

CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN VỀ CÁC BỘ BIẾN ĐỔI CÔNG SUẤT ĐA PHA, ĐA BẬC

1.1 Tổng quan về bộ biến đổi công suất

Hiện nay, sự xuất hiện của bộ biến đổi đa bậc kiểu mô-đun là một trong những bộ biến đổi đa bậc thế hệ tiếp theo dành cho thị trường công suất trung bình và cao.

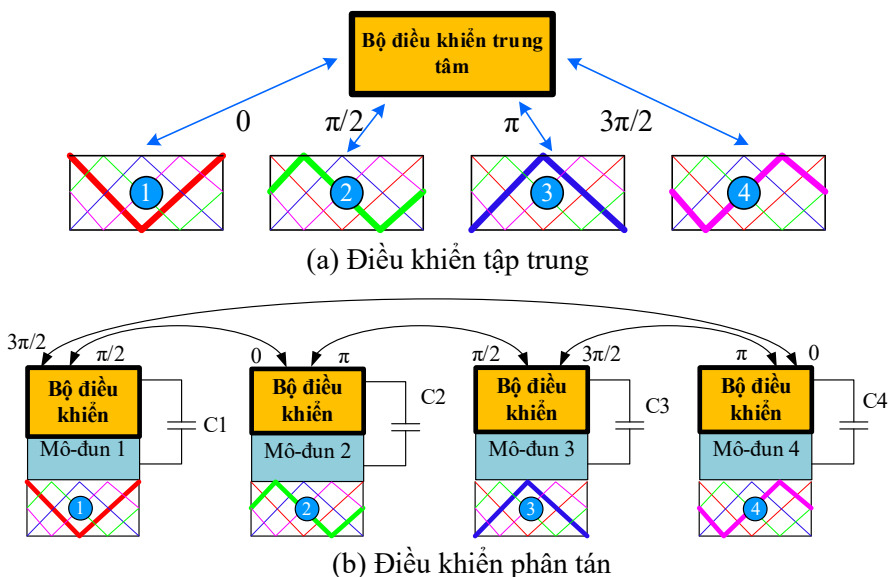
1.2 Tổng quan về bộ biến đổi công suất đa pha, đa bậc

Các bộ biến đổi công suất đa pha, đa bậc hiện nay đang được thiết kế điều khiển bởi một bộ xử lý trung tâm. Nhiệm vụ chính của bộ điều khiển trung tâm có thể là xuất tín hiệu điều khiển đến các IGBT, đến các mô-đun, điều khiển và cân bằng điện áp trên các tụ điện, điều khiển và cân bằng điện áp giữa các mô-đun, điều khiển và cân bằng dòng điện giữa các pha, điều khiển và cân bằng dòng điện của các nhánh. Chính vì vậy, các bộ điều khiển trung tâm có số lượng ngõ vào và ngõ ra rất lớn, có khả năng xử lý ở tốc độ cao, và thường có chi phí khá cao. Đây sẽ là một nhược điểm rất lớn nếu số lượng mô-đun trong hệ thống tăng lên, đòi hỏi các nhà nghiên cứu phải đánh giá tổng thể, tìm kiếm các giải pháp nhằm có thể đảm bảo hệ thống hoạt động và vận hành tin cậy, đáp ứng tốt các chỉ tiêu chất lượng hệ thống.

1.3 Tổng quan về tình hình nghiên cứu điều khiển phân tán các bộ biến đổi công suất

Bộ biến đổi công suất đa pha, đa bậc điều khiển phân tán có ưu điểm:

- Có thể mở rộng khả năng làm việc với các mức điện áp và công suất khác nhau đáp ứng cho các nhu cầu trong điều khiển và vận hành.
- Tạo điện áp ngõ ra có số bậc bất kỳ với chất lượng sóng hài tốt.
- Dễ dàng trong việc vận hành, sửa chữa và thay thế khi cần thiết.
- Hệ thống có khả năng tái cấu trúc động, tái cân bằng khi cần thêm, bớt một số mô-đun, hoặc có thể dễ dàng thay thế một mô-đun hỏng khi cần thiết.



Hình 1.15 Phương pháp điều khiển tập trung và phân tán

1.3.1 Phương pháp điều chế độ rộng xung sóng mang

1.3.1.1 Điều khiển phân cấp liên kết mô-đun chủ - tớ

Điều khiển phân tán được đặc trưng bởi cấu trúc phân cấp có hai mức điều khiển như bộ điều khiển chính-phụ, bộ điều khiển chủ-tớ hoặc bộ điều khiển cục bộ-trung tâm.

1.3.1.2 Điều khiển phân tán hoàn toàn giữa các mô-đun

Mỗi mô-đun của bộ biến đổi công suất hoạt động độc lập dựa trên thông tin dòng điện và điện áp của chính nó, không trao đổi thông tin với các mô-đun lân cận. Cấu trúc này dễ dàng kết nối nhưng thuật toán tính toán phức tạp cho các cấu hình bộ biến đổi công suất với số lượng lớn mô-đun.

1.3.1.3 Điều khiển phân tán các mô-đun trao đổi thông tin hạn chế

Các mô-đun của bộ biến đổi công suất trao đổi thông tin với các mô-đun lân cận, thông tin trao đổi có thể là vị trí của mô-đun trong các pha, vị trí các mô-đun trong các cột, góc pha của sóng mang riêng của từng mô-đun, biên độ sóng

mang của mô-đun lân cận, điện áp tham chiếu, tần số điện áp tham chiếu, dòng điện các nhánh, dòng điện các mô-đun, điện áp của các mô-đun.

1.3.2 Phương pháp điều chế độ rộng xung vec-tơ không gian

Kỹ thuật chuyển không gian điều chế đa bậc, đa pha về không gian điều chế hai bậc, đa pha nhằm tìm kiếm cho mỗi mô-đun một vec-tơ chuyển mạch và thời gian chuyển mạch thích hợp cho thấy tiềm năng ứng dụng trong các bộ biến đổi công suất đa bậc, đa pha điều khiển phân tán.

1.4 Mục tiêu nghiên cứu

Đề xuất cấu trúc bộ biến đổi công suất đa pha, đa bậc điều khiển phân tán và phương pháp điều chế độ rộng xung vec-tơ không gian

Đề xuất cấu trúc bộ biến đổi công suất đa mô-đun ghép nối tiếp và song song điều khiển phân tán và phương pháp điều chế độ rộng xung dịch pha sóng mang.

1.5 Nội dung và phạm vi luận án

Về ghép nối mô-đun động lực: tác giả định hướng nghiên cứu các bộ biến đổi công suất đa pha, đa bậc cải tiến sử dụng ghép nối các mô-đun.

Về cấu trúc phân cấp điều khiển: tác giả định hướng nghiên cứu bộ biến đổi công suất điều khiển phân tán có các mô-đun trao đổi với thông tin hạn chế nhất với các mô-đun lân cận.

Về phương pháp điều chế độ rộng xung: phương pháp điều chế độ rộng xung vec-tơ không gian cho bộ biến đổi công suất đa pha, đa bậc; phương pháp điều chế độ rộng xung dịch pha sóng mang cho bộ biến đổi công suất vừa ghép nối tiếp và song song các mô-đun.

Thực nghiệm hệ thống bộ biến đổi công suất đa pha, đa bậc điều khiển phân tán, hoàn thiện cấu trúc bộ điều khiển phân tán, đánh giá kết quả.

1.6 Phương pháp nghiên cứu

Mô phỏng bằng phần mềm chuyên dụng Matlab, Plecs.

Lập trình điều khiển DSP TMS320F28379D của tập đoàn Texas Instruments.

1.7 Đóng góp mới về khoa học của luận án

Trên cơ sở các cấu trúc bộ biến đổi công suất đa bậc, đề xuất cấu trúc và phương pháp điều khiển các bộ biến đổi công suất phân tán ghép nối các mô-đun.

Cấu trúc và phương pháp điều khiển phân tán bộ biến đổi công suất đa pha, đa bậc cho phép thiết kế các bộ biến đổi công suất dễ dàng, phù hợp cho dãy công suất và điện áp tùy chỉnh khác nhau.

Đề xuất kỹ thuật điều chế độ rộng xung dịch pha sóng mang phân tán cho cấu trúc bộ biến đổi công suất đa mô-đun ghép nối tiếp và song song và kỹ thuật điều chế vec-tơ không gian cho bộ biến đổi công suất điều khiển phân tán đa pha, đa bậc.

Thiết kế chế tạo mô hình thực nghiệm có thể được ứng dụng cho các nghiên cứu về điều khiển phân tán các bộ biến đổi công suất đa pha, đa bậc.

1.8 Bố cục của luận án

Luận án được thực hiện bao gồm 5 chương, bao gồm:

Chương 1: Tổng quan về các bộ biến đổi công suất đa pha, đa bậc.

Chương 2: Cơ sở lý thuyết đồng thuận trong thiết kế các bộ biến đổi công suất điều khiển phân tán.

Chương 3: Kỹ thuật điều chế vec-tơ không gian cho bộ biến đổi công suất điều khiển phân tán đa pha, đa bậc.

Chương 4: Điều chế độ rộng xung dịch pha sóng mang cho bộ biến đổi công suất đa mô-đun ghép nối tiếp và song song điều khiển phân tán.

Chương 5: Kết luận và các định hướng nghiên cứu.

CHƯƠNG 2 CƠ SỞ LÝ THUYẾT ĐỒNG THUẬN TRONG THIẾT KẾ CÁC BỘ BIẾN ĐỔI CÔNG SUẤT ĐIỀU KHIỂN PHÂN TÁN

2.1 Lý thuyết đồng thuận trong các bộ biến đổi công suất đa mô-đun ghép nối tiếp và song song điều khiển phân tán

2.1.1 Vai trò của lý thuyết đồng thuận trong hoạt động của mô-đun cục bộ

Bằng cách chỉ sử dụng thông tin từ các mô-đun lân cận, các thuật toán đồng thuận hoàn toàn phù hợp với mô hình điều khiển phân tán, nơi không có bộ điều khiển trung tâm, nhưng hệ thống đảm bảo vận hành ổn định và đồng bộ.

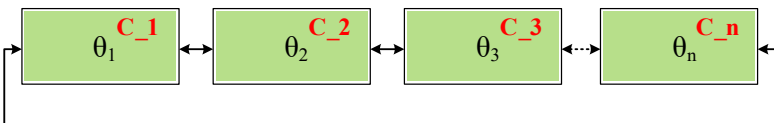
2.1.2 Mô hình mạng các mô-đun giao tiếp lân cận

Mô hình mạng lưới lân cận đóng vai trò nền tảng trong lý thuyết đồng thuận và điều khiển phân tán. Việc lựa chọn cấu trúc mạng lưới phù hợp là rất quan trọng để đảm bảo hệ thống đạt được đồng thuận một cách hiệu quả, ổn định và có khả năng chịu lỗi tốt.

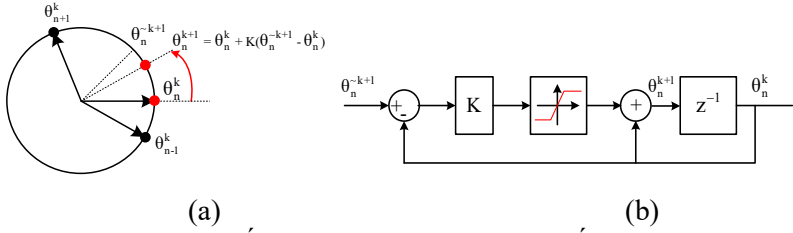
2.1.3 Ứng dụng mô hình mạng lưới lân cận trong các bộ biến đổi công suất đa mô-đun điều khiển phân tán

Các bộ biến đổi công suất lớn được xây dựng từ nhiều mô-đun nhỏ hơn, việc điều khiển phối hợp giữa các mô-đun là rất quan trọng để đảm bảo hiệu suất, độ tin cậy và chất lượng điện năng ngõ ra. Thay vì một bộ điều khiển trung tâm phức tạp, các bộ biến đổi công suất có thể áp dụng mô hình điều khiển phân tán, trong đó mỗi mô-đun có một bộ điều khiển cục bộ và tương tác với các mô-đun lân cận thông qua một mạng lưới. Mô hình mạng lưới lân cận sẽ định nghĩa cách các mô-đun điều khiển này trao đổi thông tin với nhau. Việc áp dụng mô hình mạng lưới lân cận trong thiết kế bộ biến đổi công suất đa mô-đun điều khiển phân tán là một hướng đi đầy hứa hẹn.

2.2 Nguyên lý xen kẽ góc pha phân tán



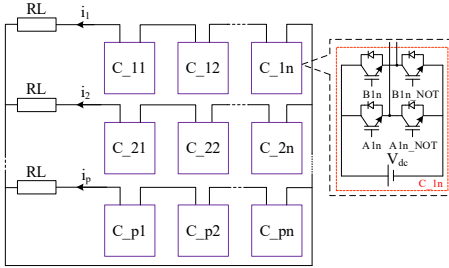
Hình 2.2 Giao tiếp giữa các mô-đun trong chuỗi liên kết nối tiếp



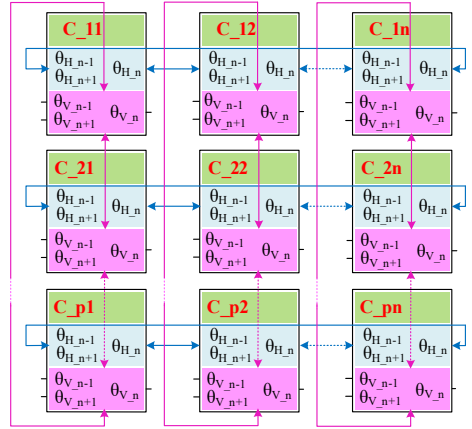
Hình 2.5 Quy tắc cập nhật góc pha với hệ số suy giảm K

$$\begin{cases} \theta_n^{k+1} = \theta_n^k + K(\theta_n^{k+1} - \theta_n^k), K \leq 0.66 \\ \theta_n^{k+1} = \text{mod}\left\{\theta_n^k + 0.5\text{mod}\left[(\theta_n^k - \theta_{n+1}^k, 360), 360\right], 360\right\} \end{cases} \quad (2.6)$$

2.3 Áp dụng nguyên lý xen kẽ góc pha phân tán xác định cấu trúc bộ biến đổi công suất đa pha, đa bậc



Hình 2.11 Bộ biến đổi công suất đa pha, đa bậc



Hình 2.12 Thiết lập giao tiếp theo hàng và cột của bộ biến đổi công suất đa pha, đa bậc

$$\begin{cases} \theta_{H,n}^{k+1} = \theta_{H,n}^k + K(\theta_{H,n}^{k+1} - \theta_{H,n}^k), K \leq 0.66 \\ \theta_{H,n}^{k+1} = \text{mod}\left\{\theta_{H,n}^k + 0.5\text{mod}\left[(\theta_{H,n-1}^k - \theta_{H,n+1}^k, 360), 360\right], 360\right\} \end{cases} \quad (2.7)$$

$$N_{cp}^k = \text{round}\left\{360 / \left[0.5\text{mod}(\theta_{H,n-1}^k - \theta_{H,n+1}^k, 360)\right]\right\} \quad (2.8)$$

$$\Delta\theta_{H,n} = 0.5\text{mod}(\theta_{H,n-1}^k - \theta_{H,n+1}^k, 360) = \frac{360}{N_{cp}} \quad (2.9)$$

$$i_n^k = \text{round} \left(\frac{\theta_{H_n}^k}{360} \right) + 1 = \text{round} \left(\frac{\theta_{H_n}^k \cdot N_{cp}^k}{360} \right) + 1 \quad (2.10)$$

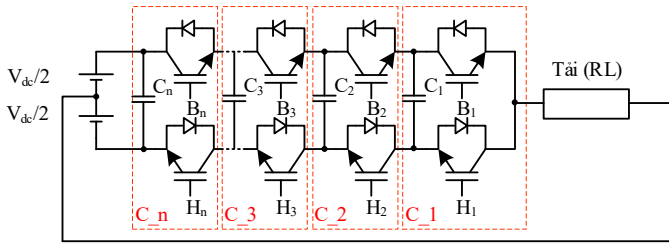
$$\begin{cases} \theta_{v_n}^{k+1} = \theta_{v_n}^k + K(\theta_{v_n}^{k+1} - \theta_{v_n}^k), K \leq 0.66 \\ \theta_{v_n}^{k+1} = \text{mod} \left\{ \theta_{v_{n+1}}^k + 0.5 \text{mod} \left[(\theta_{v_{n-1}}^k - \theta_{v_{n+1}}^k, 360), 360 \right] \right\} \end{cases} \quad (2.11)$$

$$p^k = \text{round} \left\{ 360 / \left[0.5 \text{mod} (\theta_{v_{n-1}}^k - \theta_{v_{n+1}}^k, 360) \right] \right\} \quad (2.12)$$

$$i_p^k = \text{round} \left(\frac{\theta_{v_n}^k}{360} \right) + 1 = \text{round} \left(\frac{\theta_{v_n}^k \cdot p^k}{360} \right) + 1 \quad (2.13)$$

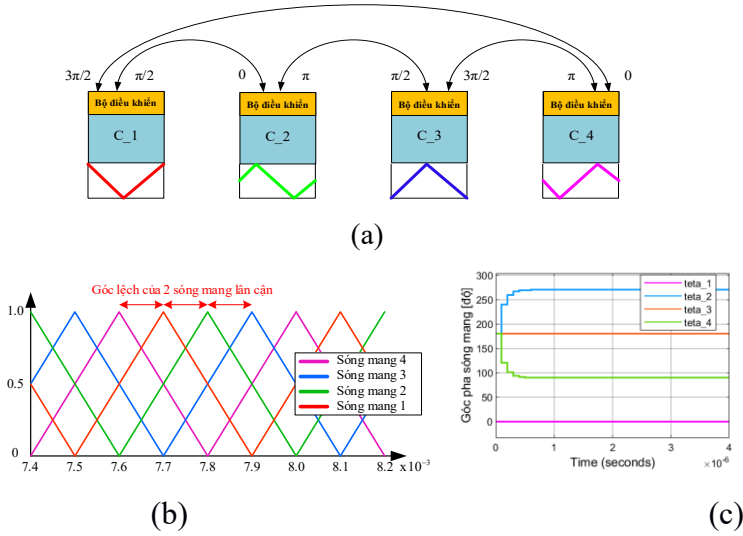
2.4 Áp dụng nguyên lý xen kẽ góc pha phân tán tạo sóng mang dịch pha cho bộ biến đổi công suất đa mô-đun ghép nối tiếp và song song

2.4.1 Bộ biến đổi công suất đa mô-đun ghép nối tiếp điều khiển phân tán



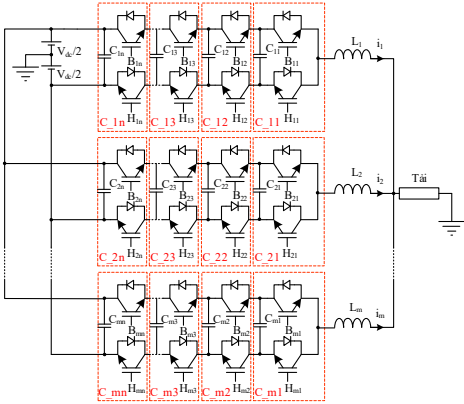
Hình 2.13 Bộ biến đổi công suất đa bậc

Xem xét cấu trúc bộ biến đổi công suất đa bậc, một pha liên kết tụ điện như Hình 2.13, cấu trúc bao gồm đa mô-đun ghép nối tiếp. Tín hiệu PWM của các mô-đun được tạo ra từ các sóng mang có góc pha xen kẽ đều nhau trong 360 độ. Vì vậy, góc pha của mô-đun trong cấu trúc Hình 2.2 được gán làm góc pha sóng mang cho cấu trúc bộ biến đổi công suất Hình 2.13. Một ví dụ minh họa trên Hình 2.14 cho cấu trúc bốn mô-đun ghép nối tiếp, góc pha sóng mang của các mô-đun xen kẽ đều trong 360 độ, sóng mang của các mô-đun xen kẽ đều nhau.

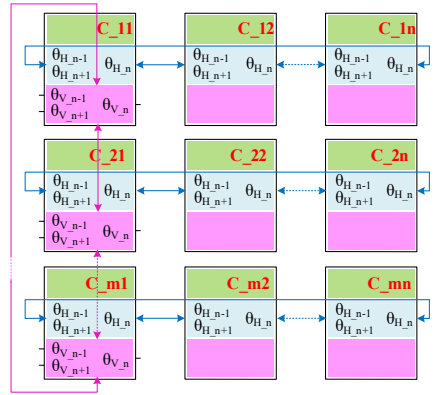


Hình 2.1 Góc pha và sự sắp xếp bốn sóng mang dịch pha; a) điều khiển phân tán 4 mô-đun; b) bốn sóng mang dịch pha; c) bốn góc pha sóng mang

2.4.2 Bộ biến đổi công suất đa mô-đun ghép nối tiếp và song song điều khiển phân tán



Hình 2.15 Bộ biến đổi công suất MMC-2D điều chế DC/AC



Hình 2.2 Đề xuất kết nối giao tiếp phương pháp 2D cho MMC-2D

$$\Delta\theta_{H_n}^{k+1} = 0.5\text{mod}(\theta_{H_n-1}^k - \theta_{H_n+1}^k, 360) \quad (2.15)$$

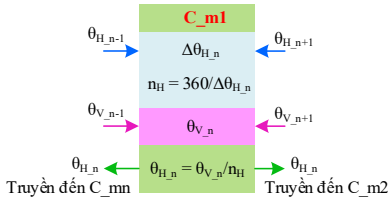
$$\begin{cases} \theta_{V_n}^{-k+1} = \text{mod}(\theta_{V_n}^k + 0.5\text{mod}(\theta_{V_n-1}^k - \theta_{V_n+1}^k, 360), 360) \\ \theta_{V_n}^{k+1} = \theta_{V_n}^k + K(\theta_{V_n}^{-k+1} - \theta_{V_n}^k) \end{cases} \quad (2.16)$$

$$n_H^{k+1} = \frac{360}{\Delta\theta_{H_n}^{k+1}} \quad (2.17)$$

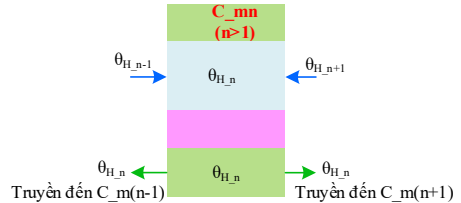
$$\theta_{H_n}^{k+1} = \frac{\theta_{V_n}^{k+1}}{n_H^{k+1}} \quad (2.18)$$

$$\theta_{H_n}^{k+1} = \text{mod}(\theta_{H_n}^k + 0.5\text{mod}(\theta_{H_n-1}^k - \theta_{H_n+1}^k, 360), 360) \quad (2.19)$$

$$\theta_n^{k+1} = \theta_{H_n}^{k+1} \quad (2.20)$$



Hình 2.19 Tính toán góc pha sóng mang tại mô-đun C_m1



Hình 2.20 Tính toán góc pha sóng mang tại mô-đun n > 1

2.5 Kết luận

Trong chương này, các cơ sở lý thuyết về điều khiển phân tán dựa trên nguyên lý đồng thuận đã được trình bày như một nền tảng quan trọng cho việc thiết kế các bộ biến đổi công suất đa mô-đun ghép nối tiếp và song song. Việc mô hình hóa các mô-đun như một mạng lưới các tác tử tương tác lân cận đã cho thấy khả năng thích nghi, mở rộng và điều khiển linh hoạt của hệ thống điều khiển phân tán. Nguyên lý xen kẽ góc pha phân tán được khai thác nhằm tối ưu hóa hiệu suất chuyển đổi, đồng thời cho phép hình thành cấu trúc sóng mang dịch pha hiệu quả trong các bộ biến đổi công suất đa bậc, đa pha. Các nội dung này sẽ là cơ sở để triển khai các thuật toán điều chế, đồng bộ hóa và cân bằng năng lượng trong các chương tiếp theo, với mục tiêu nâng cao tính ổn định, khả năng mở rộng và độ tin cậy của các bộ biến đổi công suất điều khiển phân tán.

CHƯƠNG 3 KỸ THUẬT ĐIỀU CHẾ VEC-TƠ KHÔNG GIAN CHO BỘ BIẾN ĐỔI CÔNG SUẤT ĐIỀU KHIỂN PHÂN TÁN ĐA PHA, ĐA BẬC

3.1 Tổng quan tình hình nghiên cứu về phương pháp SVPWM cho bộ biến đổi công suất đa pha, đa bậc

Nội dung nghiên cứu chính trong chương này trình bày cấu trúc và phương pháp SVPWM cho bộ biến đổi công suất đa pha, đa bậc điều khiển phân tán. Các nhiệm vụ mà các mô-đun phải thực hiện được phân chia theo sự sắp xếp của các mô-đun trong các pha và vị trí của các mô-đun trong từng pha. Nghiên cứu này chứng minh hiệu quả giảm khối lượng thực hiện tính toán của từng mô-đun so với trường hợp bộ biến đổi công suất sử dụng một bộ xử lý trung tâm. Ngoài ra, khi thay đổi số lượng mô-đun trong mỗi pha hoặc thay đổi số pha để phù hợp với ứng dụng, cấu trúc và phương pháp đề xuất cho phép hệ thống tự động hiệu chỉnh cấu trúc mà không phải ngừng hoạt động.

3.2 Cấu trúc và phương pháp điều chế độ rộng xung vec-tơ không gian đề xuất cho bộ biến đổi đa pha, đa bậc điều khiển phân tán

3.2.1 Đề xuất thuật toán DSVPWM

Với p là tổng số pha đang hoạt động của MMPC, n là vị trí mô-đun trong một pha.

Hệ thống điện áp tham chiếu đa pha, đa bậc của bộ MMPC có dạng như biểu thức (3.1) trình bày. Với $l = 1, 2, 3, \dots, p$. Điện áp điều chế có thể được xem là bội số nguyên lần điện áp ngõ vào V_{dc} của mỗi mô-đun, như (3.2).

$$v_{ref}^k = V_m \sin \{ \omega t + [2\pi(l-1)/p^k] \} \quad (3.1)$$

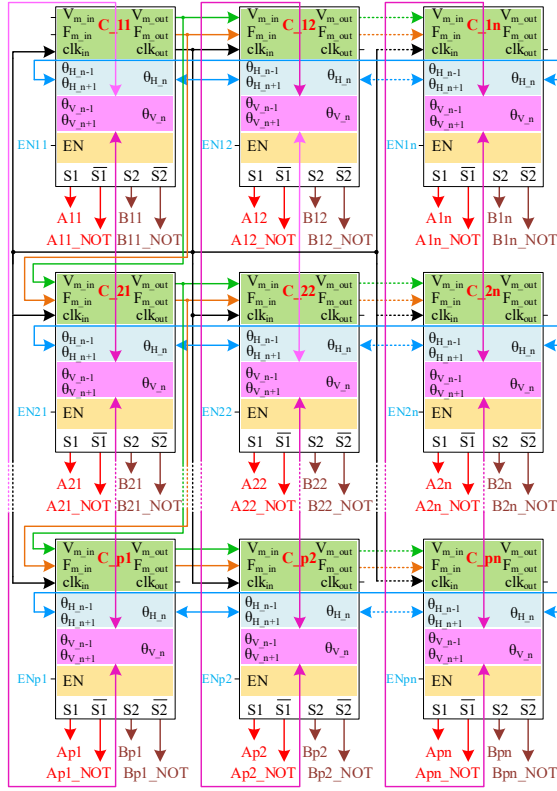
$$v_r^k = \frac{v_{ref}^k}{V_{dc}} = [v_{r1}^k, v_{r2}^k, \dots, v_{rp}^k]^T \quad (3.2)$$

Biên độ điện áp tham chiếu đa pha, đa bậc có thể được phân tách thành phần nguyên và phần dư như biểu thức (3.3) và (3.4) trình bày. Hàm toán tử floor(x) được dùng làm tròn các phần tử của x đến số nguyên gần nhất hướng tới vùng vô cực âm. Vec-tơ v_{fs} được khởi tạo từ vec-tơ v_r như phương trình (3.5) trình bày.

$$v_i^k = \text{floor}(v_r^k) \quad (3.3)$$

$$v_f^k = v_r^k - v_i^k \quad (3.4)$$

$$v_{fs}^k = \text{sort}(v_f^k) = [v_{fs1}^k, v_{fs2}^k, \dots, v_{fsp}^k]^T \quad (3.5)$$



Hình 3.1 Sơ đồ kết nối điều khiển bộ MMPC với phương pháp DSVPWM
Khởi tạo một ma trận A như (3.6)-(3.7).

$$A^k = \begin{bmatrix} 0 & A_2^k & A_3^k & \dots & A_p^k & A_{p+1}^k \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$A_g^k = \begin{cases} 1 & \text{if } [v_f(i_p^k, 1)] = v_{fs}(g, 1) \\ 0 & \text{if } [v_f(i_p^k, 1)] \neq v_{fs}(g, 1) \end{cases}, g = 2 \div p+1 \quad (3.7)$$

Vec-tơ chuyển mạch của kỹ thuật điều chế hai bậc được tìm kiếm theo phương trình (3.8), với ma trận D được mô tả trong biểu thức (3.9).

$$v_d^k = A^k D^k = \begin{bmatrix} v_{d1}^k & v_{d2}^k & \dots & v_{d(p+1)}^k \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$D^k = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Vec-tơ chuyển mạch v_s được tính toán bằng cách thêm phần nguyên của điện áp tham chiếu mỗi pha $v_i(i_p, 1)$ vào các vec-tơ dịch chuyển theo biểu thức (3.10).

$$v_s^k = v_d^k + v_i^k(i_p, 1) = \begin{bmatrix} v_{s1}^k & v_{s2}^k & \dots & v_{s(p+1)}^k \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Thời gian và vec-tơ chuyển mạch được tính toán theo (3.11) đến (3.18).

$$t_s^k = \begin{bmatrix} t_{s1}^k & t_{s2}^k & \dots & t_{s(p+1)}^k \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\sum_{u=1}^{u=p+1} t_{su}^k = 1 \quad (3.12)$$

$$t_{s1}^k = 1 - v_{fs}^k(1, 1) \quad (3.13)$$

$$t_{p+1}^k = v_{fs}^k(p+1, 1) \quad (3.14)$$

$$t_j^k = v_{fs}^k(j-1, 1) - v_{fs}^k(j, 1), j = 2 \div p \quad (3.15)$$

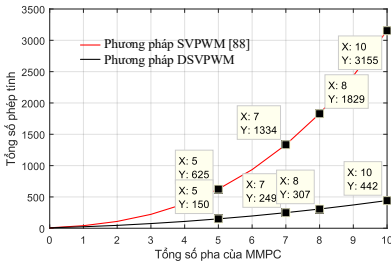
$$v_{smax}^k = \max(v_s^k) \quad (3.16)$$

$$A = \begin{cases} 0 & \text{if } v_{smax}^k < 0 \\ 1 & \text{if } (v_{smax}^k > 0) \text{ and } (v_{smax}^k \neq i_n^k) \\ PWM(t_s^k) & \text{if } (v_{smax}^k > 0) \text{ and } (v_{smax}^k = i_n^k) \end{cases} \quad (3.17)$$

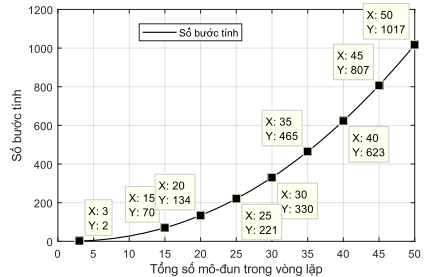
$$B = \begin{cases} 0 & \text{if } v_{smax}^k > 0 \\ 1 & \text{if } (v_{smax}^k \leq 0) \text{ and } (v_{smax}^k \neq -i_n^k) \\ PWM(t_s) & \text{if } (v_{smax}^k \leq 0) \text{ and } (v_{smax}^k = -i_n^k) \end{cases} \quad (3.18)$$

3.2.2 Lưu đồ thuật toán của mỗi mô-đun và phương pháp điều khiển

3.2.3 So sánh khối lượng tính toán giữa phương pháp SVPWM và DSVPWM



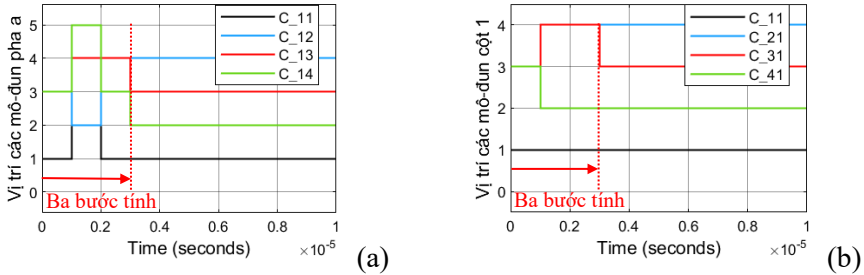
Hình 3.8 Số phép tính khi sử dụng phương pháp SVPWM và DSVPWM. X: tổng số pha của MMPC; Y: số bước tính



Hình 3.10 Số bước tính để vị trí các mô-đun ổn định vị trí. X: tổng số mô-đun trong pha; Y: số bước tính

3.3 Kết quả mô phỏng phương pháp DSVPWM cho MMPC

3.3.1 Đánh giá thời gian cấu hình hệ thống

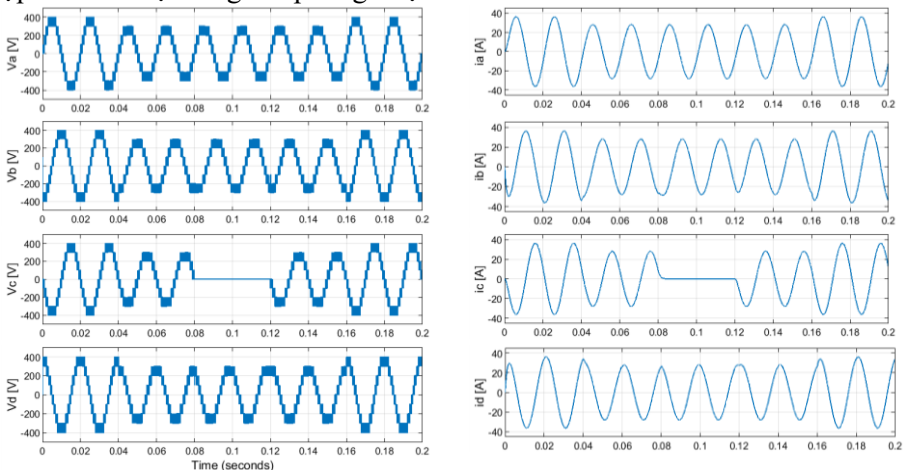


Hình 3.12 Vị trí 4 mô-đun của pha a và cột 1; a) vị trí các mô-đun pha a; b) vị trí các mô-đun

MMPC được xây dựng trên Matlab/Simulink, có bốn pha: bốn mô-đun trong mỗi pha, thông tin vị trí của các mô-đun trong pha a và các mô-đun tại cột 1 ổn định sau ba bước tính, như thể hiện trong Hình 3.12. Hình 3.10 trình bày số bước tính cần thiết để hệ thống xác định vị trí và tổng số mô-đun. Trong các ứng dụng cụ thể, số mô-đun trong mỗi pha cũng cần thiết phải xem xét đến một giới hạn cụ thể liên quan đến thời gian cấu hình, khả năng đáp ứng và độ trễ của hệ thống.

3.3.2 Đánh giá khả năng tái cấu trúc hệ thống

Hình 3.14 trình bày đáp ứng của vị trí, điện áp và dòng điện tải trong trường hợp cấu trúc hệ thống mô phỏng được điều chỉnh.

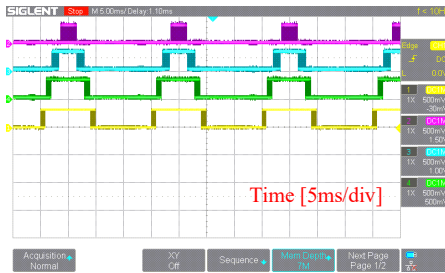


Hình 3.14 Điện áp ngõ ra và dòng điện qua tải trong trường hợp tái cấu trúc

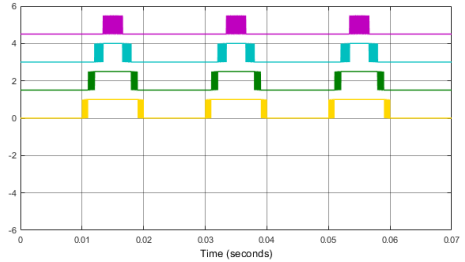
3.4 Thực nghiệm

3.4.1 Đánh giá hoạt động MMPC

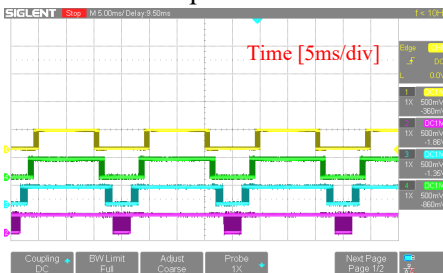
Hệ thống đã kiểm chứng khả năng tự cấu hình, điều chế chính xác xung chuyển mạch, đáp ứng tốt theo các tín hiệu tham chiếu. Tín hiệu điều khiển PWM được điều chế cho mỗi mô-đun được thể hiện trong Hình 3.19. Bốn ngõ ra PWM A tương ứng của GPIO 0 được thể hiện trong Hình 3.19(a). Bốn ngõ ra PWM B tương ứng của GPIO 2 được thể hiện trong Hình 3.19(b). Điện áp nguồn một chiều cố định của mỗi mô-đun là 30V, giúp giảm vấn đề cân bằng điện áp tụ điện trong một số ứng dụng, nghĩa là điện áp một bậc của điện áp ngõ ra cũng là 30V; Với hệ số điều chế cao $m = 3,4$, thuật toán điều khiển tận dụng tối đa điện áp của cả bốn mô-đun; Kết quả là điện áp ngõ ra đạt tới chín bậc; Điện áp giữa các bậc là 30V như thể hiện trong Hình 3.20.



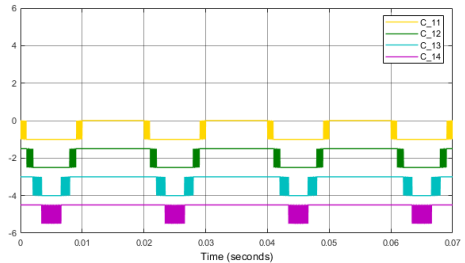
(a) Thực nghiệm tín hiệu PWM A pha a



(c) Mô phỏng tín hiệu PWM A pha a

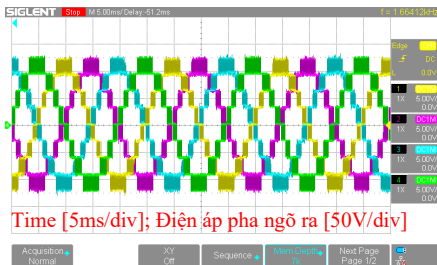


(b) Thực nghiệm tín hiệu PWM B pha a

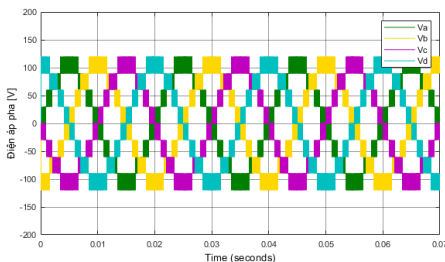


(d) Mô phỏng tín hiệu PWM B pha a

Hình 3.19 Tín hiệu PWM của các mô-đun C_11, C_12, C_13, C_14 sử dụng phương pháp DSVPWM; a)-c) tín hiệu PWM A; b)-d) tín hiệu PWM B. (màu vàng: C_11, màu tím: C_12, màu xanh lam: C_13, màu xanh lá cây: C_14)



(a) Thực nghiệm điện áp bốn pha



(b) Mô phỏng điện áp bốn pha

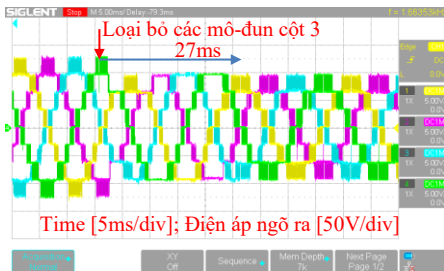
Hình 3.20 Dạng sóng điện áp pha ngõ ra của MMPC với phương pháp DSVPWM khi hệ thống có cấu trúc 4x4

3.4.2 Đánh giá quá trình tái cấu trúc MMPC

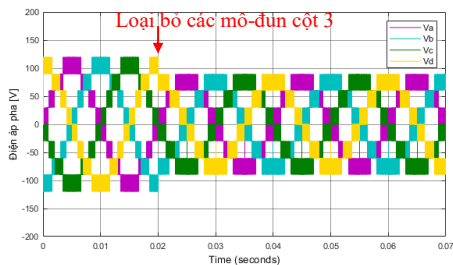
Hình 3.23 trình bày dạng sóng điện áp bốn pha khi thay đổi cấu trúc MMPC. Khi bị loại bỏ, điện áp đóng góp của mô-đun đó vào tải là 0V và tín hiệu điều khiển của chân tín hiệu GPIO 0 và 2 của các mô-đun là 0. Như trình bày trong Hình 3.23(a), vì các mô-đun ở cột 3 ngừng hoạt động nên điện áp bốn pha thay đổi từ chín bậc thành bảy bậc sau khoảng 27ms. Điện áp bốn pha của bộ MMPC được điều chế với hệ số điều chế cực đại tương ứng với ba mô-đun của mỗi pha. Trong thí nghiệm này, hệ số điều chế được đặt là 3. Góc lệch pha điện áp giữa bốn pha không thay đổi. Góc lệch pha tương ứng khi có bốn mô-đun trong một pha là 90 độ. Trong trường hợp điều chỉnh từng pha với ba mô-đun hoạt động, Hình 3.23(b) cho thấy quá trình điều chỉnh điện áp của bốn pha khi các mô-đun của pha c ngừng hoạt động, cần thời gian là 23ms. Điện áp pha được duy trì ở bảy bậc, các bậc điện áp ổn định ở 30V và góc lệch pha điện áp giữa các pha được điều chỉnh thành 120 độ. Trong khi đó, quá trình kích hoạt lại pha c và cột 3, cần thời gian là 30ms như Hình 3.23(c) và Hình 3.23(d).

3.5 Kết luận

Phương pháp và cấu trúc đề xuất cho thấy quá trình tìm kiếm các vec-tơ chuyển mạch và thời gian chuyển mạch của bộ điều khiển cục bộ có số phép tính thấp hơn so với việc chỉ sử dụng bộ điều khiển tập trung duy nhất. Phương pháp đề xuất có thể được xem là phương pháp chung để điều chế điện áp đa bậc, đa pha của bộ biến đổi công suất.



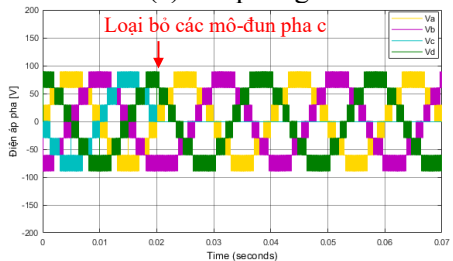
(a) Thực nghiệm



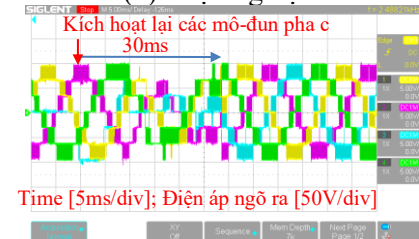
(e) Mô phỏng



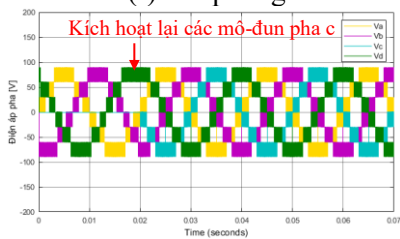
(b) Thực nghiệm



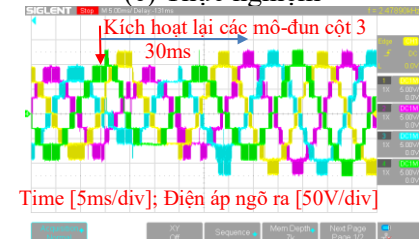
(f) Mô phỏng



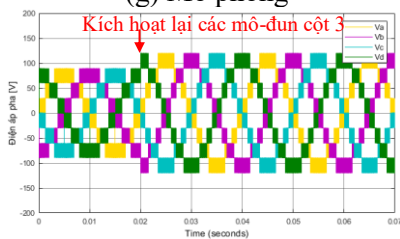
(c) Thực nghiệm



(g) Mô phỏng



(d) Thực nghiệm



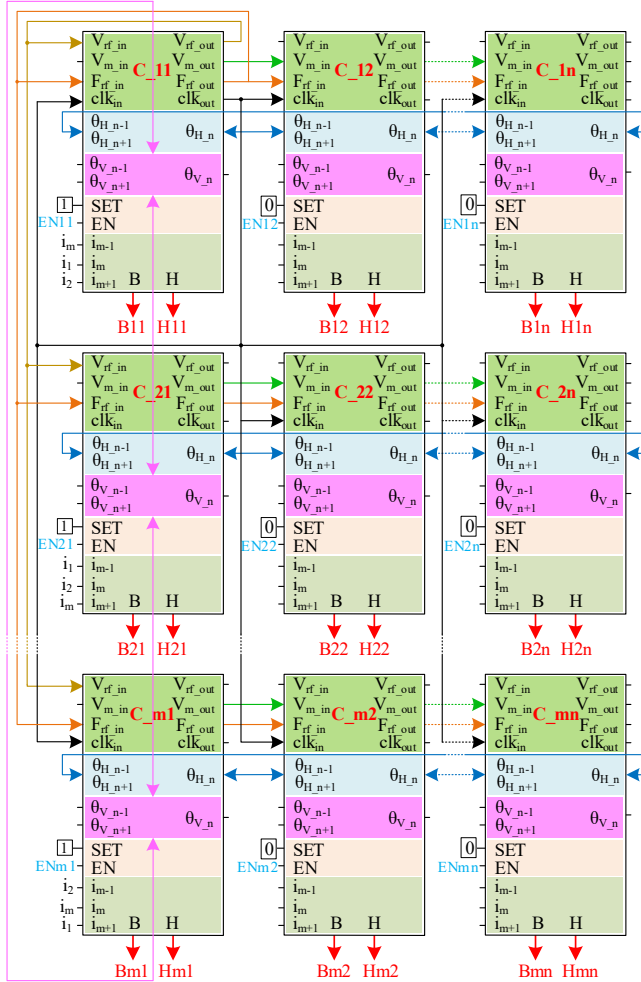
(h) Mô phỏng

Hình 3.23 Điện áp pha ngõ ra khi thay đổi cấu trúc; a)-e) loại bỏ các mô-đun ở cột 3 của hệ thống có 4 mô-đun trong một pha; b)-f) loại bỏ các mô-đun ở pha c của hệ thống có 3 mô-đun trong một pha; c)-g) kích hoạt lại các mô-đun ở pha c của hệ thống có 3 mô-đun trong một pha; d)-h) kích hoạt lại các mô-đun ở cột 3 của hệ thống có 3 mô-đun trong một pha.

CHƯƠNG 4 ĐIỀU CHẾ ĐỘ RỘNG XUNG DỊCH PHA SÓNG MANG CHO BỘ BIẾN ĐỔI CÔNG SUẤT ĐA MÔ-ĐUN GHEP NỐI TIẾP VÀ SONG SONG ĐIỀU KHIỂN PHÂN TÁN

4.1 Đề xuất giải thuật dịch pha sóng mang phân tán cho cấu trúc MMC-2D

4.1.1 Nguyên lý xen kẽ góc pha sóng mang phân tán 2D



Hình 4.1 Kết nối giữa các mô-đun với giải thuật 2D cho cấu trúc MMC-2D

Sơ đồ kết nối điều khiển phân tán được đề xuất cho cấu trúc MMC-2D được thể hiện trong Hình 4.1. Tiêu chí số lượng thông tin giao tiếp mà mỗi mô-đun trao đổi với các mô-đun lân cận ở mức tối thiểu đã được sử dụng cho các đề xuất này. Góc pha sóng mang (CPA) là thông tin mà mỗi mô-đun trao đổi với các mô-đun lân cận trong quá trình xác định CPA của tất cả các mô-đun đang hoạt động.

4.1.2 Thiết kế hệ thống

Trong đề xuất này, một hướng để lựa chọn dung lượng tụ điện là đảm bảo gọn điện áp trên các tụ điện như một phần của điện áp ngõ ra như (4.5).

$$C_0 = \frac{i_t}{mn\alpha_v V_{dc} f_{sw}} \quad (4.5)$$

Trong đề xuất này, giá trị cuộn cảm được lựa chọn để đảm bảo gọn sóng dòng điện qua các cuộn cảm như một phần của dòng điện tải (4.8) và (4.9).

$$\Delta i_{Lm} = \alpha_i i_{load} \quad (4.8)$$

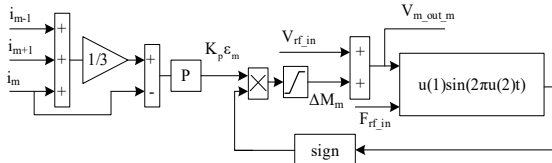
$$L_m = \frac{\left(1 - \frac{nV_t}{V_{dc}}\right) V_t}{n^2 m \alpha_i i_t f_{sw}} \quad (4.9)$$

4.1.3 Cân bằng dòng điện xoay chiều phân tán cho cấu trúc 2D

Đề xuất được thực hiện theo sơ đồ Hình 4.4. Các dòng điện i_{m+1} , i_{m-1} và i_m được nhận bởi mô-đun đầu tiên của nhánh m. Sai số điều khiển dòng điện nhánh là sai số giữa dòng điện nhánh và giá trị trung bình của i_{m+1} , i_{m-1} và i_m (4.12). Bộ điều khiển P sử dụng sai số điều khiển để điều chỉnh ΔM_m của điện áp tham chiếu V_{rf_in} (4.13).

$$\tilde{i}_m = \frac{i_{m-1} + i_m + i_{m+1}}{3} \quad (4.12)$$

$$V_{m_out} = \Delta M_m + V_{rf_in} \quad (4.13)$$

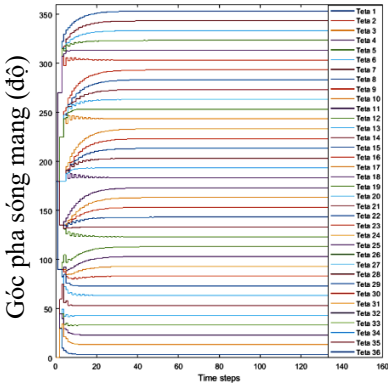


Hình 4.4 Sơ đồ điều khiển dòng điện xoay chiều của nhánh

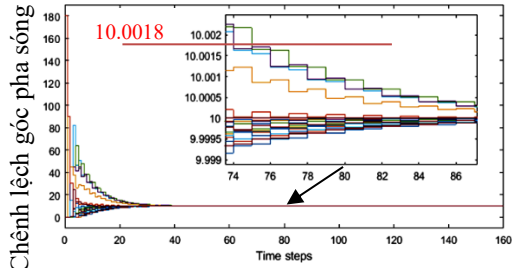
4.1.4 Phương pháp điều khiển

4.2 Kết quả mô phỏng

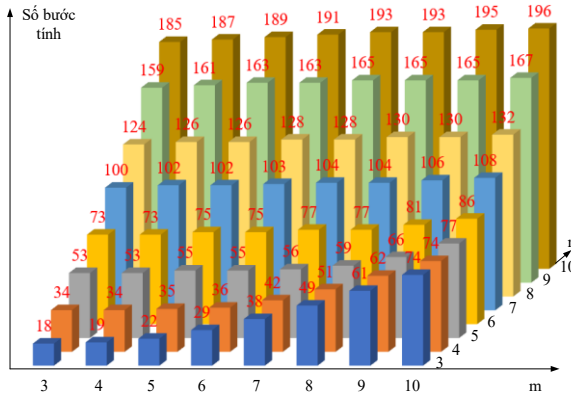
4.2.1 Đánh giá quá trình xen kẽ sóng mang



Hình 4.8 Kết quả mô phỏng xen kẽ 36 góc pha sóng mang



Hình 4.7 Sai lệch giữa các góc pha sóng mang lân cận



Hình 4.9 Số bước tính cần thiết cho bộ biến đổi công suất 2D cấu hình

Mô hình mô phỏng bộ biến đổi công suất đa mô-đun ghép nối tiếp và song song điều khiển phân tán được thiết lập trên phần mềm Matlab/Simulink bao gồm sáu nhánh song song được kết nối với cuộn cảm, mỗi nhánh có sáu mô-đun nối tiếp cung cấp năng lượng cho tải xoay chiều một pha. 36 CPA của 36 mô-đun được sắp xếp đều nhau trong 360° như Hình 4.8 trình bày. Góc pha giữa hai mô-đun lân cận nhanh chóng ổn định với độ lệch tiêu chuẩn là 10 độ như Hình 4.7 trình bày. Khảo

sát cấu trúc 2D với số nhánh và cột nhỏ hơn 10 ($m, n = 3, \dots, 10$), số bước tính để chênh lệch CPA của hai mô-đun lân cận nhỏ hơn 0,0018 độ được trình bày trong Hình 4.9.

4.2.2 Đánh giá khả năng phản hồi theo tín hiệu điều chế

4.2.2.1 Đáp ứng hệ thống khi thay đổi biên độ điện áp điều chế

Kết quả mô phỏng cho thấy điện áp các nhánh, điện áp ngõ ra, dòng điện qua tải đáp ứng tốt khi thay đổi biên độ điện áp tham chiếu. Trong quá trình mô phỏng thay đổi biên độ điện áp tham chiếu (250V, 150V, 90V), dòng điện các nhánh vẫn chia sẻ tải đồng đều theo đúng tiêu chí thiết kế.

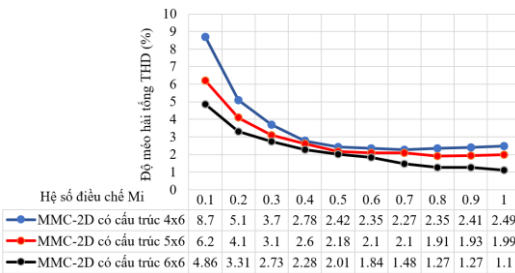
4.2.2.2 Đáp ứng hệ thống khi thay đổi tần số điện áp điều chế

Giả lập tần số điện áp tham chiếu được điều chỉnh (50Hz, 60Hz, 40Hz), các tham số của hệ thống về điện áp các nhánh, điện áp ngõ ra, dòng điện các nhánh, dòng điện qua tải đáp ứng tốt, khả năng đáp ứng chính xác theo tần số tham chiếu.

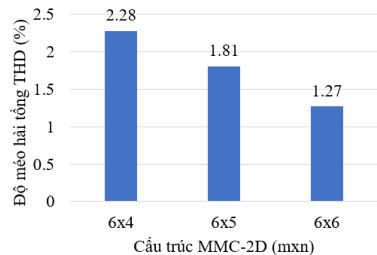
4.2.3 Đánh giá quá trình tái cấu trúc

Nghiên cứu được bắt đầu tiến hành với cấu trúc đầy đủ (cấu trúc 6x6). Các giả lập được tiến hành bao gồm loại bỏ một vài nhánh và cột, cũng như quá trình tái khởi động các nhánh và cột. Các kết quả mô phỏng cho thấy các tham số về điện áp ngõ ra, dòng điện tải, điện áp nhánh, dòng điện các nhánh đáp ứng tốt và nhanh chóng duy trì trạng thái ổn định khi hệ thống chuyển sang cấu hình mới.

4.2.4 Phân tích THD điện áp ngõ ra



Hình 4.29 THD điện áp ngõ ra theo hệ số điều chế Mi với việc điều chỉnh số nhánh của MMC-2D



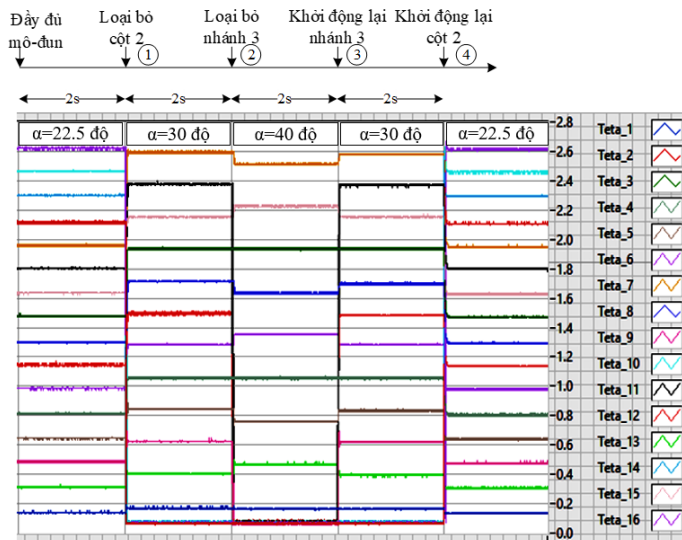
Hình 4.30 THD điện áp ngõ ra theo số mô-đun trong 6 nhánh của MMC-2D ($M_i = 0.8$)

Hình 4.29 cho thấy mối quan hệ giữa giá trị THD và hệ số điều chế trong trường hợp hoạt động bình thường (cấu trúc 6x6), một pha ngừng hoạt động (cấu trúc 5x6), hai pha ngừng hoạt động (cấu trúc 4x6). Khảo sát đã đánh giá độ méo hình sin của điện áp trong dải tần từ 0 đến 20kHz và điện áp ngõ ra có chất lượng tốt, đáp ứng các yêu cầu kết nối lưới điện. Giá trị THD có xu hướng giảm khi tăng số nhánh song song trong cấu trúc MMC-2D. Hình 4.30 phản ánh giá trị số THD có xu hướng giảm khi gia tăng số mô-đun nối tiếp trong mỗi nhánh.

4.3 Thực nghiệm

Mô hình bao gồm 16 mô-đun (bốn nhánh và bốn cột) và mỗi mô-đun sử dụng một bộ điều khiển DSP, mạch điều khiển công suất và mô-đun công suất IGBT. Bộ biến đổi công suất 2D sử dụng giao thức giao tiếp nối tiếp bất đồng bộ (SCI) để các mô-đun trao đổi thông tin.

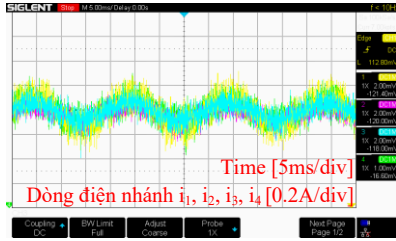
4.3.1 Tự động điều chỉnh góc pha sóng mang



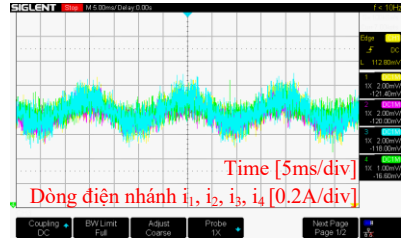
Hình 4.33 Kết quả thực nghiệm của CPA (cấu trúc 4x4)

CPA của các mô-đun được nội suy bằng cách sử dụng chân tín hiệu DACB của DSP. Thiết bị thu thập dữ liệu NI USB-6008 của National Instruments được sử dụng để thu thập và hiển thị CPA của các mô-đun như Hình 4.33.

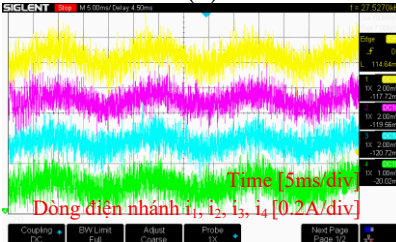
4.3.2 Điện áp ngõ ra và dòng điện tải



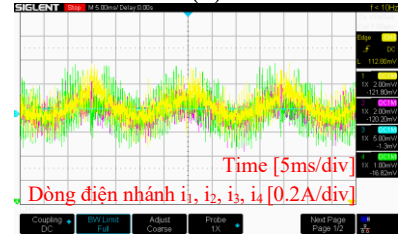
(a)



(c)

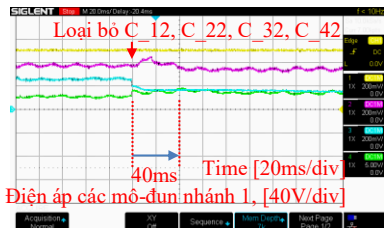


(b)

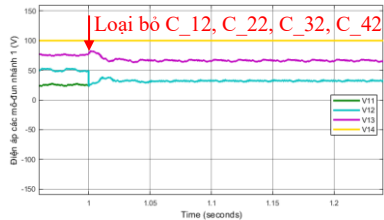


(d)

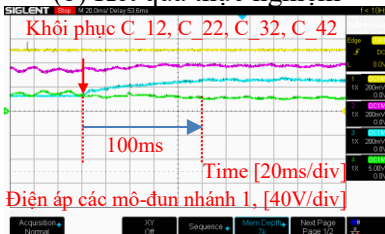
Hình 4.34 Dòng điện nhánh thực nghiệm; a) 4x4; b) Dịch chuyển trục a; c) 4x3; d) 3x3



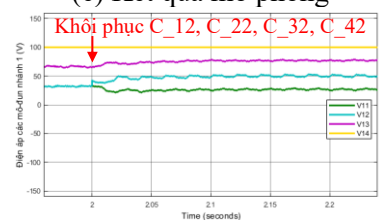
(b) Kết quả thực nghiệm



(e) Kết quả mô phỏng

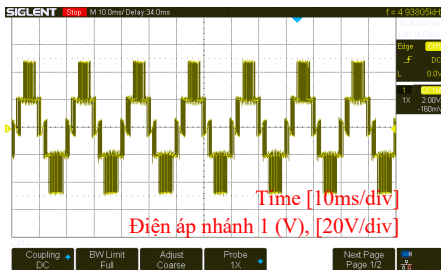


(c) Kết quả thực nghiệm

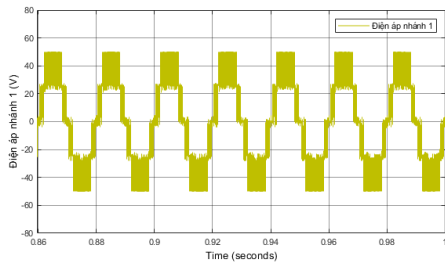


(f) Kết quả mô phỏng

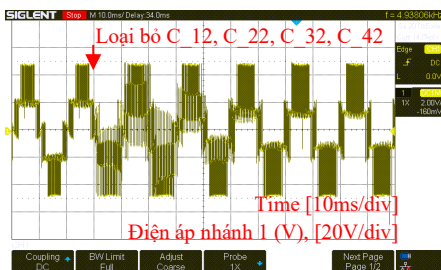
Hình 4.1 Điện áp tự điện nhánh 1 trong trường hợp cấu hình lại; a)-d) 4x4; b)-e) 4x3; c)-f) 3x3



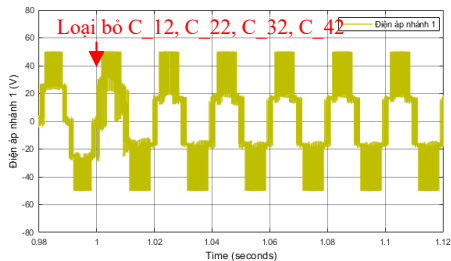
(a) Điện áp thực nghiệm nhánh 1



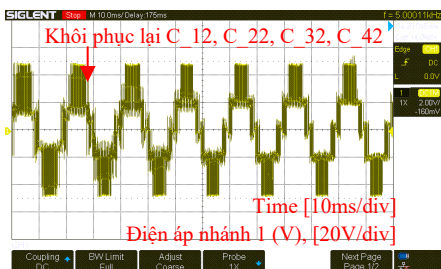
(d) Điện áp mô phỏng nhánh 1



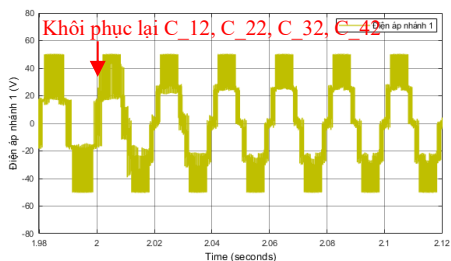
(b) Điện áp thực nghiệm nhánh 1



(e) Điện áp mô phỏng nhánh 1



(b) Điện áp thực nghiệm nhánh 1

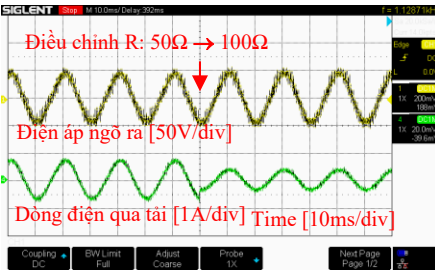


(e) Điện áp mô phỏng nhánh 1

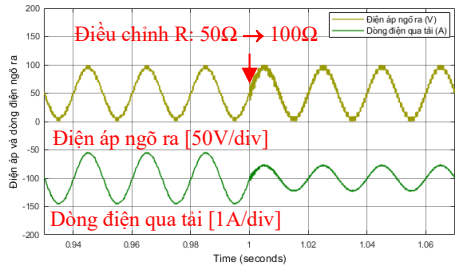
Hình 4.35 Điện áp nhánh 1 khi hệ thống thay đổi cấu trúc; a)-d) 4x4; b)-e) 4x3; c)-f) 3x3

Hình 4.34-Hình 4.37 trình bày kết quả dạng sóng dòng điện các nhánh, điện áp nhánh 1, điện áp các mô-đun nhánh 1, điện áp ngõ ra và dạng sóng dòng điện tải trong trường hợp bộ biến đổi công suất MMC-2D hoạt động với các mô-đun đầy đủ và quá trình thêm hoặc bớt mô-đun trong các cột và nhánh. Kết quả thực nghiệm được đối sánh với kết quả mô phỏng khi bộ biến đổi công suất được vận hành với cùng thông số. Trong trường hợp bộ biến đổi công suất hoạt động bình

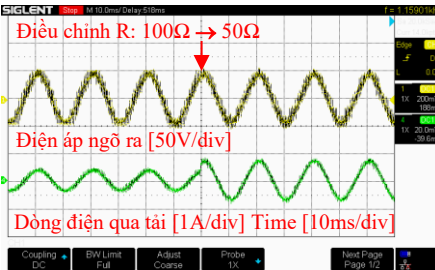
thường hoặc trong trường hợp xảy ra tái cấu trúc, điện áp tụ nhánh 1, điện áp các nhánh, dòng điện tải, điện áp ra cho thấy sự tương đồng giữa mô phỏng và thực nghiệm.



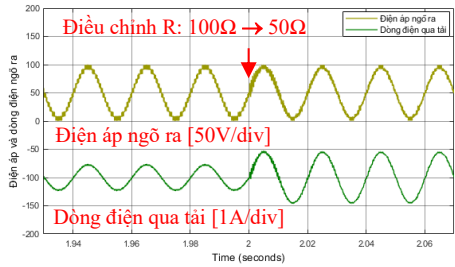
(a) Kết quả thực nghiệm



(c) Kết quả mô phỏng



(b) Kết quả thực nghiệm



(d) Kết quả mô phỏng

Hình 4.37 Điện áp ngõ ra và dòng điện qua tải; a)-c) Điều chỉnh R từ 50Ω lên 100Ω; b)-d) Điều chỉnh R từ 100Ω xuống 50Ω

4.4 Kết luận

Các kênh giao tiếp được thiết lập giữa các mô-đun trong các nhánh và giữa các mô-đun trong cột đầu tiên của cấu trúc. Các mô-đun không phải cột một chỉ giao tiếp với hai mô-đun lân cận trong mỗi nhánh, đây là một cải tiến đáng kể so với các công bố gần đây về điều khiển các cấu trúc 2D. Các mô-đun cho thấy khả năng tự động điều chỉnh nhanh chóng CPA trong quá trình vận hành bình thường và cấu hình lại động khi một số mô-đun được loại bỏ và thêm vào. Các nhánh trong hệ thống có đóng góp ngang nhau vào dòng điện xoay chiều của tải, bộ điều khiển dòng điện của mỗi nhánh đảm bảo cân bằng dòng điện giữa các nhánh khi cấu hình lại động xảy ra.

CHƯƠNG 5 KẾT LUẬN VÀ CÁC ĐỊNH HƯỚNG NGHIÊN CỨU

5.1 Kết luận

Luận án đã phát triển một hệ thống điều khiển phân tán cho bộ biến đổi công suất đa mô-đun ghép nối tiếp và song song, trong đó mỗi mô-đun có khả năng tự động xác định chính xác tín hiệu PWM điều khiển dựa trên vị trí và vai trò của mình trong cấu trúc tổng thể. Phương pháp DSVPWM đã được triển khai thành công cho hệ thống có số pha và số mô-đun trong mỗi pha bất kỳ, đảm bảo khả năng mở rộng và linh hoạt trong ứng dụng. Đối với cấu trúc MMC-2D, các mô-đun sử dụng cơ chế định vị góc pha cục bộ đã nhanh chóng xác lập được sóng mang tam giác phù hợp, đáp ứng yêu cầu đồng bộ hóa trong hệ điều khiển phân tán.

Bộ biến đổi công suất được xây dựng trên nền tảng các mô-đun công suất CHB và các mô-đun liên kết tụ điện, đi kèm với các bộ điều khiển cục bộ tích hợp vi xử lý DSP 28379D. Mô hình mô phỏng hệ thống được thực hiện trên Matlab/Simulink kết hợp với các hàm Matlab function, và chương trình điều khiển được biên dịch bằng ngôn ngữ C từ các thuật toán mô phỏng. Sự kết hợp giữa mô hình mô phỏng và phần cứng thực nghiệm đã xác minh hiệu quả của phương pháp điều khiển phân tán trong việc tạo ra các tín hiệu điều chế chất lượng cao, đáp ứng tốt với thay đổi cấu hình và điều kiện vận hành thực tế. Các nội dung đóng góp chính bao gồm:

Một là, đóng góp về cấu trúc điều khiển phân tán MMC-2D. Luận án đã đề xuất cấu trúc bộ biến đổi công suất MMC-2D điều khiển phân tán, trong đó các mô-đun chỉ trao đổi thông tin góc pha với các mô-đun lân cận. Cách tiếp cận này giúp tối giản yêu cầu về truyền thông và giảm độ phức tạp hệ thống so với các cấu trúc điều khiển tập trung. Các mô-đun trong hệ thống được tổ chức theo cấu trúc ghép nối tiếp và song song, cho phép dễ dàng điều chỉnh công suất và điện áp ngõ ra theo nhu cầu tải. Phương pháp điều khiển phân tán cân bằng dòng điện xoay chiều giữa các nhánh bảo đảm dòng điện ngõ ra của các nhánh là đồng đều trong điều kiện vận hành bình thường cũng như khi cấu trúc hệ thống thay đổi. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm đã xác nhận chất lượng điện áp điều chế tốt,

độ méo hài thấp, và khả năng đáp ứng linh hoạt trước các thay đổi cấu trúc, cho thấy tiềm năng ứng dụng thực tế cao của hệ thống đề xuất.

Hai là, triển khai kỹ thuật DSVPWM phân tán cho bộ biến đổi đa pha, đa bậc. Thuật toán tự động xen kẽ góc pha giúp xác định số lượng mô-đun và vị trí tương đối của chúng trong từng pha. Góc pha đóng vai trò như tín hiệu điều phối trung tâm trong mô hình phân tán. Kỹ thuật DSVPWM sử dụng phép ánh xạ từ không gian vec-tơ đa pha, đa bậc về không gian vec-tơ hai bậc đơn giản hơn, giúp giảm đáng kể khối lượng tính toán tại mỗi bộ điều khiển mô-đun so với chỉ dùng duy nhất một bộ điều khiển trung tâm. Sau khi xác định trạng thái chuyển mạch và thời gian chuyển mạch cần thiết trong không gian hai bậc, kết quả được ánh xạ ngược trở lại không gian đa pha, đa bậc để tạo xung điều khiển phù hợp. Phương pháp này giúp giảm thiểu phép toán so với điều khiển tập trung, đồng thời vẫn đảm bảo các yêu cầu về chất lượng điện năng và vận hành hệ thống. Thực nghiệm và mô phỏng xác nhận rằng kỹ thuật đề xuất có thể mở rộng dễ dàng với bất kỳ số lượng pha hoặc bậc, thích hợp cho nhiều ứng dụng như truyền động động cơ đa pha hoặc các hệ thống năng lượng phân tán.

Ba là, hiệu quả của thuật toán điều khiển phân tán trong MMC-2D. Phương pháp 2D triển khai trong MMC-2D cho thấy hiệu quả về mặt tối ưu hóa cấu trúc truyền thông và tính toán. Cụ thể, số lượng kênh truyền thông giữa các mô-đun được giảm so với các phương pháp trước đây; thuật toán xác lập góc pha sóng mang trong từng mô-đun được đơn giản hóa với số phép toán và thời gian tính toán rút ngắn. Cấu trúc MMC-2D sử dụng bốn kênh truyền thông đối với các mô-đun ở vị trí cột một (hai theo hàng và hai theo cột), và chỉ hai kênh truyền thông đối với các mô-đun còn lại. Điều này tạo điều kiện thuận lợi cho việc sử dụng các vi xử lý chi phí thấp, tốc độ xử lý trung bình trong mỗi mô-đun. Tính đơn giản trong cấu trúc kết nối và thuật toán điều khiển cũng giúp nâng cao độ tin cậy vận hành, khả năng cấu hình lại hệ thống linh hoạt, và thuận lợi trong bảo trì hệ thống.

Bốn là, đề xuất cơ chế tự tổ chức định vị mô-đun trong bộ biến đổi công suất điều khiển phân tán. Luận án đã xây dựng được cơ chế tự tổ chức định vị và xác định vai trò của các mô-đun trong hệ thống bộ biến đổi công suất đa pha, đa bậc

điều khiển phân tán thông qua thông tin góc pha, mà không cần đến sự giám sát từ trung tâm. Cơ chế này giúp hệ thống tự động nhận biết số lượng mô-đun đang hoạt động và cấu trúc liên kết hiện tại, từ đó chủ động điều chỉnh chiến lược điều chế phù hợp với trạng thái thực tế. Nhờ đó, hệ thống có khả năng thích nghi cao với các thay đổi cấu hình như thêm, bớt mô-đun, hoặc sự cố mô-đun, mà vẫn duy trì được chất lượng điện áp ngõ ra và đồng bộ hoạt động giữa các pha. Đây là một bước tiến quan trọng hướng đến việc hiện thực hóa các hệ thống bộ biến đổi công suất có khả năng cấu hình lại, thích ứng và hoạt động bền vững trong môi trường lưới điện linh hoạt hoặc các ứng dụng truyền động phức tạp.

5.2 Định hướng nghiên cứu

Phương pháp DSVPWM chỉ dừng lại ở vấn đề tìm kiếm xung chuyển mạch và thời gian chuyển mạch cho các bộ điều khiển cục bộ. Các vấn đề về việc triển khai phương pháp DSVPWM cần được tiếp tục nghiên cứu nhằm có những đánh giá toàn diện hơn trong nhiều lĩnh vực như chất lượng điện năng, tổn thất công suất, vấn đề điện áp và dòng điện common mode, điện áp chuyển mạch... Điện áp của các mô-đun trong cấu trúc MMC-2D có tác động rất lớn đến chất lượng điện năng, cần có đánh giá chuyên sâu và có giải pháp để đảm bảo điện áp trên các mô-đun ổn định cao nhất.

Khả năng tái cấu trúc động các bộ biến đổi công suất điều khiển phân tán là một trong nhiều ưu điểm nổi bật. Hệ thống có thể tự động điều chỉnh cấu trúc động khi có một hoặc một số mô-đun bị lỗi. Tuy nhiên, việc phát hiện lỗi của mô-đun trong nghiên cứu này chỉ dừng lại ở khía cạnh giả lập. Định hướng điều khiển thông minh, điều khiển sử dụng trí tuệ nhân tạo trên cơ sở thông tin các mô-đun thu nhận được nhằm phát hiện lỗi của mô-đun là hướng nghiên cứu đầy tiềm năng và cần thiết.

Bộ biến đổi công suất đa bậc, đa pha đề xuất hoạt động với số lượng mô-đun trong các pha tương đồng nhau, đây có thể là một yếu tố hạn chế tính linh động và độ tin cậy khi vận hành. Về cơ bản, mỗi pha độc lập có thể vận hành với số lượng mô-đun bất kỳ. Chính vì vậy, cần có các giải pháp để bộ biến đổi công suất có thể vận hành khi các pha có số mô-đun không giống nhau.