

CÂN BẰNG ĐIỆN ÁP DỰA TRÊN THUẬT TOÁN SẮP XẾP GIÁ TRỊ ĐIỆN ÁP TỤ ĐIỆN TRONG BỘ BIẾN ĐỔI ĐA MỨC MMC

VOLTAGE BALANCE BASED ON CAPACITOR VOLTAGE VALUE SORTING ALGORITHM IN THE MMC CONVERTER

Trần Hùng Cường^{1*}, Phạm Việt Phương²

¹Trường Đại học Thủy lợi

²Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

*Tác giả liên hệ: cuongth@tlu.edu.vn

(Nhận bài: 21/9/2022; Chấp nhận đăng: 21/02/2023)

Tóm tắt - Việc áp dụng bộ biến đổi MMC (Modular Multilevel Converter) cho các hệ thống điện có nhiều ưu điểm như: Hoạt động ở điện áp cao, công suất lớn. Vấn đề của MMC khi áp dụng điều chế NLM (Nearest Level Modulation) là cân bằng điện áp trên các tụ điện nhằm đảm bảo sự hoạt động ổn định của MMC để giảm được tần số chuyển mạch của IGBT. Bài báo này đề xuất thuật toán cân bằng điện áp trên tụ điện bằng cách sắp xếp giá trị điện áp tụ điện để lựa chọn đóng mở các SM (Sub-Module). Thuật toán được thực hiện bằng cách sắp xếp giá trị điện áp tụ đo về từ các cảm biến để chọn lựa cách phù hợp được bật trong một chu kỳ điều chế để đảm bảo cân bằng điện áp tụ giữa các SM. Thuật toán được áp dụng cho mô hình MMC có 13 mức điện áp xoay chiều và được kiểm chứng bằng mô phỏng trên phần mềm Simulink và thực nghiệm để chứng minh thực hiện thuật toán là khả thi.

Từ khóa - Cân bằng điện áp tụ điện; điều chế NLM; thực nghiệm MMC; Bộ biến đổi đa mức MMC

1. Đặt vấn đề

Hiện nay, công nghệ truyền tải điện một chiều điện áp cao đi xa đang được nghiên cứu và phát triển mạnh mẽ [1], việc này nhằm mục đích giảm tổn thất và tiết kiệm chi phí. Tuy nhiên, các nguồn điện được sử dụng phổ biến là nguồn điện xoay chiều, vì vậy để có thể thực hiện truyền tải điện một chiều thì các BBD (Bộ biến đổi) đóng vai trò quan trọng để có thể chuyển đổi các dạng năng lượng điện với nhau. Để chuyển đổi có hiệu quả nguồn điện công suất lớn, điện áp cao thì BBD đa mức có những thể mạnh vượt trội do có tính modun hóa, có thể chịu được điện áp lớn mà các van bán dẫn chỉ chịu một mức điện áp nhỏ [2]. Có nhiều loại cấu trúc BBD đa mức đã và đang được nghiên cứu đưa vào sử dụng trong thực tế như: BBD đa mức có cấu trúc Neutral-point converter, Cascaded H-bridge... [3]. Trong những năm gần đây, BBD đa mức MMC được quan tâm mạnh mẽ bởi các nhà nghiên cứu do có những ưu điểm như: Dễ dàng chuyển đổi điện áp ở mức rất cao mà cấu trúc và thuật toán điều khiển dễ dàng triển khai [4]. Đặc điểm này có được là nhờ MMC được cấu tạo bởi các SM có cấu trúc đơn giản và chúng được mắc nối tiếp với nhau trong mỗi pha của MMC, việc này đã chia nhỏ điện áp chịu đựng lên mỗi SM làm cho các van bán dẫn của SM hoạt động dễ dàng hơn khi chỉ chịu mức điện áp thấp [5, 8]. Tuy nhiên, với số lượng lớn các SM được mắc nối tiếp với nhau trong mỗi pha, và quá trình bật tắt không đồng thời của mỗi

Abstract - The application of Modular Multilevel Converter (MMC) in power systems has many advantages such as: Operation at high voltage, large capacity. The problem of MMC when applying Nearest Level Modulation (NLM) is to balance the voltage on the capacitors to ensure the stable operation of the MMC to reduce the switching frequency of the IGBT. This paper proposes a voltage balance algorithm on the capacitor by arranging the capacitor voltage value to select the ON and OFF option of the Sub-Module (SM). The algorithm is implemented by the arrangement of the capacitor voltage value measure from the sensors to select the appropriate turned-on SMs in a modulation cycle in order to ensure the capacitor voltage balance among SM. The algorithm is applied in the MMC model with 13 voltage levels and is verified by the simulation on Simulink software and system experiments to prove that the algorithm is feasible.

Key words - Capacitor voltage balance; NLM modulation; experimental MMC; Multilevel converter MMC

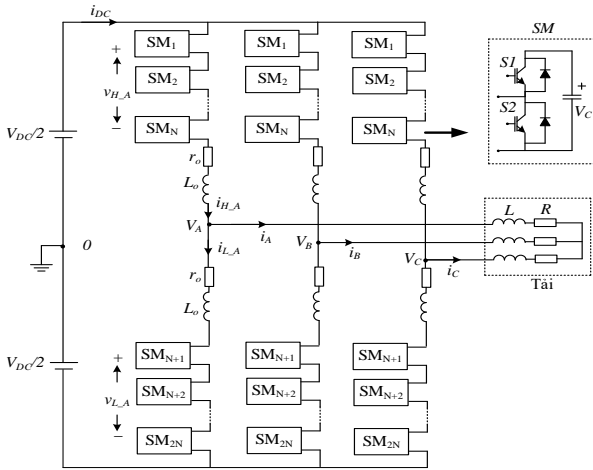
SM sẽ khiến cho điện áp trên tụ điện của mỗi SM không đồng đều, thậm chí có sự chênh lệch lớn. Vì vậy, trong tức thời các SM có thể chịu đựng mức điện áp vượt ngoài khả năng chịu đựng của chúng và ảnh hưởng đến quá trình làm việc lâu dài của mỗi SM, quá trình này cũng làm dòng điện trong mỗi nhánh sẽ dao động mạnh ở phía đầu ra [6]. Do vậy, cần một giải pháp để thực hiện quá trình cân bằng trên điện áp tụ điện. Dựa trên phương pháp điều chế PWM (Pulse Width Modulation) kiểu dịch pha, các sóng điều chế có thể tự giữ cân bằng điện áp. Tuy nhiên, phương pháp này bị hạn chế khi số mức của MMC tăng cao và việc thực hiện thuật toán sẽ trở nên phức tạp, các van bán dẫn phải hoạt động với tần số đóng cắt lớn [7]. Trong bài báo này, thuật toán cân bằng điện áp tụ được thực hiện bằng cách sắp xếp điện áp theo chiều tăng dần trong mỗi nhánh của MMC. Sau đó, thuật toán sẽ lựa chọn các SM có điện áp tụ cao nhất hoặc thấp nhất để bật theo chiều dòng điện trong mỗi nhánh. Việc này sẽ chọn lựa được các tụ điện có mức điện áp gần với giá trị trung bình điện áp tụ mỗi nhánh van và dẫn đến cân bằng điện áp trong các tụ điện tốt hơn. Phương pháp này phù hợp với việc điều chế NLM cải tiến áp dụng cho BBD MMC. Để kiểm chứng hoạt động của thuật toán, tác giả thực hiện mô phỏng mô hình MMC 13 mức điện áp trong phần mềm Matlab/Simulink và thực nghiệm thuật toán dựa trên mô hình thực ở quy mô phòng thí nghiệm, số mức này đủ lớn để có thể chứng minh được

¹ Thủy Lợi University (Tran Hung Cuong)

² Ha Noi University of Science and Technology (Pham Viet Phuong)

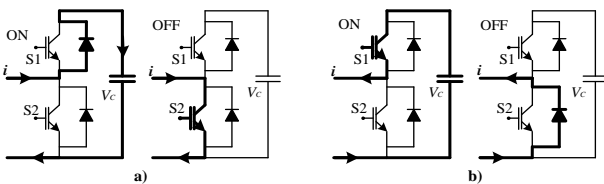
thuật toán điều chế về lý thuyết và thực nghiệm cho mô hình MMC. Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm đã chứng minh được sự phù hợp của thuật toán.

2. Cấu trúc và hoạt động của MMC



Hình 1. Cấu trúc bộ biến đổi MMC

Sơ đồ cấu trúc ba pha của BBD MMC được thể hiện như Hình 1. Mỗi pha được chia thành hai nhánh van, mỗi nhánh van có N các SM là các BBD nửa cầu giống nhau, chúng được mắc nối tiếp với nhau và nối tiếp với một cuộn kháng L_o . Điện áp đầu ra của MMC được lấy ra ở điểm giữa mỗi pha, điện trở r_o được mô tả như tổng các điện trở trong mỗi nhánh trong một pha. Số lượng SM trong mỗi pha kết hợp với phương pháp điều chế NLM sẽ quyết định số mức điện áp phía xoay chiều của MMC. Khi số lượng SM đủ lớn thì chất lượng điện áp đầu ra sẽ được cải thiện đáng kể, việc điều khiển làm giảm tần số đóng cắt của van trong mỗi SM sẽ làm cho giảm tổn hao và nâng cao chất lượng sóng sin của điện áp và dòng điện phía đầu ra. Phía một chiều của MMC được cấp bởi một nguồn V_{DC} chung, do đó điện áp phía DC của mỗi SM trên mỗi nhánh V_{DC}/N . Khi MMC làm việc, hai van bán dẫn trong mỗi SM được điều khiển ON (bật) và OFF (tắt) để đưa ra hai mức điện áp đầu ra là 0 và V_C . Quá trình kết hợp các SM đóng mở trong một pha, sẽ tạo ra các bậc điện áp mong muốn phía đầu ra xoay chiều. Trạng thái bật và tắt của SM được mô tả trong Hình 2, trạng thái này còn được gọi là trạng thái “chèn vào” và “bỏ qua” của các SM trong trường hợp chiều dòng điện có chiều dương như ở Hình 2a và trường hợp dòng điện có chiều âm như ở Hình 2b. Ở đây, ta định nghĩa: Trạng thái ON hay trạng thái “chèn vào” là trạng thái mà điện áp đầu ra ở phía AC của mỗi SM bằng điện áp V_C ở phía DC. Trạng thái OFF hay trạng thái “bỏ qua” là trạng thái mà điện áp được đưa ra ở phía AC của SM bằng không.

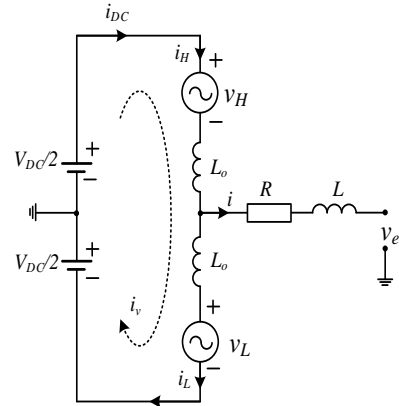


Hình 2. Trạng thái ON và OFF của các SM khi:

a) dòng điện có chiều dương; b) dòng điện có chiều âm

Hình 3 là sơ đồ thay thế một pha của MMC. Trong đó, V_{DC} và i_{DC} là điện áp và dòng điện ở phía DC của MMC;

i_H và i_L lần lượt là dòng điện nhánh trên và nhánh dưới mỗi pha của MMC; v_H và v_L lần lượt là tổng điện áp của các SM ở nhánh trên và nhánh dưới mỗi pha của BBD; v_e và i_v là điện áp và dòng điện ở phía xoay chiều của bộ biến đổi.



Hình 3. Sơ đồ thay thế một pha của MMC

Khi đó, dòng điện ra phía xoay chiều của MMC được biểu diễn như ở phương trình sau:

$$i = i_H - i_L \tag{1}$$

Nếu bỏ qua điện áp rơi trên điện trở và cuộn kháng ở phía AC của MMC thì giá trị điện áp xoay chiều v_e được tính theo biểu thức sau:

$$v_e = \frac{1}{2}(v_H - v_L) \tag{2}$$

Giá trị điện áp v_H và v_L ở phương trình (2) được tính theo biểu thức sau:

$$v_H = m_H V_{CH}^\Sigma \tag{3}$$

$$v_L = m_L V_{CL}^\Sigma$$

Trong đó, V_{CH}^Σ và V_{CL}^Σ lần lượt là tổng điện áp của các SM ở nhánh dưới và nhánh trên được chèn vào; m_H và m_L là các hệ số chỉ số lượng các SM được chèn vào ở nhánh dưới và nhánh trên của mỗi pha và có giá trị trong khoảng từ 0 đến 1. Nếu m_H hoặc m_L bằng 1 nghĩa là tất cả các SM ở nhánh trên hoặc nhánh dưới được chèn vào, ngược lại nếu m_H hoặc m_L bằng 0 nghĩa là không có SM nào được chèn vào. Điện áp các nhánh và điện áp V_{DC} đầu vào được liên hệ với nhau theo biểu thức sau:

$$V_{DC} = v_H + v_L \tag{4}$$

Để tạo ra điện áp xoay chiều AC từ nguồn một chiều DC, đã có nhiều phương pháp điều chế được áp dụng thành công cho MMC như LSPWM, PSPWM, SVM... [7]. Trong bài báo này, thuật toán cân bằng điện áp được thực hiện dựa trên việc áp dụng phương pháp NLM cải tiến cho MMC, quá trình thực hiện thuật toán điều chế NLM cải tiến cho MMC đã được trình bày cụ thể trong tài liệu [8]. Nội dung của bài báo tập trung phân tích và xây dựng thuật toán cân bằng điện áp tụ trong MMC dựa trên việc sắp xếp giá trị điện áp tụ điện để lựa chọn bật/tắt các SM theo phương pháp điều chế NLM cải tiến.

3. Thuật toán cân bằng điện dựa trên thuật toán sắp xếp giá trị điện áp tụ điện

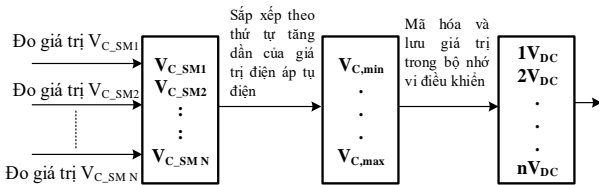
Cân bằng điện áp giữa các tụ điện có vai trò rất quan

trọng trong hoạt động của MMC vì mất cân bằng điện áp tụ điện sẽ làm suy giảm chất lượng sóng hài điện áp đầu ra của MMC [9]. Để phát hiện sự mất cân bằng điện áp trên tụ điện cần so sánh chúng với giá trị trung bình của điện áp trên các tụ trong một nhánh. Khi điện áp của tụ lớn hơn giá trị trung bình ở một ngưỡng nào đó ta sẽ cần cho tụ phóng điện, khi nhỏ hơn sẽ cần cho tụ nạp điện. Có nhiều phương pháp đề xuất trong tài liệu [9]. Tuy nhiên, việc áp dụng chúng thường đòi hỏi phải hiệu chỉnh lượng đặt điện áp ở nhánh trên, nhánh dưới của mỗi pha và điều này rất phức tạp trong các phương pháp điều chế. Lý do đầu tiên và cơ bản nhất đó là sự không giống nhau về giá trị giữa các tụ điện được sử dụng cho các SM của MMC. Bên cạnh đó, việc liên tục “chèn vào” hay “bỏ qua” các SM tại mỗi thời điểm để tạo ra mức điện áp mong muốn đòi hỏi cần có một chiến lược để giữ cân bằng điện áp trên mỗi nhánh van của bộ biến đổi. Yêu cầu về phóng nạp tụ thể hiện như sau:

$$\begin{cases} V_{Cix} > V_{avg} + \Delta V & \text{Xả tụ } C_i \ (i = 1, 2, \dots, 12) \\ V_{Cix} < V_{avg} - \Delta V & \text{Nạp tụ } C_i \end{cases} \quad (5)$$

Trong đó, ΔV là giá trị ngưỡng được lựa chọn theo yêu cầu mong muốn cân bằng điện áp trên các tụ. Ví dụ, chọn $\Delta V = 1\%V_{DC}$, tức là bằng 1% điện áp DC định mức.

Thuật toán cân bằng điện áp tụ điện sẽ làm giảm tần số đóng cắt trung bình của mỗi pha và đồng thời phân phối cân bằng điện áp trong các tụ SM, vì thế có thể giảm đáng kể biên độ của dòng điện vòng mà không ảnh hưởng đến điện áp và dòng điện đầu ra của MMC. Khi số lượng các SM trên mỗi nhánh van của BBD MMC là lớn thì phương pháp cân bằng điện áp dựa trên việc sắp xếp điện áp trên các tụ điện để chọn ra các SM sẽ được “chèn vào” là phương pháp phù hợp. Các phương pháp điều chế đề xuất được thực hiện trên miền thời gian thực gồm hai phần: Đầu tiên là tạo của các bước chuyển mạch; Sau đó là cân bằng điện áp tụ điện.

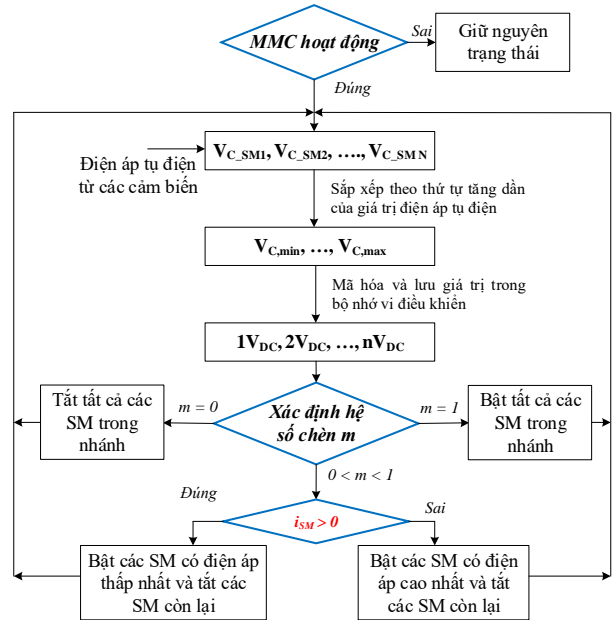


Hình 4. Thuật toán sắp xếp giá trị điện áp tụ và mã hóa

Dựa trên phương pháp NLM cải tiến, trong phần này sẽ trình bày chi tiết thuật toán cân bằng điện áp tụ, thuật toán sẽ xác định được số lượng SM của mỗi pha được chèn vào trong một chu kỳ. Theo tài liệu [8] thì trong một chu kỳ mỗi pha sẽ có số lượng N các SM trong tổng số 2N các SM được chèn vào, và phụ thuộc vào thuật toán sắp xếp sẽ quyết định số lượng SM ở nhánh trên hoặc nhánh dưới được bật hoặc tắt. Theo Hình 2 dòng điện chạy trong các SM có thể dương hoặc âm, phương pháp được đề xuất sẽ căn cứ vào chiều dòng điện chạy trong SM để sắp xếp giá trị điện áp đo được và đưa ra phương án các SM. Đề mô tả chi tiết thuật toán, quá trình sắp xếp và cân bằng điện áp được thực hiện ở nhánh trên của pha A, đối với các pha B, C thì quá trình được thực hiện tương tự.

Cụ thể của quá trình như sau: Bước đầu tiên các giá trị điện áp tụ điện sẽ được đo về từ cảm biến đo điện áp trên

các tụ điện và gửi đến bộ vi xử lý. Sau đó, các giá trị điện áp sẽ được sắp xếp theo giá trị tăng dần, bước tiếp theo các giá trị điện áp này sẽ được mã hóa và lưu giá trị của chúng như Hình 4. Sau khi sắp xếp giá trị điện áp tụ điện, tiếp theo thuật toán sẽ được lập trình tính hệ số điều chế m , mục đích của việc này là để xác định được các SM được “chèn vào” hoặc “bỏ qua” sau khi biết được chiều của dòng điện. Hình 5 là lưu đồ mô tả thuật toán cân bằng điện áp tụ cho MMC.



Hình 5. Lưu đồ thuật toán cân bằng điện áp tụ điện

Giải thích chi tiết lưu đồ thuật toán như sau:

Sau khi các giá trị điện áp được sắp xếp và mã hóa vào bộ nhớ vi điều khiển, thuật toán sẽ xác định hệ số điều chế m như Hình 5, và kiểm tra các trường hợp của m .

Khi $m = 0$ thì tắt tất cả các SM trong nhánh và lặp lại chu kỳ mới.

Nếu $m = 1$ thì bật tất cả các SM trong nhánh và lặp lại chu kỳ mới.

Với các trường hợp còn lại của m ($0 < m < 1$), việc chọn ra SM được chèn mở mỗi nhánh được thực hiện khi thuật toán phát hiện ra sự thay đổi mức điện áp từ mức này sang mức đồng thời căn cứ chiều dòng điện dương hay âm của trong mạch để chọn ra các SM phù hợp sẽ được “chèn vào” và SM không phù hợp sẽ được “bỏ qua”, từ đó gửi tín hiệu phát xung đến các van bán dẫn trên các SM. Phương pháp này có ưu điểm giảm thiểu được sự chênh lệch giữa điện áp trên tụ của các SM và điện áp đặt.

Cụ thể của quá trình này thực hiện như sau: Khi dòng điện đi qua SM theo chiều dương ($i_{SM} > 0$), thuật toán sẽ chọn các SM có điện áp lớn nhất để bật, lúc này các tụ điện sẽ được nạp và điện áp trên các tụ sẽ tăng dần khi đó điện áp ra phía xoay chiều sẽ được tăng lên một bậc theo hình bậc thang. Ngược lại, khi dòng điện đi qua SM có chiều âm ($i_{SM} < 0$), thuật toán sẽ chọn các SM có điện áp nhỏ nhất để bật, lúc này các tụ điện sẽ được xả và điện áp trên các tụ sẽ giảm dần dần khi đó điện áp ra phía xoay chiều sẽ được giảm xuống một bậc theo hình bậc thang. Lưu ý rằng, theo phương pháp điều chế NLM cải tiến thì mỗi chu kỳ trích mẫu sẽ có 1 SM ở nhánh trên được bật, cùng lúc đó sẽ có 1 SM ở nhánh

dưới được tắt hoặc ngược lại để đảm bảo rằng trong mỗi chu kỳ trích mẫu luôn có N các SM trong mỗi pha được “chèn vào”. Nghĩa là tại một thời điểm chỉ có một nửa số lượng SM của pha được chèn vào, do đó tổng điện áp đặt lên tất cả các tụ (kể cả được chèn vào hay bỏ qua) là V_{DC} .



Hình 6. Trạng thái điện áp AC đầu ra của bộ MMC

Hình 6 mô tả điện áp đầu ra V_{AC} của MMC trong một chu kỳ điều chế tương ứng với 4 trạng thái khác nhau:

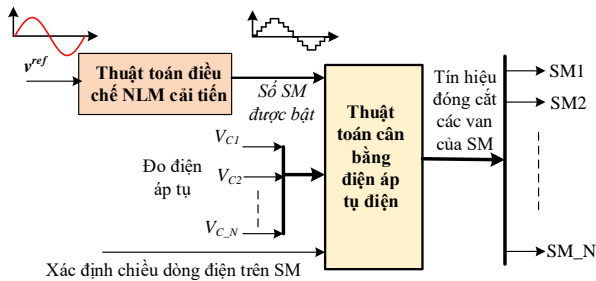
Trạng thái A: Điện áp đầu ra là lớn nhất, để đạt được trạng thái này, tất cả các SM ở nhánh trên được bỏ qua do đó điện áp $V_{DC}/2$ được nối trực tiếp tới đầu ra, tất cả các SM ở nhánh phía dưới được chèn vào, tổng điện áp qua các SM nhánh dưới bằng $V_{DC}/2$.

Trạng thái B: Điện áp ra giảm dần và bám theo bậc thang. Để đạt được điều này, các SM ở nhánh phía trên sẽ được chèn vào. Để đảm bảo số lượng SM chèn vào không thay đổi thì một SM ở nhánh dưới phải được bỏ qua. Sau khi một SM ở nhánh trên được chèn vào và một SM ở nhánh dưới được bỏ qua thì điện áp đầu ra đạt trị số $V_{DC}/2 - V_{SM}$. Khi đó, điện áp xoay chiều đầu ra càng giảm.

Trạng thái C: Điện áp đầu ra là nhỏ nhất, khi đó tất cả các SM ở nhánh trên được chèn vào và tất cả SM ở nhánh dưới bị bỏ qua, điện áp đầu ra lúc này bằng $-V_{DC}/2$.

Trạng thái D: Để tăng dần điện áp đầu ra bám theo bậc thang từ giá trị nhỏ nhất, các SM ở nhánh dưới sẽ được chèn vào, để đảm bảo số lượng SM được chèn vào không thay đổi thì các SM ở nhánh trên tương ứng sẽ được bỏ qua.

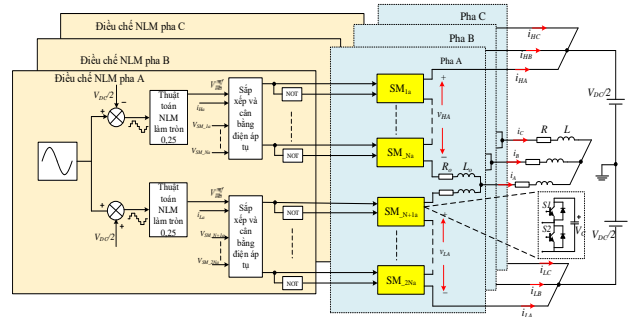
Sơ đồ nguyên lý của thuật toán cân bằng điện áp tụ điện và cấu trúc MMC 3 pha được áp dụng thuật toán lần lượt được thể hiện như Hình 7 và Hình 8.



Hình 7. Sơ đồ nguyên lý thuật toán cân bằng điện áp tụ điện

Theo sơ đồ Hình 8, ban đầu phương pháp NLM cải tiến sẽ sử dụng sóng sin chuẩn được so sánh với giá trị điện áp một chiều trên mỗi nhánh để tạo ra được điện áp dạng bậc thang trên mỗi nhánh, giá trị điện áp bậc thang này sẽ được làm tròn bởi hàm làm tròn 0,25 để tạo ra được giá trị điện áp đặt trên mỗi nhánh của MMC để tạo ra được số mức điện áp ở phía đầu ra và quyết định số SM sẽ được bật. Tiếp theo là thuật toán cân bằng điện áp tụ như Hình 7 sẽ sắp xếp giá trị điện áp tụ điện theo thứ tự tăng dần hoặc giảm dần phụ thuộc vào giá trị dòng điện để quyết định thứ tự

các tụ điện được bật và được tắt. Từ đó, tạo ra các tín hiệu để đóng cắt các van IGBT trên ba pha như Hình 8.



Hình 8. Cấu trúc phương pháp điều chế NLM cải tiến kết hợp với cân bằng điện áp tụ điện cho BBD MMC

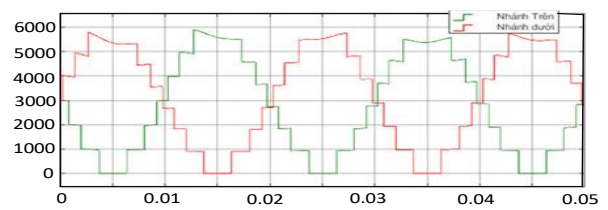
4. Mô phỏng và thực nghiệm hệ thống

4.1. Kết quả mô phỏng

Trong phần này, thực hiện mô phỏng phương pháp điều chế NLM cải tiến kết hợp với thuật toán cân bằng điện áp trên tụ điện. Quá trình mô phỏng cho MMC được thực hiện trên phần mềm Matlab/Simulink. Các thông số mô phỏng cho bộ biến đổi MMC được trình bày trong Bảng 1.

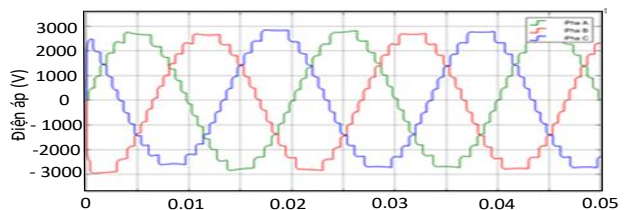
Bảng 1. Thông số mô phỏng BBD MMC

STT	Thông số	Ký hiệu	Giá trị
1	Điện trở tải	R	70Ω
2	Điện cảm tải	L	$5,10^{-3}H$
3	Điện trở nhánh	r_o	$0,5 \Omega$
4	Điện cảm nhánh	L_o	$4,2.10^{-3}H$
5	Tụ điện trên mỗi SM	C	$100F$
6	Điện áp một chiều	V_{DC}	$6000V$
7	Số SM trên mỗi nhánh	N	6 SM
8	Điện áp trên tụ	V_C	$1000V$
9	Tần số điều chế NLM	f_{NLM}	$300Hz$

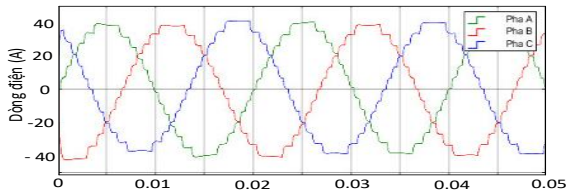


Hình 9. Điện áp nhánh trên và nhánh dưới pha A

Kết quả mô phỏng được thực hiện trong khoảng thời gian 0,3s tính từ thời điểm MMC bắt đầu làm việc đến thời điểm 0,3s. Kết quả Hình 9 cho thấy, điện áp mỗi nhánh của BBD có dạng bậc thang với 7 mức điện áp. Hình 10 và Hình 11 là kết quả điện áp và dòng điện đầu ra phía xoay chiều, kết quả cho thấy dòng điện và điện áp có dạng bậc thang bám theo quỹ đạo hình sin.

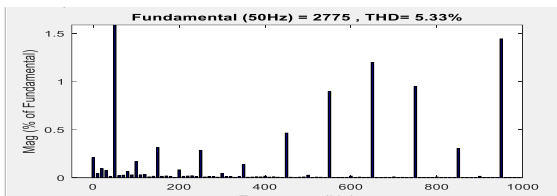


Hình 10. Điện áp ba pha phía xoay chiều

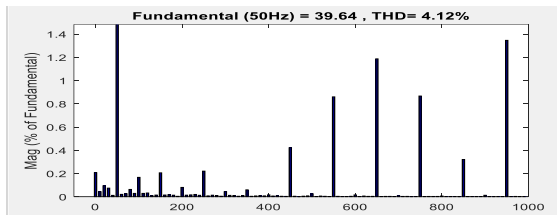


Hình 11. Dòng điện ba pha phía xoay chiều cung cấp cho tải

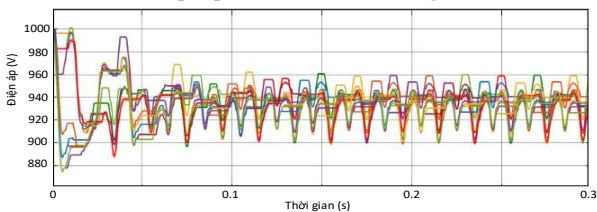
Thực hiện phân tích Fourier cho dòng điện và điện áp ở Hình 12 và Hình 13 cho thấy, chỉ số THD của dòng điện là 4,14% và của điện áp là 5.33%. So với kết quả phân tích trong tài liệu [8] nghiên cứu với 20SM trên mỗi pha, thì chỉ số THD của điện áp gần 3% và chỉ số THD của dòng điện tăng 3,35%. Nguyên nhân của việc tăng các chỉ số THD là do số lượng SM trong mạch lực mà nghiên cứu sử dụng ít hơn và thông số mạch lực sử dụng một kịch bản với các phương pháp điều chế khác.



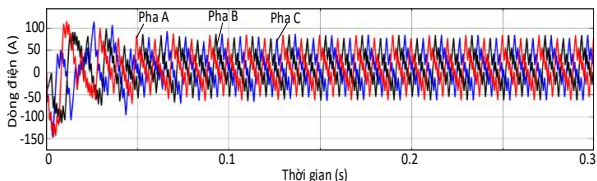
Hình 12. Kết quả phân tích Fourier điện áp đầu ra AC



Hình 13. Kết quả phân tích Fourier dòng điện trên tải



Hình 14. Điện áp các tụ điện của nhánh trên và dưới pha A

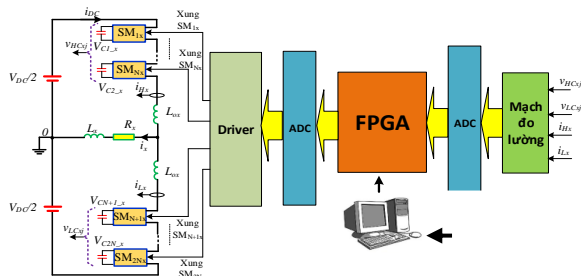


Hình 15. Dòng điện vòng trong các pha của MMC

Hình 14 là hình dạng của điện áp các tụ điện trong pha A của BBD. Thấy rằng điện áp tụ điện luôn được cân bằng và dao động quanh giá trị 930V, biên độ dao động lớn nhất khi BBD hoạt động ổn định là 30V, giá trị này lệch so với giá trị định mức 40V, tương ứng 0,04%, đây là kết quả do thuật toán cân bằng điện áp trên tụ điện mang lại, với kết quả này MMC có thể hoạt động ổn định với tần số đóng mở van nhỏ. Hình 15 là hình dạng dòng điện vòng chạy trong mạch các pha A, B, C. Biên độ dòng điện vòng có trị số 70A và có độ đập mạch lớn. Tuy nhiên, giá trị dòng điện vòng lớn vẫn là một nhược điểm của phương pháp này. Cần phải có biện pháp điều khiển để kiểm soát giá trị dòng điện vòng được tốt hơn.

4.2. Kết quả thực nghiệm

Sơ đồ cấu trúc hệ thống thực nghiệm dạng một pha bộ biến đổi MMC được thể hiện như Hình 16. Trong đó, chương trình thuật toán điều khiển và điều chế NLM được lập trình trên máy tính. Sau đó, được nạp vào thiết bị vi điều khiển FPGA AX309 do đáp ứng được số lượng cổng I/O của MMC khi MMC có số lượng chân lớn. Mạch đo lường có nhiệm vụ thu thập các tín hiệu đo lường về dòng điện và điện áp từ các cảm biến. Các mạch ADC có nhiệm vụ chuyển đổi các tín hiệu tương tự là tín hiệu điện áp và tín hiệu dòng điện đo được từ cảm biến. Mạch driver có mục đích phát xung điều khiển cho van IGBT của các SM. Đồng thời, khuếch đại xung đóng mở van IGBT, bảo vệ van và cách lý van với phần mạch lực.

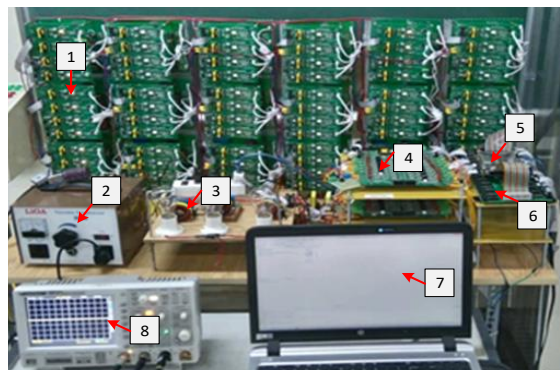


Hình 16. Cấu trúc hệ thống thực nghiệm một pha của MMC

Các thông số tính toán áp dụng cho BBD MMC thực tế với 6 SM trên mỗi nhánh, nguồn điện áp 400 V_{DC} được trình bày như Bảng 2.

Bảng 2. Thông số thực nghiệm BBD MMC

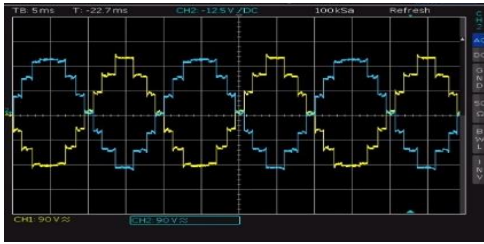
STT	Thông số thực nghiệm	Ký hiệu	Giá trị
1	Điện trở tải	<i>R</i>	0,1 Ω
2	Điện cảm tải	<i>L</i>	0,21.10 ⁻³ H
3	Điện trở nhánh	<i>r_o</i>	0,1 Ω
4	Điện cảm nhánh	<i>L_o</i>	24.10 ⁻⁶ H
5	Tụ điện trên mỗi SM	<i>C</i>	470.10 ⁻⁶ F
6	Điện áp một chiều	<i>V_{DC}</i>	400V
7	Số SM mỗi nhánh	<i>N</i>	6 SM
8	Điện áp trên tụ	<i>V_C</i>	67V
9	Tần số điều chế NLM	<i>f_{mNLM}</i>	300Hz
10	Tần số cơ bản	<i>f</i>	50Hz



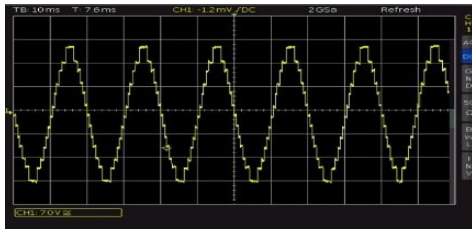
Hình 17. Mô hình hệ thống thực nghiệm BBD MMC: 1. Driver; 2. VDC; 3. Tải R-L; 4. Mạch đo lường; 5. FPGA; 6. ADC; 7. Máy tính nạp code; 8. Máy hiển thị kết quả

Sơ đồ hệ thống thực nghiệm BBD MMC gồm 6 SM trên mỗi nhánh được trình bày như Hình 17. Hệ thống được thực hiện tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội để có thể thử

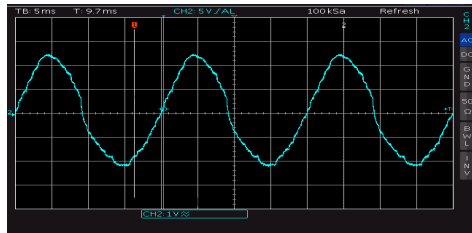
nghiệm các thuật toán điều khiển bộ biến đổi MMC. Trong phần này kịch bản thử nghiệm kết quả mô phỏng một pha BĐĐ MMC với thuật toán điều chế NLM cải tiến và thuật toán điều khiển cân bằng điện áp tụ như sơ đồ Hình 7.



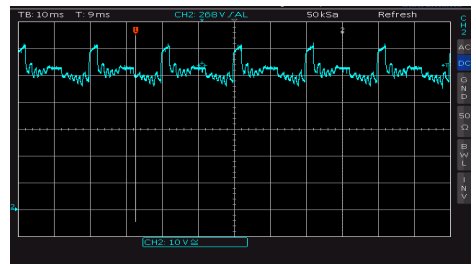
Hình 18. Hình dạng điện áp nhánh trên và nhánh dưới



Hình 19. Hình dạng điện áp trên tải xoay chiều



Hình 20. Hình dạng dòng điện trên tải xoay chiều



Hình 21. Hình dạng điện áp trên tụ điện của SM1

Một số kết quả thực nghiệm được thể hiện trên các hình từ Hình 18 đến Hình 21. Trong đó, Hình 18 là điện áp của nhánh trên và nhánh dưới của MMC một pha. Hình 19 là điện áp xoay chiều đầu ra của MMC. Kết quả cho thấy, điện áp nhánh có 7 mức, các mức được thực hiện rõ ràng, quá điện áp sinh ra khi các khoá chuyển mạch là không đáng kể. Điện áp đầu ra của MMC có 13 mức theo đúng nguyên lý của NLM cải tiến đã chứng tỏ được tính chính xác của quá trình điều chế NLM cho MMC khi thực nghiệm so với các kết quả mô phỏng đạt được. Hình 20 là dòng điện đầu ra trên tải của MMC. Kết quả cho thấy dòng điện có dạng sin đáp ứng so với yêu cầu của quá trình điều chế. Hình 21 là kết quả điện áp tụ trên các SM1 của pha. Hình ảnh cho thấy, biên độ dao động các tụ điện là 14V tương ứng với 20% giá trị định mức, giá trị này có trị số lớn so với mô phỏng. Tuy nhiên, do thực hiện ở điện áp thấp 400V với quy mô phòng thí nghiệm

nên việc này có thể lý giải được và thấy rằng điện áp tụ hoạt động ổn định và quá điện áp xuất hiện không đáng kể và phù hợp với yêu cầu đặt ra.

5. Kết luận

Bài báo này giới thiệu cấu trúc liên kết MMC và thuật toán cân bằng điện áp trên các tụ điện của MMC kết hợp với phương pháp điều chế NLM cải tiến. Thuật toán này được thực hiện dựa trên việc sắp xếp giá trị điện áp tụ điện của mỗi SM trong một chu kỳ điều chế để xác định số lượng SM được Bật hoặc Tắt. Quá trình này sẽ giảm được tần số đóng cắt van của các SM đồng thời cân bằng được giá trị điện áp các tụ và đưa giá trị của chúng về gần với giá trị điện áp trung bình các tụ điện mỗi pha trong một chu kỳ trích mẫu. Các kết quả thể hiện bằng việc mô phỏng trên phần mềm Matlab/simulink cho thấy, giá trị điện áp tụ điện lệch 0,04% so với giá trị định mức, chỉ số THD của dòng điện là 4,14% và của điện áp là 5,33%, các thông số này đảm bảo cho MMC hoạt động tốt và đã thể hiện được chất lượng của phương pháp đề xuất. Ngoài kết quả mô phỏng, bài báo cũng đã thực hiện thực nghiệm hệ thống với mô hình tương đương 13 mức điện áp ở quy mô phòng thí nghiệm, các kết quả thực hiện được cũng đã chứng minh được khả năng triển khai đúng được mô hình trong thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Gnanarathna, Udana N.; Gole, Aniruddha; Sanjay Kumar, "Multilevel Modular Converter for VSC-HVDC Transmission Applications Control and Operational Aspects", *16th National Power Systems Conference, NPSC 2010* (pp. 405-410).
- [2] Daniel Siemaszko, Antonios Antonopoulos, Kalle Ilves, Michail Vasiladiotis, Lennart Ångquist, (2010), "Evaluation of Control and Modulation Methods for Modular Multilevel Converters", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 37, pp. 611–618, Mar./Apr.
- [3] Daniel Siemaszko, Antonios Antonopoulos, Kalle Ilves, Michail Vasiladiotis, Lennart Ångquist, (2010), "Evaluation of Control and Modulation Methods for Modular Multilevel Converters", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 37, pp. 611–618, Mar./Apr.
- [4] Kalle Ilves, IEEE, Antonios Antonopoulos, IEEE, (2012), "A New Modulation Method for the Modular Multilevel Converter Allowing Fundamental Switching Frequency", *IEEE transactions on power electronics*, Vol. 27, No. 8, pp. 991-998 August 2012.
- [5] Liqun He, Kai Zhang, Jian Xiong, Shengfang Fan, Xiaosen Chen, Yaosuo Xue (2012), "New Modular Multilevel Converter with Power Channels between Upper- and Lower Arms Suitable for MV Drives", *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), IEEE*, May 2015.
- [6] Remus Teodorescu Luca Zarri, "Modular Multi-Level Converter Modeling Simulation and Control in Steady State and Dynamic Conditions", *6th Iranian Conference on Electrical and Electronics Engineering*, August - 2014.
- [7] Dekka, B. Wu, N. R. Zargari, and R. L. Fuentes, "A space-vector PWM based voltage balancing approach with reduced current sensors for modular multilevel converter", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 5, pp. 2734-2745, May 2016.
- [8] Pengfei Hu and Daozhuo Jiang, "A Level-Increased Nearest Level Modulation Method for Modular Multilevel Converters", *IEEE Trans on Power Electronics*, Vol. 30, Issue 4, pp. 1836-1842, April - 2015.
- [9] Hao Peng, Ying Wang, Kun Wang, Yan Deng, Xiangning He, and Rongxiang Zhao, "A Simple Capacitor Voltage Balancing Method with a Fundamental Sorting Frequency for Modular Multilevel Converters", *Journal of Power Electronics*, Vol. 14, No. 6, pp. 1109-1118, November - 2014.