

ỨNG DỤNG STATCOM ĐIỀU CHỈNH ĐIỆN ÁP VÀ BÙ CÔNG SUẤT PHẢN KHÁNG CHO HỆ THỐNG ĐIỆN

Hà Văn Du⁽¹⁾

(1) Trường Đại học Thủ Dầu Một

Ngày nhận bài 28/04/2020; Ngày gửi phản biện 03/05/2020; Chấp nhận đăng 24/05/2020

Liên hệ email: duhv@tdmu.edu.vn

<https://doi.org/10.37550/tdmu.VJS/2020.03.039>

Tóm tắt

Bài báo này đề xuất một phương pháp điều chỉnh điện áp và bù công suất phản kháng cho hệ thống điện 500kV gồm có ba nút. Phương pháp này sử dụng một bộ bù STATCOM 48 xung xây dựng dựa vào bộ chuyển đổi nguồn áp VSC 6-xung, các bộ biến đổi nguồn áp VSC 6-xung liên kết với bốn máy biến áp dịch pha để khử được sóng hài ngõ ra đến mức thấp nhất. Trình tự các bước thiết kế của bộ điều khiển STATCOM được trình bày cùng với các mô phỏng ứng dụng của nó vào hệ thống điện. Kết quả mô phỏng ở các chế độ bình thường và sự cố cho thấy sự đáp ứng hiệu quả của nó đối với phương pháp đã đề xuất.

Từ khóa: bù công suất phản kháng, điều chỉnh điện áp,

Abstract

STATCOM APPLICATION FOR VOLTAGE REGULATION AND REACTIVE POWER COMPENSATION FOR POWER SYSTEMS

This paper proposes a method to adjust the voltage and reactive power compensation for the 500kV power system which consists of three bus. This method uses a 48-pulse STATCOM made based on power converter 6-pulses VSC, topology of 6-pulses VSCs is connected to four phase-shifting transformer to reduced to the level of harmonics lowest. The order of the design steps of STATCOM controller is presented along with its simulation when applying to power systems. The simulation results were in the normal state and fault state showed the effectiveness of its response to the proposed method.

1. Giới thiệu

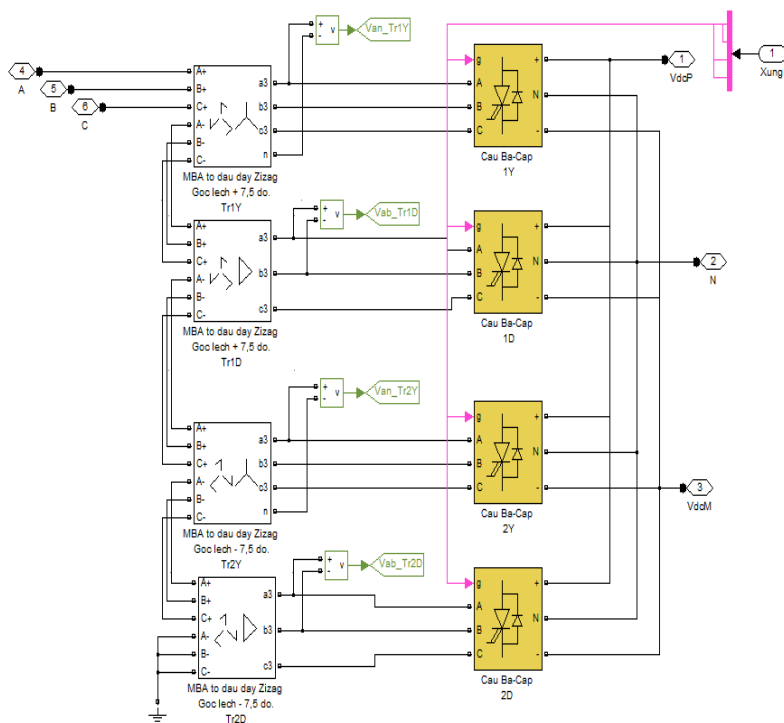
Để hệ thống điện hoạt động linh hoạt ở mọi chế độ, kể cả tình huống sự cố nghiêm trọng nhất thì phải có thiết bị điều khiển các đại lượng trong hệ thống. Một trong những đại lượng đó chính là đại lượng điện áp. Các sự cố tan rã hệ thống điện gần đây đều có liên quan đến sự sụp đổ điện áp hoặc là mất ổn định điện áp, mà nguyên nhân chủ yếu dẫn đến sự sụp đổ điện áp thường là do sự không đáp ứng đủ nhu cầu công suất phản kháng cho hệ thống điện một cách kịp thời. Theo các kết quả mô phỏng cho thấy việc đáp ứng hiệu quả của STATCOM trong mọi chế độ của hệ thống điện phụ thuộc vào tính năng làm việc của

bộ điều khiển STATCOM. Tuy nhiên, việc đánh giá, lựa chọn bộ STATCOM như thế nào là hợp lý, cũng như dung lượng bù tối ưu trong phân tích ở chế độ xác lập, chế độ quá độ là mối quan tâm hàng đầu trong việc đáp ứng nhu cầu về công suất phản kháng và nâng cao ổn định điện áp cho hệ thống điện. Trong bài báo này tác giả đã đưa ra giải pháp đáp ứng công suất phản kháng cho hệ thống điện bằng bộ STATCOM điều khiển đa bậc với 48 xung để điều chỉnh điện áp và bù công suất phản kháng cho hệ thống điện. Bộ STATCOM điều khiển đa bậc 48 xung gồm có các bộ chuyển đổi VSC 6 bước kết nối bốn máy biến áp dịch pha để giảm được sóng hài đến mức thấp nhất phía AC, có thể được ứng dụng trong lĩnh vực công suất cao mà không cần bộ lọc AC. Bộ STATCOM điều khiển đa bậc 48 xung có ưu điểm là điều khiển dòng để ngăn ngừa quá dòng trên VSC nên duy trì và cung cấp công suất phản kháng khi hệ thống sự cố hoặc có sóng hài biến dạng. Vì vậy nó đã đáp ứng được yêu cầu về độ phản ứng nhanh, nhạy cũng như dung lượng bù tối ưu cho hệ thống điện trong mọi chế độ làm việc. Trong bài báo này có sử dụng phần mềm Matlab/Simulink để mô phỏng đáp ứng động của bộ STATCOM cho hệ thống điện 500 kV gồm có ba nút và kết quả mô phỏng được trình bày để minh họa hiệu quả về đáp ứng của bộ STATCOM 48 xung trong việc bù công suất phản kháng và điều chỉnh điện áp ở mọi chế độ cho hệ thống điện.

2. Thiết kế bộ bù STATCOM 48 xung

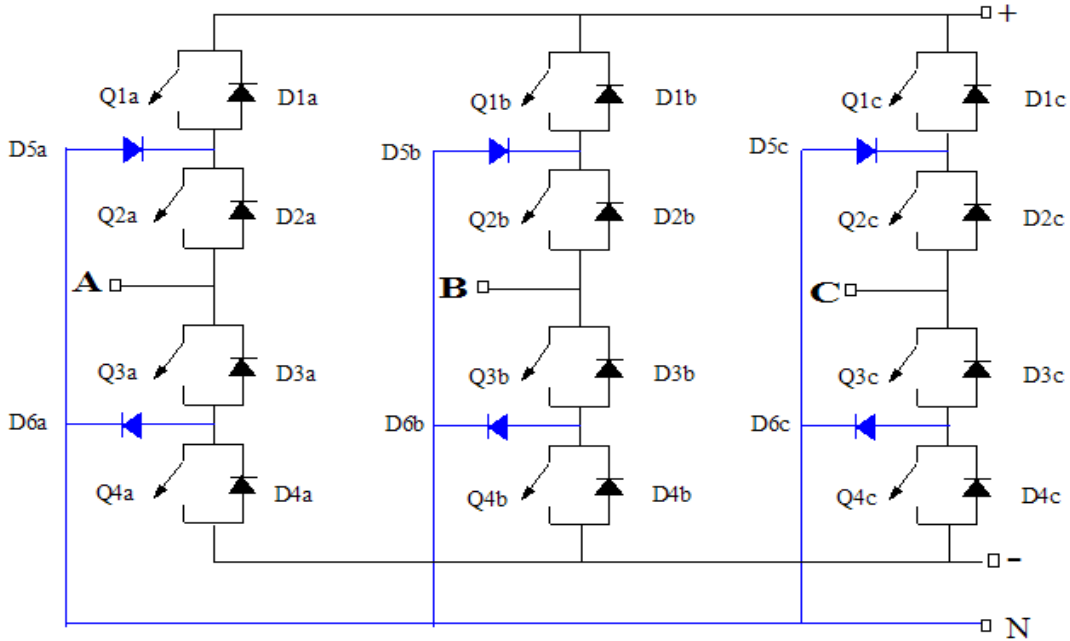
2.1. Mô hình mạch động lực

Bộ chuyển đổi nguồn áp VSC: Gồm bốn cầu 6 bước được cấp 48 xung điều khiển từ bộ điều khiển STATCOM để kích thiết bị GTO hoạt động.



Hình 1. Mạch động lực STATCOM 48 xung

Cầu 6 bước là các GTO được nối đối song với Diod như hình 2. Các GTO tạo thành bộ nghịch lưu biến đổi điện áp một chiều thành xoay chiều. Trong hình 2 các công tắc điện tử: Q1a, Q2a, Q3a, Q4a, Q1b, Q2b, Q3b, Q4b, Q1c, Q2c, Q3c, Q4c là tượng trưng cho GTO.



Hình 2. Cấu trúc của cầu nghịch lưu 6 bước

Máy biến Áp: Trong cấu trúc mạch động lực STATCOM, MBA có cuộn sơ cấp sẽ được nối với hệ thống và cuộn thứ cấp sẽ được liên kết với bộ chuyển đổi nguồn áp VSC. Trong cấu trúc liên kết với bộ chuyển đổi nguồn áp VSC, cuộn thứ cấp MBA được sử dụng để khử các sóng hài bậc cao không mong muốn khi truyền tải.

Tụ điện: Được sử dụng như một điện áp một chiều lưỡng cực cung cấp nguồn cho khối cầu 6 bước hoạt động. Chính vì vậy mà STATCOM có thể tạo ra điện áp 48 bậc tương đương với một dạng sóng hình sin như hình 3.



Hình 3. Dạng sóng điện áp 48 xung

Mô hình toán: Mô hình toán STATCOM được cho bởi công thức sau:

$$e_{an}(t) - v_{an}(t) = L \frac{d}{dt} i_a(t) + R i_a(t) \quad (1)$$

$$e_{bn}(t) - v_{bn}(t) = L \frac{d}{dt} i_b(t) + R i_b(t) \quad (2)$$

$$e_{cn}(t) - v_{cn}(t) = L \frac{d}{dt} i_c(t) + R i_c(t) \quad (3)$$

Trong đó: $v_{an}(t)$, $v_{bn}(t)$, $v_{cn}(t)$ - là điện áp đầu ra của bộ chuyển đổi được xác định bởi tín hiệu công “g” và điện áp một chiều DC.

Trạng thái mô hình toán STATCOM tại tần số cơ bản được cho bởi công thức:

$$\dot{x}^*(t) = A_S x(t) + B_S u(t) \quad (4)$$

Trong đó:

$$x(t) = [i_a^0(t), i_b^0(t), i_c^0(t), v_{DC}^0(t)]^T$$

$$u(t) = [e_{an}(t), e_{bn}(t), e_{cn}(t)]^T$$

$$A_S = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 & -k_1 \sin(\omega t + \alpha) \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & -k_1 \sin(\omega t + \alpha - 120^\circ) \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} & -k_1 \sin(\omega t + \alpha - 240^\circ) \\ -k_2 \sin(\omega t + \alpha) & -k_2 \sin(\omega t + \alpha - 120^\circ) & -k_2 \sin(\omega t + \alpha - 240^\circ) & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_S = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix}; \quad k_1 = \frac{16}{L\pi}; \quad k_2 = \frac{16}{L\pi}$$

Mô hình STATCOM chuyển đổi các giá trị đo lường từ hệ thống abc thành các giá trị dq0 từ hệ tham chiếu :

$$\dot{x}_{dq0}^* = A_{dq0} x_{dq0} + B_{dq0} u_{dq0} \quad (5)$$

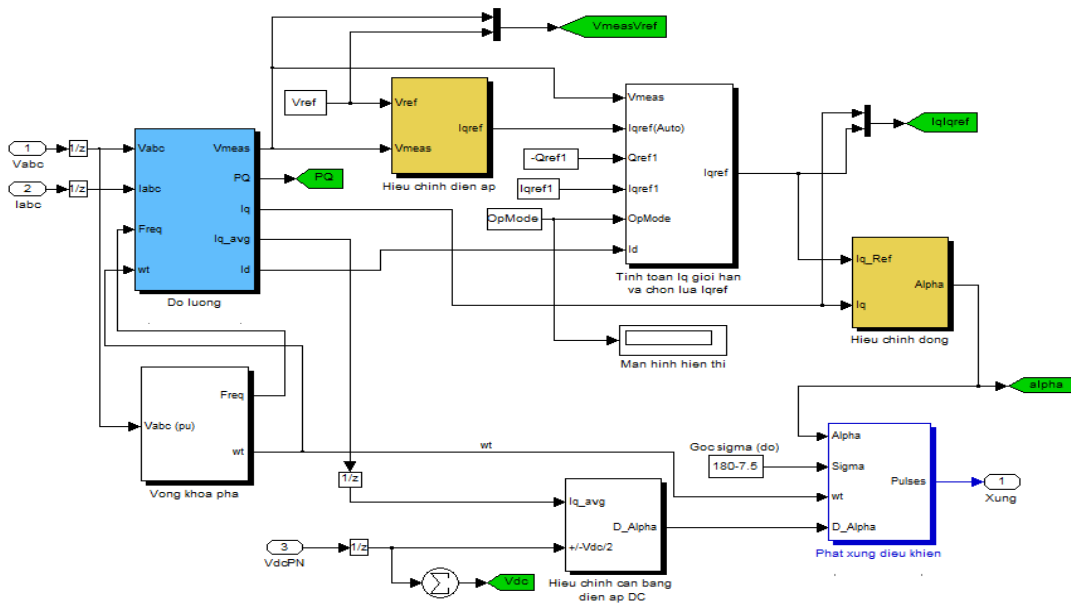
Trong đó:

$$x_{dq0} = [i_d, i_q, i_0, v_{DC}]^T$$

$$u_{dq0} = [e_d, e_q, e_0, 0]^T$$

$$A_{dq0} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & 0 & -k \sin \alpha \\ \omega & -\frac{R}{L} & 0 & k_1 \cos \alpha \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ \frac{3}{2} k_2 \cos \alpha & -\frac{3}{2} k_2 \cos \alpha & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad B_{dq0} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix}$$

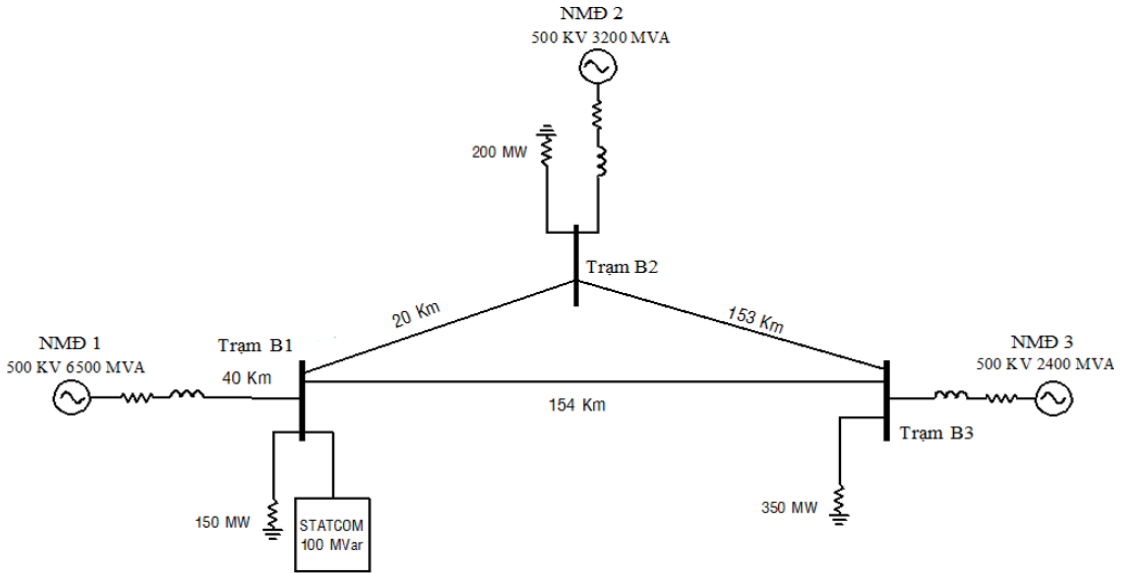
Mô hình mạch điều khiển: Nguyên tắc điều chỉnh, khi điện áp hệ thống V_{meas} thấp hơn so với điện áp tham chiếu V_{ref} . Bộ điều chỉnh điện áp sẽ điều chỉnh đầu ra dòng điện I_q tăng, bộ điều chỉnh dòng sẽ tăng chậm góc kích alpha (α) điện áp bộ chuyển đổi đối với điện áp hệ thống, bởi vậy tăng điện áp DC và do đó bộ chuyển đổi phát ra điện áp AC cao hơn điện áp trên hệ thống và cùng pha với điện áp trên hệ thống nên STATCOM làm việc ở chế độ dung sẽ phát công suất phản kháng lên hệ thống. Ngược lại, khi điện áp trên hệ thống V_{meas} cao hơn so với điện áp tham chiếu V_{ref} STATCOM chuyển từ làm việc ở chế độ dung sang làm việc ở chế độ cảm, bởi vậy giảm điện áp DC và do đó bộ chuyển đổi phát ra điện áp AC thấp hơn so với điện áp trên hệ thống, do vậy STATCOM hấp thụ công suất phản kháng tức là công suất phản kháng chạy từ hệ thống vào STATCOM. Khi điện áp trên hệ thống đúng bằng điện áp định mức thì STATCOM không phát công suất phản kháng vào hệ thống và cũng không hấp thụ công suất phản kháng từ hệ thống.



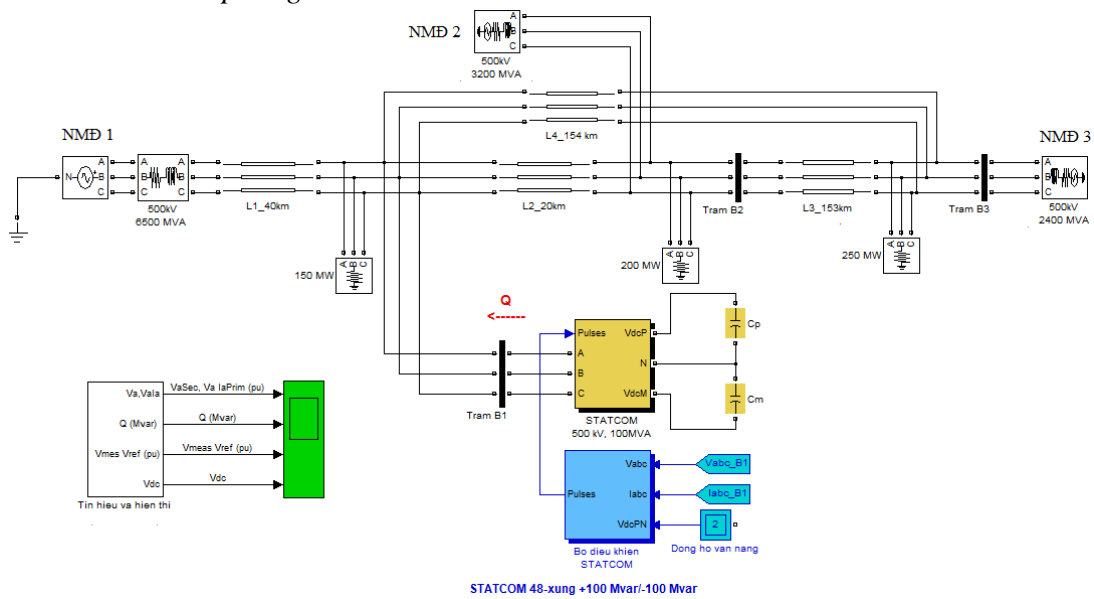
Hình 4. Sơ đồ khối mạch điều khiển STSTCOM 48 xung

2.2. Thiết kế mô hình mô phỏng STATCOM 48-xung trong lưới điện 500kV gồm có 3 nút

Sơ đồ đơn tuyến hệ thống điện: Lưới điện bao gồm ba nguồn 500kV tương ứng nhà máy điện 1 (NMĐ1) tương đương 6500 MVA, nhà máy điện 2 (NMĐ2) tương đương 3200MVA và nhà máy điện 3 (NMĐ3) tương đương 2400MVA nối với nhau bằng các đường dây truyền tải: Đường dây 500kV L1: NMĐ1-Trạm B1 dài 40km, L2: Trạm B1-Trạm B2 dài 20km, L3: Trạm B2-Trạm B3 dài 153km, L4: Trạm B3-Trạm B1 dài 154km và bộ bù đồng bộ tĩnh STATCOM 48-xung được sử dụng để điều chỉnh điện áp hệ thống, có công suất định mức 100 MVAR được đặt tại thanh cái của trạm B1 như hình 5.



Hình 5. Sơ đồ kết nối đơn tuyến STATCOM 48-xung trong lưới điện 500kV có 3 nút
Mô hình mô phỏng



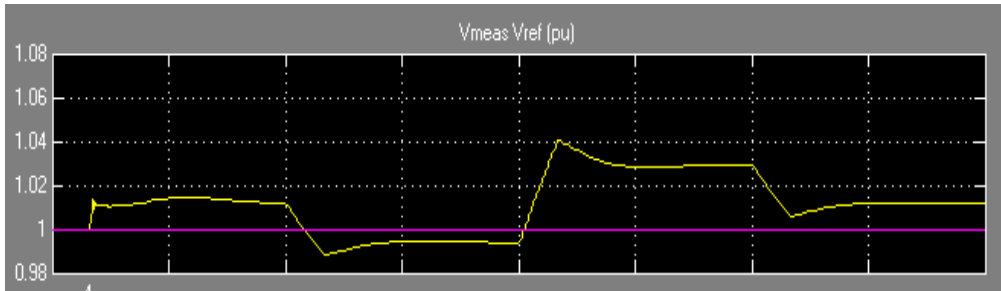
Hình 6. Mô hình mô phỏng trong Matlab/Simulink

3. Kết quả mô phỏng

3.1 Kết quả mô phỏng đáp ứng động của STATCOM trong trường hợp hệ thống điện làm việc bình thường

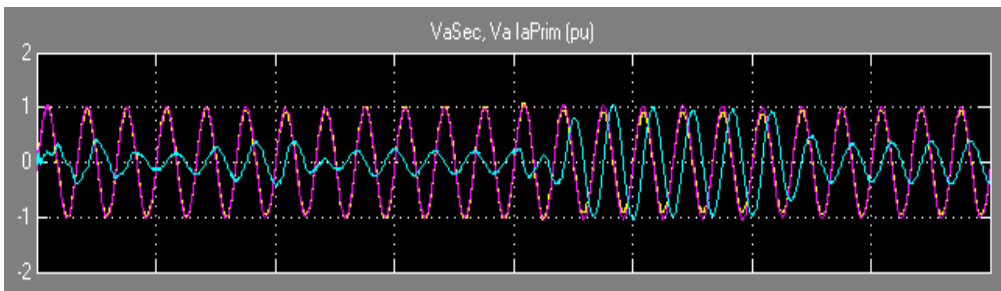
Tiến hành chạy mô phỏng và nhìn vào cửa sổ tín hiệu đáp ứng ngõ ra được thể hiện như sau:

Biểu đồ hình 7 hiển thị tín hiệu điện áp tham chiếu V_{ref} (pu) (nét màu tím) cùng với điện áp đo lường thứ tự dương V_{meas} (pu) tại thanh cái STATCOM (nét màu vàng).



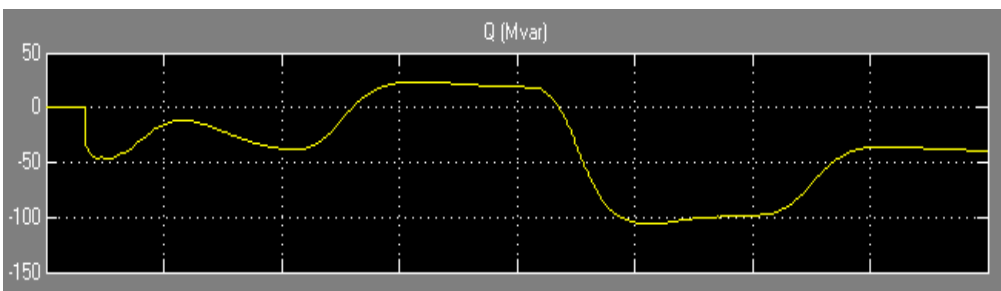
Hình 7. Kết quả đáp ứng điện áp V_{mes} và V_{ref}

Biểu đồ hình 8 hiển thị tín hiệu điện áp thứ cấp được tạo ra bởi bộ chuyển đổi V_{aSec} (pu) (nét màu vàng) cùng với điện áp sơ cấp V_a (pu)(nét màu tím) và dòng điện sơ cấp I_{aPrim} (nét màu xanh).



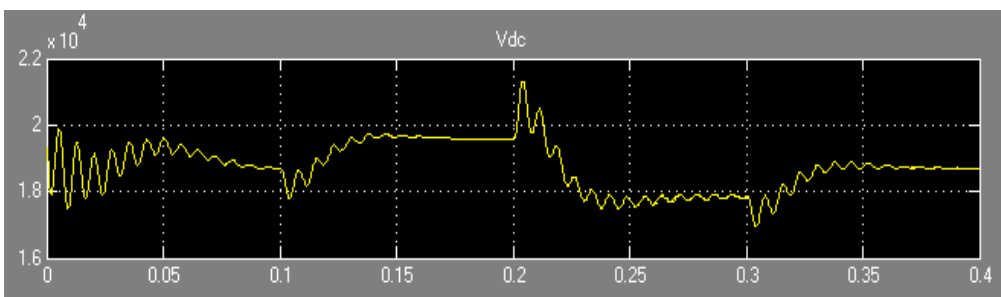
Hình 8. Kết quả đáp ứng điện áp V_{aSec} , V_a và I_{aPrim}

Biểu đồ hình 9 thể hiện sự đáp ứng của công suất phản kháng Q (MVAR)(nét màu vàng) khi điện áp trên hệ thống V_{mes} thay đổi.



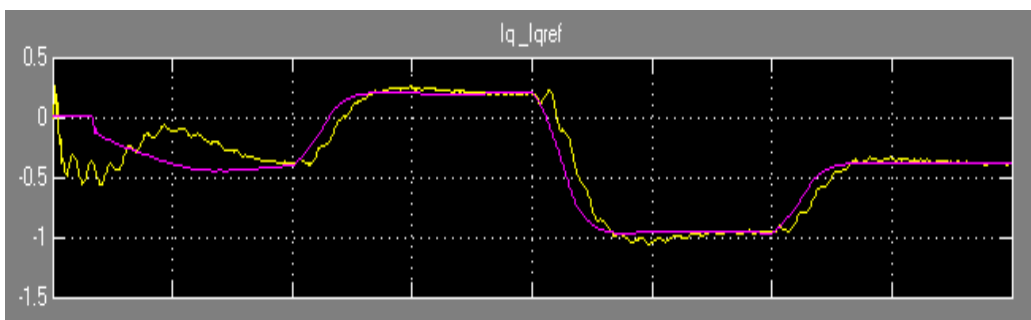
Hình 9. Kết quả đáp ứng công suất phản kháng Q (MVAR)

Biểu đồ hình 10 thể hiện sự diễn biến của điện áp DC (nét màu vàng) khi điện áp trên hệ thống thay đổi V_{mes} (pu).



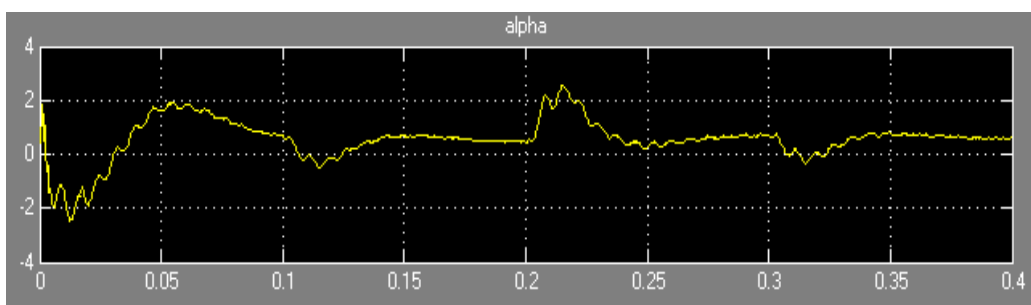
Hình 10. Kết quả biến đổi của điện áp DC

Biểu đồ hình 11 hiển thị tín hiệu dòng điện phản kháng tham chiếu I_{qref} (pu) (nét màu tím) cùng với dòng điện phản kháng I_q (pu) (nét màu vàng).



Hình 11. Kết quả biến đổi của dòng điện I_q-I_{qref}

Biểu đồ hình 12 thể hiện sự diễn biến của góc kích alpha (nét màu vàng).



Hình 12. Kết quả biến đổi của góc kích alpha

Tiến hành phân tích diễn biến về sự đáp ứng của STATCOM 48-xung đối với chế độ làm việc bình thường của hệ thống. Ban đầu khi hệ thống ổn định, điện áp DC là 19,3 kV (hình 10). Tại thời điểm $t = 0,02s$ điện áp hệ thống đột ngột tăng lên $V_{meas} = 1,01pu$ (hình 7), STATCOM phản ứng bằng cách hút về một lượng công suất phản kháng là 50 MVAR (hình 9) tương ứng điện áp nguồn DC giảm $V_{DC} = 19$ kV (hình 10), đến thời điểm: $t = 0,13s$ điện áp hệ thống giảm xuống $V_{meas} = 0,99pu$, STATCOM phản ứng bằng cách chuyển từ tính cảm sang tính dung và bù công suất phản kháng lên hệ thống một lượng là 30MVAR và tương ứng điện áp nguồn DC tăng lên $V_{DC} = 19,7$ kV. Tại thời điểm $t = 0,22s$, điện áp hệ thống lại tăng lên $V_{meas} = 1,04pu$ lúc này STATCOM lại chuyển từ hoạt động tính dung sang tính cảm và hút về một lượng công suất phản kháng là $Q=100$ MVAR, tương ứng điện áp nguồn DC giảm xuống là $V_{DC} = 17,8kV$, đến thời điểm $t=0,317s$ điện áp hệ thống giảm dần xuống $V_{meas} = 1,009pu$ và STATCOM tiếp tục hút về một lượng công suất phản kháng là $Q=37$ MVAR và điện áp nguồn DC tương ứng là $V_{DC} = 18,7kV$, điện áp của hệ thống được duy trì ở mức 1,01pu đến khi kết thúc mô phỏng.

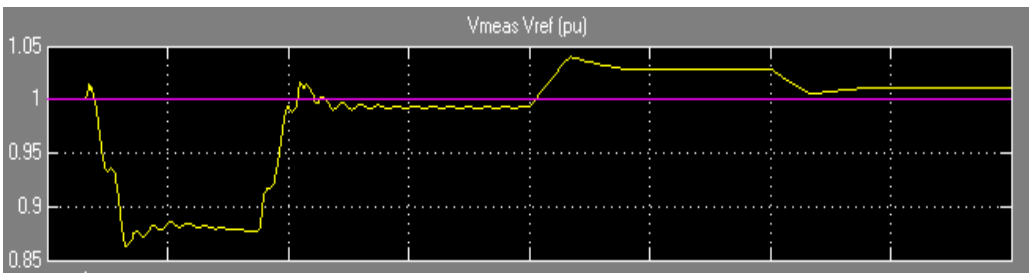
Quan sát biểu đồ hình 11 ta thấy tương ứng với thời điểm mà STATCOM bù công suất phản kháng lên hệ thống thì dòng ngang trục I_q cũng tăng lên, thời điểm STATCOM bù công suất phản kháng tới mức 30 MVAR thì dòng I_q đạt đến giá trị

0,25pu. Tại các thời điểm STATCOM thay đổi chế độ làm việc thì I_q cũng có biên độ tăng hoặc giảm thay đổi theo. Tương tự như diễn biến dòng ngang trục I_q , quan sát biểu đồ hình 12 ta nhận thấy góc kích Alpha của bộ điều khiển STATCOM thay đổi để điều khiển STATCOM hoạt động bù hoặc hút công suất phản kháng để đáp ứng theo sự thay đổi điện áp của hệ thống điện.

3.2. Kết quả mô phỏng đáp ứng động của STATCOM trường hợp hệ thống điện ngắn mạch pha A chạm đất trên đường dây L4 (Trạm B3-Trạm B1).

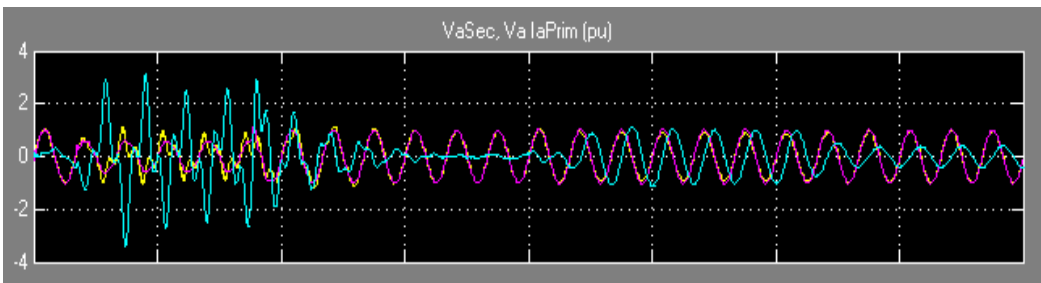
Tạo sự cố ngắn mạch pha A chạm đất và tiến hành chạy mô phỏng, nhìn vào cửa sổ tín hiệu đáp ứng ngõ ra được thể hiện như sau:

Hình 13 hiển thị tín hiệu điện áp tham chiếu V_{ref} (pu) (nét màu tím) cùng với điện áp đo lường thứ tự dương V_{meas} (pu) tại thanh cái STATCOM (nét màu vàng).



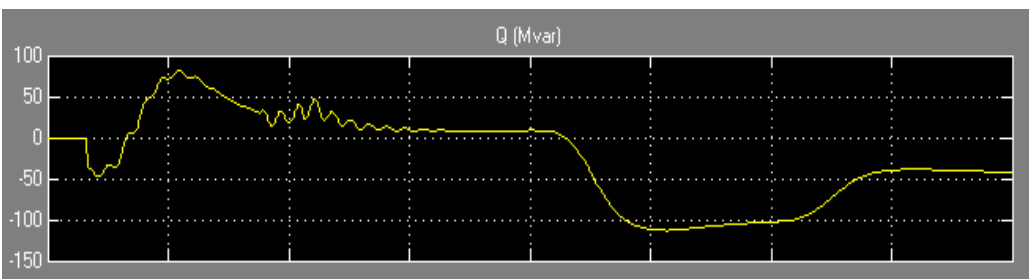
Hình13. Kết quả đáp ứng điện áp V_{mes} và V_{ref}

Hình 14 hiển thị tín hiệu điện áp thứ cấp được tạo ra bởi bộ chuyển đổi V_{aSec} (pu) (nét màu vàng) cùng với điện áp sơ cấp V_a (pu) (nét màu tím) và dòng điện sơ cấp I_{aPrim} (nét màu xanh).



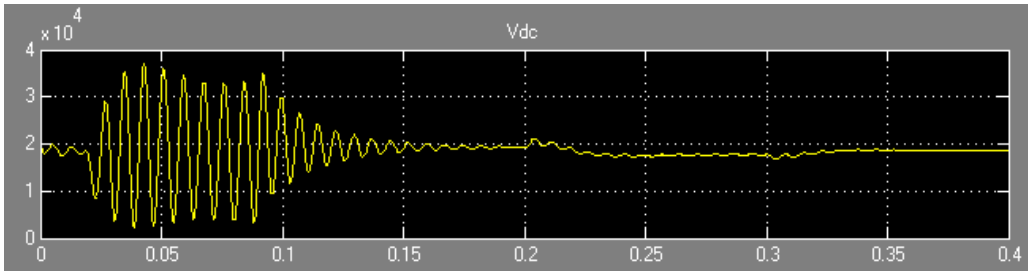
Hình 14. Kết quả đáp ứng điện áp V_{aSec} , V_a và I_{aPrim}

Biểu đồ hình 15 thể hiện sự đáp ứng của công suất phản kháng Q (MVAR) (nét màu vàng) khi điện áp trên hệ thống V_{mes} thay đổi.



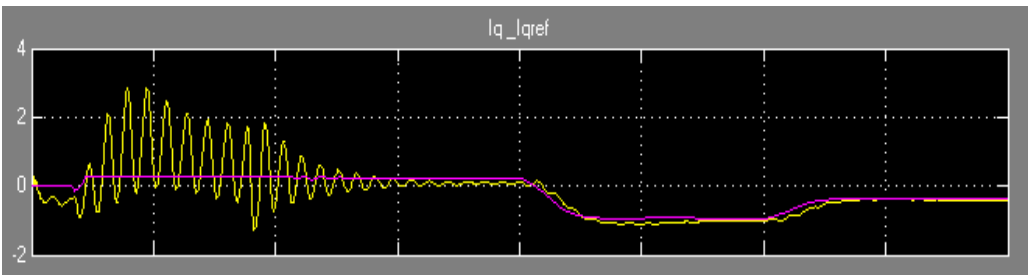
Hình 15. Kết quả đáp ứng công suất phản kháng Q (MVAR)

Biểu đồ hình 16 thể hiện sự diễn biến của điện áp DC (nét màu vàng) khi điện áp trên hệ thống thay đổi V_{meas} (pu).



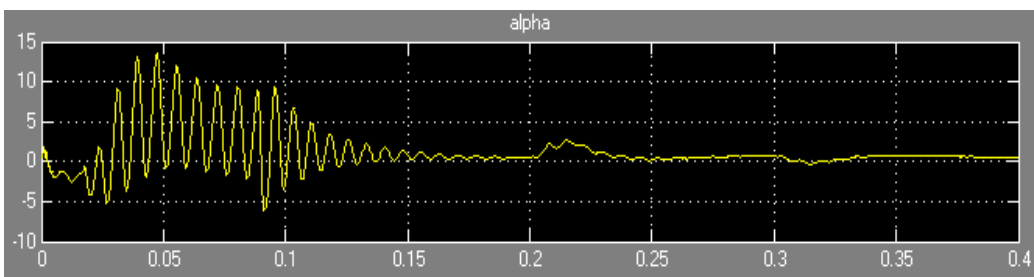
Hình 16. Kết quả biến đổi của điện áp DC

Biểu đồ hình 17 hiển thị tín hiệu dòng điện phản kháng tham chiếu $I_{q\text{ref}}$ (pu) (nét màu tím) cùng với dòng điện phản kháng I_q (pu) (nét màu vàng).



Hình 17. Kết quả biến đổi của dòng điện $I_q-I_{q\text{ref}}$

Biểu đồ hình 18 thể hiện sự diễn biến của góc kích alpha (nét màu vàng).



Hình 18. Kết quả biến đổi của góc kích alpha

Tiến hành phân tích diễn biến sự cố trên hệ thống và đáp ứng của STATCOM 48-xung như sau: Thiết lập sự cố xảy ra tại thời điểm $t = 1/60\text{s}$ và kết thúc tại thời điểm $t = 5/60\text{s}$. Thời điểm bắt đầu xảy ra sự cố ngắn mạch chạm đất pha A, tại thời điểm $t = 1/60\text{s}$ dòng điện ngắn mạch tăng nhanh lên giá trị 3,2pu (hình 14), điện áp hệ thống giảm nhanh xuống giá trị 0,87pu (hình 13). STATCOM đáp ứng lại bằng cách là tạo ra một lượng công suất phản kháng bù cho hệ thống $Q = 72 \text{ MVAR}$ (hình 15) và dẫn đến điện áp DC cũng tăng lên, lúc này ta thấy điện áp DC tăng lên đến 36kV (hình 16).

Sau đó, tại thời điểm $t = 5/60\text{s}$ sự cố kết thúc, STATCOM vẫn tiếp tục bù CSPK $Q=20 \text{ MVAR}$ để điều chỉnh điện áp hệ thống cho đến thời điểm $t = 0,24 \text{ s}$ điện áp hệ thống tăng đạt đến giá trị 1,035pu, lúc này ta có thể thấy STATCOM đáp ứng rất linh hoạt, STATCOM chuyển trạng thái hoạt động từ tính dung sang tính cảm, hút về một

lượng công suất phản kháng $Q = 100\text{MVAR}$. Tương ứng điện áp DC cũng giảm xuống $V_{DC} = 18,8\text{kV}$. Quan sát trên hình 17 ta thấy tương ứng với thời điểm mà STATCOM bù công suất phản kháng lên hệ thống thì dòng ngang trục I_q cũng tăng lên. Thời điểm STATCOM bù công suất phản kháng 72MVAR thì dòng I_q đạt đến giá trị $3,0\text{pu}$, tại các thời điểm STATCOM bù công suất phản kháng giảm dần thì I_q cũng có biên độ giảm dần cho đến khi STATCOM hoạt động ở chế độ bình thường. Tương tự như diễn biến dòng ngang trục I_q , góc kích Alpha (hình 18) của bộ điều khiển STATCOM thay đổi để điều khiển STATCOM đáp ứng việc bù hoặc hút công suất phản kháng trên hệ thống. Biên độ góc kích alpha thay đổi theo sự biến đổi điện áp của hệ thống.

4. Kết luận.

Kết quả mô phỏng ở chế độ bình thường, ngắn mạch pha A chạm đất. Các kết quả mô phỏng cho thấy STATCOM luôn luôn đáp ứng một cách nhanh nhạy ở mọi chế độ về nhu cầu bù công suất phản kháng cho hệ thống khi có sự thay đổi điện áp trên hệ thống một cách đột ngột, đặc biệt ở chế độ ngắn mạch. Điều này là hết sức cần thiết và hoàn toàn phù hợp với phương pháp đã đề xuất là điều chỉnh điện áp và bù công suất phản kháng cho hệ thống điện 500kV gồm có ba nút sử dụng bộ STATCOM 48 xung. Qua nghiên cứu và các kết quả mô phỏng của phương pháp đề xuất ta có thể áp dụng vào vận hành hệ thống truyền tải điện Việt Nam nhằm nâng cao ổn định điện áp và nâng cao khả năng truyền tải cho hệ thống điện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] STATCOM control with Robust Synchronizing Phase Locked Loop under Three Phase Power System Faults: Prof. A.K.Panda, Yellasiri.Suresh, Mikkili.Suresh. IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Robotics.
- [2] Current Control of Angle Controlled STATCOM: Zhengping Xi, Student Member, IEEE, and Subhashish Bhattacharya, Member, IEEE.
- [3] Three-Level 24-Pulse STATCOM with Pulse Width Control at Fundamental Frequency Switching: Kadagala Venkata Srinivas, Student Member, IEEE and Bhim Singh, Fellow, IEEE.
- [4] Simulation of Three-Lever 48-Pulses STATCOM: S.HADJERI, Fatiha GHEZAL and S.A.ZIDI. ACTA ELECTROTEHNICA.
- [5] This demonstration illustrates operation of a $+100\text{Mvar}/-100\text{Mvar}$ 48-pulse GTO STATCOM: P. Giroux ; G. Sybille (Hydro-Quebec).