

Three Level Boost T-Type Inverter in Open-Circuit Fault of S_{1X} Power Switch Condition

Vinh-Thanh Tran^{ORCID}, Khai-M Nguyen^{ORCID}, Duc-Tri Do^{ORCID}
Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam

*Corresponding author. Email: tridd@hcmute.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 11/07/2023
Revised: 03/08/2023
Accepted: 18/08/2023
Published: 28/08/2024

KEYWORDS

Fault-tolerant;
Open-circuit fault;
Quasi Switch Boost;
T-Type inverter;
SinPWM strategy.

ABSTRACT

There are many pulse-width modulation (PWM) control techniques reported for three-level T-type inverter (3L-T²I) to address open-circuit fault (OCF) of half-bridge power switches. However, these conventional fault-tolerant (FT) strategies significantly increase voltage rating of capacitors in comparison with normal operation. This paper presents a new 3LBT²I-FT which can improve capacitor voltage rating compared to others. In this topology, a conventional three-level boost (3LB) converter combined with a normally closed relay is installed before 3L-T²I. In post-fault condition, the relay is opened, and the proposed inverter operates like a two-stage two-level inverter. Under this method, the faulty power switch operating state of inverter side is recovered by power switches of 3LB circuit and bi-directional power switches of 3L-T²I. In comparison with previous FT methods, the proposed FT method can improve voltage stress of capacitor by 50%. This advantage leads to decrease power switch voltage rating. The proposed topology/FT method are verified by PSIM software.

Nghịch Lưu Hình-T Tăng Áp Ba Bậc trong Điều Kiện Sự Cố Hở Mạch Khóa Công Suất S_{1X}

Trần Vinh Thanh^{ORCID}, Nguyễn M Khai^{ORCID}, Đỗ Đức Tri^{ORCID}
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

*Tác giả liên hệ. Email: tridd@hcmute.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 11/07/2023
Ngày hoàn thiện: 03/08/2023
Ngày chấp nhận đăng: 18/08/2023
Ngày đăng: 28/08/2024

TỪ KHÓA

Chịu đựng sự cố;
Sự cố hở mạch;
Tăng áp tựa khóa chuyển mạch;
Nghịch lưu hình T;
Chiến lược SinPWM.

TÓM TẮT

Có nhiều kỹ thuật điều khiển điều chế độ rộng xung (PWM) được nghiên cứu cho nghịch lưu hình-T ba bậc (3L-T²I) để giải quyết lỗi hở mạch (OCF) của khóa công suất nửa cầu. Tuy nhiên, các chiến lược chịu lỗi (FT) thông thường này làm tăng đáng kể định mức điện áp của tụ điện so với hoạt động bình thường. Bài báo này giới thiệu 3LBT²I-FT mới có thể cải thiện định mức điện áp của tụ điện so với các cấu hình nghịch lưu chịu lỗi khác. Trong cấu hình này, bộ chuyển đổi tăng áp ba bậc (3LB) thông thường kết hợp với role thường đóng được thêm vào trước 3L-T²I. Trong điều kiện sau sự cố, role được mở và nghịch lưu được đề xuất hoạt động giống như nghịch lưu hai bậc hai tầng. Theo phương pháp này, trạng thái hoạt động của khóa công suất bị sự cố phía nghịch lưu được phục hồi bằng các khóa công suất của mạch 3LB và các khóa công suất hai chiều của 3L-T²I. So với các phương pháp FT trước đây, phương pháp FT được đề xuất có thể cải thiện 50% điện áp đặt trên tụ điện. Ưu điểm này dẫn đến giảm điện áp đặt trên khóa công suất. Cấu hình đề xuất và phương pháp FT được kiểm chứng bởi phần mềm PSIM.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2024.1433>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Giới thiệu

Bộ chuyển đổi điện tử công suất đóng vai trò cực kỳ quan trọng trong việc thúc đẩy sự phát triển của ngành công nghiệp và mang lại sự linh hoạt cho người sử dụng. Các bộ chuyển đổi điện tử công suất có ứng dụng đa dạng trong nhiều loại thiết bị khác nhau, chẳng hạn: hệ thống điều khiển động cơ, hệ thống truyền tải AC linh hoạt (FACTS), hệ thống truyền tải điện áp DC cao áp (HVDC) và cung cấp nguồn điện cho các thiết bị điện tử dân dụng [1]. Trong thập kỷ vừa qua, lĩnh vực nghiên cứu phổ biến và mang lại nhiều lợi ích đáng kể là chuyển đổi năng lượng tái tạo [2]. Trong số các nguồn năng lượng tái tạo, hệ thống quang điện (PV) được coi là một nền tảng quan trọng trong việc giảm lượng khí thải ra môi trường. Trong hệ thống quang điện, bộ chuyển đổi điện tử công suất đóng vai trò cực kỳ quan trọng vì nó là phối hợp chuyển đổi năng lượng giữa pin mặt trời và hệ thống lưới điện xoay chiều hoặc thiết bị tải một chiều. Hiệu suất, tính ổn định và khả năng hoạt động trong trường hợp xảy ra lỗi là những yếu tố cốt yếu để tận dụng tiềm năng năng lượng mặt trời PV trên diện rộng.

Trong tài liệu [3]-[5], đã được trình bày nhiều cấu hình đa bậc khác nhau cho bộ chuyển đổi hệ thống PV, bao gồm cả cấu hình có hoặc không có cách ly điện. Mặt khác, cấu hình nghịch lưu đa bậc được sử dụng phổ biến từ hai đến nhiều bậc điện áp khác nhau. Thời kỳ đầu, các nhà nghiên cứu đã sử dụng các bộ nghịch lưu hai bậc để chuyển đổi năng lượng. Tuy nhiên, trong các cấu trúc nghịch lưu hai bậc này, chỉ có khả năng hoạt động ở chế độ giảm áp. Điều này tạo ra một hạn chế đối với các ứng dụng PV. Vì vậy, để khắc phục nhược điểm này, một bộ chuyển đổi DC-DC đã được thêm vào trước bộ nghịch lưu hai bậc. Nhưng, điều này cũng đồng nghĩa với việc tăng kích thước và trọng lượng của hệ thống.

Một vấn đề quan trọng liên quan đến bộ nghịch lưu đa bậc là độ tin cậy của chúng. Có nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để cải thiện khả năng hoạt động của bộ nghịch lưu trong trường hợp xảy ra sự cố. Hai giải pháp đã được đề xuất để tăng khả năng hoạt động trong trường hợp sự cố cho bộ nghịch lưu là tăng cường nhánh khóa công suất dự phòng (phần cứng) hoặc thay đổi phương pháp điều chế (phần mềm) [6], [7]. Tuy nhiên, giải pháp tăng cường phần cứng sẽ dẫn đến tăng kích thước của hệ thống, trong khi giải pháp xử lý bằng phần mềm có thể làm giảm điện áp đầu ra. Có nhiều nghiên cứu đã tìm hiểu về hoạt động trong trường hợp sự cố hở mạch của các khóa công suất [7] - [10]. Nghiên cứu trong [7], [8] đã chỉ ra rằng khi xảy ra sự cố hở mạch tại khóa công suất, hệ thống sẽ cô lập nhánh bị sự cố và thay đổi phương pháp điều chế, cùng với việc tăng cường tỷ số đóng D và chỉ số điều chế M để bù điện áp mất mát do nhánh bị sự cố bị cô lập. Tuy nhiên, phương pháp được nghiên cứu trong [7], [8] có một hạn chế là tỷ số đóng D khá cao và chỉ số điều chế M khá thấp, dẫn đến dòng điện và điện áp cao trên các khóa công suất. Hơn nữa, vấn đề chưa được giải quyết khi xảy ra sự cố hở mạch tại các khóa công suất trong mạng nguồn kháng đã được đề cập trong nghiên cứu [8]. Nhằm giảm dòng điện đầu vào (dòng qua cuộn dây tăng áp) và giảm điện áp đặt trên các khóa công suất, nghiên cứu [9] đã đề xuất một kỹ thuật tái cấu trúc (Reconfigured) bộ nghịch lưu và phương pháp điều khiển để giảm độ gợn của cuộn dây tăng áp, cũng như cải thiện tỷ số đóng D và chỉ số điều chế M sao cho điện áp đặt trên các khóa công suất nhỏ hơn so với nghiên cứu trong [7], [8]. Tuy nhiên, việc áp dụng kỹ thuật tái cấu trúc mạch và bù điện áp mất do nhánh bị sự cố phía nghịch lưu bị cô lập đã dẫn đến tăng điện áp DC-link từ 368 V lên 736 V. Điện áp DC-link là 736 V khi đặt trên khóa bán dẫn công suất trong trường hợp sự cố sẽ gây khó khăn trong việc lựa chọn khóa công suất khi hoạt động bình thường và sự cố mà điều này làm gia tăng giá thành.

Nhằm khắc phục vấn đề điện áp DC-link cao khi xảy ra sự cố hở mạch tại khóa công suất của mạch nghịch lưu, nghiên cứu [10] đã thể hiện sự vượt trội trong việc tạo ra điện áp đặt trên các linh kiện bán dẫn thấp nhất có thể. Đặc biệt, đối với lỗi hở mạch xảy ra tại S_{1X} , phương pháp đề xuất có khả năng giảm điện áp đặt trên các khóa S_{1X} hoặc S_{4X} xuống chỉ bằng nửa so với nghiên cứu trước đây [7] - [9] bởi vì nghiên cứu [10] hoạt động ở hai chạng (DC-DC và DC-AC) kết hợp kỹ thuật điều chế vector không gian bởi các vector dự phòng để điều khiển.

Trong bài báo này, một kỹ thuật điều khiển SinPWM được đề xuất hoạt động dưới điều kiện bình thường và sự cố. Ngoài ra, với kỹ thuật điều khiển mới này sẽ giúp điện áp trên tụ giảm ít nhất 50% so với nghiên cứu [9], [10]. Nguyên lý hoạt động dưới điều kiện bình thường và điều kiện sự cố hở mạch

$$V_{CP} = V_{CN} = \frac{V_{dc}}{2(1-D)} \quad (1)$$

Với V_{dc} là điện áp DC đầu vào, D là tỷ số đóng của hai khóa S_{2P} và S_{2N} và $0 \leq D < 1$.

Điện áp DC-link, V_{PN} , được tính toán như sau:

$$V_{PN} = V_{CP} + V_{CN} = \frac{V_{dc}}{1-D} \quad (2)$$

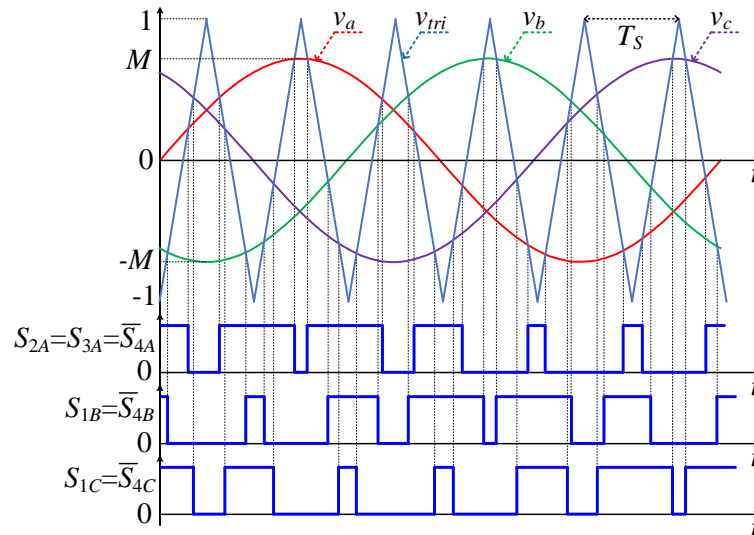
Điện áp pha đỉnh đầu ra, \hat{V}_x , được xác định như sau:

$$\hat{V}_x = MV_{PN} / 2 = MV_{dc} / (2-2D) \quad (3)$$

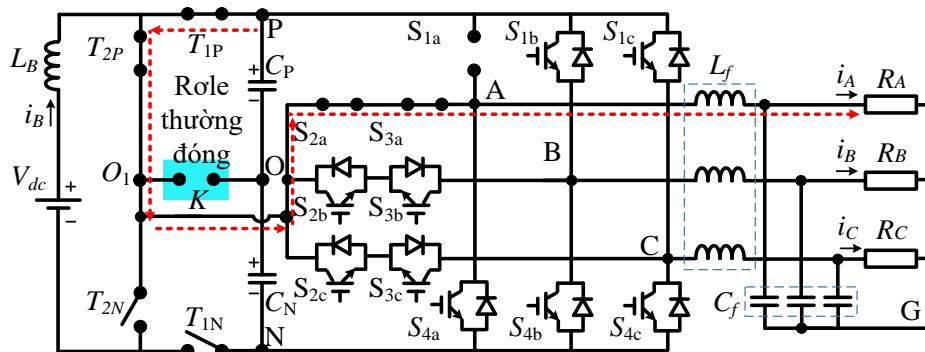
Độ lợi điện áp, G , của mạch nghịch lưu được xác định như sau:

$$G = \hat{V}_x / (V_{dc} / 2) = M / (1-D) \quad (4)$$

2.2. Trạng thái 3LBT²I-FT hoạt động ở sự cố hở mạch khóa công suất S_{1x} .



Hình 2. Tín hiệu điều khiển của các khóa công suất phía nghịch lưu khi sự cố hở mạch khóa công suất S_{1A} .



Hình 3. Cấu hình ba bậc 3LBT²I-FT khi sự cố hở mạch khóa công suất S_{1A} .

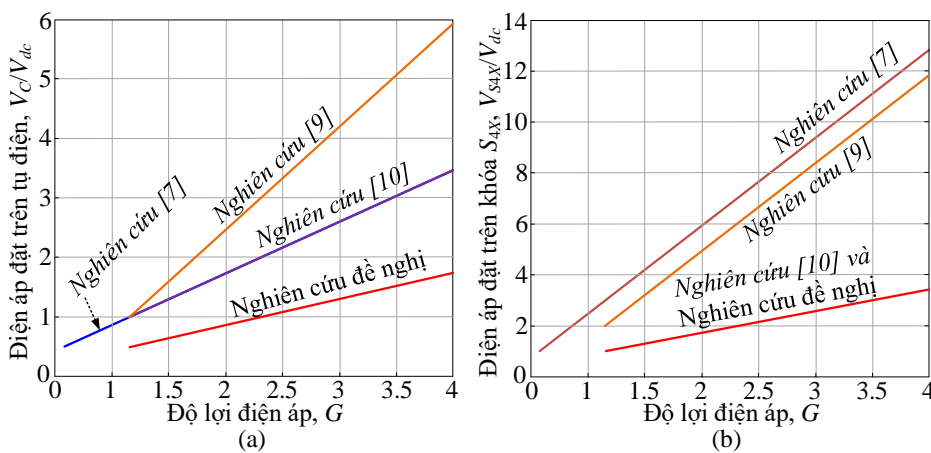
Khi sự cố hở mạch khóa công suất S_{1A} , điện áp đầu ra pha A bị suy giảm. Để khôi phục điện áp bị suy giảm này, các khóa công suất T_{1P} và T_{2P} được kích đóng đồng thời. Lưu ý, thời điểm này role được kích mở để hở mạch điểm O_1 và O . Pha A bây giờ hoạt động giống như nghịch lưu hai bậc: $+V_{PN}/2$ và $-V_{PN}/2$. Để tạo ra trạng thái $+V_{PN}/2$ tại pha A, hai khóa công suất hai chiều S_{2x} và S_{3x} được kích dẫn, trong khi đó để đạt trạng thái $-V_{PN}/2$ hai khóa S_{3x} và S_{4x} được kích dẫn như trình bày ở Hình 3. Tín hiệu điều

khiến cho các khóa công suất khi bị sự cố hở mạch khóa công suất S_{1A} được trình bày như Hình 2. Điện áp đầu ra vẫn duy trì như trạng thái hoạt động bình thường.

Để duy trì điện áp DC-link không đổi khi hoạt động ở sự cố hở mạch khóa công suất S_{1A} , hai khóa công suất T_{1N} và T_{2N} được sử dụng. Để nạp năng lượng cho cuộn dây, khóa T_{1N} được kích dẫn trong khi đó khóa T_{2N} bị kích ngắt. Để nạp năng lượng cho tụ điện và truyền năng lượng cho tải, khóa T_{1N} được kích ngắt trong khi đó khóa T_{2N} bị kích dẫn, cuộn dây và nguồn điện một chiều đầu vào nạp cho tụ điện. Có thể thấy rằng, khi hoạt động ở sự cố hở mạch khóa công suất S_{1A} , việc thay thế T_{1N} và T_{2N} hoạt động như một bộ chuyển đổi DC-DC mà điều này làm cho điện áp và dòng điện trên cuộn dây cũng như điện áp trên hai tụ C_P và C_N không đổi so với hoạt động bình thường.

2.3. So sánh điện áp đặt trên các phần tử công suất khi sự cố hở mạch xảy ra tại S_{1X} .

Để làm nổi bật đóng góp chính của nghiên cứu đề xuất so với các nghiên cứu trước đây, Hình 4 trình bày điện áp đặt trên các phần tử công suất.



Hình 4. So sánh điện áp đặt trên các phần tử công suất bởi các nghiên cứu [7], [9], [10] và nghiên cứu đề xuất.

Trong số những cấu hình 3LBT²I-FT, cấu hình đề xuất được so sánh với các cấu hình [7], [9], và [10] khi cùng độ lợi điện áp, G và chỉ số điều chế. Các nghiên cứu [7], [9] sử dụng cấu hình nghịch lưu một chặng (single stage), do đó chỉ số điều chế bị giới hạn ($M+D \leq 1$). Trong khi đó, cả hai nghiên cứu [10] và nghiên cứu đề xuất hoạt động hai chặng (two stage) dẫn đến chỉ số điều chế cao hơn. Vì vậy, nghiên cứu [10] và nghiên cứu đề xuất có điện áp đặt trên tụ thấp hơn như được trình bày ở Hình 4(a). Nghiên cứu [10] và nghiên cứu đề xuất có cùng độ lợi (G) và hệ số tăng áp (B). Tuy nhiên, trong trường hợp sự cố hở mạch tại khóa công suất S_{1A} , nghiên cứu [10] sử dụng chỉ một tụ điện trong khi nghiên cứu đề xuất sử dụng hai tụ. Vì thế, điện áp trên tụ của nghiên cứu đề xuất thấp hơn nghiên cứu [10]. Tại độ lợi điện áp bằng 3, điện áp đặt trên tụ điện V_C theo điện áp đầu vào là 4.3 đối với nghiên cứu [9] và bằng 2.7 so với nghiên cứu [7] và nghiên cứu [10], nghiên cứu đề xuất là 1.25. Kết quả là, nghiên cứu đề xuất giảm ít nhất 50% điện áp trên tụ so với các nghiên cứu [7], [9], [10]. Hình 4(b) trình bày điện áp đặt trên khóa công suất S_{4X} trong trường hợp xảy ra sự cố hở mạch tại khóa công suất S_{1A} . Tại độ lợi điện áp bằng 3, điện áp đặt trên khóa công suất S_{4X} theo điện áp đầu vào là 9.5 đối với nghiên cứu [7] và bằng 8.3 so với nghiên cứu [9]. Trong khi đó, nghiên cứu [10] và nghiên cứu đề xuất đều có giá trị là 2.5. Tuy nhiên, nghiên cứu [10] chỉ sử dụng một tụ điện.

3. Kết quả mô phỏng và thử nghiệm

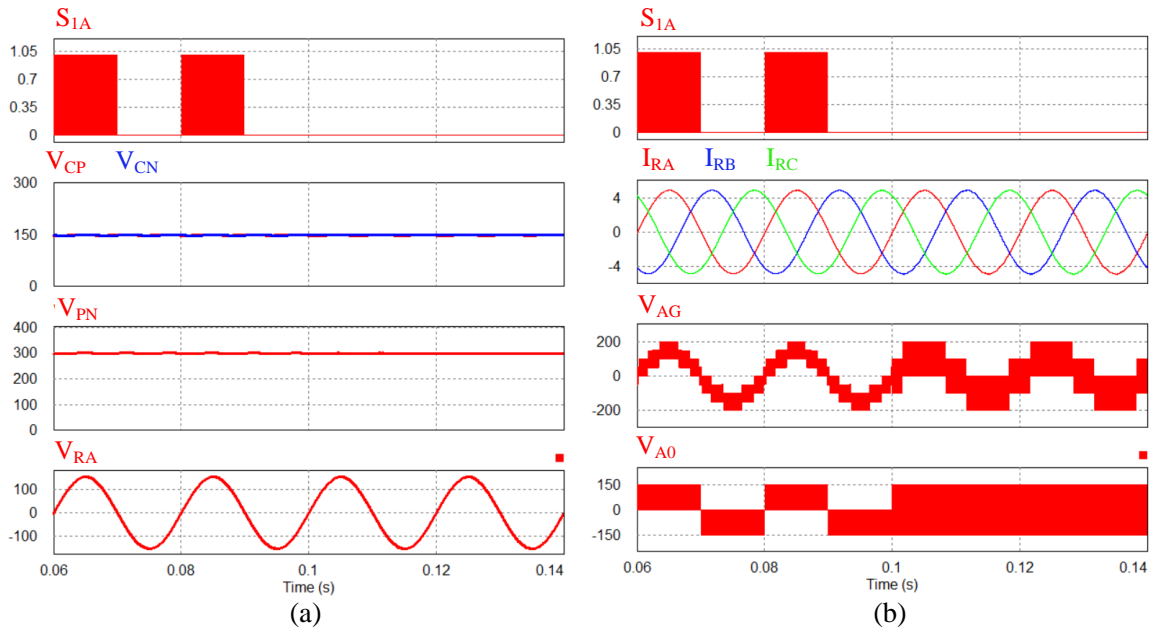
Mô hình mô phỏng được trình bày với sự hỗ trợ của phần mềm PSIM với các thông số sau:

Bảng 2. Các thông số mô phỏng và thử nghiệm của 3LBT²I-FT

Thông số các thành phần		Giá trị
Điện áp đầu vào	V_{dc}	200-V

Điện áp đầu ra	V_o	110-V _{RMS}
Tần số đầu ra	f_o	50-Hz
Tần số sóng mang	f_s	10-kHz
Tỉ số đóng	D	0.33
Chỉ số điều chế	M	0.9
Điện cảm	L_B	3-mH/20 A
Tụ điện	$C_P = C_N$	680- μ F/400 V
Mạch lọc LC	L_f và C_f	3-mH và 10- μ F
Tải trở	R_t	32- Ω

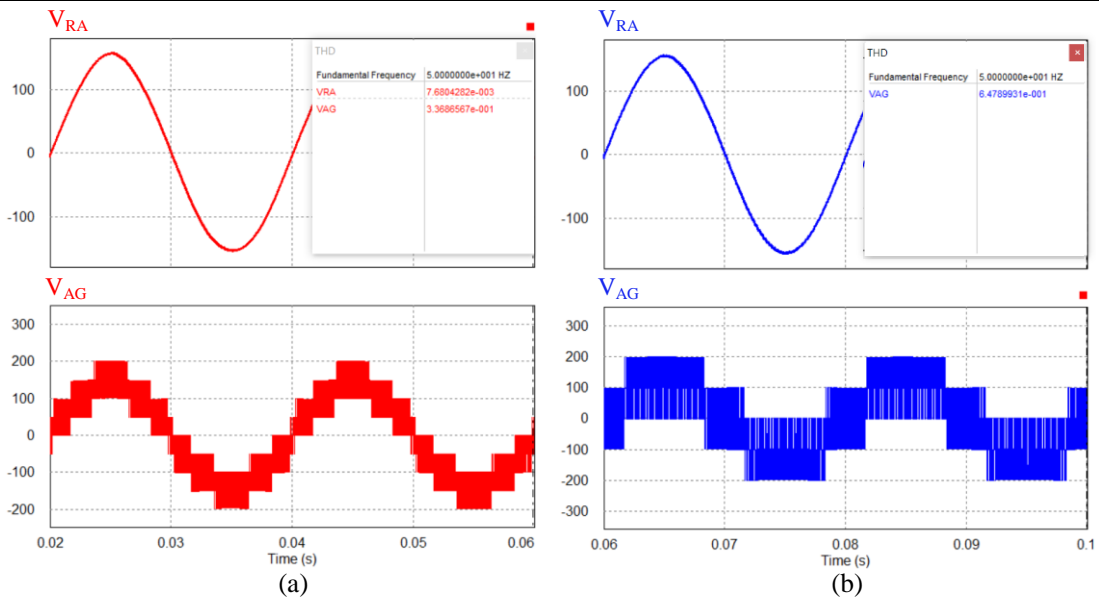
3.1. Kết quả mô phỏng.



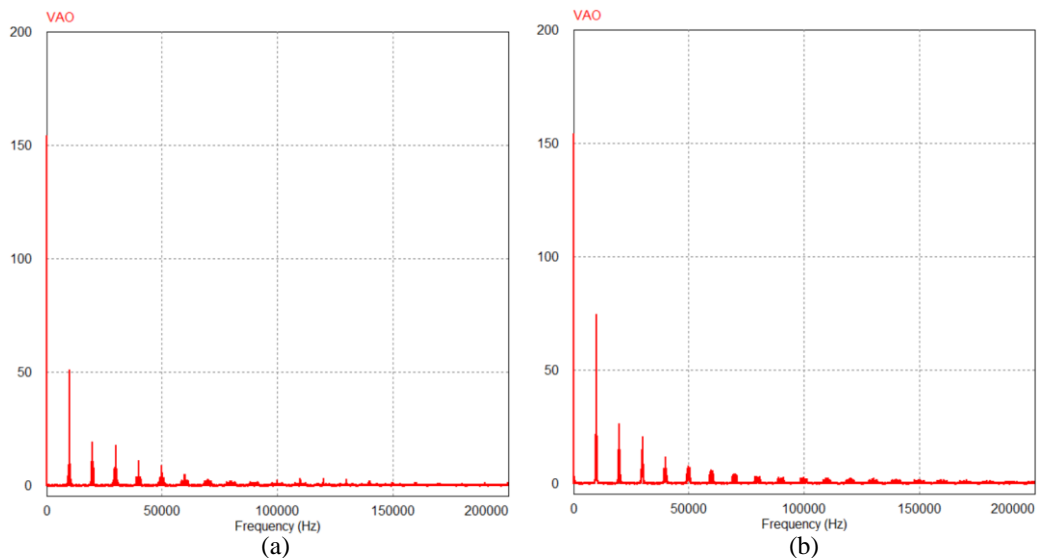
Hình 5. Kết quả mô phỏng dạng sóng của 3LBT²I-FT: (a) Dạng sóng tín hiệu điều khiển (S_{1A}), điện áp trên tụ (V_{CP} và V_{CN}), điện áp DC-link (V_{PN}) và điện áp pha đầu ra (V_{RA}); (b) dạng sóng dòng điện đầu ra (I_{RA} , I_{RB} , I_{RC}), điện áp pha đầu ra chưa qua bộ lọc (V_{AG}), điện áp cực đầu ra (V_{AO}) khi điện áp đầu vào 200V.

Hình 5(a), nhìn từ trên xuống dưới, tín hiệu điều khiển cho khóa công suất S_{1A} . Trong khoảng thời gian từ 0.02 đến 0.06, cấu hình 3LBT²I-FT hoạt động trong điều kiện bình thường. Từ 0.06 đến 0.1, tín hiệu điều khiển cho 3LBT²I-FT bị ngắt do hoạt động trong điều kiện sự cố lỗi hở mạch khóa công suất S_{1A} . Điện áp trên tụ V_{CP} và V_{CN} trước và sau sự cố, khi điện áp đầu vào 200-V và tỷ số đóng là 0.33 theo phương trình (2) có thể thấy rằng, điện áp trên hai tụ điện V_{CP} và V_{CN} đều là 150-V. Điện áp DC-link (V_{PN}) là tổng của điện áp hai tụ điện áp tụ V_{CP} và V_{CN} , nên là 300-V. Điện áp pha đầu ra pha A có trị hiệu dụng là 110-V_{RMS}.

Hình 5(b), nhìn từ trên xuống dưới, tín hiệu điều khiển cho khóa công suất S_{1A} . Dòng điện hiệu dụng 3 pha đầu ra trước và sau sự cố hở mạch khóa công suất S_{1X} có giá trị bằng nhau và là 3.42-A_{RMS}. Điện áp pha đầu ra chưa qua bộ lọc (V_{AG}), trước và sau sự cố có biên độ đỉnh là 200-V khi tỷ số đóng là 0.33. Điện áp cực đầu ra (V_{AO}), trước sự cố có 3 bậc +150-V, 0-V, -150-V. Sau khi xảy ra sự cố, điện áp cực đầu ra có hai bậc +150-V và -150-V.



Hình 6. THD và dạng sóng điện áp đầu ra sau và trước khi lọc.

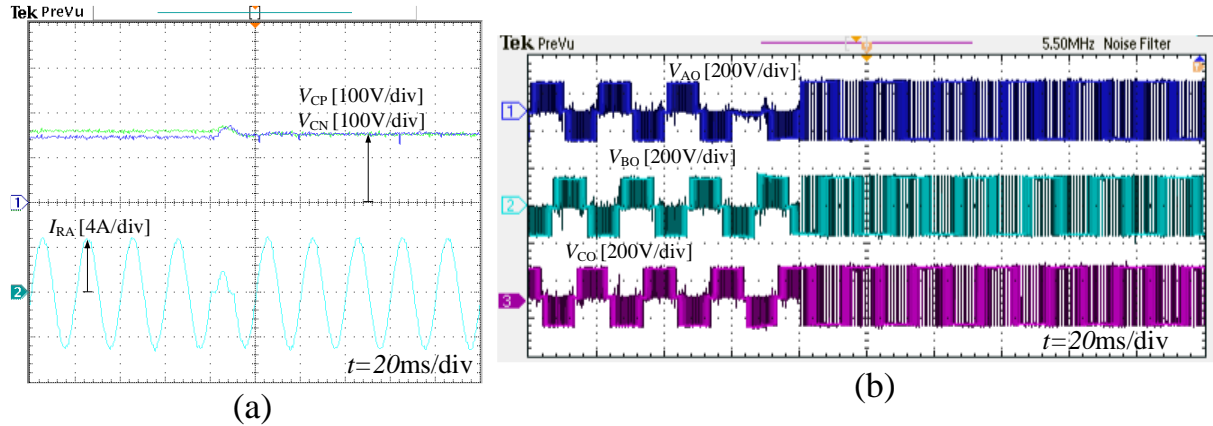


Hình 7. FFT điện áp cực đầu ra trước và sau sự cố hở mạch khóa công suất S_{1A} . (a) trước sự cố hở mạch, (b) sau sự cố hở mạch.

Hình 6, trình bày tổng méo dạng sóng hài (THD) của nghiên cứu đề xuất. Có thể thấy rằng, THD điện áp pha tải đầu ra trước và sau bộ lọc của nghiên cứu đề xuất lần lượt là 33.68% và 0.76% trong điều kiện hoạt động bình thường. Khi xảy ra sự cố lỗi hở mạch khóa công suất S_{1A} , THD điện áp pha tải đầu ra trước bộ lọc của nghiên cứu đề xuất là 64.678%, trong khi đó THD điện áp pha tải đầu ra sau bộ lọc thay đổi không đáng kể, vì điện áp đầu ra được đưa qua bộ lọc tần số thấp có giá trị 3 mH và 10 μ F.

Hình 7 trình bày FFT của điện áp cực đầu ra trước và sau sự cố hở mạch khóa công suất S_{1A} . Có thể thấy rằng, Hình 7(a) và Hình 7(b) điện áp cực hài bậc 1 đều là 156-V. Phổ hài của Hình 7(a) thấp hơn so với phổ hài của Hình 7(b) bởi vì điện áp cực trước sự cố là 3 bậc trong khi đó điện áp cực sau sự cố là hai bậc.

3.2. Kết quả thử nghiệm.



Hình 8. FFT điện áp cực đầu ra trước và sau sự cố hở mạch khóa công suất S_{1A} . (a) trước sự cố hở mạch, (b) sau sự cố hở mạch.

4. Kết luận

Cấu hình nghịch lưu tăng áp 3 bậc hình T với khả năng hoạt động dưới điều kiện bình thường và sự cố hở mạch khóa công suất S_{1X} . Cấu hình và giải thuật đề xuất có những ưu điểm chính sau đây: 1) Giảm ít nhất 50% điện áp đặt trên tụ so với các nghiên cứu [7], [9], [10], 2) Tại độ lợi điện áp bằng 3 và điện áp đặt trên khóa công suất S_{4X} theo điện áp đầu vào, giảm 7 so với các nghiên cứu [7], [9]. Phân tích nguyên lý hoạt động cho cấu hình 3LBT²I-FT phù hợp với cơ sở lý thuyết. Kết quả mô phỏng được so sánh với cơ sở lý thuyết để làm nổi bật giải thuật đề xuất. Nghiên cứu này phù hợp với các hệ thống yêu cầu độ ổn định và độ tin cậy cao.

Lời cảm ơn

Bài báo này được thực hiện tại phòng thí nghiệm điện tử công suất nâng cao D405 với sự hỗ trợ của dự án thuộc năm 2023 cũng như chuyên đề cấp trường của nghiên cứu sinh Trần Vĩnh Thanh Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh.

Trần Vĩnh Thanh được tài trợ bởi Chương trình học bổng đào tạo thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), mã số VINIF.2022.TS112.

Xung đột lợi ích

Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích trong bài báo này.

Danh mục từ viết tắt

3L	Three level
PWM	Pulse Width Modulation
FT	Fault Tolerant
OCF	Open Circuit Fault
T ² I	T-Type inverter
HVDC	High Voltage DC
FACT	AC Transmission System
PV	Photovoltaic

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] O. G. Bellmunt, J. S. Bassols, E. P. Araujo, and M. C. Mane, "Flexible Converters for Meshed HVDC Grids: From Flexible AC Transmission Systems (FACTS) to Flexible DC Grids," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 35, no. 1, pp. 2-15, Feb. 2020.
- [2] L. Xie, T. Huang, P. R. Kumar, A. A. Thatte, and S. K. Mitter, "On an Information and Control Architecture for Future Electric Energy Systems," *IEEE Power and Energy Technology Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 1940-1962, Dec. 2022.
- [3] D. T. Do, V. T. Tran, and K. Nguyen, "An DPWM for Active DC-Link Type Quasi-Z-Source Inverter to Reduce Component Voltage Rating," *Energies*, vol. 15, no. 13, p. 4889, 2022.
- [4] M. Moosavi and H. A. Toliyat, "A Multicell Cascaded High-Frequency Link Inverter With Soft Switching and Isolation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 66, no. 4, pp. 2518-2528, Apr. 2019.
- [5] D. T. Do, V. T. Tran, and M. K. Nguyen, "Enhanced Boost Factor for Three-Level Quasi-Switched Boost T-Type Inverter," *Energies*, vol. 14, no. 13, pp. 1-17, 2021.
- [6] B. Lu and S. Sharma, "A literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 5, pp. 1770-1777, Sep./Oct. 2009.
- [7] V. F. Pires, A. Cordeiro, D. Foito, and J. F. Martins, "Quasi-Z-source inverter with a T-type converter in normal and failure mode," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 11, pp. 7462-7470, Nov. 2016.
- [8] M. Sahoo and S. Keerthipati, "Fault-tolerant three-level boost inverter with reduced source and LC count," *IET Power Electron.*, vol. 11, pp. 399-405, Feb. 2018.
- [9] D. T. Do, M. K. Nguyen, T. H. Quach, V. T. Tran, F. Blaabjerg, and D. M. Vilathgamuwa, "A PWM Scheme for a Fault-Tolerant Three-Level Quasi-Switched Boost T-Type Inverter," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 8, pp. 3029-3040, 2019.
- [10] D. T. Do, V. T. Tran, M. K. Nguyen, and S. Naik, "Fault Tolerant Control Methods for Three-Level Boost T-Type Inverter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, early access, Aug. 2022.



Tran Vinh Thanh was born in Viet Nam, in 1995. He received the B.S. and the M.S degrees in Electronic Engineering from Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Viet Nam, in 2018 and 2020, respectively. He currently working toward the Ph.D. degree in Electronic Engineering from Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Viet Nam. His current research interests include impedance source inverters and control of multi-level inverters. Email: thanhtv.ncs@hcmute.edu.vn. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7135-5077>



Nguyen M. Khai photograph and biography not available at the time of publication. Email: khainm@hcmute.edu.vn. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1774-0817>



Do Duc Tri (Member, IEEE) was born in Vietnam in 1973. He received the B.S., M.S. and Ph.D degrees in electronic engineering from the Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Ho Chi Minh City, Vietnam, in 1999, 2012 and 2021, respectively. He is currently a Lecturer with the Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology and Education. His current research interests include power converters for renewable energy systems. Email: tridd@hcmute.edu.vn. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4096-5208>