

Cải tiến thuật toán cân bằng điện áp trên tụ cho nghịch lưu kiểu T-type 1 pha

Improved Capacitor Voltage Balancing Algorithm for a Single-phase T-type Inverter

Vũ Hoàng Phương*, Kiều Hữu Phúc, Trần Văn Phương,
Nguyễn Đình Ngọc, Nguyễn Quang Địch

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

*Email: phuong.vuhoang@hust.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo đề xuất thuật toán điều chế độ rộng xung cải tiến để giải quyết vấn đề mất cân bằng điện áp trên các tụ điện một chiều cho nghịch lưu T-type 1 pha. Bằng cách thay đổi hệ số điều chế, các trạng thái dư được sử dụng tác động vào quá trình phóng hoặc nạp cho các tụ điện DC để cân bằng được điện áp. Sự thay đổi của điện áp trên các tụ điện một chiều trong các trạng thái hoạt động được phân tích trong bài báo này. Thuật toán đề xuất được kiểm chứng cho ứng dụng trong nghịch lưu kiểu T-type 1 pha ở chế độ độc lập. Hơn nữa ảnh hưởng của sự mất cân bằng điện áp lên tổng méo sóng hài điện áp đầu ra được phân tích. So với thuật toán ban đầu, thuật toán cải tiến cho thấy chất lượng điện áp đầu ra giảm 1,28% tổng độ méo sóng hài. Thêm vào đó, cấu trúc điều khiển của bộ biến đổi giúp đạt được thời gian phản hồi nhanh chóng của hệ thống. Các kết quả mô phỏng, thực nghiệm đã khẳng định hiệu quả của phương pháp điều chế độ rộng xung cải tiến cho bộ nghịch lưu đa mức 1 pha kiểu T-type.

Từ khóa: Nghịch lưu kiểu T-type, cân bằng điện áp trên tụ, điều chế độ rộng xung (PWM).

Abstract

The paper proposes an improved pulse width modulation algorithm to solve the voltage imbalance on DC capacitors for single-phase T-type inverter. By changing the modulation index, the residual states can be applied to the discharge or charge state on the DC capacitors to balance the voltage. The variation of the voltage across the DC capacitors in the operating states is analyzed in this paper. The proposed algorithm is validated for application in single-phase T-type inverters in independent mode. Furthermore, the effect of the voltage imbalance on the total output voltage harmonic distortion is analyzed. Compared with the original algorithm, the improved algorithm shows that the output voltage quality reduces 1.28% of the total harmonic distortion. Additionally, the converter control structure helps in achieving the fast time response of the system. The simulation and experimental results have confirmed the effectiveness of the improved pulse width modulation method for single-phase T-type inverter.

Keywords: T-type inverter, balance capacitor voltages, pulse width modulation (PWM).

1. Giới thiệu

Năng lượng tái tạo đang là điểm nóng của toàn cầu. Vì vậy việc xây dựng và đưa vào các ứng dụng các hệ thống điện dùng năng lượng tái tạo đã trở thành một yêu cầu bức thiết. Trong số các nguồn năng lượng tái tạo, năng lượng mặt trời là trường hợp điển hình. Với yêu cầu chuyển đổi từ nguồn điện 1 chiều được cung cấp từ các tấm pin mặt trời sang nguồn điện xoay chiều, bộ nghịch lưu phải đạt được các tiêu chí về chất lượng điện áp đầu ra để cấp cho tải sử dụng hoặc hòa lưới [1,2]. Do đó, nghịch lưu đa mức ứng dụng cho hệ thống phát điện năng lượng mặt trời được nhiều nhóm nghiên cứu quan tâm, bộ nghịch lưu này có nhiều ưu điểm giảm sóng hài, tăng hiệu suất chuyển đổi mà không tăng điện áp đặt lên

các van, nâng cao hiệu suất và giảm tần số chuyển mạch. Hiện nay, có rất nhiều sơ đồ cho các bộ biến đổi đa mức như: kiểu diode kẹp (Neutral-Point Clamped-NPC), kiểu cầu H nối tầng (Cascaded H-bridge multilevel-CHB), kiểu T-type [3-8]. Tuy nhiên, bộ nghịch lưu kiểu T-type có nhiều lợi thế nhất trong hệ thống năng lượng mặt trời áp mái sử dụng cho lưới điện 1 pha [8].

Các thuật toán cân bằng điện áp trên các tụ điện DC được nghiên cứu để nâng cao độ tin cậy của bộ biến đổi kiểu T-type 1 pha [9]. Tuy nhiên, các kết quả đạt được ở các công trình đã công bố cho thấy độ chênh lệch điện áp trên 2 tụ DC vẫn còn lớn. Do đó, bài báo đề xuất 1 thuật toán cân bằng điện áp trên các tụ DC mới, thuật toán này cho phép các hệ số điều chế của các van bán dẫn được thay đổi dựa vào giá trị đo được của từng điện áp trên mỗi tụ DC, nên trạng thái phóng nạp của mỗi tụ điện DC sẽ được kiểm soát và mức chênh lệch điện áp trên 2 tụ DC giảm đi đáng kể. Hiệu quả của phương pháp đề xuất được kiểm

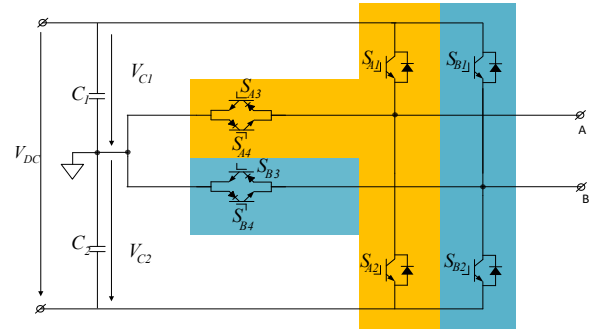
chúng ở cả mô hình mô phỏng và thực nghiệm ở dải công suất 5kW.

2. Thuật toán cân bằng điện áp trên tụ

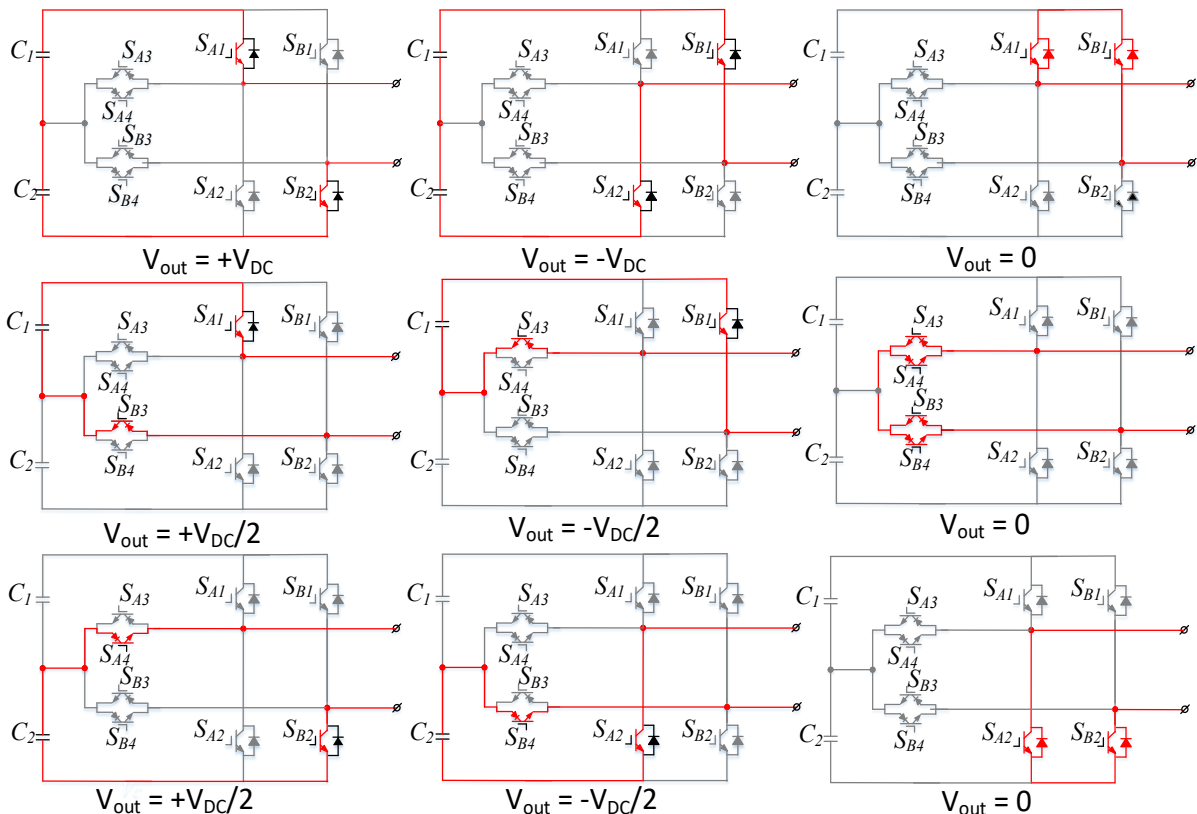
Trên Hình 1 là cấu trúc nghịch lưu kiểu T-Type 5 mức 1 pha bao gồm một cầu H-bridge 4 van IGBT(S_{A1} , S_{A2} , S_{B1} , S_{B2}) và mỗi nhánh được kết nối với điểm trung tính của tụ thông qua van hai chiều (S_{A3} , S_{A4}) và (S_{B3} , S_{B4}). Mỗi nhánh có thể tạo ra 3 mức điện áp tại đầu ra và tổng hợp điện áp ra 2 nhánh tạo ra 5 giá trị điện áp khác nhau là $+V_{DC}$, $+0,5V_{DC}$, 0, $-0,5V_{DC}$, $-V_{DC}$. Các trạng thái dẫn dòng của của các van bán dẫn được thể hiện trên Hình 2, tổ hợp các trạng thái này sẽ tạo ra mức điện áp đầu ra nghịch lưu T-type 1 pha và sự thay đổi điện áp trên mỗi tụ DC như ở Bảng 1, “↓” – điện áp trên tụ DC có xu hướng giảm, “↑”- điện áp trên tụ DC có xu hướng tăng, “-”- điện áp trên tụ DC không thay đổi giá trị [9]. Điều chế nghịch lưu T-Type 5 mức dựa trên phương pháp PWM dịch mức sóng mang (Hình 4), các sóng mang đồng pha với nhau và được so sánh với một sóng Sine chuẩn-được gọi là hệ số điều chế. Từ đó, bằng việc lấy đảo trạng thái của van S_{A1} , S_{A2}

sẽ thu được trạng thái của S_{A3} , S_{A4} . Tương tự với nhánh B sẽ có được trạng thái van S_{B3} và S_{B4} .

Bảng 1 và Hình 2 cho thấy trạng thái phóng nạp của các tụ điện chỉ bị tác động khi ở mức điện áp đầu ra $\pm\frac{1}{2} V_{DC}$. Với mỗi mức điện áp đầu ra $\pm\frac{1}{2} V_{DC}$ đều có chứa trạng thái dư cho phép thay đổi điện áp trên mỗi tụ DC. Dựa vào đặc điểm này, điện áp trên 2 tụ điện sẽ được cân bằng khi thời gian dẫn dòng của các van bán dẫn là phù hợp. Do đó, điều chế độ xung sẽ thực hiện dịch mức sóng sine chuẩn (Hình 5) để cân bằng điện áp trên tụ.



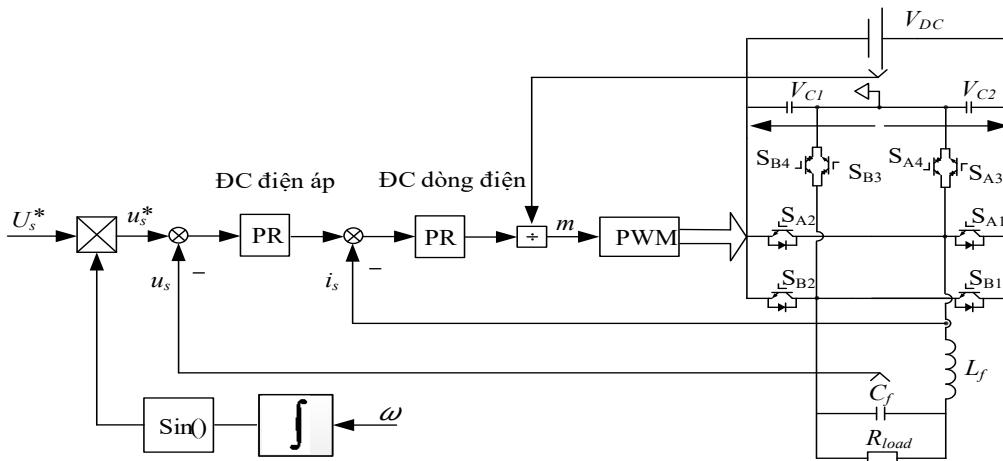
Hình 1. Cấu trúc nghịch lưu T-type



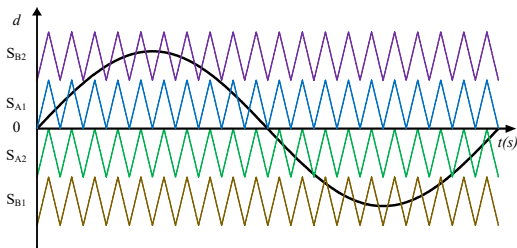
Hình 2. Trạng thái dẫn dòng của các van trong các mức điện áp đầu ra khác nhau

Bảng 1. Trạng thái van bán dẫn ứng với các mức điện áp và trạng thái phóng nạp của các tụ điện

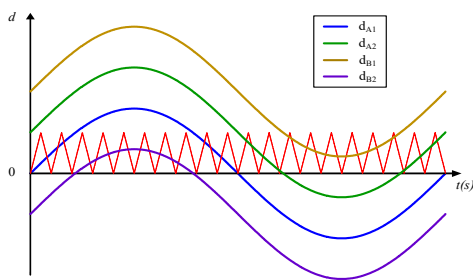
Biên độ điện áp ra	S _{A1}	S _{A2}	S _{A3}	S _{A4}	S _{B1}	S _{B2}	S _{B3}	S _{B4}	V _{C1}	V _{C2}
+V _{DC}	On	Off	Off	Off	Off	On	Off	Off	-	-
+1/2V _{DC}	On	Off	Off	Off	Off	Off	On	Off	↓	↑
	Off	Off	Off	On	Off	On	Off	Off	↑	↓
0	On	Off	Off	Off	On	Off	Off	Off	-	-
	Off	On	Off	Off	Off	On	Off	Off		
	Off	Off	On	On	Off	Off	On	On		
-1/2V _{DC}	Off	Off	On	Off	On	Off	Off	Off	↑	↓
	Off	On	Off	Off	Off	Off	Off	On	↓	↑
-V _{DC}	Off	On	Off	Off	On	Off	Off	Off	-	-



Hình 3. Cấu trúc điều khiển nghịch lưu kiểu T-type ứng dụng ở chế độ độc lập



Hình 4. Phương pháp điều chế dịch mức sóng mang



Hình 5. Phương pháp dịch mức sóng Sine

Thuật toán cân bằng điện áp trên tụ sẽ thực hiện như sau:

Bước 1: Đọc các giá trị điện áp trên tụ V_{C1} , V_{C2} .

Bước 2: So sánh giá trị điện áp trên V_{C1} , V_{C2} .

+) Nếu $V_{C1} \geq V_{C2}$ thì ta phóng điện tụ C1, nạp điện tụ C2.

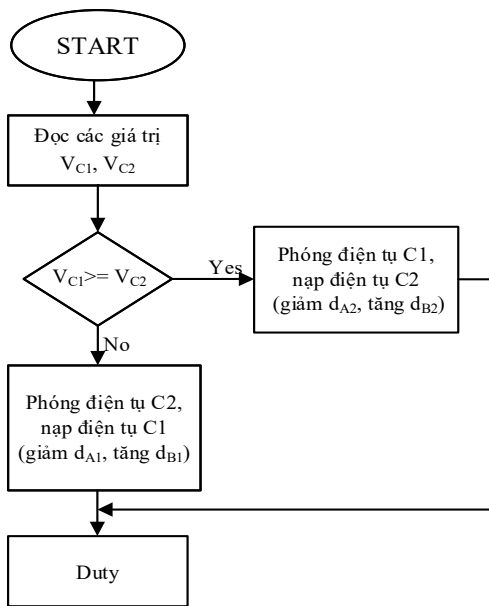
+) Nếu $V_{C1} < V_{C2}$ thì ta nạp điện tụ C1, phóng điện tụ C2.

Bước 3: Điều chỉnh hệ số điều chế phát xung cho từng van như ở Hình 8. Hệ số điều chế cho mỗi van bán dẫn ở Hình 8 là sự cải tiến so với các hệ số điều chế van ở Hình 7 đã được công bố trong tài liệu [9].

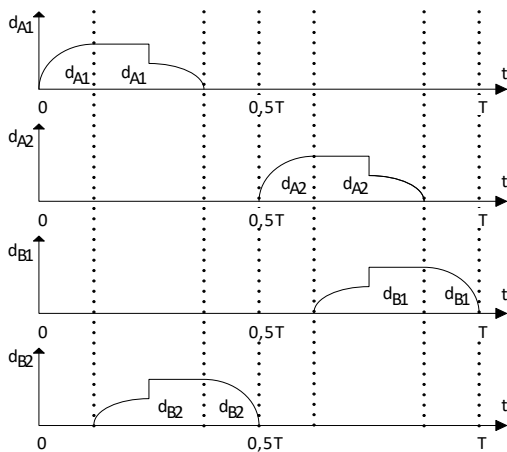
Các Hình 8 mô tả hệ số điều chế trong các phương pháp khác nhau. Ta thấy rằng khi có thuật toán cân bằng thì hệ số điều chế của các van đều nhau hơn. Dẫn đến vấn đề mất cân bằng do thời gian đóng mở của các van khác nhau giảm xuống. Bước tiếp theo, thuật toán điều chế độ rộng xung cải tiến sẽ được đưa vào cấu trúc điều khiển T-type 1 pha trong

chế độ độc lập như trên Hình 3. Cấu trúc điều khiển sử dụng 2 mạch vòng điện áp và dòng điện kiểu nối cấp, các bộ điều chỉnh dòng điện và điện áp sử dụng bộ cộng hưởng (Proportional resonant controller-PR) để triệt tiêu sai lệch tĩnh [10,11].

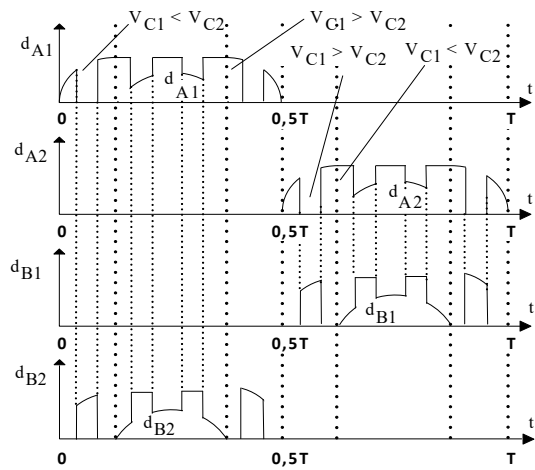
Hình 9-Hình 11 cho thấy kết quả của thuật toán cân bằng điện áp trên tụ DC theo [9] và thuật toán đề xuất. Khi có thuật toán cân bằng thì chênh lệch điện áp trên các tụ điện giảm xuống. Ngoài ra, Hình 9 ta thấy được rằng dạng xung của các van trong trường hợp sử dụng phương pháp cải tiến đều hơn so với phương pháp đã đề cập ở [9]. Nhờ đó thì chênh lệch điện áp tụ DC lớn nhất đạt được $\Delta V_C = 3$ V, trong khi đó khi sử dụng phương pháp ở tài liệu [9] chỉ đạt được $\Delta V_C = 50$ V. Do đó, độ méo sóng hài điện áp sau lọc LC chỉ còn THD = 1,8%.



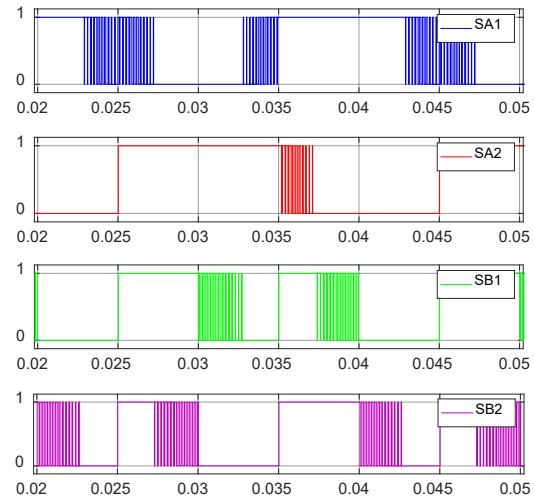
Hình 6. Thuật toán cân bằng điện áp trên tụ cải tiến



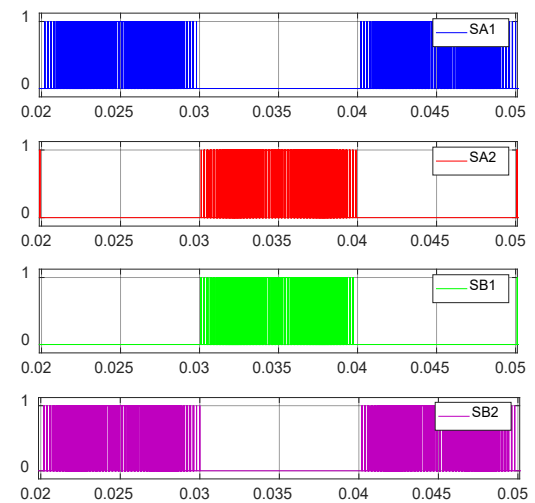
Hình 7. Hệ số điều chế phương pháp cân bằng điện áp trên tụ điện trước đây [9]



Hình 8. Hệ số điều chế phương pháp cân bằng điện áp trên tụ điện cải tiến



a) Mẫu xung khi thực hiện thuật toán cân bằng trên tụ DC theo [9]



b) Mẫu xung khi thực hiện thuật toán cân bằng tụ cải tiến

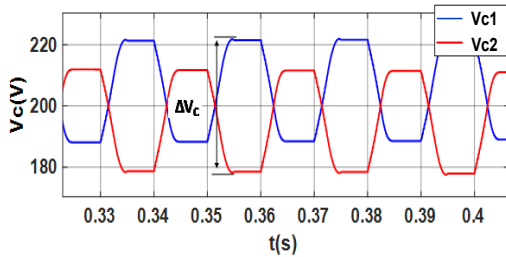
Hình 9. Mẫu xung đưa đến các van bán dẫn

3. Kết quả mô phỏng

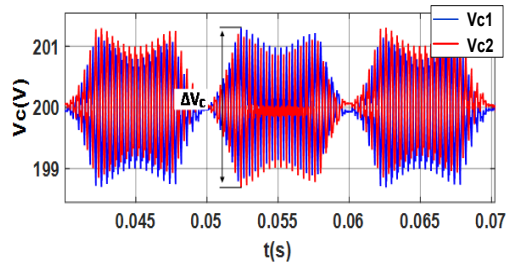
Bảng 2 dưới đây thể hiện thông số hệ thống trong mô phỏng.

Bảng 2. Thông số mô phỏng

Ký hiệu	Tham số	Giá trị
P	Công suất danh định	5kW
V_{DC}	Điện áp đầu vào	400VDC
V_{rms}	Điện áp đầu ra	220VAC
f_g	Tần số ra	50 Hz
f_s	Tần số đóng	5 kHz
L_f	Cuộn cảm lọc	1 mH
C_f	Tụ điện lọc	20 μ F
C_1, C_2	Tụ điện phía 1 chiều	940 μ F



a) thuật toán cân bằng điện áp trên tụ [9]



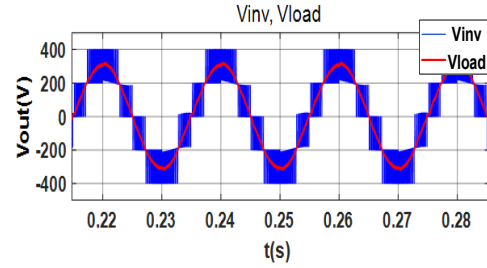
b) thuật toán cân bằng điện áp trên tụ đề xuất

Hình 10. Điện áp trên các tụ

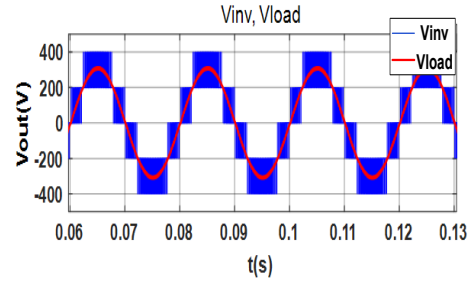
Phân tích kết quả mô phỏng được tổng hợp ở Bảng 3 cho thấy, với cùng 1 bộ tham số và điều kiện mô phỏng thấy thuật toán cân bằng điện áp trên tụ cải tiến cho chênh lệch điện áp giữa 2 tụ điện thấp cho đầu ra chất lượng tốt hơn so với thuật toán được mô tả trong [9].

Bảng 3. So sánh chênh lệch điện áp trên tụ theo các phương pháp

Các trường hợp	Không có cân bằng	Cân bằng điện áp trên tụ [9]	Cân bằng điện áp trên tụ cải tiến
ΔV_C	70V	50V	3V
THD	3,89%	3,08%	1,8%



a) Điện áp trước và sau lọc LC khi sử dụng thuật toán cân bằng điện áp trên tụ trong tài liệu [9]



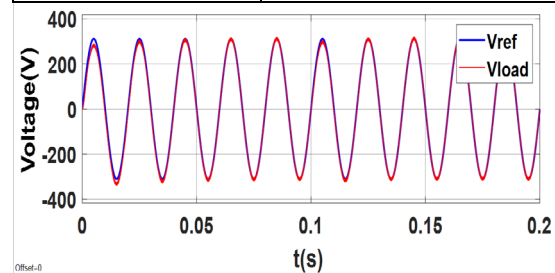
b) Điện áp trước và sau lọc LC khi sử dụng thuật toán cân bằng điện áp trên tụ cải tiến

Hình 11. Điện áp đầu ra trước và sau lọc LC

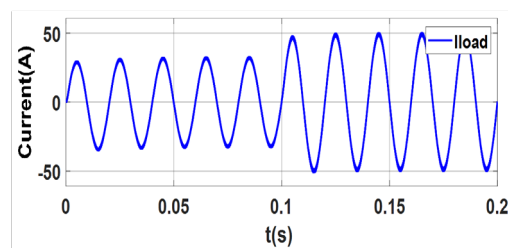
Bước tiếp theo sẽ là mô phỏng kiểm chứng thuật toán cân bằng điện áp trên tụ điện DC áp dụng trong hệ thống nghịch lưu kiểu T-type chế độ độc lập. Bảng 4 đưa ra thông số của các bộ điều chỉnh cộng hưởng.

Bảng 4. Thông số bộ điều khiển

Tham số	Giá trị
Bộ điều khiển điện áp	
K_{pv}, K_{iv}	0.04, 273
Bộ điều khiển dòng điện	
K_{pc}, K_{ic}	5, 85000



Hình 12. Điện áp đặt và điện áp trên tải



Hình 13. Dòng điện qua tải

Kết quả Hình 12 chỉ ra rằng điện áp tải (điện áp sau lọc LC) bám với giá trị đặt. Tại thời điểm 0,1s, công suất tải thay đổi từ 2.5 kW lên 5 kW thể hiện dòng điện tải Hình 13, điện áp tải sẽ được ổn định sau khoảng thời gian quá độ là 20ms.

4. Xây dựng hệ thống thực nghiệm

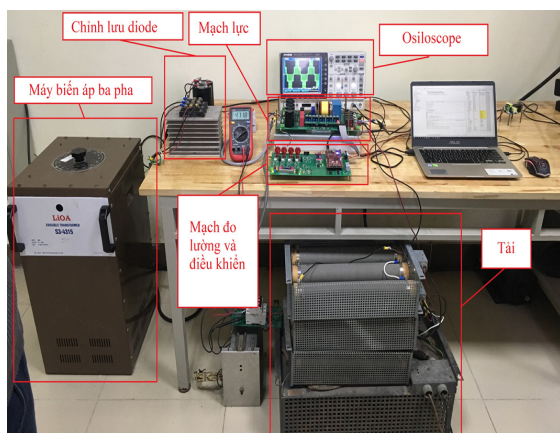
Một số thông số của hệ thống thực nghiệm được chỉ ra như trong Bảng 5.

Ở công suất 6 kW, khi thuật toán cân bằng điện áp trên các tụ cải tiến được áp dụng, chênh lệch điện áp là $\Delta V_C = 20$ V như Hình 15. Với hình dạng điện áp ra như trên Hình 16, hệ số méo dạng sóng hài điện áp sau lọc LC đạt được 4.25%.

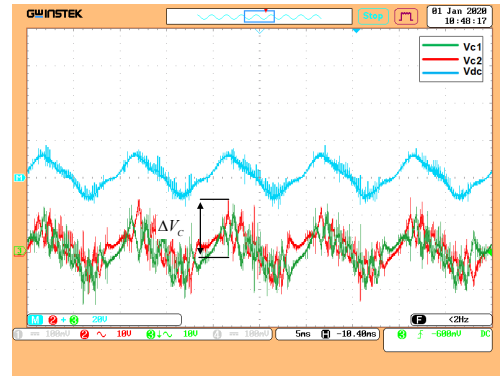
Trong khi đó ở dải công suất 3kW, khi thuật toán cân bằng điện áp trên các tụ cải tiến được áp dụng, chênh lệch điện áp là $\Delta V_C = 10$ V như Hình 17. Với hình dạng điện áp ra như trên Hình 18, hệ số méo dạng sóng hài điện áp sau lọc LC đạt được 4.25%.

Bảng 5. Thông số mạch thực

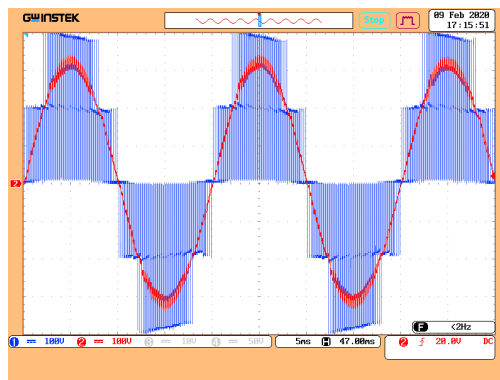
Kí hiệu	Tham số	Giá trị
V_{DC}	Điện áp đầu vào	400 VDC
V_{rms}	Điện áp đầu ra	220 VAC
f_l	Tần số cơ bản	50 Hz
f_s	Tần số phát xung	5 kHz
L_f	Cuộn cảm lọc	0.8 mH
C_f	Tụ điện lọc	20 μ F
C_1, C_2	Tụ điện phía 1 chiều	940 μ F
IGBT Fuji	12MBI75VN-120-50 (1,2kV/50A)	
Card điều khiển	TMS320F28379D	



Hình 14. Mô hình thực nghiệm nghịch lưu T-Type 1 pha



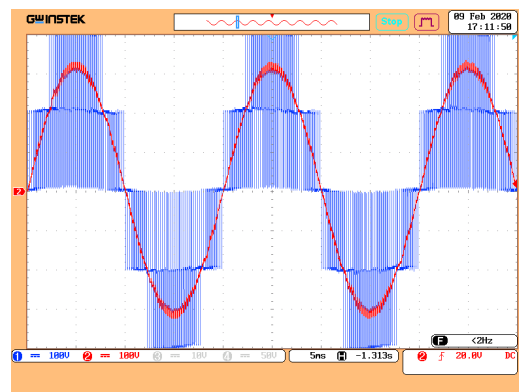
Hình 15. Chênh lệch điện áp trên các tụ.



Hình 16. Điện áp đầu ra trước và sau lọc



Hình 17. Điện áp trên các tụ điện



Hình 18. Điện áp đầu ra trước và sau lọc

Kết quả thực nghiệm có sai khác so với mô phỏng do nguồn điện 1 chiều đặt vào mạch nghịch lưu T-Type 1 pha được cấp bởi nguồn chỉnh lưu diode 3 pha, nên điện áp bị đập mạch 6 lần trong mỗi chu kỳ điện áp lưới và công suất hữu hạn. Trong khi đó, nguồn 1 chiều trong sơ đồ mô phỏng là nguồn lý tưởng.

5. Kết luận

Bài báo đề xuất thuật toán cân bằng điện áp trên các tụ điện bằng cách thay đổi hệ số điều chế. Thuật toán đưa ra đã giảm được chênh lệch điện áp trên các tụ điện. Nhờ đó giảm được độ méo sóng hài điện áp đầu ra tang độ tin cậy của bộ biến đổi nghịch lưu kiểu T-type 1 pha. Tính hiệu quả và khả thi của thuật toán đề xuất được kiểm chứng bằng kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho bộ T-type 1 pha ở chế độ độc lập. Thuật toán cân bằng điện áp trên tụ đề xuất có thể áp dụng cho bộ T-type 1 pha ở chế độ nối lưới, và sẽ được công bố trong các bài báo tiếp theo.

6. Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin được gửi lời cảm ơn chân thành đến Đề tài cấp Khoa học cấp Nhà nước mã số KC.05.22/16-20 đã tạo điều kiện cho chúng tôi thực hiện bài viết này.

Tài liệu tham khảo

- [1] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, in IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992) , 11 June 2014, <http://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>.
- [2] R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodriguez, Grid Converter for Photovoltaic and Wind Power Systems, John Wiley & Sons, 2011.
- [3] M. F. Kangarlu and E. Babaei, A Generalized Cascaded Multilevel Inverter Using Series Connection of Submultilevel Inverters, in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 2, pp. 625-636, Feb. 2013, <http://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2203339>.
- [4] Al-Judi, A. and Nowicki, E. (2013), Cascading of diode bypassed transistor-voltage-source units in multilevel inverters. IET Power Electronics, 6: 554-560. <http://doi.org/10.1049/iet-pel.2011.0499>.
- [5] M. Ben Smida and F. Ben Ammar, Modeling and DBC-PSC-PWM Control of a Three-Phase Flying-Capacitor Stacked Multilevel Voltage Source Inverter, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 7, pp. 2231-2239, July 2010, <http://doi.org/10.1109/TIE.2009.2030764>.
- [6] Y. Ounejjar and K. Al-Haddad, Multiband hysteresis controller of the novel three phase seven-level PUC-NPC converter, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, Austria, 2013, pp. 6257-6262, <http://doi.org/10.1109/IECON.2013.6700164>.
- [7] U. Choi, F. Blaabjerg and K. Lee, Reliability Improvement of a T-Type Three-Level Inverter With Fault-Tolerant Control Strategy, in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 5, pp. 2660-2673, May 2015, <http://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2325891>.
- [8] A. Anthon, Z. Zhang, M. A. E. Andersen, D. G. Holmes, B. McGrath and C. A. Teixeira, The Benefits of SiC mosfets in a T-Type Inverter for Grid-Tie Applications, in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 4, pp. 2808-2821, April 2017, <http://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2582344>.
- [9] M. Aly, E. M. Ahmed, M. Orabi and M. Shoyama, An enhanced PWM method for loss balancing of five level T-type inverter in PV systems, 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), San Antonio, TX, USA, 2018, pp. 2530-2535, <http://doi.org/10.1109/APEC.2018.8341373>.
- [10] M. Parvez, M. F. M. Elias and N. A. Rahim, Performance analysis of PR current controller for single-phase inverters, 4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016), Kuala Lumpur, Malaysia, 2016, pp. 1-8, <http://doi.org/10.1049/cp.2016.1311>.
- [11] Simone Buso and Paolo Mattavelli, Digital Control in Power Electronics, Morgan & Claypool, 2006, <http://doi.org/10.2200/S00047ED1V01Y200609PEL002>.