

ĐÁNH GIÁ VỀ CÁC BỘ VIENNA ĐA MỨC MỘT PHA VÀ ĐỀ XUẤT SƠ ĐỒ VIENNA 7 MỨC CHO CÁC ỨNG DỤNG PFC AC/DC

REVIEW OF SINGLE-PHASE MULTI-LEVEL VIENNA CONVERTERS AND PROPOSAL OF 7-LEVEL VIENNA CONVERTER FOR PFC AC / DC APPLICATIONS

Phạm Thị Thùy Linh

TÓM TẮT

Bộ biến đổi đa mức PFC (Power Factor Correction) AC/DC Vienna với số lượng van bán dẫn điều khiển ít nhất đã nhận được sự quan tâm rộng rãi trong những năm qua để cải thiện chất lượng điện năng đầu vào của các hệ thống chỉnh lưu cũng như là tạo ra hệ số công suất bằng một. Trong bài báo này, tác giả đánh giá về các sơ đồ 3 mức, 5 mức và đề xuất sơ đồ 7 mức cùng với điều khiển PWM (Pulse Width Modulation) để loại bỏ sóng hài tần số thấp trong dòng điện và để đạt được hệ số công suất bằng một ở đầu vào của bộ chỉnh lưu. Tác giả đã mô phỏng và so sánh THD (Total harmonic distortion) dòng điện cho cả ba sơ đồ với cùng một mức công suất 3kW. Các kết quả của nghiên cứu được kiểm chứng bằng mô phỏng bởi phần mềm PSIM.

Từ khóa: Bộ biến đổi đa mức, VIENNA, hiệu chỉnh hệ số công suất, điều chế độ rộng xung.

ABSTRACT

The PFC (Power Factor Correction) AC / DC Vienna converter with the least number of control semiconductor devices has received wide attention over the years to improve the quality of the input power systems, and to obtain utility power factor. In this paper, the author reviews 3-level, 5-level topologies and proposes a 7-level Vienna topology with PWM (Pulse Width Modulation) control to eliminate low frequency harmonics in the current and to achieve power factor equal to one at the input of the rectifier. The author simulated and compared the THD (Total harmonic distortion) of current for all 3 structures with the same power level of 3kW. The results of the study were verified by simulation by PSIM software.

Keywords: Multi-level converter, Vienna, Power Factor Correction, Pulse Width Modulation.

Khoa Điều khiển và Tự động hóa, Trường Đại học Điện Lực

Email: linhptt@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/01/2020

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 28/3/2020

Ngày chấp nhận đăng: 24/4/2020

1. MỞ ĐẦU

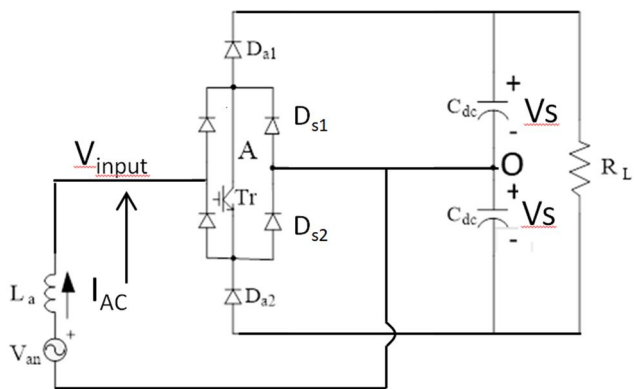
Các bộ chỉnh lưu tích cực đã trở nên nổi tiếng trong thập kỷ qua so với các bộ chỉnh lưu diốt và chỉnh lưu đa xung, vì có chất lượng dòng điện phía xoay chiều và điện áp phía đầu ra tốt hơn [1, 2]. Xu hướng chung trong điện tử

công suất là tăng tần số chuyển mạch van bán dẫn nhằm giảm thiểu sóng hài và qua đó giảm kích thước bộ lọc. Tuy nhiên, việc tăng tần số chuyển mạch làm tổn thất chuyển mạch tăng đáng kể ở mức công suất lớn. Một số phương pháp để giảm tổn thất chuyển mạch, đồng thời cải thiện chất lượng điện năng, đã được đề xuất là thiết kế bộ biến đổi cộng hưởng và bộ biến đổi đa mức. Trong số đó, bộ biến đổi Vienna ba mức đã được nghiên cứu trong một số bài báo và được áp dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp khác nhau như UPS (Cung cấp điện liên tục), viễn thông [1], hệ thống tuabin gió [2, 3] và các hệ thống hiệu chỉnh hệ số công suất [4].

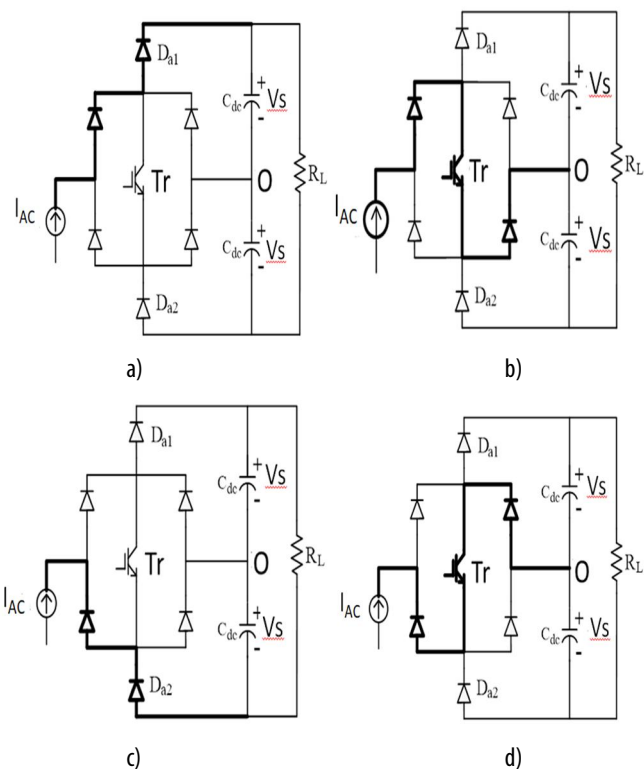
Trong bài báo này, tác giả đánh giá về sơ đồ Vienna 3 mức, sau đó mở rộng thiết kế ra sơ đồ 5 mức, từ đó đề xuất sơ đồ 7 mức. Tác giả cũng đã phân tích, so sánh các phương pháp điều chế, tính toán so sánh THD dòng điện cho các sơ đồ và kiểm chứng hoạt động của các sơ đồ bằng phần mềm mô phỏng PSIM.

2. SƠ ĐỒ VIENNA AC/DC 3 MỨC MỘT PHA

Sơ đồ Vienna 3 mức một pha một chiều công suất như thể hiện ở hình 1. Trong đó chỉ có một van có điều khiển được sử dụng. Giả thiết rằng chế độ dẫn liên tục, điện áp đầu vào của bộ chỉnh lưu V_{in} có trạng thái định nghĩa được xác định bởi các trạng thái ON / OFF của van bán dẫn có điều khiển và phân cực của dòng điện xoay chiều tại bất kỳ thời điểm hoạt động nào. Ví dụ, nếu dòng điện i_{AC} dương và van bán dẫn có điều khiển T_r khóa, điện áp giữa cực A của bộ biến đổi và điểm giữa O của bus một chiều, tương đương điện áp van là V_s . Đường đi của dòng điện trong trường hợp này được minh họa ở hình 2a. Nếu dòng điện i_{AC} là dương và van bán dẫn T_r là dẫn, thì điện áp van bằng 0 và trong trường hợp đó đường đi của dòng điện được minh họa trong hình 2b. Tương tự như vậy, nếu dòng điện i_{AC} là âm, điện áp van mang là $-V_s$ nếu van bán dẫn T_r là khóa hoặc bằng 0 nếu van bán dẫn T_r dẫn như được minh họa lần lượt trong hình 2c và d. Để loại bỏ sóng hài tần số thấp (tần số thấp hơn tần số chuyển mạch) trong dòng điện xoay chiều, điện áp pha đầu vào bộ biến đổi phải không có sóng hài tần số thấp, ngoại trừ sóng hài bậc ba, có thể xuất hiện trong tín hiệu điều chế để tăng thành phần cơ bản mà không bị quá điều chế.



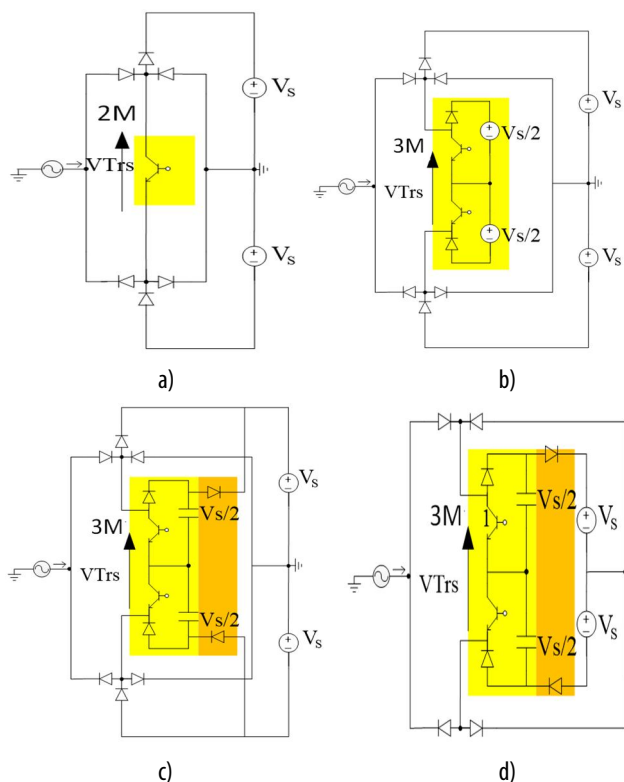
Hình 1. Bộ biến đổi AC/DC Vienna 3 mức 1 pha



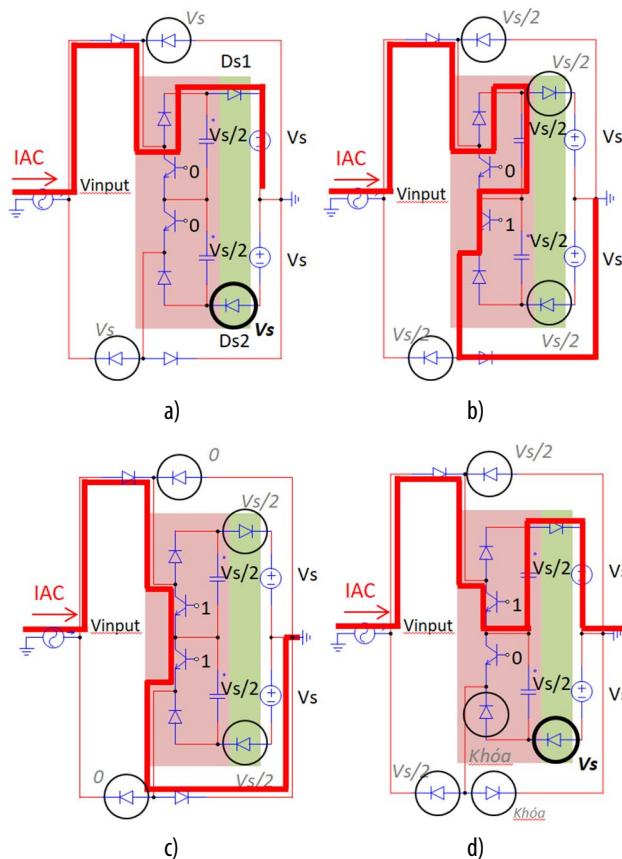
Hình 2. a) Đường dẫn của dòng điện ứng với dòng xoay chiều dương và $I_{AC} > 0$ và van bán dẫn có điều khiển OFF; (b) $I_{AC} > 0$ và van bán dẫn có điều khiển ON; (c) $I_{AC} < 0$ và van bán dẫn có điều khiển OFF; (d) $I_{AC} < 0$ và van bán dẫn có điều khiển ON

3. BỘ BIẾN ĐỔI AC/DC VIENNA 5 MỨC

Hình 3a thể hiện sơ đồ Vienna 5 mức bằng cách mở rộng thêm một nhóm chuyển mạch khi dòng điện dương và một nhóm chuyển mạch khi dòng điện âm [5,6]. Hình 3b, cho thấy phần mở rộng 5 mức bằng cách bổ sung thêm một nhóm 3 mức nối tầng, được đặt tên là PFC xếp chồng 5 mức [7]. Trong mọi trường hợp, cần lưu ý rằng các tụ điện nối được thiết kế ứng với tần số chuyển mạch, chỉ phải chịu điện áp điện mức là $V_s/2$ và duy trì Amps-giây chỉ trong một nửa chu kỳ thời gian của dòng điện xoay chiều. Những tính chất này rất quan trọng, cho phép chọn tụ điện nhỏ, dòng hiệu dụng thấp và kích thước nhỏ so với các bộ biến đổi thông thường.



Hình 3. Hình thành cấu trúc AC/DC Vienna 5 mức



Hình 4. Minh họa đường dẫn dòng điện khi dòng điện IAC dương. Khi van bán dẫn Tr1, Tr2 cùng khóa (a); Tr1 OFF, Tr2 ON (b); Hai van bán dẫn Tr1, Tr2 cùng ON (c); Tr1 ON, Tr2 OFF (d)

Bảng 1. Phân tích trạng thái hoạt động của mạch điện khi dòng điện dương

Ctrl_Tr ₁	Ctrl_Tr ₂	V_Tr ₁	V_Tr ₂	V_DS ₁	V_DS ₂	V _{input}	CdVc1 /dt	CdVc2 /dt
0	0	V _s /2	V _{dc} /4	0	V _s không đóng cắt	V _s	0	0
0	1	V _s /2	0	V _s /2 đóng cắt	V _s /2 không đóng cắt	V _s /2	+I _{AC}	0
1	1	0	0	V _s /2 đóng cắt	V _s /2 không đóng cắt	0	0	0
1	0	0	V _s /2	0	V _s không đóng cắt	V _s /2	-I _{AC}	0

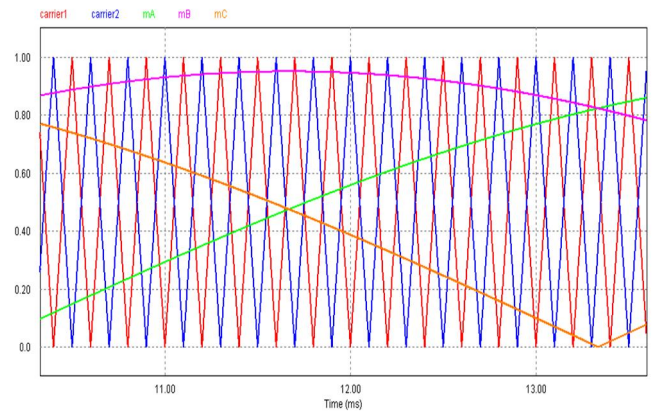
4. CHIẾN LƯỢC ĐIỀU CHẾ ĐỘ RỘNG XUNG

Các phương pháp chuyển mạch cho bộ chỉnh lưu Vienna được đề xuất trong [4-5, 8-10]. Các phương pháp này đáp ứng yêu cầu đối với hoạt động bình thường của bộ chỉnh lưu Vienna: dấu của dòng điện phải cùng với dấu hiệu của điện áp [3-5, 8-10]. Do đó, bộ chỉnh lưu Vienna có một hạn chế trong thay đổi hệ số công suất. Trong số các phương pháp chuyển mạch này, các phương pháp chuyển mạch trễ được đề xuất để kiểm soát các dòng điện đầu vào có được dạng sóng hình sin [3-5]. Các tín hiệu chuyển mạch được tạo ra bằng cách so sánh dòng điện tham chiếu hình sin và dòng điện xoay chiều đo được. Mặc dù cách tiếp cận này dễ thực hiện, nhưng tần số chuyển mạch không phải là hằng số. Do đó, phương pháp này gây khó khăn cho việc thiết kế bộ lọc đầu vào. Các phương pháp điều chế độ rộng xung đã được đề xuất như là giải pháp cho các nhược điểm của các phương pháp chuyển mạch trễ. Phương pháp này đảm bảo tần số chuyển mạch không đổi.

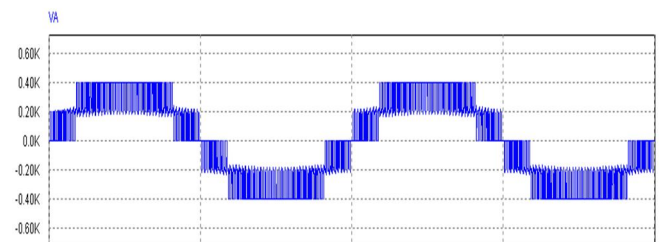
Tín hiệu điều chế cho phép điện áp xoay chiều đầu vào với THD tối thiểu và cân bằng điện áp của hai tụ điện nối. Đối với hoạt động của bộ 5 mức, bốn sóng mang phải được sử dụng. Cách tiếp cận đầu tiên được chỉ ra trong hình 5a và bao gồm việc mở rộng bộ điều biến 3 mức với hai sóng mang xen kẽ lệch pha một góc π. Giải pháp này có thể được sử dụng nếu có tính cân bằng tự nhiên được thực hiện thông qua bộ lọc được đặt ở đầu vào của bộ biến đổi ở tần số chuyển mạch. Ở đây, cách tiếp cận này không phù hợp với chiến lược xử lý lỗi vì việc giảm tần số biểu kiến trong chế độ lỗi tạo ra sự cộng hưởng với bộ lọc đầu vào được điều chỉnh ở cùng tần số (nghiên cứu tiếp theo của bài báo này).

Một giải pháp có thể được sử dụng để cân bằng ở tần số thấp bằng cách kiểm soát các hệ số điều chỉnh khác nhau. Ngay cả khi cân bằng được thực hiện trên hình 5b cho thấy giải pháp đầu tiên này cung cấp điện áp pha không được tối ưu hóa do sự thay đổi pha ±π của sóng điều hòa điện áp ở tần số chuyển mạch biểu kiến khi mức điều chế vượt qua {-1/2, 0, 1/2}. Tuy nhiên, hình 6a cho thấy một giải pháp rất thú vị thứ hai do bốn sóng mang xếp chồng thể hiện trong hình 6b, dạng sóng điện áp pha được tối ưu hóa do triệt

tiêu sóng hài điện áp dây ở tần số chuyển mạch biểu kiến. Trong giải pháp thứ hai này, việc cân bằng điện áp phức tạp hơn so với chiến lược đối pha. Một máy trạng thái được chỉ ra trong [10] nhưng nó sẽ không được chi tiết trong bài báo này.

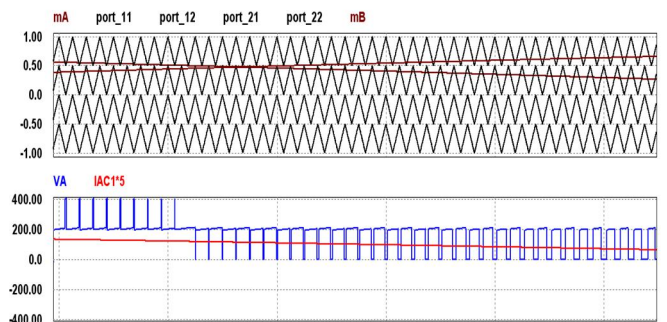


a) Sóng mang và tín hiệu điều chế

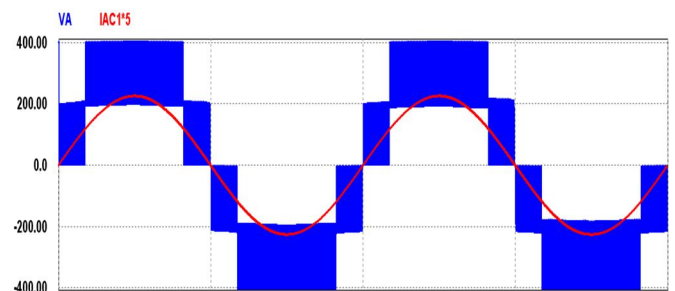


b) Điện áp 5 mức đầu vào của bộ biến đổi Vienna 5 mức

Hình 5. Kết quả mô phỏng ứng với phương pháp điều chế lệch pha (Modulation POD)



a) Sóng mang và tín hiệu điều chế



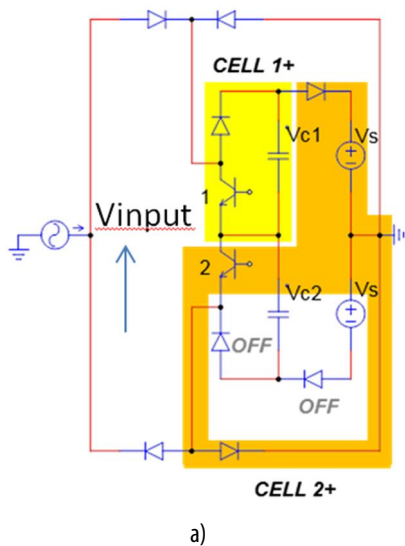
b) Điện áp 5 mức đầu vào của bộ biến đổi Vienna 5 mức

Hình 6. Kết quả mô phỏng ứng với phương pháp điều chế cùng pha (Modulation PD)

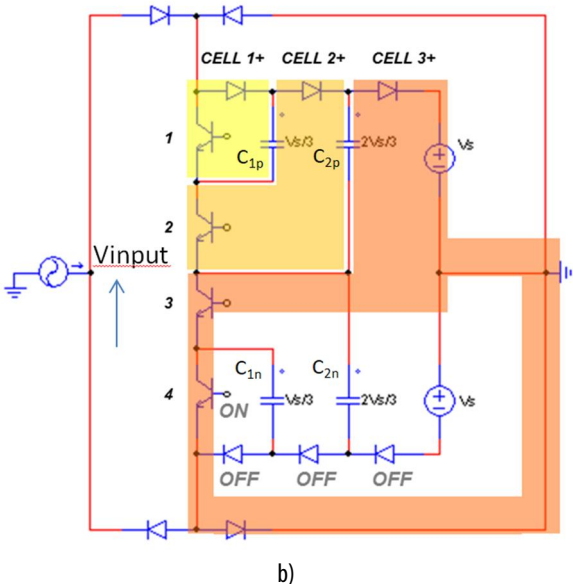
5. ĐỀ XUẤT BỘ BIẾN ĐỔI AC/DC VIENNA 7 MỨC

Tác giả đề xuất sơ đồ AC/DC Vienna 7 mức có cấu tạo gồm 4 van có điều khiển, 2 điôt chỉnh lưu, 6 điôt chuyển mạch, 2 điôt chặn, 4 tụ nổi như thể hiện ở hình 7b.

Đối với dòng điện xoay chiều dương, hai nhóm chuyển mạch của sơ đồ Vienna 5 mức (hình 7a) sẽ thay nhau hoạt động để tạo ra điện áp 3 mức ở nửa chu kì dương bao gồm các mức điện áp $\{+Vs, +Vs/2, 0\}$. Nhóm chuyển mạch số 1 (đánh dấu màu vàng), nhóm chuyển mạch số 2 (đánh dấu màu cam). Để có được điện áp 7 mức, thì tác giả đề xuất bổ sung thêm một nhóm chuyển mạch đối với dòng điện dương như thể hiện ở hình 7b. Nhóm chuyển mạch số 1 (đánh dấu màu vàng), nhóm chuyển mạch số 2 (đánh dấu màu cam), nhóm chuyển mạch số 3 (đánh dấu màu đỏ). Một cách tương tự ta sẽ có hai nhóm chuyển mạch của sơ đồ Vienna 5 mức (hình 8a) và ba nhóm chuyển mạch của sơ đồ Vienna 7 mức (hình 8b) đối với dòng điện âm.

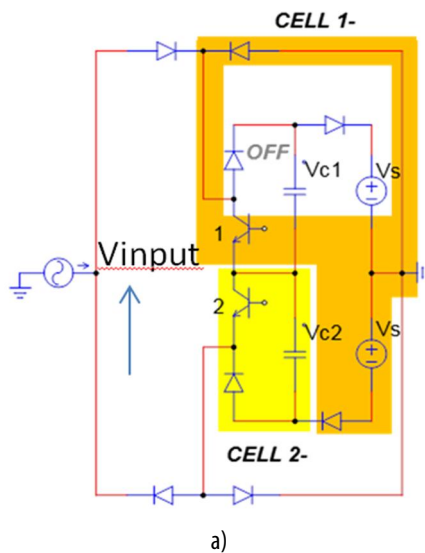


a)

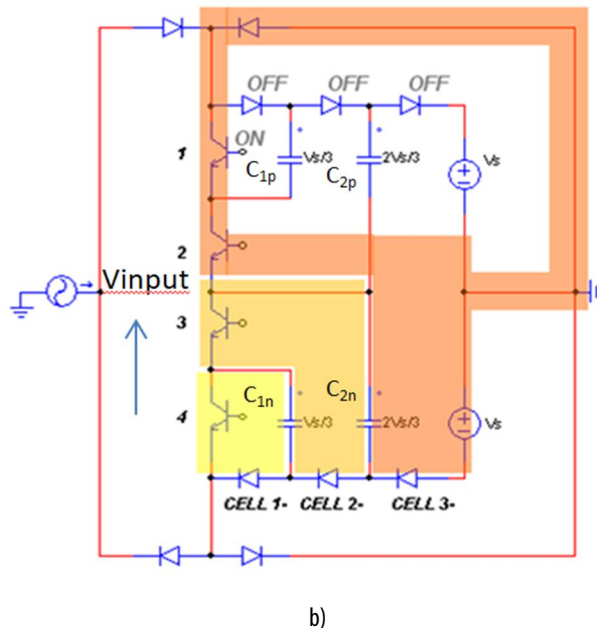


b)

Hình 7. Các nhóm chuyển mạch của sơ đồ Vienna a) 5 mức, b) 7 mức ứng với dòng điện xoay chiều đầu vào dương ($I_{ac} > 0$)



a)



b)

Hình 8. Các nhóm chuyển mạch của sơ đồ Vienna a) 5 mức, b) 7 mức ứng với dòng điện xoay chiều đầu vào âm ($I_{ac} < 0$)

Mỗi nhóm chuyển mạch sẽ hoạt động ở tần số chuyển mạch lớn, các trạng thái chuyển mạch ứng với dòng điện xoay chiều dương được thể hiện ở bảng 2, qua phân tích tác giả thấy rằng bằng việc điều khiển bốn van transistor thì đã tạo ra các trạng thái cân bằng cho các tụ nổi, 2 tụ nổi ở tầng trên và tương tự như vậy đối với nửa chu kì âm của dòng điện. Mỗi tụ nổi trong quá trình hoạt động chịu điện áp cao nhất là $Vs/3$ đối với các tụ C_{1p} , C_{1n} và $2Vs/3$ đối với các tụ C_{2p} và C_{2n} . Trong khi đối với sơ đồ Vienna 5 mức có 2 tụ nổi với điện áp định mức là $Vs/2$. Một ưu điểm của sơ đồ Vienna 7 mức được thiết kế là có thành phần điện cảm thụ động đầu vào nhỏ hơn rất nhiều so với sơ đồ 3 mức và 5 mức do mỗi van có điều khiển chỉ phải chịu điện áp $Vs/3$ so với $Vs/2$ của sơ đồ 5 mức và Vs của sơ đồ 3 mức. Trong khi tần số đóng cắt của van transistor ở sơ đồ 3 mức là f_{sw} , còn sơ đồ 5 mức là $2.f_{sw}$ và sơ đồ 7 mức là $4.f_{sw}$.

Bảng 2. Phân tích trạng thái hoạt động của sơ đồ Vienna 7 mức khi dòng điện dương

Ctrl_Tr ₁	Ctrl_Tr ₂	Ctrl_Tr ₃	Ctrl_Tr ₄	V_input	CdVc1p/dt	CdVc2p/dt
0	0	0	1	V _s	0	0
1	0	0	1	$-V_s/3+V_s=2V_s/3$	-IAC	0
1	1	0	1	$-2V_s/3+V_s=V_s/3$	0	-IAC
0	1	0	1	$V_s/3-2V_s/3+V_s=2V_s/3$	+IAC	-IAC
0	0	1	1	2V _s /3	0	+IAC
1	0	1	1	$-V_s/3+2V_s/3=V_s/3$	-IAC	+IAC
1	1	1	1	0	0	0
0	1	1	1	V _s /3	+IAC	0

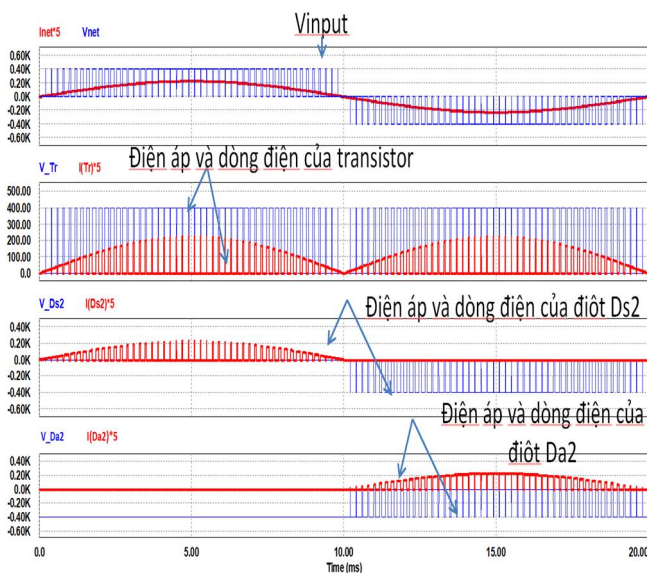
6. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Mô phỏng hệ thống 3kW đã được thực hiện bằng phần mềm PSIM. Các đặc điểm hệ thống được mô tả ở bảng 3.

Bảng 3. Các thông số mô phỏng

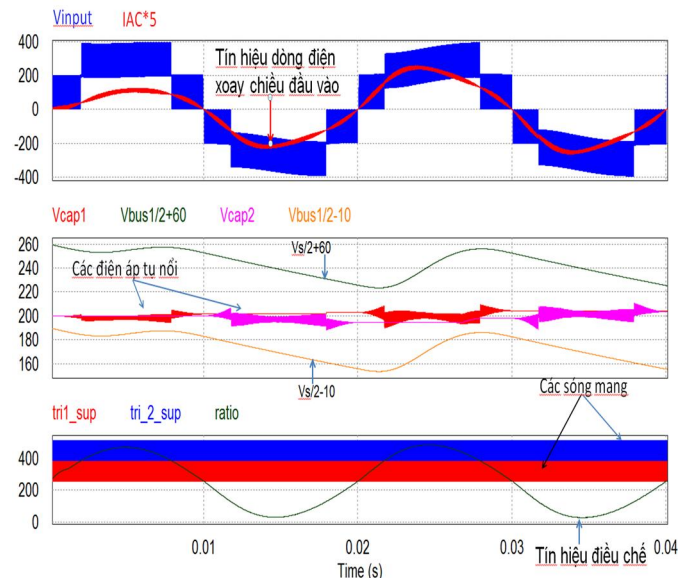
Thông số	Giá trị
Công suất định mức	3kW
Điện áp hiệu dụng nguồn xoay chiều	230Vrms
Điện áp DC- Link	700 - 800V
Điện cảm đầu vào	0,165mH
Giá trị mỗi tụ đầu ra	2mF

Kết quả mô phỏng của sơ đồ Vienna 3 mức được hiển thị trong hình 9. Điện áp đầu vào của bộ chỉnh lưu Vinput có các mức {+400V; 0; -400V}. Mỗi transistor đóng cắt dòng điện xoay chiều đầu vào với tần số fsw và mang điện áp 400V và hoạt động ở cả hai chu kỳ của dòng điện xoay chiều. Các diốt chuyển mạch (Da1; Da2) và diốt chặn (Ds1; Ds2) đều đóng cắt ở điện áp 400V.

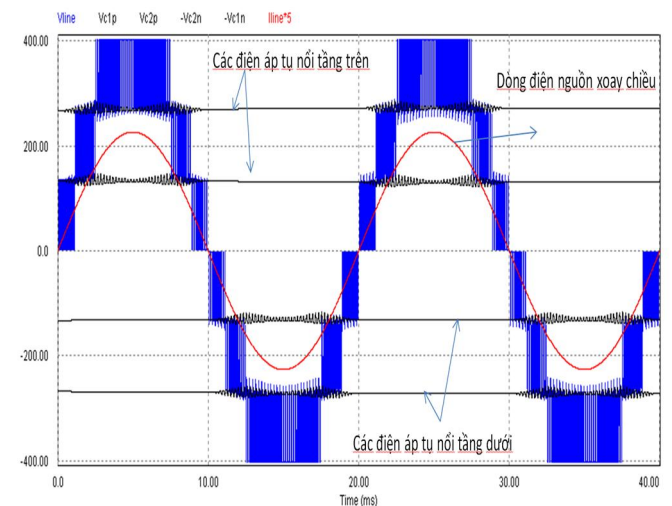


Hình 9. Các dạng sóng mô phỏng điển hình cho sơ đồ AC/DC Vienna 3 mức 3kW/ 230V AC/50Hz/ 800V DC-link/ 31,25kHz

Hình 10 thể hiện mô phỏng của sơ đồ AC/DC Vienna 5 mức với các mạch vòng điều khiển dòng điện và điện áp, bao gồm quá trình khởi động. Điện áp xoay chiều đầu vào của bộ chỉnh lưu có 5 mức {+400V; +200V; 0; -200V; -400V}, mỗi tụ nối sẽ phóng và sạc ở xung quanh điện áp làm việc 200V. Điện áp trên hai tụ nối được cân bằng với phương pháp điều chế PWM Phase Disposition.



Hình 10. Các dạng sóng mô phỏng điển hình cho sơ đồ AC/DC Vienna 5 mức 3kW/ 230V AC/50Hz/ 800V DC-link/ 31,25kHz



Hình 11. Kết quả mô phỏng của sơ đồ AC/DC Vienna 7 mức 3kW/ 230V AC/50Hz/ 800V DC-link/ 31,25kHz

Kết quả mô phỏng của sơ đồ AC/DC Vienna 7 mức được thể hiện ở hình 11. Điện áp xoay chiều đầu vào của bộ chỉnh lưu có 7 mức {+400V; +266V; +133V; 0; -133V; -266V; -400V}, mỗi tụ nối sẽ phóng và sạc ở xung quanh điện áp làm việc lần lượt là 133V và 266V. Điện áp trên hai tụ nối được cân bằng với phương pháp điều chế PWM Phase Disposition. Tác giả cũng đã tính toán THD của dòng điện xoay chiều đã cho thấy THD dòng điện của sơ đồ Vienna 7 mức trong chế độ làm việc bình thường nhỏ hơn THD dòng điện của sơ đồ 5 mức và 3 mức như kết quả ở bảng 4.

Bảng 4. Bảng so sánh THD dòng điện của ba sơ đồ -3kW

	Vienna 3 mức	Vienna 5 mức	Vienna 7 mức
Điện áp DC-link	800V	800V	800V
THD dòng điện	7,1%	4,45%	1,27%

7. KẾT LUẬN

Cấu trúc của bộ chỉnh lưu tích cực PFC Vienna 3 mức, 5 mức và 7 mức được giới thiệu trong bài báo này. Đặc biệt, bài báo đề xuất sơ đồ Vienna 7 mức với chỉ 4 transistor có điều khiển so với các sơ đồ 7 mức khác đã được nghiên cứu như Double-Boost hay xếp tầng cần phải có ít nhất 8 transistor có điều khiển. Phương pháp điều chế PWM được sử dụng cho kết quả hoạt động tốt của sơ đồ 7 mức đề xuất, các điện áp tụ nối được cân bằng tự nhiên, và có các giá trị tương ứng là $\{2V_s/3; V_s/3; -V_s/3; -2V_s/3\}$, các bậc mức của điện áp đầu vào bộ chỉnh lưu là $V_s/3$. Kết quả mô phỏng bằng phần mềm PSIM cũng cho thấy THD dòng điện của sơ đồ Vienna 7 mức đề xuất nhỏ hơn nhiều so với THD dòng điện của các sơ đồ 3 mức và 5 mức.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. J. W. Kolar and F. C. Zach, 1997. *A novel three-phase utility interface minimizing line current harmonics of high-power telecommunications rectifier modules*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 44, no. 4, pp. 456–467.
- [2]. H. Chen and D. C. Aliprantis, 2011. *Analysis of Squirrel-Cage Induction Generator With Vienna Rectifier for Wind Energy Conversion System*. IEEE Trans. Energy Convers., vol. 26, no. 3, pp. 967–975.
- [3]. J. S. Lee, E. Lee, and K. B. Lee, 2014. *Hybrid parallel three-level converter topology for large wind turbine generation systems*. IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp. 515–520.
- [4]. B. Kedjar, H. Y. Kanaan, and K. Al-Haddad, 2014. *Vienna Rectifier With Power Quality Added Function*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 8, pp. 3847–3856.
- [5]. R. C. Campbell, 2007. *A Circuit-based Photovoltaic Array Model for Power System Studies*. 39th North American Power Symposium, pp. 97–101.
- [6]. U. Drogenik and J. W. Kolar, 1999. *Comparison of not synchronized sawtooth carrier and synchronized triangular carrier phase current control for the VIENNA rectifier I*. in Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1999. ISIE '99, vol. 1, pp. 13–19.
- [7]. J. W. Kolar and U. Drogenik, 1999. *A new switching loss reduced discontinuous PWM scheme for a unidirectional three-phase/switch/level boost-type PWM (VIENNA) rectifier*. in Telecommunication Energy Conference, 1999. IN TEL'EC '99. The 21st International, 490 pp.
- [8]. R. Burgos, R. Lai, Y. Pei, F. Wang, D. Boroyevich, and J. Pou, 2008. *Space Vector Modulator for Vienna-Type Rectifiers Based on the Equivalence Between Two- and Three-Level Converters: A Carrier-Based Implementation*. IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, no. 4, pp. 1888–1898.

[9]. J. S. Lee and K. B. Lee, 2015. *Carrier-Based Discontinuous PWM Method for Vienna Rectifiers*. IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 6, pp. 2896–2900.

[10]. B. P. McGrath, T. Meynard, G. Gateau, and D. G. Holmes, 2007. *Optimal Modulation of Flying Capacitor and Stacked Multicell Converters Using a State Machine Decoder*. IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 2, pp. 508–516.

AUTHOR INFORMATION

Pham Thi Thuy Linh

Faculty of Control and Automation, Electric Power University