

XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT CHO D-STATCOM DÙNG BÙ ĐIỆN ÁP TRONG HỆ THỐNG PHÂN PHỐI LƯỚI ĐIỆN

DESIGN SLIDING CONTROLLER FOR D-STATCOM USING VOLTAGE COMPENSATION IN THE POWER GRID DISTRIBUTION SYSTEM

Đặng Tiến Trung*, Nguyễn Thị Thu Hiền

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 25/3/2024, Ngày chấp nhận đăng: 25/4/2024, PGS. TS Phạm Tuấn Thành

Tóm tắt:

Bài báo đề xuất điều khiển chế độ trượt SMC cho D-STATCOM để bù áp cho hệ thống phân phối điện năng bằng cách bơm thêm hoặc hấp thụ một lượng công suất phản kháng khi bị nhiễu. Tính ổn định của bộ điều khiển SMC được chứng minh bằng tiêu chuẩn ổn định Lyapunov. Hiệu quả của bộ điều khiển được kiểm chứng bằng mô phỏng trên Matlab-Simulink. Kết quả khẳng định tính ưu việt của bộ điều khiển được đề xuất về khả năng ổn định biên độ và cải thiện chất lượng điện áp khi xảy ra nhiễu nhỏ trong chế độ xác lập cũng như việc nâng cao biên độ, giảm dao động điện áp, phục hồi nhanh về giá trị ban đầu trong quá trình quá độ khi xảy ra nhiễu lớn trong hệ thống điện.

Từ khóa:

Bộ bù đồng bộ tĩnh lưới phân phối (D-STATCOM); bộ bù tĩnh (SVC); bộ nghịch lưu nguồn áp (VSC); cải thiện chất lượng điện áp.

Abstract:

This article proposes SMC sliding mode control for D-STATCOM to compensate the power distribution system by injecting or absorbing an amount of reactive power when disturbed. The stability of the SMC controller is proven by the Lyapunov stability criterion. The effectiveness of the controller is verified by simulation on Matlab-Simulink. The results confirm the superiority of the proposed controller in terms of its ability to stabilize amplitude and improve voltage quality when small disturbances occur in steady state mode as well as increasing amplitude and reducing voltage fluctuations, recovering quickly to the original value during transients when large disturbances occur in the power system.

Keywords:

Distribution static synchronous compensator (D-STATCOM); Static var compensator (SVC); Voltage Source Converter (VSC); Voltage quality improvement.

1. MỞ ĐẦU

Trong những năm gần đây, đã có nhiều công trình nghiên cứu về việc tích hợp D-STATCOM trong hệ thống phân phối

điện bằng bộ điều khiển tuyến tính. Công trình [1] đã phân tích việc sử dụng bộ điều khiển PI trong D-STATCOM để giảm tác động không mong muốn do nhiễu

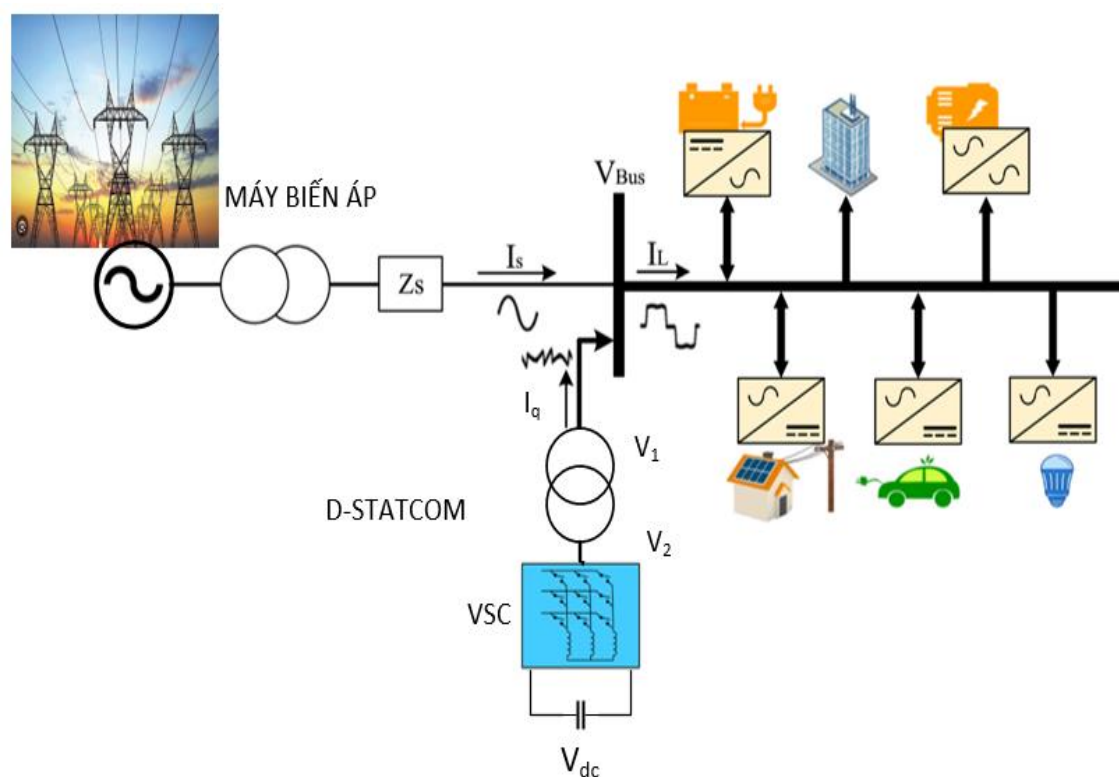
lưới tạo ra. Điều khiển PID được sử dụng cho D-STATCOM để bù tải một pha trong hệ thống phân phối điện nhằm hiệu chỉnh hệ số công suất [2]. Các tác giả trong [3], đã trình bày một D-STATCOM dựa trên biến tần đa cấp xếp tầng ổn định điện áp lưới thông qua bộ điều khiển PI để bù công suất phản kháng. Trong [4], đã đề xuất một PV-STATCOM kết hợp bộ điều khiển IP và PID với tải phi tuyến, không cân bằng để giảm các sóng hài. Bộ điều khiển trượt SMC được sử dụng thiết kế D-STATCOM [5] nhằm bù áp cho hệ thống phân phối điện. Tuy nhiên, kết quả cho thấy thời gian phản hồi rất chậm có thể gây mất ổn định hệ thống. Trong [6] đã đề xuất sử dụng SMC bậc hai trong

D-STATCOM, nhưng mô hình toán khá phức tạp. Hơn nữa, trong điều kiện tải không cân bằng, tổng méo hài đầu ra khá cao.

Trong bài báo, tác giả đề xuất một bộ điều khiển trượt được thiết kế cho vòng dòng điện bên trong D-STATCOM nhằm bù điện áp cho lưới điện hạ áp. Nhờ mặt trượt phi tuyến, hiệu quả điều khiển được nâng lên rõ rệt và được kiểm chứng thông qua mô phỏng bằng phần mềm Matlab-Simulink.

2. CẤU TRÚC MÔ HÌNH

Xét một mô hình hệ thống phân phối điện năng như Hình 1.



Hình 1. Cấu trúc cơ bản của hệ D-STATCOM trong hệ thống phân phối điện

Hình 1 trình bày cấu trúc cơ bản của D-STATCOM bao gồm: một bộ biến đổi nguồn điện áp ba pha (VSC) dựa vào chuyển mạch điện tử công suất chuyển nguồn điện áp DC sang AC kết nối với phía thứ cấp của máy biến áp với lưới phân phối. Nguyên lý hoạt động của D-STATCOM chính là việc điều chỉnh công suất phản kháng được thực hiện bằng việc điều khiển bộ VSC. VSC sử dụng các linh kiện điện tử công suất để điều chế thành điện áp xoay chiều ba pha V2 từ nguồn một chiều Vdc được tích trên các tụ điện. D-STATCOM là một thiết bị bù ngang, dùng điều chỉnh điện áp tại vị trí lắp đặt đến giá trị mong muốn (Vref) thông qua việc điều chỉnh biên độ và góc pha của điện áp rơi giữa D-STATCOM và hệ thống điện. Trong chế độ hoạt động ổn định điện áp thì D-STATCOM phát ra điện áp V2 cùng pha với V1 ($\delta = 0$), do đó nó chỉ có chức năng điều khiển công suất phản kháng. Bằng cách điều khiển VSC để điện áp V2 tạo ra cùng pha với điện áp V1 của hệ thống nhưng có biên độ lớn hơn khiến dòng phản kháng (I_q) chạy từ D-STATCOM vào hệ thống điện, lúc này dòng điện I_q hoạt động như một điện dung cung cấp công suất phản kháng vào hệ thống điện, vì thế sẽ làm điện áp hệ thống tăng lên. Ngược lại, nếu điện áp V2 tạo ra bởi VSC có biên độ thấp hơn điện áp V1 của hệ thống khiến dòng phản kháng (I_q) chạy từ hệ thống vào D-STATCOM, lúc này dòng điện I_q hoạt

động như một điện cảm tiêu thụ công suất phản kháng từ hệ thống, qua đó làm giảm điện áp hệ thống điện tại chỗ kết nối. Nếu điện áp V2 tạo ra bởi VSC và điện áp hệ thống V1 bằng nhau thì không có trao đổi công suất phản kháng.

Để thiết kế D-STATCOM ba pha, giá trị của C_{dc} được tính bằng biểu thức theo [7]:

$$C_{dc} = \frac{3u_s \Delta I_L T}{u_{cmax}^2 - u_{dc}^2} \quad (1)$$

Trong đó C_{dc} , u_{dc} , u_{cmax} , ΔI_L , u_s , T lần lượt là điện dung, điện áp tụ điện, điện áp lớn nhất đặt lên tụ điện, 5% dòng tải (tỷ lệ gợn dòng điện), điện áp pha cực đại D-STATCOM và chu kỳ. Các sóng hài được loại bỏ bằng cách sử dụng bộ lọc ba pha. Giá trị của cuộn cảm và tụ lọc được chọn theo biểu thức sau:

$$L = \frac{\sqrt{3}mu_{dc}}{12f_s a \Delta I_L} \quad (2)$$

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

Trong đó, m , f_s , a tương ứng là hệ số điều chế, tần số chuyển mạch, hệ số quá tải.

Phương trình D-STATCOM trong hệ tọa độ abc được cho bởi:

$$\frac{di_{abcLV}}{dt} = \frac{-Ri_{abcLV}}{L} + \frac{u_{abcstart}}{L} - \frac{u_{abcLV}}{L} \quad (4)$$

Với i_{abcLV} , u_{abcLV} và $i_{abcstart}$, $u_{abcstart}$ tương ứng là dòng điện, điện áp hạ áp và dòng điện, điện áp đầu ra D-STATCOM. Đưa phương trình (4) về hệ tọa độ dq với

$u_{stat} = (u_{dc}/2).m$ có:

$$\begin{aligned}\frac{di_{dLV}}{dt} &= \frac{-Ri_{dLV}}{L} + \omega i_{qLV} + \frac{u_{dc}m}{2L} - \frac{u_{dLV}}{L} \\ \frac{di_{qLV}}{dt} &= \frac{-Ri_{qLV}}{L} - \omega i_{dLV} + \frac{u_{dc}m}{2L} - \frac{u_{qLV}}{L}\end{aligned}\quad (5)$$

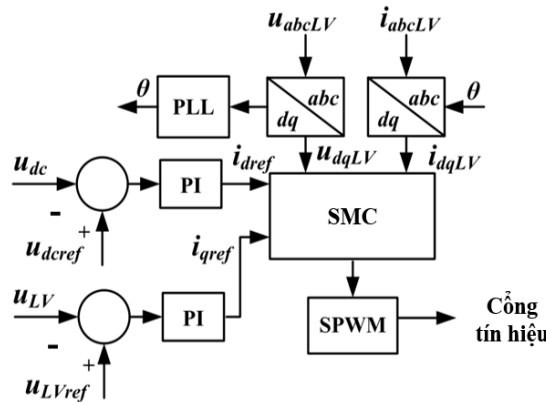
Khi tính đến các thành phần bất định phương trình (5) đưa về dạng:

$$\begin{aligned}\frac{di_{dLV}}{dt} &= f_d(u_{dLV}, u_{qLV}, i_{dLV}, i_{qLV}) + xm_d + \rho_d \\ \frac{di_{qLV}}{dt} &= f_q(u_{dLV}, u_{qLV}, i_{dLV}, i_{qLV}) + xm_q + \rho_q\end{aligned}\quad (6)$$

Với $x = \frac{u_{dc}}{2L}$; hàm $f_d(\cdot), f_q(\cdot)$ là:

$$\begin{aligned}f_d &= \frac{di_{dLV}}{dt} = \frac{-Ri_{dLV}}{L} + \omega i_{qLV} - \frac{u_{dLV}}{L} \\ f_q &= \frac{di_{qLV}}{dt} = \frac{-Ri_{qLV}}{L} + \omega i_{dLV} - \frac{u_{qLV}}{L}\end{aligned}\quad (7)$$

3. XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN



Hình 2. Sơ đồ điều khiển

Đặt biến sai lệch:

$$\begin{aligned}e_d &= i_{dref} - i_{dLV} \\ e_q &= i_{qref} - i_{qLV}\end{aligned}\quad (8)$$

Chọn mặt trượt phi tuyến:

$$s_d = e_d + \lambda D^\alpha |e_d|^\gamma \text{sgn}(e_d) \quad (9)$$

$$s_q = e_q + \lambda D^\alpha |e_q|^\gamma \text{sgn}(e_q)$$

Với $D, \alpha, \gamma, \lambda$ là các hằng số dương thỏa mãn $\alpha < 1; \gamma < 1$

Đạo hàm hai vế (9) và theo (8) có:

$$\begin{aligned}\dot{s}_d &= \dot{i}_{dref} - \dot{i}_{dLV} + \lambda_{RL} D^\alpha |e_d|^{\gamma-1} \text{sgn}(e_d) \\ \dot{s}_q &= \dot{i}_{qref} - \dot{i}_{qLV} + \lambda_{RL} D^\alpha |e_q|^{\gamma-1} \text{sgn}(e_q)\end{aligned}\quad (10)$$

Với $\lambda_{RL} = \lambda. \gamma$

Thay (6) vào (10) có:

$$\begin{aligned}\dot{s}_d &= f_d(\cdot) + xm_d + \rho_d + \lambda_{RL} D^\alpha |e_d|^{\gamma-1} \text{sgn}(e_d) \\ \dot{s}_q &= f_q(\cdot) + xm_q + \rho_q + \lambda_{RL} D^\alpha |e_q|^{\gamma-1} \text{sgn}(e_q)\end{aligned}\quad (11)$$

Từ (11) có luật điều khiển cho bộ điều chế xung SPWM có dạng:

$$\begin{aligned}m_d &= \frac{-[f_d(\cdot) + \lambda_{RL} D^\alpha |e_d|^{\gamma-1} \text{sgn}(e_d) + k_d \text{sgn}(s_d)]}{x} \\ m_q &= \frac{-[f_q(\cdot) + \lambda_{RL} D^\alpha |e_q|^{\gamma-1} \text{sgn}(e_q) + k_q \text{sgn}(s_q)]}{x}\end{aligned}\quad (12)$$

Với $\text{sig}(\cdot)^\gamma = |\cdot|^\gamma \text{sgn}(\cdot)$

▪ Chứng minh hệ ổn định:

Chọn hàm Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2}(s_d^2 + s_q^2) \quad (13)$$

Đạo hàm hai vế (13) kết hợp (11) có:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= s_d \dot{s}_d + s_q \dot{s}_q = \\ &= s_d (f_d(\cdot) + xm_d + \rho_d + \lambda_{RL} D^\alpha |e_d|^{\gamma-1} \text{sgn}(e_d)) \\ &+ s_q (f_q(\cdot) + xm_q + \rho_q + \lambda_{RL} D^\alpha |e_q|^{\gamma-1} \text{sgn}(e_q))\end{aligned}\quad (14)$$

Thay (12) vào (14) có:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= s_d (\rho_d - \text{sgn}(s_d)) + s_q (\rho_q - k_q \text{sgn}(s_q)) \\ &= (s_d \rho_d - k_d |s_d|) + (s_q \rho_q - k_q |s_q|)\end{aligned}\quad (15)$$

Chọn:

$k_d = |\rho_d| + \xi_d$; $k_q = |\rho_q| + \xi_q$ trong đó: ξ_d, ξ_q là các hằng số dương. Khi đó ta có:

$$\begin{aligned}\dot{V} &\leq -\xi_d |s_d| - \xi_q |s_q| \leq \min(\xi_d, \xi_q) (|s_d| + |s_q|) \\ &= -\min(\xi_d, \xi_q) \|s\|\end{aligned}\quad (16)$$

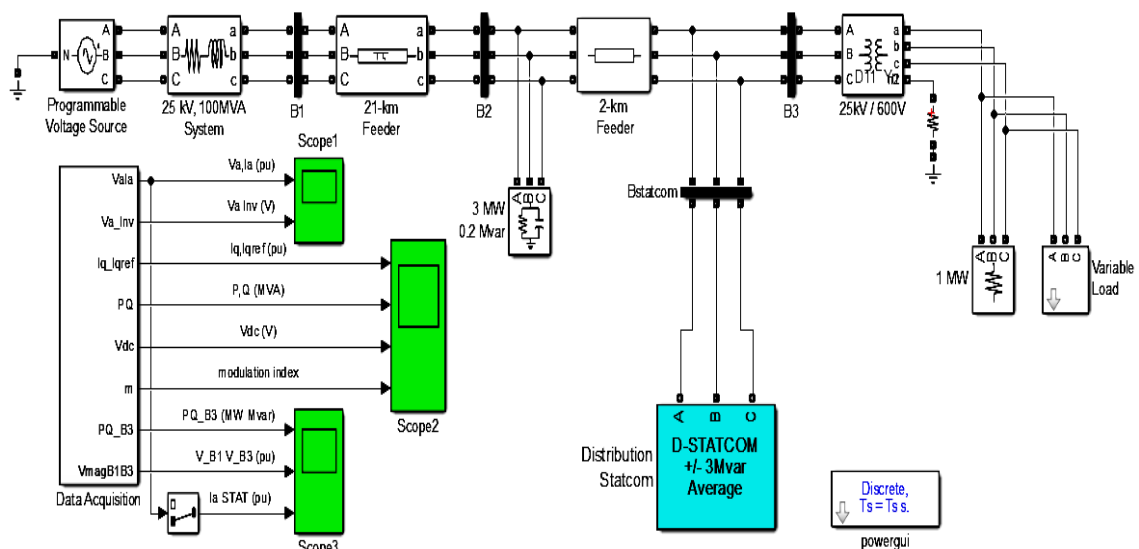
Như vậy $\dot{V} \leq 0$ nên hệ ổn định tiệm cận với thời gian hữu hạn theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov.

Hiệu quả điều khiển và chống nhiễu của bộ điều khiển sẽ được khẳng định qua mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink.

4. MÔ PHỎNG

Bộ bù đồng bộ tĩnh D-STATCOM được sử dụng để điều chỉnh điện áp trên mạng

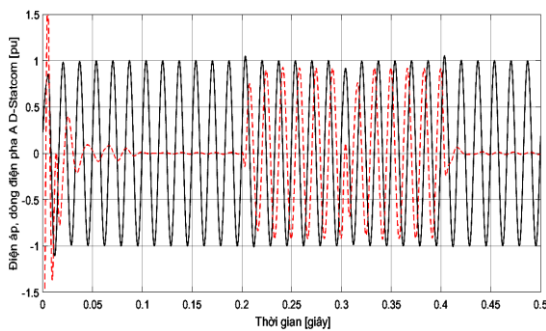
phân phối 25 kV có hai tuyến (21 km và 2 km) truyền tải điện tới các phụ tải được kết nối tại nút B2 và B3. Một tụ điện shunt được sử dụng để hiệu chỉnh hệ số công suất ở bus B2. Tải 600 V nối với bus B3 thông qua máy biến áp 25 kV/600 V tượng trưng cho một nhà máy hấp thụ dòng điện thay đổi liên tục, tương tự như lò hồ quang, do đó tạo ra điện áp nhấp nháy. Cường độ dòng điện tải thay đổi được điều chế ở tần số 5 Hz sao cho công suất biểu kiến của nó thay đổi trong khoảng từ 1 MVA đến 5,2 MVA, trong khi vẫn giữ hệ số công suất trễ 0,9. Sự thay đổi tải này sẽ cho phép quan sát khả năng của D-STATCOM trong việc bù điện áp. D-STATCOM điều chỉnh điện áp bus B3 bằng cách hấp thụ hoặc tạo ra công suất phản kháng. Thông số của bộ điều khiển: $\gamma = 0,9$; $\lambda = 1500$; $\alpha = 0,8$; $k_d = 200$; $k_q = 200$; $\xi_d = 50$; $\xi_q = 55$; $D = 5$.



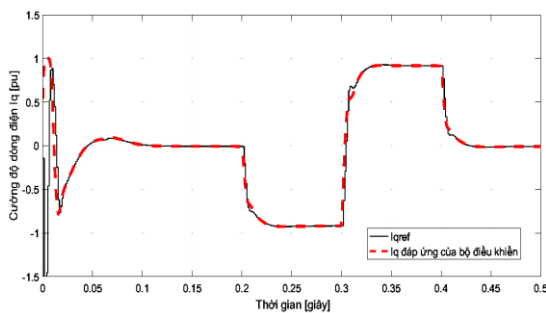
Hình 3. Mô hình mô phỏng hệ thống bù điện áp dùng D-STATCOM

Trường hợp 1: Kiểm tra đáp ứng của D-STATCOM khi điện áp nguồn thay đổi.

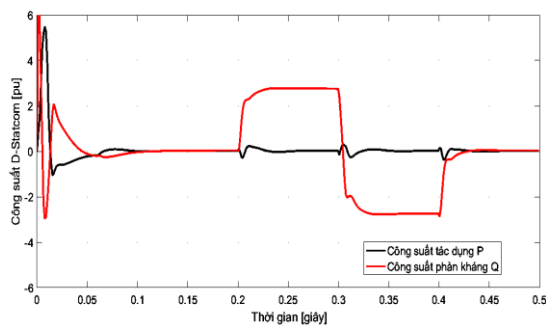
Điện áp nguồn 25 kV tương đương 1,077pu, thay đổi điện áp nguồn tại thời điểm 0,2 giây và 0,3 giây với lượng thay đổi tương ứng là tăng 6% và giảm 6%, sau đó trở về trạng thái ban đầu ở 0,4 giây.



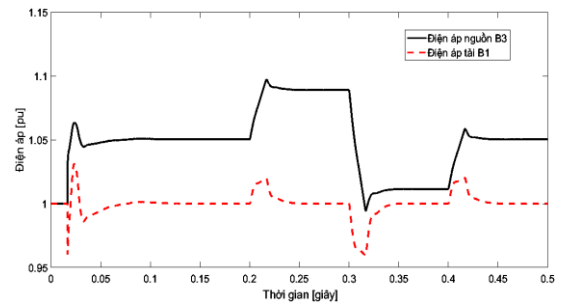
Hình 4. Điện áp, dòng điện đầu ra D-STATCOM



Hình 5. Cường độ dòng điện I_q



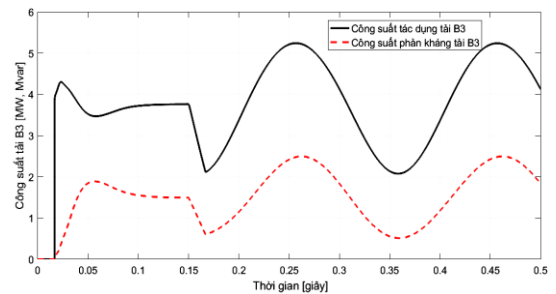
Hình 6. Công suất D-STATCOM



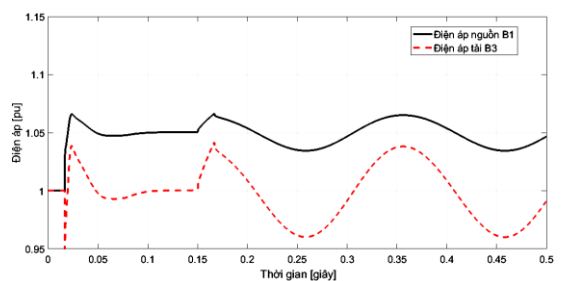
Hình 7. Điện áp nguồn B1 và điện áp tải B3

Tại thời điểm $t = 0,2$ s, điện áp nguồn tăng thêm 6%, D-STATCOM hấp thụ công suất phản kháng từ mạng $Q=+2,7$ Mvar, tại thời điểm $t = 0,3$ s, điện áp nguồn giảm 6%, D-STATCOM phải phát công suất phản kháng để duy trì điện áp 1 pu (Q giảm xuống -2,8 Mvar). Kết quả cho thấy bộ điều khiển SMC đã giúp dòng I_q bám sát tín hiệu đặt, duy trì được điện áp ổn định trên tải B3.

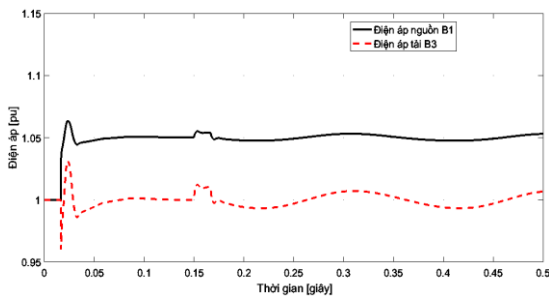
Trường hợp 2: Cho tải thay đổi tại thời điểm 0,15 giây, chu kỳ 0,1 giây.



Hình 8. Công suất tải B3



Hình 9. Điện áp nguồn B1 và điện áp tải B3 khi không có D-STATCOM



Hình 10. Điện áp nguồn B1 và điện áp tải B3 khi có D-STATCOM

Có thể thấy khi tải B3 có công suất thay đổi liên tục, khi không có D-STATCOM, điện áp nguồn và tải cũng bị thay đổi theo, điện áp B3 dao động trong khoảng 0,96 pu đến 1,04 pu ($\pm 4\%$). Khi có D-STATCOM điện áp nguồn và tải đã được giữ ổn định theo điện áp đặt, dao động điện áp giảm xuống ($\pm 0,7\%$).

Nhận xét:

Từ các kết quả mô phỏng thấy rằng bộ điều khiển trượt của D-STATCOM đã cho chất lượng điều khiển tốt. Trong điều kiện tải chịu ảnh hưởng của các yếu tố phi

tuyến hệ thống vẫn đảm bảo được độ ổn định điện áp và dòng điện, tỉ lệ sóng hài thấp.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả tổng hợp bộ điều khiển trượt phi tuyến cho thiết bị bù điện áp D-STATCOM, để cải thiện chất lượng điện áp của phụ tải trong chế độ xác lập khi điện áp nguồn dao động và phụ tải thay đổi trong quá trình hoạt động và sự cố ngắn mạch ba pha thoáng qua. Phần trình bày được bắt đầu từ việc xây dựng mô hình toán học, xây dựng luật điều khiển, xây dựng mô hình mô phỏng, kiểm nghiệm bằng phần mềm Matlab-Simulink. Qua kiểm tra và so sánh với các kết quả của các công bố trước đây [3]-[6] cho thấy bộ điều khiển đã nâng cao được chất lượng của D-STATCOM, làm giảm đáng kể tần số cao của sóng hài, đảm bảo khả năng ổn định tần số, điện áp, dòng điện của phụ tải.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K. Sayahi, A. Kadri, F. Bacha, and H. Marzougui, "Implementation of a D-STATCOM control strategy based on direct power control method for grid connected wind turbine," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 121, Oct. 2020, Art. no. 106105.
- [2] W.-N. Chang and C.-H. Liao, "Development of an SDBC-MMCC-based D-STATCOM for real-time single-phase load compensation in three-phase power distribution systems," Energies, vol. 12, no. 24, p. 4705, Dec. 2019.
- [3] R. Pandey, R. Tripathi, and T. Hanamoto, "Comprehensive analysis of LCL filter interfaced cascaded H-bridge multilevel inverter-based D-STATCOM," Energies, vol. 10, no. 3, p. 346, Mar. 2017.
- [4] Y.A. Kadi and F.Z. Baghli, "PV-STATCOM in photovoltaic systems under variable solar radiation and variable unbalanced nonlinear loads," Int. J. Electr. Electron. Eng. Telecommun., vol. 10, no. 1, pp. 36–48, Jan. 2021.
- [5] G. Shahgholian and Z. Azimi, "Analysis and design of a DSTATCOM based on sliding mode control strategy for improvement of voltage sag in distribution systems," Electronics, vol. 5, no. 4, p. 41, Jul. 2016.

- [6] S. Bouafia, A. Benaissa, S. Barkat, and M. Bouzidi, "Second order sliding mode control of three-level four-leg DSTATCOM based on instantaneous symmetrical components theory," *Energy Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 79–111, Feb. 2018.
- [7] M.A. Hannan, "Effect of DC capacitor size on D-STATCOM voltage regulation performance evaluation," *Press Electr. Rev.*, vol. 88, pp. 243–246, Jan. 2012.

Giới thiệu tác giả:

Tác giả Đặng Tiến Trung tốt nghiệp đại học ngành điện - tự động hóa tại Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2004, bảo vệ luận án Tiến sĩ tại Học viện Kỹ thuật quân sự năm 2019. Hiện nay tác giả là giảng viên Khoa Kỹ thuật điện - Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: ứng dụng các giải pháp điều khiển hiện đại trong hệ thống điện.



Tác giả Nguyễn Thị Thu Hiền tốt nghiệp đại học ngành điện – kỹ thuật điện năm 2001, bảo vệ luận án Tiến sĩ năm 2020 tại Đại học Bách khoa Hà Nội. Hiện nay tác giả là giảng viên Khoa Kỹ thuật điện - Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: nghiên cứu cấu tạo và vận hành máy điện. nghiên cứu ứng dụng các giải pháp điều khiển hiện đại trong hệ thống điện.

