

Phương pháp điều chế NLM cải tiến không đo điện áp tụ áp dụng cho bộ biến đổi đa mức MMC

Improved NLM modulation method without measuring capacitor voltage applied to Modular Multilevel Converter

Phạm Việt Phương¹, Nguyễn Đức Dương^{1,2}, Trần Hùng Cường³, Nguyễn Thị Thắm⁴, Lê Phương Hảo⁴, Nguyễn Hoàng Long⁵, Phạm Chí Hiếu¹

¹Đại học Bách khoa Hà Nội

²Học viện Nông nghiệp Việt Nam

³Đại học Thủy lợi

⁴Đại học Hồng Đức

⁵Công ty TOJI

* E-mail: phuong.phamviet@hust.edu.vn

Abstract

The NLM modulation method is particularly effective for Modular Multilevel Converter (MMC) systems with a large number of Submodules (SMs). This approach enables the generation of an output voltage on the AC side of the MMC, achieving up to $2N+1$ voltage levels, where N represents the number of SMs in each branch. This article focuses on enhancing the NLM modulation technique for MMC converters by introducing an algorithm that eliminates the need for voltage measurements from the capacitors. Instead, it utilizes simple logical operations to determine which SMs to activate or deactivate during each duty cycle. This innovation significantly reduces the requirement for capacitor voltage and current sensors within the branches, streamlining the complexity of signal connections. Consequently, the hardware design becomes more compact, which is advantageous for MMC converters deployed in medium and high voltage applications. The outcomes of this study were simulated using Matlab/Simulink and were compared against the traditional NLM modulation method, which relies on capacitor voltage measurements to assess the performance of the proposed approach.

Keywords: MMC - Modular Multilevel Converter; NLM - Nearest Level Modulation

Chữ viết tắt

MMC	Modular Multilevel Converter
NLM	Nearest Level Modulation
SVM	Space Vector Modulation
PWM	Pulse Width Modulation
SM	Sub-module
HVDC	High Voltage Direct Current
STATCOM	Static Synchronous Compensator
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor

Tóm tắt

Phương pháp điều chế NLM là phương pháp rất phù hợp để áp dụng cho bộ biến đổi đa mức MMC có số lượng lớn các SM. Phương pháp này có thể tạo ra một điện áp ở phía xoay chiều của MMC với số mức lên đến $2N+1$ (với N là số SM trên mỗi nhánh). Bài báo này đề cập đến việc cải tiến phương pháp điều chế NLM cho bộ biến đổi MMC thông qua việc sử dụng thuật toán mà trong đó không cần sử dụng thông tin về điện áp trên các tụ điện. Thuật toán này sử dụng các phép toán logic đơn giản để lựa chọn các SM sẽ được bật hoặc tắt trong một chu kỳ làm việc để tiến hành phát xung điều khiển. Điều này có ý nghĩa rất lớn trong việc giảm đáng kể các cảm biến đo điện áp tụ, cảm biến dòng điện trên các nhánh cũng như các đầu nối tín hiệu phức tạp. Nhờ đó, việc thiết kế phần cứng trở nên gọn nhẹ hơn khi bộ biến đổi MMC cần phải sử dụng một số lượng lớn các SM trong các ứng dụng trung và cao áp. Kết quả của nghiên cứu được thực hiện trên Matlab/simulink và được so sánh với phương pháp điều chế NLM có đo điện

áp trên tụ điện để đánh giá hiệu quả của phương pháp đã đề xuất.

1. Phần mở đầu

Bộ biến đổi (BBĐ) đa mức MMC là sự lựa chọn phù hợp cho các ứng dụng biến đổi điện năng từ một chiều sang xoay chiều ở cấp điện áp trung và cao thế [1]. MMC thường được sử dụng trong hệ thống HVDC, hệ thống PV nối lưới hoặc các hệ thống STATCOM... [2] - [4]. Ưu điểm của MMC là có thể tạo ra số mức điện áp bất kỳ ở phía xoay chiều từ nguồn điện áp một chiều ở phía đầu vào của MMC [5]. So với các bộ biến đổi đa mức khác như CHB (Cascaded H - bridge), FC (Flying Capacitor), NPC (Neutral Point Clamped), bộ biến đổi MMC có cấu trúc mạch lực rất đơn giản và rất linh hoạt trong việc mở rộng để thay đổi số mức điện áp, MMC có thể tạo ra điện áp với chất lượng sóng hài tốt khi áp dụng phương pháp điều chế phù hợp. Các ưu điểm khác của MMC có thể kể đến như: chỉ sử dụng duy nhất một nguồn điện áp một chiều đầu vào; không cần sử dụng máy biến áp hoặc các bộ lọc điện áp ở đầu ra, có thể áp dụng cho các hệ thống có dải công suất lớn để có thể truyền kết nối các hệ thống nguồn điện với lưới điện [6], [7]. Tuy nhiên, khi MMC có số mức quá lớn, thì việc áp dụng các thuật toán điều chế và điều khiển sẽ trở nên rất phức tạp, đặc biệt là rất khó khăn trong việc thiết kế phần cứng cho MMC do cấu trúc mạch lực có rất nhiều phân tử bán dẫn cũng như các thiết bị đo lường và hệ thống dây nối tín hiệu giữa các bộ phận [8]. Đây được coi là một trong những nhược điểm của MMC. Hiện nay, có một số phương pháp điều chế thường được áp dụng cho MMC như: Phương pháp điều chế SVM [9], phương pháp điều chế PWM [10]. Trong đó, điều chế

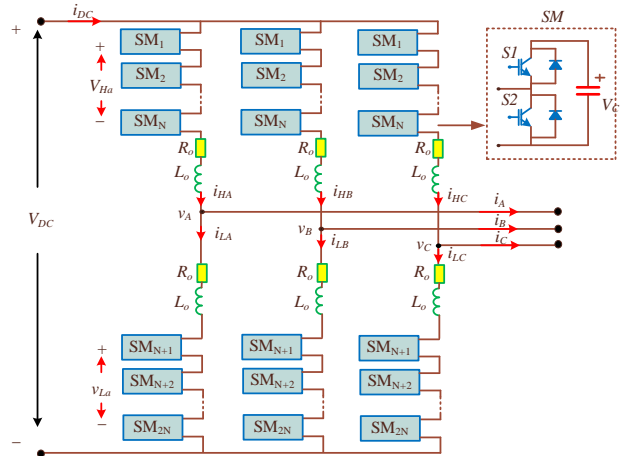
PWM có cách thực hiện đơn giản và có thể tạo ra $N+1$ mức điện áp, phương pháp này thường chỉ áp dụng cho bộ MMC có số lượng các SM là nhỏ, khi số lượng các SM lớn thì việc áp dụng điều chế PWM sẽ trở nên khó khăn vì tần số đóng cắt van sẽ rất lớn. Điều chế SVM có thể tạo ra số mức điện áp là $2N+1$ và có thể áp dụng cho MMC có số lượng lớn các SM. Tuy nhiên, phương pháp này có nhược điểm là tính toán rất phức tạp khi triển khai cho vi điều khiển, ngoài ra tần số đóng cắt lớn cũng là một nhược điểm khi áp dụng phương pháp điều chế này. Gần đây, phương pháp điều chế NLM đã được áp dụng cho MMC [11] để khắc phục các nhược điểm của điều chế PWM và SVM, cụ thể: NLM có thể tạo ra tần số đóng cắt van rất thấp và có thể áp dụng cho MMC lên tới hàng trăm các SM trong mỗi pha. Đây là một trong những ưu điểm vượt trội của phương pháp điều chế NLM khi áp dụng cho MMC mà các phương pháp điều chế khác không có được. Tuy nhiên, khi áp dụng NLM cho MMC như trong tài liệu [11], cũng có những vấn đề còn tồn tại cần phải giải quyết như: cần đo điện áp các tụ điện và dòng điện các nhánh để thực hiện việc sắp xếp và lựa chọn số SM được “chèn vào” hay “bỏ qua” trong mỗi chu kỳ điều chế để tạo ra số mức là $2N+1$. Trong cấu trúc mạch lực của MMC, ứng với mỗi SM cần phải dùng một cảm biến đo điện áp tụ, và trên mỗi nhánh van sẽ cần một cảm biến đo dòng điện. Việc sử dụng một lượng lớn thiết bị đo lường như vậy sẽ làm cho cấu hình mạch trở nên phức tạp, cồng kềnh và gây khó khăn trong việc xây dựng mô hình hệ thống trong mô phỏng và thực nghiệm. Thêm nữa, vấn đề thiết kế điều khiển cân bằng điện áp trên các tụ cũng như việc lựa chọn các SM phù hợp để thực hiện thuật toán “chèn vào” hay “bỏ qua” sẽ gặp nhiều khó khăn khi cần phải sử dụng thông tin điện áp trên các tụ thông qua các thiết bị đo lường. Nội dung chính của bài báo này là cải tiến thuật toán điều chế NLM mà trong đó không cần phải sử dụng các biện pháp đo điện áp tụ, đo dòng điện nhánh cũng như không cần phải sử dụng thuật toán cân bằng điện áp tụ điện. Điều này làm cho phương pháp điều chế NLM sẽ trở nên đơn giản hơn khi áp dụng cho MMC với hàng trăm các SM trên mỗi nhánh van. Thuật toán này giúp làm giảm mức độ phức tạp trong cấu trúc mạch lực của MMC khi không phải sử dụng các cảm biến đo điện áp, dòng điện và các dây nối tín hiệu. Để chứng minh được hiệu quả của phương pháp đề xuất, mô hình mô phỏng được thực hiện trong phần mềm MATLAB/Simulink và so sánh trực tiếp với phương pháp điều chế NLM có đo điện áp tụ áp dụng cho cùng một cấu hình bộ biến đổi MMC.

2. Sơ đồ cấu trúc và nguyên lý hoạt động của BBD MMC

2.1. Sơ đồ cấu trúc của BBD MMC

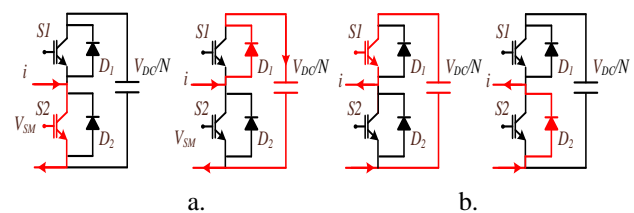
Hình 1 mô tả cấu trúc bộ biến đổi MMC ba pha, mỗi pha được tạo thành từ hai nhánh van gồm nhánh trên và nhánh dưới chứa số lượng N các SM mắc nối tiếp với nhau. Các SM sử dụng trong mô hình này chính là các bộ biến đổi nửa cầu H với hai van IGBT và một tụ điện. Khi làm việc, bộ MMC sẽ nạp hoặc xả các tụ điện trên SM để có thể tạo ra một mức điện áp phía xoay chiều. MMC chỉ sử dụng nguồn một chiều V_{DC} duy nhất cấp cho đầu vào. Điện áp xoay chiều được lấy ra từ giữa hai điện cảm nhánh L_o . Các cuộn cảm này có tác dụng hạn chế dòng điện vòng và các quá độ làm việc của MMC. Các tổn hao trong mỗi nhánh được mô tả bởi điện trở R_o , điện

trở này còn có tác dụng giúp tụ điện phóng hoặc nạp tốt hơn và giảm thiểu việc quá độ dòng điện trong mạch. Số lượng SM trong mỗi nhánh sẽ quyết định số mức đầu ra của điện áp phía xoay chiều. Về mặt lý thuyết, thì số lượng SM có thể mở rộng tới mức bất kỳ để đáp ứng được các yêu cầu về mức điện áp phía xoay chiều. Tuy nhiên, dựa vào điều kiện cụ thể và các yêu cầu đặt ra, người thiết kế sẽ lựa chọn số SM cho phù hợp với các điều kiện vận hành bộ biến đổi.



Hình 1: Cấu trúc bộ biến đổi đa mức MMC

2.2. Nguyên lý hoạt động của MMC



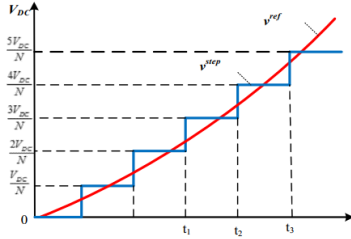
Hình 2: Trạng thái đóng cắt của S1 và S2: (a) khi dòng điện có chiều dương và (b) khi dòng điện có chiều âm

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 các SM được mô tả trong Hình 2, các 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 Hình 2a và trường hợp dòng điện có chiều âm như Hình 2b. Ở đây, ta định nghĩa trạng thái ON hay “chèn vào” là trạng thái mà điện áp đầu ra ở phía AC của mỗi SM bằng điện áp V_c ở phía DC, tức dòng điện sẽ chạy qua tụ điện của SM. Trạng thái OFF hay “bỏ qua” là trạng thái mà điện áp đầu ra ở phía AC của SM bằng 0, tức dòng điện không chạy qua tụ điện của SM. MMC hoạt động dựa trên nguyên tắc cộng dồn điện áp được tạo ra bởi các SM để tạo ra điện áp xoay chiều AC ở từng pha. Tổng điện áp DC của mỗi nhánh MMC bằng tổng điện áp DC trên mỗi SM, nghĩa là mỗi SM sẽ chịu mức điện áp là V_{DC}/N nếu có N là số SM trên mỗi nhánh pha. Điện áp xoay chiều trên các pha là v_x ($x = A, B, C$) thay đổi từng bước trong phạm vi của $V_{DC}/2$ đến $-V_{DC}/2$ với mỗi bước điện áp là V_{DC}/N . Quá trình xác định ở tại thời điểm cần bao nhiêu SM được “chèn vào”, bao nhiêu SM bị “bỏ qua” cho từng nhánh, từng pha sẽ được thực hiện bởi phương pháp điều chế NLM được trình bày ở phần sau.

3. Phương pháp điều chế NLM không đo điện áp tụ

3.1. Phương pháp điều chế NLM

Ý tưởng chính của phương pháp NLM là chia đều điện áp V_{DC} đầu vào cho các tụ điện của SM trong BBD MMC và sắp xếp các mức điện áp này bám theo thành phần điện áp mong muốn như biểu diễn trên Hình 3.



Hình 3: Khâu sắp xếp điện áp của phương pháp NLM

Bằng cách sắp xếp này, các SM sẽ được chèn vào. Khi đó điện áp nhánh trên, nhánh dưới và điện áp đầu ra trong mỗi pha được xác định như biểu diễn ở các phương trình (1) và (2) dưới đây:

$$\begin{cases} V_{Hx} = \frac{V_{DC}}{2} [1 - m \sin(\omega t)] \\ V_{Lx} = \frac{V_{DC}}{2} [1 + m \sin(\omega t)] \end{cases} \quad (1)$$

$$v_x = \frac{V_L - V_H}{2} \quad (2)$$

Trong đó: ω , $0 < m < 1$, V_H , V_L và V_x lần lượt ký hiệu cho tần số góc, hệ số điều chế, điện áp nhánh trên, điện áp nhánh dưới và điện áp đầu ra của pha x ($x = A, B, C$). Khi MMC làm việc, số lượng các SM được chèn vào trong một thời điểm được thể hiện như phương trình (3).

$$\begin{cases} N_H = \frac{N}{2} [1 - m \sin(\omega t)] \\ N_L = \frac{N}{2} [1 + m \sin(\omega t)] \end{cases} \quad (3)$$

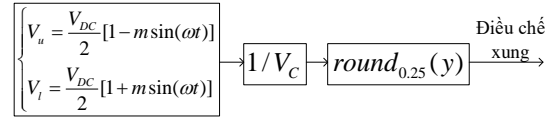
Trong đó, N_H và N_L lần lượt là số SM được chèn vào tại thời điểm t ở nhánh trên và nhánh dưới. Phương pháp NLM là phương pháp làm tròn trong đó số SM được chèn vào sẽ được quyết định qua hàm làm tròn tín hiệu đặt hình sin. Đối với điều chế NLM có số mức là $N+1$, số SM được chèn vào ở nhánh trên và nhánh dưới của một pha được đưa ra bởi phương trình (4) như sau:

$$\begin{cases} N_H = \text{round}_{0,5} \left\{ \frac{N}{2} [1 - m \sin(\omega t)] \right\} \\ N_L = \text{round}_{0,5} \left\{ \frac{N}{2} [1 + m \sin(\omega t)] \right\} \end{cases} \quad (4)$$

Hàm làm tròn $\text{round}_{0,5}(y)$ sẽ làm tròn giá trị y tới giá trị nguyên gần nhất. Ví dụ, $\text{round}_{0,5}(1.26) = 1$ hoặc $\text{round}_{0,5}(-2.68) = -3$. Với hai phương trình này, hai nhánh trên và dưới của một pha sẽ đổi mức vào cùng một thời điểm. Để cải thiện phương pháp đối với cùng một số SM, phương pháp NLM cải tiến sẽ tăng số mức lên $2N+1$. Đối với điều chế NLM có số mức là $2N+1$, số SM được chèn vào ở nhánh trên và nhánh dưới của một pha được đưa ra bởi phương trình (5) như sau:

$$\begin{cases} N_u = \text{round}_{0,25} \left\{ \frac{N}{2} [1 - m \sin(\omega t)] \right\} \\ N_l = \text{round}_{0,25} \left\{ \frac{N}{2} [1 + m \sin(\omega t)] \right\} \end{cases} \quad (5)$$

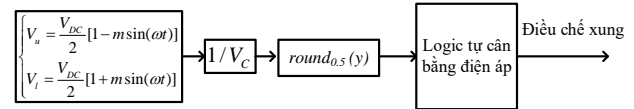
Hàm làm tròn $\text{round}_{0,25}(y)$ sẽ làm tròn giá trị y tới bội số của 0.5 gần nhất. Ví dụ: $\text{round}_{0,25}(1.26) = 1.5$ hoặc $\text{round}_{0,25}(-2.68) = -2.5$. Khâu tính toán số lượng các SM chèn vào được thể hiện ở Hình 4.



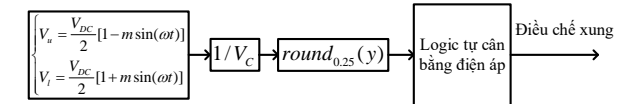
Hình 4: Khâu tính toán số lượng các SM chèn vào

Phương pháp này được thực hiện dựa trên việc đo điện áp trên tất cả các tụ điện của MMC và được trình bày trong tài liệu [11]. Phần tiếp theo sẽ trình bày phương pháp NLM cải tiến bằng việc loại bỏ khâu đo tụ điện và loại bỏ khâu cân bằng điện áp tụ điện.

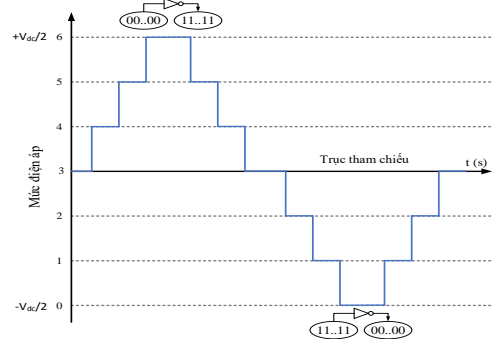
3.2. Cải tiến thuật toán điều chế NLM với khâu sắp xếp bằng thuật toán không đo điện áp tụ



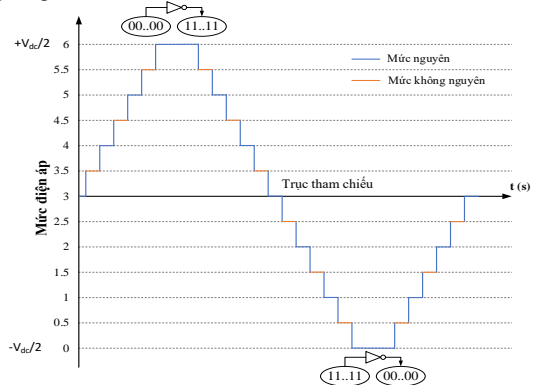
a. Sơ đồ điều khiển điều chế $N+1$ mức



b. Sơ đồ điều khiển điều chế $2N+1$ mức



c. Dạng sóng đầu ra với điều chế $N+1$ mức



d. Dạng sóng đầu ra với điều chế $2N+1$ mức

Hình 5: Sơ đồ điều khiển của phương pháp điều chế NLM chủ động và dạng sóng đầu ra

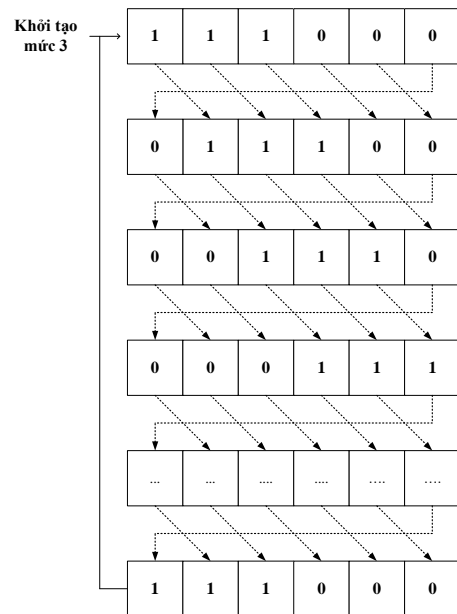
Phương pháp điều chế NLM không đo điện áp tụ được tạo ra bằng cách sử dụng các phép toán logic một cách đơn giản, hiệu quả và được thể hiện như Hình 5. Đây là phương pháp điều chế với tần số đóng cắt thấp, qua đó giảm tổn hao trên các van dẫn. Phương pháp NLM cải tiến có thể thực hiện trong hai trường hợp tạo ra số mức $N+1$ hoặc $2N+1$, hai trường hợp này có cách thực hiện tương tự nhau. Trong đó: Hình 5a là sơ đồ khối thể hiện thuật toán điều chế NLM thường để tạo ra $N+1$ mức và được trình bày trong mục 3.2.1; Hình 5b là sơ đồ khối thể hiện thuật toán điều chế NLM cải tiến để tạo ra $2N+1$ mức và được trình bày trong mục 3.2.2; Hình 5c và hình 5d là dạng sóng đầu ra với điều chế NLM thường và điều chế NLM cải tiến. Quá trình không đo tụ của dạng sóng này được thay thế bằng cách thiết lập các trạng thái bit dạng 0 và 1 và thực hiện bằng cách dịch các bit 0 và 1 để có thể tạo ra mức điện áp là $N+1$ hoặc $2N+1$, cụ thể quá trình dịch bit này được trình bày chi tiết trong mục 3.2.1 và 3.2.2

3.2.1. Điều chế NLM không đo điện áp tụ tạo ra $N+1$ mức

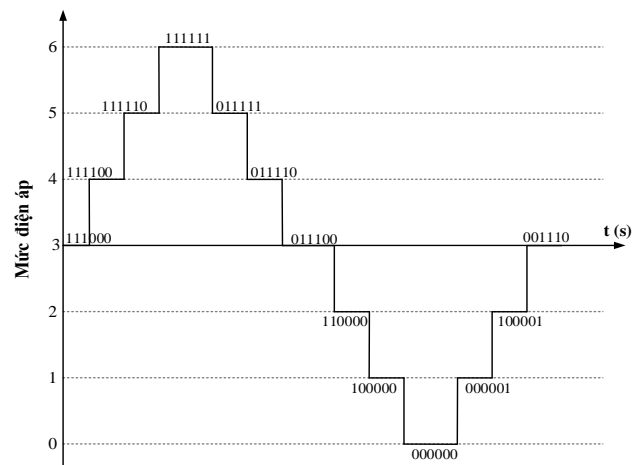
Đối với điều chế NLM tạo ra $N+1$ mức điện áp xoay chiều, các trạng thái logic cấp xung cho SM của nhánh trên và nhánh dưới luôn được bù nhau với mức 0 hoặc 1. Để dễ hiểu, trong bài viết này sẽ thực hiện với số SM trên mỗi nhánh của cả ba pha là $N = 6$. Với $N = 6$, dạng điện áp đầu ra của nhánh dưới được miêu tả như Hình 5c. Dạng điện áp ra của một pha có 7 mức đó là: mức 0, mức 1, mức 2, mức 3, mức 4, mức 5 và mức 6. Số chỉ của các mức chính là số SM được “chèn vào”. Trên đồ thị Hình 5c, mức 3 là mức ở giữa nằm trên trục hoành của đồ thị, các cặp mức có khoảng cách đến trục hoành bằng nhau lần lượt là mức 4 và mức 2, mức 5 và mức 1, mức 6 và mức 0. Tổng số các mô hình đóng cắt có thể có đối với $N = 6$ tại nhánh dưới là $2^N = 2^6 = 64$ tổ hợp. Để đơn giản hóa vấn đề, bài báo sẽ xác lập các mô hình đóng cắt khởi tạo Y_l^7 đối với từng mức như ma trận (6).

$$Y_l^7 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Trong biểu thức số (6): 7 là số hàng tương ứng với số mức, l là số cột tương ứng với số SM. Phương pháp NLM không đo tụ sẽ đảm bảo các SM có thời gian “chèn vào” đều bằng nhau và không phụ thuộc vào giá trị của điện áp tụ điện, việc này được thực hiện bằng cách sử dụng phương pháp dịch bit tại thời điểm bắt đầu mức của lần tiếp theo. Hình 6 thể hiện minh họa cho phương pháp dịch bit đối với mức 3. Như vậy, đối với mô hình đóng cắt khởi tạo được đề xuất như ma trận (6), dạng điện áp đầu ra của nhánh dưới và các mô hình đóng cắt tương ứng sẽ được cho bởi Hình 7.



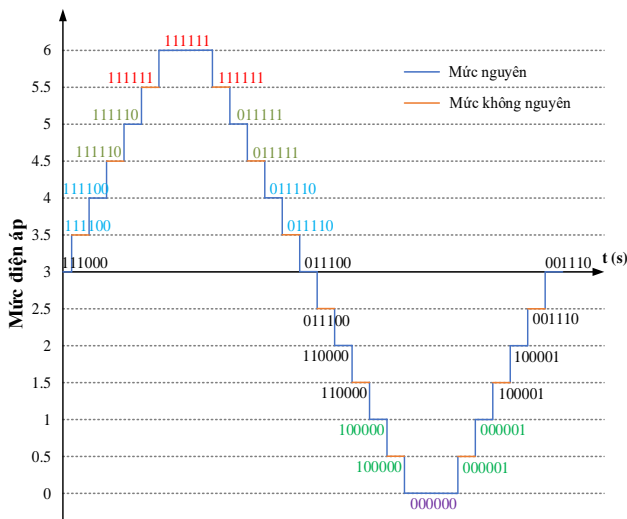
Hình 6: Quy tắc dịch bit chuyển đổi trạng thái mức 3 của phương pháp NLM chủ động



Hình 7: Trạng thái logic lựa chọn các SM với phương pháp điều chế NLM không đo tụ cho trường hợp $N+1$ mức

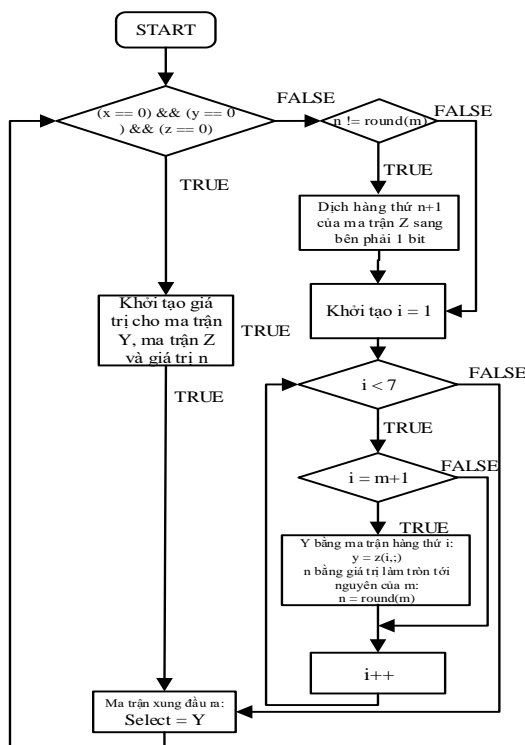
3.2.2. Điều chế NLM không đo điện áp tụ tạo ra $2N+1$ mức

Như đã đề cập trước đó, điều chế NLM không đo điện áp tụ với $2N+1$ mức có cách thực hiện tương tự như điều chế NLM không đo điện áp tụ tạo ra $N+1$ mức. Dạng điện áp ra của phương pháp điều chế $2N+1$ mức được thể hiện bởi Hình 8. Điểm khác biệt ở phương pháp điều chế này là có sự xuất hiện của các mức không nguyên. Tại các mức không nguyên, mô hình đóng cắt để chọn SM của nhánh sẽ trùng với mô hình đóng cắt của mức nguyên liền kề sau đó. Ví dụ, mô hình đóng cắt của mức 3.5 sẽ trùng với mô hình đóng cắt của mức 4, tức là có 4 SM được chèn vào. Điều này sẽ đảm bảo xuất hiện mức không nguyên tại điện áp đầu ra của pha A.



Hình 8: Dạng điện áp đầu ra và mô hình đóng cắt tương ứng của nhánh dưới với $2N+1$ mức

Lưu đồ thuật toán phương pháp NLM không đo điện áp tụ điện cho MMC để tạo ra $2N+1$ mức điện áp được thể hiện như trong Hình 9. Như vậy, bằng cách thực hiện dịch bit theo trạng thái logic đơn giản, ta có thể chọn được tín hiệu để chèn vào hoặc bỏ qua các SM mà không phụ thuộc vào các tín hiệu đo điện áp tụ điện và trạng thái cân bằng của các tụ điện. Điều này, đã khắc phục được các nhược điểm của phương pháp NLM có đo điện áp tụ điện.



Hình 9: Lưu đồ thuật toán phương pháp NLM chủ động cho MMC

4. Kết quả mô phỏng

Trong phần này, sẽ trình bày kết quả mô phỏng của phương pháp NLM không đo điện áp tụ. Áp dụng cho cấu hình bộ biến đổi MMC có công suất 20MW, điện áp 20kVDC với tổng số

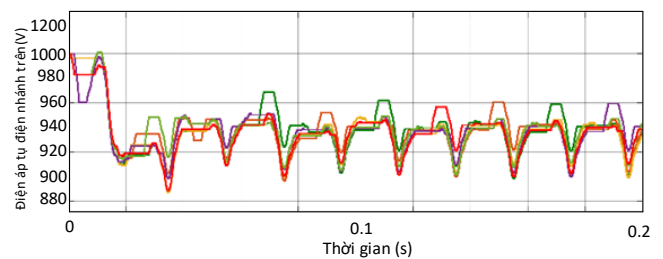
12 SM trên mỗi pha và các thông số kỹ thuật khác được mô tả như Bảng 1. Để kiểm chứng hiệu quả của thuật toán đề xuất, quá trình mô phỏng được thực hiện song hành cùng kịch bản với phương pháp điều chế NLM có đo điện áp tụ điện.

Bảng 1: Thông số các phần tử của BBD MMC dùng cho mô phỏng

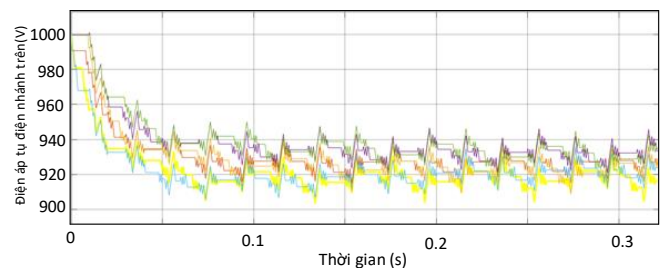
STT	Thông số	Ký hiệu	Giá trị
1	Điện trở tải	R	70 Ω
2	Điện cảm tải	L	5 mH
3	Điện trở nhánh	R_0	0,5 Ω
4	Điện cảm nhánh	L_0	4,2mH
5	Tụ điện trên mỗi SM	C	100 F
6	Điện áp một chiều	V_{DC}	20kV
7	Số SM trên mỗi nhánh	N	6 SM
8	Điện áp trên tụ	V_C	1000 V
9	Tần số điều chế NLM	f_{NLM}	300 Hz

Các kết quả mô phỏng được trình bày tương ứng với nhau cho cả hai phương pháp điều chế và được thể hiện từ Hình 10 đến Hình 19.

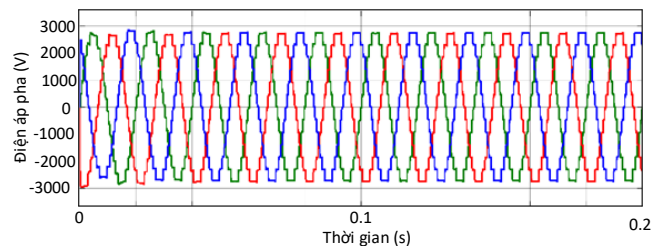
Các Hình 10 và 11 lần lượt là kết quả đo điện áp trên tụ điện của hai phương pháp điều chế NLM có đo điện áp tụ điện và không đo điện áp tụ điện. Kết quả cho thấy phương pháp có đo điện thì điện áp được cân bằng với dao động nằm trong khoảng 900V đến 960V ở trạng thái ổn định. Trong khi đó phương pháp không đo điện thì điện áp được cân bằng với dao động nằm trong khoảng 905V đến 945V ở trạng thái ổn định. Kết quả này cho thấy khoảng dao động điện áp tụ điện của phương pháp không đo điện áp tụ nhỏ hơn. Điều này có thể kết luận rằng, phương pháp điều chế không đo điện áp tụ điện có hiệu quả cân bằng tốt hơn mà không cần dùng thuật toán cân bằng điện áp tụ điện.



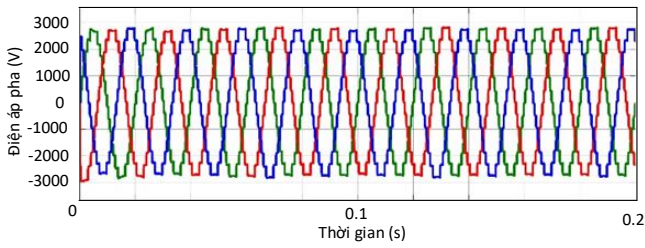
Hình 10: Giá trị điện áp trên tụ với phương pháp NLM có đo tụ



Hình 11: Giá trị điện áp trên tụ với phương pháp NLM không đo tụ

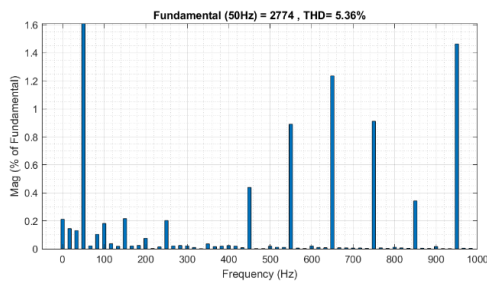


Hình 12: Giá trị điện áp pha A với phương pháp NLM có đo tụ

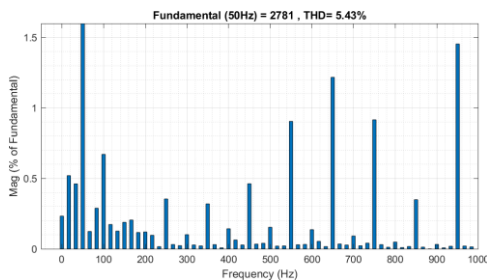


Hình 13: Giá trị điện áp pha A với phương pháp NLM không đo tụ

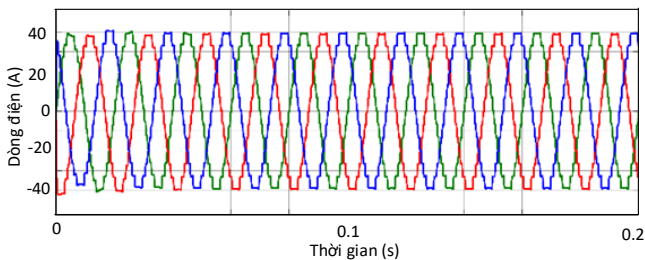
Hình 12 và Hình 13 là kết quả điện áp đầu ra phía xoay chiều của MMC cho hai phương pháp NLM có đo điện áp tụ điện và không đo điện áp tụ điện. Kết quả cho thấy rằng cả hai phương pháp đều tạo ra 13 bậc điện áp phía xoay chiều, đáp ứng nguyên lý tạo ra $2N+1$ mức điện áp của điều chế NLM. Khi thực hiện phân tích giá trị THD của điện áp ta thu được chỉ số THD của hai phương pháp lần lượt là 5,36% và 5,43% tương ứng với kết quả trên các Hình 14 và Hình 15. Ta thấy rằng, hai giá trị THD này là xấp xỉ tương đương nhau, chỉ chênh lệch một khoảng rất nhỏ là 0,07%, giá trị này không đáng kể so với việc phải thực hiện mô hình MMC có các thiết bị cảm biến đo điện áp tụ điện. Điều này là hoàn toàn có thể chấp nhận khi giá trị THD của phương pháp không đo tụ điện cao hơn một chút so với phương pháp có đo tụ điện.



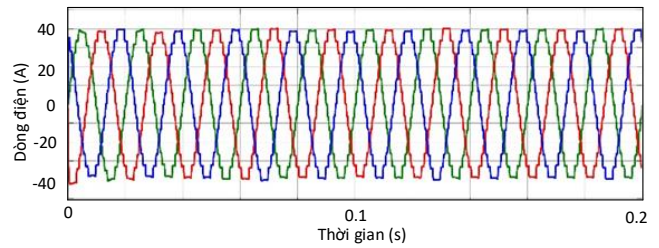
Hình 14: Kết quả phân tích Fourier dạng điện áp pha A với phương pháp điều chế NLM có đo tụ



Hình 15: Kết quả phân tích Fourier dạng điện áp pha A với phương pháp điều chế NLM không đo tụ

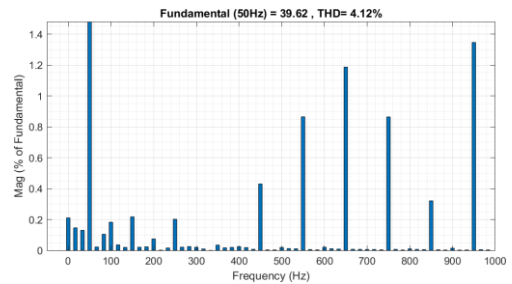


Hình 16: Giá trị dòng điện pha A với phương pháp NLM có đo tụ

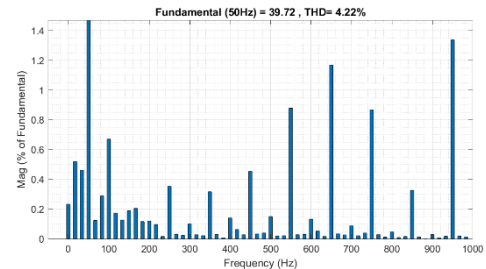


Hình 17: Giá trị dòng điện pha A với phương pháp NLM không đo tụ

Hình 16 và Hình 17 là kết quả dòng điện đầu ra phía xoay chiều của MMC cho hai phương pháp NLM có đo điện áp tụ điện và không đo điện áp tụ điện. Kết quả cho thấy rằng dòng điện bám theo quỹ đạo hình sin khi chưa qua bộ lọc, đáp ứng được yêu cầu đầu ra của thuật toán đề xuất. Khi thực hiện phân tích giá trị THD của dòng điện như Hình 18 và Hình 19, ta thu được chỉ số THD của hai phương pháp lần lượt là 4,12% và 4,223%. Tương tự như giá trị đo THD của điện áp như trên, ta thấy rằng, hai giá trị THD này là xấp xỉ tương đương nhau, chỉ chênh lệch một khoảng rất nhỏ là 0,1%, giá trị này không đáng kể so với việc phải thực hiện mô hình MMC có các thiết bị cảm biến đo điện áp tụ điện.



Hình 18: Kết quả phân tích Fourier dạng dòng điện pha A với phương pháp điều chế NLM có đo tụ



Hình 19: Kết quả phân tích Fourier dạng dòng điện pha A với phương pháp điều chế NLM không đo tụ

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày thuật toán điều chế NLM không đo điện áp tụ được cải tiến từ thuật toán điều chế NLM áp dụng cho bộ biến đổi MMC. Nội dung cụ thể của thuật toán là loại bỏ được hệ thống đo điện áp phức tạp trên các SM của MMC mà vẫn thực hiện được phương pháp điều chế NLM trên MMC cho ra số mức điện áp là $2N+1$. Quá trình này đã giúp cho hệ thống tiết kiệm được một số lượng lớn vật tư về cảm biến đo điện áp tụ điện, giảm hệ thống các dây tín hiệu kết nối, giảm đáng kể tài nguyên sử dụng của vi điều khiển. Khi được áp dụng trên mô hình thực, thì hệ thống sẽ giảm được chi phí và đơn giản hóa được mô hình. Các kết quả thực hiện thuật toán NLM chủ động cho BBĐ MMC với 12 SM trên mỗi pha được so sánh với thuật toán điều chế NLM có đo tụ. Kết quả so sánh

cho thấy sự tương đồng về các thông số đầu ra của MMC và đã khẳng định tính đúng đắn các phân tích lý thuyết được trình bày trong bài báo.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Bách khoa Hà Nội trong đề tài mã số T2023-PC-025

Tài liệu tham khảo

- [1] A. Lesnicar and R. Marquardt (2003) *An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range*. in Proc. IEEE Power Tech. Conf.
- [2] Ricardo Lizana, Apparao Dekka, Bin Wu, Marcelo Perez (2015) *Control of HVDC transmission system based on MMC with three-level flying capacitor submodule*. 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT).
- [3] Simone Barcellona, Marzio Barresi, Luigi Piegari (2022) *MMC-Based PV Three-Phase System With Distributed MPPT*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume: 37, Issue: 3, September 2022..
- [4] Jonathan Hunder Dutra Gherard Pinto, William Caires Silva Amorim, Allan Fagner Cupertino (2021) *Optimum Design of MMC-Based ES-STATCOM Systems: The Role of the Submodule Reference Voltage*. IEEE Transactions on Industry Applications, Volume: 57, Pages. 3064 – 3076.
- [5] Guanlong Jia; Mingshuo Li, Xiaotong Su, Song Tang, Xiaoming Liu (2021) *Circulating Current Injection Method for the Modular Multilevel Converter*. 2021 IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium (PEAS).
- [6] H. Barnklau, A. Gensior, and J. Rudolph (2015). *A model-based control scheme for modular multilevel converters*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 12, pp. 5359–5375.
- [7] Saddaqt Ali, Jahangeer Badar Soomro, Mahnoor Mughal, Faheem Akhter Chachar (2020) *Power Quality Improvement in HVDC MMC With Modified Nearest Level Control in Real-Time HIL Based Setup*. IEEE Access, Vol: 8, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3043811.
- [8] T. Heath (2021) *Cascaded- and modular-multilevel converter laboratory test system options: A review*. IEEE Access, vol. 9, pp. 44718-44737.
- [9] Zhihong Bai; Haoqi Chen; Hao Ma, “*Implementation of Space Vector Modulation (SVM) for Modular Multilevel Converter Based on Submodule Regroup*”, 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), Date of Conference: 04-07 November 2018.
- [10] S. P. Biswas, M. S. Anower, M. R. I. Sheikh, M. R. Islam, M. A. Rahman, M. A. P. Mahmud (2021) *A modified reference saturated third harmonic injected equal loading PWM for VSC-based renewable energy systems*. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 31, no. 8, pp. 1-5.
- [11] Yang Xing, Hui Wang, Tao Zhang, Shanshan Wang, Bing Zhao, Tiezhu Wang, “*An Improved NLM Strategy for MMC Emergency Power Control*”, 2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), Date of Conference: 13-15 July 2020.