

NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ TỔN HAO CÔNG SUẤT VÀ HIỆU SUẤT CỦA BỘ NGHỊCH LƯU BA PHA DIODE KẸP SiC MOSFET

RESEARCH ON ASSESSMENT OF POWER LOSS AND PERFORMANCE OF SiC MOSFET THREE-PHASE DIODE-CLAMPED INVERTER

PHẠM THỊ MỘNG TUYỀN¹, Ths. NGUYỄN PHƯỚC LỘC²,
Ths. TRẦN NGỌC THOA², Ths. PHẠM THỊ KIM THÊ²

¹ Học viên Khoa điện – điện tử, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

² Khoa điện – điện tử, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

Email: phamtuyenkhoacoban@gmail.com SĐT: 0336409337

Nhận bài (received): 07/3/2022; Phản biện (revised): 30/3/2022; Chấp nhận (accepted): 12/4/2022

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày phân tích tổn hao công suất và hiệu suất của bộ nghịch lưu ba bậc (3L-NPC). Tính toán tổn hao công suất trên các linh kiện bán dẫn SiC 3L-NPC sử dụng kỹ thuật điều chế sóng mang (PD_PWM). Cấu trúc trên được mô hình hóa trên phần mềm mô phỏng PLECS để xác định tổng tổn hao và hiệu suất của SiC 3L-NPC. Các kết quả mô phỏng được phân tích đánh giá và so sánh với cấu trúc Si IGBT truyền thống. Hơn nữa, SiC MOSFET được sử dụng để đạt được hiệu suất của hệ thống ở tần số chuyển mạch cao. Kết quả sẽ xác minh các tính năng của bộ nghịch lưu SiC 3L-NPC, kỹ thuật điều chế tương ứng được sử dụng và tác dụng của chúng đối với việc giảm và cải thiện tổn hao công suất trong bộ nghịch lưu sử dụng bán dẫn công nghệ SiC.

Từ khóa: Bộ nghịch lưu diode kẹp ba bậc (3L-NPC), Kỹ thuật điều chế sóng mang (PD_PWM), bán dẫn cacbua silic (SiC), bán dẫn silic (Si).

ABSTRACT

This paper presents the power loss and performance analysis of a three-level inverter (3L-NPC). Calculation of power loss on SiC 3L-NPC semiconductor devices using carrier modulation (PD_PWM) technique. The above structure is modeled on PLECS simulation software to determine the total loss and performance of the SiC 3L-NPC inverter. The simulation results are analyzed, evaluated, and compared with the Si IGBT 3L-NPC structure using traditional IGBT semiconductors. Furthermore, SiC MOSFETs are used to achieve system performance at high switching frequencies. The results will verify the features of the SiC 3L-NPC inverter; the respective modulation techniques used, and their effect on reducing and improving the power loss in the inverter using SiC technology semiconductor.

Keyword: Three-level neutral-point clamped inverter (3L-NPC), Carrier modulation technique (PD_PWM), Silicon Carbide (SiC), silicon (Si)

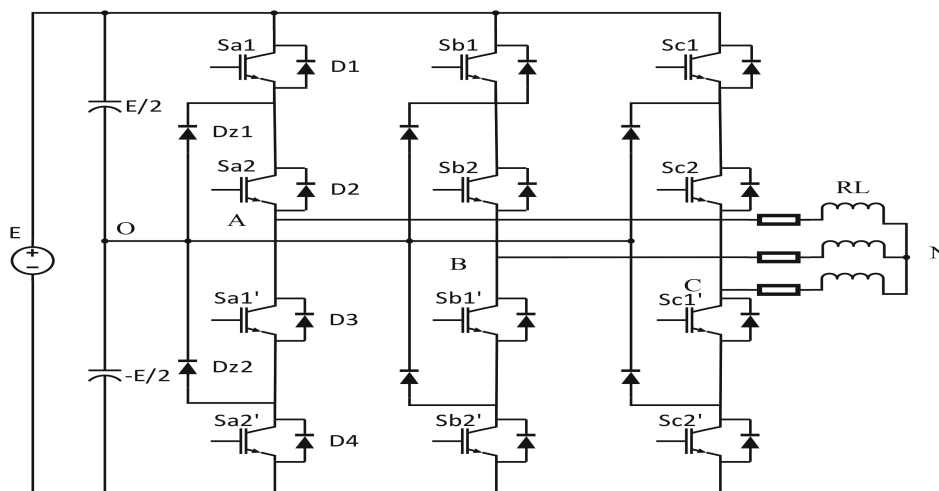
1. GIỚI THIỆU

Sự phổ biến của năng lượng quang điện mặt trời (PV) đã dẫn đến các nghiên cứu quy mô lớn trong các lĩnh vực điện năng lượng mặt trời. Để tăng hiệu suất, các linh kiện chuyển đổi công suất sử dụng chất bán dẫn cacbua silic đang đóng vai trò thiết yếu trong công nghệ điện tử công suất vì linh kiện này có đặc tính vật liệu đặc biệt khi so sánh với bán dẫn truyền thống silicon. Bộ nghịch lưu PV là một trong những thành phần chính của chuyển đổi quang điện mặt trời hệ thống có hiệu suất phụ thuộc vào cấu trúc liên kết hiệu quả và kỹ thuật điều chế được áp dụng. Tổn hao công suất trong hệ thống chuyển đổi được giảm thiểu bằng cách lựa chọn các thiết bị bán dẫn tiên tiến

điện áp cao, tần số hoạt động cao và nhiệt độ cao vật liệu bán dẫn, chẳng hạn như bán dẫn SiC để đạt được một hiệu suất cao và công suất cực đại. Các cải tiến hiệu suất dựa trên về các đặc tính vật liệu cao cấp của SiC như độ dẫn nhiệt, độ rộng vùng cấm rộng, vận tốc bão hòa và tới hạn trường sự cố [1], [2]. Công nghệ SiC được coi là một giải pháp mới đầy hứa hẹn để chế tạo các thiết bị chuyển mạch nguồn. Điều này là do khả năng của SiC MOSFET để đẩy lên mức tối đa.

2. MÔ HÌNH TOÁN BỘ NGHỊCH LƯU SiC 3L-NPC

2.1. Nguyên lý điều khiển bộ nghịch lưu 3 bậc NPC diode kẹp 3 pha



Hình 1: Sơ đồ bộ nghịch lưu 3 bậc NPC diode kẹp 3 pha.

Bộ nghịch lưu 3 bậc NPC diode kẹp 3 pha được kết nối với tải. Điểm N là điểm trung tính của tải, điểm O là trung tính nguồn của bộ nghịch lưu:

Với cấu trúc này có thể tạo ra ba điện áp đầu ra V_{AN} là khác nhau:

- Khi khóa Sa1 và Sa2 đóng điện áp đầu ra là E.

- Khi khóa Sa2 đóng điện áp đầu ra là 0v.

- Khi khóa Sa1 và Sa2 mở điện áp đầu ra là -E.

Bảng1: Trạng thái chuyển mạch trên các khóa

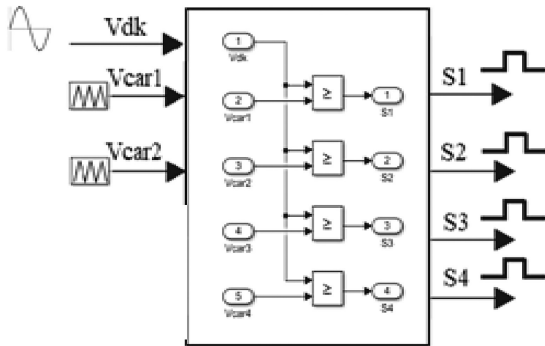
Chuyển mạch	Trạng thái chuyển đổi thiết bị				Điện áp ngõ ra U_{AO}
	Sa1	Sa2	Sa1'	Sa2'	
P	1	1	0	0	E

Chuyển mạch	Trạng thái chuyển đổi thiết bị				Điện áp ngõ ra U_{AO}
	Sa1	Sa2	Sa1'	Sa2'	
O	0	1	1	0	0
N	0	0	1	1	-E

2.2. Các kỹ thuật điều khiển bộ nghịch lưu

a. Nguyên lý kỹ thuật điều chế độ rộng xung sóng mang (PWM)

Kỹ thuật điều chế độ rộng xung sóng mang mô tả ở hình 2 gồm hai sóng mang dạng tam giác so sánh với áp điều khiển V_{dk} để tạo các trạng thái đóng ngắt của các khóa S1, S2, S3, S4.



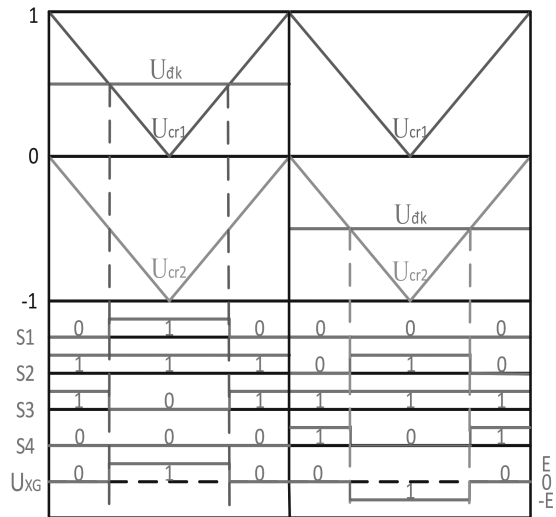
Hình 2: Sơ đồ phương pháp sóng mang.

b. Kỹ thuật PWM cho bộ nghịch lưu ba pha NPC-3L.

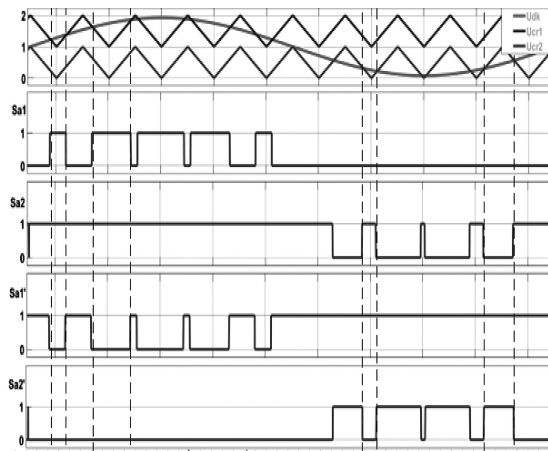
- Kỹ thuật sóng mang PD_PWM là kỹ thuật sử dụng 2 sóng mang U_{cr1} , U_{cr2} được bố trí lần lượt cùng pha, cùng tần số như hình 3.

- Sóng mang U_{cr1} sẽ được so sánh với điện áp điều khiển $1 \leq U_{dk} \leq 2$ tạo xung kích cho khóa Sa1, Sa1' như hình 4.

- Sóng mang U_{cr2} sẽ được so sánh với điện áp điều khiển $0 \leq U_{dk} \leq 1$ tạo xung kích cho khóa Sa2, Sa2' như hình 4.



Hình 3: Nguyên lý sóng mang kỹ thuật PD



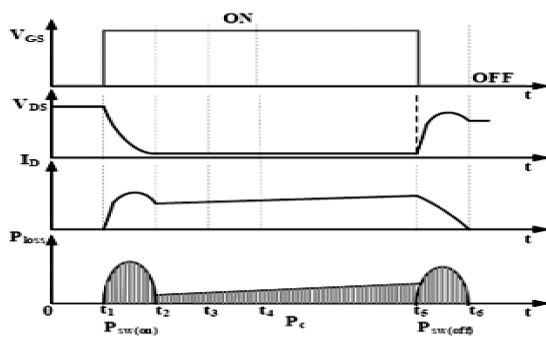
Hình 4: Mô phỏng tạo xung PWM kỹ thuật PD

2.3. Tính toán tổn hao công suất của bộ nghịch lưu SiC 3L-NPC

Trong phần này mô tả mô hình và tính toán trên bộ nghịch lưu SiC 3L-NPC. Tính toán tổn hao công suất quan trọng nhất trong bất kỳ phép tính hiệu suất của bộ chuyển đổi năng lượng. Các tổn hao tiêu tán năng lượng cao trong Sic MOSFET xảy ra vì linh kiện bán dẫn này xử lý các quá trình đóng / ngắt chuyển đổi của bộ nghịch lưu. Bên cạnh hiệu suất, điều quan trọng là phải biết tổn hao công suất và nhiệt lượng tiêu hao để thiết kế bộ tản nhiệt thích hợp nếu cần thiết.

a) Phân tích tổn hao công suất trên bán dẫn SiC

Tổn hao điện năng trong các khóa bán dẫn công suất là được chia thành hai nhóm, cụ thể là: Tổn hao tĩnh và tổn hao động. Tổn hao tĩnh bao gồm suy hao dẫn điện (Nguồn điện trên trạng thái tổn thất) và tổn hao đóng ngắt, trong khi tổn hao động bao gồm tổn hao luân chuyển và tổn hao do mất nguồn DC. Những tổn hao cơ bản nhất được tính toán trong SiC MOSFET là tổn hao chuyển mạch và tổn hao dẫn. Tuy nhiên, tổn hao dẫn bị bỏ qua do dòng rò thiết bị SiC không đáng kể. Hình 5 cho thấy các dạng sóng chuyển mạch tổn hao công suất của SiC - MOSFET, bao gồm suy hao dẫn (P_c), và tổn hao chuyển mạch P_{sw}



Hình 5: Tổn hao chuyển mạch trên SiC MOSFET

Tuy nhiên, tần số ảnh hưởng đến tổn hao dẫn, do đó sự tổn hao dẫn có thể được nhân với tần số:

$$P_{c(MosFET)} = f_{sw} \int_{t2}^{t5} I_{rms}^2 R_{DS(on)} dt \quad (1)$$

Tổn hao dẫn của một diode Schottky SiC P_c (diode) cũng có thể được tính toán dựa trên động học của chúng trên điện trở (Ron (Diode) như sau:

$$P_{c(Diode)} = f_{sw} \int_{t2}^{t5} I_{rms}^2 R_{on,(Diode)} dt \quad (2)$$

Trong đó:

I_{rms} là giá trị dòng hiệu dụng dẫn SiC MOSFET

f_{sw} là tần số chuyển mạch.

Trong bán dẫn SiC MOSFET và SiC Diode, các trở kháng $R_{DS(on)}$ và R_{on} (Diode) là cần thiết để tìm suy hao dẫn.

b) Tính toán tổn hao đóng ngắt.

Tổn hao do chuyển mạch của các linh kiện bán dẫn SiC thể hiện sự tổn hao công suất và được phân loại là tổn hao động lực học. Mất chuyển mạch xảy ra khi chuyển mạch của linh kiện bán dẫn SiC đóng và ngắt (chuyển đổi tạm thời). Những tổn hao này phụ thuộc về tần số chuyển mạch, dòng điện qua khóa bán dẫn và điện áp đặt trên khóa [3]. Chuyển đổi giảm tổn hao công suất trong linh kiện SiC sử dụng kỹ thuật chuyển mạch mới được trình bày trong [4]. Kích thước vật lý của MOSFET một vai trò trong việc tính toán tổn hao đóng ngắt. Kích thước MOSFET tăng lên sẽ tăng điện dung ký sinh trên nội trở của linh kiện và điều này sẽ gây ra sự gia tăng tổn hao khi chuyển mạch [5]. Năng lượng chuyển đổi cho SiC MOSFET có thể được tìm thấy bằng cách tổng hợp cả đóng và ngắt như trong (3).

$$P_{sw(MosFET)} = E_{on(MosFET)} + E_{off(MosFET)} \quad (3)$$

Trong đó E_{off} (MOSFET) và E_{on} (MOSFET) đại diện cho năng lượng đóng và ngắt của MOSFET SiC, tương ứng

$$E_{on(MosFET)} = f_{sw} \int_{t1}^{t2} V_{DS(on)} I_{D(on)} dt \quad (4)$$

$$E_{off(MosFET)} = f_{sw} \int_{t5}^{t6} V_{DS(off)} I_{D(off)} dt \quad (5)$$

Sau đó, thế phương trình (4) và (5) vào phương trình (3), Phương trình toán học được sử dụng để đánh giá SiC Tổng tổn hao chuyển mạch của MOSFET có thể được biểu thị bằng:

$$P_{sw(MOSFET)} = f_{sw} \left(\int_{t_1}^{t_2} V_{DS(on)} I_{D(on)} dt + \int_{t_5}^{t_6} V_{DS(off)} I_{D(off)} dt \right) \quad (6)$$

Dòng điện I_D (on) và I_D (off) là dòng điện chạy qua SiC MOSFET trong quá trình đóng và ngắt; V_{DS} (on) và V_{DS} (off) là điện áp nguồn xả SiC MOSFET được áp dụng trong trường hợp đóng và ngắt, tương ứng trong khoảng thời gian t_1 , t_2 , t_5 và t_6 .

Tổng tổn hao công suất của SiC

$$P_{loss(MOSFET)} = f_{sw} \int_{t_2}^{t_5} I_{rms}^2 R_{DS(on)} dt + f_{sw} \int_{t_1}^{t_2} V_{DS(on)} I_{D(on)} dt + \int_{t_5}^{t_6} V_{DS(off)} I_{D(off)} dt \quad (8)$$

Thông thường, công suất đóng ngắt của diodes SiC sử dụng trong bộ chuyển đổi công suất không được xem như tính toán tổn hao. Điều này là do công suất chuyển đổi của diode SiC rất nhỏ so với công suất chuyển mạch SiC MOSFET, do đó thường sẽ bị bỏ qua trong mô hình tính toán tổn hao của linh kiện công suất SiC Diode Schottky như sau:

$$P_{loss(Diode)} = P_{c(Diode)} + P_{sw(Diode)} \quad (9)$$

MOSFET Ploss (MOSFET) có thể được tính như sau:

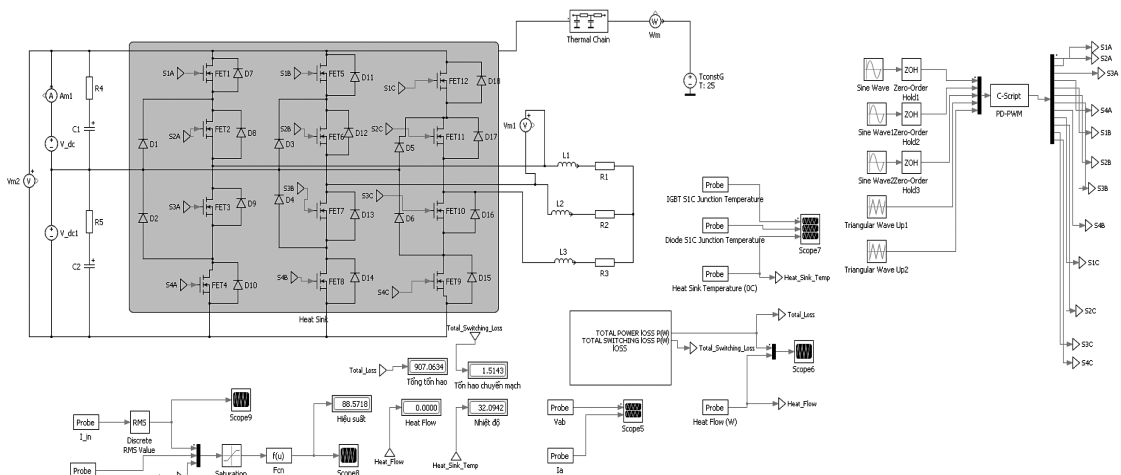
$$P_{loss(MOSFET)} = P_{c(MOSFET)} + P_{sw(MOSFET)} \quad (7)$$

Thay phương trình (2) và (6) vào (7), tổng tổn hao công suất thu được như trong phương trình (8):

$$P_{loss(Diode)} = f_{sw} \int_{t_2}^{t_5} I_{rms}^2 R_{on(Diode)} dt \quad (10)$$

3. MÔ HÌNH HÓA MÔ PHỎNG CỦA BỘ NGHỊCH LƯU SiC 3L-NPC

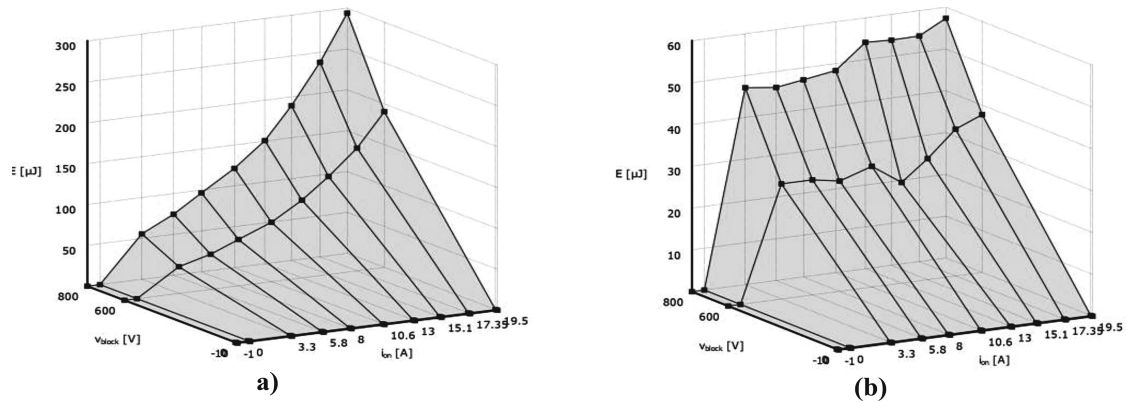
Tổn hao công suất của bộ nghịch lưu này được xác định bằng thực trạng làm việc của các MOSFETs SiC trong mạch nghịch lưu. Tổn hao chuyển mạch trung bình và tổn hao dẫn được tính bằng sử dụng thư viện PLECS của linh kiện như hình 6.



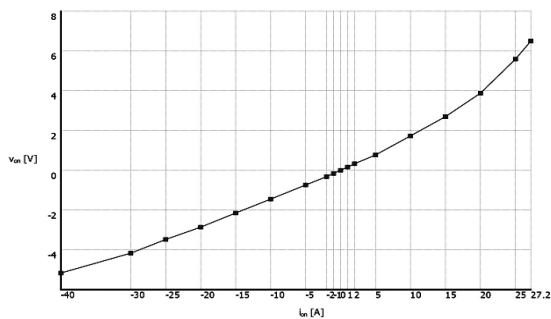
Hình 6: Mô hình hóa mô phỏng bộ nghịch lưu SiC 3L-NPC

Tổn hao công suất chuyển mạch được coi là một hàm của nhiệt độ môi trường xung quanh của linh kiện bán dẫn, dòng điện qua linh kiện, tín hiệu điều khiển cực cổng và điện áp trên linh kiện (Vblock)

được thể hiện trong bảng tra cứu 3D, như trong Hình 7. Việc chuyển đổi tổn hao công suất được đo ở các điện áp và dòng điện khác nhau. Hình 8 cho thấy đặc tuyến tổn hao dẫn của MOSFET SiC 1,2 kV / 19 A.

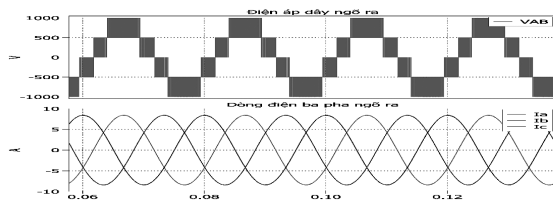


Hình 7: Tổn hao chuyển mạch trên SiC MOSFET (C2M0160120D). (a) Tổn hao khi khoa đóng; (b) Tổn hao khi khóa ngắt



Hình 8: Đặc tuyến tổn hao dẫn của SiC MOSFET

Hình 9 cho thấy điện và dòng điện áp hạ ngõ ra của bộ nghịch lưu SiC 3L NPC. Tổn hao chuyển mạch gây ra bởi các khóa bán dẫn trong bộ nghịch lưu SiC 3L NPC ba pha ảnh hưởng đến điện áp đầu ra và dòng điện.



Hình 9: Điện áp và dòng điện ngõ ra bộ nghịch lưu SiC 3L NPC

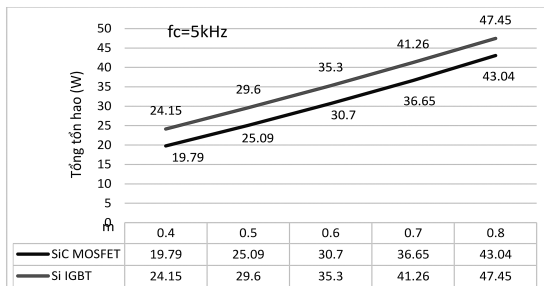
3.1 Kết quả của mô hình mô phỏng PLECS dựa trên mô hình toán lý thuyết

Bằng cách sử dụng các tham số thư viện nhiệt từ phần mềm PLECS như hình 7 và hình 8 và các công thức rút ra trong phần 2.3, tính toán lý thuyết kết quả của tổng hao dẫn và tổn hao chuyển mạch của linh kiện bán dẫn SiC được sử dụng trong bộ nghịch lưu SiC 3L-NPC đã được tính toán. Hơn nữa, tổng công suất tổn hao của mosfet SiC(C2M0160120D) trên mô hình mô phỏng dựa trên dữ liệu trên và thông số từ hãng Wolfspeed (SiC). Thu được kết quả như Bảng 3 cho thấy các giá trị so sánh giữa cấu trúc SiC 3L-NPC IGBT 3L-NPC và dựa trên dữ liệu tổn hao điện dựa trên thư viện PLECS phân tích tổn hao của 2 bộ nghịch lưu.

Bảng 3: Kết quả phân tích các giá trị tổn hao.

Điện áp ngõ vào	SiC MOSFET 3L-NPC				Si IGBT 3L-NPC			
	Tổn hao chuyển mạch	Tổng tổn hao	Nhiệt độ	Hiệu suất	Tổn hao chuyển mạch	Tổng tổn hao	Nhiệt độ	Hiệu suất
1000(V)	0.77	47.64	21.69	99.07	11.6	51.71	24.82	99.11
800(V)	0.54	32.64	21.4	99.01	8.26	38.55	24.81	98.97

Theo bảng này, các giá trị mô phỏng trên bộ nghịch lưu Si IGBT 3L-NPC là lớn hơn các giá trị SiC MOSFET 3L-NPC. Do đó, tổng tổn hao công suất trong kết quả mô phỏng của Si IGBT đều cao hơn SiC MOSFET khi thay đổi chỉ số điều chế từ 0.4 đến 0.5 ở tần số sóng mang là 5kHz như hình 10.



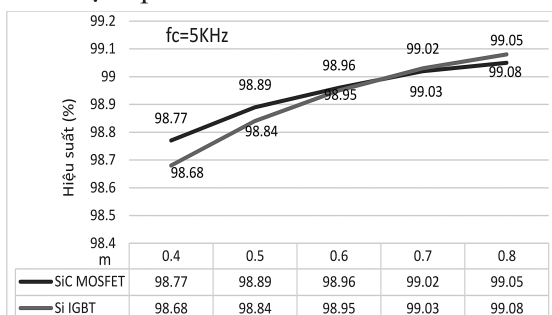
Hình 10: Đặc tuyến đánh giá tổng tổn hao công suất

3.2 Đánh giá hiệu suất bộ nghịch lưu SiC 3L-NPC

Hiệu suất của bộ nghịch lưu SiC 3L-NPC đạt được khi sử dụng tổng công suất tổn hao ở điện áp đầu vào 1000V, hiệu suất của bộ nghịch lưu được tính toán với biểu thức (11):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum P_{losses}} \quad (11)$$

Hiệu suất bộ nghịch lưu được suy ra theo biểu thức (11). Các kết quả mô phỏng được thể hiện trong Hình 11 với chỉ số điều chế (m) thay đổi và tần số sóng mang cố định là 5kHz. Hiệu suất cao nhất thu được là ở điện áp 1000V.



Hình 11: Đặc tuyến đánh giá hiệu suất của bộ nghịch lưu

Hiệu suất cực đại thu được đối với chỉ số điều chế ở 0.8 là 99.05% và 99.08V và công suất đầu ra trong khoảng 5 - 12kW. Các tổng tổn hao công suất của bộ nghịch lưu SiC 3L-NPC thu được cho thấy rằng hệ thống chuyển đổi đã đạt tổng tổn hao công suất khoảng là rất thấp so với công suất đầu ra của bộ nghịch lưu.

4. Kết Luận

Bài báo này trình bày phân tích tổn hao công suất của linh kiện bán dẫn SiC trên bộ nghịch lưu 3L-NPC và hiệu suất của các khóa bán dẫn. Tính toán tổn hao công suất chính xác và chi tiết hàm toán cho các khóa bán dẫn được sử dụng trong bộ nghịch lưu. Hơn nữa, đã xây dựng mô phỏng tổng tổn hao công suất của bộ nghịch lưu SiC 3L-NPC dựa trên cơ sở lý thuyết. Suy hao do chuyển mạch và suy giảm truyền dẫn của các linh kiện bán dẫn SiC được sử dụng trong bộ nghịch lưu. Dựa trên đặc tính của SiC MOSFET, so sánh giữa phân tích lý thuyết và phân tích mô phỏng của bộ nghịch lưu SiC 3L-NPC được đưa ra và đối sánh với bộ nghịch lưu truyền thống Si IGBT 3L-NPC. Tổn hao công suất SiC MOSFET thu được ở điện áp và dòng điện khác nhau với tần số chuyển mạch cao. Theo tính toán hiệu suất, kết quả cho thấy hiệu suất luôn ở mức cao mặc dù trong vùng chỉ số điều chế thấp từ 0.4 đến 0.6, ở công suất đầu ra của bộ nghịch lưu và hiệu suất cao nhất thu được khi điện áp một chiều ngõ vào là 1000V. Tóm lại, thu được rằng tổng tổn hao công suất và công suất đầu ra của bộ nghịch lưu NPC 3L có thể được cải thiện bằng cách sử dụng linh kiện bán dẫn SiC. Do đó, bộ nghịch lưu 3L-NPC sử dụng SiC MOSFET với tần số chuyển mạch cao sử dụng phương pháp điều chế sóng mang (DP_PWM) là một giải pháp hiệu quả cho các ứng dụng về nghịch lưu SiC PV.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] B. N. Pushpakaran, A. S. Subburaj, S. B. Bayne, and J. Mookken, Mar. 2016, “Impact of silicon carbide semiconductor technology in the photovoltaic energy system,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 971–989.
- [2] T. Zhou, Z. Shu, H. Lin, D. Luo, Y. Chen, and X. Guo, 2017, “A high-power density single-phase rectifier based on three-level neutral-point clamped circuits,” *Energies*, vol. 10, no. 5, p. 697,
- [3] B. Zhao, Q. Song, and W. Liu, Mar. 2014 “Experimental comparison of isolated bidirectional DC-DC converters based on All-Si and All-SiC power devices for next-generation power conversion application,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 3, pp. 1389–1393.
- [4] Y. Firouz, M. T. Bina, and B. Eskandari, Jan. 2014 “Efficiency of three-level neutral point clamped converters: Analysis and experimental validation of power losses, thermal modeling, and lifetime prediction,” *IET Power Electron.*, vol. 7, no. 1, pp. 209–219.
- [5] Z. Zeng, W. Shao, H. Chen, B. Hu, W. Chen, H. Li, and L. Ran, Oct. 2017 “Changes and challenges of photovoltaic inverter with silicon carbide device,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, pp. 624–639.

Thông tin phản biện: TS. Nguyễn Xuân Vinh; TS. Nguyễn Văn Minh