

Nghiên cứu so sánh các kỹ thuật điều khiển bộ chỉnh lưu tích cực ba pha

Trương Xuân Quang, Lâm Dẩn Long, Nguyễn Văn Nhờ*



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

TÓM TẮT

Bài báo này nghiên cứu so sánh đặc tính của các phương pháp điều khiển bộ chỉnh lưu tích cực 3 pha theo các điều kiện hoạt động của tải và tần số đóng ngắt. Các phương pháp điều khiển chủ yếu được khảo sát bao gồm: điều khiển định hướng tựa điện áp (VOC), điều khiển công suất trực tiếp (DPC) và điều khiển dự báo dòng điện tựa mô hình (MPC). Phương pháp điều khiển truyền thống VOC được sử dụng rộng rãi trong thực tế. Nguyên lý điều khiển của nó được áp dụng cho nhiều hệ thống ứng dụng kết nối lưới khác nhau như hệ thống truyền động điện, hệ thống biến đổi năng lượng tái tạo. Tuy nhiên, vấn đề tính toán thiết kế tham số tối ưu các bộ điều chỉnh dòng điện cho các điều kiện hoạt động khác nhau của hệ thống là bài toán không dễ dàng. Phương pháp DPC và phương pháp MPC giúp loại bỏ nhược điểm của phương pháp VOC. Đặc biệt phương pháp MPC hiện đang trở thành một phương pháp thu hút nhiều sự quan tâm do khả năng giải quyết tổng quát của nó cho bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu. Trong bài báo, các cấu trúc điều khiển và tính toán tóm tắt thông số bộ điều khiển sẽ được trình bày cho từng phương pháp. Tiêu chí đánh giá chủ yếu của bộ chỉnh lưu tích cực là giảm độ méo dạng dòng điện (THD), đạt hệ số công suất bằng một, và ổn định điện áp phía tải DC. Ba phương pháp được phân tích và đánh giá kiểm chứng dựa theo hai công cụ: dùng phần mềm MATLAB và thực nghiệm đo lường trên mô hình thực tế. Các kết quả đạt được cho thấy phương pháp VOC đạt chất lượng ổn định khi thay đổi tải cũng như tần số đóng ngắt. Trong khi đó, phương pháp MPC sẽ đạt chất lượng tốt với tần số đóng ngắt khá cao.

Từ khoá: Bộ chỉnh lưu điều khiển độ rộng xung, méo dạng sóng hài, hệ số công suất, điều khiển định hướng tựa điện áp (VOC), điều khiển công suất trực tiếp (DPC), điều khiển dự báo dòng điện tựa mô hình (MPC), mạch vòng khóa pha (PLL)

Khoa Điện – Điện Tử, Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM, Việt Nam

Liên hệ

Nguyễn Văn Nhờ, Khoa Điện – Điện Tử, Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM, Việt Nam

Email: nvnho@hcmut.edu.vn

Lịch sử

- Ngày nhận: 10-9-2020
- Ngày chấp nhận: 17-5-2021
- Ngày đăng: 28-5-2021

DOI: 10.32508/stdjet.v4i2.765



Bản quyền

© ĐHQG Tp.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



GIỚI THIỆU

Bộ chỉnh lưu tích cực ba pha được sử dụng rộng rãi trong nhiều ứng dụng công nghiệp do có nhiều ưu điểm như: có kích thước bộ lọc đầu vào nhỏ, đạt độ méo dạng dòng điện đầu vào thấp, điều khiển được hệ số công suất, và có khả năng trao đổi năng lượng theo hai chiều giữa điện áp lưới và tải¹. Một số ứng dụng của bộ chỉnh lưu tích cực có

thể liệt kê như điều khiển chất lượng dòng điện ngõ vào của bộ biến đổi AC-DC-AC cho hệ truyền động điện động cơ xoay chiều 3 pha. Bên cạnh đó, bộ chỉnh lưu tích cực có thể giúp kết nối các nguồn năng lượng tái tạo: sức gió, pin mặt trời^{2,3} với lưới điện. Bộ chỉnh lưu tích cực thường là thiết bị chính trong hệ thống biến đổi nâng cao chất lượng điện: bù lọc tích cực, bộ biến đổi phục hồi điện áp lưới chống các sự cố^{4,5}.

Hiện nay, có nhiều phương pháp điều khiển bộ chỉnh lưu tích cực được công bố và đưa vào ứng dụng trong thực tiễn. Trong đó, một trong các phương pháp điều khiển phổ biến nhất là điều khiển định hướng tựa điện áp (VOC). Phương pháp VOC dựa trên cơ sở biến đổi

các đại lượng tọa độ 3 pha abc sang hệ tọa độ phức đứng yên và sau đó chuyển sang hệ tọa độ quay dq. Sử dụng góc pha đồng bộ của hệ điện áp lưới điện ba pha, điện áp bộ biến đổi sẽ được phân tích theo hai thành phần trục d và q để điều khiển vector dòng điện nạp cho mạch chứa tụ DC. Với yêu cầu đạt hệ số công suất bằng 1 thì thành phần dòng điện theo trục q bằng không. Khi đó trong hệ tọa độ vector bám theo vector áp lưới, vector dòng điện sẽ bám theo vector điện áp lưới này. Dòng điện ba pha sẽ có dạng sin và khả năng truyền tải năng lượng với hiệu suất lớn nhất. Phương pháp VOC được thiết kế với các hiệu chỉnh dòng điện PI. Phương pháp VOC đảm bảo trạng thái ổn định và đáp ứng động học nhanh nhờ tác dụng vòng điều khiển dòng điện bên trong. Các vòng điều chỉnh giúp VOC đạt độ chính xác cao ở chế độ xác lập. Điều đó lý giải khả năng ứng dụng tốt của phương pháp VOC trong rất nhiều ứng dụng trong công nghiệp như điều khiển các hệ thống truyền động điện khác nhau. Tuy nhiên, chất lượng chủ yếu phụ thuộc vào chiến lược thiết kế các bộ điều chỉnh này.

Trích dẫn bài báo này: Quang T X, Long L D, Nhờ N V. Nghiên cứu so sánh các kỹ thuật điều khiển bộ chỉnh lưu tích cực ba pha. *Sci. Tech. Dev. J. - Eng. Tech.*; 4(2):986-998.

Một phương pháp điều khiển khác là điều khiển công suất trực tiếp (DPC). Phương pháp DPC dựa trên cấu trúc chứa vòng điều khiển công suất tác dụng và công suất phản kháng tức thời. Do đó, hệ thống điều khiển thích hợp cho nhiều ứng dụng điều khiển dòng công suất, ví dụ điều khiển các bộ biến đổi kết nối lưới từ các nguồn năng lượng tái tạo như điện gió, điện mặt trời, điều khiển các bộ biến đổi cải tiến chất lượng điện. Hệ thống điều khiển không cần trang bị vòng điều khiển dòng điện vòng trong và không có khối điều chế PWM. Trạng thái đóng ngắt linh kiện bán dẫn trong chu kỳ xung làm việc được xác định từ một Bảng trạng thái trên cơ sở sai số giữa giá trị yêu cầu và ước tính của công suất tác dụng và phản kháng. Bảng chuyển đổi không phải là rất chính xác nên DPC thể hiện độ gợn sóng công suất tương đối lớn². Để khắc phục nhược điểm lựa chọn vector không chính xác trong DPC, MPC được đề xuất và nó có thể đạt được hiệu quả hoạt động với trạng thái ổn định tốt hơn. MPC cũng tương tự như DPC ở chỗ nó cũng chọn và áp dụng một vector điện áp trong suốt một chu kỳ điều khiển. Tuy nhiên, các vector được chọn không lấy từ một bảng chuyển đổi xác định trước mà đạt được bởi giải thuật tối ưu một hàm chi phí. Trong điều khiển mô hình dự báo dòng điện, hàm chi phí là sai số giữa giá trị dòng dự báo và giá trị dòng mong muốn. Mô hình hệ thống sử dụng dự báo giá trị dòng tải tương lai cho mỗi vector điện áp khác nhau. Vector điện áp giảm thiểu tối đa sai số dòng được chọn và trạng thái chuyển mạch tương ứng tạo ra³. Với thuật toán đơn giản, dễ hiểu và linh hoạt trong việc xử lý những hạn chế phi tuyến, MPC đã và đang được nghiên cứu phát triển mạnh có kết hợp với các kỹ thuật điều khiển khác nhau^{4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100}.

Trong bài báo này, hai đặc tính chất lượng quan trọng của các hệ thống điều khiển bộ chỉnh lưu tích cực như độ méo dạng sóng hài dòng điện ngõ vào và hệ số công suất sẽ được khảo sát theo sự thay đổi của tải và tần số đóng ngắt. Đáp ứng của các phương pháp điều khiển bộ chỉnh lưu sẽ được kiểm chứng bằng mô phỏng và thực nghiệm. Kết quả thu được của các phương pháp điều khiển bộ chỉnh lưu tích cực ba pha như VOC và DPC sẽ được đánh giá và so sánh với phương pháp MPC. Từ đó các biểu đồ so sánh sẽ được dẫn giải.

MÔ HÌNH CHỈNH LƯU PWM

Sơ đồ bộ chỉnh lưu PWM ba pha được mô tả trên Hình 1 bao gồm: nguồn xoay chiều ba pha, cuộn kháng lọc RL, mạch chỉnh lưu cầu ba pha chứa 6 IGBT, tụ điện C một chiều và tải. Hoạt động bộ chỉnh lưu dựa trên sự tương tác giữa hai nguồn năng lượng đó là điện năng cung cấp bởi điện áp trên lưới điện xoay chiều ba pha và điện năng được tích lũy trên tụ

điện. Các van IGBT hoạt động như một công tắc với hai trạng thái đóng và ngắt, được điều khiển đưa điện áp trên tụ C ra kết nối với điện áp của lưới điện.

Bằng cách sử dụng chuyển đổi hệ tọa độ ba pha abc sang hệ tọa độ hai thành phần², mô hình toán học của chỉnh lưu PWM trong hệ tọa độ $\alpha\beta$ được biểu diễn như sau:

$$v_s = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + u_s \quad (1)$$

Trong đó: u_s , v_s và i_s là vector điện áp chuyển đổi, vector điện áp lưới và vector dòng điện lưới; R_s và L_s là điện trở và điện cảm bộ lọc ngõ vào.

Công suất phức S biểu diễn theo hàm:

$$S = p + jq = \frac{3}{2} (i_s * v_s) \quad (2)$$

Trong đó p và q là các đại lượng công suất tác dụng và công suất phản kháng tức thời.

CÁC PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN BỘ CHỈNH LƯU TÍCH CỰC

Điều khiển định hướng tựa điện áp lưới

Điều khiển định hướng tựa điện áp lưới được đưa ra dựa vào phương pháp điều khiển định hướng trường của máy điện cảm ứng. Khi đó, hệ thống sẽ có đáp ứng tốt nhờ có các vòng điều khiển dòng điện bên trong. Với phương pháp này điều khiển dòng điện được thực hiện theo hai thành phần dòng điện một chiều nhờ phép biến đổi tọa độ abc về tọa độ quay với tần số đồng bộ của lưới điện.

Theo nghiên cứu của Lennart², trong hệ tọa độ dq:

$$v_{dq} = v_s e^{-j\theta} \quad (3)$$

Thay (3) vào (1) ta được:

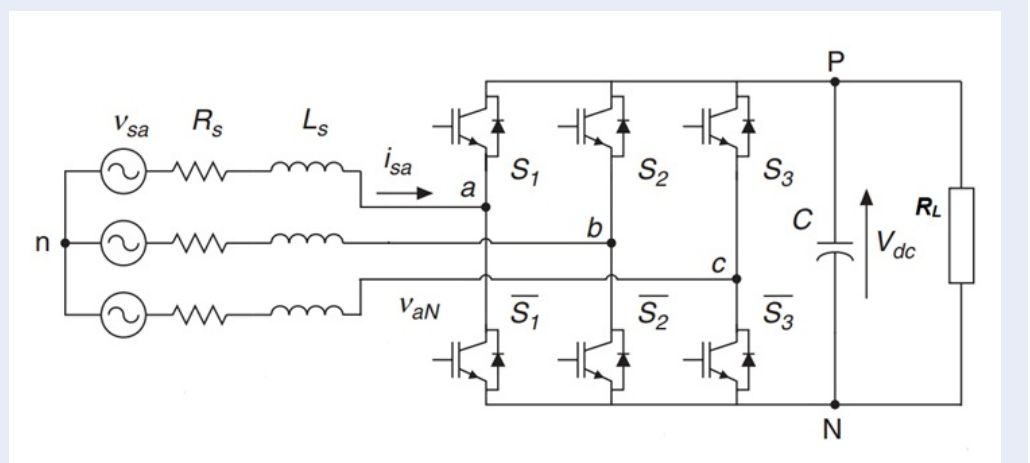
$$v_s = R_s i_{dq} + L_s \frac{di_{dq}}{dt} + jL_s \omega i_{dq} + u_{sdq} \quad (4)$$

Mô tả riêng các thành phần d và q:

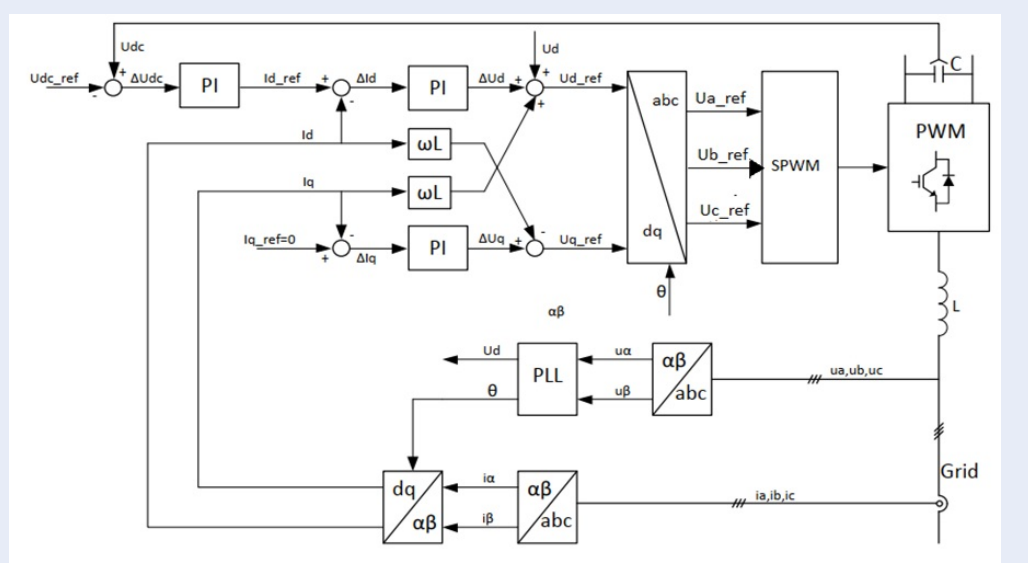
$$v_d = R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - L_s \omega i_q + u_{sd} \quad (5)$$

$$v_q = R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} - L_s \omega i_d + u_{sq} \quad (6)$$

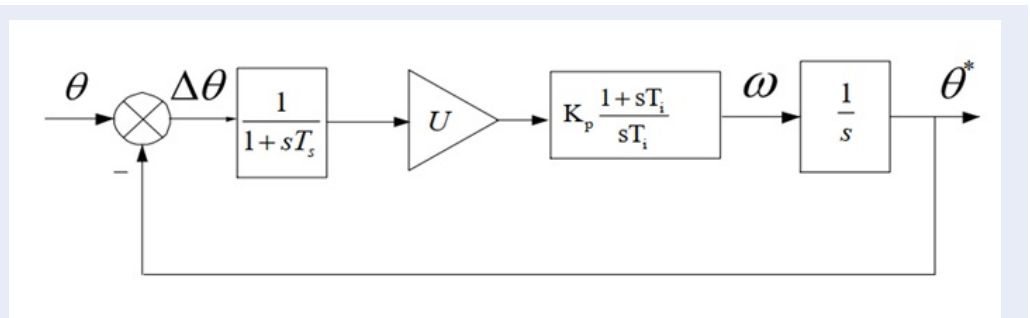
Trên Hình 2 là cấu trúc điều khiển chỉnh lưu tích cực trên tọa độ dq bằng phương pháp tựa điện áp lưới. Mạch vòng khóa pha (PLL) cung cấp thông tin góc đồng bộ θ cho hệ thống điều khiển. Giá trị dòng điện đặt trên trục q được thiết lập bằng không, đảm bảo cho vector dòng điện bám theo vector điện áp. Độ lớn dòng điện đặt trên trục d được tính toán từ bộ điều chỉnh điện áp tụ một chiều u_{dc} , sẽ mang thông



Hình 1: Mô hình chuyển đổi chỉnh lưu PWM ba pha



Hình 2: Cấu trúc điều khiển bộ chỉnh lưu tích cực theo phương pháp VOC



Hình 3: Sơ đồ tuyến tính hóa mạch vòng pha khóa PLL

tin thành phần năng lượng cần phải nạp hay xả để ổn định điện áp trên tụ điện.

Hệ thống điều khiển thể hiện cấu trúc điều khiển tầng (cascade control) trong đó, vòng điều chỉnh dòng điện vừa có tác dụng nhanh chóng đạt giá trị dòng điện yêu cầu do bộ điều chỉnh điện áp đưa ra, vừa loại bỏ tác động của nhiễu lên quá trình dòng điện, và do đó đảm bảo đạt chất lượng cao. Tầng điều chỉnh điện áp có tác dụng đảm bảo ổn định giá trị điện áp một chiều trên tụ điện khi có sự cố thay đổi của tải.

Giá trị tính toán sau bộ điều chỉnh dòng là các giá trị điện áp điều chế u_a, u_b, u_c được đưa qua bộ điều chế độ rộng xung (Pulse-width modulation PWM) để tạo ra các tín hiệu kích đóng linh kiện IGBT.

Vòng khóa pha:

Trong cấu trúc điều khiển định hướng tựa điện áp, nhiệm vụ phát hiện góc đồng bộ có ý nghĩa quan trọng để đảm bảo hệ thống điều khiển làm việc đúng theo nguyên lý thiết kế. Do đó, thuật toán vòng khóa pha (PLL) được xây dựng nhằm phát hiện góc pha của vector điện áp lưới.

Trên Hình 3 là sơ đồ tuyến tính hóa mạch vòng khóa pha PLL. Đại lượng cần điều khiển là góc quay trên trục dq θ^* , đại lượng đặt là góc đồng bộ điện áp lưới θ . Yêu cầu điều khiển góc quay trên trục d bám theo góc pha điện áp lưới, nghĩa là θ^* sẽ mang thông tin của θ . Cấu trúc PLL như trên sẽ không có nhiễu đo hay nhiễu quá trình. Nhiều chủ yếu tham gia vào hệ thống là nhiễu đầu vào, tức giá trị đặt không mong muốn như góc pha của thành phần hài bậc cao và thành phần thứ tự nghịch.

Theo nghiên cứu của Blasko và cộng sự⁷, phương trình hàm truyền hệ hở:

$$G(s) = k_p \frac{1 + sT_i}{sT_i} \frac{1}{1 + sT_s} \frac{U}{s} \quad (7)$$

Thiết kế các thông số trong (7) có thể làm theo phương pháp tối ưu đối xứng.

Tính toán thông số mạch vòng điều khiển:

Trong tài liệu của tác giả Rolf⁸ sử dụng phương pháp mô hình nội -Internal Model Control (IMC) để tính toán các tham số bộ điều chỉnh PI cho cả 2 mạch vòng điều khiển dòng điện và áp DC.

Theo nghiên cứu của Rolf⁸, hàm truyền hệ thống theo IMC:

$$F(s) = \frac{\alpha^n}{(s + \alpha)^n - \alpha^n} \widehat{G}^{-1}(s) \quad (8)$$

Trong đó: α là băng thông của bộ lọc thông thấp, \widehat{G} là ước lượng của hàm đối tượng, n là bậc bộ lọc.

Theo nghiên cứu của Rolf⁸, với mạch vòng điều khiển dòng điện:

$$k_p = \alpha_i \widehat{R}_s \quad (9)$$

$$k_i = \alpha_i \widehat{R}_s \quad (10)$$

Với giá trị băng thông α_i có thể chọn nhỏ hơn 10 lần tần số góc lấy mẫu:

$$\alpha_i < 2\pi \frac{F_s}{10} \quad (11)$$

Với mạch vòng điều khiển điện áp:

$$k_p = \frac{\alpha_v \widehat{C}}{3\widehat{E}_m} \quad (12)$$

Độ lớn băng thông α_v , có thể chọn nhỏ hơn 10 lần so với độ lớn băng thông bộ điều khiển dòng:

$$\alpha_v < \frac{\alpha_i}{10} \quad (13)$$

Điều chế độ rộng xung sin

Kỹ thuật điều chế độ rộng xung sin dựa trên nguyên lý so sánh ba điện áp tham chiếu sin U_a^*, U_b^*, U_c^* với sóng mang tam giác như mô tả ở Hình 4. Từ đó các tín hiệu logic Sa, Sb, Sc được tạo ra xác định trạng thái chuyển đổi của các IGBT.

Điều khiển công suất trực tiếp

Ý tưởng chính của phương pháp điều khiển công suất trực tiếp là thông qua điều khiển công suất tác dụng P và công suất phản kháng Q để đạt được mục tiêu điều khiển. Hình 5 là sơ đồ khối của phương pháp điều khiển công suất trực tiếp.

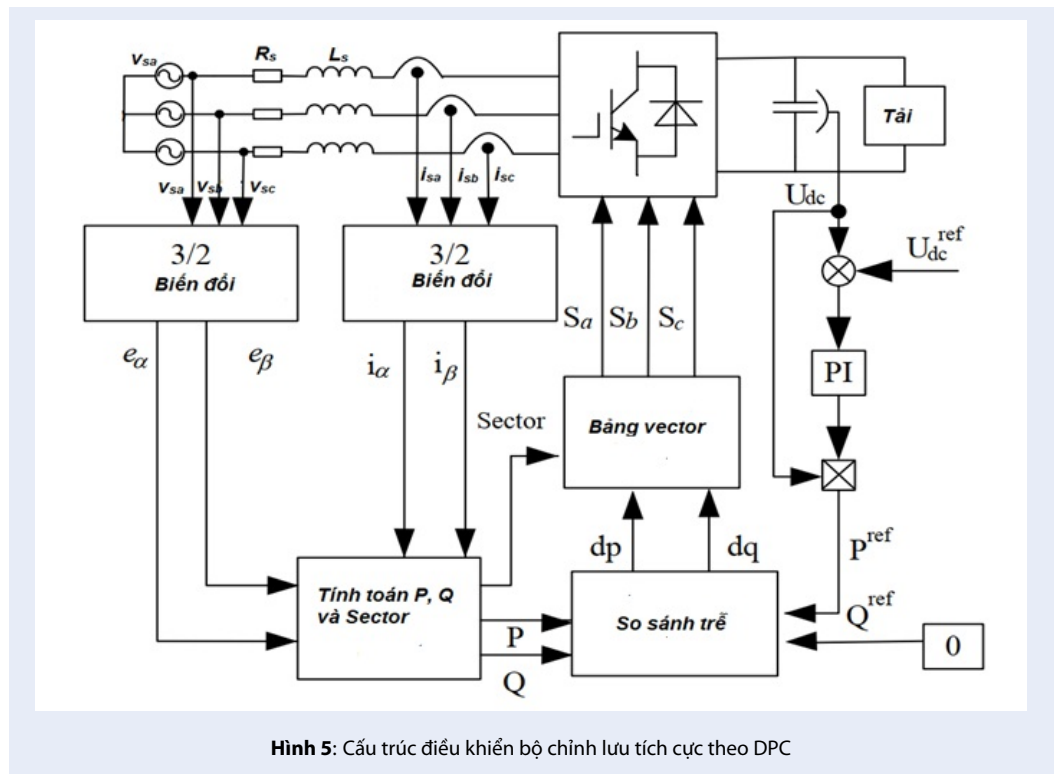
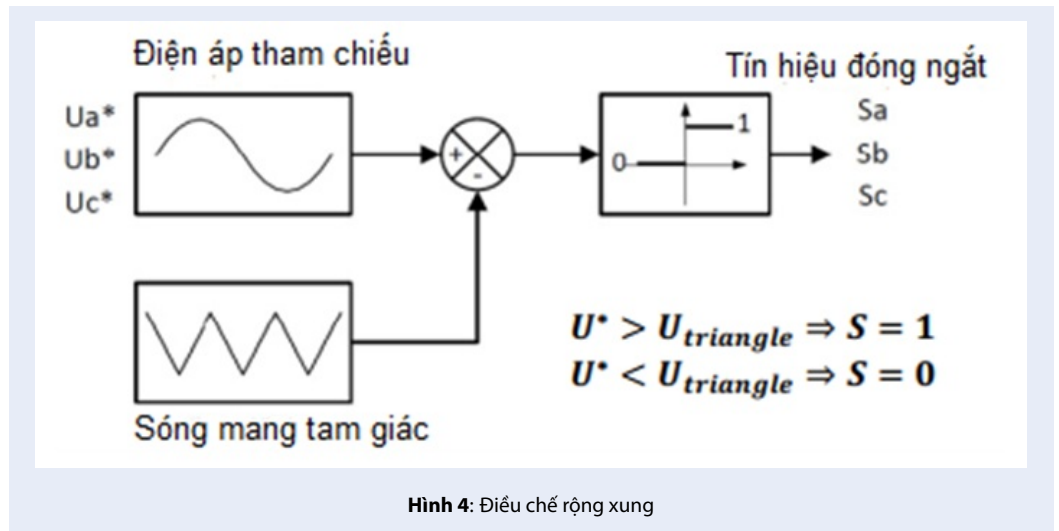
Đầu tiên ta chuyển đổi điện áp và dòng điện lưới sang hệ tọa độ α, β để tính toán công suất tác dụng P, công suất phản kháng Q cũng như góc của vector điện áp lưới. Sau khi tính toán, giá trị thu được P, Q sẽ so sánh với công suất tác dụng tham chiếu P_{ref} (được tính thông qua bộ điều khiển PI điện áp DC) và công suất phản kháng tham chiếu Q_{ref} (đặt bằng 0 để hệ số công suất bằng 1) thông qua bộ so sánh trễ (hysteresis). Từ giá trị đầu ra bộ so sánh trễ và sector điện áp lưới, và dựa vào Bảng chuyển đổi trạng thái để xuất ra trạng thái đóng ngắt để kích linh kiện IGBT.

Công suất tác dụng và công suất phản kháng được tính toán theo lý thuyết công suất tức thời⁹:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} \text{Re}(i_s * v_s) = \frac{3}{2} (i_\alpha * e_\alpha + i_\beta * e_\beta) \\ Q = \frac{3}{2} \text{Im}(i_s * v_s) = \frac{3}{2} (i_\alpha * e_\beta - i_\beta * e_\alpha) \end{cases} \quad (14)$$

Bộ điều khiển trễ

Bộ điều chỉnh được sử dụng là bộ so sánh trễ; tín hiệu đầu vào là sai số giữa công suất tác dụng, công suất phản kháng so với các giá trị tham chiếu. Giá trị đầu ra xác định trạng thái chuyển đổi của bộ chỉnh lưu.



Đầu ra bộ so sánh trễ ứng với công suất tác dụng được thiết lập như sau:

$$\begin{cases} S_p = 1, & p < p_{ref} - H_p \\ S_p = 0, & p > p_{ref} + H_p \end{cases} \quad (15)$$

tương tự cho công suất phản kháng:

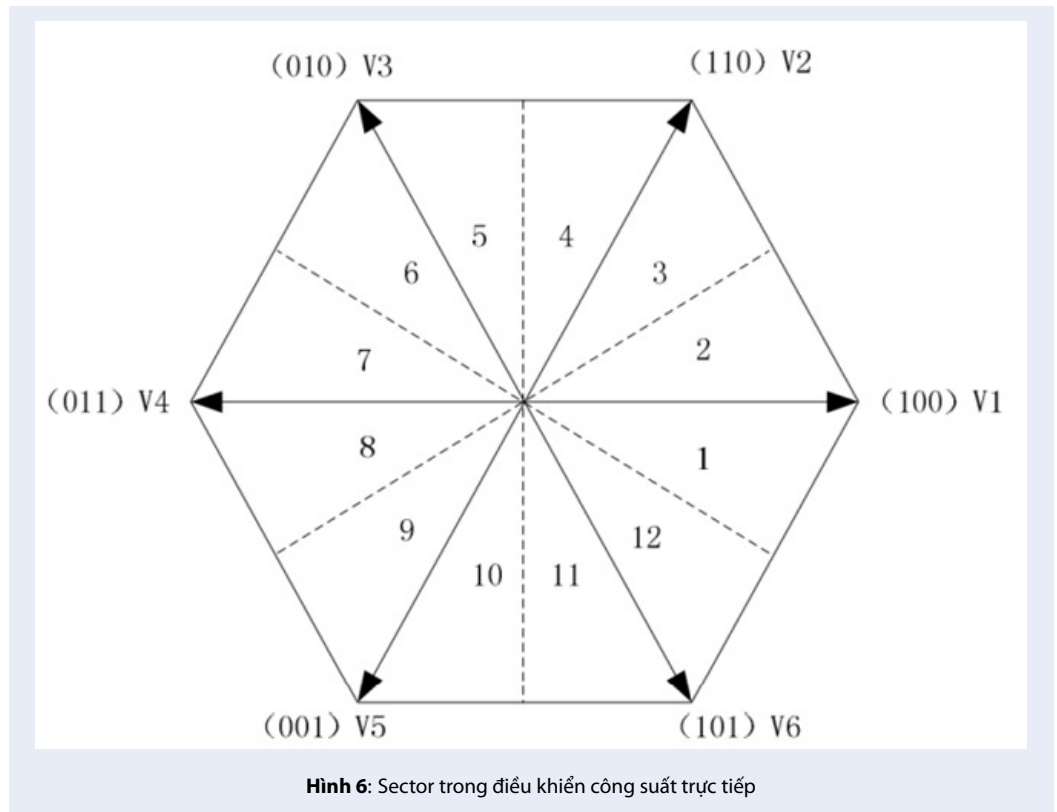
$$\begin{cases} S_q = 1, & q < q_{ref} - H_q \\ S_q = 0, & q > q_{ref} + H_q \end{cases} \quad (16)$$

trong đó H_p và H_q là band trễ của bộ so sánh trễ.

Bảng chuyển đổi

Nguyên tắc của điều khiển công suất trực tiếp là chọn ra trạng thái chuyển đổi (S_a, S_b, S_c) từ bảng chuyển đổi, dựa vào sai số giữa công suất tác dụng và công suất phản kháng cũng như vị trí góc của vector điện áp lưới.

Hình 6 thể hiện việc chia mặt phẳng vector điện áp lưới thành 12 sector.



Hình 6: Sector trong điều khiển công suất trực tiếp

Các sector sẽ được tính toán theo công thức:

$$(n-2) \frac{\pi}{6} \leq \theta < (n-1) \frac{\pi}{6} \quad (17)$$

trong đó: n là số sector n = 1, 2, ...12.

θ là góc lưới điện áp được tính bởi:

$$\theta = \arctan\left(\frac{v_\beta}{v_\alpha}\right)$$

Bảng chuyển đổi được xác định để giảm sai số giữa giá trị tham chiếu và giá trị đo lường của công suất tác dụng, công suất phản kháng trong mỗi chu kỳ lấy mẫu. Trong thực tế, có nhiều bảng chuyển đổi khác nhau đã được đề xuất, phân tích cũng như so sánh hiệu quả. Bảng chuyển đổi được tham khảo và trình bày ở Bảng 1[?].

Điều khiển mô hình dự báo dòng điện

Khác với phương pháp DPC, khi mà các vector áp được chọn từ một Bảng chuyển đổi được xác định trước, trong phương pháp MPC, vector được chọn bằng cách đánh giá một hàm chi phí lần lượt cho mỗi vector điện áp chuyển đổi. Vector điện áp nào giảm thiểu tối đa hàm chi phí sẽ được lựa chọn.

Hình 7 mô tả sơ đồ nguyên lý mô hình thuật toán điều khiển dự báo dòng điện. Giá trị dòng điện mong

muốn được lấy từ vòng điều khiển bên ngoài và dòng tải $i(k)$ ở trạng thái hiện tại được đo. Trên sơ đồ, một mô hình dự báo xác định giá trị dòng tải cho khoảng thời gian lấy mẫu tiếp theo $i(k+1)$ cho lần lượt các vector điện áp khác nhau. Hàm chi phí g đánh giá sai số giữa giá trị dòng mong muốn và giá trị dòng dự báo $i(k+1)$ cho mỗi vector điện áp. Cuối cùng, vector điện áp giảm thiểu tối sai số dòng điện sẽ được chọn và trạng thái chuyển mạch tương ứng sẽ được xuất ra, dùng cho kích IGBT.

Theo Hình 1, giả sử trạng thái chuyển đổi IGBT được biểu diễn bởi S_a, S_b, S_c :

$$S_a = \begin{cases} 1, S_1 \text{ on and } S_4 \text{ off} \\ 0, S_1 \text{ off and } S_4 \text{ on} \end{cases} \quad (19)$$

$$S_b = \begin{cases} 1, S_2 \text{ on and } S_5 \text{ off} \\ 0, S_2 \text{ off and } S_5 \text{ on} \end{cases} \quad (20)$$

$$S_c = \begin{cases} 1, S_3 \text{ on and } S_6 \text{ off} \\ 0, S_3 \text{ off and } S_6 \text{ on} \end{cases} \quad (21)$$

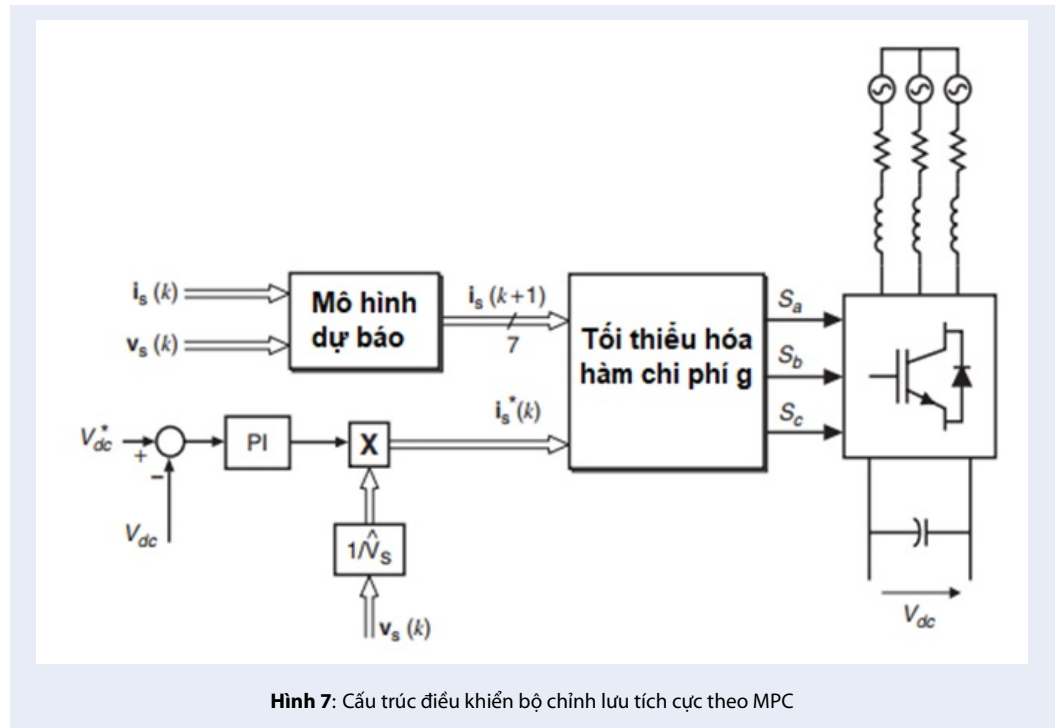
Những tín hiệu chuyển mạch này xác định điện áp đầu ra:

$$\begin{cases} v_{aN} = S_a V_{dc} \\ v_{bN} = S_b V_{dc} \\ v_{cN} = S_c V_{dc} \end{cases} \quad (22)$$

Bảng 1: Bảng chuyển đổi phương pháp điều khiển công suất trực tiếp

S_p	S_q	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
1	0	v_5	v_6	v_6	v_1	v_1	v_2	v_2	v_2	v_2	v_4	v_4	v_5
	1	v_3	v_4	v_4	v_5	v_5	v_6	v_6	v_1	v_1	v_2	v_2	v_3
0	0	v_6	v_1	v_1	v_2	v_2	v_3	v_3	v_4	v_4	v_5	v_5	v_6
	1	v_1	v_2	v_2	v_3	v_3	v_4	v_4	v_5	v_5	v_6	v_6	v_1

$v_1(110), v_2(010), v_3(011), v_4(001), v_5(101), v_6(000), v_7(111)$



Hình 7: Cấu trúc điều khiển bộ chỉnh lưu tích cực theo MPC

V_{dc} : điện áp nguồn DC.

Vector điện áp đầu ra được xác định²:

$$v = \frac{2}{3} (v_{aN} + av_{bN} + a^2v_{cN}) \quad (23)$$

Trong đó v_{aN}, v_{bN}, v_{cN} là điện áp pha của chuyển đổi và

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (24)$$

Dựa vào (22),(23), các vector áp bộ chỉnh lưu xác định như mô tả trên Bảng 2.

Hàm chi phí

Hàm chi phí tính toán sai số giữa dòng mong muốn và dòng dự báo.

$$g = |i_{\alpha}^*(k) - i_{\alpha}^p(k+1)| + |i_{\beta}^*(k) - i_{\beta}^p(k+1)| \quad (25)$$

Trong đó $i_{\alpha}^p(k+1), i_{\beta}^p(k+1)$ là phần thực và phần ảo của vector dòng tải dự báo $i^p(k+1)$ và $i_{\alpha}(k), i_{\beta}(k)$

là phần thực và phần ảo của vector dòng điện mong muốn đạt được.

Mô hình tải

Theo², ta có:

$$v_{sa} = L_s \frac{di_{sa}}{dt} + R_s i_{sa} + v_{aN} - v_{nN} \quad (26)$$

$$v_{sb} = L_s \frac{di_{sb}}{dt} + R_s i_{sb} + v_{bN} - v_{nN} \quad (27)$$

$$v_{sc} = L_s \frac{di_{sc}}{dt} + R_s i_{sc} + v_{cN} - v_{nN} \quad (28)$$

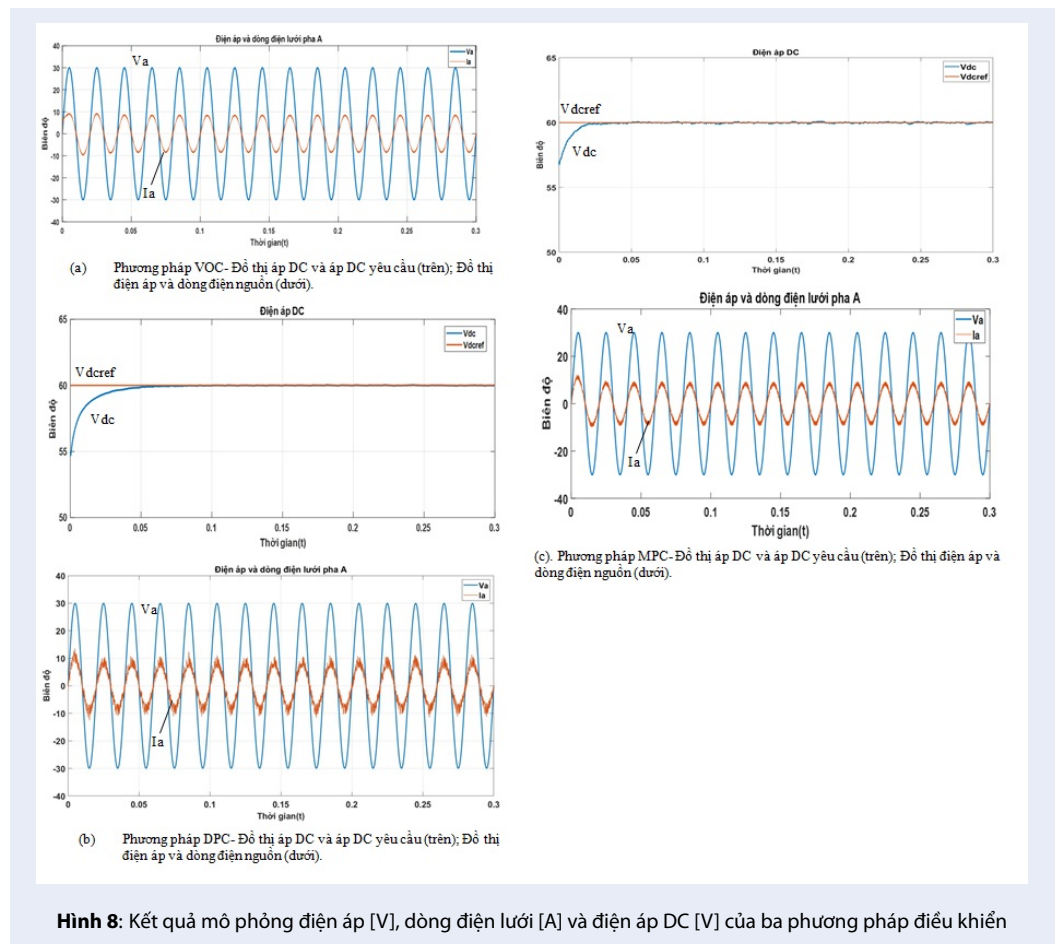
Theo định nghĩa vector không gian:

$$v_s = \frac{2}{3} (v_{sa} + av_{sb} + a^2v_{sc}) \quad (29)$$

$$v_s = L_s \frac{di_s}{dt} + v_{afe} + R_s i_s \quad (30)$$

Bảng 2: Trạng thái đóng ngắt và vector điện áp

Sa	Sb	Sc	Vector điện áp
0	0	0	$V_0 = 0$
1	0	0	$V_1 = \frac{2}{3}V_{dc}$
1	1	0	$V_2 = \frac{2}{3}V_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
0	1	0	$V_3 = -\frac{1}{3}V_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
0	1	1	$V_4 = -\frac{2}{3}V_{dc}$
0	0	1	$V_5 = -\frac{1}{3}V_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
1	0	1	$V_6 = \frac{1}{3}V_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
1	1	1	$V_7 = 0$



Hình 8: Kết quả mô phỏng điện áp [V], dòng điện lưới [A] và điện áp DC [V] của ba phương pháp điều khiển

Trong đó v_s là điện áp cung cấp, v_i là vector dòng điện đầu vào, v_{afe} điện áp tạo ra bởi chuyển đổi(xác định theo Bảng 1).

$$i_s = \frac{2}{3} (i_{sa} + ai_{sb} + a^2 i_{sc}) \quad (31)$$

Mô hình rời rạc thời gian

Đạo hàm dòng tải được thay thế bằng hàm Euler xấp xỉ:

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} \quad (33)$$

Dòng dự báo tính toán theo hàm rời rạc thời gian:

$$i_s(k+1) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_s}\right) i_s(k) + \frac{T_s}{L_s} [v_s(k) - v_{afe}(k)] \quad (34)$$

CÁC KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Để đánh giá và so sánh hiệu quả của các phương pháp mô tả ở trên, hệ thống bộ chỉnh lưu tích cực 3 pha được xây dựng trên mô hình mô phỏng dùng MATLAB và mô hình thực nghiệm thực tế công suất nhỏ điều khiển bằng DSP TMS320F28779D. Tần số đóng ngắt cho phương pháp VOC là 5Khz, DPC và MPC là 20Khz. Bảng 3 liệt kê các thông số mô phỏng và thực nghiệm

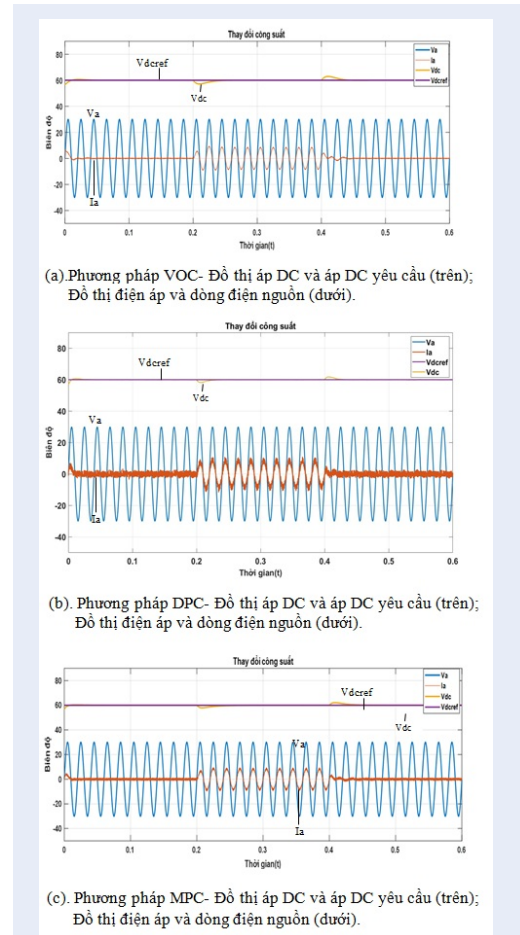
Bảng 3: Bảng thông số mô phỏng và thực nghiệm

	Thông số
Công suất biến đổi	100W
Điện áp lưới	36VAC/50Hz
Lượng đặt điện áp một chiều	60V
Giá trị tụ mạch DC	1800µF
Cuộn cảm lọc	4mH
Điện trở tải	48Ω

Kết quả mô phỏng

Mục tiêu chất lượng chung của các phương pháp điều khiển bộ chỉnh lưu tích cực là giảm độ méo dạng dòng điện nguồn AC, điều khiển đạt hệ số công suất bằng 1 và ổn định điện áp cấp cho tải DC.

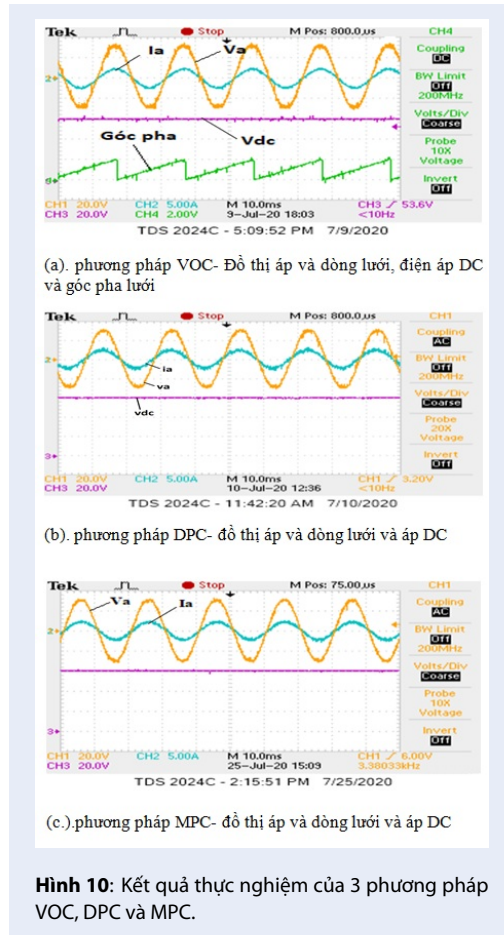
Trước khi vận hành điều khiển hoạt động bộ chỉnh lưu, điện áp tụ DC của bộ chỉnh lưu được nạp trước đến giá trị gần bằng giá trị đặt. Với số liệu thiết lập cho cấu hình bộ chỉnh lưu nêu trong Bảng 3, điện áp DC nạp đến giá trị đặt 60V, trong thời gian từ 2 đến 3 chu kì để điều khiển đạt giá trị xác lập. Kết quả mô phỏng quá trình áp DC, quá trình điện áp và dòng điện pha



Hình 9: Mô phỏng quá trình quá độ điện áp trên tụ DC [V], và dòng lưới [A] khi thay đổi công suất tải 0% lên 75% và ngược lại $V_{dc}=60V$

nguồn mô tả trên các Hình 8a-c. Khi phân tích THD bằng khối phân tích phổ trong MATLAB, khi tải hoạt động ở 75% công suất định mức, THD dòng điện theo phương pháp VOC là 2.9%. Trong khi đó THD theo DPC và MPC lần lượt là 13.4% và 3.95%. Hệ số công suất của các phương pháp đều duy trì ở giá trị gần bằng 1.

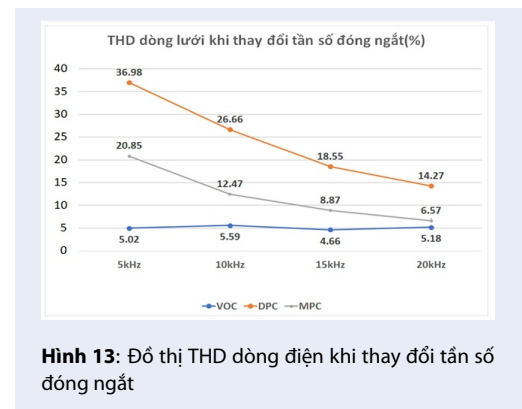
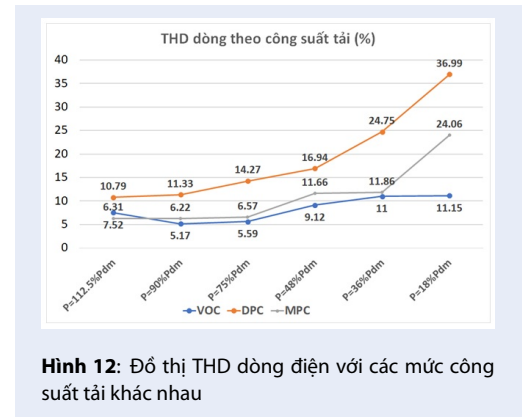
Hình 9 mô tả quá trình mô phỏng đáp ứng quá độ khi thay đổi công suất tải đột ngột, được chọn cho trường hợp thay đổi đột ngột công suất tải từ 0% công suất định mức lên 75% công suất định mức và ngược lại. Tại thời điểm $t=0.2s$ đóng tải, $t=0.4s$ ngắt tải. Cả 3 phương pháp VOC, DPC và MPC đều cho thấy khả năng đáp ứng tốt với sự thay đổi của tải. Điện áp DC bám tốt theo giá trị đặt 60V.



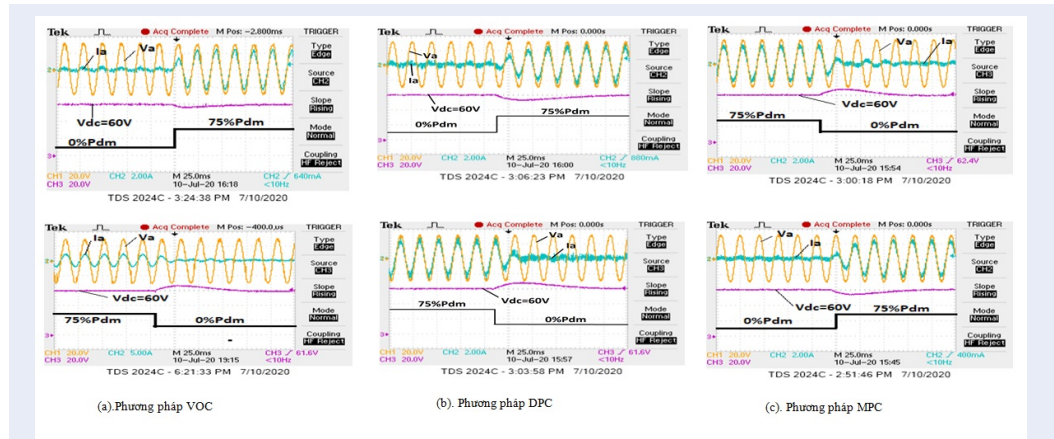
Kết quả thực nghiệm

Thực hiện thực nghiệm trên mô hình thực tế sử dụng DSP TMS320F28379D. Khảo sát ở hai chế độ: xác lập và quá độ khi thay đổi công suất tải. Giống như kết quả mô phỏng ở phần trước, kết quả thực nghiệm kiểm chứng quá trình các đại lượng điện áp và dòng điện nguồn AC ngõ vào và điện áp tụ DC ngõ ra. Hình 10 thể hiện kết quả thực nghiệm ở chế độ xác lập. Tiến hành phân tích THD dòng điện của mỗi phương pháp, với VOC thực hiện ở tần số lấy mẫu 5Khz, THD dòng điện là 5.59% và độ gợn sóng điện áp DC 1.80%- xem Hình 10a). Trong khi đó với DPC-xem Hình 10b) và MPC-xem Hình 10c) thực hiện ở tần số lấy mẫu 20Khz, THD dòng điện lần lượt là: 14.27% và 6.57%, độ gợn sóng điện áp DC lần lượt là 1.63% và 1.61%. So với đáp ứng trên mô phỏng MATLAB, đáp ứng thực nghiệm có THD lớn hơn do ảnh hưởng các linh kiện thực tế và tác dụng thời gian chết. Kết quả thực nghiệm cho thấy, phương pháp điều khiển VOC và MPC có THD dòng điện giảm đáng kể. Với phương pháp DPC, độ méo dạng dòng điện cao hơn.

Kết quả thực nghiệm khi khảo sát đáp ứng chế độ quá độ khi thay đổi điện áp phía DC được mô tả trên Hình 11. Hình 11 mô tả quá trình quá độ của điện áp và dòng điện pha nguồn AC và điện áp trên tụ một chiều khi tải thay đổi đột ngột từ 0% đến 75% công suất định mức và ngược lại. Đồ thị đo được cho thấy dòng điện qua nguồn AC thay đổi đạt sự đồng pha với điện áp nguồn ngay trong chu kỳ đầu tiên. Cả 3 phương pháp đều cho thấy khả năng đáp ứng tốt điện áp một chiều khi có sự thay đổi đột ngột của tải. Tuy nhiên, VOC và MPC mất khoảng 3 đến 4 chu kỳ để đạt được giá trị xác lập điện áp DC ở 60V. Trong khi đó, với DPC cần khoảng 5 đến 6 chu kỳ.



Dựa trên Hình 12, khi công suất tải thay đổi từ 18% đến 112.5% công suất định mức, THD dòng điện có giá trị lớn ở mức công suất tải nhỏ, và giảm dần khi công suất tăng. THD dòng điện đạt giá trị thấp ở công suất định mức. Trong đó, VOC có độ méo dạng dòng điện nhỏ nhất, mặc dù đóng ngắt ở tần số thấp 5Khz. MPC cao hơn VOC nhưng vẫn ở mức thấp. DPC có độ méo dạng dòng điện cao nhất. Kết quả thực nghiệm cho thấy, độ méo dạng dòng điện của phương pháp VOC không thay đổi nhiều khi tăng tần



Hình 11: Kết quả thực nghiệm khi đóng ngắt tải 0% lên 75% công suất định mức và ngược lại. Quá trình các đại lượng áp và dòng lưới, áp DC và công suất tải.

số đóng ngắt. Theo Hình 13 tần số thay đổi từ 5Khz đến 20Khz, THD dòng điện thay đổi không đáng kể dao động trong khoảng 4.66% đến 5.59%. Trong khi đó, chất lượng dòng điện ngõ vào ở hai phương pháp còn lại DPC và MPC phụ thuộc nhiều vào tần số đóng ngắt. Kết quả chung, phương pháp MPC đạt tốt hơn về cải thiện THD so với DPC. Ở tần số đóng ngắt thấp, độ méo dạng THD của MPC và DPC khá lớn và phương pháp MPC có thể đạt độ méo dạng thấp gần bằng của phương pháp VOC khi tần số đóng ngắt khá cao, trong trường hợp cấu hình cho ở Bảng 3, giá trị tần số chọn khoảng trên 20kHz như chỉ ra ở Hình 13. Do đó, ở tần số đóng ngắt cao MPC tỏ ra có lợi thế về THD dòng điện. Tuy nhiên, với hệ thống lớn có nhiều trạng thái đóng ngắt (ví dụ điều khiển hệ thống cấp nguồn bởi các hệ thống biến đổi đa bậc), hoặc bài toán có hàm chi phí nhiều mục tiêu??, khối lượng tính toán tối ưu hàm chi phí sẽ mất nhiều thời gian và trở thành vấn đề kỹ thuật khó khăn. Xu hướng chung sẽ là tìm cách đơn giản bài toán MPC, ví dụ giảm hàm mục tiêu, hoặc giới hạn số trạng thái liên quan trong phạm vi nhỏ hơn???. Một xu hướng cải thiện chất lượng điều khiển bộ chỉnh lưu tích cực của phương pháp MPC là kết hợp MPC truyền thống với các phương pháp điều khiển hiện đại??.

KẾT LUẬN

Bài báo đưa ra kết quả đánh giá và so sánh chất lượng đáp ứng hệ thống bộ chỉnh lưu tích cực ba pha của ba phương pháp điều khiển VOC, DPC và MPC. Các kết quả mô phỏng trên MATLAB và các kết quả thí nghiệm trên thiết bị cho thấy khả năng ổn định tốt điện áp mạch DC và sự cải thiện THD dòng điện lưới cho cả ba phương pháp điều khiển: điều khiển

định hướng tựa điện áp (VOC), điều khiển công suất trực tiếp (DPC), điều khiển mô hình dự báo dòng điện(MPC). VOC cho thấy khả năng cải thiện THD tốt nhất và không phụ thuộc nhiều vào tần số đóng ngắt. Phương pháp VOC có thể đảm bảo được chất lượng điều khiển có độ méo dạng dòng điện nguồn thấp dù hoạt động ở tần số đóng ngắt thấp khoảng vài kHz. Phương pháp MPC có thuật toán đơn giản và dễ thực hiện trên thiết bị phần cứng, có thể làm giảm đáng kể THD dòng điện lưới nhưng đòi hỏi tần số đóng ngắt cao hơn. Điều này dễ kéo sự tăng công suất tổn hao do chuyển mạch, và do đó giảm hiệu suất thiết bị. Do đó, có thể thích hợp với các linh kiện mới công nghệ SiC và GaN.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 103.99-2019.369

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

- VOC: Điều khiển định hướng tựa điện áp - Voltage Oriented Control
- DPC: Điều khiển công suất trực tiếp - Direct power control
- MPC: Điều khiển dự báo dòng điện tựa mô hình - Modeling predictive control
- PLL: Mạch vòng khóa pha - Phase locked loop
- THD: Độ méo dạng sóng hài tổng - Total harmonic distortion
- PWM: Điều chế độ rộng xung - pulse-width modulation
- IGBT: Transistor lưỡng cực cực cổng cách điện - Insulated Gate Bipolar Transistor

DSP: Bộ xử lý tín hiệu kỹ thuật số - Digital Signal Processor

CCS: Code Composer Studio

AC: Dòng điện xoay chiều - Alternating Current

DC: Dòng điện một chiều - Direct current

PI: tích phân tỷ lệ Proportional-Integral

XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

Nhóm tác giả xin cam đoan rằng không có bất kỳ xung đột lợi ích nào trong công bố bài báo.

ĐÓNG GÓP CỦA TÁC GIẢ

Nguyễn Văn Nhò: tham gia vào việc đưa ra ý tưởng, người hướng dẫn, chỉnh sửa bản thảo, trả lời phản biện.

Trương Xuân Quang và Lâm Dẫn Long: viết phần mềm, xử lý dữ liệu và viết bản thảo.

Comparative study of control techniques for three phase PWM rectifier

Truong Xuan Quang, Lam Dan Long, Nguyen Van Nho*



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

ABSTRACT

This paper studies and compares the performances of different control strategies of 3-phase active rectifier under different load and frequency conditions. There are three main control approaches to be investigated such as: Voltage Oriented Control (VOC), Direct Power Control (DPC) and Model Predictive Control (MPC). The traditional method VOC has been used widely in practice. Its control principle is available to many different grid-connected converter systems such as electric drive system, renewable energy conversion system. However, the problem of optimal design of the current regulators for the different operating conditions of the system is not an easy problem. The DPC and MPC methods then help to eliminate the disadvantages of the VOC. The MPC method has been now become much interesting since it offers a general solution to a multi-goal optimization problem. In the paper, the system structures and controller parameters are briefly presented. The main evaluation factors of the active rectifier are low input current distortion (THD), a unit input power factor and stable DC output voltage. Three methods are analyzed and verified using MATLAB software and measuring experiment on a real model. The obtained results show that the VOC method achieves stable quality under different load as well as the switching frequency conditions, while the MPC method may achieve good quality with a rather high switching frequency.

Key words: PWM rectifier, Harmonics distortion, Power factor, Voltage Oriented Control (VOC), Direct power control (DPC), modeling predictive control (MPC), phase locked loop (PLL).

Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology, Vietnam National University

Correspondence

Nguyen Van Nho, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology, Vietnam National University

Email: nvnho@hcmut.edu.vn

History

- Received: 10-9-2020
- Accepted: 17-5-2021
- Published: 28-5-2021

DOI : 10.32508/stdjet.v4i2.765



Copyright

© VNU-HCM Press. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



Cite this article : Quang T X, Long L D, Nho N V. **Comparative study of control techniques for three phase PWM rectifier.** *Sci. Tech. Dev. J. – Engineering and Technology*; 4(2):986-998.