tạp hơn (như sự cố kép). (b) Mở

rộng nghiên cứu cho hệ thống tích hợp năng lượng tái tạo biến động cao (điện gió, mặt trời).

Hướng nghiên cứu tiếp theo có thể kế thừa và mở rộng dựa trên các phương pháp đang phát triển: tối ưu hóa tham số điều khiển phối hợp bằng các thuật toán tiên tiến (AI, PSO) [ 9], đánh giá thiết bị FACTS thế hệ mới như STATCOM [10] trong hệ thống có tích hợp năng lượng tái tạo [11], hoặc nghiên cứu cơ chế điều khiển tập trung (wide-area control) dựa trên tín hiệu PMU [12], Ngoài ra, các hướng tiếp cận tối ưu tham số PSS-SVC [13] và ổn định hệ thống đa máy [14, 15] cũng là những tham chiếu quan trọng cho nghiên cứu tiếp theo.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. Guesmi, B. M. Alshammari, Y. Almalaq, A. Alateeq, and K. Alqunun, “New coordinated tuning of SVC and PSSs in multimachine power system using Coyote optimization algorithm,” *Sustainability*, vol. 13, no. 6, p. 3131, 2021, doi: 10.3390/su13063131.
- [2] N. M. A. Ibrahim, E. A. El-Said, H. E. M. Attia, and B. A. Hemade, “Enhancing power system stability: An innovative approach using coordination of FOPID controller for PSS and SVC FACTS device with MFO algorithm,” *Electrical Engineering*, vol. 106, pp. 2265–2283, 2024, doi: 10.1007/s00202-023-02051-7.
- [3] B. Kada and A. K. Bensenouci, “Coordinate control for an SMIB power system with an SVC,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*, vol. 2023, Art. no. 7883177, 2023, doi: 10.1155/2023/7883177.
- [4] A. Farah, A. Belazi, K. Alqunun, A. Almalaq, B. M. Alshammari, M. B. Ben Hamida, and R. Abbassi, “A new design method for optimal parameters setting of PSSs and SVC damping controllers to alleviate power system stability problem,” *Energies*, vol. 14, no. 21, p. 7312, 2021, doi: 10.3390/en14217312.
- [5] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2000.
- [6] C. M. Verrelli, R. Marino, P. Tomei, and G. Damm, “Nonlinear robust coordinated PSS-AVR control for a synchronous generator connected to an infinite bus,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 66, no. 11, pp. 5468–5475, 2021, doi: 10.1109/TAC.2021.3062174.
- [7] A. T. Moghadam, M. Aghahadi, M. Eslami, S. Rashidi, B. Arandian, and S. Nikolovski, “Adaptive rat swarm optimization for optimum tuning of SVC and PSS in a power system,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2022, Art. no. 4798029, 2022, doi: 10.1155/2022/4798029.
- [8] M. Zamani, G. Shahgholian, A. Fathollahi, A. Mosavi, and I. Felde, “Improving interarea mode oscillation damping in multi-machine energy systems through a coordinated PSS and FACTS controller framework,” *Sustainability*, vol. 15, no. 22, p. 16070, 2023, doi: 10.3390/su152216070.
- [9] M. A. Kamarposhti, H. Shokouhandeh, Y. G. Omali, I. Colak, P. Thounthong, and W. Holderbaum, “Optimal coordination of TCSC and PSS2B controllers in electric power systems using MOPSO multiobjective algorithm,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2022, Art. no. 5233620, 2022, doi: 10.1155/2022/5233620.
- [10] S. A. Dahat and A. Dhabale, “Rotor angle stability improvement by coordinated control of SVC and SSSC controllers,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 13–22, 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.05.050.
- [11] M. R. Djalal, I. Robandi, and M. A. Prakasa, “Stability enhancement of Sulselrabar electricity system using Mayfly algorithm based on static var compensator and multi-band power system stabilizer PSS2B,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 67234–67248, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3283598.

- [12] P. K. Guchhait, A. Banerjee, and V. Mukherjee, "Application of Posicast controller with SVC in wind-diesel hybrid power system model," *SN Applied Sciences*, vol. 3, Art. no. 566, 2021, doi: 10.1007/s42452-021-04454-2.
- [13] P. Khampariya, S. Panda, H. Alharbi, A. Y. Abdelaziz, and S. S. M. Ghoneim, "Coordinated design of type-2 fuzzy lead-lag-structured SSSCs and PSSs for power system stability improvement," *Sustainability*, vol. 14, no. 11, p. 6656, 2022, doi: 10.3390/su14116656.
- [14] A. Khan, B. Hussain, A. Wahyudie, and R. A. Khalil, "Stability improvement of renewable energy integrated power network through coordination of PSS, ISFCL, and STATCOM," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 14567–14579, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3592940.
- [15] N. V. Liem, T. Q. Tuan, N. B. Khue và N. C. Hung, "Stability studies and improvement in Vietnam power system," *VNUHCM Journal of Science and Technology Development*, vol. 5, no. 11, pp. 38-47, Nov. 2002, doi:10.32508/stdj.v5i11.3456.