

# ĐIỀU KHIỂN TRAO ĐỔI ĐIỆN QUA BIÊN GIỚI VIỆT - TRUNG BẰNG LIÊN KẾT ĐIỆN MỘT CHIỀU CAO ÁP SỬ DỤNG BỘ BIẾN ĐỔI ĐA MỨC KIỂU MODULE

VIETNAM-CHINA BORDER POWER EXCHANGE CONTROLLING  
BY MODULAR MULTILEVEL CONVERTER BASED HVDC INTERCONNECTION

**Nguyễn Phúc Huy**

*Trường Đại học Điện Lực*

## **Tóm tắt:**

Kết nối truyền tải điện một chiều (HVDC) là một giải pháp tốt để trao đổi công suất giữa hai mạng điện khác nhau nhờ những ưu việt của nó. Bài báo tiến hành nghiên cứu xây dựng mô hình mô phỏng hệ thống kết nối HVDC sử dụng các bộ biến đổi đa mức điện áp kiểu module, mô phỏng và phân tích các trường hợp trao đổi công suất theo thực tế vận hành giữa Việt Nam và Trung Quốc. Bên cạnh ưu điểm về chất lượng sóng dòng điện và điện áp đầu ra tốt, vấn đề điều khiển công suất tác dụng và phản kháng độc lập là một ưu thế rõ rệt trong vận hành linh hoạt hệ thống. Liên kết HVDC là một giải pháp cần được tính đến trong lập kế hoạch xây dựng liên kết lưới điện với các quốc gia láng giềng, khai thác và sử dụng hiệu quả mạng điện, cũng như sử dụng hợp lý các nguồn tài nguyên đất nước.

## **Từ khóa:**

Bộ biến đổi đa mức module, MMC, HVDC, điều khiển công suất, mạng điện liên kết.

## **Abstract:**

High voltage direct current (HVDC) interconnection is a suitable solution for exchanging power between two separate power networks because of its benefits. This paper deals with the simulation model of Modular Multilevel Converter (MMC)-based HVDC system. Case studies based on power exchange situation between Vietnam and China are simulated and analysed. Beside the high quality output voltage and current waves, the independent control of active and reactive power is an obvious advantage in the flexible operation of the connected networks. Consequently, HVDC interconnection should be taken into account in planning and designing networks connecting between neighbour countries, effectively exploiting power grids and national resources as well.

## **Key words:**

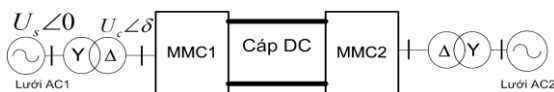
Modular Multilevel Converter, MMC, HVDC, power control, interconnection

---

Ngày nhận bài: 28/11/2017, ngày chấp nhận đăng: 8/12/2017, phản biện: TS. Phạm Thị Thùy Linh.

## 1. MỞ ĐẦU

Hiện tại, Việt Nam và Trung Quốc đang có liên kết lưới điện xoay chiều 220 kV từ Guman - Lào Cai và Malutang - Hà Giang. Tổng sản lượng điện Việt Nam mua của Trung Quốc năm 2016 là 1.500 GWh với mức công suất khoảng 300 MW [1]. Liên kết lưới điện xoay chiều giữa hai hệ thống có một số khó khăn về kỹ thuật như việc điều khiển dòng công suất, ổn định hệ thống, ảnh hưởng qua lại lớn khi có sự cố một phía... Trong khi đó, liên kết bằng hệ thống truyền tải điện cao áp một chiều (HVDC) là một lựa chọn khả dĩ ngay cả khi hai hệ thống khác tần số [2]. So với các cấu hình HVDC sử dụng các bộ biến đổi nguồn dòng (LCC-HVDC) đã sớm phát triển, các cấu hình liên kết sử dụng bộ biến đổi nguồn áp (VSC-HVDC) có nhiều ưu điểm vượt trội như độc lập điều khiển công suất tác dụng và phản kháng, các van bán dẫn IGBT có khả năng tự chuyển mạch, dễ dàng kết nối với lưới điện xoay chiều... Trong hệ VSC-HVDC, bộ biến đổi đa mức nguồn áp (MMC) là thế hệ mới nhất trong công nghệ bộ biến đổi, linh hoạt trong điều khiển điện áp đầu ra với mức sóng hài rất thấp [2-4]. Cấu hình cơ bản của hệ thống HVDC sử dụng bộ biến đổi MMC (sau đây gọi tắt là MMC-HVDC) được thể hiện trong hình 1.



Hình 1. Cấu hình cơ bản của MMC-HVDC

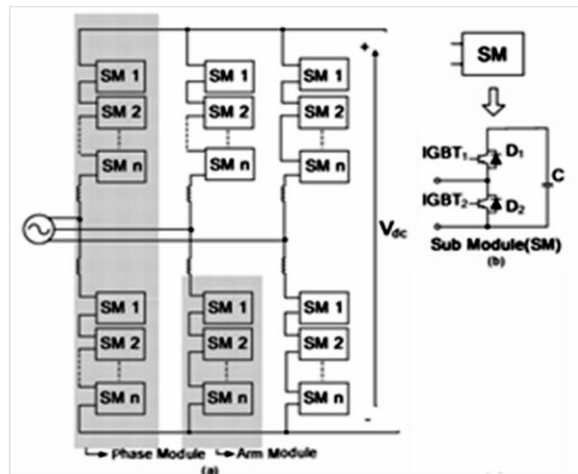
Trong các phần tiếp theo của bài báo, các nội dung chính sẽ được trình bày là cấu

tạo và phương pháp điều chế của MMC, các vòng điều khiển tương ứng của hệ điều khiển MMC-HVDC phù hợp với kết nối giữa hai lưới điện xoay chiều. Phần mô phỏng tập trung vào các trường hợp trao đổi công suất, phân tích một số trường hợp vận hành thực tế trong liên kết trao đổi điện năng giữa Việt Nam và Trung Quốc.

## 2. BỘ BIẾN ĐỔI ĐA MỨC NGUỒN ÁP KIỂU MODULE

### 2.1. Cấu tạo

Bộ biến đổi đa mức nguồn áp kiểu module (MMC) sử dụng nhiều module thành phần (SM) nối tiếp với nhau tạo thành (hình 2). Mỗi một cầu pha sẽ có số SM là  $2N$  bố trí thành hai nửa cầu đối xứng nối tiếp với một kháng điện.



Hình 2. Cấu trúc của MMC (a), module thành phần (b)

### 2.2. Phương pháp điều chế NLM cho MMC

MMC làm việc dựa trên nguyên tắc cộng dồn điện áp của từng SM có được do sự kết hợp trạng thái làm việc giữa các van

bán dẫn. Tại mỗi thời điểm số lượng SM của mỗi cầu pha được đưa vào hoạt động luôn là  $N$ , và khi số lượng SM ở hai nửa cầu bằng nhau thì điện áp ra sẽ bằng 0 [2-5]. Việc điều chế xung đóng cắt của các SM có thể được thực hiện bằng phương pháp NLM (Nearest Level Modulation) phổ biến hiện nay dành cho MMC [2,4]. Trong bài báo này, nguyên lý cơ bản của NLM được áp dụng, đó là việc so sánh từng bậc điện áp với sóng hình sin tham chiếu để tạo ra xung điều khiển đóng cắt các SM tương ứng. Nếu gọi  $u_s(t)$  là sóng điện áp tham chiếu,  $U_C$  là điện áp của tụ điện SM, thì tại mỗi thời điểm, số SM nửa cầu trên cần đóng vào  $n_p$  và của nửa cầu dưới  $n_n$  được tính như sau:

$$n_p = \frac{N}{2} + \text{round} \left( \frac{u_s}{U_C} \right) \quad (1)$$

$$n_n = \frac{N}{2} - \text{round} \left( \frac{u_s}{U_C} \right) \quad (2)$$

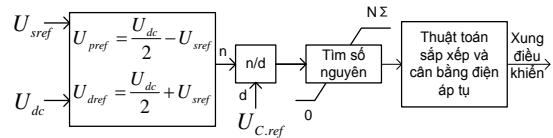
Điều kiện  $N=n_p + n_n$  luôn đảm bảo, tương ứng với sóng điện áp đầu ra có  $N+1$  bậc.

### 2.3. Điều khiển cân bằng điện áp tụ của module thành phần

Đối với MMC, việc tích trữ năng lượng phía một chiều được thực hiện bởi nhiều tụ điện của SM ghép nối với nhau, do vậy cần phải điều khiển cả giá trị điện áp một chiều tổng và cân bằng điện áp tụ của từng SM. Để thực hiện cân bằng điện áp tụ, thuật toán được biết đến nhiều nhất là thuật toán sắp xếp lựa chọn SM đưa vào làm việc [6, 7]. Thuật toán thực hiện như sau: (1) Điện áp tụ tại từng thời điểm trong chu kỳ điều khiển được đo và sắp xếp theo các nhóm tăng dần và giảm dần.

(2) Khi dòng điện đi vào SM theo chiều nạp, các SM có mức điện áp thấp sẽ được đưa vào. Ngược lại khi dòng điện đi vào theo chiều phóng của tụ, thì các SM có điện áp tụ cao sẽ được đóng vào.

Sơ đồ khối điều khiển tạo xung đóng mở các SM được thể hiện trong hình 3.



Hình 3. Sơ đồ khối tạo xung theo NLM

### 3. ĐIỀU KHIỂN MMC-HVDC

Trong hình 1, nếu gọi điện kháng của MBA là  $X$ , lấy điện áp điểm kết nối  $U_s$  là gốc, điện áp đầu ra MMC là  $U_c$  trễ pha  $\delta$  so với  $U_s$ , ta có công suất truyền từ hệ thống về MMC là:

$$P = \frac{U_s U_c}{X} \sin \delta \quad (3)$$

$$Q = \frac{U_s (U_s - U_c \cos \delta)}{X} \quad (4)$$

Có thể thấy rằng, công suất tác dụng chủ yếu phụ thuộc vào  $\delta$ , còn công suất phản kháng phụ thuộc chủ yếu vào hiệu  $U_s - U_c \cos \delta$ . Thông qua điều khiển  $\delta$  và độ lớn của  $U_c$  mà có thể điều khiển được độ lớn và phương hướng của  $P$  và  $Q$ .

Phương pháp điều khiển thường dùng hiện nay là phương pháp điều khiển vectơ, tác động thông qua việc điều khiển các thông số công suất tác dụng, công suất phản kháng, điện áp một chiều, điện áp xoay chiều, và tần số [2-4]. Trong liên kết lưới điện giữa hai hệ thống xoay chiều trong nghiên cứu này, lựa chọn cặp thông

số điều khiển cho phía phát điện (phía chỉnh lưu) là  $P$  và  $Q$ , và phía nhận điện (phía nghịch lưu) là  $U_{dc}$  và  $Q$ . MMC sẽ được điều khiển để các thông số này bám theo các giá trị đặt ban đầu.

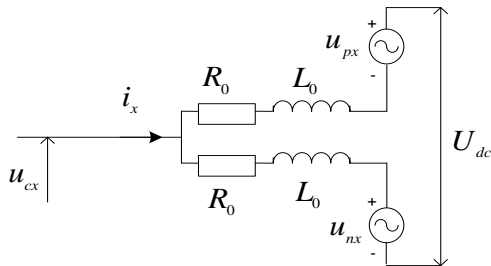
### 3.1. Mô hình toán học của MMC

Sơ đồ thay thế pha  $x$  ( $x=a,b,c$ ) của MMC như hình 4.  $R_0$  và  $L_0$  là điện trở và điện kháng của kháng điện pha,  $U_{px}$  là điện áp nửa cầu trên và  $U_{nx}$  là điện áp nửa cầu dưới pha  $x$ . Áp dụng luật Kierchhoff và một vài biến đổi ta có:

$$L \frac{di_x(t)}{dt} + R.i_x(t) = u_{cx}(t) - u_x(t) \quad (5)$$

trong đó:

$$u_x(t) = (u_{nx} - u_{px}) / 2; R_0 = 2R; L_0 = 2L$$



Hình 4. Sơ đồ thay thế pha  $x$  (a,b,c) của MMC

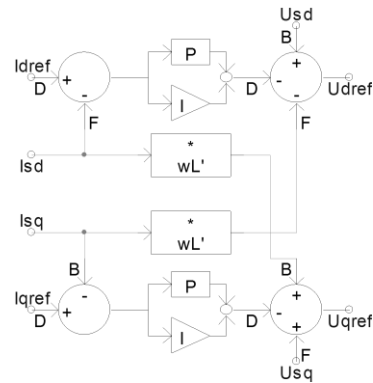
Trong hệ đơn vị dq hệ phương trình 5 được biểu diễn thành :

$$\begin{cases} (R + sL)i_d(s) = u_{cd}(s) - u_d(s) + \omega Li_q(s) \\ (R + sL)i_q(s) = u_{cq}(s) - u_q(s) - \omega Li_d(s) \end{cases} \quad (6)$$

### 3.2. Bộ điều khiển vòng trong

Bộ điều khiển vòng trong (bộ điều khiển dòng điện) điều khiển dòng điện pha bám theo giá trị tham chiếu. Có thể thấy từ (6), dòng điện trục d-q có quan hệ tương hỗ,

dẫn đến điện áp tương hỗ trục d-q với lượng bù là  $\omega Li_q$  và  $\omega Li_d$ , sử dụng điều khiển PI có thể có hệ phương trình mô tả tín hiệu điện áp tham chiếu để điều khiển MMC như (7), và sơ đồ được thể hiện trong hình 5.



Hình 5. Bộ điều khiển dòng điện

$$\begin{cases} u_{dref} = u_{cd} + \omega Li_q - k_{p1}(i_{dref} - i_d) \\ \quad \quad \quad + k_{i1} \int (i_{dref} - i_d) dt \\ u_{qref} = u_{cq} - \omega Li_d - k_{p2}(i_{qref} - i_q) \\ \quad \quad \quad + k_{i2} \int (i_{qref} - i_q) dt \end{cases} \quad (7)$$

### 3.3. Bộ điều khiển vòng ngoài

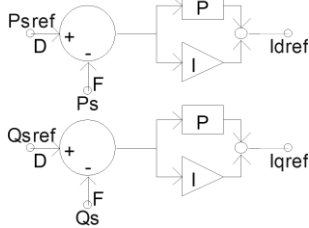
Bộ điều khiển vòng ngoài căn cứ vào giá trị công suất tác dụng và phản kháng đối với phía phát điện; công suất phản kháng và điện áp một chiều đối với phía nhận điện để tính toán ra dòng điện tham khảo cho bộ điều khiển dòng điện.

Công suất tức thời trong hệ dq là:

$$\begin{cases} P_{s,dq} = \frac{3}{2} u_{sd} \cdot i_d \\ Q_{s,dq} = -\frac{3}{2} u_{sd} \cdot i_q \end{cases} \quad (8)$$

Có thể thông qua  $i_d$  và  $i_q$  để điều khiển  $P_s$

và  $Q_s$ , tức điều khiển độc lập  $P_s$  và  $Q_s$ . Để giảm thiểu sai số ta dùng bộ điều khiển PI như mô tả trong hình 6.

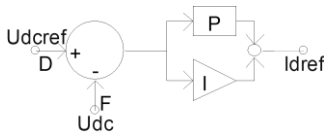


Hình 6. Bộ điều khiển công suất PQ

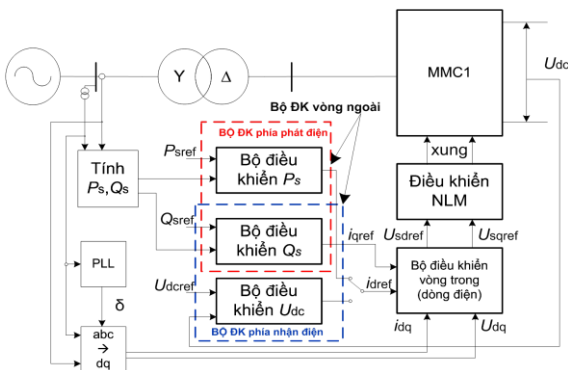
Công suất phía xoay chiều cũng chính là công suất phía một chiều, và do đó ta có quan hệ (9).

$$i_{dc} = \frac{3 u_{sd} . i_d}{2 U_{dc}} \quad (9)$$

Như vậy, cũng có thể thông qua  $i_d$  để điều khiển  $U_{dc}$ . Bộ điều khiển điện áp một chiều căn cứ theo giá trị đặt  $U_{dcref}$  tiến hành điều chỉnh công suất tác dụng truyền tới phía một chiều để giữ  $U_{dc}$  (hình 7).



Hình 7. Bộ điều khiển điện áp một chiều



Hình 8. Sơ đồ khối tổng quan điều khiển trạm biến đổi

Bộ điều khiển vòng ngoài của hệ thống một phía điều khiển theo  $P$  và  $Q$  và phía kia điều khiển theo  $U_{dc}$  và  $Q$ . Sơ đồ khối điều khiển mỗi trạm biến đổi của liên kết MMC-HVDC như hình 8. Cả hai trạm biến đổi đều được thiết kế đầy đủ các bộ điều khiển, dễ dàng chuyển đổi từ chỉnh lưu sang nghịch lưu.

#### 4. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

Với cấu trúc hệ thống như hình 1, máy biến áp có các cấp điện áp là 220 kV (phía lưới AC) và 110 kV (phía bộ biến đổi). Mỗi nửa cầu pha của MMC được bố trí số mô đun  $N=10$  có  $U_c=20$  kV, tổng điện áp một chiều là 200 kV. Tụ điện của SM được chọn đảm bảo giá trị điện áp ra có xét tới dao động điện áp tụ. Cuộn kháng pha cũng được lựa chọn để giảm thiểu ảnh hưởng của dòng điện vòng trong mạch cầu pha và dòng sự cố qua MMC [4,5,8]. Các thông số mô hình được cho trong bảng 1 và bảng 2.

Các trường hợp nghiên cứu được xây dựng căn cứ vào thực tế trao đổi công suất, Trung Quốc là phía phát điện (AC2) và Việt Nam là phía nhận điện (AC1).

- Trường hợp 1: Truyền 200 MW công suất tác dụng và thay đổi lên mức 300 MW ở 0,75 s, không phát công suất phản kháng.
- Trường hợp 2: Khi đang vận hành 300 MW, lần lượt điều khiển các bộ biến đổi phát công suất phản kháng lên lưới AC, phía Việt Nam tại 1 s và phía Trung Quốc tại 1,25 s.
- Trường hợp 3: tác động điều khiển giảm  $P=0$  tại 1,5 s trong khi vẫn duy trì mức phát công suất phản kháng.

**Bảng 1. Thông số mạch mô hình MMC-HVDC**

| Đại lượng                          | Ký hiệu   | Giá trị       |
|------------------------------------|-----------|---------------|
| Công suất định mức                 | $P_{dm}$  | 300 MW        |
| Điện áp định mức module thành phần | $U_{SM}$  | 20 kV         |
| Điện áp DC định mức                | $U_{dc}$  | 200 kV        |
| Điện trở nhánh cầu                 | $R_{arm}$ | 0,02 $\Omega$ |
| Điện cảm nhánh cầu                 | $L_{arm}$ | 0,06367 H     |
| Tụ điện mỗi module con             | $C_{SM}$  | 1680 $\mu F$  |

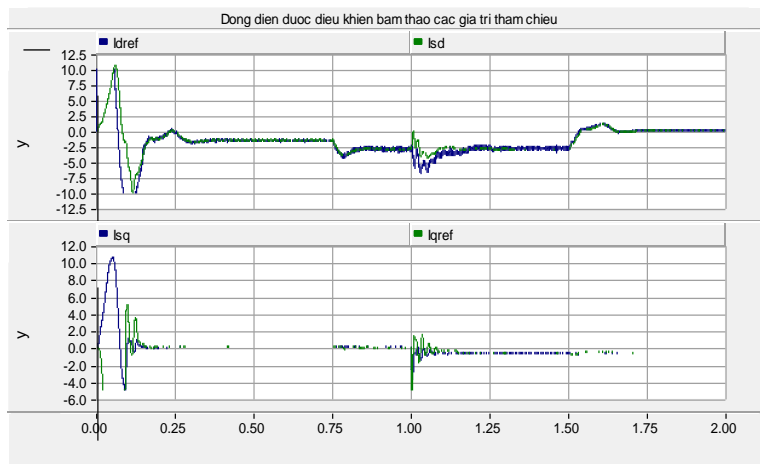
**Bảng 2. Thông số điều khiển**

| Bộ điều khiển |                       | Kp               | Ki             |
|---------------|-----------------------|------------------|----------------|
| MMC1          | Điện áp một chiều     | 0,163            | 0,177          |
|               | Công suất phản kháng  | 0,095            | 0,518          |
|               | Dòng điện: $d$<br>$q$ | 15,534<br>15,236 | 0,949<br>1,043 |
| MMC2          | Công suất tác dụng    | 0,042            | 0,597          |
|               | Công suất phản kháng  | 0,014            | 5,218          |
|               | Dòng điện: $d$<br>$q$ | 15,666<br>15,9   | 0,126<br>0,107 |

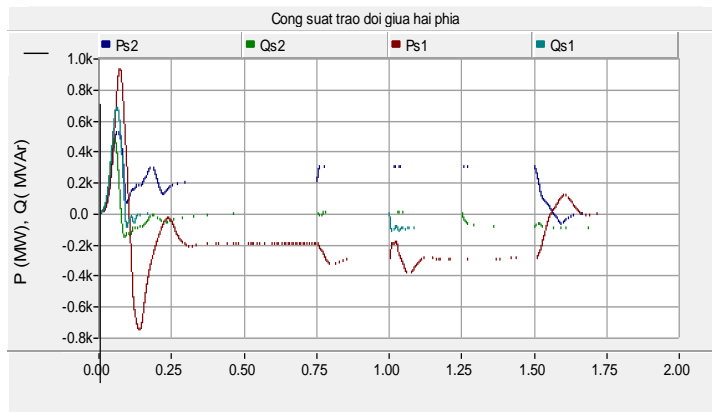
Hình 9 cho thấy kết quả dòng điện được điều khiển bám sát dòng điện tham chiếu được tạo ra từ vòng điều khiển ngoài. Hệ thống điều khiển ổn định, giá trị công suất đầu ra của mỗi hệ thống bám sát các giá trị đặt mong muốn điều khiển.

Công suất tác dụng và công suất phản kháng được điều khiển hoàn toàn độc lập. Ngoài ra, hệ thống còn cho phép mức truyền công suất tác dụng bằng 0, trong khi vẫn phát công suất phản kháng. Có thể quan sát kỹ trong hình 10 công suất tác dụng phía nhận điện (Ps1) nhỏ hơn một chút so với phía phát điện (Ps2) do có tổn thất trên hệ thống.

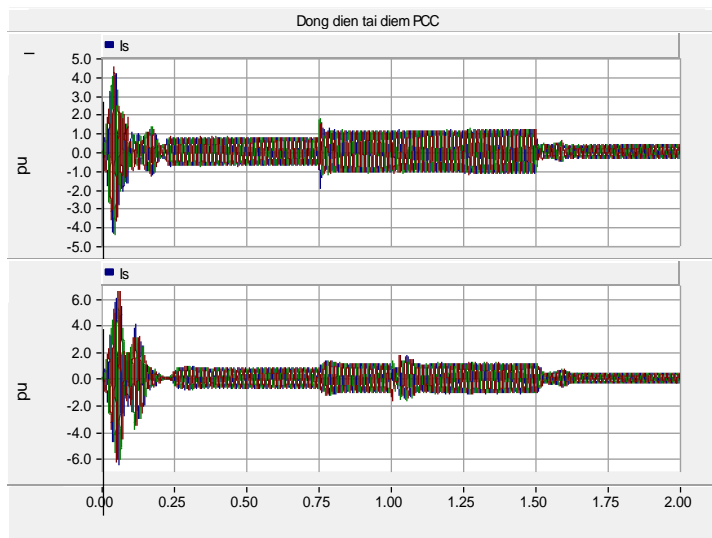
Dòng điện phía xoay chiều thay đổi ổn định theo mức thay đổi của công suất (hình 11). Điện áp tại PCC (tính quy về cấp 110 kV) dao động rất ít ở cả hai phía hệ thống (hình 12). Hình 13 cho thấy tại điểm PCC, sóng điện áp gần như đạt được dạng sin chuẩn. Điện áp nửa cầu trên pha  $a$  có dạng bậc thang 11 cấp điện áp, kết hợp với điện áp nửa cầu dưới có dạng tương ứng sẽ có điện áp đầu ra bộ biến đổi có đặc tính rất tốt.



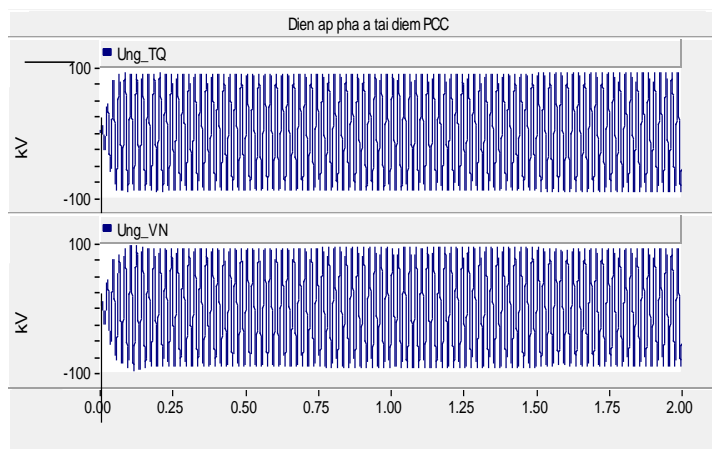
**Hình 9. Dòng điện điều khiển và dòng điện tham chiếu**



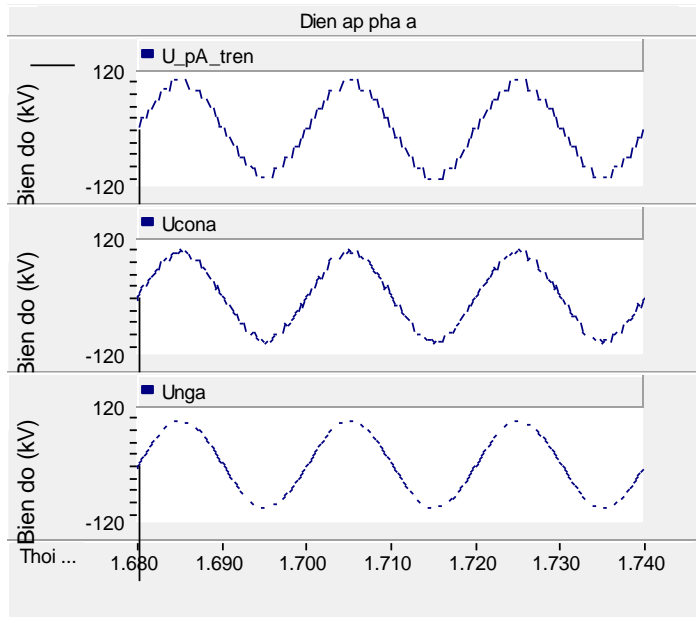
Hình 10. Sự thay đổi công suất tương ứng ở hai đầu hệ thống



Hình 9. Dòng điện các pha điểm kết nối PCC phía Trung Quốc (trên) và phía Việt Nam (dưới)

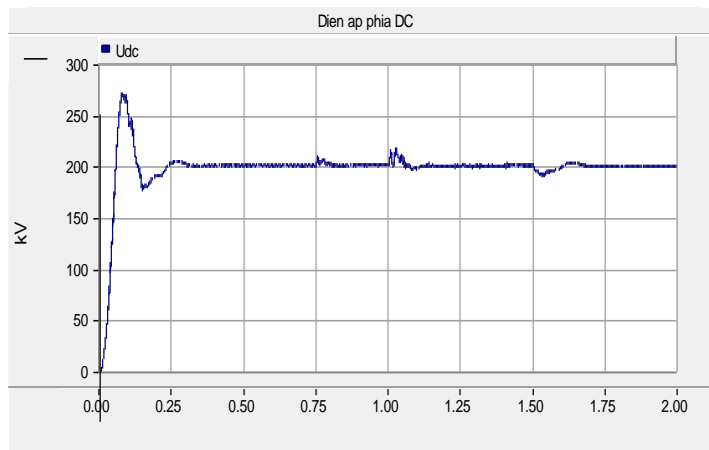


Hình 12. Điện áp pha a điểm kết nối PCC phía Trung Quốc (trên) và phía Việt Nam (dưới)



Hình 13. Điện áp pha a phía Việt Nam (từ trên xuống): nửa cầu trên, đầu ra bộ biến đổi, PCC

Điện áp DC cũng được điều chỉnh ở giá trị ổn định 200 kV mặc dù có những dao động nhỏ tại những thời điểm có sự thay đổi về công suất ở các bộ điều khiển (hình 14).



Hình 14. Điện áp phía một chiều của hệ thống

## 5. KẾT LUẬN

Từ các kết quả và phân tích trên có thể nhận thấy, việc ứng dụng MMC-HVDC trong việc liên kết trao đổi điện giữa Việt Nam - Trung Quốc có một số ưu điểm:

a. Phương pháp điều chế NLM và thuật toán sắp xếp cân bằng điện áp tụ cho ra sóng điện áp có dạng gần sin chuẩn. Điều này cho phép MMC-HVDC không cần thêm các bộ lọc sóng hài như các cấu hình khác của VSC.



b. Công suất tác dụng và phản kháng được điều khiển hoàn toàn độc lập. Mức truyền công suất có thể thay đổi linh hoạt, thuận lợi cho điều độ và vận hành giữa hai quốc gia.

c. MMC-HVDC cho phép phát công suất phản kháng lên lưới xoay chiều trong khi không truyền công suất tác dụng. Điều

này đặc biệt có lợi trong việc huy động công suất phản kháng để điều chỉnh chế độ của lưới điện và điều chỉnh điện áp khi cần thiết.

Đó cũng là tiền đề để nghiên cứu sâu hơn về kinh tế và các vấn đề kỹ thuật khác trong ứng dụng MMC-HVDC tại Việt Nam.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] EVN, 2016 Vietnam Electricity Annual Report, <http://www.evn.com.vn/>
- [2] Mircea Eremia (Editor), *Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence*, IEEE Press, United State of America, First edition, 2016.
- [3] Dragan Jovcic, *High voltage direct current transmission: converters, systems and DC grids*, Wiley John&Son, United State of America, First edition, 2015.
- [4] Zheng Xu, and others, *Flexible high voltage direct current transmission system [in Chinese]*, China Machine Press, China, first edition, 2013.
- [5] Qingrui, and others, *Parameter design principle of the arm inductor in modular multilevel converter based HVDC*, 2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON), Zhejiang, China, p.1-6, 24-28 Oct. 2010.
- [6] Trần Hùng Cường và cộng sự, *Phương pháp điều chế NLM và thuật toán cân bằng năng lượng cho bộ biến đổi đa mức cấu trúc module*, Hội nghị toàn quốc lần thứ 3 về điều khiển và tự động hóa, Thái Nguyên, Việt Nam, P.1-7, 28-29.11.2015;
- [7] Byung Moon Han, Jong kyou Jeong, *Switching-Level Simulation Model of MMbased Back-to-Back Converter for HVDC Application*, Conference in Power Electronics (IPEC), Hiroshima, Japan, p. 937 - 943, 2014.
- [8] Beddard, A.Barnes, M., *Modelling of MMC-HVDC Systems – An Overview*, Energy Procedia, Vol. 80, Supplement C, p.201-212, 2015

### Giới thiệu tác giả:



Tác giả **Nguyễn Phúc Huy** tốt nghiệp đại học và thạc sĩ tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội vào các năm 2003 và 2010. Năm 2015 nhận bằng Tiến sĩ hệ thống điện và tự động hóa tại Trường Đại học Điện lực Hoa Bắc, Bắc Kinh, Trung Quốc. Hiện nay tác giả đang công tác tại Trường Đại học Điện lực.

Hướng nghiên cứu chính: Chất lượng điện năng, ứng dụng điện tử công suất, độ tin cậy của hệ thống điện.

