

XÂY DỰNG ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT CHO THIẾT BỊ BÙ ĐIỀU KHIỂN DÒNG CÔNG SUẤT UPFC

SLIDING MODE CONTROLLER DESIGN FOR UPFC POWER LINE CONTROL COMPENSATION DEVICE

Hoàng Thị Thu Hà¹, Trần Thị Kim Thanh^{2*}, Tạ Tuấn Hữu²,
Nguyễn Văn Cảnh³, Nguyễn Trung Hiếu²

DOI: <http://doi.org/10.57001/huic5804.2024.202>

TÓM TẮT

Trong những năm gần đây, kiểm soát dòng điện ngày càng trở nên quan trọng trong lĩnh vực hệ thống truyền tải điện thông minh. Bộ điều khiển dòng công suất hợp nhất (UPFC) cung cấp khả năng điều khiển dòng công suất tác dụng và phản kháng theo thời gian thực. Bài báo trình bày kết quả tổng hợp bộ điều khiển trượt (SMC) cho thiết bị bù điều khiển dòng công suất (UPFC). Bộ điều khiển đã giúp ổn định công suất lưới điện, giảm ảnh hưởng của tải phi tuyến và hiện tượng sóng hài đến tính ổn định của lưới điện. Chất lượng của bộ điều khiển được đánh giá thông qua kết quả mô phỏng hệ truyền tải lưới điện 500kV bằng phần mềm Matlab-Simulink.

Từ khóa: Thiết bị bù dòng công suất; điều khiển trượt; công suất; truyền tải điện năng.

ABSTRACT

In recent years, power flow control has become increasingly important in the field of intelligent power transmission systems. The Unified Power Flow Controller (UPFC) provides real-time control of active and reactive power flows. This article presents the results of synthesizing a sliding regulator (SMC) for a power flow control compensation device (UPFC). The controller has helped stabilize grid capacity, reducing the influence of nonlinear loads and harmonic phenomena on grid stability. The quality of the proposed controller is evaluated through simulation results of the 500kV power grid transmission system using Matlab-Simulink software.

Keywords: Unified power flow controller; sliding mode control; power; electricity transmission.

¹Trường Đại học Thành Đô

²Trường Đại học Điện Lực

³Trường Trung cấp Kinh tế - Kỹ thuật Bắc Thăng Long

*Email: thanhhtk@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 28/3/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/5/2024

Ngày chấp nhận đăng: 25/6/2024

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

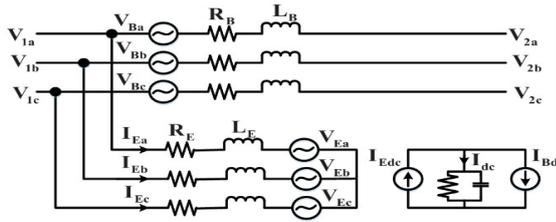
Trong những năm gần đây, nhu cầu điện năng ngày càng tăng khiến đường dây truyền tải trong tình trạng quá tải và dẫn đến mất ổn định hệ thống điện. Chính vì vậy cần có các giải pháp thiết thực để cải thiện khả năng truyền tải điện và

vận hành đường dây hiện có. Trong các phương pháp truyền thống, việc sử dụng máy biến áp lệch pha, tụ điện song song và tụ điện nối tiếp giúp tăng khả năng truyền tải điện và cải thiện tính ổn định của hệ thống điện [1]. Thiết bị FACTS (Flexible alternating current transmission system) đã được đề xuất cho việc truyền tải điện, nhằm tăng lưu lượng điện và công suất đường dây cũng như cải thiện độ ổn định của hệ thống. Trong số các thiết bị thực tế, UPFC là thiết bị điều khiển luồng công suất, tạo ra dòng công suất tác dụng và công suất phản kháng độc lập trong đường dây truyền tải. Việc cải thiện tính ổn định của hệ thống phụ thuộc vào việc sử dụng phương pháp điều khiển phù hợp của bộ điều khiển UPFC [2]. Có nhiều kỹ thuật điều khiển khác nhau đã được phát triển để cải thiện hiệu suất của UPFC. Phương pháp Lyapunov trực tiếp [3], bộ điều khiển dựa trên lý thuyết điều khiển thông thường như PID [4], mạng nơron [5], logic mờ [6] và điều khiển dự báo [7] là một số phương pháp đã được phát triển trong tài liệu.

Trong một hệ thống điện, có chứa nhiều bất định do những thay đổi về thông số, đặc tính của hệ thống, sự thay đổi của phụ tải và các sai số trong mô hình hóa nên các điểm vận hành có thể thay đổi. Vì vậy cần một bộ điều khiển phù hợp để điều khiển UPFC. SMC là một phương pháp điều khiển hiện đại đã được ứng dụng trong nhiều hệ thống kỹ thuật. SMC có khả năng khắc phục yếu tố bất định của mô hình động. Bài viết này trình bày một phương pháp điều khiển trượt cho UPFC, nhằm đảm bảo sự ổn định nhất thời cho lưới điện truyền tải.

2. MÔ HÌNH UPFC TRONG HỆ THỐNG ĐIỆN

UPFC được sử dụng để điều khiển dòng công suất trong hệ thống truyền tải bằng cách điều khiển trở kháng, cường độ điện áp và góc pha. Bộ điều khiển này mang lại nhiều ưu điểm về vận hành tính và động của hệ thống điện. Cấu trúc cơ bản của UPFC bao gồm hai bộ biến tần nguồn áp (VSI); trong đó một bộ chuyển đổi được mắc song song với đường truyền, một bộ chuyển đổi kia mắc nối tiếp với đường dây truyền tải. Hình 1 thể hiện mạch tương đương của UPFC. Mỗi bộ chuyển đổi của UPFC có thể tạo ra hoặc hấp thụ công suất tác dụng hoặc công suất phản kháng từ đường dây truyền tải một cách độc lập.



Hình 1. Mạch tương đương UPFC

Trong đó: Chỉ số “abc” biểu thị các biến trong tọa độ pha; i_e là dòng điện đi vào biến tần nối tiếp; u_e, u_b là điện áp đầu ra biến tần nối tiếp và biến tần Shunt;

Theo [8], phương trình cân bằng điện áp đầu vào UPFC có dạng:

$$u_1 = R_E i_E + L_E \frac{di_E}{dt} + u_E \quad (1)$$

$$u_1 = -u_B + R_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt} + u_2 \quad (2)$$

Các biến tần được kết nối với mạng điện qua máy biến áp, vì vậy:

$$|u_E| = u_{dc} K_E m_E \quad (3)$$

$$|u_B| = u_{dc} K_B m_B \quad (4)$$

Điện áp biến tần nối tiếp và shunt cũng như điện áp đầu vào và đầu ra có:

$$u_{1a} = |u_1| \delta_1 \quad (5)$$

$$u_{2a} = |u_2| \delta_2 \quad (6)$$

$$u_{Ea} = |u_E| \delta_E \quad (7)$$

$$u_{Ba} = |u_B| \delta_B \quad (8)$$

Trong các phương trình trên (m_B, δ_B) và (m_E, δ_E) là tỷ số điều chế và góc pha; (K_B, K_E) là tỷ số biến đổi của bộ biến đổi nối tiếp và bộ chuyển đổi song song tương ứng.

Bằng cách viết phương trình (1) và (2) theo trục d-q, có:

$$u_{1d} = -u_{Bd} + R_B i_{Bd} + L_B \frac{di_{Bd}}{dt} - \omega i_{Bq} + u_{2d} \quad (9)$$

$$u_{1q} = -u_{Bq} + R_B i_{Bq} + L_B \frac{di_{Bq}}{dt} - \omega i_{Bd} + u_{2q} \quad (10)$$

$$u_{1d} = R_E i_{Ed} + L_E \frac{di_{Ed}}{dt} - \omega i_{Eq} + u_{Ed} \quad (11)$$

$$u_{1q} = R_E i_{Eq} + L_E \frac{di_{Eq}}{dt} - \omega i_{Ed} + u_{Eq} \quad (12)$$

Có thể thu được u_B, u_E theo trục d-q như sau:

$$u_{Bd} = u_{dc} K_B m_B \cos \delta_B \quad (13)$$

$$u_{Bq} = u_{dc} K_B m_B \sin \delta_B \quad (14)$$

$$u_{Ed} = u_{dc} K_E m_E \cos \delta_E \quad (15)$$

$$u_{Eq} = u_{dc} K_E m_E \sin \delta_E \quad (16)$$

Từ các phương trình (1)-(16) và xem xét dòng điện trên hai trục d-q trong các bộ chuyển đổi nối tiếp, Shunt và điện áp liên kết DC như các biến trạng thái, ta có phương trình trạng thái sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_B}{L_B} & \frac{\omega}{\omega_b} & 0 & 0 & \frac{u_1}{L_B} \\ -\omega & \frac{-R_B}{L_B} & 0 & 0 & \frac{u_2}{L_B} \\ 0 & 0 & \frac{-R_E}{L_E} & \frac{\omega}{\omega_b} & \frac{-u_3}{L_E} \\ 0 & 0 & \frac{-\omega}{\omega_b} & \frac{-R_E}{L_E} & \frac{-u_4}{L_E} \\ -\frac{3}{2}u_1C & -\frac{3}{2}u_1C & -\frac{3}{2}u_1C & -\frac{3}{2}u_1C & \frac{-C}{R_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + \omega_b \begin{bmatrix} \frac{1}{L_B} & 0 & \frac{-1}{L_B} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_B} & 0 & \frac{-1}{L_B} & 0 \\ \frac{1}{L_E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_E} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1d} \\ V_{1q} \\ V_{2d} \\ V_{2q} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Trong đó: $X = [i_{Bd} \ i_{Bq} \ i_{Ed} \ i_{Eq} \ i_{dc}]$; $u_1 = K_B m_B \cos \delta_B$; $u_2 = K_B m_B \sin \delta_B$; $u_3 = K_E m_E \cos \delta_E$; $u_4 = K_E m_E \sin \delta_E$

3. XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN SMC

Phương trình động lực học phi tuyến của hệ thống:

$$\dot{X} = f(X) + g(X) \quad (18)$$

Trong đó, $f(X), g(X)$ là các hàm phi tuyến và bất định, X là biến trạng thái.

Bộ điều khiển được thiết kế đảm bảo cho biến trạng thái bám theo tín hiệu đặt, biến sai lệch được định nghĩa như sau:

$$e = X - X^d \quad (19)$$

Chọn mặt trượt có dạng:

$$s = \dot{e} + \lambda e \quad (20)$$

Với λ là tham số thiết kế. Điều kiện trượt được xác định:

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s| \Rightarrow s\dot{s} \leq -\eta |s| \Rightarrow \dot{s} \leq -\eta \text{sgn}(s) \quad (21)$$

Để hệ ổn định tiệm cận, chọn luật điều khiển như sau:

$$u = -g(X)^{-1} f(X) + (K_1 + K_2 \int (X - X^d) dt + \eta \text{sgn}(s)) \quad (22)$$

Trong đó, K_1 và K_2 là các thông số thiết kế. Công suất tác dụng và công suất phản kháng của bộ biến đổi nối tiếp được định nghĩa là các biến trạng thái của hệ thống $X = [P_s \ Q_s]^T$.

Sai số theo biến trạng thái được xác định như sau:

$$\dot{S}_{ps} = \dot{e}_{ps} + \lambda e_{ps} = (\dot{P}_s - \dot{P}_s^d) + \lambda (P_s - P_s^d) \quad (23)$$

$$\dot{S}_{Qs} = \ddot{e}_{Qs} + \lambda \dot{e}_{Qs} = (\ddot{Q}_s - \ddot{Q}_s^d) + \lambda(\dot{Q}_s - \dot{Q}_s^d) \quad (24)$$

Với P_s, Q_s lần lượt là công suất tác dụng và công suất phản kháng. Nếu chúng ta xem xét điều khiển chế độ trượt bậc hai cho công suất tác dụng và phản kháng, sự biến đổi của bề mặt trượt dựa trên (6) và (7) sẽ được định nghĩa như các phương trình sau:

$$\begin{aligned} \dot{S}_p &= (\dot{P}_s - \dot{P}_s^d) + \lambda(P_s - P_s^d) \\ &\leq -\eta \text{sgn}(S_p) = -\eta \text{sgn}((\dot{P}_s - \dot{P}_s^d) + \lambda(P_s - P_s^d)) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \dot{S}_{Qs} &= (\dot{Q}_s - \dot{Q}_s^d) + \lambda(Q_s - Q_s^d) \\ &\leq -\eta \text{sgn}(S_{Qs}) = -\eta \text{sgn}((\dot{Q}_s - \dot{Q}_s^d) + \lambda(Q_s - Q_s^d)) \end{aligned} \quad (26)$$

Mặt khác ta có:

$$\dot{x} = a|e(t)|^{0.5} \text{sgn}(e(t)) + b \int_0^t \text{sgn}(e(s)) ds \quad (27)$$

Thay (25) và (26) vào (27), thu được phương trình mặt trượt bậc hai. Mặt trượt trên được xác định như sau:

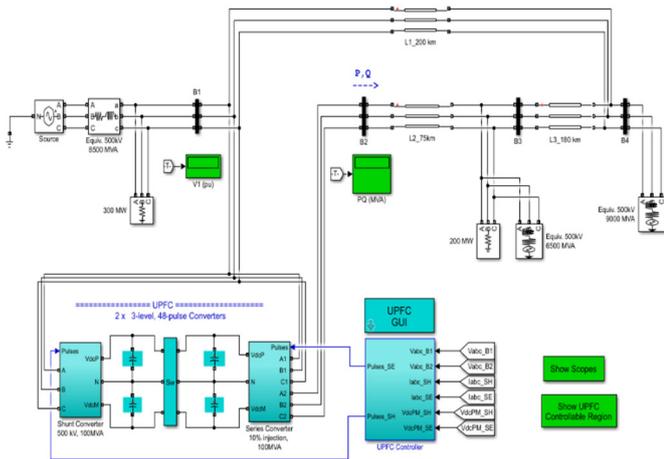
$$\text{sat}(S_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } S_k > \phi \\ \frac{S_k}{\phi} & \text{if } |S_k| > \phi \\ -1 & \text{if } S_k < -\phi \end{cases} \quad (28)$$

Trong (28), ϕ là giới hạn dao động. Điện áp tham chiếu u_{qr} và u_{dr} được xác định:

$$\begin{bmatrix} V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{p1}(P_s - P_s^d) + K_{i1} \int (P_s - P_s^d) + K_{p2} \text{sat}(S_p) + K_{i2} \int \text{sat}(S_p) \\ K_{q1}(Q_s - Q_s^d) + K_{i1} \int (Q_s - Q_s^d) + K_{q2} \text{sat}(S_{Qs}) + K_{i2} \int \text{sat}(S_{Qs}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\alpha - e} \end{bmatrix} \quad (29)$$

Theo luật điều khiển được xác định trong (29), với $K_{pr}, K_{qr}, K_{psr}, K_{qs}$ là tham số thiết kế, đảm bảo hệ ổn định và giảm hiện tượng dao động của điều khiển trượt.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

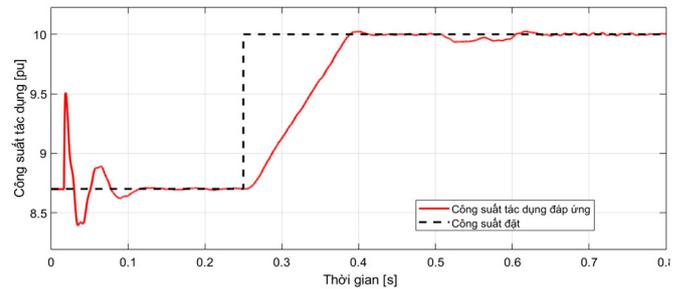


Hình 2. Mô phỏng hệ thống truyền tải 500kV dùng UPFC

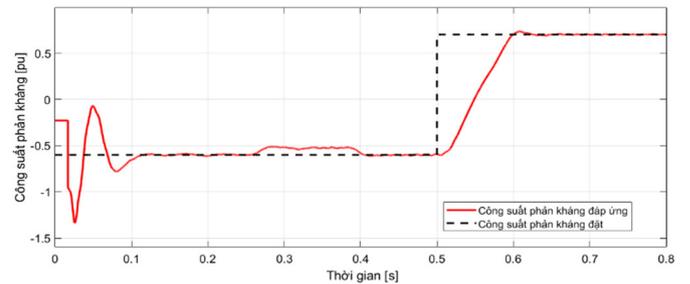
Bộ điều khiển lưỡng công suất hợp nhất (UPFC) được sử dụng để điều khiển lưỡng công suất trong hệ thống truyền tải 500kV. UPFC nằm ở đầu bên trái của đường L2 dài 75km, giữa bus B1 và B2 500kV, được sử dụng để điều khiển công suất tác dụng và phản kháng chạy qua bus B2 trong khi điều khiển điện áp ở bus B1. Nó bao gồm hai bộ chuyển đổi dựa

trên GTO 100MVA, ba cấp, 48 xung, một bộ được nối song song ở bus B1 và một bộ được nối nối tiếp giữa bus B1 và B2. Bộ chuyển đổi song song và nối tiếp có thể trao đổi nguồn điện thông qua bus DC. Bộ chuyển đổi nối tiếp có thể đưa tối đa 10% điện áp nối đất danh định (28,87kV) nối tiếp vào đường dây L2.

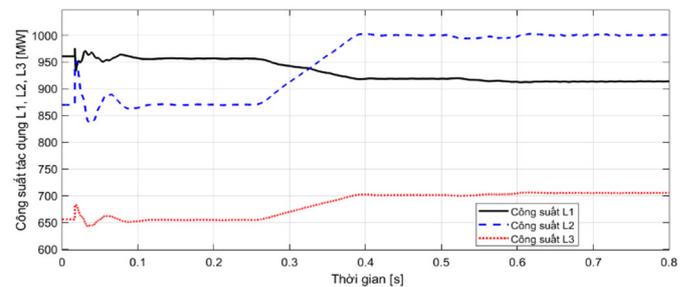
Trường hợp 1: Công suất tác dụng và phản kháng đặt ban đầu, $P_{ref} = +8,7\text{pu}/100\text{MVA}$ (+870MW) và $Q_{ref} = -0,6\text{pu}/100\text{MVA}$ (-60Mvar). Tại $t = 0,25$ giây, P_{ref} được đổi thành +10pu (+1000MW). Sau đó, tại thời điểm $t = 0,5$ giây, Q_{ref} được đổi thành +0,7pu (+70Mvar). Điện áp tham chiếu của bộ chuyển đổi shunt sẽ được giữ không đổi ở $V_{ref} = 1\text{pu}$ trong toàn bộ quá trình mô phỏng (thời gian bước = $0,3 * 100 >$ thời gian dừng mô phỏng (0,8 giây)).



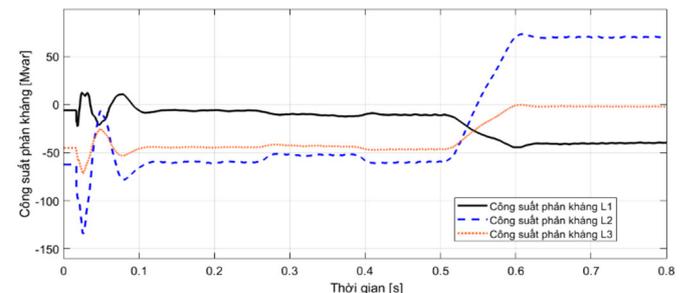
Hình 3. Đáp ứng công suất tác dụng



Hình 4. Đáp ứng công suất phản kháng



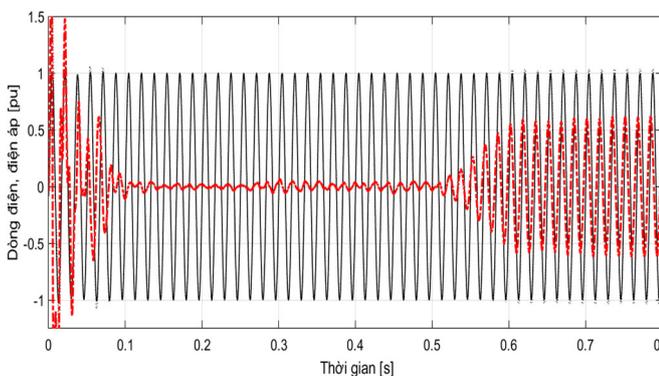
Hình 5. Công suất tác dụng trên các nhánh đường dây truyền tải



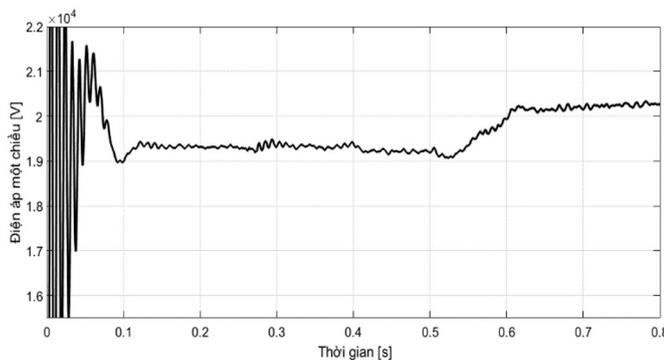
Hình 6. Công suất phản kháng trên các nhánh đường dây truyền tải

Trường hợp 2: Giá trị tham chiếu $[T_1 \ T_2 \ Q_1 \ Q_2]$

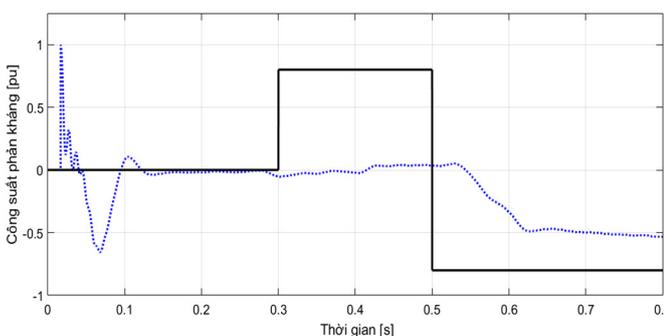
được đặt $[0,3 \ 0,5 \ +0,8 \ -0,8]$. Ở chế độ này, UPFC được vận hành như một nguồn công suất phản kháng thay đổi. Ban đầu, Q được đặt thành 0, sau đó tại $T_1 = 0,3$ giây Q được tăng lên $+0,8pu$ (UPFC hấp thụ công suất phản kháng) và tại $T_2 = 0,5$ giây, Q được đảo ngược thành $-0,8pu$ (UPFC tạo ra công suất phản kháng). Chạy mô phỏng và quan sát phản hồi động của UPFC. Khi $t = 0,5$ giây, Q được thay đổi từ $+0,8pu$ thành $-0,8pu$. Khi $Q = +0,8pu$, điện áp trễ so với dòng điện, cho thấy UPFC đang hấp thụ công suất phản kháng. Khi Q_{ref} được thay đổi từ $+0,8$ thành $-0,8$, độ dịch pha hiện tại đối với điện áp trễ 90° trong một chu kỳ. Việc điều khiển công suất phản kháng đạt được bằng cách thay đổi độ lớn của điện áp thứ cấp V_s được tạo ra bởi bộ chuyển đổi song song trong khi vẫn giữ nó cùng pha với điện áp thanh cái B1 V_p . Sự thay đổi cường độ V_s được thực hiện bằng cách điều khiển điện áp bus DC. Khi Q thay đổi từ $+0,8pu$ thành $-0,8pu$, V_{dc} tăng từ $17,5kV$ lên $21kV$.



Hình 7. Cường độ dòng điện, điện áp đầu ra UPFC



Hình 8. Điện áp một chiều



Hình 9. Công suất phản kháng

Nhận xét:

Kết quả sau khi mô phỏng cho thấy bộ SMC đã giúp UPFC đạt được các yêu cầu của một thiết bị bù điều khiển dòng công suất. Khi công suất tác dụng và công suất phản kháng trên đường truyền thay đổi, hệ thống nhanh chóng đáp ứng, với thời gian quá độ lớn nhất là 1,5 giây, sai số 0,01pu, không có dao động.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã mô hình hóa thiết bị bù UPFC, trên cơ sở đó đề xuất luật điều khiển SMC. Kết quả sau khi khảo sát cho thấy thiết bị bù đảm bảo được yêu cầu chất lượng, đảm bảo duy trì được công suất truyền tải. Có thể ứng dụng trong hệ thống truyền tải điện năng quốc gia như đường dây 500kV và các đường dây truyền tải khác.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. C. Chakraborty, H. H. C. Lu, D. D. C. Lu, "Power converters, control, and energy management for distributed generation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62, 4466-4470, 2015.
- [2]. J. Yin, *Unified Power Flow Controller Technology and Application*. Academic Press, 2017.
- [3]. A. M. Shotorbani, A. Ajami, M. P. Aghababa, S. H. Hosseini, "Direct lyapunov theory-based method for power oscillation damping by robust finite-time control of unified power flow controller," *IET Generation, Transmission & Distribution*, 7, 7, 691-699, 2013.
- [4]. P. Kasinathan, R. Vairamani, S. Sundramoorthy, "Dynamic performance investigation of d-q model with PID controller-based unified power-flow controller," *IET Power Electronics*, 6, 5, 843-850, 2013.
- [5]. S. Mishra, "Neural-network-based adaptive UPFC for improving transient stability performance of power system," *IEEE Transactions on Neural Networks*, 17, 2, 461-470, March 2006.
- [6]. M. E. A. Farrag, G. A. Putrus, "Design of an Adaptive Neurofuzzy Inference Control System for the Unified Power-Flow Controller," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27, 1, 53-61, 2012.
- [7]. S. Tiwari, R. Naresh, R. Jha, "Neural network predictive control of UPFC for improving transient stability performance of power system," *Appl. Soft Comput.*, 11, 8, 4581-4590, 2011.
- [8]. M. Nayeripour, T. Niknam, S. Jam, "Design of sliding mode controller for UPFC to improve power oscillation damping," *Applied Soft Computing*, 11, 4766-4772, 2011.

AUTHORS INFORMATION

Hoang Thi Thu Ha¹, Tran Thi Kim Thanh², Ta Tuan Huu², Nguyen Van Canh³, Nguyen Trung Hieu²

¹Thanh Do University, Vietnam

²Electric Power University, Vietnam

³Northern Thanglong Economic Technical College, Vietnam