

MÁY BIẾN ÁP BÁN DẪN BA GIAI ĐOẠN

Trần Văn Hải, Lê Thành Tới, Văn Tấn Lượng*

Trường Đại học Công Thương Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: luongvt@huit.edu.vn

Ngày nhận bài: 27/5/2024; Ngày nhận bài sửa: 05/7/2024; Ngày chấp nhận đăng: 10/7/2024

TÓM TẮT

Trong những năm gần đây, sự phức tạp của hệ thống lưới điện đã tăng lên do sự thâm nhập ngày càng tăng của năng lượng tái tạo và các nguồn phát điện phân tán. Sự phức tạp ngày càng tăng đòi hỏi các phương pháp mới để nhanh chóng quản lý các nguồn và tải thay đổi. Bài báo này trình bày cơ bản về bộ chuyên đổi điện tử công suất AC-AC hai chiều với tên gọi máy biến áp bán dẫn. Máy biến áp bán dẫn thường gồm ba giai đoạn chuyển đổi chính AC-DC, DC-DC, và DC-AC; trong đó trung tâm là bộ chuyển đổi DC-DC công suất cao, hoạt động ở tần số cao để giảm đáng kể kích thước, khối lượng tổng thể và chi phí của bộ chuyển đổi.

Từ khóa: Biến tần 2-bậc, điều chế dịch pha, bộ chuyên đổi DC-DC, máy biến áp tần số cao.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Máy biến áp cho phép truyền tải điện đi khoảng cách xa và hiệu quả cao bằng cách tăng điện áp lên mức cao hơn ở phía phát điện. Về phía hệ thống phân phối, điện áp cao này được giảm xuống để sử dụng trong công nghiệp, thương mại và dân dụng. Máy biến áp truyền thống có cấu tạo đơn giản gồm các thành phần chính là lõi thép và dây quấn, như trong Hình 1a. Mặc dù, chúng đã được sử dụng rộng rãi trên thế giới, nhưng máy biến áp này tồn tại những nhược điểm như: kích thước cồng kềnh và trọng lượng nặng; dầu máy biến áp có thể gây hại khi tiếp xúc với môi trường; bão hòa lõi thép tạo ra sóng hài, dòng điện khởi động lớn; tổn hao tương đối cao ở mức tải hoạt động trung bình; khả năng điều chỉnh điện áp không tốt; không có khả năng điều chỉnh tần số điện áp ngõ ra.

Trong thập kỷ gần đây, khái niệm máy biến áp bán dẫn (SST-Solid State Transformer), như trong Hình 1b, đã thu hút nhiều sự chú ý và được nghiên cứu rộng rãi để ứng dụng trong hệ thống điện [1-3]. Máy biến áp bán dẫn là một thiết bị điện tử công suất thay thế máy biến áp truyền thống. Một máy biến áp điển hình bao gồm bộ chỉnh lưu AC/DC, bộ chuyển đổi DC/DC với biến áp tần số cao và bộ biến tần DC/AC. Một trong những chức năng của máy biến áp bán dẫn tương tự như chức năng của máy biến áp tần số thấp truyền thống (LFT- Low Frequency Transformer), cụ thể là tăng hoặc giảm điện áp. Những ưu điểm nổi bật phải kể đến của máy biến áp bán dẫn mà máy biến áp thông thường không có được như [4-7]: giảm kích thước và trọng lượng; điều chỉnh được điện áp tức thời; cách ly lỗi; hiệu chỉnh hệ số công suất; kiểm soát dòng công suất tác dụng và phản kháng; kiểm soát được dòng điện sự cố ở phía điện áp thấp và cao áp; khả năng điều chỉnh điện áp tốt; đầu ra có thể điều chỉnh tần số và số pha khác với đầu vào; khả năng có đầu vào hoặc đầu ra là điện áp DC.

Trong những năm gần đây, chi phí sản xuất của linh kiện điện tử công suất đã giảm, và các thiết bị điện tử công suất có tổn thất thấp, công suất cao, tần số cao đã trở nên đáng tin cậy hơn. Dẫn đến thực tế là máy biến áp bán dẫn có thể thay thế một số thành phần lưới điện cùng với máy biến áp thông thường, khiến máy biến áp bán dẫn trở nên khả thi về mặt kinh tế. Tính khả thi về mặt kinh tế này kết hợp với nhiều ưu điểm của máy biến áp thể rắn đã khiến nhiều nhà nghiên cứu theo đuổi nghiên cứu sâu hơn về phát triển và ứng dụng các thiết bị này trong lưới điện. Máy biến áp bán dẫn cung cấp giải pháp thay thế cho máy biến áp truyền thống. Nó sử dụng các thiết bị điện tử công suất và máy biến áp tần số cao để đạt được sự chuyển đổi và cách ly điện áp. Cần lưu ý rằng máy biến áp bán dẫn không phải là sự thay thế 1:1 của máy biến áp truyền thống mà là một thiết bị đa chức năng, trong đó một trong các chức năng của nó là chuyển đổi mức AC này sang mức AC khác. Một số ứng dụng tiềm năng của máy biến áp bán dẫn trong hệ thống điện như [8-11]:

+ SST có thể được sử dụng trong hệ thống phân phối năng lượng để quản lý và kiểm soát dòng điện một cách hiệu quả. Chúng cung cấp tính linh hoạt cao trong việc điều chỉnh điện áp và có thể thích ứng với các điều kiện tải biến động.

+ SST đóng vai trò quan trọng trong việc tích hợp nguồn năng lượng tái tạo như năng lượng mặt trời và gió vào lưới điện. Chúng tạo ra một giao diện động và linh hoạt giữa đầu ra biến động của nguồn năng lượng tái tạo và lưới, giúp duy trì ổn định của lưới.

+ Trong ứng dụng lưới thông minh, SST cung cấp khả năng giám sát, kiểm soát và giao tiếp cải thiện. Chúng hỗ trợ dòng điện hai chiều, tối ưu hóa quản lý chất lượng điện và tăng cường khả năng chống chịu của lưới.

+ SST có khả năng điều chỉnh điện áp chính xác hơn so với các biến áp truyền thống. Tính năng này hữu ích để duy trì chất lượng và ổn định của nguồn cung điện, đặc biệt là ở những khu vực có yêu cầu tải biến động.

+ SST có thể giảm thiểu các vấn đề về chất lượng điện như giảm áp, sóng biên độ và những dao động ngắn hạn. Khả năng kiểm soát cao giúp nhanh chóng thích ứng để giải quyết những thách thức này.

+ SST có thể tích hợp với các hệ thống lưu trữ năng lượng, giúp quản lý sạc và xả pin một cách hiệu quả hơn. Sự tích hợp này cải thiện ổn định và độ tin cậy của hệ thống điện.

+ So với biến áp truyền thống, SST thường nhẹ và nhỏ gọn hơn [11]. Điều này làm cho chúng phù hợp cho các ứng dụng nơi không gian hạn chế hoặc khi tính di động quan trọng.

+ Trong các ứng dụng lưới điện siêu nhỏ, SST có thể được sử dụng để tạo ra các hệ thống lưới điện nhỏ hoạt động độc lập hoặc kết hợp với lưới chính. Điều này tăng cường tính ổn định và độ tin cậy của nguồn điện ở các khu vực xa xôi hoặc quan trọng.

Bài báo này trình bày về máy biến áp bán dẫn 3 giai đoạn: bao gồm cấu trúc liên kết, một số lĩnh vực ứng dụng của SST trong hệ thống điện, nguyên lý hoạt động, phương pháp điều khiển cho từng giai đoạn. Cuối cùng, các kết quả mô phỏng được cung cấp để chứng minh đề xuất.



a) Máy biến áp truyền thống

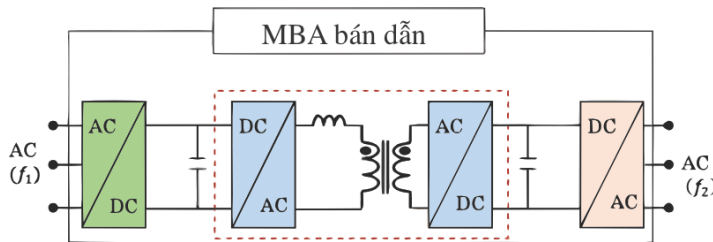


b) Máy biến áp bán dẫn

Hình 1. Máy biến áp

2. CẤU TRÚC VÀ NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG CỦA MÁY BIẾN ÁP BÁN DẪN

Sơ đồ khối chung của SST được đưa ra trong Hình 2. Nó thể hiện cấu trúc liên kết SST ba giai đoạn. Đầu vào điện áp AC được chuyển đổi thành DC bằng bộ chỉnh lưu AC/DC. Giai đoạn tiếp theo là bộ chuyển đổi DC/DC với máy biến áp tần số cao. Giai đoạn cuối cùng là giai đoạn chuyển đổi nghịch lưu DC/AC, cung cấp đầu ra AC ba pha với biên độ và tần số mong muốn.



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc của máy biến áp bán dẫn 3 giai đoạn

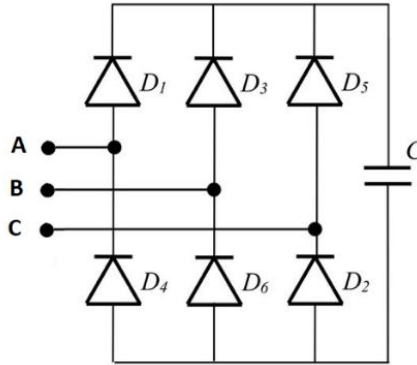
2.1. Giai đoạn AC/DC

Trong bài báo này, giai đoạn chuyển đổi AC-DC được thực hiện bởi cầu chỉnh lưu diode đơn giản như trong Hình 3, do đó chưa khai thác đầy đủ khả năng hai chiều và điều khiển công suất của SST. Đầu vào được cấp nguồn áp AC ba pha hoặc một pha linh hoạt, điện áp DC ngõ ra được tính theo công thức (1) và (2) cho trường hợp đầu vào ba pha và một pha tương ứng:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{L(RMS)} \quad (1)$$

$$V_{dc} = \sqrt{2} V_{P(RMS)} \quad (2)$$

Trong đó $V_{L(RMS)}$ là điện áp dây hiệu dụng của nguồn ba pha, $V_{P(RMS)}$ là điện áp pha hiệu dụng.



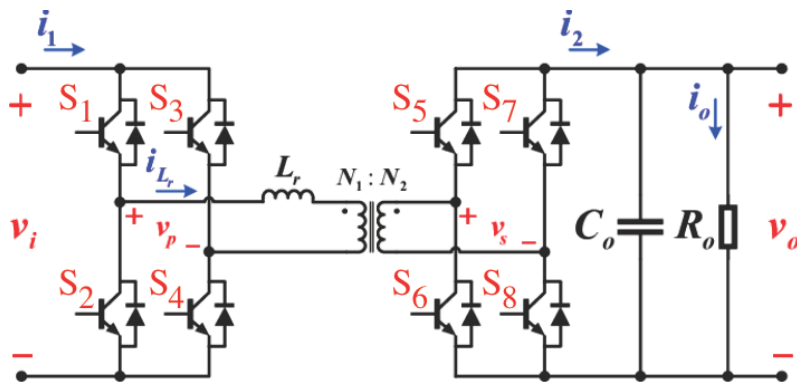
Hình 3. Bộ chỉnh lưu AC-DC

2.2. Giai đoạn DC/DC

Giai đoạn thứ hai của SST là giai đoạn chuyển đổi DC-DC được thể hiện như trong Hình 4, gồm 3 thành phần chính:

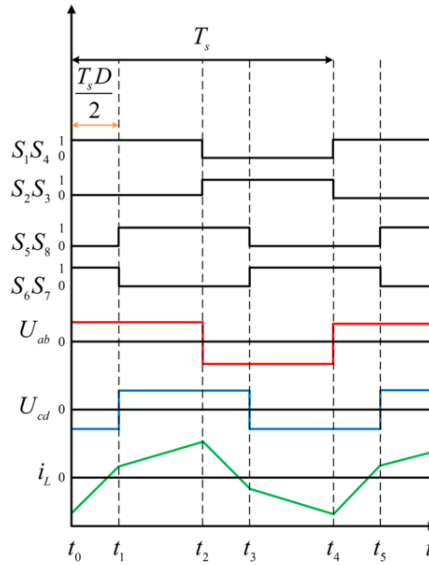
- ① Bộ chuyển đổi DC-AC ở đầu vào
- ② Máy biến áp cao tần (HFT- High Frequency Transformer) ở giữa
- ③ Bộ chuyển đổi AC-DC ở đầu ra

Bộ chuyển đổi DC-DC được xem như là trái tim của máy biến áp bán dẫn [12-14]. Cấu trúc gồm hai cầu chủ động được nối qua máy biến áp và lượng điện năng từ nguồn DC này sang nguồn DC kia được xác định bởi độ lệch pha ϕ giữa hai cầu chủ động, như Hình 4. Cầu chủ động kép chuyển đổi điện áp hai chiều DC sang DC cung cấp khả năng cách ly điện. Việc cách ly điện được đảm bảo bằng máy biến áp trung gian tần số cao.



Hình 4. Sơ đồ liên kết của giai đoạn chuyển đổi DC/DC

Điều chế dịch pha có lẽ là kỹ thuật điều chế đơn giản nhất cho các bộ chuyển đổi cầu chủ động kép. Dạng sóng điện áp chuyển mạch và dòng điện cảm ứng được mô tả như Hình 5.



Hình 5. Nguyên lý chuyển mạch và điện áp ngõ ra của quá trình chuyển đổi DC-DC

Điều chế dịch pha hoạt động với tín hiệu điều chế PWM cho phía sơ cấp và thứ cấp ở hệ số nhiệm vụ 50%. Việc truyền công suất giữa cả hai bên có thể được kiểm soát bằng cách điều chỉnh góc lệch giữa dạng sóng chuyển mạch sơ cấp và thứ cấp. Phương pháp điều chế này có những ưu điểm như sau: đơn giản, dễ thực hiện; khả năng truyền tải điện năng với hiệu suất cao; phân bố đồng đều tổn hao trên tất cả các thiết bị chuyển mạch.

Như được hiển thị trong Hình 5, trạng thái chuyển mạch của bộ chuyển đổi DC-DC trong điều khiển dịch pha có thể được xác định như sau:

$$\begin{cases} S_A = \begin{cases} 1 & \text{khi } S_1 \text{ và } S_4 \text{ ON, } S_2 \text{ và } S_3 \text{ OFF} \\ -1 & \text{khi } S_1 \text{ và } S_4 \text{ OFF, } S_2 \text{ và } S_3 \text{ ON} \end{cases} \\ S_B = \begin{cases} 1 & \text{khi } S_5 \text{ và } S_8 \text{ ON, } S_6 \text{ và } S_7 \text{ OFF} \\ -1 & \text{khi } S_5 \text{ và } S_8 \text{ OFF, } S_6 \text{ và } S_7 \text{ ON} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

Phương trình trạng thái của bộ chuyển đổi DC-DC có thể được biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{S_A U_i}{L} - \frac{n S_B U_o}{L} \\ \frac{dU_o}{dt} = \frac{n S_B i_L}{C_o} - \frac{U_o}{RC_o} \end{cases} \quad (4)$$

Dạng sóng của dòng điện cảm ứng i_L chia thành bốn pha hoạt động: $t_0 - t_1$, $t_1 - t_2$, $t_2 - t_3$ và $t_3 - t_4$. Bằng cách tận dụng tính đối xứng của dạng sóng để đơn giản hóa việc phân tích, nửa chu kỳ từ t_0 đến t_2 được chọn. Theo công thức (3) và (4), các biểu thức của dòng điện cảm ứng trong các khoảng thời gian $t_0 - t_1$ và $t_1 - t_2$ như sau:

$$i_L(t) = \begin{cases} i_L(t_0) + \frac{U_i + nU_o}{L}(t - t_0), t_0 \leq t \leq t_1 \\ i_L(t_1) + \frac{U_i - nU_o}{L}(t - t_1), t_1 \leq t \leq t_2 \end{cases} \quad (5)$$

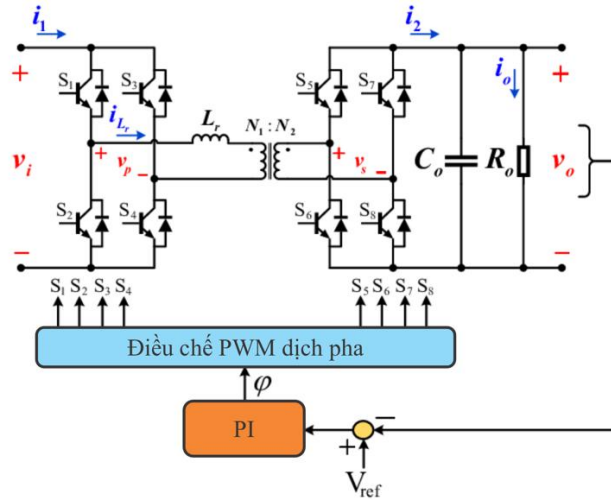
Trong công thức (5), $i_L(t_0)$ và $i_L(t_1)$ biểu thị dòng điện cảm ứng tại các thời điểm tương ứng t_0 và t_1 , và do tính đối xứng của dạng sóng của dòng điện cảm i_L nên $i_L(t_0) = -i_L(t_2)$, $i_L(t_1) = -i_L(t_3)$. Bỏ qua tổn hao hệ thống và kết hợp (5) và Hình 5, công suất P_o truyền tải của bộ chuyển đổi DC-DC trong điều khiển dịch pha được xác định như sau [15]:

$$P_o = \frac{T_s}{2} \int_{t_0}^{t_2} U_p i_L(t) dt = \frac{n U_p U_s}{2 L f_s} D(1 - D) \quad (6)$$

Trong đó f_s là tần số chuyển mạch và $T_s = 1/f_s$; D góc dịch pha từ 0° đến 180°

Vì mục tiêu là điều khiển điện áp đầu ra bám theo điện áp đặt mong muốn, bộ điều khiển tích phân tỉ lệ (PI-Proportional Integral) được thiết kế như trong Hình 6. Bộ điều khiển có tín hiệu phản hồi từ

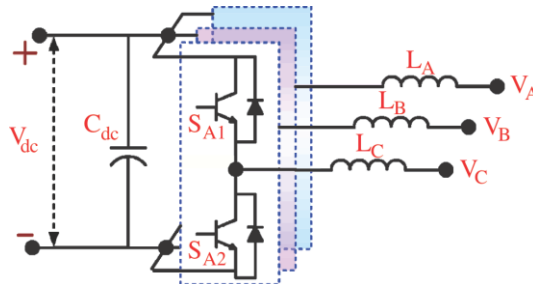
đầu ra (đầu thứ cấp) và tham chiếu là giá trị điện áp mong muốn (V_{ref}). Bằng cách so sánh với điện áp đầu vào, điện áp đầu ra tăng hoặc giảm tỷ lệ thuận với tín hiệu sai số, 8 khóa công suất được điều khiển bởi bộ tạo xung thông thường và bộ điều khiển PI tạo ra sự dịch pha.



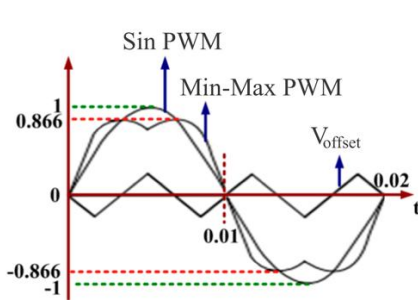
Hình 6. Sơ đồ thực hiện điều khiển điện áp DC ngõ ra

2.3. Giai đoạn DC/AC

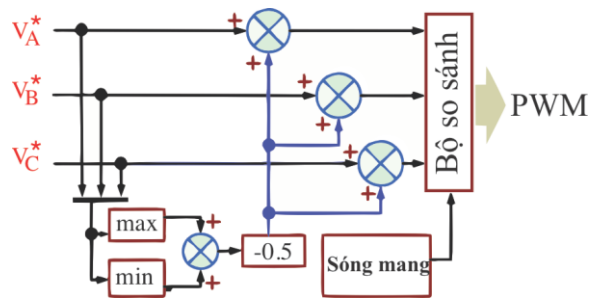
Điện áp AC ngõ ra được tạo ra bởi bộ nghịch lưu áp DC-AC hai bậc như trong Hình 7. Điện áp DC ngõ vào được cung cấp từ điện áp DC ngõ ra của bộ DC-DC được trình bày ở Mục 2.2. Kỹ thuật điều chế độ rộng xung (PWM-Pulse Width Modulation) cho bộ nghịch lưu được thực hiện bởi kỹ thuật điều chế dựa trên sóng mang với hàm offset Min-Max [16, 17], được trình bày ở Hình 8.



Hình 7. Cấu trúc bộ nghịch lưu áp 2-bậc



a) Dạng sóng điều chế của kỹ thuật sin PWM và Min-Max PWM



b) Sơ đồ thực hiện kỹ thuật Min-Max PWM

Hình 8. Kỹ thuật điều chế PWM cho giai đoạn DC-AC

Chiến lược điều chế Min-Max được cho là tương đương với chiến lược điều chế vector không gian. Vì vậy, bằng cách sử dụng phương pháp này, chỉ số điều chế có thể được mở rộng lên tới 15% so với kỹ

thuật sin PWM thông thường. Hình 8a, Hình 8b mô tả các dạng sóng liên quan và sơ đồ khối thể hiện nguyên lý tạo xung PWM thông qua chiến lược điều chế Min-Max:

$$V_{offset} = - \frac{[\max(V_A^*, V_B^*, V_C^*) + \min(V_A^*, V_B^*, V_C^*)]}{2} \quad (7)$$

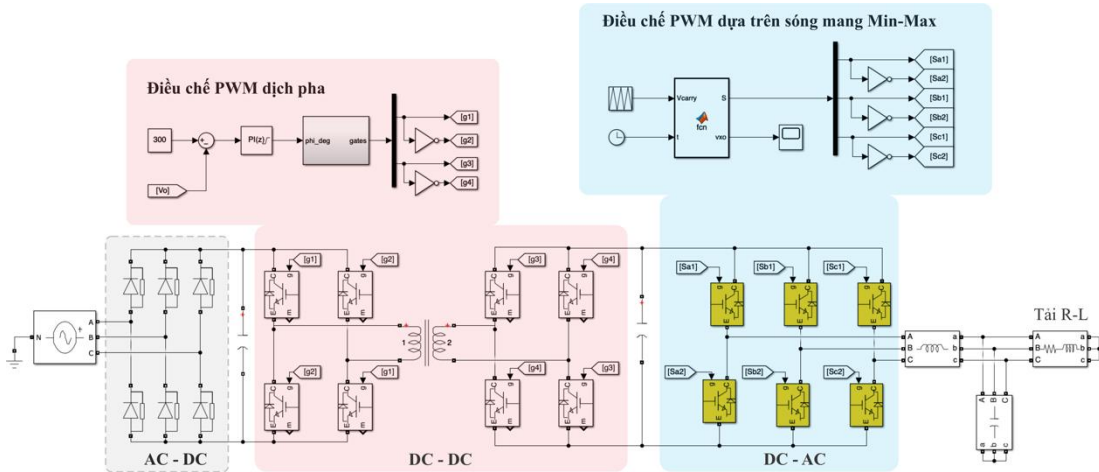
Trong đó:

$$\begin{cases} V_A^* = m \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} \cos(2\pi f t) \\ V_B^* = m \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} \cos(2\pi f t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_C^* = m \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} \cos(2\pi f t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (8)$$

Với m được gọi là chỉ số điều chế, có giá trị từ 0 đến 1, f là tần số điện áp ngõ ra mong muốn.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Để thấy rõ được các ưu điểm nổi bật của máy biến áp bán dẫn đã trình bày ở trên, các mô phỏng bởi phần mềm Matlab/Simulink phiên bản 2023a với các kịch bản khác nhau đã được thực hiện. Sơ đồ mô phỏng được trình bày như trong Hình 9, với các thông số được liệt kê trong Bảng 1.



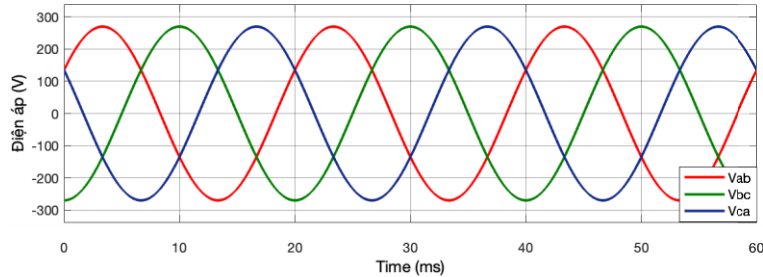
Hình 9. Sơ đồ mô phỏng máy biến áp bán dẫn

Bảng 1. Thông số mô phỏng hệ thống

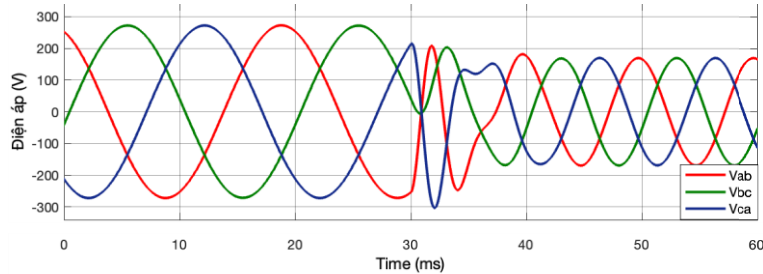
Mô tả	Ký hiệu	Giá trị
Tỷ số máy biến áp	$N_1 : N_2$	1 : 1
Tụ DC	C	4700 μ F
Tần số chuyển mạch DC-DC	f_1	20 kHz
Tần số chuyển mạch DC-AC	f_2	3 kHz
Điện áp DC đặt	$V_{dc(ref)}$	300V
Tải R	R	12 Ω
Tải L	L	5 mH
Thông số bộ điều khiển	K_p	1
	K_i	5
Thông số bộ lọc	L_{fil}	5 mH
	C_{fil}	100 μ F

Mô phỏng đầu tiên được thực hiện với nguồn ba pha có điện áp dây $110\sqrt{3}$ V/50 Hz. Ban đầu, điện áp dây ngõ ra mong muốn được đặt $110\sqrt{3}$ V/50 Hz, tiếp đó điện áp đặt được thay đổi theo hàm

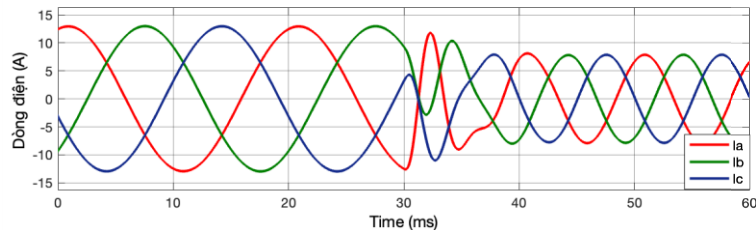
nắc thành $70\sqrt{3}$ V/100 Hz, kết quả mô phỏng được trình bày như trong Hình 10. Hình 10a trình bày dạng sóng của điện áp sơ cấp. Điện áp thứ cấp máy biến áp được mô tả ở Hình 10b cho thấy điện áp ban đầu xác lập tại giá trị đỉnh mong muốn 270V/50 Hz, tại thời điểm $t = 30$ ms điện áp ngõ ra nhanh chóng đạt trạng thái xác lập mới ở giá trị đỉnh 170 V/100 Hz. Dạng sóng của dòng điện tải được trình bày ở Hình 10c. Mô phỏng cho thấy đáp ứng điện áp thứ cấp của máy biến áp luôn được duy trì ổn định ở trạng thái mong muốn kể cả biên độ và tần số. Tại thời điểm thay đổi đột ngột giá trị tham chiếu, điện áp ngõ ra có xảy ra quá độ trong khoảng thời gian rất ngắn, sau khoảng 5 ms thì điện áp này nhanh chóng đạt trạng thái xác lập. Qua đó cho thấy, máy biến áp bán dẫn không những thay đổi được biên độ điện áp mà còn có thể thay đổi được cả tần số của điện áp ngõ ra.



a) Điện áp sơ cấp



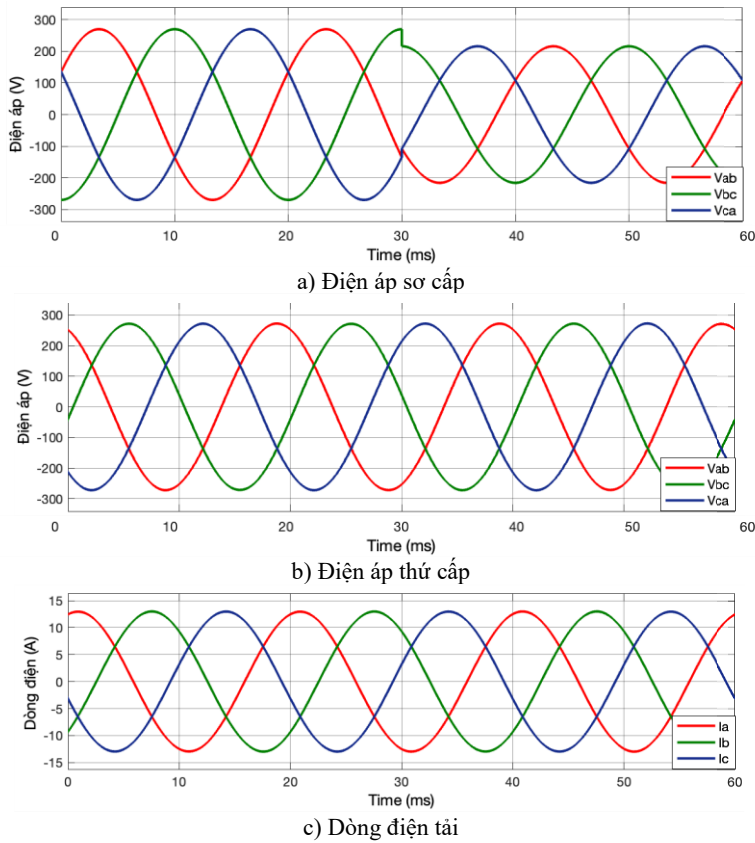
b) Điện áp thứ cấp



c) Dòng điện tải

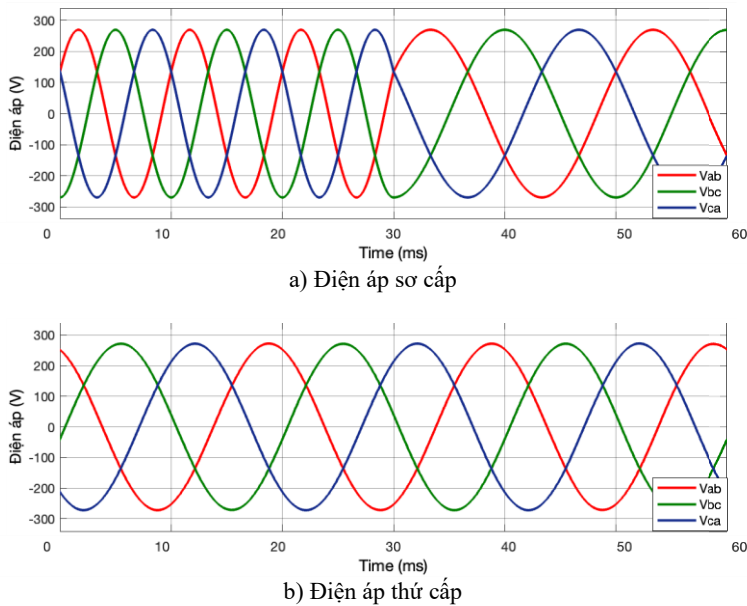
Hình 10. Kết quả mô phỏng dạng sóng khi thay đổi điện áp đặt phía thứ cấp

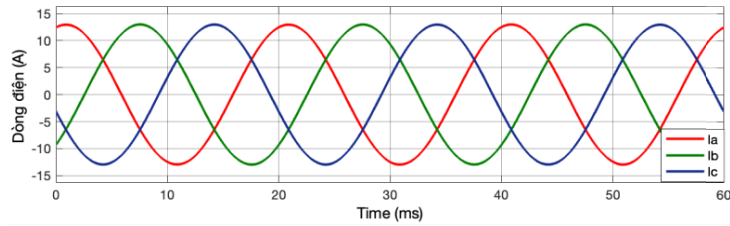
Mô phỏng thứ hai được thực hiện trong điều kiện điện thay đổi về điện áp sơ cấp, điện áp thứ cấp mong muốn được đặt tại $110\sqrt{3}$ V/50 Hz. Điện áp sơ cấp ban đầu được đặt ở giá trị $100\sqrt{3}$ V/50 Hz, sau đó giảm 20% biên độ điện áp. Hình 11a trình bày dạng sóng của điện áp sơ cấp. Hình 11b và 11c thể hiện điện áp và dòng điện phía thứ cấp của máy biến áp. Mặc dù có sự biến động 20% ở phía đầu vào, nhưng điện áp đầu ra vẫn được duy trì ổn định ở giá trị đặt.



Hình 11. Kết quả mô phỏng dạng sóng trong điều kiện thay đổi biên độ điện áp phía sơ cấp

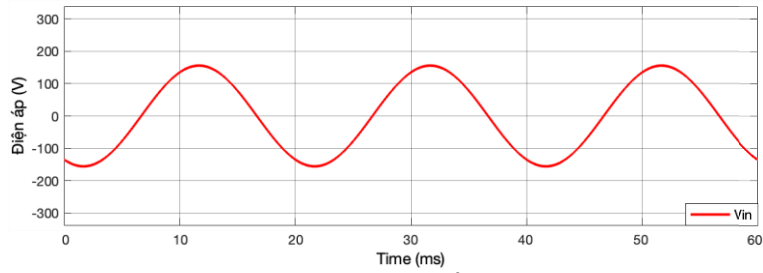
Mô phỏng tiếp theo được thực hiện với kịch bản tương tự như ở mô phỏng thứ hai nhưng tần số sơ cấp được thay đổi, ban đầu được đặt ở 100 Hz, sau đó giảm về 50 Hz. Kết quả thu được trình bày như trong Hình 12 cũng cho thấy điện áp thứ cấp của máy biến áp bán dẫn luôn được duy trì ổn định ở biên độ và tần số đặt.



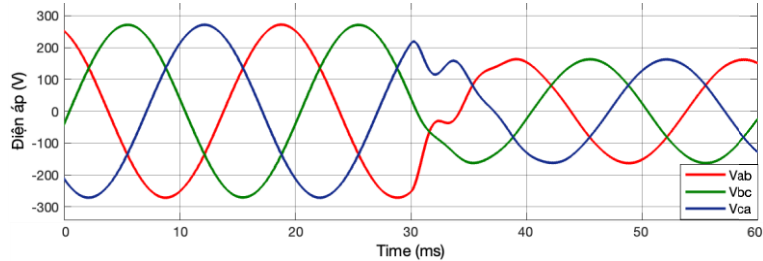


c) Dòng điện tải

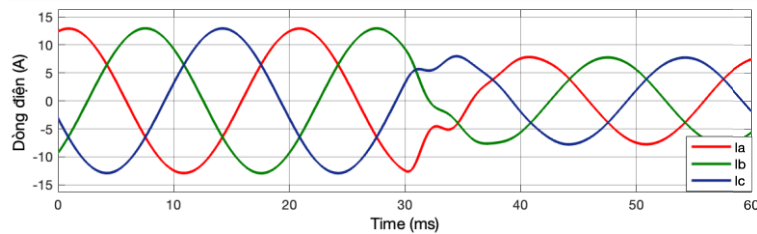
Hình 12. Kết quả mô phỏng dạng sóng trong điều kiện thay đổi tần số phía sơ cấp



a) Điện áp sơ cấp



b) Điện áp thứ cấp



c) Dòng điện tải

Hình 13. Kết quả với điện áp đầu vào một pha dưới điều kiện thay đổi điện áp mong muốn đầu ra

Một mô phỏng khác được thực hiện với nguồn vào là điện áp một pha 110 V/100 Hz. Điện áp đầu ra mong muốn được đặt ở $110\sqrt{3}$ V/50 Hz sau đó thay đổi thành $70\sqrt{3}$ V/50 Hz tại thời điểm $t = 30$ ms. Với điện áp đầu vào một pha được mô tả như trong Hình 13a, điện áp đầu ra của máy biến áp vẫn cho đáp ứng tốt, thể hiện như trong Hình 13b, duy trì ổn định cả về tần số lẫn biên độ tại giá trị đặt. Tại thời điểm $t = 30$ ms, điện áp ngõ ra nhanh chóng đạt xác lập tại giá trị tham chiếu mới trong thời gian khoảng 5 ms. Dạng sóng dòng điện tải được trình bày như trong Hình 13c.

Từ các kết quả mô phỏng cũng đã cho thấy được ưu điểm nổi bật của máy biến áp bán dẫn so với máy biến áp thông thường ở khả năng duy trì ổn định điện áp ngõ ra ở giá trị mong muốn. Bên cạnh đó nó còn có khả năng điều chỉnh linh hoạt điện áp ra về biên độ lẫn tần số. Ngoài ra, máy biến áp bán dẫn còn cho phép vận hành với nguồn điện đầu vào là một pha hoặc ba pha.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày sơ lược về cấu trúc cơ bản của máy biến áp bán dẫn 3 giai đoạn. Giai đoạn đầu, điện áp AC được chuyển đổi thành điện áp DC thông qua cầu chỉnh lưu ba pha sử dụng diode. Giai đoạn tiếp theo, bộ chuyển đổi DC sang DC sử dụng hai cầu chỉnh lưu có điều khiển với máy biến áp cách ly tần số cao ở giữa, điện áp DC ngõ ra được điều chỉnh thông qua kỹ thuật điều chế PWM dịch pha. Giai đoạn cuối cùng, điện áp DC sang điện áp AC với biên độ và tần số mong muốn được thực hiện với bộ nghịch lưu áp ba pha 2-bậc sử dụng kỹ thuật điều chế PWM dựa trên sóng mang Min-Max. Các kết quả mô phỏng cho thấy những ưu điểm nổi bật của máy biến áp bán dẫn: khả năng điều chỉnh linh hoạt điện áp và tần số ngõ ra, duy trì ổn định điện áp ngõ ra khi nguồn đầu vào có biến động, hoạt động được với cả nguồn vào là một pha hoặc ba pha... Máy biến áp bán dẫn hứa hẹn sẽ dần thay thế và đóng vai trò quan trọng trong hệ thống điện tương lai.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này do Trường Đại học Công Thương TP. Hồ Chí Minh bảo trợ và cấp kinh phí theo Hợp đồng số 81/HĐ-DCT ngày 15 tháng 8 năm 2023.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. Qin and J. W. Kimball, "Solid-state transformer architecture using AC-AC dual-active-bridge converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 3720–3730, 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2204710>
- [2] R. T. Naayagi, A. J. Forsyth, and R. Shuttleworth, "High-power bidirectional DC-DC converter for aerospace applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 11, pp. 4366–4379, 2012, doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2184771>
- [3] A. Abu-Siada, J. Budiri, and A. F. Abdou, "Solid state transformers topologies, controllers, and applications: State-of-the-art literature review," *Electronics*, vol. 7, no. 11, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics7110298>
- [4] Y. Deng, N. Zhao, J. Wu, and H. Zhou, "Research on optimization method of soft-switching range of DAB converter based on saturable inductor," in *Proc. Asia Energy Electr. Eng. Symp. (AEEES)*, Chengdu, China, 2020, pp. 481–486, doi: <https://doi.org/10.1109/AEEES48850.2020.9121453>
- [5] H. Ataullah, T. Iqbal, I. U. Khalil, U. Ali, V. Blazek, L. Prokop, and N. Ullah, "Analysis of the dual active bridge-based DC-DC converter topologies, high-frequency transformer, and control techniques," *Energies*, vol. 15, no. 23, Art. no. 8944, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/en15238944>
- [6] M. A. Hannan *et al.*, "State of the art of solid-state transformers: Advanced topologies, implementation issues, recent progress and improvements," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 19113–19132, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2967345>
- [7] D. Cervero *et al.*, "Solid state transformers: A critical review of projects with relevant prototypes and demonstrators," *Electronics*, vol. 12, no. 4, Art. no. 931, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics12040931>
- [8] M. Liserre, G. Buticchi, M. Andresen, G. De Carne, L. F. Costa, and Z.-X. Zou, "The smart transformer: Impact on the electric grid and technology challenges," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 10, no. 2, pp. 46–58, 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/MIE.2016.2551418>
- [9] S. Khan, K. Rahman, M. Tariq, S. Hameed, B. Alamri, and T. S. Babu, "Solid-state transformers: Fundamentals, topologies, applications, and future challengers," *Sustainability*, vol. 14, no. 1, Art. no. 319, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/su14010319>
- [10] X. She, A. Q. Huang, and R. Burgos, "Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 1, no. 3, pp. 186–198, 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2013.2277917>
- [11] A. Bineshaq, M. I. Hossain, H. Binqadhi, A. Salem, and M. A. Abido, "Design and control of two-stage DC-AC solid-state transformer for remote area and microgrid applications," *Sustainability*, vol. 15, no. 9, Art. no. 7345, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/su15097345>

- [12] D. S. Segaran, *Dynamic Modelling and Control of Dual Active Bridge Bi-directional DC-DC Converters for Smart Grid Applications*, Ph.D. dissertation, Monash Univ., Melbourne, Australia, 2006, doi: <https://doi.org/10.25439/rmt.27586782>
- [13] R. Seyezhai, “Performance evaluation of modulation strategies for dual active bridge multiport DC-DC converter,” *IOSR J. Eng. (IOSRJEN)*, vol. 1, no. 1, pp. 77–83, 2011, doi: <https://doi.org/10.9790/3021-0117783>
- [14] H. Fan and H. Li, “High-frequency transformer isolated bidirectional DC–DC converter modules with high efficiency over wide load range for 20 kVA solid-state transformer,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 12, pp. 3599–3608, 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2160652>
- [15] M. Yang and P. Liu, “Research on sliding mode control of dual active bridge converter based on linear extended state observer in distributed electric propulsion system,” *Electronics*, vol. 12, no. 16, Art. no. 3522, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics12163522>
- [16] D. G. Holmes and T. A. Lipo, *Pulse width modulation for power converters: principles and practice*. Wiley-IEEE press, 2003, doi: <https://doi.org/10.1109/9780470546284>
- [17] O. Dordevic, M. Jones, and E. Levi, “A comparison of carrier-based and space vector PWM techniques for three-level five-phase voltage source inverters,” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 9, no. 2, pp. 609–619, 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2220553>

ABSTRACT

THREE-STAGE SOLID STATE TRANSFORMER (SST)

Tran Van Hai, Le Thanh Toi, Van Tan Luong*

Ho Chi Minh City University of Industry and Trade

*Email: luongvt@huit.edu.vn

In recent years, the complexity of power grid systems has increased due to the increasing penetration of renewable energy and distributed generation sources. Increasing complexity requires new methods to quickly manage changing sources and loads. This article presents the basics of bidirectional AC-AC power electronics converters called semiconductor transformers. Semiconductor transformers typically consist of three main conversion stages AC-DC, DC-DC, and DC-AC; at the heart of which is a high-power DC-DC converter, operating at high frequencies to significantly reduce the size, overall mass, and cost of the converter.

Keywords: 2-level inverter, phase shift modulation, DC-DC converter, high frequency transformer.