

ĐIỀU KHIỂN BỘ BIẾN ĐỔI ĐA MỨC CÓ CẤU TRÚC MMC NỐI LƯỚI DỰA TRÊN PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO DÒNG ĐIỆN CONTROL FOR MODULAR MULTILEVEL CONVERTER (MMC) WITH CONNECTION GRID BASED ON MODEL PREDICTIVE CURRENT CONTROL METHODS

Trần Hùng Cường^{1,2}, Trần Trọng Minh¹, Phạm Việt Phương¹, Phạm Đỗ Tường Linh²

¹Trường Đại học Bách khoa Hà Nội; tranhungcuong@hdu.edu.vn

²Trường Đại học Hồng Đức; phamdotlinh@hdu.edu.vn

Tóm tắt - Modular Multilevel Converter (MMC) là bộ biến đổi đa mức được xây dựng bằng cách mắc nối tiếp các Submodule (SM). Do có tính modun hóa cao nên bộ biến đổi được ứng dụng cho hệ thống công suất lớn, điện áp cao. So với các bộ biến đổi đa mức khác, sự khác biệt giữa điện áp nhánh trên và nhánh dưới của MMC trong mỗi pha sẽ được sử dụng để dự đoán dòng điện xoay chiều. Bài báo này đề xuất phương pháp điều khiển dự báo dòng điện dựa trên phương pháp điều khiển dự báo hữu hạn các trạng thái đóng cắt (FCS-MPC), đồng thời điều khiển công suất để kết nối MMC với lưới sử dụng bộ điều khiển tuyến tính PI. Phương pháp điều khiển sử dụng mô hình của MMC để dự đoán giá trị tương lai của dòng điện mỗi pha. Hiệu quả của phương pháp điều khiển được đánh giá bằng cách mô phỏng trên Matlab/Simulink để chứng minh các ưu điểm của thuật toán.

Từ khóa - Bộ biến đổi MMC; Điều khiển dự báo MPC; điều khiển công suất; bộ điều khiển PI; Sub-module.

1. Đặt vấn đề

Bộ biến đổi (BBĐ) MMC là cấu trúc có nhiều ưu điểm phù hợp cho các ứng dụng cao áp. So với một số BBĐ đa mức khác như: Cầu H nối tầng, Điốt kẹp, Tự điện thay đổi thì MMC vẫn giữ được các ưu điểm của BBĐ đa mức và có nhiều tính năng nổi bật khác như: tính module hóa, tạo ra sóng điện áp gần sin lý tưởng... [1]. Do có tính module hóa nên MMC có thể mở rộng tới hàng trăm mức điện áp để đáp ứng với cấp điện áp rất cao [2], được thực hiện bằng cách chia nhỏ mức điện áp cho các SM giống nhau [3]. Hiện nay, MMC đã được nghiên cứu áp dụng cho các hệ thống như: truyền tải điện cao áp một chiều (HVDC) [4], kết nối nguồn năng lượng tái tạo [5], [8] ... MMC đã có sản phẩm ứng dụng điển hình là hệ thống HVDC 200kV-400MVA, đây là dự án cấp tuyến vịnh của hãng Siemens tại TP San Francisco của Hoa Kỳ [3]. Nhược điểm của MMC là khi số lượng các SM tăng lên, việc điều khiển sẽ trở nên phức tạp. Một số phương pháp điều chế đã được áp dụng thành công cho MMC như: PWM, SVM [6]. Tuy nhiên các phương pháp này vẫn tồn tại một số nhược điểm như: Thời gian đáp ứng chậm, tần số chuyển mạch van lớn, rất khó thực hiện khi số SM tăng lên. Để cải thiện các vấn đề trên, bài báo này trình bày phương pháp điều khiển FCS-MPC nhằm mục đích giảm quá trình tính toán phức tạp cho MMC và đạt mục tiêu điều khiển dòng điện có dạng sin lý tưởng phía xoay chiều. Ngoài ra, bài báo cũng đề xuất phương pháp điều khiển sử dụng bộ điều khiển PI, để điều chỉnh công suất tác dụng và công suất phản kháng đáp ứng nhu cầu trao đổi công suất của BBĐ khi kết nối với lưới điện. Bộ điều khiển PI được chọn để điều khiển công suất ở mạch vòng ngoài là do quá trình thiết kế đơn giản, có thể đáp ứng nhanh với thời gian

Abstract - The Modular Multilevel Converter (MMC) is a electronic converter whose topology is built up by using cascaded connection of sub-modules. Due to its explicit features such as high modularity, low switching frequency, the MMC is recommended for high voltage, high power applications. Different from other converter topologies, the voltage difference between low and high side of each phase of the MMC can be determined, and in combination with converter's parameters, the output phase current can be predicted for control purpose. In this paper, we propose an approach to minimize the tracking error between the measured and predicted current based on Finite Control Set - Model Predictive Control (FCS-MPC), simultaneously, to control output power to connect the MMC to the grid. The control method utilizes the MMC's model to predict the future values of the phase current and finds the optimized working condition of the converter. The control performance is evaluated by simulation on Matlab/Simulink which shows the advantages of the algorithm.

Key words - Modular Multilevel Converter; Model Predictive Control; control power; PI Controller; Sub-module.

nhỏ. Bộ điều khiển MPC được phát triển trong ngành công nghiệp vào năm 1970 [7]. Tuy nhiên, MPC chỉ mới được áp dụng trong điện tử công suất vào năm 2003 [4]. Đến nay, với các thiết bị vi xử lý hiện đại, MPC đã có những ứng dụng mạnh mẽ và đạt được nhiều thành tựu trong điện tử công suất. Ưu điểm chính của MPC là thiết kế đơn giản, dễ dàng xử lý các sai lệch tín hiệu điều khiển thông qua hàm mục tiêu. Nguyên tắc làm việc của MPC là điều khiển tín hiệu thực bám theo tín hiệu đặt ở các chu kỳ làm việc tiếp theo để duy trì mức sai lệch nhỏ và giảm tổn thất bằng cách giảm tần số chuyển mạch van bán dẫn. Ý tưởng chính của FCS-MPC là sử dụng số lượng hữu hạn các trạng thái chuyển đổi của MMC để tính toán một hàm mục tiêu được xác định trước [5], [6]. Trạng thái chuyển đổi dẫn đến giá trị tối thiểu cho hàm mục tiêu sẽ được chọn làm trạng thái chuyển đổi tốt nhất của MMC trong chu kỳ chuyển đổi tiếp theo. Với cách tiếp cận này, số lượng phép tính giảm đáng kể, tránh những trạng thái chuyển đổi không cần thiết và thời gian xử lý tín hiệu sẽ nhỏ. Nhược điểm chính của MPC là khi số lượng SM tăng lên, các trạng thái chuyển đổi tăng lên theo cấp số nhân sẽ gây nên áp lực tính toán và kéo dài thời gian xử lý tín hiệu.

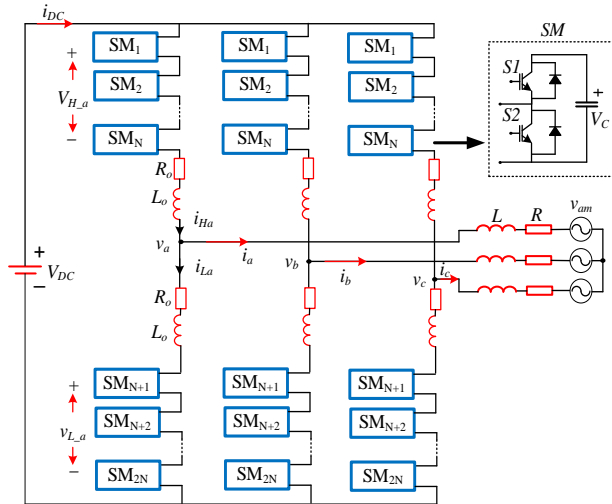
2. Cấu trúc và mô hình toán học bộ biến đổi MMC

2.1. Cấu trúc bộ biến đổi MMC

Hình 1 là sơ đồ cấu trúc ba pha của MMC. Mỗi pha gồm 2N các SM. Các SM ở nhánh trên được ký hiệu từ SM_{j1} đến SM_{jN} ($j = a, b, c$), các SM ở nhánh dưới được ký hiệu từ SM_{jN+1} đến SM_{j2N} .

Phía một chiều BBĐ MMC được cấp bởi một nguồn duy nhất là V_{DC} , dòng điện tương ứng là I_{DC} . Trong mỗi pha của MMC tồn tại các dòng điện nhánh trên và nhánh dưới

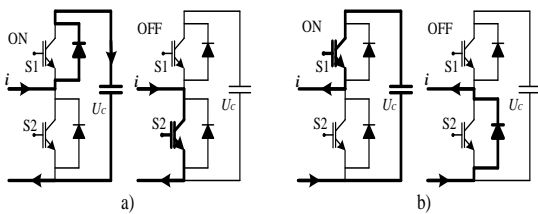
được ký hiệu là i_{Hj} và i_{Lj} , V_{Hj} và V_{Lj} là tổng điện áp trên tụ điện nhánh trên và nhánh dưới mỗi pha của MMC. V_j , i_j , i_v là điện áp, dòng điện xoay chiều, dòng điện vòng của MMC, dòng điện xoay chiều được lấy ra ở điểm giữa của cuộn cảm L_o của mỗi nhánh. Cuộn cảm này có tác dụng hạn chế các quá độ làm việc của bộ biến đổi [9]. Các tổn hao trong mỗi nhánh của BBD được mô tả bởi điện trở R_o .



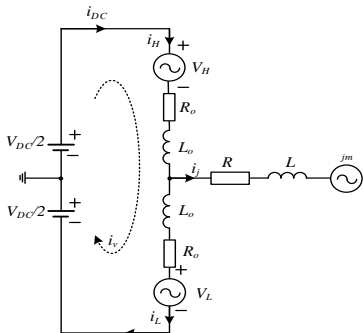
Hình 1. Sơ đồ cấu trúc của bộ biến đổi MMC

2.2. Nguyên lý hoạt động của MMC

Bộ biến đổi MMC hoạt động dựa trên nguyên tắc cộng dồn điện áp V_{SM} của các SM để tạo ra điện áp xoay chiều ở từng pha. Đối với từng SM, điện áp đầu ra sẽ gắn liền với một trong hai trạng thái ngược nhau được định nghĩa là “chèn vào” hoặc “bỏ qua” dựa trên trạng thái đóng cắt của các cặp van có kể đến chiều của dòng điện chạy trong mạch như các Hình 2. Đối với BBD MMC, điện áp V_{DC} được phân phối trên các tụ của từng SM trong tất cả các nhánh van mỗi pha. Nếu tổng điện áp của các SM được chèn vào trên mỗi nhánh là khác nhau, dòng điện sẽ được sinh ra từ sự mất cân bằng điện áp trên các tụ [4].



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. Mạch điện tương đương một pha của MMC

Các SM của MMC được cấu tạo bởi hai van bán dẫn IGBT mắc song song với một tụ điện C như Hình 1, mỗi SM có hai trạng thái chuyển mạch là {0;1}, trong đó 1 ứng với trạng thái tụ điện được chèn vào, tương ứng với SM được ON và ngược lại. Hình 2 mô tả các trạng thái ON và OFF của SM, trong trường hợp chiều dòng điện là dương như ở Hình 2a và trường hợp dòng điện là âm như ở Hình 2b [5]. Mạch điện tương đương một pha của MMC như Hình 3.

MMC hoạt động tốt khi điện áp các tụ điện phải được điều khiển bám so với giá trị đặt. Do đó, mục tiêu điều khiển là giữ điện áp trung bình của các tụ bám giá trị đặt và điện áp các tụ phải được cân bằng. Trong mô hình tất cả các điện áp tụ điện được coi như một nguồn điện tương đương như Hình 3, khi hoạt động bình thường tất cả các tụ điện được tích điện đến giá trị định mức V_{DC}/N . Để đạt được giá trị này MMC đề xuất bật lần lượt các SM của một nhánh và tắt số SM tương ứng ở nhánh còn lại. Tổng số SM được bật của mỗi nhánh là N. Việc bật tắt của mỗi SM được thực hiện bằng các xung điều khiển do bộ điều khiển tạo ra. Mỗi lần bật hoặc tắt của SM số mức của MMC sẽ tăng hoặc giảm một mức điện áp có giá trị bằng V_{DC}/N . Quá trình này sẽ tạo ra điện áp phía xoay chiều luôn dao động trong các mức $-V_{DC}/2$ đến $+V_{DC}/2$ với mỗi bước điện áp là V_{DC}/N . Từ hình1, mô hình toán học ba pha mô tả dòng điện nhánh của MMC như công thức (1).

$$i_{Hj} = \frac{1}{3}i_{DC} + i_{vj} + \frac{1}{2}i_j \quad (j = a, b, c) \tag{1}$$

$$i_{Lj} = \frac{1}{3}i_{DC} + i_{vj} - \frac{1}{2}i_j$$

Các phương trình điện áp của nhánh trên và nhánh dưới của các pha được mô tả bởi (2).

$$\frac{V_{DC}}{2} = v_{Hj} + L \frac{di_{Hj}}{dt} + R i_{Hj} + L_o \frac{di_j}{dt} + R_o i_j + v_{jm} \tag{2}$$

$$\frac{V_{DC}}{2} = v_{Lj} + L \frac{di_{Lj}}{dt} + R i_{Lj} - L_o \frac{di_j}{dt} - R_o i_j - v_{jm}$$

v_{cm} là điện áp xoay chiều nối lưới. Điện áp ra của mỗi SM được xác định bởi phương trình (3).

$$v_x = S.v_C \quad x=1 \rightarrow 2N \tag{3}$$

Ở đây S nhận trạng thái 0 hoặc 1. Từ (3), điện áp mỗi nhánh của MMC được cho bởi phương trình (4).

$$v_{jy} = \left(\frac{V_{jy}}{N} \right) \sum_{x=1}^N v_{Cx} \quad (y = H; L) \tag{4}$$

Mô hình toán học của dòng điện trong miền thời gian liên tục thu được bằng cách giải phương trình (1), (2) và được thể hiện bởi (5).

$$\frac{di_j}{dt} = \frac{1}{L + 2L_o} [v_{Lj} - v_{Hj} - 2v_{jm} - R + 2R_o i_j] \tag{5}$$

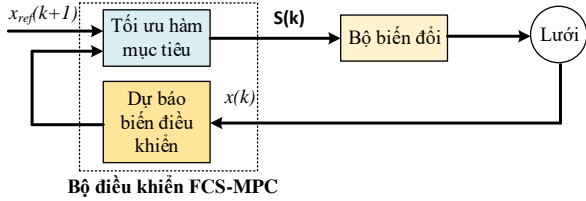
Ở đây: $v_{jm} = \frac{1}{6} \sum_{j=a,b,c} v_{Hj} - v_{Lj}$

Phương trình (5) sẽ được sử dụng để dự báo điều khiển dòng điện xoay chiều nối lưới của MMC.

3. Điều khiển dự báo dòng điện xoay chiều cho bộ biến đổi MMC

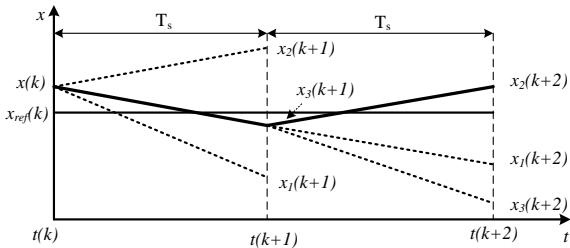
3.1. Giới thiệu về phương pháp điều khiển dự báo

Nguyên tắc làm việc của MPC là dựa trên việc dự đoán hoạt động của mô hình ở các chu kỳ làm việc tiếp theo, tính toán trạng thái làm việc tối ưu thông qua hàm mục tiêu phụ thuộc vào đặc điểm của từng hệ thống [10]. Mô hình điều khiển dự báo khi áp dụng trong hệ thống các bộ biến đổi được thể hiện như Hình 4.



Hình 4. Biểu đồ khóa điều khiển của MMC [6]

Trong đó $x(k)$ là biến cần điều khiển. Dựa trên mô hình rời rạc của hệ thống, các giá trị hiện tại của các biến điều khiển $x(k)$ được sử dụng để dự đoán các giá trị trong tương lai $x(k+1)$ cho tất cả các trạng thái chuyển đổi. Tất cả các giá trị dự đoán $x(k+1)$ được so sánh với giá trị đặt $x_{ref}(k+1)$ bằng một hàm mục tiêu, trạng thái chuyển mạch S tối ưu sẽ được chọn để áp dụng cho bộ chuyển đổi và làm trạng thái để dự toán tiếp cho các chu kỳ sau.



Hình 5. Nguyên lý hoạt động dự báo tín hiệu của MPC [7]

Phương pháp dự báo tín hiệu của MPC được thể hiện như Hình 5. Trong đó $t(k)$ là chu kỳ trích mẫu đầu tiên, $t(k+1)$ và $t(k+2)$ là các chu kỳ dự đoán các trạng thái làm việc tiếp theo của tín hiệu điều khiển. Giả sử MPC được áp dụng cho hệ thống với ba trạng thái chuyển đổi là x_1 , x_2 và x_3 với giá trị đặt là không đổi. Trong mỗi chu kỳ dự báo hàm mục tiêu sẽ xác định giá trị sai lệch giữa các trạng thái của biến điều khiển so với giá trị đặt, và giá trị sai lệch bé nhất so với giá trị đặt sẽ được chọn làm tín hiệu điều khiển cho hệ thống, ở Hình 5 tại thời điểm $t(k+1)$ tín hiệu $x_3(k+1)$ được chọn làm tín hiệu điều khiển, ở thời điểm $t(k+2)$ tín hiệu $x_2(k+2)$ được chọn làm tín hiệu điều khiển. Các chu kỳ tiếp theo quá trình được lặp đi lặp lại nhiều lần dựa trên thuật toán lập trình đã được định sẵn.

3.2. Chiến lược FCS-MPC cho bộ biến đổi MMC

Phương pháp FCS-MPC cho MMC để điều khiển dòng điện xoay chiều trên tải được thực hiện qua bốn bước sau: i) Đo dòng điện xoay chiều; ii) Tạo ra các giá trị đặt của dòng điện là $i_{jref}(k)$ với biên độ và tần số như biến điều khiển mong muốn; iii) Từ mô hình toán học liên tục, thực hiện ngoại suy các biến điều khiển dòng điện theo phương pháp gián đoạn hóa Euler để được các giá trị dự báo điều khiển trong chu kỳ lấy mẫu tiếp theo; iv) Thực hiện tối ưu

hóa biến điều khiển bằng hàm mục tiêu.

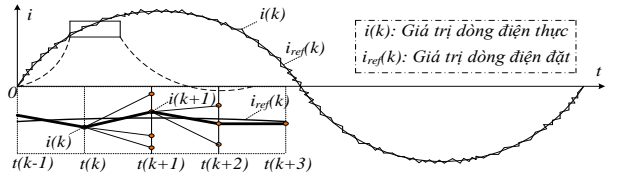
3.2.1. Xác định số trạng thái chuyển mạch của MMC

Trong bộ biến đổi MMC một pha có $(N + 1)$ mức điện áp, tổng số trạng thái chuyển đổi thể hiện bởi (7) [7]:

$$M = C_{2N}^N = \frac{2N!}{N! 2N - N!} \quad (7)$$

Trong MMC ba pha, số trạng thái chuyển đổi là M^3 trạng thái. Ví dụ: bộ biến đổi ba pha MMC với 7 mức điện áp có $M = 3432$ (có $N = 7$ SM trên mỗi nhánh), số trạng thái chuyển mạch trên ba pha của MMC là 3432^3 trạng thái chuyển đổi. Vì hàm mục tiêu sẽ tính tất cả các trạng thái chuyển đổi trong cùng một chu kỳ điều khiển nên số trạng thái chuyển đổi sẽ quyết định tốc độ xử lý tín hiệu của bộ điều khiển. Khi số mức của bộ biến đổi tăng lên, số trạng thái chuyển đổi sẽ tăng lên theo cấp số nhân, do đó áp lực tính toán của bộ điều khiển trong cùng một thời gian trích mẫu là rất lớn. Vì vậy phương pháp FCS-MPC sẽ tối ưu các trạng thái tính toán và chỉ chọn những trạng thái phù hợp trước khi đưa vào xử lý tín hiệu.

3.2.2. Điều khiển tín hiệu dòng điện xoay chiều



Hình 6. Thuật toán điều khiển dự báo dòng điện

Mục đích của dự báo tín hiệu dòng điện là điều khiển sao cho dòng điện ra bám sát dòng điện đặt. Theo Euler mô hình gián đoạn của dòng điện xoay chiều phía đầu ra được mô tả bởi (8).

$$i_j(k+1) = A i_j(k) + B [v_{jH}(k+1) - v_{jH}(k) - 2v_{Cm}(k+1) C] \quad (8)$$

$$\text{Trong đó: } v_{jm}(k+1) = \frac{1}{6} \sum_{j=a,b,c} v_{Lj}(k+1) - v_{Hj}(k+1)$$

$$A = 1 - \frac{R + 2R_o T_s}{L + 2L_o}; \quad B = \frac{T_s}{L + 2L_o}; \quad C = [1 \ 1 \ 1]^T$$

$$i_j(k) = \begin{bmatrix} i_a(k) \\ i_b(k) \\ i_c(k) \end{bmatrix}; \quad v_{jL}(k) = \begin{bmatrix} v_{La}(k) \\ v_{Lb}(k) \\ v_{Lc}(k) \end{bmatrix}; \quad v_{jH}(k) = \begin{bmatrix} v_{Ha}(k) \\ v_{Hb}(k) \\ v_{Hc}(k) \end{bmatrix}$$

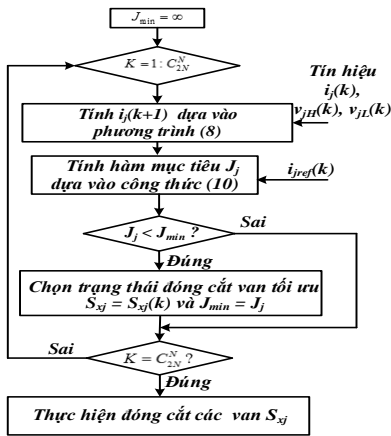
Từ phương trình (8) ta xác định được hàm mục tiêu tối ưu hóa giá trị dòng điện như (9):

$$J_j = |i_{jref}(k+1) - i_j(k+1)| \quad (9)$$

Trong đó, $i_{jref}(k+1)$, $i_j(k+1)$ là dòng điện đặt và dòng điện dự báo các pha được tính từ công thức (8). Trong một khoảng thời gian trích mẫu đủ nhỏ thì $i_{jref}(k+1) \approx i_{jref}(k)$, khi đó (9) viết lại như công thức (10).

$$J_j = |i_{jref}(k) - i_j(k+1)| \quad (10)$$

Hàm mục tiêu (10) sẽ tính giá trị sai lệch nhỏ nhất của dòng điện xoay chiều so với giá trị đặt. Giá trị tối ưu được sử dụng làm tín hiệu ra trên tải xoay chiều và làm giá trị để dự báo cho chu kỳ lấy mẫu tiếp theo. Hình 7 là lưu đồ thuật toán điều khiển các biến của MMC theo FCS-MPC.



Hình 7. Lưu đồ thuật toán áp dụng MPC cho MMC

4. Thiết kế bộ điều khiển công suất cho bộ biến đổi MMC nối lưới điện

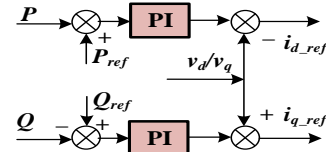
Điều khiển đảm bảo công suất đề cung cấp cho phụ tải là công việc quan trọng của MMC, mục đích là đảm bảo nguồn công suất cần thiết, ổn định cung cấp cho tải. Phần này trình bày chiến lược điều khiển công suất khi MMC được kết nối với lưới điện xoay chiều ba pha. Quá trình điều khiển công suất tác dụng và công suất phản kháng được thực hiện bởi mạch vòng ngoài bằng bộ điều khiển tuyến tính PI. Bộ điều khiển PI sẽ điều khiển dòng công suất và giảm được độ đập mạch của trào lưu công suất cho lưới điện mà vẫn đảm bảo dòng điện có dạng hình sin mong muốn. Theo tài liệu [3], trong hệ tọa độ dq công suất của bộ biến đổi được tính theo phương trình (11).

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) \\ Q = -\frac{3}{2}(v_d i_q - v_q i_d) \end{cases} \quad (11)$$

Từ phương trình (11) dòng điện i_d, i_q tính như (12).

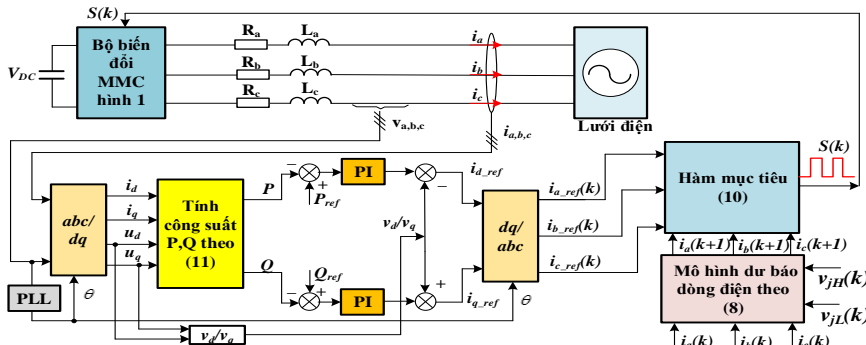
$$\begin{cases} i_d = \frac{2}{3v_d} P - \frac{v_q}{v_d} i_q \\ i_q = -\frac{2}{3v_d} Q + \frac{v_d}{v_d} i_d \end{cases} \quad (12)$$

Trong thiết kế, thành phần v_d/v_q được coi là nhiễu và được bỏ qua, thành phần này sẽ được bù sau khi thiết kế xong bộ điều khiển. Dựa vào phương trình (12), sơ đồ mạch vòng điều khiển công suất được thể hiện ở Hình 8.



Hình 8. Cấu trúc mạch vòng điều khiển công suất

Để điều khiển công suất, các tín hiệu dòng điện, điện áp được đo và được chuyển sang hệ tọa độ Odq . Từ dòng điện i_d và i_q sẽ tính được công suất thực của hệ thống. Công suất tính toán sẽ được so sánh với giá trị công suất đặt mong muốn, thành phần sai lệch sẽ được triệu tiêu bằng bộ điều khiển PI, sau đó các thành phần nhiễu sẽ được bù và tạo ra các giá trị dòng điện cần thiết cho bước điều khiển tiếp theo. Cấu trúc hệ thống điều khiển điều khiển công suất của MMC dựa trên phương pháp đề xuất được thể hiện như Hình 9.



Hình 9. Cấu trúc hệ thống điều khiển cho MMC

5. Mô phỏng và đánh giá kết quả

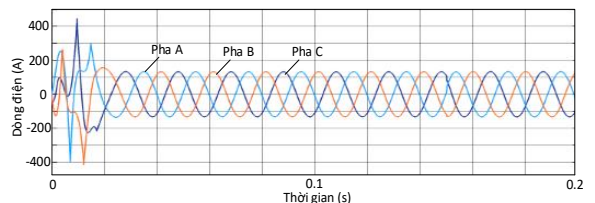
Kết quả mô phỏng bằng phần mềm MATLAB/SIMULINK cho BBĐ MMC ở Hình 1 áp dụng thuật toán điều khiển đề xuất. Các thông số mô phỏng được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số mô phỏng hệ thống.

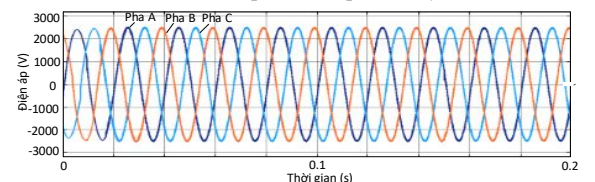
Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị
V_{DC}	6000V	Điện áp trên tải	6000V
Điện cảm nhánh L_o	10 mH	Tần số lưới	50Hz
Điện trở nhánh R_o	6 Ω	P_{ref}	500 kW
Chu kỳ trích mẫu T_s	200 μs	Q_{ref}	500 kVar

Kết quả mô phỏng dòng điện, điện áp ba pha phía nối lưới xoay chiều trên Hình 10 và Hình 11 cho thấy dòng điện, điện áp có dạng sin chuẩn ở thời gian 0,02s. Kết quả cho thấy bộ điều khiển cho đáp ứng nhanh và chất lượng.

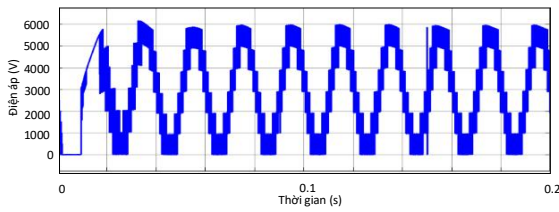
Điện áp nhánh trên pha A ở Hình 12 cho thấy điện áp ra có dạng 7 mức, mỗi mức điện áp có giá trị 1000V.



Hình 10. Dòng điện ba pha a,b,c phía xoay chiều nối lưới

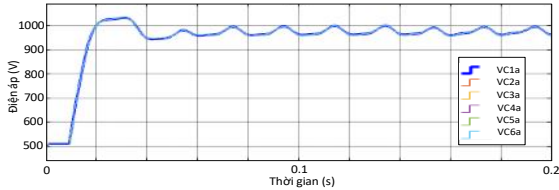


Hình 11. Điện áp ba pha a, b, c phía xoay chiều nối lưới

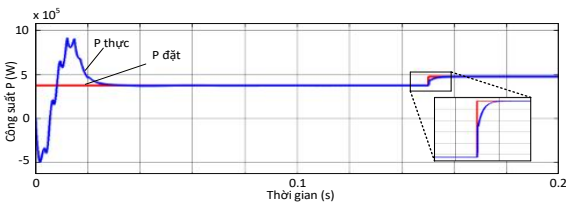


Hình 12. Điện áp nhánh trên pha a

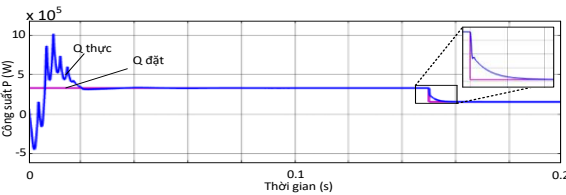
Hình 13 cho thấy, điện áp tụ của bộ biến đổi được nạp tới 1000V trong khoảng 0.02s, khi MMC hoạt động, điện áp tụ điện luôn được giữ cân bằng với biên độ dao động cực đại là 27V, tức là 2,7% giá trị định mức.



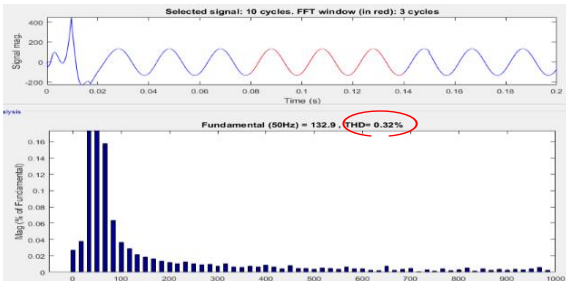
Hình 13. Điện áp trên các tụ điện nhánh trên pha a



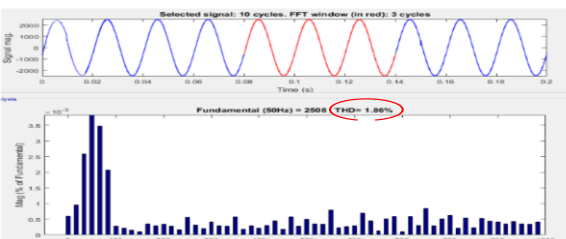
Hình 14. Công suất phản kháng cung cấp cho lưới điện



Hình 15. Công suất phản kháng cung cấp cho lưới điện



Hình 16. Kết quả phân tích Fourier dòng điện AC nối lưới



Hình 17. Kết quả phân tích Fourier điện áp AC nối lưới

Hình 14 và Hình 15 là đáp ứng của công suất tác dụng và công suất phản kháng. Kết quả cho thấy, công suất tác dụng và công suất phản kháng bám giá trị đặt sau 0,023s. Khi thay đổi giá trị đặt công suất ở thời điểm 1,5s, công suất thay đổi ngay tức khắc để bám theo giá trị đặt sau 0,005s. Kết quả phân tích tổng độ méo sóng hài trên Hình 16 và Hình 17 cho dòng điện và điện áp phía xoay chiều cho thấy, chỉ số THD của dòng điện và điện áp lần lượt là 0,32% và 1,86%, các sóng hài bậc cao với biên độ lớn xuất hiện ít, điều này chứng minh nhưng ưu điểm khi áp dụng phương pháp điều khiển FCS-MPC và PI cho MMC. Kết quả phân tích cho thấy, mục tiêu điều khiển đã đạt được kết quả mong muốn là THD ở mức thấp, giá trị dòng điện và điện áp đạt được hình sin sau một thời gian ngắn, giá trị công suất cung cấp cho tải luôn có giá trị ổn định với độ đập mạch nhỏ.

6. Kết luận

Bài báo đã thực hiện việc điều khiển công suất và dòng điện cho bộ biến đổi MMC kết nối lưới điện. Công suất trao đổi với lưới được điều khiển bởi bộ điều khiển tuyến tính PI. Dòng điện đầu ra phía xoay chiều được điều khiển bằng phương pháp điều khiển dự báo. Phân tích các kết quả thu được khi cấu hình bộ biến đổi có 6 SM trên mỗi nhánh cho thấy dòng điện, điện áp xoay chiều nối lưới có dạng sin chuẩn với chỉ số THD là 0,32% và 1,86%. Công suất tác dụng và công suất phản kháng bám giá trị đặt với độ đập mạch nhỏ khi thay đổi chế độ làm việc. Các kết quả đã chứng minh hiệu quả của thuật toán điều khiển đã đề xuất và cho thấy bộ biến đổi MMC khi được nối lưới luôn hoạt động ổn định.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K. Ilves, A. Antonopoulos, S. Norrga, and H. Nee, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 1, pp. 57–68, Jan. 2014.
- [2] J. Qin and M. Saefidifard. Predictive control of a modular multilevel converter for a back-to-back HVDC system. *IEEE Trans. Power Deliv.* 27(3):1538–1547, Jul. 2012.
- [3] Wei LI, Luc-Andre GREGOIRE. *Control and Performance of a Modular Multilevel Converter System*. CIGRÉ Canada Conference on Power Systems Halifax, September 6- 8, 2011.
- [4] Kurt Friedrich. *Modern HVDC PLUS application of VSC in Modular Multilevel Converter Topology*. Addison-Wesley, Reading, MA, 2nd ed, 2012.
- [5] T. Geyer, G. Papafotiou, and M. Morari. Model predictive direct torque control - part I: Concept, algorithm and analysis. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 56(6):1894–1905, Jun. 2009.
- [6] Mr. Balasaheb J. Pawar; Dr. Vitthal J. Gond; “Modular multilevel converters: A review on topologies, modulation, modeling and control schemes”, *International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology ICECA* 2017.
- [7] Q. Song, W. Liu, X. Li, H. Rao, S. Xu, and L. Li, “A steady-state analysis method for a modular multilevel converter”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 8, pp. 3702–3713, Aug. 2013.
- [8] J. Mei, B. Xiao, K. Shen, L. Tolbert, and J. Y. Zheng, “Modular multilevel inverter with new modulation method and its application to photovoltaic grid-connected generator”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 11, pp. 5063–5073, Nov. 2013.