

NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN BỘ PFC 3 MỨC HÌNH T TRONG ỨNG DỤNG VEHICLE TO GRID

RESEARCH ON CONTROL OF 3-LEVEL T-TYPE PFC IN VEHICLE TO GRID APPLICATION

Nguyễn Mạnh Tuấn¹, Lê Long Vũ¹,
Dương Anh Tuấn^{1,*}, Đỗ Trung Hiệp¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huiv5804.2025.316>

TÓM TẮT

Vehicle to Grid (V2G) là công nghệ sử dụng pin xe điện để lưu trữ điện năng “dư thừa” và cấp trở lại lưới khi cần. Để thực hiện chức năng này cần có các bộ điều chỉnh hệ số công suất (PFC). PFC trong V2G thường là các bộ nghịch lưu đa mức với một số lợi thế như yêu cầu ít bộ lọc, tăng hiệu suất, giảm nhiễu, giảm THD; tuy nhiên làm tăng mức độ phức tạp bộ điều khiển. Trong bài báo này, một bộ nghịch lưu hình T ba pha ba mức nối lưới được giới thiệu. Cấu trúc của bộ nghịch lưu này có nhiều ưu điểm với số lượng van bán dẫn ít hơn dẫn đến giảm độ phức tạp của mạch. Bộ điều khiển tích phân-tỷ lệ (PI) được đề xuất để điều khiển nghịch lưu hình T ba pha ba mức có đáp ứng động học nhanh và khả năng theo dõi tham chiếu tốt. Tính khả thi và hoạt động chính xác của hệ thống được đề xuất được xác thực thông qua mô phỏng Matlab/Simulink.

Từ khóa: Điều chế độ rộng xung vector không gian, điều chế độ rộng xung sin, nghịch lưu hình T.

ABSTRACT

Vehicle-to-Grid (V2G) is a technology that uses electric vehicle batteries to store “excess” electricity and feed it back to the grid when needed. To perform this function, power factor correction (PFC) is required. PFC in V2G is usually multi-level inverters with several advantages, such as less filtering required, increased efficiency, noise reduction, and reduced THD; however, it increases the complexity of the controller. In this paper, a grid-connected three-phase three-level T-type inverter is introduced. The inverter structure has many advantages, with fewer transistors leading to reduced circuit complexity. A proportional-integral (PI) controller is proposed to control a three-phase three-level T-type inverter providing fast dynamic response and good reference tracking capability. The feasibility and correct operation of the proposed system are verified through Matlab/Simulink simulation.

Keywords: Space vector pulse width modulation, sinusoidal pulse width modulation, T-type inverter.

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: tuanda@hauivn

Ngày nhận bài: 25/5/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 30/6/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/9/2025

1. GIỚI THIỆU

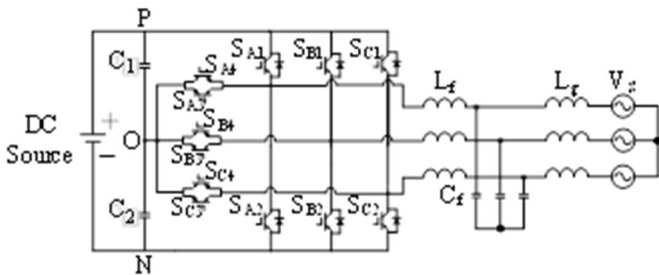
PFC (Power Factor Correction) là thiết bị hiệu chỉnh công suất, dùng để cải thiện hệ số công suất và điều chỉnh dạng sóng điện áp và dòng điện trong bộ sạc. Trong công nghệ V2G, PFC là bộ biến tần đa cấp (MLIs), thường được sử dụng trong các hoạt động của biến tần nối lưới cung cấp chất lượng dạng sóng tốt với tổng độ méo sóng hài (THD) nhỏ. Một số MLI đã được giới thiệu, bao gồm Tụ bay (Flying Capacitor - FC) [1, 2], Trung tính kẹp (Neutral Point Clamp - NPC) [3] và Cầu H (Cascaded H-bridge - CHB) [4-6]. Mặc dù các MLI trên tăng đáng kể mức công suất nhưng vẫn tồn tại một số hạn chế. CHB yêu cầu nhiều nguồn DC độc lập, FC yêu cầu tụ điện lớn, NPC gặp vấn đề mất cân bằng điện áp và tổn thất dẫn điện lớn. Do đó, một cấu trúc cải tiến của nghịch lưu NPC, được gọi là nghịch lưu hình T được đề xuất. Bên cạnh ưu điểm của nghịch lưu NPC: không yêu cầu nhiều nguồn DC độc lập như CHB, hay tụ điện lớn như FC; nghịch lưu hình T không cần diốt kẹp và có ít van bán dẫn hơn nghịch lưu NPC dẫn đến tổn thất dẫn điện và THD thấp hơn. Mặc dù vẫn gặp vấn đề mất cân bằng điện áp nhưng vấn đề này có thể được giải quyết bằng thuật toán điều chế hoặc phương pháp điều khiển.

Trong bài báo này, cấu trúc điều khiển bộ PFC hình T [8, 10, 12, 18, 20, 22, 23, 26] trong chế độ nối lưới được giới thiệu. Cấu trúc điều khiển của hệ thống nối lưới phải đảm bảo trao đổi công suất hai chiều. Nhiệm vụ của bộ điều khiển nối lưới là lấy năng lượng từ lưới để cung cấp cho mạch một chiều ở chế độ chỉnh lưu tích cực hoặc hoàn trả năng lượng từ phía một chiều lên lưới ở chế độ nghịch lưu. Điện áp trên tụ điện một chiều trung gian (phải được giữ ổn định), công suất tác dụng, công suất phản kháng là những đại lượng cần phải điều khiển (thông qua dòng điện chạy qua cuộn cảm của các pha). Xét và mặt điều

khiến, cấu trúc hai mạch vòng gồm các mạch vòng trong là mạch vòng dòng điện, mạch vòng ngoài là mạch vòng công suất hoặc điện áp có những ưu điểm nổi bật. Mạch vòng dòng điện sẽ giúp hệ thống kiểm soát được dòng điện, đáp ứng tốt hơn khi có nhiều tải, dập được dao động cộng hưởng và bảo vệ sự cố quá dòng. Đối với mạch vòng ngoài thì mục tiêu là ổn định, trong khi mạch vòng trong thì yêu cầu đặt ra là khả năng đáp ứng động học nhanh. Cấu trúc liên kết biến tần và sơ đồ điều khiển được đề xuất để xác nhận thông qua các nghiên cứu mô phỏng được thực hiện trong Matlab/Simulink.

1.1. Nghịch lưu ba pha hình T

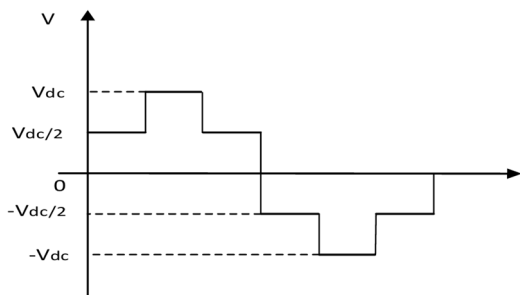
Nghịch lưu hình T loại bỏ các yêu cầu về nguồn độc lập, tụ điện lớn và diode kẹp khiến chúng trở thành một giải pháp thay thế hữu hiệu cho các nghịch lưu ba pha ba mức phức tạp trước đây. Một cấu trúc nghịch lưu ba pha ba mức hình T sử dụng van RB-IGBT [11] giúp giảm số lượng van được mô tả trong hình 1. Hai tụ điện chia điện áp đều vào thành hai điện áp thành phần. Các van Sx1, Sx2 phải chịu toàn bộ điện áp DC, trong khi các van Sx3, Sx4 chỉ phải chịu một nửa.



Hình 1. Cấu trúc nghịch lưu hình T ba pha

Bằng cách phối hợp đóng, tắt các van bán dẫn, điện áp một pha đầu ra có thể đạt 3 mức:

$$\frac{V_{dc}}{2} (P), 0 (O), -\frac{V_{dc}}{2} (N) \text{ (ở hình 2).}$$



Hình 2. Dạng điện áp đầu ra của nghịch lưu hình T ba pha

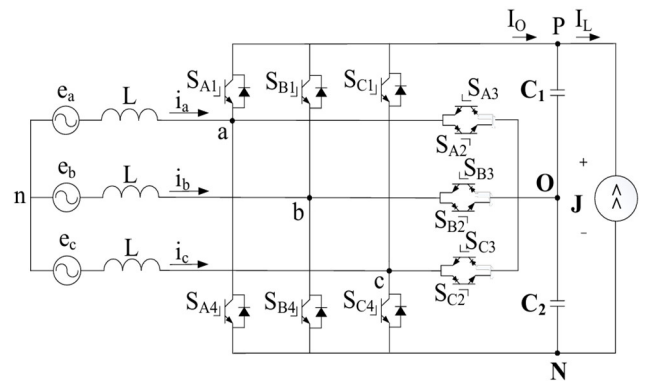
Mức điện áp P, O, N mong muốn thu được ở đầu ra bằng cách phối hợp đóng và cắt đồng thời hai van bán dẫn. Bảng 1 mô tả các van bán dẫn được sử dụng để thu được điện áp đầu ra mong muốn cho pha A.

Bảng 1. Trạng thái đóng cắt van để tạo mức điện áp pha A

| Status | V _{out} | S _{A1} | S _{A2} | S _{A3} | S _{A4} |
|--------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| P | $\frac{V_{DC}}{2}$ | ON | OFF | ON | OFF |
| O | 0 | OFF | OFF | ON | ON |
| N | $-\frac{V_{DC}}{2}$ | OFF | ON | OFF | ON |

1.2. Mô hình toán học của nghịch lưu 3 pha hình T

Để thuận tiện cho quá trình tính toán, sơ đồ mạch nghịch lưu hình T nối lưới trong chế độ chỉnh lưu tích cực được mô tả như trong hình 3.



Hình 3. Cấu trúc nghịch lưu ba pha hình T chế độ nối lưới

Phương trình mô tả hoạt động của bộ nghịch lưu ba pha hình T phía AC:

$$\begin{cases} e_a = -L \frac{di_a}{dt} + v_{an} \\ e_b = -L \frac{di_b}{dt} + v_{bn} \\ e_c = -L \frac{di_c}{dt} + v_{cn} \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó: e_a, e_b, e_c lần lượt là thành phần a, b, tương ứng của điện áp lưới; v_{an}, v_{bn}, v_{cn} lần lượt là thành phần tương ứng của điện áp pha đầu ra bộ biến đổi; i_a, i_b, i_c lần lượt là thành phần a, b, c tương ứng của dòng điện pha.

Chuyển hệ phương trình trên sang hệ tọa độ d-q, được:

$$\begin{cases} L \frac{di_{sd}}{dt} = -\omega L i_{sq} + v_{sd} - e_d \\ L \frac{di_{sq}}{dt} = -\omega L i_{sd} + v_{sq} - e_q \end{cases} \quad (2)$$

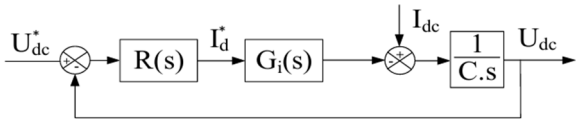
Với e_d, e_q lần lượt là thành phần d-q tương ứng của điện áp lưới (e_q = 0); v_{sd}, v_{sq} là thành phần d-q tương ứng của điện áp pha đầu ra; i_{sd}, i_{sq} là thành phần d-q tương ứng của dòng điện pha; ω là tần số góc cơ bản.

Trong đó, ζ là hệ số dao động tắt dần; ω_n là tần số góc dao động riêng của hệ thống.

2.3. Thiết kế bộ điều khiển điện áp

Trong bài báo này, bộ điều khiển PI lấy giá trị sai lệch ($U_{DC}^* - U_{DC}$) làm giá trị đầu vào và cho ra giá trị đặt của dòng điện.

Cấu trúc của bộ điều khiển điện áp DC được thể hiện trong hình 6.



Hình 6. Cấu trúc bộ điều khiển điện áp

Hàm truyền của bộ điều khiển PI có dạng:

$$R_u(s) = k_{up} + \frac{k_{ui}}{s} \tag{9}$$

Trong đó, k_{up} và k_{ui} là hệ số tỷ lệ và tích phân tương ứng.

Hàm truyền vòng kín mạch vòng điện áp:

$$\frac{U_{dc}(s)}{U_{dc}^*(s)} = \frac{k_{up} \cdot \frac{k_{ui} + s}{k_{up}}}{C \cdot s^2 + \frac{k_{up}}{C} s + \frac{k_{ui}}{C}} \tag{10}$$

So sánh phương trình trên với phương trình hàm truyền của khâu dao động bậc hai chuẩn, ta chọn các thông số điều chỉnh điện áp như sau:

$$\begin{cases} k_{up} = 2\zeta C\omega_n \\ k_{ui} = C\omega_n^2 \end{cases} \tag{11}$$

Với $C = \frac{C_1}{2} = \frac{C_2}{2}$ là giá trị tương ứng của tụ điện C_1 nối tiếp C_2 .

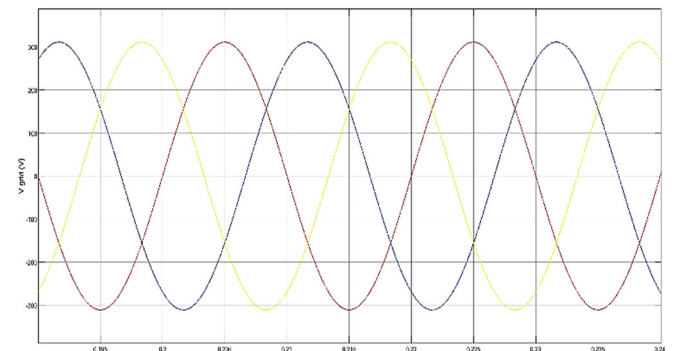
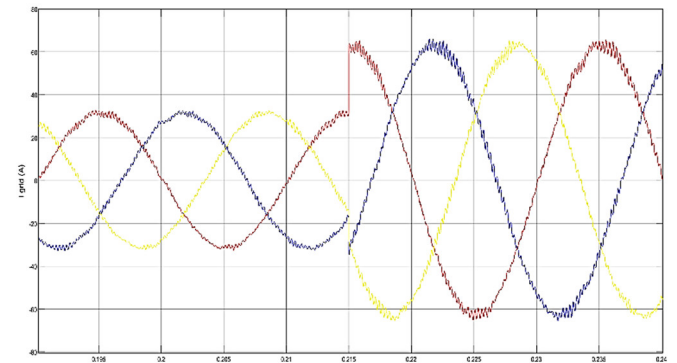
3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Cấu trúc mạch điều khiển nghịch lưu hình T ba pha ba mức với bộ điều khiển PI được mô phỏng bằng Matlab/Simulink. Bảng 2 cho thấy các thông số được sử dụng trong nghiên cứu mô phỏng. Hiệu suất của bộ nghịch lưu được kiểm tra trong các điều kiện khác nhau. Các nghiên cứu mô phỏng cho thấy bộ nghịch lưu ba pha ba mức hình T sử dụng van RB-IGBT có thể thực hiện chức năng tương tự mặc dù có cấu trúc đơn giản hơn so với các bộ nghịch lưu thông thường khác. Biên độ dòng điện lưới tham chiếu tăng từ 32A lên 64A tại $t = 0,215s$ và giảm từ 64A về 32A tại $t = 0,395s$.

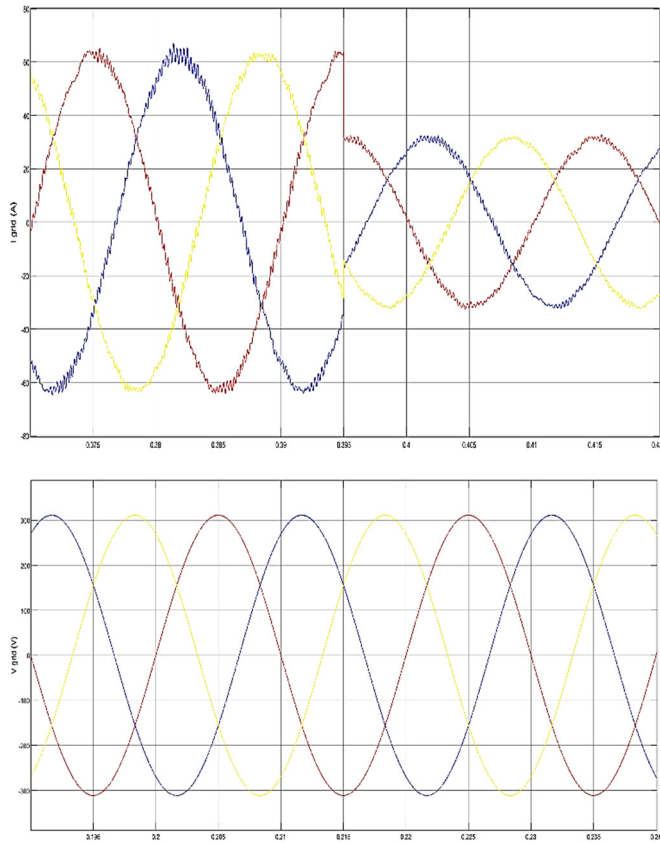
Dòng điện lưới và điện áp lưới cho các thử nghiệm hoạt động này được mô tả trong hình 7 và 8. Từ các kết quả này cho thấy nghịch lưu hình T ba pha ba mức đề xuất có tác động nhanh và loại bỏ lỗi trạng thái ổn định trong dòng điện. Dòng điện lưới cũng đồng pha với điện áp lưới và thu được hệ số công suất thống nhất. Hình 9 cho thấy tổng độ méo sóng hài (THD) của dòng điện lưới cho nghiên cứu mô phỏng này. Theo kết quả mô phỏng, mức THD được tính là 3,04%, đáp ứng các giới hạn quy định trong các tiêu chuẩn quốc tế như IEC61727 và IEEE1547.

Bảng 2. Các thông số hệ thống mô phỏng

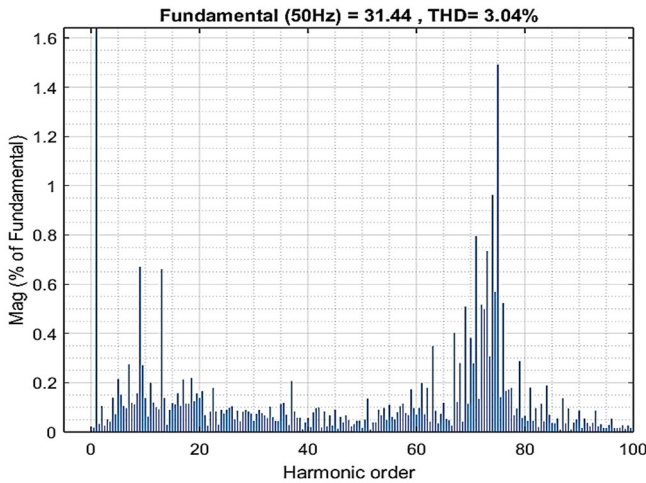
| Đại lượng | Mô tả | Giá trị |
|------------|---------------------------|--------------|
| V_{DC} | Điện áp DC-link | 700V |
| C | Tụ đầu vào DC-link | 950 μ F |
| L_f | Cuộn cảm lọc | 1,3mH |
| C_f | Cuộn kháng lọc | 21 μ F |
| R_{load} | Điện trở tải | 9,7 Ω |
| f_s | Tần số chuyển mạch | 5kHz |
| T_s | Thời gian trích mẫu | 0,2ms |
| K_{p-u} | Hệ số tỷ lệ điện áp | 0,532 |
| K_{p-i} | Hệ số tỷ lệ dòng điện | 1,617 |
| K_{i-u} | Hệ số tích phân điện áp | 119,275 |
| K_{i-i} | Hệ số tích phân dòng điện | 5081,07 |



Hình 7. Dòng điện lưới tham chiếu tăng



Hình 8. Dòng điện lưới tham chiếu giảm



Hình 9. Tổng độ méo sóng hài (THD) dòng điện lưới

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, bộ nghịch lưu nối lưới hình T ba pha ba mức được đề xuất với số lượng van bán dẫn giảm đã làm đơn giản cấu trúc mạch nhưng vẫn duy trì được tính ưu việt của nghịch lưu hình T nói riêng và nghịch lưu ba mức nói chung.

Đồng thời trong bài báo này, một mạch vòng điều khiển cho nghịch lưu hình T cũng được đề xuất với hai vòng điều khiển; vòng trong điều khiển dòng điện, vòng

ngoài điều khiển điện áp. Đây là một hệ thống điều khiển hiệu quả, tác động nhanh và loại bỏ lỗi trạng thái mất ổn định của dòng điện lưới. Hệ thống đề xuất được xác nhận thông qua các nghiên cứu mô phỏng trên Matlab/Simulink. Từ kết quả mô phỏng có thể thấy nghịch lưu được đề xuất tạo ra điện áp lưới ba pha cân bằng và có dạng hình sin. THD của dòng điện lưới đáp ứng các giới hạn quy định của tiêu chuẩn IEC61727 và IEEE1547.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Jun-ichi Itoh, Ryoichi Ishibashi, Keisuke Kusaka, "Control Method of Flying Capacitor Converter Operated in Discontinuous Current Mode for High Voltage Photovoltaic Cell," in *2018 International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)*, Nagasaki, Japan, 214-219, 2018.
- [2]. J. Huang, K. A. Corzine, "Extended operation of flying capacitor multilevel inverters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, 21, 1, 140-147, 2006.
- [3]. J. Rodriguez, S. Bernet, P. K. Steimer, I. E. Lizama, "A Survey on Neutral-Point-Clamped Inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57, 7, 2219-2230, 2010.
- [4]. M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Rodriguez, M. A. Pé. Andrez, "A Survey on Cascaded Multilevel Inverters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 57, 2197-2206, 2010.
- [5]. G. Schettino, V. Castiglia, P. Livreri, R. Miceli, F. Viola, R. Rizzo, "Novel Computational Method for Harmonic Mitigation for Three-phase Five-level Cascaded H-Bridge Inverter," in *2018 International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)*, Nagasaki, Japan, 299-306, 2018.
- [6]. M. Keddar, M. L. Doumbia, M. D. Krachai, K. Belmokhtar, A.H Midoun, "Interconnection Performance Analysis of Single Phase Neural Network Based NPC and CHB Multilevel Inverters for Grid-Connected PV Systems," *International Journal of Renewable Energy Research*, 9, 3, 2019.
- [7]. T. Kerekes, R. Teodorescu, M. Liserre, C. Klumpner, M. Sumner, "Evaluation of Three-Phase Transformerless Photovoltaic Inverter Topologies," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24, 9, 2202-2211, 2009.
- [8]. S. Majumdar, R. Raushan, B. Mahato, K. C. Jana, P. Thakura, S. K. Singh, "Comparative Study of Space Vector Pulse Width Modulation based T-Type Three level Inverter," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 4, 2, 1-5, 2016.
- [9]. M. Schweizer, I. Lizama, T. Friedli, J. W. Kolar, "Comparison of the chip area usage of 2-level and 3-level voltage source converter topologies," in *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 391-396, 2010.
- [10]. Hyunjin Shin, Kwanghee Lee, Jaeho Choi, Seokchan Seo, Jinguok Lee, "Power loss comparison with different PWM methods for 3L-NPC inverter and 3L-T type inverter," in *2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition*, 1322-1327, 2014.

- [11]. D. A. Tuan, P. Vu, N. V. Lien, "Design and Control of a Three-Phase T-Type Inverter using Reverse-Blocking IGBTs," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, 11, 1, 6614-6619, 2021.
- [12]. V. Fernão Pires, D. Foito, T. G. Amaral, "Fault Detection and Diagnosis in a PV Grid-Connected T-Type Three Level Inverter," in *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Palermo Italy, 933-937, 2015.
- [13]. A. Bellini, S. Bifaretti, "Comparison between Sinusoidal PWM and Space Vector Modulation Techniques for NPC Inverters," *IEEE Russia Power Tech*, 2005.
- [14]. K. C. Jana, S. K. Chowdhury, S. K. Biswas, "Performance evaluation of a simple and general space vector pulse-width modulation-based M-level inverter including over-modulation operation," *IET Power Electron.*, 6, 4, 809-817, 2013.
- [15]. K. C. Jana, S. K. Biswas, "Generalised switching scheme for a space vector pulse-width modulation-based N-level inverter with reduced switching frequency and harmonics," *IET Power Electron.*, 1-9, 2015.
- [16]. K. Gupta, A. M. Khambadkone, "A general space vector PWM algorithm for multilevel inverters, including operation in overmodulation range," *IEEE Trans. Power Electron.*, 22, 2, 517-526, 2007.
- [17]. S. Vasudevamurthy, Swetha, "Simulation And Comparison Of Space Vector Pulse Width Modulation For Three Phase Voltage Source Inverter," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, 2, 5, 1691-1698, 2013.
- [18]. Duc-Tri Do, Minh-Khai Nguyen, Thanh-Hai Quach, Vinh-Thanh Tran, Cong-Bang Le, Kyoung-Won Lee, Geum-Bae Cho, "Space Vector Modulation Strategy for Three-Level Quasi-Switched Boost T-Type Inverter," in *2018 IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, Singapore, 2018.
- [19]. Sajitha M., Ramchand R., "Space Vector PWM Scheme for Three Phase Three Level T-type NPC Inverter," in *2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT)*, Kannur India, 523-528, 2019.
- [20]. Qin C., Zhang C., Chen A., Xing X., Zhang G., "A Space Vector Modulation Scheme of Quasi-Z-Source Three Level T-Type Inverter for Common-Mode Voltage Reduction," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 65, 10, 8340-8350, 2018.
- [21]. Nguyen Phung Quang, Jörg-Andreas Dittrich, *Vector Control of Three-Phase AC Machines - System Development in the Practice*, 1st ed. Springer, 49-51, 2008.
- [22]. Li X., Dusmez S., Akin B., Rajashekara K., "A New SVPWM for Phase Currents Reconstruction of Three Phase Three-Level T-type Converters," in *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Charlotte NC USA, 1582-1588, 2015.
- [23]. Phuong Vu, Trang Van Nguyen, Manh Dinh Nguyen, Cuong Ngoc Tran, Anh Tuan Do, "Modified Space Vector Modulation Technique for Three Phase Three Level T-type Inverter," *International Journal of Renewable Energy Research - IJRRER*, 11, 3, 2021. doi: 10.20508/ijrer.v11i3.12058.g8256.
- [24]. D. Kairous, R. Wamkeue, J.J. Beaudoin, "DSP-Based SVM Generation Algorithm For DFIM," in *2013 IEEE Electric Power Conference (EPEC)*, Halifax NS Canada, 2013.
- [25]. B. J. Pordanjani, A. Saleki, M. T. Bina, "DSP Implementation of the SVM and THI-PWM Techniques: Comparing THD and Switching Losses of Cascaded H-Bridge Converter," in *28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Tabriz Iran, 2020.
- [26]. H. Altin, I. Sefa, H. Komurcugil, S. Ozdemir, "Three-phase three-level T-type grid-connected inverter with reduced number of switches," in *2018 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG)*, Istanbul, Turkey, 58-62, 2018.

AUTHORS INFORMATION**Nguyen Manh Tuan, Le Long Vu, Duong Anh Tuan, Do Trung Hiep**

Hanoi University of Industry, Vietnam