

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA ĐIỆN

ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP
CAPSTONE PROJECT

NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN VÀ TỰ ĐỘNG HÓA

ĐỀ TÀI:

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG
INVERTER PVH-L2550E
VÀ XÂY DỰNG MÔ HÌNH CHẨN ĐOÁN LỖI
HỖ MẠCH
CHO CẦU IGBT KIỂU T

Người hướng dẫn: **TS. GIÁP QUANG HUY**
ThS. ĐOÀN VĂN LONG

Sinh viên thực hiện:

- 1. ĐOÀN HUY VŨ – MSSV: 105200350 – LỚP: 20TDH2**
- 2. ĐẶNG VĂN THƯỜNG – MSSV: 105200346 – LỚP: 20TDH2**

Đà Nẵng, 06/2025

TÓM TẮT

Tên đề tài: Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hở mạch cho cầu IGBT kiểu T.

Sinh viên thực hiện 1: Đoàn Huy Vũ

Số thẻ sinh viên: 105200350 Lớp: 20TDH2.

Sinh viên thực hiện 2: Đặng Văn Thường

Số thẻ sinh viên: 105200346 Lớp: 20TDH2.

Đề tài này trình bày những nghiên cứu khảo sát về inverter trong hệ thống điện mặt trời, cụ thể là inverter PVH-L2550E công suất 2550 kW của nhà sản xuất TMEIC. Dựa trên các kết quả đặc tính, cấu tạo và mô phỏng hoạt động của inverter này, nhóm xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi cho cầu IGBT kiểu T của inverter để phục vụ cho việc bảo trì sửa chữa inverter hiệu quả.

NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

TT	Họ tên sinh viên	Số thẻ SV	Lớp	Ngành
1	Đoàn Huy Vũ	105200350	20TDH2	Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa
2	Đặng Văn Thường	105200346	20TDH2	

1. Tên đề tài đồ án:

Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hồ mạch cho cầu IGBT kiểu T.

2. Đề tài thuộc diện: Có ký kết thỏa thuận sở hữu trí tuệ đối với kết quả thực hiện

3. Các số liệu và dữ liệu ban đầu:

4. Nội dung các phần thuyết minh và tính toán:

a. Phần chung:

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung
1	Đoàn Huy Vũ	- Mô phỏng hoạt động inverter PVH-L2550E trong hệ thống điện mặt trời.
2	Đặng Văn Thường	- Nghiên cứu phương pháp chẩn đoán lỗi. - Xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi: Thiết kế phần cứng.

b. Phần riêng:

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung
1	Đoàn Huy Vũ	- Nghiên cứu khảo sát inverter PVH-L2550E: Tổng quan, đặc tính, nguyên lý. - Lý thuyết điều khiển vector không gian mạch nghịch lưu đa bậc kiểu T. - Xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi: Nguyên lý, tính toán thiết kế, lập trình điều khiển phát xung. - Đánh giá kết quả của mô hình chẩn đoán lỗi.

2	Đặng Văn Thường	<ul style="list-style-type: none"> - Khảo sát tổng quan hệ thống điện mặt trời. - Nghiên cứu khảo sát inverter PVH-L2550E: Vận hành và hoạt động. - Lý thuyết điều khiển MPPT, điều khiển nối lưới. - Đánh giá mô phỏng hoạt động của inverter PVH-L2550E trong hệ thống điện mặt trời. - Mô phỏng thuật toán chẩn đoán lỗi. - Xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi: Thiết kế PCB, lập trình chẩn đoán lỗi.
---	-----------------	---

<i>5. Họ tên người hướng dẫn:</i>	<i>Phần/ Nội dung:</i>
TS. Giáp Quang Huy	Nghiên cứu thuật toán chẩn đoán lỗi.
ThS. Đoàn Văn Long	Nghiên cứu khảo sát inverter PVH-L2550E. Mô phỏng hoạt động hệ thống điện mặt trời.

6. Ngày giao nhiệm vụ đồ án: 7/3/2025

7. Ngày hoàn thành đồ án: 17/6/2025

Đà Nẵng, ngày tháng 6 năm 2025

Trưởng Bộ môn Tự động hóa

Người hướng dẫn

TS. Giáp Quang Huy

PHIẾU KIỂM SOÁT TIẾN ĐỘ LÀM ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

(Phiếu dành cho người hướng dẫn/sinh viên)

Họ tên sinh viên: Đoàn Huy Vũ Số thẻ SV : 105200350

Đặng Văn Thường 105200346

Tên đề tài ĐATN: Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình
chẩn đoán lỗi hở mạch cho cầu IGBT kiểu T.

Họ tên người HD: TS. Giáp Quang Huy Đơn vị: Khoa Điện

ThS. Đoàn Văn Long Công ty CP EPCSolar

Tuần	Từ Ngày	Khối lượng		GVHD ký tên
		đã thực hiện (%)	tiếp tục thực hiện (%)	
1	7/3	Nhận đề tài.	Nghiên cứu đề tài.	
2	14/3	Nghiên cứu và hoàn thiện phần tổng quan và khảo sát inverter.	Nghiên cứu lý thuyết điều khiển, lý thuyết mạch nghịch lưu đa bậc kiểu T.	
3,4	21/3	Hoàn thiện thuyết minh các phần tổng quan, khảo sát và lý thuyết điều khiển.	Xây dựng mô hình mô phỏng hoạt động inverter trong hệ thống điện mặt trời.	
		Duyệt lần 1: Đánh giá khối lượng hoàn thành 25 % : Được tiếp tục làm ĐATN <input type="checkbox"/> Không tiếp tục thực hiện ĐATN <input type="checkbox"/>		

5	4/4	Xây dựng mô hình mô phỏng hoạt động inverter trong hệ thống điện mặt trời bằng phần mềm Matlab.	Hiệu chỉnh, đánh giá kết quả mô phỏng.	
6	11/4	Mô phỏng và hiệu chỉnh hoạt động inverter trong hệ thống điện mặt trời.	Hoàn thiện mô phỏng, viết thuyết minh.	
7,8	18/4	Hoàn thiện thuyết minh cho phần mô phỏng inverter trong hệ thống điện mặt trời.	Nghiên cứu thuật toán chẩn đoán lỗi.	
		Duyệt lần 2: Đánh giá khối lượng hoàn thành 50 % : Được tiếp tục làm ĐATN <input type="checkbox"/> Không tiếp tục thực hiện ĐATN <input type="checkbox"/>		
9	2/5	Nghiên cứu thuật toán chẩn đoán lỗi.	Mô phỏng chẩn đoán lỗi bằng phần mềm Matlab.	
10	9/5	Hoàn thiện mô phỏng và thuyết minh phần chẩn đoán lỗi.	Nghiên cứu xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi.	
11,12	16/5	Nghiên cứu, xây dựng phần mềm mô hình chẩn đoán lỗi.	Xây dựng phần cứng mô hình chẩn đoán lỗi.	
		Duyệt lần 3: Đánh giá khối lượng hoàn thành 85 % : Được tiếp tục làm ĐATN <input type="checkbox"/> Không tiếp tục thực hiện ĐATN <input type="checkbox"/>		
13	30/5	Hoàn thiện phần cứng mô hình chẩn đoán lỗi.	Đánh giá kết quả và hiệu chỉnh.	
14	6/6	Hoàn thiện mô hình mô hình chẩn đoán lỗi.	Hoàn thiện toàn bộ thuyết minh.	
15	13/6	Chỉnh sửa và hoàn thiện đồ án.	Nộp đồ án về bộ môn.	

LỜI NÓI ĐẦU VÀ CẢM ƠN

Song song với sự phát triển như vũ bão của khoa học kỹ thuật và công nghệ là nhu cầu về năng lượng đang ngày càng gia tăng. Năng lượng đóng vai trò quan trọng trong mọi hoạt động của con người nói riêng và toàn bộ sinh vật sống nói chung. Trong suốt chiều dài lịch sử, con người đã và đang tìm kiếm, tìm cách khai thác mọi nguồn năng lượng có thể, dẫn đến hiện trạng là các nguồn nhiên liệu hóa thạch đang dần cạn kiệt, và đáng lo ngại hơn phía sau đó là môi trường cũng đang dần bị hủy hoại. Trong bối cảnh đó, các nguồn năng lượng sạch, vô tận như năng lượng mặt trời đã xuất hiện như chìa khóa. Năng lượng mặt trời đã được biết đến là một nguồn năng lượng xanh, sạch và vô tận, bởi Mặt trời – không chỉ là nguồn sống mà là nguồn năng lượng gần như và vô hạn đối với con người. Chúng ta đã đẩy mạnh công cuộc khai thác và sử dụng nguồn năng lượng tuyệt vời này về cả quy mô và chất lượng. Hiện nay, các hệ thống điện năng lượng mặt trời đã xuất hiện và trở nên quen thuộc như một phần trong đời sống thường ngày của chúng ta.

Trong hệ thống điện mặt trời, inverter đóng vai trò rất quan trọng khi nó là đầu ra nguồn điện xoay chiều được sử dụng trong hầu hết các thiết bị điện hiện nay. Nếu inverter gặp lỗi hay bị hỏng trong quá trình hoạt động, hậu quả và thiệt hại gây ra sẽ rất lớn. Hiểu được điều đó và cùng với sự ủy thác từ Công ty Cổ phần Điện Mặt trời Việt Nam (EPCSolar), nhóm đã bắt tay vào tìm hiểu, nghiên cứu đề tài: “Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hở mạch cho cầu IGBT kiểu T”. Đây là một đề tài thiết yếu và mang tính ứng dụng cao trong bối cảnh thực tiễn.

Trải qua một quãng thời gian hạn chế, lượng kiến thức và kinh nghiệm cũng có hạn. Đề tài hoàn thành chắc chắn sẽ còn nhiều sai sót. Kính mong các quý thầy cô thông cảm và đưa ra những nhận xét, hướng dẫn tận tâm để chúng em sửa chữa, bổ sung phục vụ cho hành trang sau này.

Lời cuối, cho phép chúng em xin gửi lời cảm ơn đến thầy Giáp Quang Huy – giáo viên hướng dẫn đề tài, chú Đoàn Văn Long cùng hai anh kỹ sư Phạm Hữu Thành và anh Đặng Viết Tâm từ công ty EPCSolar đã tận tình hướng dẫn, chỉ bảo để giúp chúng em hoàn thành đề tài này. Xin chân thành cảm ơn!

LỜI CAM ĐOAN VỀ LIÊM CHÍNH HỌC THUẬT

Nhóm chúng em xin cam đoan đề tài “Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hở mạch cho cầu IGBT kiểu T” là kết quả của quá trình khảo sát, nghiên cứu của nhóm. Các số liệu, kết quả được trình bày là hoàn toàn trung thực, chính xác. Đề tài không có sự sao chép từ bất kì công trình nào khác. Mọi sự giúp đỡ, hướng dẫn trong quá trình nghiên cứu đề tài đều đã được cảm ơn và mọi trích dẫn, tham khảo đều đã được ghi rõ nguồn gốc.

Đà Nẵng, ngày 17 tháng 6 năm 2025

Nhóm sinh viên thực hiện

Đoàn Huy Vũ Đặng Văn Thường

MỤC LỤC

Tóm tắt	i
Lời nói đầu và cảm ơn	vi
Lời cam đoan về liên chính học thuật	vii
Mục lục	viii
Danh sách hình ảnh và bảng biểu	xi
Danh sách chữ viết tắt	xv

Trang

MỞ ĐẦU.....1

Chương 1 TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG ĐIỆN MẶT TRỜI VÀ VAI TRÒ CỦA INVERTER ĐỐI VỚI HỆ THỐNG

1.1. Tổng quan về hệ thống điện mặt trời3

1.1.1. Khái niệm

1.1.2. Các thành phần chính của hệ thống điện mặt trời điển hình

1.1.3. Nguyên lý hoạt động của một hệ thống điện mặt trời điển hình

1.2. Khảo sát các hệ thống điện mặt trời7

1.2.1. Phân loại các hệ thống

1.2.2. Khảo sát hệ thống điện mặt trời theo quy mô

1.3. Vai trò của inverter trong hệ thống điện mặt trời.....10

1.4. Kết luận10

Chương 2 NGHIÊN CỨU KHẢO SÁT INVERTER ĐIỆN MẶT TRỜI PVH-L2550E CỦA NHÀ SẢN XUẤT TMEIC

2.1. Khảo sát tổng quan inverter PVH-L2550E.....11

2.1.1. Tổng quan và đặc tính kỹ thuật

2.1.2. Nguyên lý mạch

2.1.3. Vận hành thực tế

2.2. Khảo sát vận hành và hoạt động của inverter PVH-L2550E14

2.2.1. Tổng quan vận hành

2.2.2. Các chế độ hoạt động của inverter	
2.2.3. Hoạt động chỉ thị và các chức năng	
2.3. Kết luận	18
Chương 3 LÝ THUYẾT ĐIỀU KHIỂN INVERTER TRONG HỆ THỐNG ĐIỆN MẶT TRỜI	
3.1. Lý thuyết điều khiển theo dõi điểm công suất cực đại	19
3.1.1. Khái niệm điểm công suất cực đại và theo dõi điểm công suất cực đại	
3.1.2. Thuật toán MPPT	
3.2. Lý thuyết mạch nghịch lưu đa bậc kiểu T và phương pháp điều khiển.....	21
3.2.1. Lý thuyết mạch nghịch lưu đa bậc kiểu T	
3.2.2. Phương pháp điều khiển phát xung	
3.3. Lý thuyết điều khiển nối lưới	31
3.4. Kết luận	33
Chương 4 MÔ PHỎNG INVERTER PVH-L2550E TRONG HỆ THỐNG ĐIỆN MẶT TRỜI VÀ ĐÁNH GIÁ CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN CẦU NGHỊCH LƯU IGBT	
4.1. Mô phỏng điều khiển inverter bằng MATLAB/Simulink	34
4.1.1. Bối cảnh mô phỏng	
4.1.2. Kết quả mô phỏng	
4.2. Phân tích, đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến cầu nghịch lưu IGBT.....	44
4.2.1. Tổng độ méo sóng hài	
4.2.2. Tổn hao chuyển mạch trung bình của IGBT	
4.3. Kết luận	46
Chương 5 ĐỀ XUẤT THUẬT TOÁN CHẨN ĐOÁN LỖI CHO CẦU IGBT CỦA INVERTER PVH-L2550E	
5.1. Tổng quan về lỗi van bán dẫn và các phương pháp chẩn đoán lỗi.....	47
5.2. Phân tích hoạt động của mạch nghịch lưu kiểu T trong điều kiện lỗi.....	48
5.2.1. Sự thay đổi của dòng điện pha và điện áp cực đầu ra	

5.2.2. Sự thay đổi của điện áp điểm trung tính	
5.3. Phương pháp nhận diện lỗi.....	51
5.4. Mô phỏng kiểm chứng phương pháp.....	54
5.4.1. Bối cảnh	
5.4.2. Kết quả mô phỏng	
5.5. Kết luận	59
Chương 6 XÂY DỰNG MÔ HÌNH CHẨN ĐOÁN LỖI VÀ THỰC NGHIỆM KẾT QUẢ	
6.1. Xây dựng phần cứng mô hình chẩn đoán lỗi	60
6.1.1. Sơ đồ tổng quan phần cứng	
6.1.2. Thiết kế mạch nguyên lí	
6.1.3. Thiết kế mạch PCB	
6.2. Xây dựng phần mềm mô hình chẩn đoán lỗi	65
6.3. Kiểm tra kết quả	66
6.3.1. Thông số thực nghiệm	
6.3.2. Chất lượng bộ nghịch lưu	
6.3.3. Chất lượng chẩn đoán lỗi	
6.4. Kết luận	70
KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN	71
TÀI LIỆU THAM KHẢO	
PHỤ LỤC	

DANH SÁCH HÌNH ẢNH VÀ BẢNG BIỂU

Hình 1. 1 Cấu tạo của tế bào PV	3
Hình 1. 2 Các phân cấp của một tấm pin mặt trời.....	4
Hình 1. 3 Mô tả hiện tượng quang điện.....	4
Hình 1. 4 Cấu trúc sử dụng micro inverter.....	5
Hình 1. 5 Cấu trúc sử dụng string inverter.....	5
Hình 1. 6 Inverter PVH-L2550E	6
Hình 1. 7 Cấu trúc của hệ thống điện mặt trời nối lưới.....	7
Hình 1. 8 Cấu trúc của hệ thống điện mặt trời độc lập.....	8
Hình 1. 9 Cấu trúc của hệ thống điện mặt trời kết hợp	9
Hình 2. 1 Sơ đồ một sợi của inverter PVH-L2550E	12
Hình 2. 2 Giải pháp trạm hợp bộ và hình ảnh thực tế	13
Hình 2. 3 Sơ đồ hoạt động của inverter PVH-L2550E.....	15
Hình 2. 4 Cấu tạo màn hình chỉ thị.....	16
Hình 2. 5 Giao diện chính của màn LCD.....	17
Bảng 2. 1 Các đặc tính của inverter PVH-L2550E	11
Bảng 2. 2 Thông số kỹ thuật của inverter PVH-L2550E	11
Bảng 2. 3 Các cấp độ lỗi của inverter PVH-L2550E	14
Bảng 2. 4 Mô tả các chế độ hoạt động của inverter PVH-L2550E	16
Bảng 2. 5 Trạng thái chỉ thị của các chế độ hoạt động.....	17
Hình 3. 1 Minh họa điểm công suất cực đại.....	19
Hình 3. 2 Sơ đồ khối ứng dụng MPPT	19
Hình 3. 3 Lưu đồ thuật toán của phương pháp INC	20
Hình 3. 4 Cấu trúc mạch nghịch lưu ba pha kiểu T.....	21
Hình 3. 5 Quá trình chuyển trạng thái P sang O đối với (a) $i > 0$ và (b) $i < 0$	22
Hình 3. 6 Sơ đồ vector không gian cho bộ nghịch lưu ba bậc	25
Hình 3. 7 Minh họa hai thông số m_1 và m_2	26
Hình 3. 8 Tổ hợp các vector trong sector A	27

Hình 3. 9 Minh họa trình tự chuyển mạch vùng 2 sector A	29
Hình 3. 10 Mẫu xung đóng cắt các van cho pha B.....	29
Hình 3. 11 Hai vector lệch 60 độ trong sector A và B	31
Hình 3. 12 Sơ đồ khối phương pháp điều khiển vector.....	32
Hình 3. 13 Sơ đồ khối mạch vòng điều khiển dòng điện	32
Hình 3. 14 Sơ đồ khối mạch vòng điều khiển điện áp	33
Bảng 3. 1 Các trạng thái chuyển mạch trên một pha.....	22
Bảng 3. 2 27 trạng thái với biên độ và góc pha các vector.....	24
Bảng 3. 3 Thời gian điều chế trong sector A.....	28
Bảng 3. 4 Thời gian phát xung PWM cho từng khóa ở phía cao	30
Bảng 3. 5 Các mối quan hệ điện áp tạo nên vector tham chiếu trong 6 sector	31
Hình 4. 1 Mô phỏng hệ thống điện mặt trời nối lưới công suất 2550 kW	34
Hình 4. 2 Kịch bản thay đổi bức xạ.....	35
Hình 4. 3 Khối MPPT và mạch Boost.....	36
Hình 4. 4 Khối mạch nghịch lưu của inverter (a) và cầu IGBT ba bậc kiểu T (b).....	37
Hình 4. 5 Điều khiển nối lưới (a) và SVPWM (b)	38
Hình 4. 6 Đường đặc tính P-V của dãy PV (a) và kết quả mô phỏng dãy PV (b)	40
Hình 4. 7 Đồ thị kết quả điện áp và dòng điện đầu ra của mạch nghịch lưu.....	42
Hình 4. 8 Kết quả điều khiển điện áp DC-link.....	43
Hình 4. 9 Đồ thị điện áp và dòng điện thứ cấp máy biến áp (a) và giá trị hiệu dụng tương ứng (b)	43
Hình 4. 10 Kết quả phân tích FFT trong 3 trường hợp	45
Hình 4. 11 Tổn hao chuyển mạch trung bình của 1 IGBT	46
Bảng 4. 1 Thông số dãy PV	35
Bảng 4. 2 Thông số khối MPPT & Boost.....	36
Bảng 4. 3 Thông số điều khiển nối lưới và điều khiển phát xung.....	38
Bảng 4. 4 So sánh kết quả điều khiển MPPT	41
Bảng 4. 5 Tiêu chuẩn IEEE 519-2022 về ngưỡng THD	44

Hình 5. 1 Đường đi của dòng điện trong trường hợp van S_{a1} bị lỗi. (a) Dòng điện có chiều dương. (b) Dòng điện có chiều âm	48
Hình 5. 2 Đường đi của dòng điện trong trường hợp van S_{a2} bị lỗi. (a) Dòng điện có chiều dương. (b) Dòng điện có chiều âm	49
Hình 5. 3 Đường đi của dòng điện trong trường hợp van S_{a3} bị lỗi. (a) Dòng điện có chiều dương. (b) Dòng điện có chiều âm	50
Hình 5. 4 Đường đi của dòng điện trong trường hợp van S_{a4} bị lỗi. (a) Dòng điện có chiều dương. (b) Dòng điện có chiều âm	50
Hình 5. 5 Lưu đồ thuật toán cho phương pháp chẩn đoán lỗi	54
Hình 5. 6 Sơ đồ mô phỏng chẩn đoán lỗi hở mạch IGBT mạch nghịch lưu	55
Hình 5. 7 Kết quả mô phỏng van S_{a1} bị lỗi (a) Đồ thị các tín hiệu (b) Kết quả chẩn đoán	56
Hình 5. 8 Kết quả mô phỏng van S_{b2} bị lỗi (a) Đồ thị các tín hiệu (b) Kết quả chẩn đoán	57
Hình 5. 9 Kết quả mô phỏng van S_{c3} bị lỗi (a) Đồ thị các tín hiệu (b) Kết quả chẩn đoán	58
Hình 5. 10 Kết quả mô phỏng van S_{b4} bị lỗi (a) Đồ thị các tín hiệu (b) Kết quả chẩn đoán	59
Bảng 5. 1 Tổng hợp chẩn đoán lỗi.....	53
Hình 6. 1 Sơ đồ tổng quan phần cứng mô hình chẩn đoán lỗi	60
Hình 6. 2 Sơ đồ nguyên lý mạch cầu IGBT kiểu T	61
Hình 6. 3 Sơ đồ nguyên lý mạch lái kích xung IGBT	62
Hình 6. 4 Sơ đồ nguyên lý mạch phát xung, đo lường và hiển thị	63
Hình 6. 5 Thiết kế các mạch PCB (a) Mạch cầu IGBT (b) Mạch lái phát xung (c) Mạch phát xung, đo lường và hiển thị	64
Hình 6. 6 Phần cứng thực tế a) Mạch cầu IGBT b) Mạch lái c) Mạch phát xung đo lường và hiển thị d) Tổng thể phần cứng	65
Hình 6. 7 Lưu đồ thuật toán cấu trúc chương trình lập trình.....	66
Hình 6. 8 Chất lượng điện áp đầu ra (a) Điện áp dây (b) Điện áp pha (c) Điện áp 2 pha sau lọc	67

Hình 6. 9 Kết quả thực nghiệm trạng thái bình thường (a) Điện áp 2 pha sau lọc (b) Hiển thị kết quả chẩn đoán trên LCD.....	68
Hình 6. 10 Kết quả thực nghiệm van S_{x1} lỗi (a) Điện áp ra pha A (xanh) và C (vàng) (b) Kết quả LCD.....	68
Hình 6. 11 Kết quả thực nghiệm van S_{x2} lỗi (a) Điện áp ra pha A (xanh) và C (vàng) (b) Kết quả LCD.....	69
Hình 6. 12 Kết quả thực nghiệm van S_{x3} lỗi (a) Điện áp ra pha B (xanh) và C (vàng) (b) Kết quả LCD.....	69
Hình 6. 13 Kết quả thực nghiệm van S_{x4} lỗi (a) Điện áp ra pha A (xanh) và C (vàng) (b) Kết quả LCD.....	70
Bảng 6. 1 Thông số thực nghiệm của mô hình chẩn đoán lỗi	66

DANH SÁCH CHỮ VIẾT TẮT

Chữ viết tắt	Viết tắt của	Ý nghĩa
PV	Photovoltaic	Quang điện
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor	Transistor lưỡng cực cổng cách ly
DC	Direct Current	Một chiều
AC	Alternating Current	Xoay chiều
CB	Circuit Breaker	Cầu dao tự động
ACB	Air Circuit Breaker	Máy cắt không khí
IC	Intergrated Circuit	Vi mạch
DSP	Digital Signal Processor	Bộ xử lý tín hiệu số
FPGA	Field-Programmable Gate Array	Mảng cổng khả lập trình trường (Vi mạch có thể lập trình được)
VSI	Voltage Source Inveter	Bộ nghịch lưu nguồn áp
PWM	Pulse Width Modulation	Điều chế độ rộng xung
Sine PWM	Sine Pulse Width Modulation	Điều chế độ rộng xung sin
SFO-PWM	Switching Frequency Optimal - Pulse Width Modulation	Điều chế độ rộng xung cải biến
SVPWM	Space Vector Pulse Width Modulation	Điều chế vector không gian
MPP	Maximum Power Point	Điểm công suất cực đại
MPPT	Maximum Power Point Tracker	Bám điểm công suất cực đại
RMU	Ring Main Unit	Tủ trung thế

LED	Light Emitting Diode	Diode phát quang
LCD	Liquid Crystal Display	Màn hình tinh thể lỏng
P&O	Perturbation and Observation	Nhiễu loạn và quan sát
INC	Incremental Conduction	Điện dẫn tăng dần
FL	Fuzzy Logic	Logic mờ
ANN	Artificial Neural Network	Mạng nơ ron nhân tạo
PI	Proportional Intergral	Tích phân tỉ lệ
PLL	Phase-Locked Loop	Vòng khóa pha
VSC	Voltage Source Converter	Bộ chuyển đổi nguồn áp
THD	Total Harmonic Distortion	Tổng độ méo sóng hài
FFT	Fast Fourier Transform	Biến đổi Fourier nhanh

MỞ ĐẦU

1. TÍNH CẤP THIẾT CỦA ĐỀ TÀI

Inverter PVH-L2550E công suất 2550kW của nhà sản xuất TMEIC là loại inverter trung tâm được lắp đặt khá phổ biến tại nhiều dự án solar farm ở Việt Nam. Việc nghiên cứu khảo sát, mô phỏng hoạt động inverter loại này nhằm tìm hiểu nguyên lý cấu tạo, hoạt động và các tính năng của nó trong công việc cài đặt chạy thử, vận hành, bảo trì và sửa chữa cho các dự án solar farms tại Việt Nam. Sau thời gian 5 năm hoạt động, các inverter này hết bảo hành nên nguy cơ sự cố hư hỏng dừng hoạt động rất lớn, đặc biệt khả năng cháy nổ cầu điện tử công suất IGBT rất cao. Vì vậy công việc nghiên cứu chuyên sâu hệ inverter này bằng cách xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi cho dòng inverter này sẽ có ý nghĩa thực tế và nhu cầu thị trường rất lớn để duy trì inverter làm việc hiệu quả và độ tin cậy cao hơn, thời gian khắc phục sự cố ngắn nhất.

2. MỤC TIÊU ĐỀ TÀI

Các mục tiêu được đưa ra trong đề tài này như sau:

- Mô phỏng điều khiển inverter PVH-L2550E bằng phần mềm Matlab/Simulink.
- Xây dựng được bộ mô hình phục vụ cho việc chẩn đoán lỗi cho mạch cầu IGBT của inverter PVH-L2550E.

3. ĐỐI TƯỢNG

Đối tượng nghiên cứu của đề tài là inverter PVH-L2550E với công suất 2550 kW của nhà sản xuất TMEIC và đặc biệt là cầu IGBT kiểu T của inverter này.

4. PHƯƠNG PHÁP

Trong đề tài này, nhóm sử dụng các phương pháp như khảo sát, thu thập số liệu, hình ảnh, mô phỏng hoạt động của đối tượng.

5. BỐ CỤC ĐỀ TÀI

Đề tài được trình bày gồm các phần như sau:

Mở đầu.

Chương 1: Tổng quan về hệ thống điện mặt trời và vai trò của inverter đối với hệ thống.

Chương 2: Nghiên cứu khảo sát inverter điện mặt trời PVH-L2550E của nhà sản xuất TMEIC.

Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hở mạch cho cầu IGBT kiểu T

Chương 3: Lý thuyết điều khiển inverter trong hệ thống điện mặt trời.

Chương 4: Mô phỏng inverter PVH-L2550E trong hệ thống điện mặt trời và đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến cầu nghịch lưu IGBT.

Chương 5: Đề xuất thuật toán chẩn đoán lỗi cho cầu IGBT của inverter PVH-L2550E.

Chương 6: Xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi và thực nghiệm kết quả.

Kết luận và hướng phát triển.

Tài liệu tham khảo.

6. TỔNG QUAN TÀI LIỆU

Đề án có sử dụng các loại tài liệu như sau (chi tiết cụ thể được trình bày trong phần Tài liệu tham khảo):

- Tài liệu kỹ thuật nhà sản xuất TMEIC đi kèm (manual, technical guide,...).
- Các tài liệu về điện tử công suất liên quan solar central inverter, IGBT bridge.
- Tài liệu liên quan mô phỏng inverter dùng công cụ như MATLAB/Simulink.
- Các tài liệu liên quan đến chẩn đoán lỗi inverter.

Chương 1

TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG ĐIỆN MẶT TRỜI VÀ VAI TRÒ CỦA INVERTER ĐỐI VỚI HỆ THỐNG

1.1. Tổng quan về hệ thống điện mặt trời

1.1.1. Khái niệm

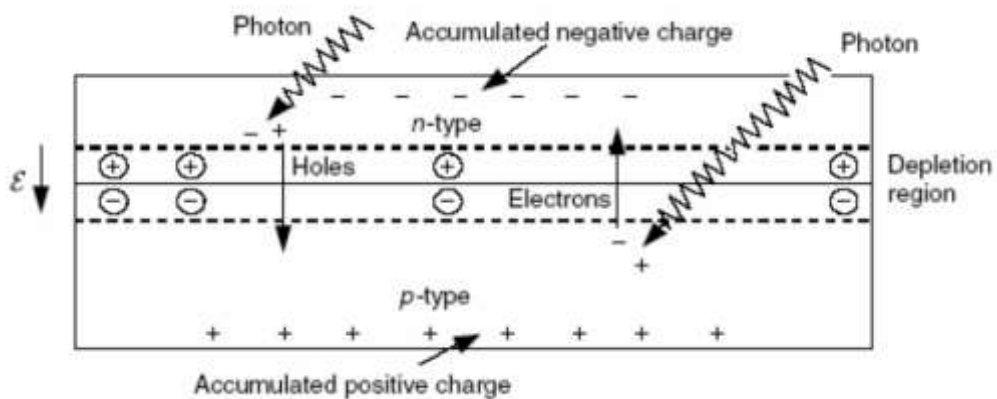
Hệ thống điện mặt trời là hệ thống có tác dụng biến đổi năng lượng từ ánh sáng mặt trời thành điện năng thông qua các tấm pin mặt trời. Như đã biết, ánh sáng mặt trời là các dòng hạt photon mang năng lượng. Chúng xuất phát từ Mặt trời nên có thể coi như là 1 nguồn năng lượng vô hạn. Đây là 1 nguồn năng lượng sạch khi không phát sinh khí thải CO₂, hứa hẹn là nguồn năng lượng đáng tin cậy và vô cùng giá trị đối với con người.

1.1.2. Các thành phần chính của hệ thống điện mặt trời điển hình

Một hệ thống điện mặt trời điển hình nói chung bao gồm ba thành phần chính:

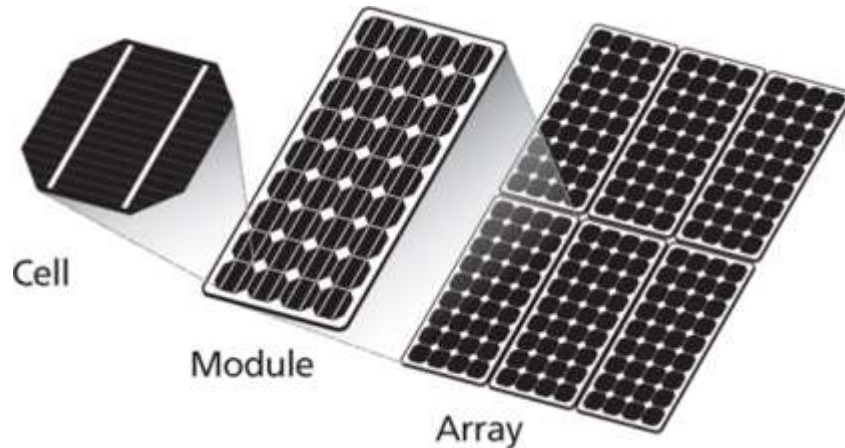
(a) Pin mặt trời

Pin mặt trời là thiết bị biến đổi quang năng thành điện năng. Nó được cấu thành từ nhiều tế bào quang điện (PV cell). Các tế bào quang điện này thực chất là các chất bán dẫn với kỹ thuật tạo và nguyên liệu giống như các linh kiện bán dẫn như diode, transistor,... Một tế bào PV được tạo thành từ 2 lớp bán dẫn P-N chồng lên nhau (Hình 1.1).



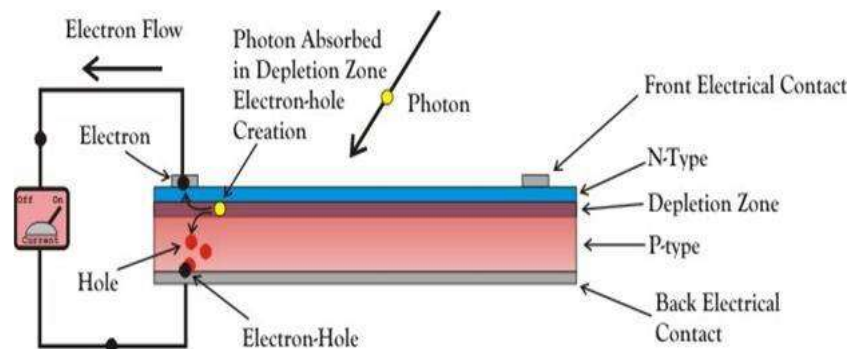
Hình 1. 1 Cấu tạo của tế bào PV

Các tế bào quang điện có điện áp và dòng làm việc rất nhỏ. Do đó để cung cấp được điện áp và dòng điện đủ lớn, chúng được ghép nối (theo nguyên tắc: nối tiếp để tăng áp, song song để tăng dòng) thành các module, các module lại được ghép nối thành các mảng để tạo thành một tấm pin mặt trời hoàn chỉnh.



Hình 1. 2 Các phân cấp của một tấm pin mặt trời

Pin mặt trời biến đổi quang năng thành điện năng dựa trên hiện tượng quang điện. Có thể diễn giải ngắn gọn hiện tượng này như sau: khi bức xạ mặt trời chứa photon chiếu vào tấm pin sẽ xảy ra sự bắn phá tại lớp tiếp giáp (vùng nghèo). Các cặp electron – lỗ trống bị tách ra và di chuyển về lớp tương ứng, sự di chuyển này là nguyên nhân tạo nên dòng điện (Hình 1.3).



Hình 1. 3 Mô tả hiện tượng quang điện

(b) Inverter

Dòng điện mà tấm pin mặt trời tạo ra là dòng điện DC, trong khi hầu hết các thiết bị điện hiện nay đều sử dụng dòng điện AC. Do vậy cần có một thiết bị chuyển đổi dòng DC thành dòng AC, thiết bị đó được gọi là inverter.

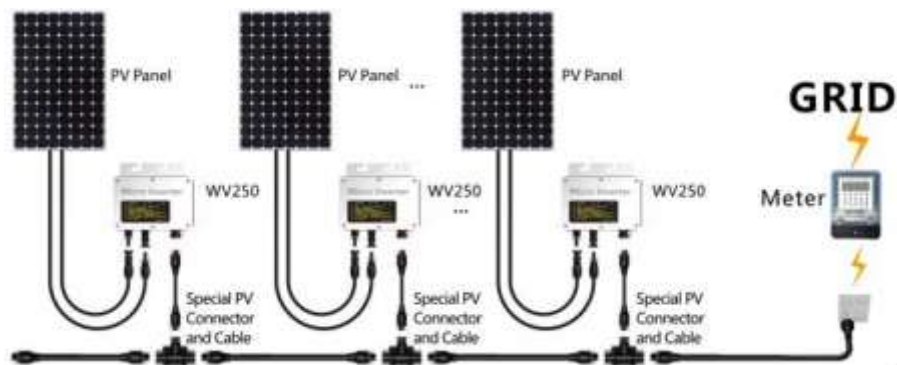
Về cơ bản, solar inverter được chia làm ba loại chính:

- Micro inverter.

Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hở mạch cho cầu IGBT kiểu T

- String inverter.
- Central inverter.
- Micro inverter

Micro inverter có kích thước nhỏ, đây là loại inverter chỉ kết hợp với duy nhất một tấm pin mặt trời để quản lý và chuyển đổi dòng điện DC thành dòng AC cho duy nhất tấm pin đó. Nghĩa là, mỗi tấm pin sẽ được kết nối với micro inverter của riêng mình (Hình 1.4). Ưu điểm của loại này là có thể tối đa hiệu suất. Vì là liên kết theo từng cặp pin – inverter nên khi có một tấm pin bị giảm hiệu suất sẽ không làm ảnh hưởng đến các tấm còn lại.



Hình 1. 4 Cấu trúc sử dụng micro inverter

- String inverter

Đây là loại inverter thường được các đơn vị thi công sử dụng nhất trong lắp đặt. Với string inverter, các tấm pin mặt trời được liên kết với nhau thành chuỗi và điểm cuối là kết nối vào inverter (Hình 1.5).



Hình 1. 5 Cấu trúc sử dụng string inverter

String inverter lắp đặt đơn giản và chi phí đầu tư hợp lý. Nhưng nhược điểm của nó là khi hoạt động theo chuỗi thì nếu có một tấm pin bị giảm hiệu suất sẽ kéo theo hiệu suất những tấm pin còn lại trong chuỗi cũng giảm theo.

- Central inverter

Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hở mạch cho cầu IGBT kiểu T

Đây là loại inverter dành cho các công trình, dự án có quy mô lớn như các solar farm, thường nằm ở trung tâm một khu vực của cánh đồng, các tấm pin xung quanh được kết nối thành từng chuỗi, qua hộp kết hợp các chuỗi song song lại và tập trung về inverter. Có thể hiểu central inverter như một string inverter cỡ lớn nhiều đầu vào.



Hình 1. 6 Inverter PVH-L2550E

Cấu tạo inverter thường gồm các thành phần cơ bản sau:

- Mạch đầu vào DC: gồm các terminal để kết nối với các tấm pin, tụ điện đầu vào, cầu chì và CB. Có tác dụng nhận nguồn DC từ tấm pin mặt trời, giảm nhiễu và ổn định điện áp đầu vào. Cầu chì và CB bảo vệ inverter khỏi quá dòng hoặc ngắn mạch từ phía tấm pin.
- Bộ chuyển đổi DC-DC: bộ tăng áp (boost), giảm áp (buck) hoặc buck-boost, được điều khiển bởi một IC hoặc vi điều khiển tích hợp thuật toán MPPT. Vi điều khiển sẽ dò tìm điểm công suất cực đại, sau đó điều khiển bộ chuyển đổi để điều chỉnh điện áp đúng với điểm công suất.
- Cầu nghịch lưu IGBT: có nhiệm vụ biến đổi nguồn DC thành nguồn AC.
- Bộ lọc đầu ra: gồm cuộn cảm và tụ, giúp làm mịn điện áp thành sóng sine, loại bỏ nhiễu sóng hài tần số cao, đảm bảo chất lượng điện.
- Bộ điều khiển (Control unit): là bộ não của inverter, sử dụng các bo mạch DSP, FPGA làm nhiệm vụ điều khiển toàn bộ hoạt động của inverter, theo dõi và xử lý dữ liệu.

Hệ thống làm mát: quạt (fan), tấm tản nhiệt (heatsink), trong inverter nhỏ gọn như loại micro, có thể chỉ dùng tản nhiệt thụ động

(c) Pin lưu trữ

Hệ thống điện mặt trời không sản xuất điện liên tục (do không có ánh sáng vào ban đêm) nên cần có pin, ắc quy để lưu trữ. Như vậy sẽ đảm bảo điện được cung cấp liên tục cho các thiết bị điện.

1.1.3. Nguyên lý hoạt động của một hệ thống điện mặt trời điển hình

Nguyên lý hoạt động của một hệ thống điện mặt trời điển hình được tóm gọn như sau:

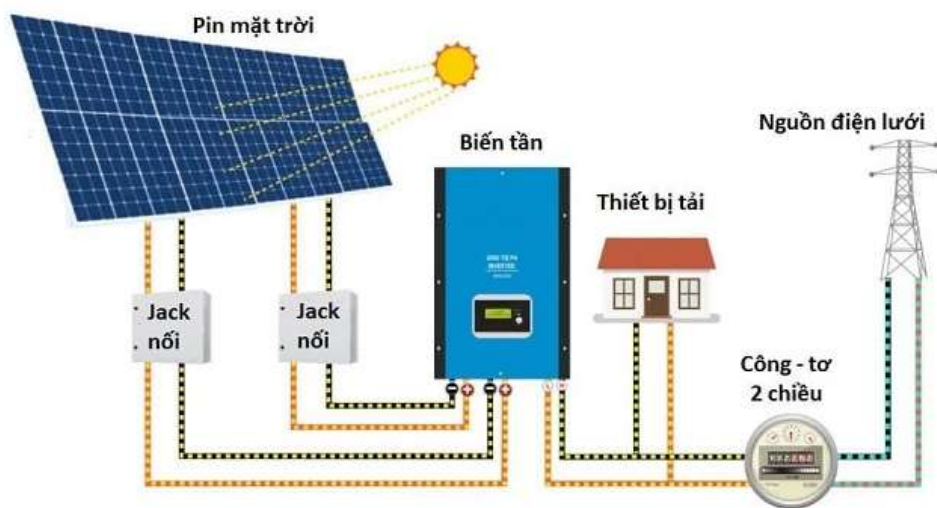
- Dựa trên hiện tượng quang điện, pin mặt trời biến đổi quang năng thành điện năng.
- Năng lượng điện từ tấm pin tạo ra được đưa vào inverter và pin lưu trữ. Inverter sẽ chuyển đổi nguồn điện sang AC, sau đó phục vụ các mục đích như cấp cho tải, hòa lưới,...
- Điện được lưu trữ trong pin được cấp cho inverter khi hệ thống không sản xuất điện, ngoài ra cũng có thể dùng để cấp cho các thiết bị điện sử dụng nguồn DC.

1.2. Khảo sát các hệ thống điện mặt trời

1.2.1. Phân loại các hệ thống

Theo hình thức lắp đặt, hiện nay có ba loại hệ thống điện mặt trời bao gồm:

(a) Hệ thống điện mặt trời nối lưới (On-grid)



Hình 1. 7 Cấu trúc của hệ thống điện mặt trời nối lưới

Như tên gọi, hệ thống điện mặt trời được kết nối với lưới điện. Nó có công tơ 2 chiều để cấp điện cho lưới và không cần đến pin lưu trữ. Điện sản xuất ra từ hệ thống được cung cấp một phần cho tải tiêu thụ, phần dư ra được truyền đến lưới và bán cho cơ quan điện lực. Khi pin mặt trời không cung cấp đủ điện cho tải tiêu thụ, hệ thống có thể lấy điện từ điện lưới. Hệ thống có ưu điểm là chi phí lắp đặt thấp hơn các hệ

thống khác, tiết kiệm tối đa chi phí sử dụng điện và điện dư được bán với giá ưu đãi. Song, khi kết nối với lưới điện bị ngắt, phụ tải sẽ không còn điện để sử dụng.

(b) Hệ thống điện mặt trời độc lập (Off-grid)

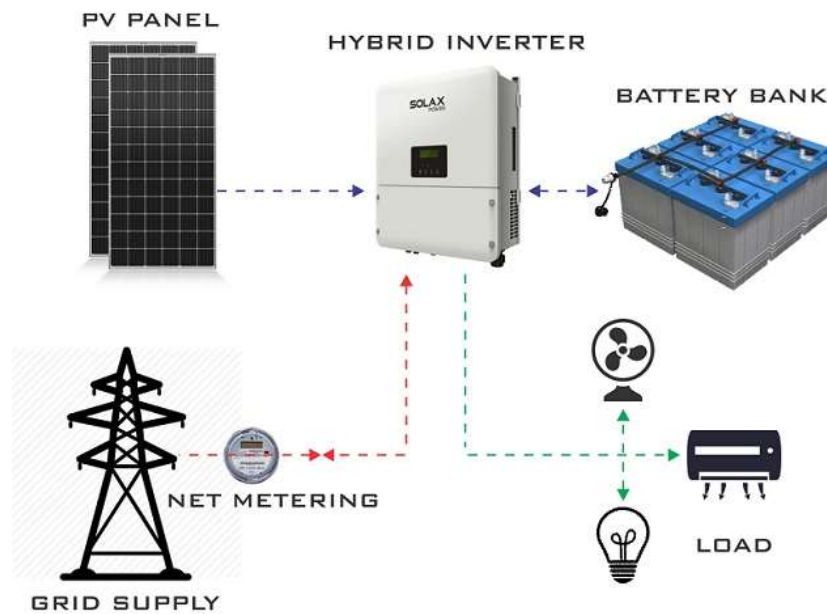
Ngược lại với hệ thống điện mặt trời nối lưới, hệ thống điện mặt trời độc lập không được kết nối với lưới điện. Lượng điện năng được sản xuất ra dư sau khi cấp cho tải tiêu thụ được lưu trữ trong pin hay ắc quy. Nhược điểm của hệ thống là chi phí lắp đặt ban đầu lớn và chi bảo trì, bảo dưỡng hàng năm cũng sẽ cao. Bù lại, hệ thống này do có khả năng lưu trữ năng lượng nên phụ tải sẽ đảm bảo được cấp điện liên tục.



Hình 1. 8 Cấu trúc của hệ thống điện mặt trời độc lập

(c) Hệ thống điện mặt trời kết hợp (Hybird)

Như tên gọi, đây là hệ thống điện kết hợp giữa hai loại hệ thống đã kể trên. Đây là hệ thống điện mặt trời được sử dụng phổ biến nhất. Hệ thống có công tơ 2 chiều để phục vụ nối lưới và cả pin để lưu trữ điện sản xuất dư. Khi điện năng sản xuất không đủ cấp cho phụ tải, hệ thống sẽ ưu tiên lấy điện từ lưới để sử dụng. Nếu mất điện lưới, hệ thống mới sử dụng điện từ pin lưu trữ. Có thể dễ dàng nhận thấy, hệ thống có chi phí lắp đặt, bảo dưỡng cao hơn cả, song bù lại với khả năng cấp điện liên tục và sinh lời nhờ bán điện hòa lưới.



Hình 1. 9 Cấu trúc của hệ thống điện mặt trời kết hợp

1.2.2. Khảo sát hệ thống điện mặt trời theo quy mô

Đối với các nhà máy *quy mô trang trại*, pin mặt trời được bố trí trên diện tích đất khổng lồ. Loại hệ thống điện sử dụng là loại kết hợp. Còn đối với các đối tượng có quy mô nhỏ hơn, hay các đối tượng không có hoạt động chính là sản xuất điện năng từ mặt trời có thể sử dụng hệ thống điện mặt trời cho nhu cầu hoạt động miễn là có mái nhà. Pin mặt trời được lắp đặt trên mái nên được gọi là hệ thống điện mặt trời áp mái. Với các đối tượng này, tùy thuộc vào quy mô, đặc tính vị trí mà có thể lựa chọn hình thức hệ thống phù hợp.

Quy mô gia đình: Hệ thống điện mặt trời lắp đặt cho quy mô nhỏ như gia đình còn phải tùy thuộc vào đặc tính vị trí để có sự lựa chọn phù hợp. Đối với các hộ gia đình ở vùng sâu vùng xa, không thể kết nối trực tiếp đến lưới điện, hệ thống độc lập sẽ là lựa chọn khả dĩ. Các hộ gia đình ở nông thôn có diện tích lớn cũng có thể sử dụng hệ thống độc lập. Đối với các hộ gia đình ở thành thị diện tích chật hẹp, hệ thống nối lưới sẽ phù hợp hơn.

Quy mô thương mại, công nghiệp: Với các đối tượng như công ty, doanh nghiệp, hệ thống kết hợp sẽ là lựa chọn tối ưu. Việc mất điện sẽ ảnh hưởng lớn đến lợi ích của các công ty và doanh nghiệp, do đó cần một hệ thống có thể cung cấp điện liên tục, đặc biệt là các nhà máy công nghiệp với tải tiêu thụ cần lượng lớn điện năng. Ngoài ra, hệ thống điện mặt trời kết hợp vừa có thể bán điện dư cho lưới, giúp tối ưu lợi nhuận.

1.3. Vai trò của inverter trong hệ thống điện mặt trời

Trong hệ thống điện mặt trời, inverter là thành phần rất quan trọng không thể thiếu. Ngoài chức năng chính là biến đổi điện năng DC sang AC, các inverter đều trang bị các chức năng hữu ích khác như:

- *Tối ưu hiệu suất:* Inverter có thể giúp tối ưu hiệu suất của tấm pin mặt trời dựa vào công nghệ theo dõi điểm công suất cực đại (MPPT).
- *Giám sát và điều khiển:* Inverter hiện đại có thể thu thập thông tin về hiệu suất dòng điện, điện áp. Các thông tin này cần thiết cho việc giám sát sản xuất điện năng. Ngoài ra cũng có thể điều chỉnh được công suất đầu ra của inverter.
- *Bảo vệ an toàn:* Các chức năng bảo vệ quá dòng, quá áp và ngắn mạch là cần thiết để có thể bảo vệ các thiết bị phụ tải cũng như chính các thiết bị trong hệ thống.
- *Hỗ trợ hòa lưới:* Các inverter trong các hệ thống có nối lưới có thể sử dụng điện lưới như nguồn để biến đổi tiêu thụ.

Inverter khi gặp sự cố có thể dẫn tới các hậu quả nghiêm trọng như:

- *Mất khả năng cung cấp điện:* Xảy ra khi inverter hỏng hoàn toàn, mất điện đầu ra dẫn đến thiệt hại lớn về kinh tế đối với quy mô thương mại hay công nghiệp.
- *Giảm hiệu suất:* Inverter bị giảm hiệu suất tức là điện năng đầu ra giảm, do đó không thể khai thác tối đa công suất của tấm pin mặt trời.
- *Rủi ro an toàn:* Inverter gặp sự cố có thể dẫn đến các rủi ro về điện không được xử lý và ngăn chặn kịp thời.
- *Ảnh hưởng đến các thiết bị phụ tải:* Biến tần gặp sự cố có thể tạo ra dòng điện có chất lượng kém, không ổn định. Sử dụng nguồn điện này cấp cho phụ tải có thể dẫn đến hư hại phụ tải, phát sinh thêm các chi phí sửa chữa cho phụ tải.

Với vai trò và ảnh hưởng rất quan trọng của mình, inverter cần được đảm bảo luôn trong tình trạng tốt nhất. Do đó, việc chẩn đoán và phát hiện lỗi của inverter kịp thời để giảm thiểu và khắc phục sự cố là rất cần thiết. Đây cũng là mục tiêu chính của đề tài này.

1.4. Kết luận

Chương này đã trình bày tổng quan về khái niệm, cấu tạo, nguyên lý hoạt động của một hệ thống điện mặt trời điển hình, đồng thời cũng đưa ra các khảo sát về các loại hệ thống điện mặt trời hiện hữu, tính phù hợp với từng quy mô của chúng và cũng đã trình bày tổng quan về vai trò của inverter đối với hệ thống điện mặt trời. Chương tiếp theo sẽ trình bày cụ thể về tổng quan công nghệ, cấu tạo, nguyên lý hoạt động,... của inverter PVH-L2550E.

Chương 2

NGHIÊN CỨU KHẢO SÁT INVERTER PVH-L2550E CỦA NHÀ SẢN XUẤT TMEIC

2.1. Khảo sát tổng quan inverter PVH-L2550E

2.1.1. Tổng quan và đặc tính kỹ thuật

Inverter PVH-L2550E là một sản phẩm của TMEIC (Toshiba Mitsubishi-Electric Industrial Systems Corporation) được thiết kế cho các nhà máy điện mặt trời quy mô lớn. Nó đã được sử dụng trong nhiều dự án điện mặt trời tại Việt Nam. Bảng 2.1 và 2.2 trình bày các đặc tính và các thông số kỹ thuật của inverter.

Bảng 2. 1 Các đặc tính của inverter PVH-L2550E

Mạch chính:	
Phương pháp chuyển đổi	VSI với điều khiển dòng tức thời
Phương pháp chuyển mạch	Điều khiển PWM
Cấu hình nghịch lưu	Cầu ba pha ba bậc
Phương pháp làm mát	Làm mát cưỡng bức
Phương pháp điều khiển:	
Chức năng điều khiển phía DC	Theo dõi điểm công suất tối đa (MPPT)
Chức năng điều khiển phía lưới	Điều khiển công suất tác dụng, điều khiển công suất phản kháng
Hoạt động	Tự động khởi động/dừng (Khởi động mềm)
Các chức năng khác	Bộ giới hạn công suất đầu ra

Bảng 2. 2 Thông số kỹ thuật của inverter PVH-L2550E

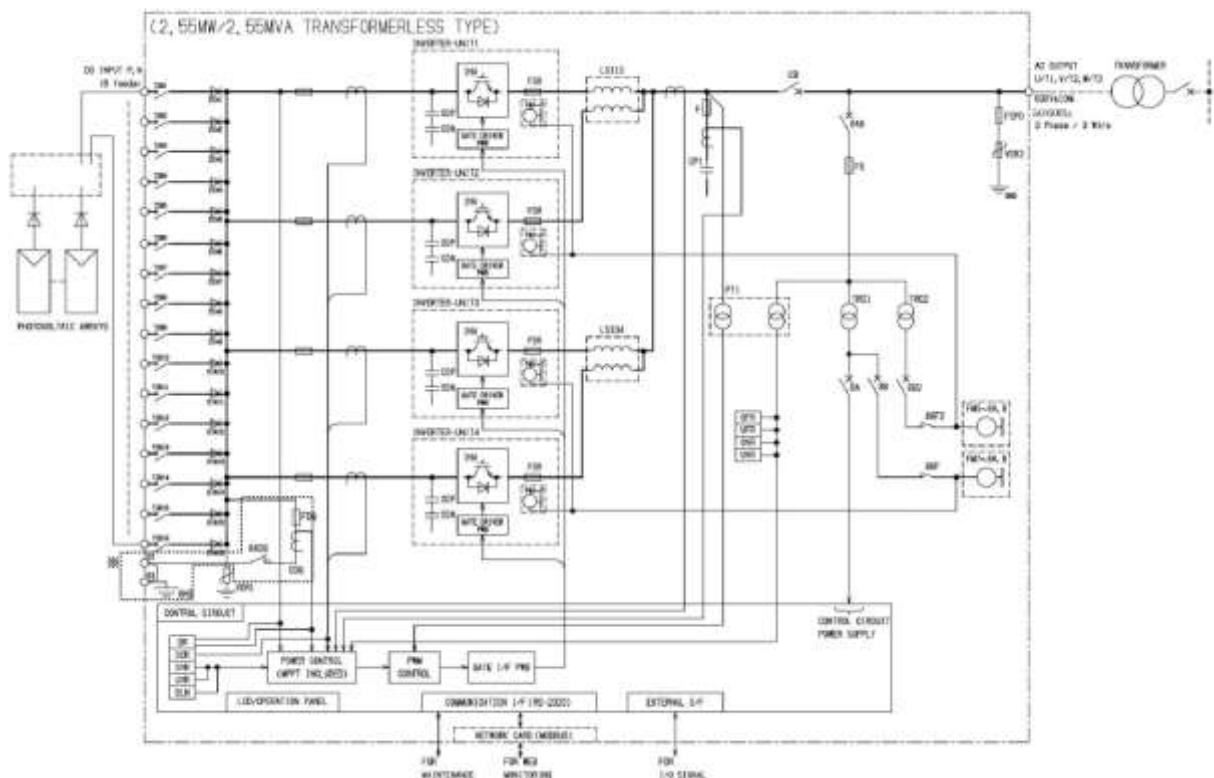
Phần Input (DC):	
Điện áp đầu vào lớn nhất	1500V
Dải điện áp hoạt động MPPT	915-1300V (khởi động: 975V)

Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hồ mạch cho cầu IGBT kiểu T

Phần Output (AC):	
Công suất định mức AC	2550kW/2550kVA (ở 50°C) 2550kW/2550kVA (ở 40°C)
Công đầu ra AC (cos φ=1)	3000kW (ở 50°C)
Điện áp định mức	630V ± 1%
Dòng điện tối đa	2337A ở 2550kVA
Tần số định mức	50/60Hz ± 1%
Hệ số công suất	0,99
Số đầu vào tiêu chuẩn	16 đầu vào
Loại truyền thông	Modbus/TCP, Ethernet
Hiệu suất	98,7%

2.1.2. Nguyên lý mạch

Hình 2.1 trình bày sơ đồ một sợi của inverter PVH-L2550E.



Hình 2. 1 Sơ đồ một sợi của inverter PVH-L2550E

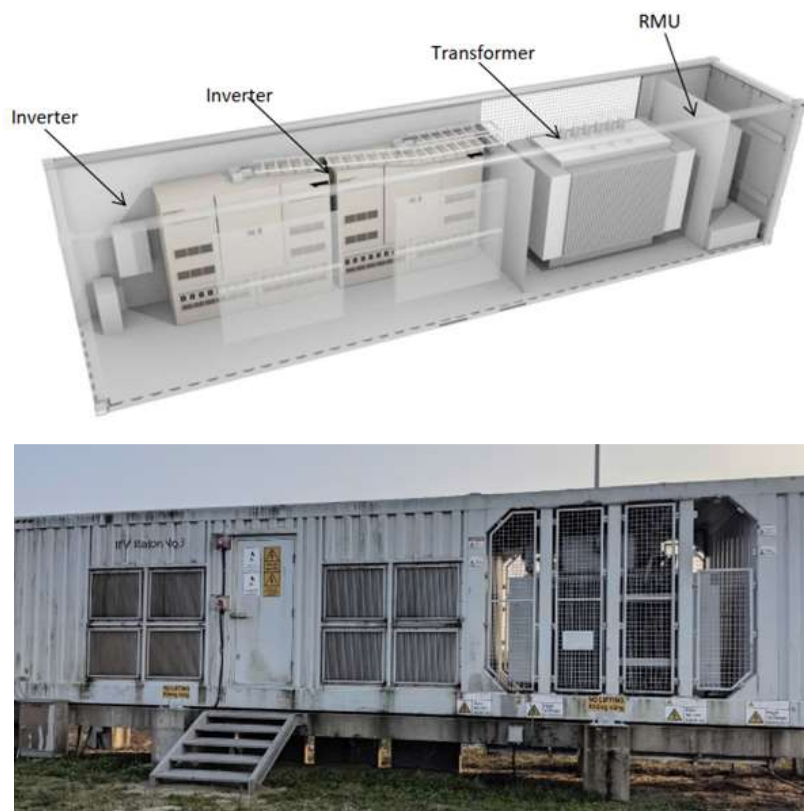
Các bộ phận chính bao gồm:

Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hở mạch cho cầu IGBT kiểu T

- Các CB đầu vào DC, ACB đầu ra.
- Các cầu nghịch lưu IGBT ba pha nguồn áp: là phần quan trọng nhất, chuyên đổi nguồn DC thành AC. Trong inverter này sử dụng bộ nghịch lưu đa bậc kiểu T với chuyển mạch PWM.
- Cuộn kháng: lọc sóng hài điện áp, điều chỉnh điện áp đầu ra thành dạng sóng hình sin.
- Thiết bị chống sét lan truyền DC và AC.
- Mạch điều khiển: điều khiển công suất MPPT, PWM,...
- Các bộ phận khác: biến dòng đo dòng điện, cầu chì, tụ, quạt làm mát,...

2.1.3. Vận hành thực tế

PVH-L2550E thuộc loại inverter trong nhà (indoor) và được sử dụng nhiều trong các dự án điện mặt trời cỡ lớn. Trong thực tế các nhà máy điện mặt trời, việc áp dụng đơn lẻ inverter này sẽ gặp nhiều bất cập. Do đó, nhà sản xuất TMEIC đã cung cấp một giải pháp trạm hợp bộ với tính thực dụng và hiệu quả cao (Hình 2.2).



Hình 2. 2 Giải pháp trạm hợp bộ và hình ảnh thực tế

Trạm hợp bộ này bao gồm 2 inverter PVH-L2550E, 1 máy biến áp trung thế 22/0.63/0.63 kV và 1 tủ RMU có nhiệm vụ kết nối, đo lường và tích hợp máy cắt cố định với chức năng bảo vệ máy biến áp. Giải pháp này giúp nâng cao hiệu quả năng lượng, giảm thiểu chi phí và giúp thuận tiện trong quá trình giám sát vận hành.

2.2. Khảo sát vận hành và hoạt động của inverter PVH-L2550E

Các khảo sát vận hành và hoạt động của inverter được trình bày trong bối cảnh inverter hoạt động trong trạm hợp bộ của một nhà máy sản xuất điện mặt trời.

2.2.1. Tổng quan vận hành

Quá trình hoạt động hàng ngày của trạm như sau:

- Ban ngày: Từ lúc bình minh, các mô đun PV bắt đầu sản xuất điện, trạm AC sẽ tự khởi động khi nguồn điện từ PV đạt một mức điện áp nhất định. Dựa trên công nghệ MPPT, trạm sẽ cung cấp lượng điện năng tối đa cho lưới.
- Ban đêm: Từ lúc hoàng hôn, điện năng từ PV sẽ giảm dần, khi xuống dưới ngưỡng hoạt động, trạm hợp bộ sẽ dừng, ngắt kết nối lưới và chuyển sang chế độ chờ.

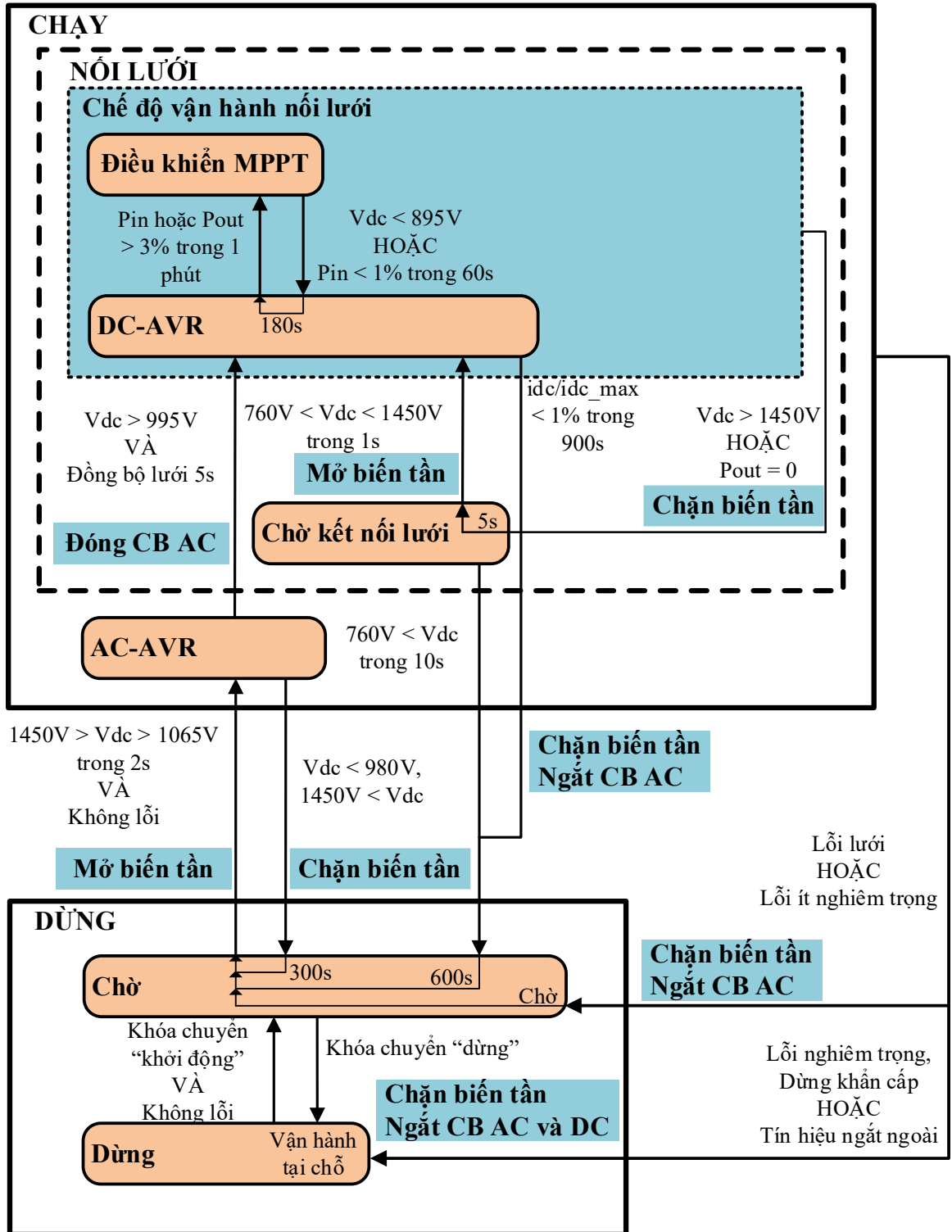
Trong quá trình hoạt động nếu gặp lỗi, tùy vào loại lỗi gặp phải mà inverter sẽ ngừng hoạt động và/hoặc hiển thị thông báo lỗi lên màn hình LCD. Lỗi được phân loại gồm 4 cấp độ như trong Bảng 2.3.

Bảng 2. 3 Các cấp độ lỗi của inverter PVH-L2550E

Mức lỗi	Mô tả
CẢNH BÁO (ALARM)	Các lỗi không ảnh hưởng đến hoạt động của bộ inverter. Inverter sẽ tiếp tục cấp điện cho lưới điện.
LỖI LƯỚI ĐIỆN (GRID FAULT)	Lỗi do điện áp hoặc tần số bất thường của lưới điện gây ra. Bộ inverter sẽ ngừng hoạt động và ngắt kết nối với lưới điện. Sau khi không còn bất thường, inverter sẽ tự khởi động lại.
LỖI ÍT NGHIÊM TRỌNG (MINOR FAULT)	Các lỗi ảnh hưởng đến hoạt động bình thường của bộ inverter do những bất thường tạm thời. Bộ inverter sẽ ngừng hoạt động và ngắt kết nối với lưới điện. Sau khi không còn bất thường, inverter sẽ tự khởi động lại.
LỖI NGHIÊM TRỌNG (MAJOR FAULT)	Lỗi do tình trạng bất thường, có thể làm hỏng inverter. Inverter sẽ ngừng hoạt động và ngắt kết nối với nguồn một chiều và lưới điện. Cần kiểm tra và sửa chữa nếu cần để thiết lập lại hệ thống.

2.2.2. Các chế độ hoạt động của inverter

Hình 2.3 thể hiện các chế độ hoạt động của inverter và quan hệ chuyển đổi giữa chúng.



Hình 2. 3 Sơ đồ hoạt động của inverter PVH-L2550E

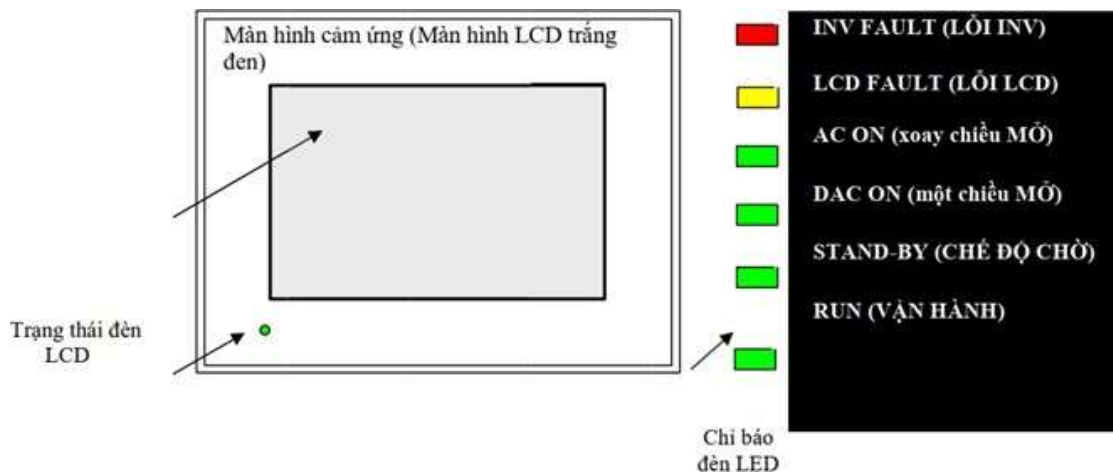
Mô tả cụ thể cho từng chế độ hoạt động được trình bày trong bảng sau:

Bảng 2. 4 Mô tả các chế độ hoạt động của inverter PVH-L2550E

Chế độ	Bối cảnh	Mô tả
Dừng	- Trước khi khởi động lúc đầu. - Sau khi có lỗi nghiêm trọng (MAJOR FAULT). - Sau khi dừng hoạt động.	Dừng hoàn toàn trạng thái vận hành. Khi khởi động lại, inverter chuyển sang chế độ chờ.
Chờ	- Vào ban đêm. - Sau khi có lỗi ít nghiêm trọng (MINOR FAULT) hoặc lỗi lưới điện (GRID FAULT).	Inverter được kết nối với nguồn một chiều và chờ điều kiện khởi động được thỏa mãn. Đầu ra xoay chiều không được kết nối với lưới điện.
AC-AVR	Trạng thái trung gian tạm thời giữa trạng thái “chờ” và trạng thái “DC-AVR”	Nguồn điện 1 chiều đã thỏa mãn để inverter hoạt động. Tuy nhiên inverter chưa được kết nối với lưới điện.
DC-AVR	Trạng thái trung gian giữa “AC-AVR” và “điều khiển MPPT”	Inverter được kết nối với lưới điện.
Điều khiển MPPT	Hai đầu vào ra của inverter đã sẵn sàng cho quá trình biến đổi và truyền tải.	Năng lượng điện được biến đổi và truyền từ PV tới lưới. Thông qua MPPT để tối ưu lượng điện năng truyền tải.
Chờ kết nối lưới	Nguồn điện một chiều không đủ.	Inverter ngừng chuyển đổi nhưng vẫn được kết nối với lưới điện.

2.2.3. Hoạt động chỉ thị và các chức năng

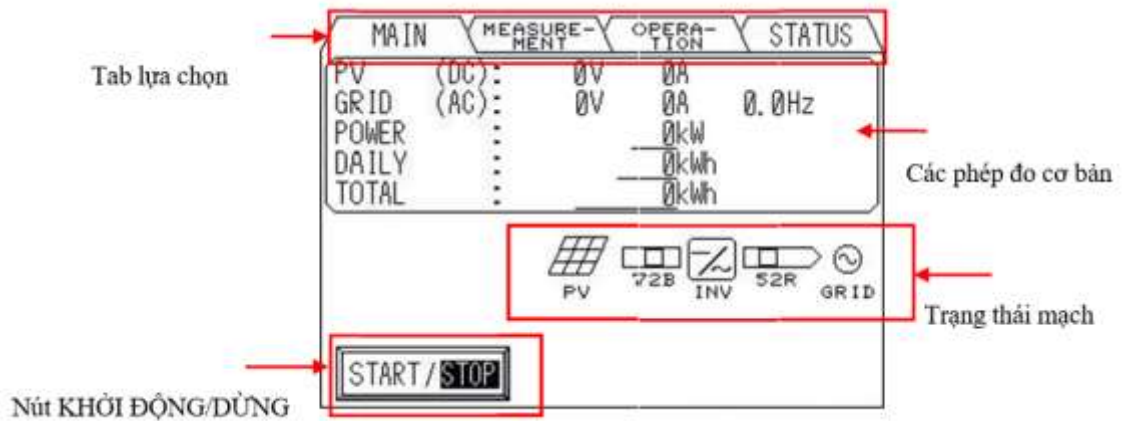
Inverter PVH-L2550E thực hiện chỉ thị và cung cấp các chức năng giám sát thông qua các đèn báo và màn hình LCD (Hình 2.4).



Hình 2. 4 Cấu tạo màn hình chỉ thị

(a) Các hoạt động và chức năng của màn hình LCD

Giao diện chính của màn hình LCD thể hiện các thông số đo đạc cơ bản như điện áp, dòng điện 2 đầu, công suất tức thời, công suất trong ngày,... Ngoài ra còn có một sơ đồ để thể hiện trạng thái hệ thống và nút START/STOP để khởi động và dừng.



Hình 2. 5 Giao diện chính của màn LCD

Các tab giao diện khác bao gồm:

- MEASUREMENT: Thể hiện các thông số đo đạc chi tiết về điện áp, dòng điện, tần số, công suất của phần PV và phần lưới.
- OPERATION: Giao diện này cho phép người dùng thiết lập chế độ vận hành (cục bộ/từ xa) và thiết lập thời gian trong mục SETUP. Mục còn lại cho phép thiết lập giới hạn công suất và hệ số công suất.
- STATUS: Giao diện này cung cấp các chức năng bổ sung như ghi lại sự kiện, công suất, chế độ bảo vệ lưới.

(b) Chỉ thị các chế độ hoạt động

Thông qua sơ đồ trạng thái hệ thống (trong giao diện MAIN của màn hình LCD) và các đèn LED chỉ báo, các chế độ hoạt động của inverter có thể được nhận diện theo như Bảng 2.5.

Bảng 2. 5 Trạng thái chỉ thị của các chế độ hoạt động

Trạng thái hoạt động	Trạng thái sơ đồ LCD	Trạng thái đèn LED
Dừng	<p>Hoặc</p>	<p>Hoặc</p>

*Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hỏng mạch
cho cầu IGBT kiểu T*

Chờ		
AC - AVR		
DC - AVR hoặc Điều khiển MPPT		
Chế độ chờ kết nối lưới		
Cảnh báo	Trạng thái hoạt động không thay đổi	
Lỗi lưới điện hoặc Lỗi ít nghiêm trọng	Trạng thái hoạt động chuyên sang chế độ “Chờ” 	
Lỗi nghiêm trọng	Trạng thái hoạt động chuyên sang “Dừng” 	

2.3. Kết luận

Chương này đã trình bày tổng quan các nghiên cứu khảo sát về inverter PVH-L2550E của nhà sản xuất TMEIC từ các thông số kỹ thuật, cấu tạo, nguyên lý hoạt động và vận hành. Chương tiếp theo sẽ trình bày về lý thuyết điều khiển liên quan đến inverter, những lý thuyết này là cần thiết để hiểu rõ hơn về hoạt động của inverter trong một hệ thống điện mặt trời hoàn chỉnh.

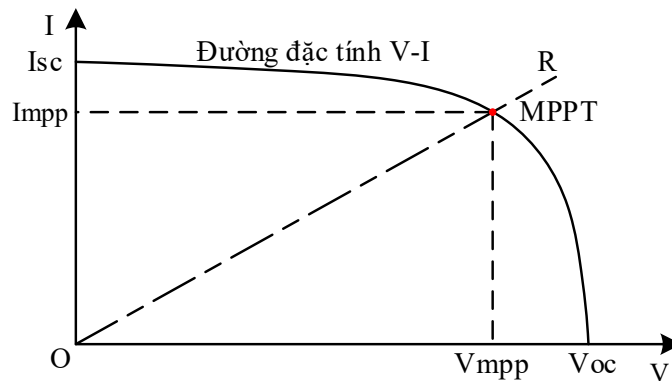
Chương 3

LÝ THUYẾT ĐIỀU KHIỂN INVERTER TRONG HỆ THỐNG ĐIỆN MẶT TRỜI

3.1. Lý thuyết điều khiển theo dõi điểm công suất cực đại

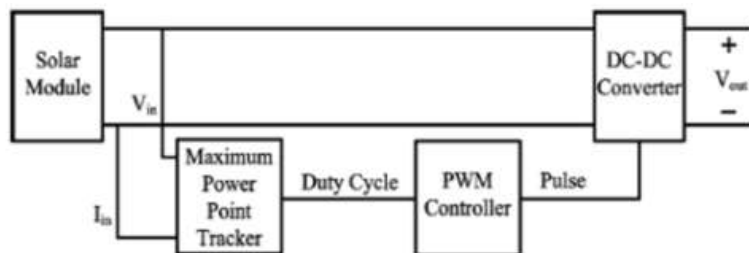
3.1.1. Khái niệm điểm công suất cực đại và theo dõi điểm công suất cực đại

Xét đường cong I-V đặc trưng của tấm pin ở điều kiện chuẩn, nếu cung cấp cho tấm pin một tải tiêu thụ thuần trở R, thì điểm giao nhau giữa đường cong đặc trưng của tấm pin và đường đặc tính I-V của tải là điểm làm việc, từ điểm làm việc này suy ra được công suất mà tấm pin cung cấp. Điểm công suất cực đại (Maximum power point – MPP) là điểm làm việc hiệu quả nhất, cung cấp công suất lớn nhất của PV theo mức độ bức xạ hấp thu được.



Hình 3. 1 Minh họa điểm công suất cực đại

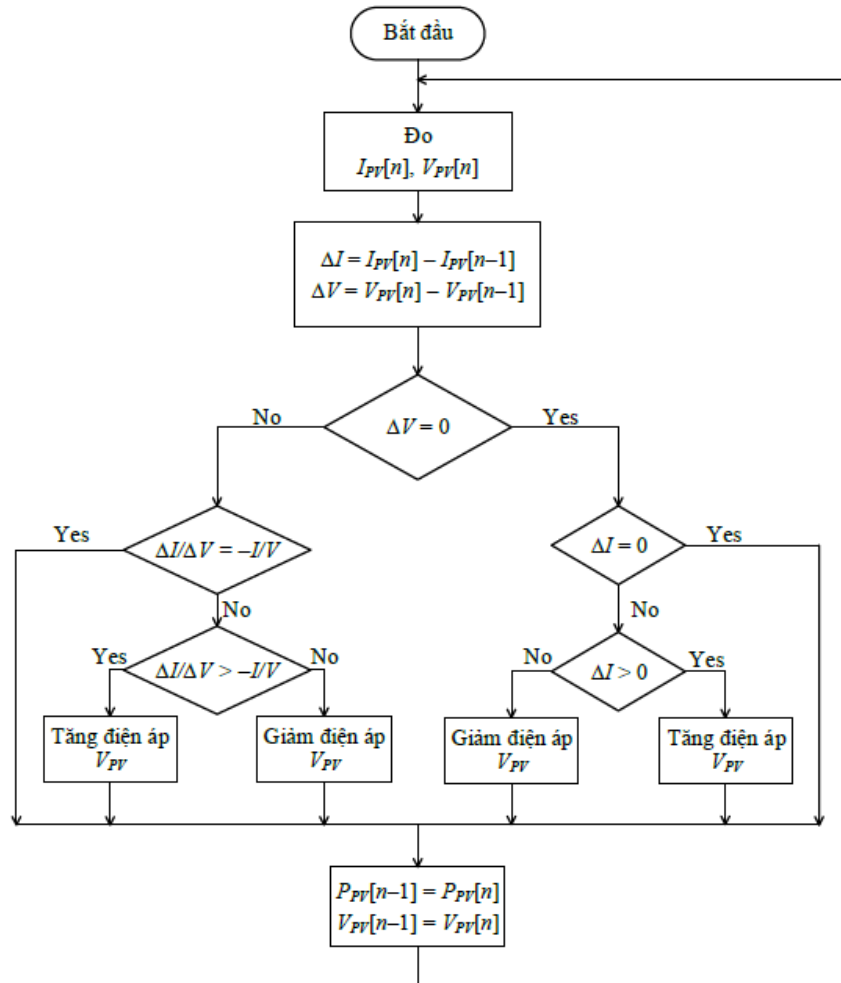
Để tìm được MPP, người ta dùng bộ theo dõi điểm công suất cực đại (Maximum Power Point Tracker – MPPT) để dò tìm điểm MPP dựa trên các tín hiệu dòng, áp rồi sử dụng các thuật toán khác nhau để xác định điểm MPP, sau đó phát tín hiệu điều khiển bộ biến đổi DC-DC để đạt được điểm này. Sơ đồ khối như sau:



Hình 3. 2 Sơ đồ khối ứng dụng MPPT

3.1.2. Thuật toán MPPT

Có nhiều thuật toán để xác định được điểm MPP, tổng quan có thể chia làm 2 loại trực tiếp và gián tiếp. Đề tài này trình bày nội dung của thuật toán Điện dẫn tăng dần (INC). Đây là một thuật toán trực tiếp, nó đơn giản và được sử dụng phổ biến.



Hình 3. 3 Lưu đồ thuật toán của phương pháp INC

Thuật toán INC có được bằng cách lấy đạo hàm của công suất đầu ra theo điện áp:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \approx I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (3.1)$$

Nếu điểm hoạt động của mảng PV dao động quanh điểm MPP, các trường hợp sau có thể xảy ra:

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} : \text{điểm hoạt động tại điểm MPP, } V_{PV} = V_{MPP} \cdot \quad (3.2)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} : \text{điểm hoạt động bên trái điểm MPP, } V_{PV} < V_{MPP} \cdot \quad (3.3)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} : \text{điểm hoạt động bên phải điểm MPP, } V_{PV} > V_{MPP} \cdot \quad (3.4)$$

Và dựa vào các trường hợp trên, bộ điều khiển sẽ điều chỉnh điện áp V_{PV} tương ứng để tiến tới gần V_{MPP} . Lưu đồ thuật toán cho thuật toán này được thể hiện trong Hình 3.3. Thực tế, do các sai số phép đo, trường hợp (3.2) rất khó xảy ra, vậy nên dù trong điều kiện môi trường ổn định, hệ thống PV vẫn dao động quanh điểm MPP. Đây cũng chính là nhược điểm của thuật toán này.

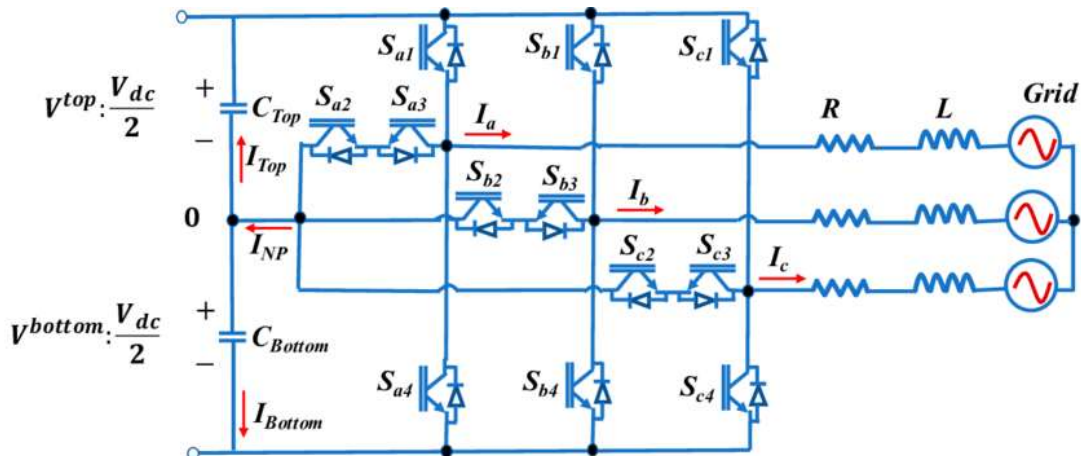
3.2. Lý thuyết mạch nghịch lưu đa bậc kiểu T và phương pháp điều khiển

3.2.1. Lý thuyết mạch nghịch lưu đa bậc kiểu T

Inverter PVH-L2550E sử dụng mạch nghịch lưu đa bậc kiểu T, so với mạch nghịch lưu hai bậc truyền thống, mạch nghịch lưu đa bậc được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng với điện áp trung bình, có công suất và hiệu suất cao như inverter năng lượng mặt trời, hệ inverter ô tô.

(a) Cấu trúc mạch

Cấu trúc của mạch nghịch lưu ba pha kiểu T gồm có ba nhánh, mỗi nhánh gồm có bốn khóa bán dẫn xếp thành dạng hình chữ T, được biểu diễn như Hình 3.4.



Hình 3. 4 Cấu trúc mạch nghịch lưu ba pha kiểu T

Trong đó, các khóa nửa cầu (S1 và S4) nối với cực dương và cực âm của nguồn DC-link. Giống với bộ nghịch lưu hai mức truyền thống, chúng phải chặn toàn bộ điện áp DC-link. Mặt khác, một khóa hai chiều được cấu tạo bởi hai IGBT được mắc nối tiếp ngược chiều nhau, kết nối giữa điểm trung tính của điện áp DC-link và mỗi đầu ra. Không như các khóa nửa cầu, chúng chỉ phải chặn một nửa điện áp DC-link,

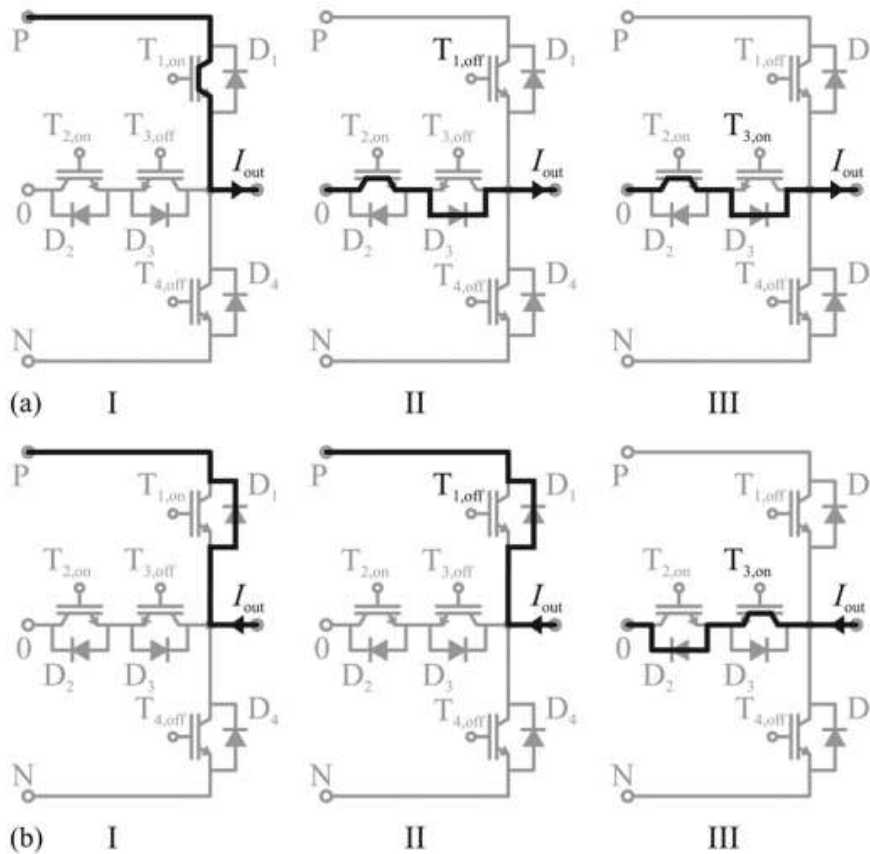
do đó có thể chọn các khóa này có điện áp chịu đựng thấp hơn, tiết kiệm chi phí. So với cấu trúc nghịch lưu diode kẹp (NPC), cấu trúc nghịch lưu hình T có số lượng linh kiện ít hơn (giảm hai diode kẹp trên một pha), do đó giảm được kích thước mạch, chi phí cũng như tổn thất dẫn, tổn thất chuyển mạch.

(b) Quá trình chuyển mạch

Có ba trạng thái chuyển mạch trên một pha như trong Bảng 3.1.

Bảng 3. 1 Các trạng thái chuyển mạch trên một pha

Trạng thái van	S_{x1}	S_{x2}	S_{x3}	S_{x4}	Điện áp pha – tâm nguồn V_{xo}
P	On	On	Off	Off	$+\frac{V_{dc}}{2}$
O	Off	On	On	Off	0
N	Off	Off	On	On	$-\frac{V_{dc}}{2}$



Hình 3. 5 Quá trình chuyển trạng thái P sang O đối với (a) $i > 0$ và (b) $i < 0$

Có thể thấy quy tắc hoạt động của các thiết bị chuyển mạch trong cùng một nhánh điều khiển đối nghịch cặp $S_{x1}-S_{x3}$ và $S_{x2}-S_{x4}$. Hơn nữa, việc chuyển từ trạng thái P sang trạng thái N là không được phép. Với dòng điện đầu ra dương, trong trạng thái P, T1 và T2 đóng, dòng điện chạy qua khóa T1 và điện áp pha đầu ra ở mức dương. Để chuyển sang trạng thái O, T1 được mở, dòng điện lúc này đi qua T2 và D3 và sau một khoảng trễ, T3 đóng lại. Với dòng điện ra âm, trong trạng thái P, dòng điện đi qua D1 về cực dương của DC-link. Để chuyển sang trạng thái O, đầu tiên mở T1, dòng điện vẫn không đổi hướng. Sau khoảng thời gian trễ, T3 đóng, dòng điện lúc này đi qua T3 và D2 về điểm O. Nguyên tắc này hoạt động tương tự với các quá trình chuyển mạch còn lại.

3.2.2. Phương pháp điều khiển phát xung

Các phương pháp phổ biến được dùng trong điều khiển các mạch nghịch lưu có thể kể đến:

- Phương pháp điều chế độ rộng xung sine (Sine PWM).
- Phương pháp điều chế độ rộng xung cải biến (SFO – PWM).
- Phương pháp điều chế vector không gian (SVPWM).

Đề tài này trình bày nội dung của phương pháp điều chế vector không gian. Đây là một trong những kỹ thuật điều chế thời gian thực được ưa chuộng và được sử dụng rộng rãi để điều khiển bộ nghịch lưu nguồn áp ba pha. So với phương pháp điều chế hình sin ba pha (SPWM), nó có sóng hài dòng điện thấp hơn và tỉ số điều chế cao hơn.

Mỗi trạng thái chuyển mạch tạo ra một điện áp nghịch lưu đầu ra xác định, có thể được biểu diễn bằng các vector điện áp cố định trong không gian. Một tập hợp các vector không gian tạo thành sơ đồ vector không gian (Hình 3.6). Giả định một vector tham chiếu quay trong khu vực bên trong sơ đồ vector không gian đó. Đối với mỗi vị trí nhất định trong không gian, vector tham chiếu có thể được tạo ra bởi ba vector cố định gần nhất. Do đó khi vector tham chiếu quay một vòng, điện áp đầu ra bộ nghịch lưu sẽ thay đổi được một chu kỳ cơ bản. Độ lớn và tần số của điện áp đầu ra cơ bản tương ứng với độ dài và tốc độ quay của vector tham chiếu.

(a) Nguyên tắc cơ bản

Từ Bảng 3.1, ba trạng thái chuyển mạch P, O, N có thể biểu thị hoạt động của kỹ thuật SVPWM. Với ba pha, có tổng cộng 27 trạng thái chuyển mạch. Mỗi trạng thái có thể biểu diễn dưới dạng vector qua biểu thức sau:

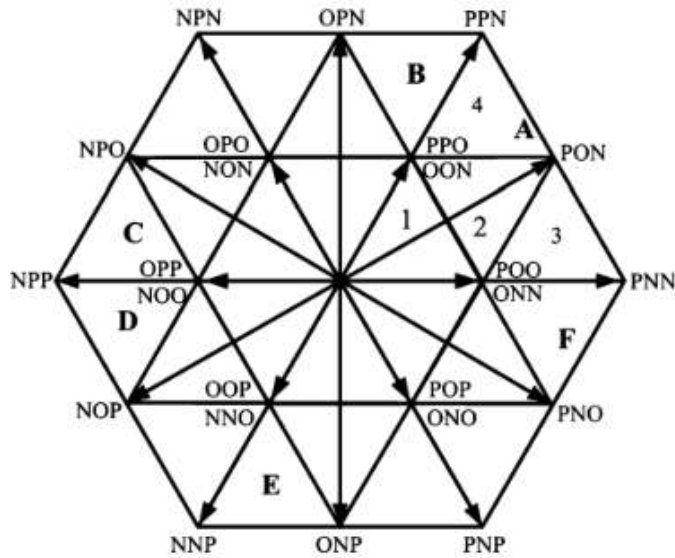
$$\vec{V} = \frac{2}{3} (V_{ao} + V_{bo} e^{j\frac{2\pi}{3}} + V_{co} e^{j\frac{4\pi}{3}}) \quad (3.5)$$

Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hở mạch cho cầu IGBT kiểu T

Trong đó bao gồm 6 vector nhỏ ($\vec{V}_1 \rightarrow \vec{V}_6$), 6 vector trung bình ($\vec{V}_7 \rightarrow \vec{V}_{12}$) và 6 vector lớn ($\vec{V}_{13} \rightarrow \vec{V}_{18}$), còn lại là các vector không \vec{V}_0 (PPP, OOO, NNN). Diện tích hình lục giác được chia thành 6 sector (A đến F) và mỗi sector được chia thành 4 vùng (1 đến 4), tổng cộng 24 vùng hoạt động. Bảng 3.2 tóm tắt tất cả trạng thái chuyển mạch theo vector liên quan.

Bảng 3. 2 27 trạng thái với biên độ và góc pha các vector

Vector	Trạng thái chuyển mạch	Biên độ và góc pha	Vector	Trạng thái	Biên độ và góc pha
\vec{V}_0	[PPP], [OOO], [NNN]	0	\vec{V}_9	[NPO]	$\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} e^{j\frac{5\pi}{6}}$
\vec{V}_1	[ONN], [POO]	$\frac{V_{dc}}{3} e^{j0}$	\vec{V}_{10}	[NOP]	$\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} e^{j\frac{7\pi}{6}}$
\vec{V}_2	[OON], [PPO]	$\frac{V_{dc}}{3} e^{j\frac{\pi}{3}}$	\vec{V}_{11}	[ONP]	$\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} e^{j\frac{3\pi}{2}}$
\vec{V}_3	[NON], [OPO]	$\frac{V_{dc}}{3} e^{j\frac{2\pi}{3}}$	\vec{V}_{12}	[PNO]	$\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} e^{j\frac{11\pi}{6}}$
\vec{V}_4	[NOO], [OPP]	$\frac{V_{dc}}{3} e^{j\pi}$	\vec{V}_{13}	[PNN]	$\frac{2V_{dc}}{3} e^{j0}$
\vec{V}_5	[NNO], [OOP]	$\frac{V_{dc}}{3} e^{j\frac{4\pi}{3}}$	\vec{V}_{14}	[PPN]	$\frac{2V_{dc}}{3} e^{j\frac{\pi}{3}}$
\vec{V}_6	[ONO], [POP]	$\frac{V_{dc}}{3} e^{j\frac{5\pi}{3}}$	\vec{V}_{15}	[NPN]	$\frac{2V_{dc}}{3} e^{j\frac{2\pi}{3}}$
\vec{V}_7	[PON]	$\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} e^{j\frac{\pi}{6}}$	\vec{V}_{16}	[NPP]	$\frac{2V_{dc}}{3} e^{j\pi}$
\vec{V}_8	[OPN]	$\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} e^{j\frac{\pi}{2}}$	\vec{V}_{17}	[NNP]	$\frac{2V_{dc}}{3} e^{j\frac{4\pi}{3}}$
			\vec{V}_{18}	[PNP]	$\frac{2V_{dc}}{3} e^{j\frac{5\pi}{3}}$



Hình 3. 6 Sơ đồ vector không gian cho bộ nghịch lưu ba bậc

Giả sử điện áp tức thời của ba pha được biểu diễn:

$$U_a = V_m \sin(\omega t) \quad (3.6)$$

$$U_b = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.7)$$

$$U_c = V_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.8)$$

Vector quay có thể biểu diễn trong hệ trục $\alpha\beta$ bằng cách sử dụng biến đổi Clarke:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Từ đó ta có:

$$\vec{V}_{ref} = V_\alpha + jV_\beta \quad (3.10)$$

Biên độ và góc pha của vector tham chiếu:

$$|\vec{V}_{ref}| = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad (3.11)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{V_\beta}{V_\alpha}\right) \quad (3.12)$$

(b) *Xác định vị trí vector tham chiếu*

Bước thứ hai trong kỹ thuật SVPWM là xác định vector tham chiếu đang nằm ở sector và vùng nào.

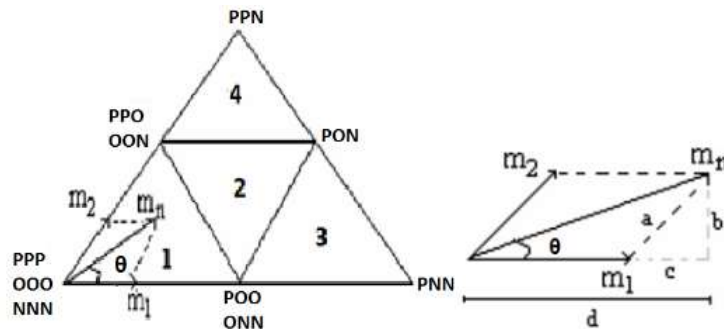
- **Xác định sector**

Góc pha θ của vector tham chiếu được sử dụng để xác định sector mà vector tham chiếu thuộc về như sau:

- Nếu $0^\circ < \theta < 60^\circ$ thì \vec{V}_{ref} nằm trong sector A.
- Nếu $60^\circ < \theta < 120^\circ$ thì \vec{V}_{ref} nằm trong sector B.
- Nếu $120^\circ < \theta < 180^\circ$ thì \vec{V}_{ref} nằm trong sector C.
- Nếu $180^\circ < \theta < 240^\circ$ thì \vec{V}_{ref} nằm trong sector D.
- Nếu $240^\circ < \theta < 300^\circ$ thì \vec{V}_{ref} nằm trong sector E.
- Nếu $300^\circ < \theta < 360^\circ$ thì \vec{V}_{ref} nằm trong sector F.

- **Xác định vùng**

Sau khi xác định sector, ta cần xác định chính xác vector tham chiếu nằm ở vùng nào trong sector. Thuật toán phụ này dựa trên hai thông số m_1 và m_2 , được minh họa trên Hình 3.7.



Hình 3. 7 Minh họa hai thông số m_1 và m_2

Hai thông số m_1 và m_2 được tính như sau:

$$m_1 = m_n \cos\theta - \left(\frac{2}{\sqrt{3}} m_n \sin\theta \right) \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) = m_n \left(\cos\theta - \frac{\sin\theta}{\sqrt{3}} \right) \quad (3.13)$$

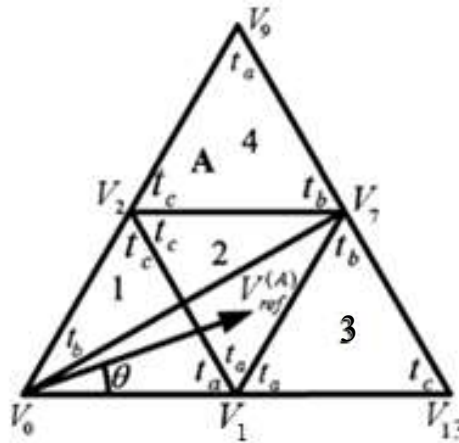
$$m_2 = a = \frac{b}{\sin\left(\frac{\pi}{3}\right)} = \frac{2}{\sqrt{3}} b = \frac{2}{\sqrt{3}} m_n \sin\theta \quad (3.14)$$

Với $m_n = \frac{V_{ref}}{2/3V_{dc}}$. Các vùng được xác định dựa vào m_1 và m_2 như sau:

- Nếu m_1, m_2 và $m_1 + m_2 < 0.5$ thì \vec{V}_{ref} nằm ở vùng 1.
- Nếu $m_1 > 0.5$ thì \vec{V}_{ref} nằm ở vùng 3.
- Nếu $m_2 > 0.5$ thì \vec{V}_{ref} nằm ở vùng 4.
- Nếu $m_1, m_2 < 0.5$ và $m_1 + m_2 > 0.5$ thì \vec{V}_{ref} nằm ở vùng 2.

(c) *Tính toán thời gian điều chế*

Sau khi xác định được vùng chứa vector tham chiếu, ta sẽ đi tính toán thời gian điều chế các tổ hợp vector cơ bản để tạo ra được \vec{V}_{ref} . Thời gian điều chế t_a, t_b, t_c cho từng tổ hợp ba vector cơ bản được quy định như Hình 3.8. Sector A được chọn làm ví dụ tính toán thời gian điều chế.



Hình 3. 8 Tổ hợp các vector trong sector A

Giả sử \vec{V}_{ref} đang nằm ở vùng 2, lúc này \vec{V}_{ref} có thể được biểu diễn bằng ba vector gần nhất \vec{V}_1, \vec{V}_2 và \vec{V}_7 . Trong chu kỳ lấy mẫu T_s , công thức tính thời gian thực hiện các vector điện áp như sau:

$$\begin{cases} \vec{V}_{ref} T_s = \vec{V}_1 t_a + \vec{V}_7 t_b + \vec{V}_2 t_c \\ T_s = t_a + t_b + t_c \end{cases} \quad (3.15)$$

Thay giá trị các vector \vec{V}_1, \vec{V}_2 và \vec{V}_7 vào hệ phương trình, ta tính được các khoảng thời gian điều chế như sau:

$$\begin{cases} t_a = T_s - \frac{4}{\sqrt{3}} m_n T_s \sin\theta \\ t_b = \frac{4}{\sqrt{3}} m_n T_s \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) - T_s \\ t_c = T_s - \frac{4}{\sqrt{3}} m_n T_s \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \end{cases} \quad (3.16)$$

Áp dụng tương tự đối với các vùng khác trong sector A, ta có thời gian điều chế của từng vùng trong Bảng 3.3.

Bảng 3. 3 Thời gian điều chế trong sector A

T.gian Vùng	t_a	t_b	t_c
1	$\frac{4}{\sqrt{3}} m_n T_s \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right)$	$T_s - \frac{4}{\sqrt{3}} m_n T_s \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right)$	$\frac{4}{\sqrt{3}} m_n T_s \sin\theta$
2	$T_s - \frac{4}{\sqrt{3}} m_n T_s \sin\theta$	$\frac{4}{\sqrt{3}} m_n T_s \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) - T_s$	$T_s - \frac{4}{\sqrt{3}} m_n T_s \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right)$
3	$2T_s - \frac{4}{\sqrt{3}} m_n T_s \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right)$	$\frac{4}{\sqrt{3}} m_n T_s \sin\theta$	$\frac{4}{\sqrt{3}} m_n T_s \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) - T_s$
4	$\frac{4}{\sqrt{3}} m_n T_s \sin\theta - T_s$	$\frac{4}{\sqrt{3}} m_n T_s \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right)$	$2T_s - \frac{4}{\sqrt{3}} m_n T_s \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right)$

(d) Sắp xếp trình tự chuyển mạch

Sau khi tính toán thời gian điều chế cho từng vector, ta sẽ xác định trình tự chuyển mạch. Nhìn chung, trình tự chuyển mạch phải đáp ứng hai điều kiện sau:

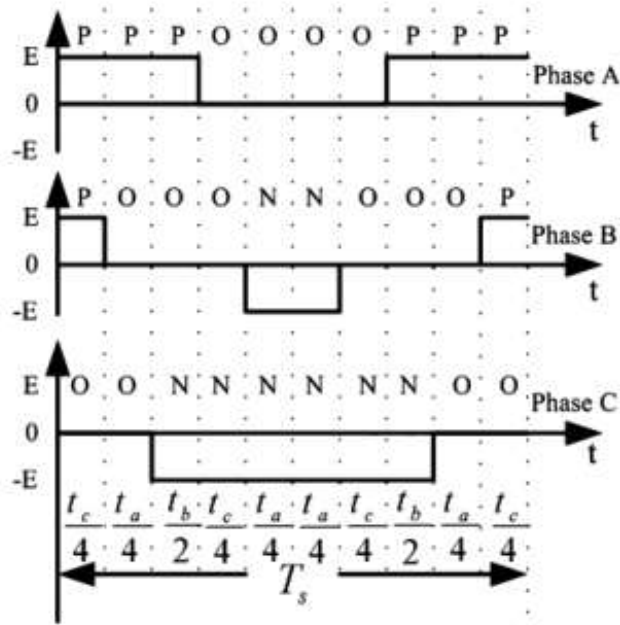
- Quá trình chuyển đổi từ trạng thái này sang trạng thái tiếp theo chỉ bao gồm hai van, một được bật và van còn lại được tắt.
- Quá trình chuyển từ vùng này sang vùng tiếp theo có số lượng chuyển mạch là tối thiểu.

Trình tự chuyển mạch được phối hợp để đạt được THD thấp và đảm bảo cân bằng điện áp DC-link.

Trình tự chuyển mạch ở sector A được sắp xếp như sau:

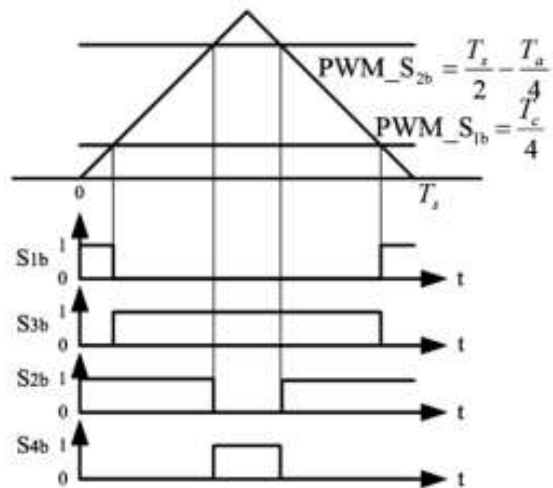
- Vùng 1: PPO-POO-OOO-OON-ONN rồi trở lại.
- Vùng 2: PPO-POO-PON-OON-ONN rồi trở lại.
- Vùng 3: POO-PON-PNN-ONN rồi trở lại.

- Vùng 4: PPO-PPN-PON-OON rồi trở lại.



Hình 3. 9 Minh họa trình tự chuyển mạch vùng 2 sector A

Từ trình tự chuyển mạch, ta có thể đưa ra mẫu xung đóng cắt cho từng van bán dẫn trong từng pha, ví dụ cho pha B của vùng 2 (Hình 3.10).



Hình 3. 10 Mẫu xung đóng cắt các van cho pha B

Từ mẫu xung đóng cắt này, ta có thể xác định được chu kỳ PWM để điều chế cho từng van bán dẫn trong sector A. Bảng 3.4 tổng hợp tất cả thời gian phát xung PWM cho từng khóa phía cao:

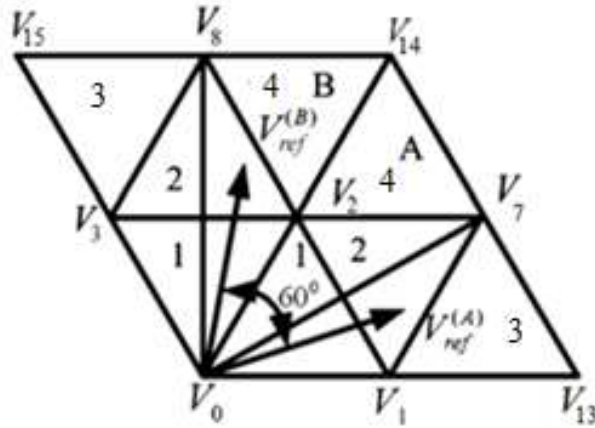
Bảng 3. 4 Thời gian phát xung PWM cho từng khóa ở phía cao

Vùng Tgian	1	2	3	4
PWM_S1a	$\frac{T_c}{4} + \frac{T_a}{4}$	$\frac{T_c}{4} + \frac{T_a}{4} + \frac{T_b}{2}$	$\frac{T_s}{2} - \frac{T_a}{4}$	$\frac{T_s}{2} - \frac{T_c}{4}$
PWM_S2a	$\frac{T_s}{2}$	$\frac{T_s}{2}$	$\frac{T_s}{2}$	$\frac{T_s}{2}$
PWM_S1b	$\frac{T_c}{4}$	$\frac{T_c}{4}$	0	$\frac{T_c}{4} + \frac{T_a}{2}$
PWM_S2b	$\frac{T_s}{2} - \frac{T_a}{4}$	$\frac{T_s}{2} - \frac{T_a}{4}$	$\frac{T_a}{4} + \frac{T_b}{2}$	$\frac{T_s}{2}$
PWM_S1c	0	0	0	0
PWM_S2c	$\frac{T_s}{2} - \frac{T_a}{4} - \frac{T_c}{4}$	$\frac{T_c}{4} + \frac{T_a}{4}$	$\frac{T_a}{4}$	$\frac{T_c}{4}$

(e) Thuật toán đơn giản hóa

Ý tưởng của thuật toán SVPWM đơn giản hóa là khai thác tính đối xứng hình học của sáu sector chia ra từ sơ đồ vector không gian. Dựa trên điều này, có một mối quan hệ chặt chẽ giữa việc tính toán thời gian bật và chuyển đổi trong mỗi pha. Do đó, ta có thể tính toán thời gian thực hiện cho các công tắc trong một sector nhất định và sau đó ánh xạ thời gian thực hiện trong một sector cụ thể thành thời gian thực hiện tương ứng trong sector chính thông qua mối quan hệ này.

Giả sử vector tham chiếu A nằm trong vùng 2 của sector A, trong khi vector tham chiếu B nhận được bằng cách quay vector A một góc 60° . Vector V_{ref}^A được tạo bởi ba vector \vec{V}_1, \vec{V}_2 và \vec{V}_7 . Tương tự, vector V_{ref}^B tạo bởi ba vector \vec{V}_2, \vec{V}_3 và \vec{V}_8 . Bằng cách nhân $e^{j\frac{\pi}{3}}$ ở cả hai phía của biểu thức tính toán thời gian điều chế cho vector V_{ref}^B , biểu thức luôn có thể được chuyển về sector A. Do đó nếu vector tham chiếu nằm ở bất cứ sector nào khác, nó cũng có thể được chuyển về sector A bằng cách nhân với $e^{j\frac{n\pi}{3}}$, với $n = 1, 2, 3, 4, 5$.



Hình 3. 11 Hai vector lệch 60 độ trong sector A và B

Vector V_{ref}^B có thể viết như sau:

$$V_{ref}^A = \frac{2}{3} \left(U_a + U_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + U_c e^{j\frac{-2\pi}{3}} \right) \quad (3.17)$$

$$V_{ref}^B = V_{ref}^A e^{j\frac{\pi}{3}} = \frac{2}{3} \left(-U_b - U_c e^{j\frac{2\pi}{3}} - U_a e^{j\frac{-2\pi}{3}} \right) \quad (3.18)$$

Tương tự, vector tham chiếu tương ứng trong các sector khác được xây dựng trong bảng dưới đây:

Bảng 3. 5 Các mối quan hệ điện áp tạo nên vector tham chiếu trong 6 sector

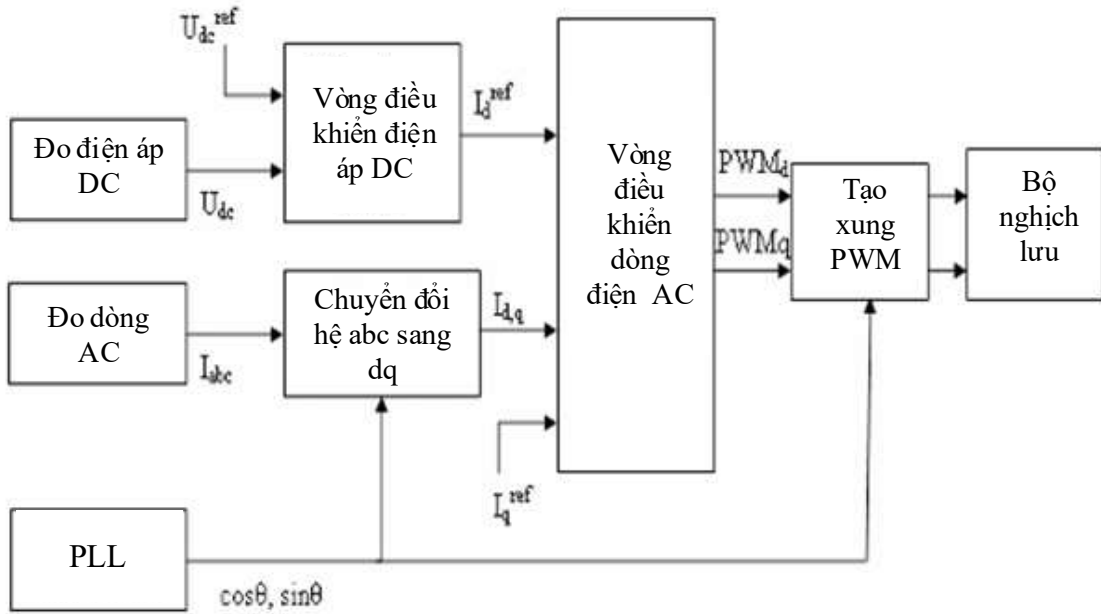
Sector	Pha A	Pha B	Pha C
A	U_a	U_b	U_c
B	$-U_b$	$-U_c$	$-U_a$
C	U_c	U_a	U_b
D	$-U_a$	$-U_b$	$-U_c$
E	U_b	U_c	U_a
F	$-U_c$	$-U_a$	$-U_b$

3.3. Lý thuyết điều khiển nối lưới

Nội dung của lý thuyết điều khiển nối lưới trong đề tài này được trình bày ngắn gọn, tóm tắt các ý chính. Để có cái nhìn sâu sắc và chi tiết hơn, xin tham khảo nội dung của tài liệu tham khảo [1].

Mục đích của việc điều khiển nối lưới là điều chỉnh điện áp V_{dc} và duy trì sự cân bằng giữa nguồn DC-link và nguồn lưới. Đề tài này trình bày một phương pháp điều

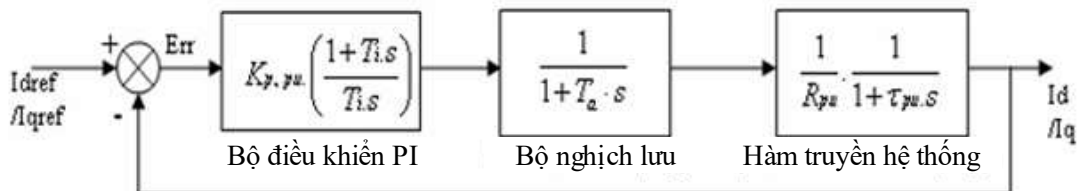
khí được sử dụng rộng rãi là điều khiển vector tựa theo trường (field oriented vector control). Hình 3.12 trình bày sơ đồ khối chức năng của phương pháp điều khiển vector. Hệ thống gồm hai vòng điều khiển độc lập với cấu trúc tầng, bộ điều khiển điện áp DC cung cấp tín hiệu đặt cho hệ thống điều khiển và bộ điều khiển dòng điện tạo ra tín hiệu chuyển mạch cho bộ phát xung. Các tín hiệu dòng điện và điện áp được chuyển đổi từ hệ tọa độ ba pha abc sang hệ tọa độ cố định dq.



Hình 3. 12 Sơ đồ khối phương pháp điều khiển vector

(a) Mạch vòng điều khiển dòng điện

Sơ đồ khối cho mạch vòng điều khiển dòng điện được trình bày trong Hình 3.13. Các hàm truyền đạt của các khối thành phần được biểu diễn trong hệ đơn vị nhằm loại bỏ rào cản về đơn vị giữa các đại lượng, mang đến sự đơn giản trong tính toán.



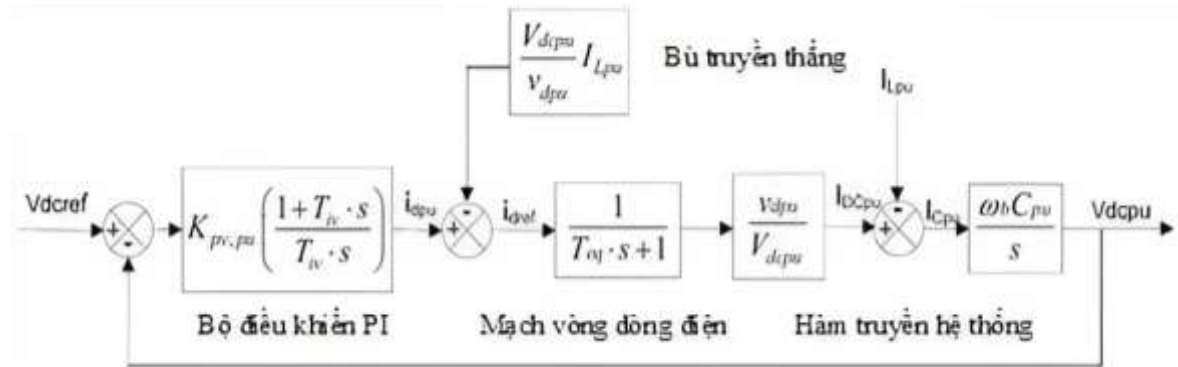
Hình 3. 13 Sơ đồ khối mạch vòng điều khiển dòng điện

Dựa theo phương pháp tối ưu mô đun, các thông số của bộ điều khiển dòng điện được xác định như sau:

$$K_{p, pu} = \frac{\tau_{pu} R_{pu}}{2T_a}; T_i = \tau_{pu} \quad (3.19)$$

(b) Mạch vòng điều khiển điện áp

Hình 3.14 trình bày sơ đồ khối của mạch vòng điều khiển điện áp, để loại bỏ ảnh hưởng qua lại giữa 2 thành phần trục d và q, một thành phần bù truyền thẳng được thêm vào trước mạch vòng dòng điện.



Hình 3. 14 Sơ đồ khối mạch vòng điều khiển điện áp

Thông số của bộ điều khiển điện áp được xác định dựa vào phương pháp tối ưu đối xứng:

$$T_{iv} = a^2 T_{eq}; K_{pv, pu} = \frac{T_c}{K \sqrt{T_{iv} T_{eq}}} = \frac{T_c}{a K T_{eq}} \quad (3.20)$$

Với a là khoảng cách đối xứng giữa $1/T_{iv}$ và $1/T_{eq}$ đến tần số giao thoa ω_d .

3.4. Kết luận

Chương này đã trình bày các lý thuyết liên quan đến điều khiển inverter trong hệ thống điện mặt trời nối lưới. Ở chương tiếp theo, những lý thuyết này sẽ được áp dụng trong mô phỏng một hệ thống điện mặt trời nối lưới sử dụng inverter PVH-L2550E. Đồng thời, các yếu tố ảnh hưởng đến mạch nghịch lưu sẽ được phân tích để đánh giá khả năng ảnh hưởng cũng như gây hư hại của các yếu tố này tới mạch nghịch lưu và đặc biệt là các van bán dẫn IGBT.

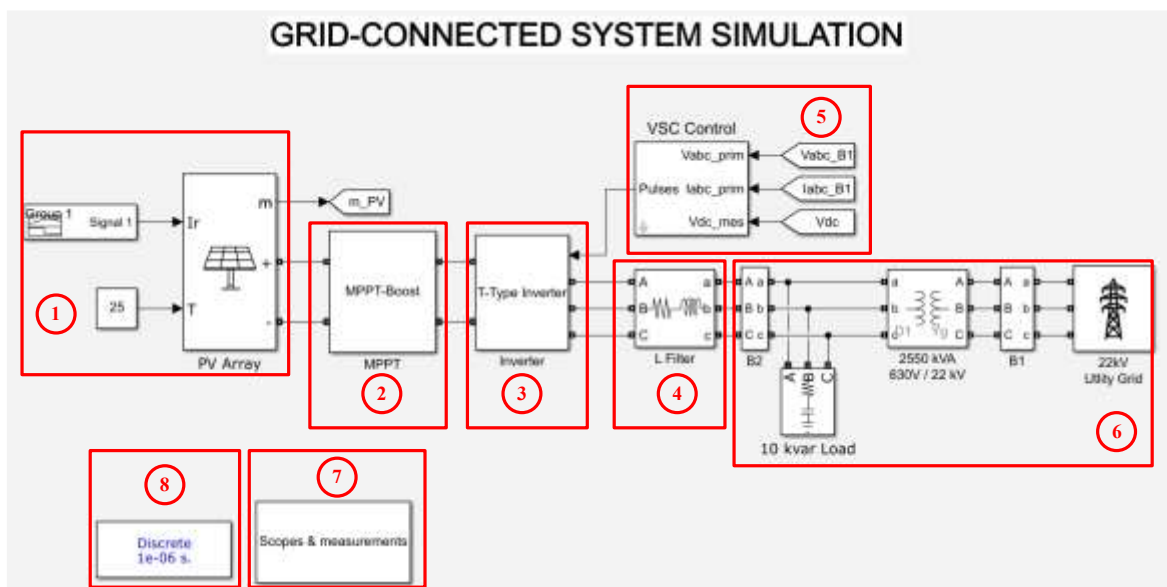
Chương 4

MÔ PHỎNG INVERTER PVH-L2550E TRONG HỆ THỐNG ĐIỆN MẶT TRỜI VÀ ĐÁNH GIÁ CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN CẦU NGHỊCH LƯU IGBT

4.1. Mô phỏng điều khiển inverter bằng MATLAB/Simulink

4.1.1. Bối cảnh mô phỏng

Mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm MATLAB/Simulink phiên bản 2022a. Mục tiêu của việc mô phỏng là điều khiển được inverter PVH-L2550E hoạt động tốt trong hệ thống sản xuất điện mặt trời nối lưới, do đó nội dung mô phỏng chủ yếu là chế độ vận hành nối lưới của inverter. Mô phỏng cũng tập trung vào mạch nghịch lưu cầu IGBT của inverter để đánh giá mức độ ảnh hưởng của các yếu tố có thể gây hư hại cho IGBT, từ đó làm tiền đề cho việc chuẩn bị các chiến lược, phương pháp bảo trì, bảo dưỡng cho inverter để tối thiểu hóa thiệt hại khi sự cố xảy ra. Hình 4.1 biểu diễn sơ đồ khối mô phỏng của hệ thống điện mặt trời nối lưới với quy mô công suất 2550kW.



Hình 4. 1 Mô phỏng hệ thống điện mặt trời nối lưới công suất 2550 kW

Hệ thống được chia làm 8 khối chức năng chính:

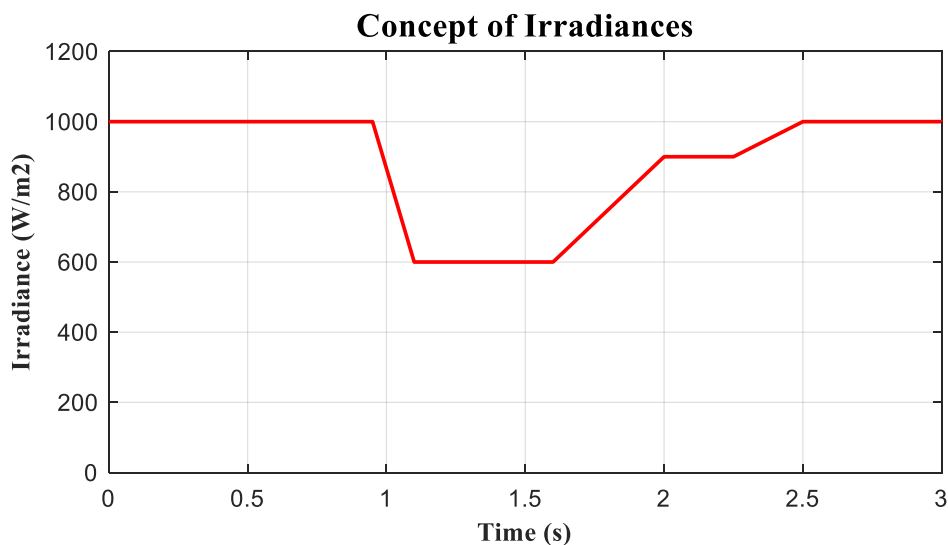
(a) Khối 1: Dây PV

Khối 1 là dây PV – nguồn DC của hệ thống. Dây PV có công suất thiết kế tương đương 2550kW với các thông số như sau:

Bảng 4. 1 Thông số dây PV

Dây PV:	
Tấm pin sử dụng	Jinko Solar JKM330-M72
Số tấm pin mắc nối tiếp (chuỗi)	30
Số chuỗi mắc song song	258
Nhiệt độ hoạt động (mô phỏng)	25°C
Tấm PV:	
Công suất tối đa	330.048 W
Số tế bào trên 1 mô đun	72
Điện áp hở mạch	46.7 V
Dòng điện ngắn mạch	9.11 A
Điện áp hoạt động tại MPP	38.2 V
Dòng điện hoạt động tại MPP	8.64 A

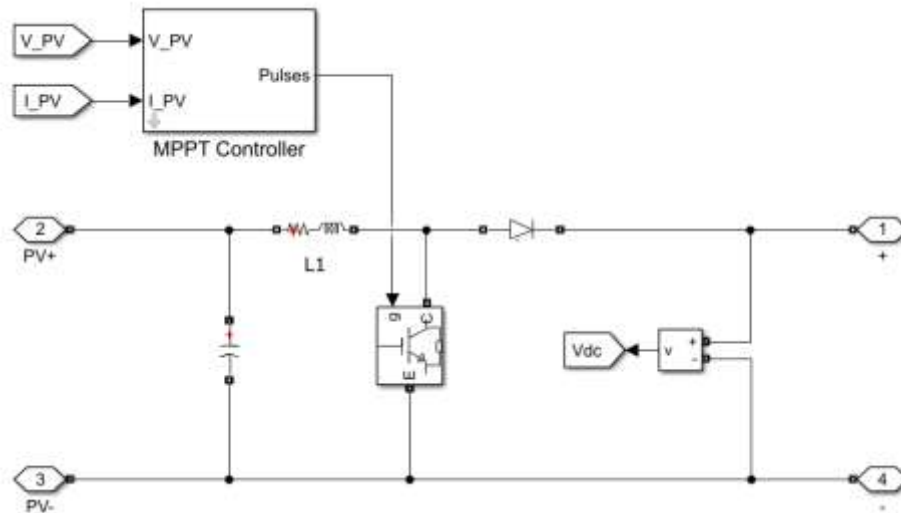
Bức xạ đầu vào của dây PV được thay đổi theo kịch bản như đồ thị trong Hình 4.2.



Hình 4. 2 Kịch bản thay đổi bức xạ

(b) Khối 2: Điều khiển MPPT & mạch Boost

Sử dụng phương pháp điện dẫn tăng dần đã được giới thiệu ở chương trước, điện áp ra của dây PV qua điều khiển MPPT được nâng lên nhờ mạch Boost trước khi đưa vào mạch nghịch lưu (Hình 4.3). Bảng 4.2 trình bày các thông số của bộ MPPT và mạch Boost.



Hình 4. 3 Khối MPPT và mạch Boost

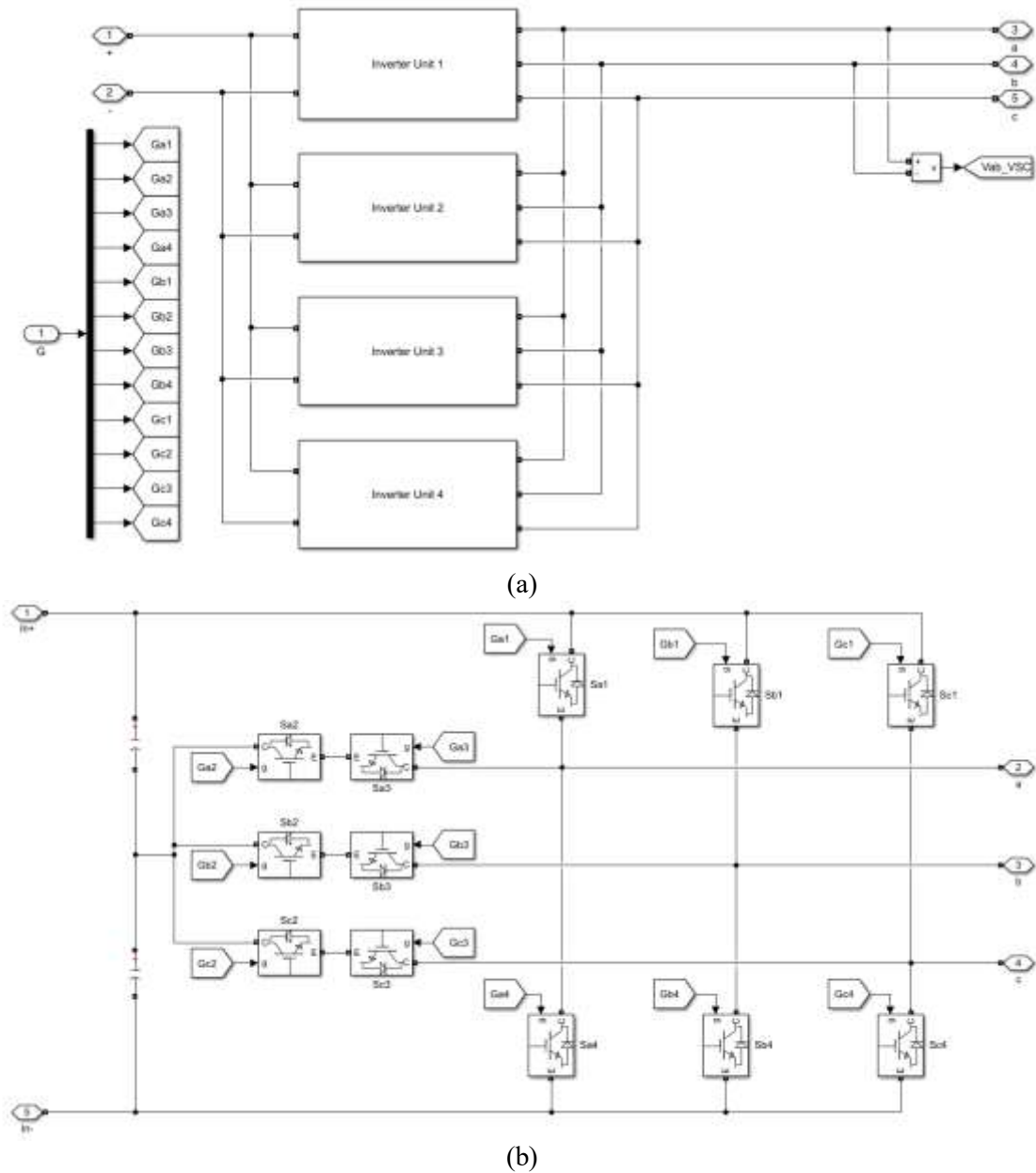
Bảng 4. 2 Thông số khối MPPT & Boost

Bộ điều khiển MPPT:	
Phương pháp sử dụng	Điện dẫn tăng dần (INC)
Tần số phát xung	5000 Hz
Chu kỳ cửa sổ	200^{-6} s
Độ rộng xung ban đầu	0.5
Mạch Boost:	
Van chuyển mạch	IGBT
Điện dung tụ đầu vào	100 μ F
Điện cảm của cuộn dây	5 mH
Điện trở của cuộn dây	0.005 Ω
Điện trở Ron của diode	0.0001 Ω

(c) Khối 3: Mạch nghịch lưu

Khối này gồm 4 đơn vị cầu IGBT ba bậc kiểu T của inverter PVH-L2550E (Hình 4.4). Các tụ điện DC-link có điện dung là 12000 μ F.

Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hở mạch cho cầu IGBT kiểu T



Hình 4. 4 Khối mạch nghịch lưu của inverter (a) và cầu IGBT ba bậc kiểu T (b)

(d) Khối 4: Mạch lọc

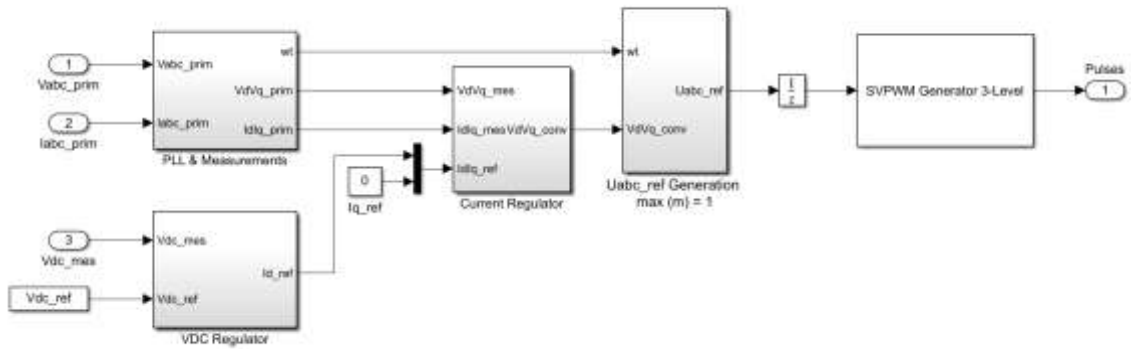
Mạch lọc có nhiệm vụ làm mượt và sin hóa dạng sóng điện áp cũng như dòng điện 3 pha đầu ra. Bộ lọc thuộc loại L với điện cảm có giá trị 0.25 mH kèm với giá trị điện trở là 0.002 Ω.

(e) Khối 5: Điều khiển phát xung & điều khiển nối lưới

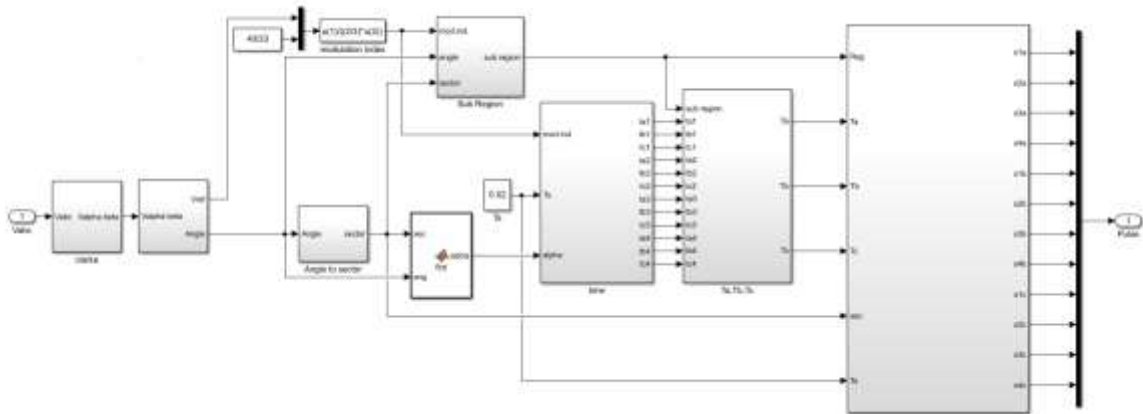
Hệ thống điều khiển sử dụng phương pháp điều chế vector không gian (SVPWM) để phát xung điều khiển mạch nghịch lưu và phương pháp vector tựa theo trường để điều khiển đồng bộ lưới. Mô phỏng được thực hiện trong điều kiện giả sử toàn bộ

Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hở mạch cho cầu IGBT kiểu T

công suất đầu ra của hệ thống là công suất tác dụng (không có công suất phản kháng), do vậy thành phần đặt của trục q được đưa về 0.



(a)



(b)

Hình 4. 5 Điều khiển nối lưới (a) và SVPWM (b)

Các thông số điều khiển được trình bày trong Bảng 4.3.

Bảng 4. 3 Thông số điều khiển nối lưới và điều khiển phát xung

Điều khiển nối lưới:	
Phương pháp sử dụng	Điều khiển vector
Tần số lưới	50 Hz
Công suất danh định	2550 kW
Điện áp sơ cấp danh định (phía lưới)	22 kV
Điện áp thứ cấp danh định (phía inverter)	630 V
Điện áp DC danh định (DC-link)	1200 V
Thông số bộ điều khiển dòng điện	$K_p = 0.3; K_i = 20$
Thông số bộ điều khiển điện áp	$K_{pv} = 0.1; K_{iv} = 440$

Chu kỳ lấy mẫu	0.0001 s
Điều khiển phát xung:	
Phương pháp sử dụng	SVPWM
Tần số chuyển mạch	3000 Hz
Tỉ số điều chế	0.8625
Chu kỳ lấy mẫu	0.02 s

(f) Khối 6: Kết nối lưới

Khối có 1 máy biến áp 0.6/22 kV. Phía sơ cấp của máy biến áp nối với lưới điện 22 kV, phía thứ cấp nối với đầu ra mạch nghịch lưu. Ngoài ra còn có khối tải 10 kVar có chức năng bù công suất phản kháng cho hệ thống.

(g) Khối 7: Đo đạc & hiển thị

Chứa các khối Scope để hiển thị các thông số kết quả mô phỏng. Các thông số quan tâm bao gồm điện áp DC-link, điện áp và dòng điện ba pha sơ cấp và thứ cấp máy biến áp, điện áp, công suất đầu ra của dãy PV và của hệ thống.

(h) Khối 8: Powergui

Powergui là khối môi trường cần thiết để mô phỏng các hệ thống điện công suất, khối này quyết định loại mô phỏng, ngoài ra còn có các công cụ phân tích kết quả mô phỏng. Trong mô phỏng này, thiết đặt của khối powergui là mô phỏng rời rạc với thời gian lấy mẫu hệ thống là 1^{-6} s.

4.1.2. Kết quả mô phỏng

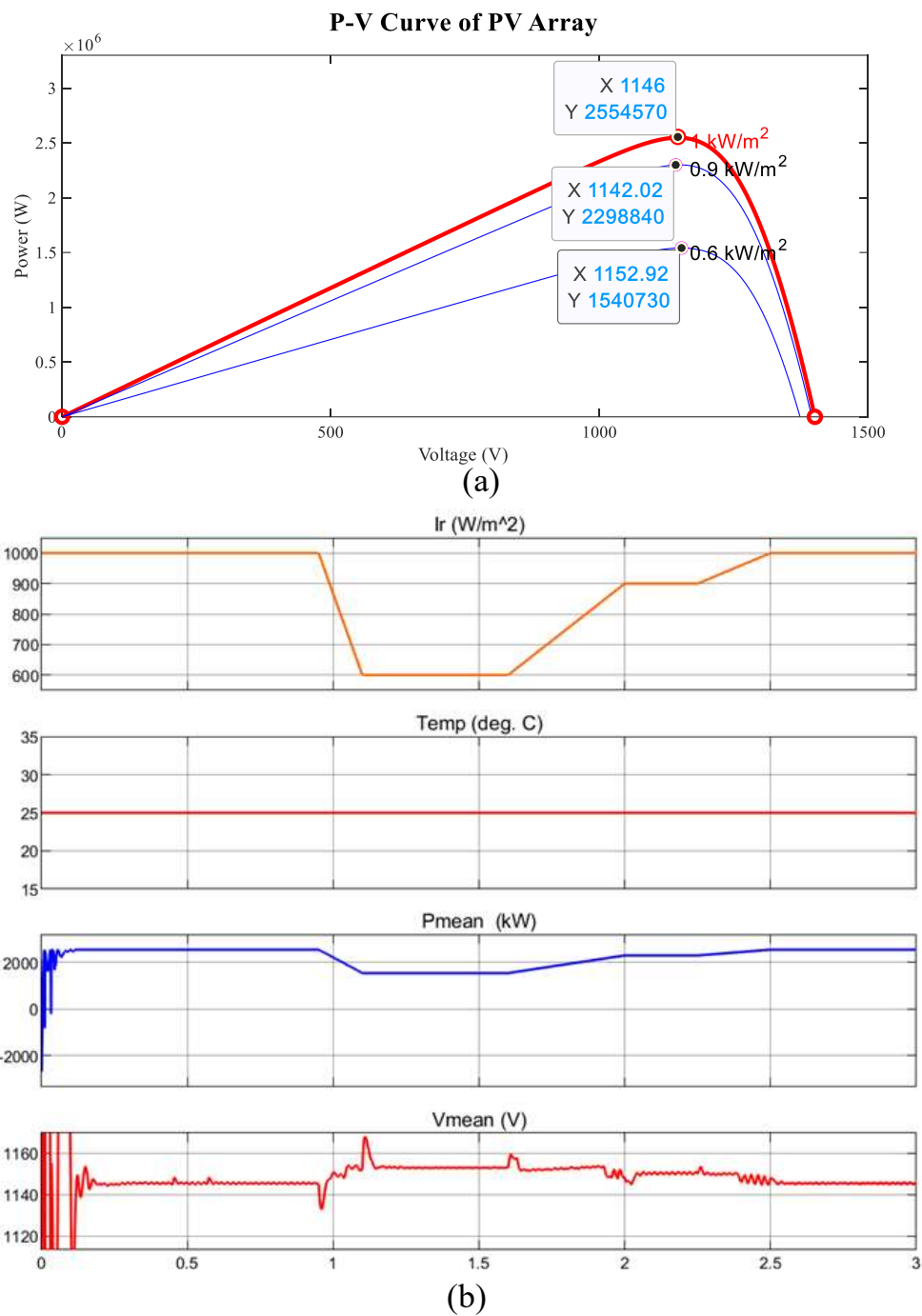
Mục tiêu chính của mô phỏng là kiểm tra xem hệ thống điện mặt trời nối lưới được thiết kế có hoạt động tốt hay không, cụ thể cần phân tích các mục:

- Điều khiển MPPT đã hoạt động tốt hay chưa?
- Điều khiển phát xung có điều khiển được mạch nghịch lưu tạo ra điện áp ba bậc như lý thuyết không?
- Điều khiển nối lưới có cân bằng được điện áp DC-link, và đồng bộ điện áp và dòng điện đầu ra giống với lưới không?

(a) Kiểm tra kết quả điều khiển MPPT

Trong Hình 4.2, đồ hình bức xạ thay đổi với 3 mức bức xạ: 1000 W/m^2 , 900 W/m^2 và 600 W/m^2 . Để kiểm tra tính chính xác của phương pháp điều khiển

MPPT, các giá trị điện áp và công suất đầu ra của dãy PV khi mô phỏng sẽ được so sánh với các giá trị tương ứng trong thiết kế.



Hình 4. 6 Đường đặc tính P-V của dãy PV (a) và kết quả mô phỏng dãy PV (b)

Từ hai đồ thị trong Hình 4.6, Bảng 4.4 được đưa ra nhằm trực quan hóa kết quả kiểm chứng.

Bảng 4. 4 So sánh kết quả điều khiển MPPT

Mức bức xạ	Giá trị thiết kế		Giá trị mô phỏng	
	P (kW)	V (V)	P (kW)	V (V)
1000 W/m ²	2554.57	1146	2547.4	1145.94
900 W/m ²	2298.84	1142.02	2300.04	1151.45
600 W/m ²	1540.73	1152.92	1541.06	1153.1

Từ Bảng 4.4 rút ra các nhận xét như sau:

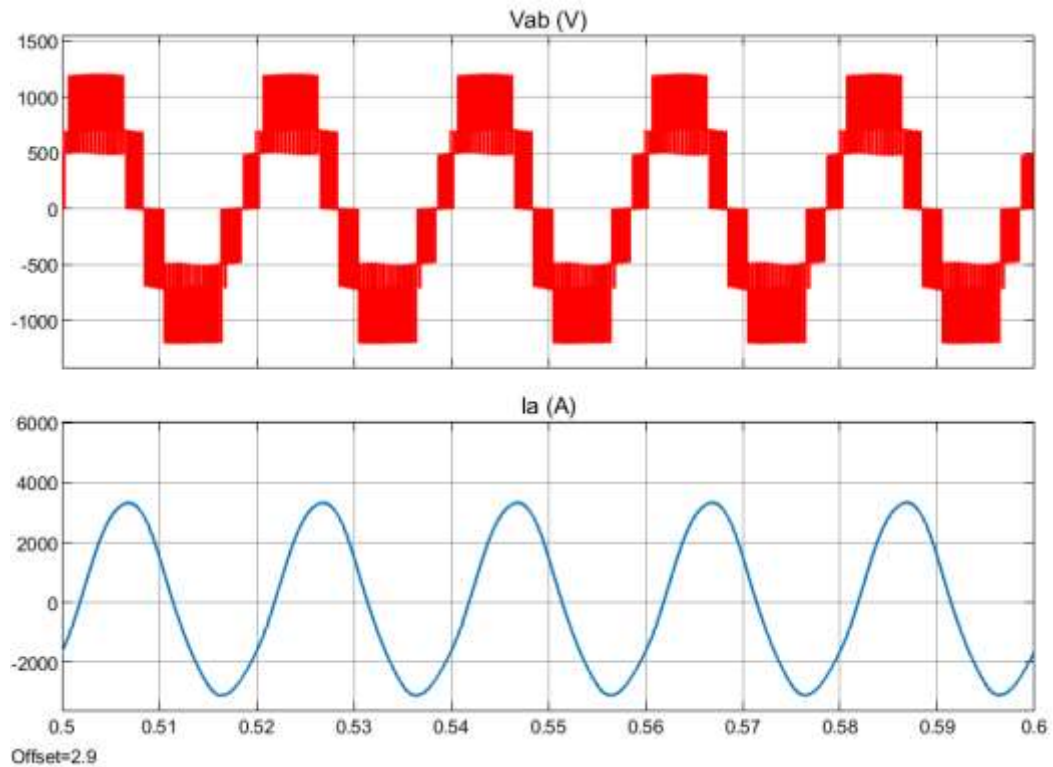
- Tại mức bức xạ 1000 W/m² : giá trị điện áp gần như không có sự chênh lệch, trong khi giá trị công suất có sự sụt hao đi 7 kW. Tuy nhiên khi xét đến quy mô toàn hệ thống, chênh lệch này có thể chấp nhận được.
- Tại mức bức xạ 900 W/m² : Giá trị công suất không chênh nhiều nhưng giá trị điện áp có sự chênh lệch khoảng 9.5 V, nguyên nhân có thể do khoảng thời gian mà hệ thống duy trì ở mức bức xạ này tương đối ngắn (0.3 s), khiến cho điện áp không giảm kịp.
- Tại mức bức xạ 600 W/m² : Không có sự chênh lệch đáng kể nào của cả điện áp lẫn công suất.

Nhận xét tổng quát, điều khiển MPPT coi như đã đạt yêu cầu.

(b) Kiểm tra kết quả điều khiển phát xung

Điều kiện đạt ở mục kiểm tra này là xem dạng điện áp và dòng điện đã giống như lý thuyết của mạch nghịch lưu ba bậc hay chưa. Hình 4.7 biểu diễn đồ thị kết quả của điện áp dây và dòng một pha đầu ra của mạch nghịch lưu. Có thể thấy, điện áp dây V_{ab} có đủ 3 bậc: $\pm V_{dc}$, $\pm V_{dc}/2$ và 0. Dòng điện đầu ra cũng có dạng sóng sin và chu kì của cả dòng và áp đều là 0.02 s. Như vậy mô phỏng điều khiển phát xung đã đạt yêu cầu.

Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hở mạch cho cầu IGBT kiểu T



Hình 4. 7 Đồ thị kết quả điện áp và dòng điện đầu ra của mạch nghịch lưu

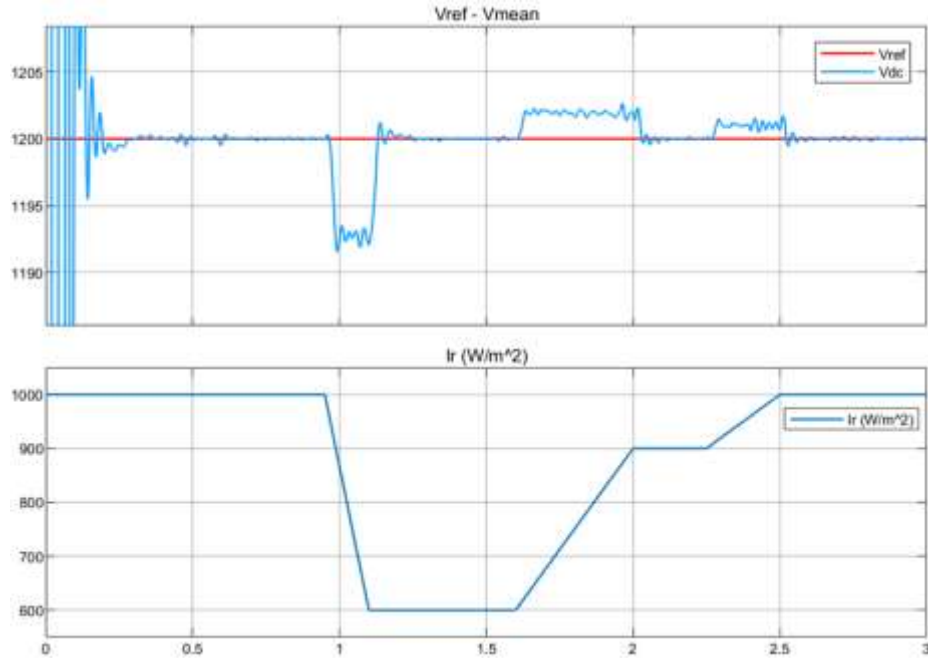
(c) Kiểm tra kết quả điều khiển nối lưới

Để kiểm tra kết quả điều khiển nối lưới, các thông số cần được xét đến là điện áp DC-link và dòng điện cũng như điện áp thứ cấp máy biến áp.

- Điện áp DC-link

Hình 4.8 biểu diễn đồ thị kết quả điều khiển điện áp DC-link kèm với đồ hình thay đổi bức xạ để tiện phân tích. Có thể thấy điện áp DC-link được điều khiển đã bám theo được giá trị đặt tuy nhiên còn có sự dao động nhỏ quanh điểm đặt. Ngoài ra điện áp có sự sai lệch ở một vài khoảng thời gian, điều này hoàn toàn có thể hiểu được vì trong những khoảng thời gian đó, bức xạ đầu vào có sự thay đổi liên tục. Thấy rõ rằng trong những khoảng thời gian mà bức xạ ổn định tại một giá trị, dù là giá trị bức xạ bằng bao nhiêu thì điện áp DC-link vẫn có thể bám theo được giá trị đặt. Mặt khác, sự sai lệch của điện áp so với giá trị đặt không quá lớn ($<10\text{ V}$). Chung quy lại, kết quả điện áp DC-link có thể chấp nhận được.

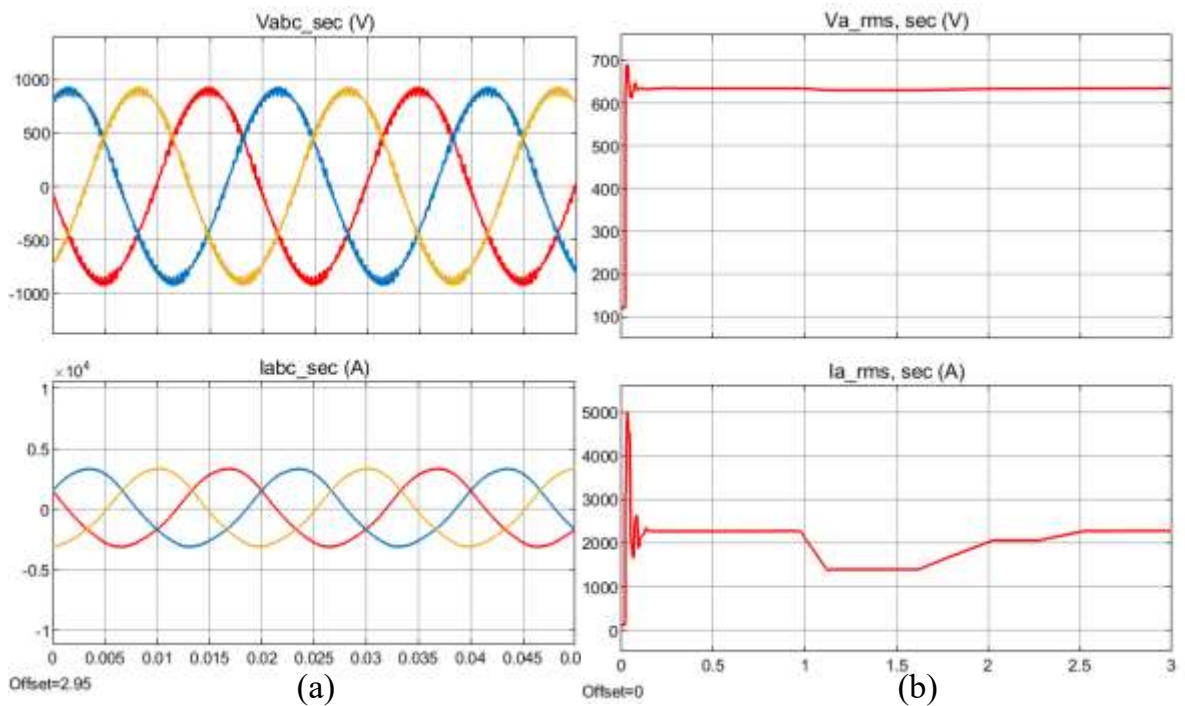
Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hở mạch cho cầu IGBT kiểu T



Hình 4. 8 Kết quả điều khiển điện áp DC-link

- Điện áp và dòng điện thứ cấp máy biến áp

Yêu cầu của điện áp thứ cấp máy biến áp là giá trị danh định phải xấp xỉ 630 V. Ngoài ra dạng sóng của điện áp và dòng điện phải đảm bảo hình sin, có tần số giống với tần số lưới (50 Hz). Có thể trong Hình 4.9, những yêu cầu này đã được đáp ứng.



Hình 4. 9 Đồ thị điện áp và dòng điện thứ cấp máy biến áp (a) và giá trị hiệu dụng tương ứng (b)

4.2. Phân tích, đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến cầu nghịch lưu IGBT

Các van IGBT trong mạch cầu IGBT thường sẽ hư hỏng sớm so với tuổi thọ được thiết kế từ nhà sản xuất. Nguyên nhân chính là do điều kiện hoạt động thực tế không thể tốt so với điều kiện thí nghiệm lý tưởng. Có nhiều yếu tố sâu xa gây nên điều kiện không tốt này và việc tìm hiểu các yếu tố giúp chuẩn bị tốt hơn cho các chiến lược, biện pháp bảo trì bảo vệ cho các IGBT. Phần này của đề tài phân tích một số yếu tố và đánh giá chúng dựa trên hệ thống mô phỏng vừa được trình bày.

4.2.1. Tổng độ méo sóng hài

(a) Tổng quan

Một tín hiệu không chỉ chứa sóng tần số cơ bản mà còn có các thành phần sóng bậc cao hơn (sóng hài bậc cao). Tỷ số phần trăm của các sóng hài bậc cao hơn này trong tổng tín hiệu được gọi là tổng độ méo sóng hài (THD). Giá trị THD cao gây giảm hiệu suất bộ biến đổi, tăng tổn hao chuyển mạch và gây dao động dòng. Điều này làm van bán dẫn nóng nhanh hơn và nếu không được tản nhiệt tốt có thể gây hỏng hóc và giảm tuổi thọ linh kiện. Tiêu chuẩn quốc tế IEEE 519-2022 quy định về ngưỡng THD cho phép đối với một số hệ thống điện được trình bày trong Bảng 4. 5.

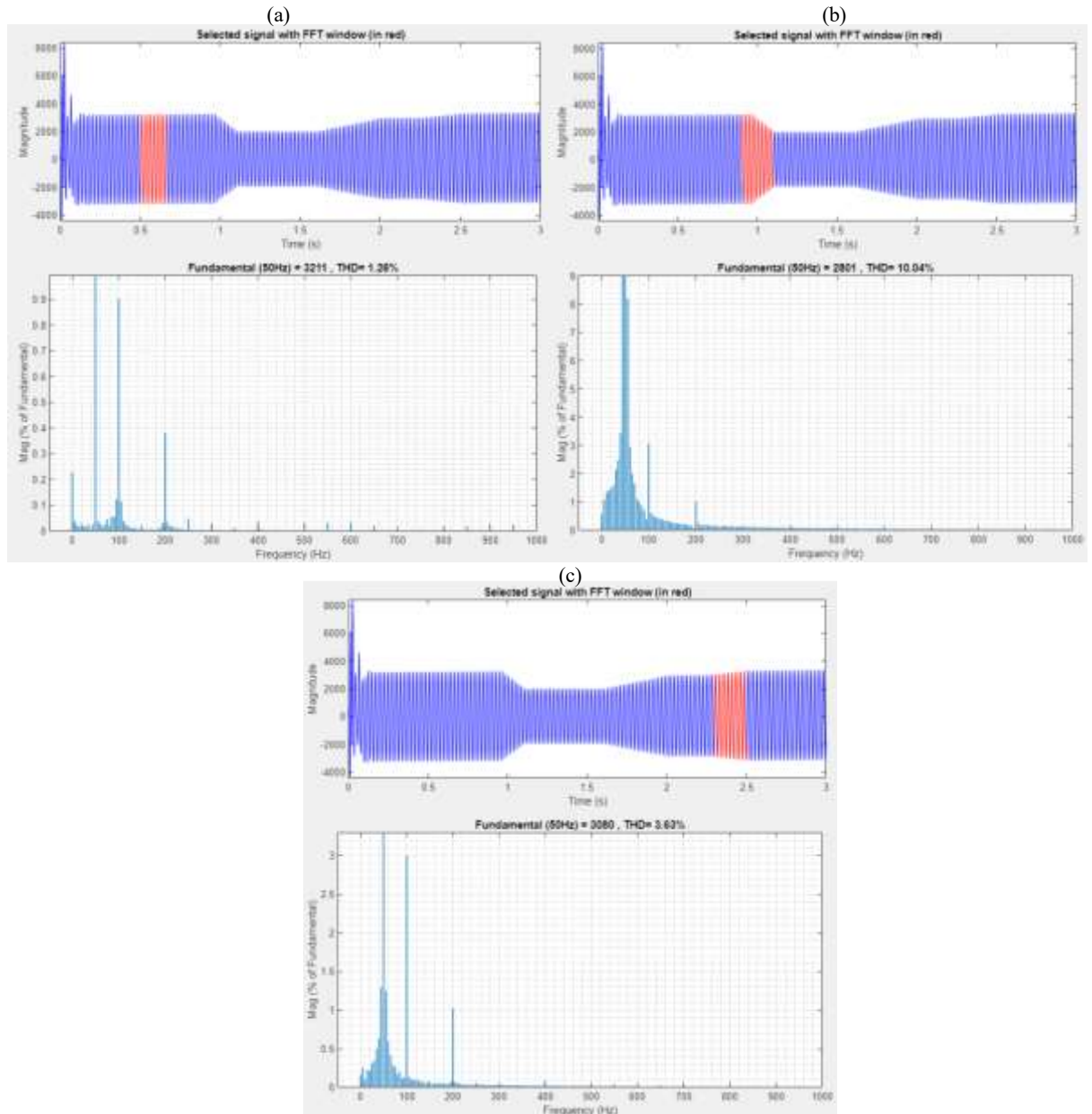
Bảng 4. 5 Tiêu chuẩn IEEE 519-2022 về ngưỡng THD

Điện áp pha	Ngưỡng THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.5

(b) Phân tích

Đối tượng phân tích là dòng điện pha thứ cấp máy biến áp của hệ thống mô phỏng ở mục 4.1. Sử dụng công cụ FFT Analysis của khối powergui, việc phân tích được thực hiện trong 10 chu kỳ dòng điện với 3 trường hợp:

- Dòng điện khi bức xạ đầu vào của hệ thống không biến động (Hình 4. 10 (a)).
- Dòng điện khi bức xạ thay đổi lớn và liên tục (Hình 4.10 (b)).
- Dòng điện khi bức xạ thay đổi nhỏ và liên tục (Hình 4.10 (c)).



Hình 4. 10 Kết quả phân tích FFT trong 3 trường hợp

Có thể nhận thấy rằng trong trường hợp (a), THD chỉ là 1.26% cho thấy chất lượng tín hiệu rất tốt, nhỏ hơn nhiều so với tiêu chuẩn (8%). Trong trường hợp (b), THD lên tới 10.04% (vượt ngưỡng). Còn trong trường hợp (c), THD dưới ngưỡng (3.63%). Từ đây có thể rút ra nhận xét không nên để hệ thống hoạt động trong điều kiện biến động lớn, vì giá trị THD vượt ngưỡng gây hại lớn cho IGBT.

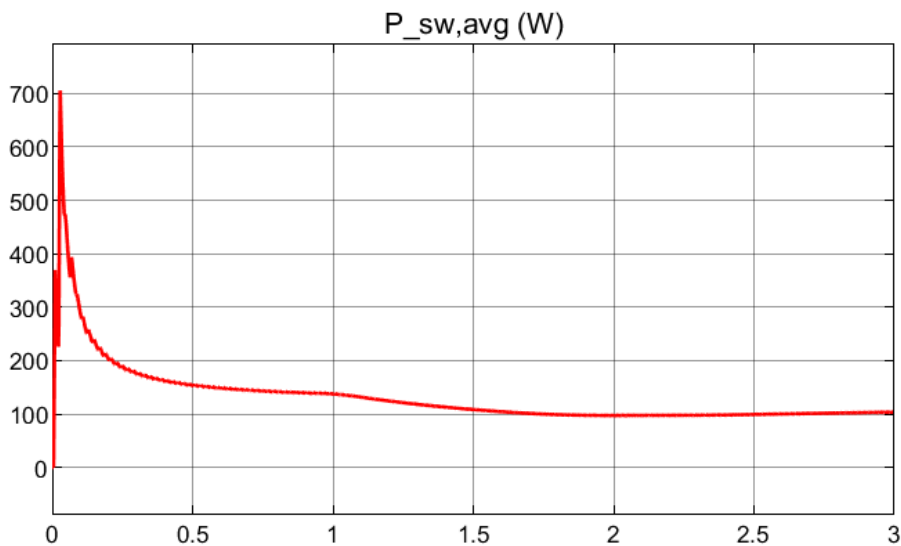
4.2.2. Tổn hao chuyển mạch trung bình của IGBT

Tổn hao chuyển mạch trung bình của IGBT là phần năng lượng mất đi trên một đơn vị thời gian trong quá trình IGBT hoạt động. Phần năng lượng mất đi này gây nên sự gia tăng nhiệt độ IGBT, dẫn đến tăng dòng rò, tăng chu kỳ ứng suất nhiệt.

Điều này lâu dài không chỉ làm giảm tuổi thọ của IGBT mà còn phá vỡ kết cấu mạch hàn, gây lỏng hay nứt gãy chân. Công thức tính tổn hao trung bình là:

$$p_{sw, avg} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{sw} i_{sw} dt \quad (4.1)$$

Trong công thức (4.1), nhận thấy tổn hao $p_{sw, avg}$ phụ thuộc vào điện áp và dòng điện qua van (v_{sw} và i_{sw}). Điện áp và dòng điện biểu hiện như thế nào lại phụ thuộc vào thay đổi của hệ thống và xung chuyển mạch cấp vào van. Như vậy phương pháp điều khiển phát xung có ảnh hưởng lớn đến tổn hao chuyển mạch của IGBT.



Hình 4. 11 Tổn hao chuyển mạch trung bình của 1 IGBT

Hình 4.11 mô tả đồ thị kết quả của tổn hao chuyển mạch trung bình. Có thể thấy giá trị $p_{sw, avg}$ xấp xỉ khoảng 100 W/IGBT. Để đánh giá, giá trị này được so sánh với giá trị thiết kế trong datasheet của IGBT mà inverter PVH-L2550E sử dụng. Nếu cần điều chỉnh, những việc cần làm là thử thay đổi phương pháp kích xung IGBT, hoặc về phía đầu ra có thể tăng hiệu quả tản nhiệt cho IGBT.

4.3. Kết luận

Trong chương này, kết quả mô phỏng điều khiển inverter PVH-L2550E trong hệ thống điện mặt trời nối lưới đã được trình bày, được đánh giá và thông qua. Các yếu tố có ảnh hưởng đến khả năng gây hư hỏng IGBT cũng đã được xem xét và phân tích đến. Ở chương tiếp theo, một thuật toán chẩn đoán lỗi cho mạch cầu IGBT của inverter sẽ được trình bày cùng với kiểm nghiệm thuật toán đó bằng mô phỏng.

Chương 5

ĐỀ XUẤT THUẬT TOÁN CHẨN ĐOÁN LỖI CHO CẦU IGBT CỦA INVERTER PVH-L2550E

5.1. Tổng quan về lỗi van bán dẫn và các phương pháp chẩn đoán lỗi

Lỗi van bán dẫn trong bộ biến đổi gây tổn hại nghiêm trọng đến độ tin cậy của hệ thống, gây hao hụt năng lượng và thậm chí là dừng hệ thống. Van bán dẫn không may lại là thành phần dễ bị hư hỏng nhất trong bộ biến đổi. Với mạch nghịch lưu kiểu T, số lượng van bán dẫn nhiều gấp đôi so với mạch nghịch lưu hai bậc, do vậy nó cũng đối mặt với nguy cơ lỗi lớn hơn.

Lỗi van bán dẫn cơ bản được chia thành hai loại: lỗi hở mạch (van không dẫn), và lỗi ngắn mạch (van bị đánh thủng). Lỗi ngắn mạch thường gây ra hậu quả lớn cho hệ thống như gây dừng hệ thống và ảnh hưởng nghiêm trọng đến các thiết bị khác liên quan. Tuy vậy, các thiết bị bảo vệ của hệ thống đã giúp giải quyết vấn đề lỗi này. Khi lỗi hở mạch xảy ra, hệ thống vẫn có thể hoạt động được. Tuy nhiên nó gây biến dạng đầu ra, gây rung, nhiễu đến các thiết bị lân cận và do vậy làm giảm hiệu suất hoạt động của hệ thống. Do đó, việc xác định các phương pháp lỗi hở mạch cho thiết bị bán dẫn là cần thiết.

Rất nhiều phương pháp chẩn đoán lỗi đã được tiến hành trong nhiều năm gần đây. Có thể phân loại các phương pháp thành ba nhóm chính:

- Phương pháp dựa vào mô hình (model-based): Thu thập các tham số hệ thống và xây dựng lại các mô hình mạch chính xác để ước tính các giá trị còn lại và thực hiện chẩn đoán lỗi.
- Phương pháp dựa vào dữ liệu (data-based): Khai thác thông tin lỗi từ lượng lớn dữ liệu hệ thống bằng các kỹ thuật học máy hoặc học sâu và nhận diện lỗi bằng phân loại.
- Phương pháp dựa vào tín hiệu (signal-based): sử dụng tín hiệu điện áp hoặc dòng điện của hệ thống và thu được thông tin lỗi thông qua phân tích và xử lý các tín hiệu đó.

So với phương pháp dựa vào mô hình – cần thu thập rất nhiều tham số và việc xây dựng mô hình có thể khó khăn, phức tạp – hay phương pháp dựa vào dữ liệu yêu cầu kỹ thuật công nghệ cao và dữ liệu đầu vào chuẩn xác, phương pháp dựa vào tín

hiệu có phần đơn giản và dễ dàng áp dụng. Đề tài này trình bày một phương pháp nhận diện lỗi dựa vào tín hiệu. Cụ thể, phương pháp này xác định van lỗi dựa trên dòng điện chuẩn hóa trung bình của ba pha và điện áp điểm trung tính. Hình thức nhận diện là offline (dừng hệ thống) và nhận diện cho trường hợp một van đơn lẻ bị lỗi vì các trường hợp hai van trở lên bị lỗi cùng lúc là hiếm khi xảy ra.

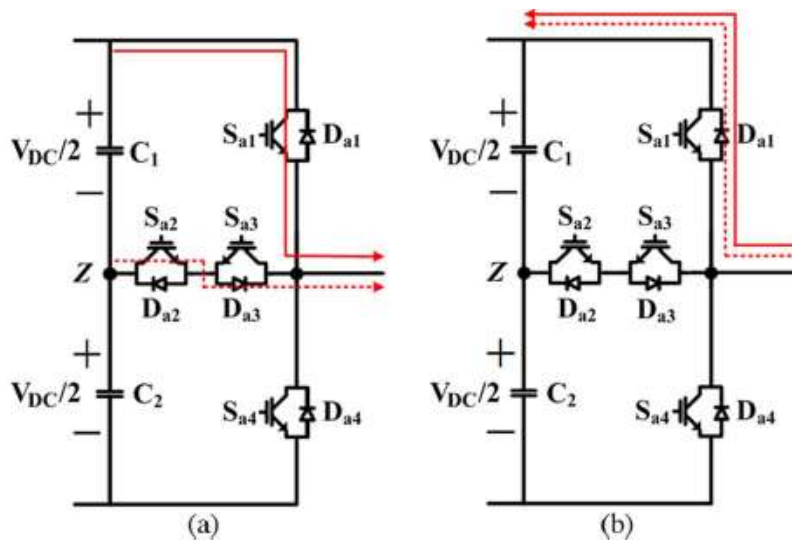
5.2. Phân tích hoạt động của mạch nghịch lưu kiểu T trong điều kiện lỗi

Khi một lỗi hở mạch xảy ra, đường đi của dòng điện sẽ khác so với đường đi trong điều kiện hoạt động bình thường do trạng thái chuyển mạch khác với trạng thái được thiết kế. Điều này gây ra sự biến dạng của dòng điện pha đầu ra, thay đổi điện áp cực đầu ra và thay đổi điện áp điểm trung tính.

5.2.1. Sự thay đổi của dòng điện pha và điện áp cực đầu ra

Hình 5.1 đến Hình 5.4 biểu diễn đường đi của dòng điện trong điều kiện bình thường và điều kiện lỗi lần lượt tương ứng với đường mũi tên màu đỏ nét liền và đường mũi tên màu đỏ nét đứt. Các trường hợp lỗi được thể hiện đại diện là pha A.

(a) Trường hợp S_{a1} lỗi



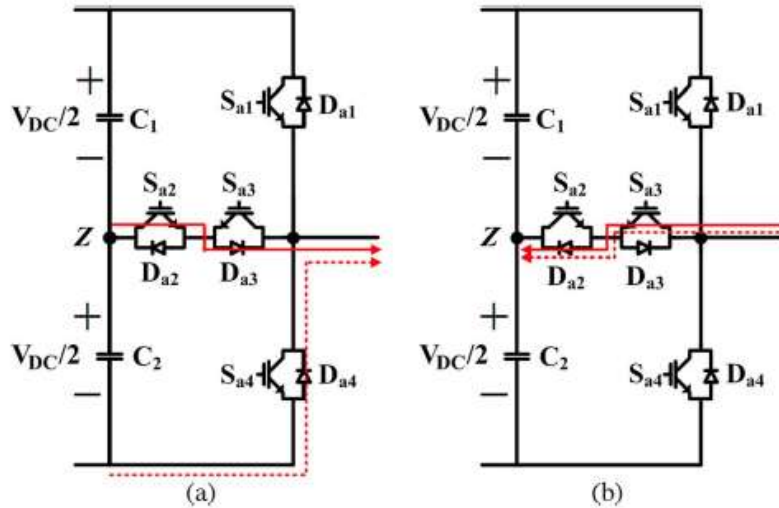
Hình 5. 1 Đường đi của dòng điện trong trường hợp van S_{a1} bị lỗi.

(a) Dòng điện có chiều dương. (b) Dòng điện có chiều âm

Trong trường hợp S_{a1} bị lỗi, nếu trạng thái chuyển mạch của pha A đang là trạng thái P và dòng pha có chiều dương, thay vì dòng điện đi qua S_{a1} và điện áp pha đầu ra là $+V_{DC}/2$, dòng điện lúc này đi qua van S_{a2} và diode D_{a3} , pha đầu ra được nối với điểm trung tính Z hay điện áp cực bằng 0 (Hình 5.1 (a)). Trong trường hợp dòng

pha có chiều âm và trạng thái chuyển mạch vẫn là P, đường đi của dòng điện không có sự thay đổi trong điều kiện lỗi so với điều kiện thường (Hình 5.1 (b)).

(b) Trường hợp S_{a2} lỗi



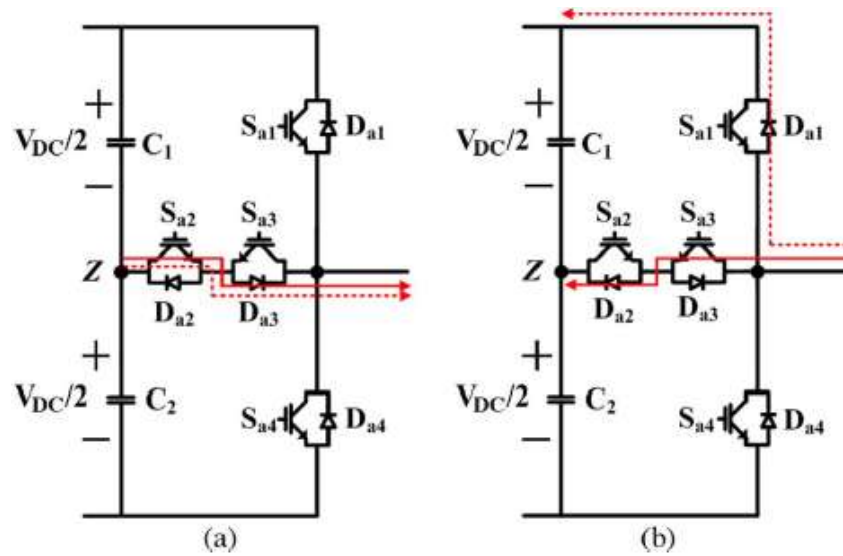
Hình 5. 2 Đường đi của dòng điện trong trường hợp van S_{a2} bị lỗi.

(a) Dòng điện có chiều dương. (b) Dòng điện có chiều âm

Trong trường hợp van S_{a2} bị lỗi, nếu trạng thái chuyển mạch đang là O và dòng có chiều dương, dòng điện đi qua diode D_{a4} thay vì đi qua van S_{a2} và diode D_{a3} . Điện áp cực đầu ra lúc này là $-V_{DC}/2$ vì pha đầu ra được nối với cực âm. Nếu dòng điện có chiều âm, không có sự thay đổi nào xảy ra (Hình 5.2).

(c) Trường hợp S_{a3} lỗi

Nhìn vào Hình 4.3 (a), có thể thấy khi trạng thái chuyển mạch là O và chiều dòng điện là dương, đường đi của dòng điện dù lỗi hay không lỗi không có sự khác biệt. Còn khi dòng điện có chiều âm, thay vì đi qua van S_{a3} và diode D_{a2} , dòng điện đi qua diode D_{a1} và nối pha đầu ra với cực dương khi có lỗi (Hình 4.3 (b)).

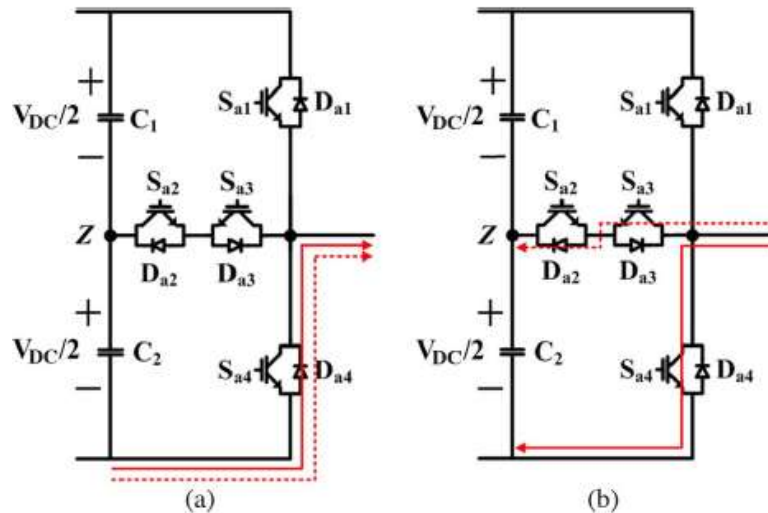


Hình 5. 3 Đường đi của dòng điện trong trường hợp van S_{a3} bị lỗi.

(a) Dòng điện có chiều dương. (b) Dòng điện có chiều âm

(d) Trường hợp S_{a4} lỗi

Khi trạng thái chuyển mạch là N và chiều dòng điện là dương, lỗi van S_{a4} không ảnh hưởng gì đến đường đi của dòng điện (Hình 4.4 (a)). Còn khi chiều dòng điện âm, đường đi của dòng điện lại đi qua van S_{a3} và diode D_{a2} thay vì đi qua diode D_{a4} như thường lệ, điện áp cực không còn là $-V_{DC}/2$ nữa vì lúc này pha đầu ra được nối với điểm trung tính (Hình 4.4 (b)).



Hình 5. 4 Đường đi của dòng điện trong trường hợp van S_{a4} bị lỗi.

(a) Dòng điện có chiều dương. (b) Dòng điện có chiều âm

Qua bốn trường hợp, có thể nhận thấy rằng nếu lỗi xảy ra ở van S_{a1} hoặc S_{a2} , dòng điện dương bị ảnh hưởng, còn với van S_{a3} hay S_{a4} thì ngược lại. Việc thay đổi đường đi của dòng điện gây nên sự thay đổi không mong muốn của điện áp cực đầu ra và dòng điện pha cũng bị biến dạng.

5.2.2. Sự thay đổi của điện áp điểm trung tính

Phân tích về sự thay đổi điện áp trung tính được trình bày trong bối cảnh mạch nghịch lưu hoạt động ở chế độ bình thường và pha lỗi đại diện là pha A.

Nếu lỗi xảy ra ở van S_{a1} , trạng thái chuyển mạch P không thể thực hiện được. Do vậy, tất cả các vector chuyển mạch 3 pha của mạch nghịch lưu có chứa trạng thái P ở pha A đều không khả thi. Pha ra được nối với điểm trung tính Z, suy ra trạng thái P được thay thế bằng trạng thái O. Lúc này tất cả các vector chuyển mạch bị ảnh hưởng sẽ thay thế trạng thái P thành trạng thái O. Ví dụ vector PON sẽ được chuyển thành vector OON. Dòng đi ra từ điểm trung tính sẽ lớn hơn dòng đi vào điểm trung tính, đồng nghĩa rằng điện áp tụ trên V_{DC1} lớn hơn điện áp tụ dưới V_{DC2} , điện áp điểm trung tính lúc này bị lệch về phía âm. Trường hợp tương tự xảy ra một cách đối lập là khi van S_{a4} bị lỗi, trạng thái N không khả thi và được thay thế bằng trạng thái O. Do vậy điện áp điểm trung tính lệch về phía dương hay $V_{DC1} < V_{DC2}$.

Việc phân tích khi van S_{a2} hay S_{a3} bị lỗi cũng tương tự. Trạng thái O lúc này không khả thi và khi van S_{a2} lỗi, nó được thay thế bằng trạng thái N. Dòng đi ra từ điểm trung tính nhỏ hơn khi không lỗi và như vậy, $V_{DC1} < V_{DC2}$. Còn khi S_{a3} lỗi, trạng thái thay thế là P, dòng đi vào điểm trung tính là nhỏ hơn do đó $V_{DC1} > V_{DC2}$.

5.3. Phương pháp nhận diện lỗi

Trong điều kiện hoạt động thông thường, giá trị trung bình của dòng điện ba pha sẽ gần với 0. Tuy nhiên trong điều kiện lỗi, giá trị này sẽ bị lệch đi. Như đã phân tích, lỗi ở van S_{a1} hoặc S_{a2} gây biến dạng đến dòng dương của pha lỗi, do đó giá trị trung bình của dòng pha này là một giá trị âm. Ngược lại, lỗi van S_{a3} hay S_{a4} làm cho giá trị trung bình của dòng pha A là dương. Mặt khác, lỗi ở pha nào không chỉ ảnh hưởng pha đó mà còn ảnh hưởng đến hai pha còn lại, suy ra, giá trị trung bình dòng của hai pha đó cũng sẽ khác đi. Tuy nhiên, sự thay đổi của các pha này không lớn bằng so với pha bị lỗi. Lợi dụng điều này, pha lỗi có thể được xác định vì giá trị trung bình của dòng pha lỗi sẽ lệch hẳn so với 0 hoặc giá trị của hai pha còn lại. Tuy

vậy, việc sử dụng trực tiếp các giá trị dòng trung bình có thể gây nên chẩn đoán sai lệch bởi các sóng hài dòng điện hay sự dao động nhanh. Để giải quyết điều này, các dòng điện pha sẽ được chuẩn hóa. Đầu tiên biểu diễn các dòng điện ba pha trong hệ tọa độ dq:

$$\begin{cases} i_d = \sqrt{\frac{2}{3}}i_a - \sqrt{\frac{1}{6}}i_b - \sqrt{\frac{1}{6}}i_c \\ i_q = \sqrt{\frac{1}{2}}i_b - \sqrt{\frac{1}{2}}i_c \end{cases} \quad (5.1)$$

Giá trị đỉnh của dòng điện sẽ là:

$$I_m = \sqrt{\frac{2}{3}(i_d^2 + i_q^2)} \quad (5.2)$$

Lúc này, giá trị dòng chuẩn hóa từng pha bằng:

$$i_{x_norm} = \frac{i_x}{I_m} \quad (5.3)$$

Với $x = a, b, c$. Như vậy, trung bình của các giá trị này là:

$$i_{x_norm, avg} = \frac{\sum_{i=1}^L i_{x_norm}(i)}{L} \quad (5.4)$$

Với L là độ dài của một khung cửa sổ lấy mẫu cho các giá trị i_x , L thường được lấy bằng:

$$L = \frac{f}{f_s} \quad (5.5)$$

Trong đó f là tần số lấy mẫu của phương pháp, f_s là tần số của dòng điện.

Pha lỗi có thể được phát hiện dựa vào điều kiện:

$$\max(i_{a_0}, i_{b_0}, i_{c_0}) \quad (5.6)$$

Với $i_{a_0} = |i_{a_norm, avg} - 0|$, $i_{b_0} = |i_{b_norm, avg} - 0|$, $i_{c_0} = |i_{c_norm, avg} - 0|$, kết quả i_{x_0} sẽ suy ra pha lỗi tương ứng là x . Các giá trị trung gian dùng cho chẩn đoán là μ_x và V_d được tính dựa vào các điều kiện:

Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hỏng mạch cho cầu IGBT kiểu T

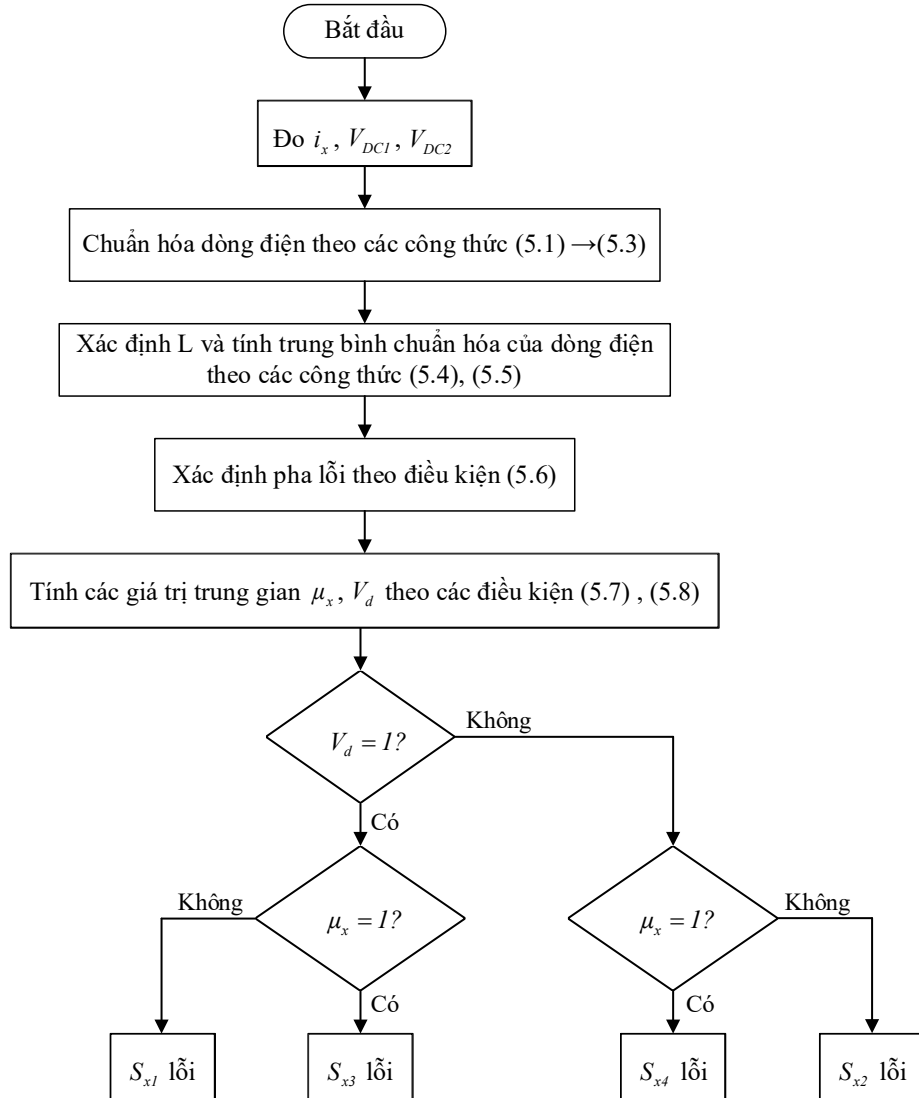
$$\begin{cases} i_{x_norm, avg} > I_{thr} & : \mu_x = 1 \\ i_{x_norm, avg} < -I_{thr} & : \mu_x = -1 \\ -I_{thr} < i_{x_norm, avg} < I_{thr} & : \mu_x = 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

$$\begin{cases} V_{DC1} - V_{DC2} > V_{thr} & : V_d = 1 \\ V_{DC1} - V_{DC2} < -V_{thr} & : V_d = -1 \\ -V_{thr} < V_{DC1} - V_{DC2} < V_{thr} & : V_d = 0 \end{cases} \quad (5.8)$$

Với các giá trị ngưỡng phát hiện lỗi cho dòng điện (I_{thr}) và điện áp (V_{thr}) được thiết đặt từ trước. Phương pháp được trực quan bằng Bảng 5.1 và lưu đồ thuật toán như Hình 5.5.

Bảng 5. 1 Tổng hợp chẩn đoán lỗi

Pha lỗi	Giá trị μ_x tương ứng	Giá trị V_d	Van lỗi
A	-1	1	S_{a1}
	-1	-1	S_{a2}
	1	1	S_{a3}
	1	-1	S_{a4}
B	-1	1	S_{b1}
	-1	-1	S_{b2}
	1	1	S_{b3}
	1	-1	S_{b4}
C	-1	1	S_{c1}
	-1	-1	S_{c2}
	1	1	S_{c3}
	1	-1	S_{c4}



Hình 5. 5 Lưu đồ thuật toán cho phương pháp chẩn đoán lỗi

5.4. Mô phỏng kiểm chứng phương pháp

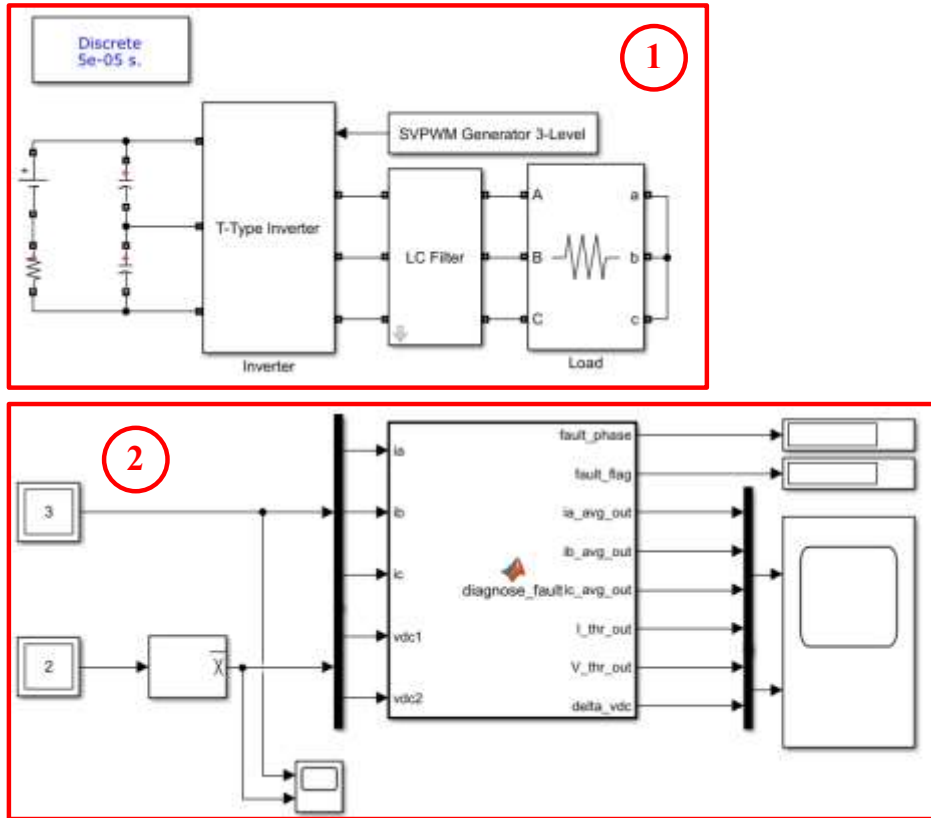
5.4.1. Bối cảnh

Mô phỏng được thực hiện trong bối cảnh lỗi hở mạch xảy ra ở một IGBT của một đơn vị mạch nghịch lưu trong inverter PVH-L2550E. Lúc này inverter dừng hoạt động, đơn vị bị lỗi được đưa ra khỏi inverter và thực hiện chẩn đoán riêng. Hình 5.6 trình bày cấu trúc mô phỏng chẩn đoán lỗi theo phương pháp đã được trình bày bằng phần mềm MATLAB/Simulink. Mô phỏng được chia thành hai phần:

- *Phần 1 – Mô phỏng mạch công suất:* Đơn vị mạch nghịch lưu bị lỗi được tách chạy riêng. Mạch có thêm bộ lọc LC để làm mượt tín hiệu ra.
- *Phần 2 – Thuật toán điều khiển:* Thuật toán đo dòng điện ba pha và điện áp của 2 tụ DC-link và được lập trình trong khối Matlab Function. Điện áp hai tụ được

Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hở mạch cho cầu IGBT kiểu T

lấy trung bình. Kết quả xuất ra pha lỗi, van lỗi và các giá trị trung gian để nhận xét kết quả trực quan hơn.



Hình 5. 6 Sơ đồ mô phỏng chẩn đoán lỗi hở mạch IGBT mạch nghịch lưu

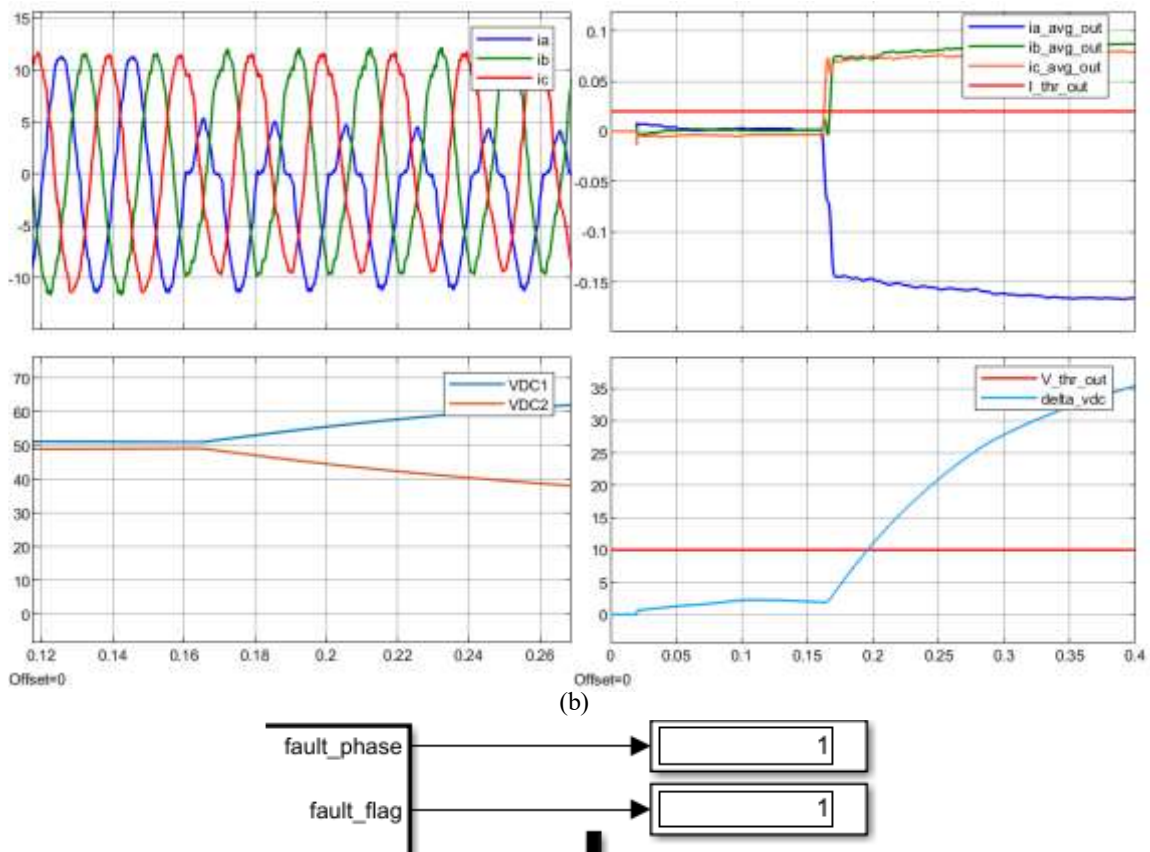
Bảng 5.2 trình bày các thông số được sử dụng trong mô phỏng.

Mạch công suất:	
Điện áp nguồn DC	100 V
Điện dung của 2 tụ DC-link	4700 μ F
Điện cảm của bộ lọc	2 mH
Điện dung của bộ lọc	20 μ F
Điện trở tải ba pha	5 Ω
Thuật toán điều khiển:	
Tần số lấy mẫu	5000 Hz
Tần số lưới	50 Hz
Ngưỡng lỗi dòng điện	0.02
Ngưỡng lỗi điện áp	10
Kí hiệu pha	A=1; B=2; C=3

5.4.2. Kết quả mô phỏng

(a) Trường hợp S_{x1} bị lỗi

Lỗi hở mạch cho IGBT được giả định bằng cách ngắt xung điều khiển cho IGBT tương ứng sau 0.15s. Giả sử van lỗi là S_{a1} , kết quả thu được như trong Hình 5.7. Có thể thấy dòng điện pha A bị biến dạng mạnh ở phần dương dẫn đến giá trị trung bình chuẩn hóa của dòng pha A bị lệch về phía âm. Điều này kéo theo các dòng trung bình chuẩn hóa của hai pha còn lại lệch một chút về phía dương để cân bằng lại. Điện áp $V_{DC1} > V_{DC2}$. Sau khoảng 0.05s từ khi lỗi xảy ra, các giá trị trung gian đã vượt ngưỡng, và kết quả chẩn đoán là chính xác như Hình 5.7.



Hình 5. 7 Kết quả mô phỏng van S_{a1} bị lỗi

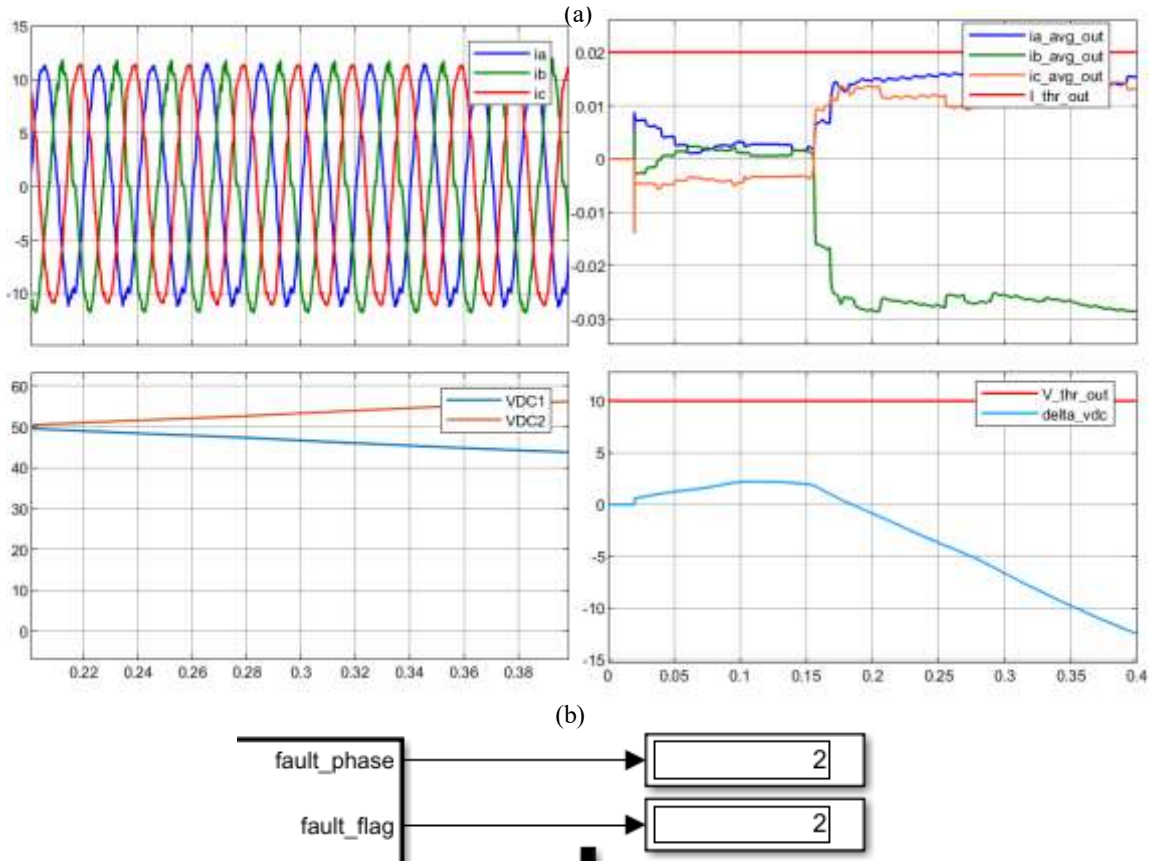
(a) Đồ thị các tín hiệu (b) Kết quả chẩn đoán

(b) Trường hợp van S_{x2} bị lỗi

Giả định van lỗi trong trường hợp này là S_{b2} . Kết quả đồ thị trong Hình 5.8 (a) có thể thấy rằng lỗi van S_{x2} không ảnh hưởng quá nhiều đến dòng điện, dòng pha B không có sự biến dạng nào lớn. Tuy nhiên giá trị trung bình chuẩn hóa của pha B

Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hờ mạch cho cầu IGBT kiểu T

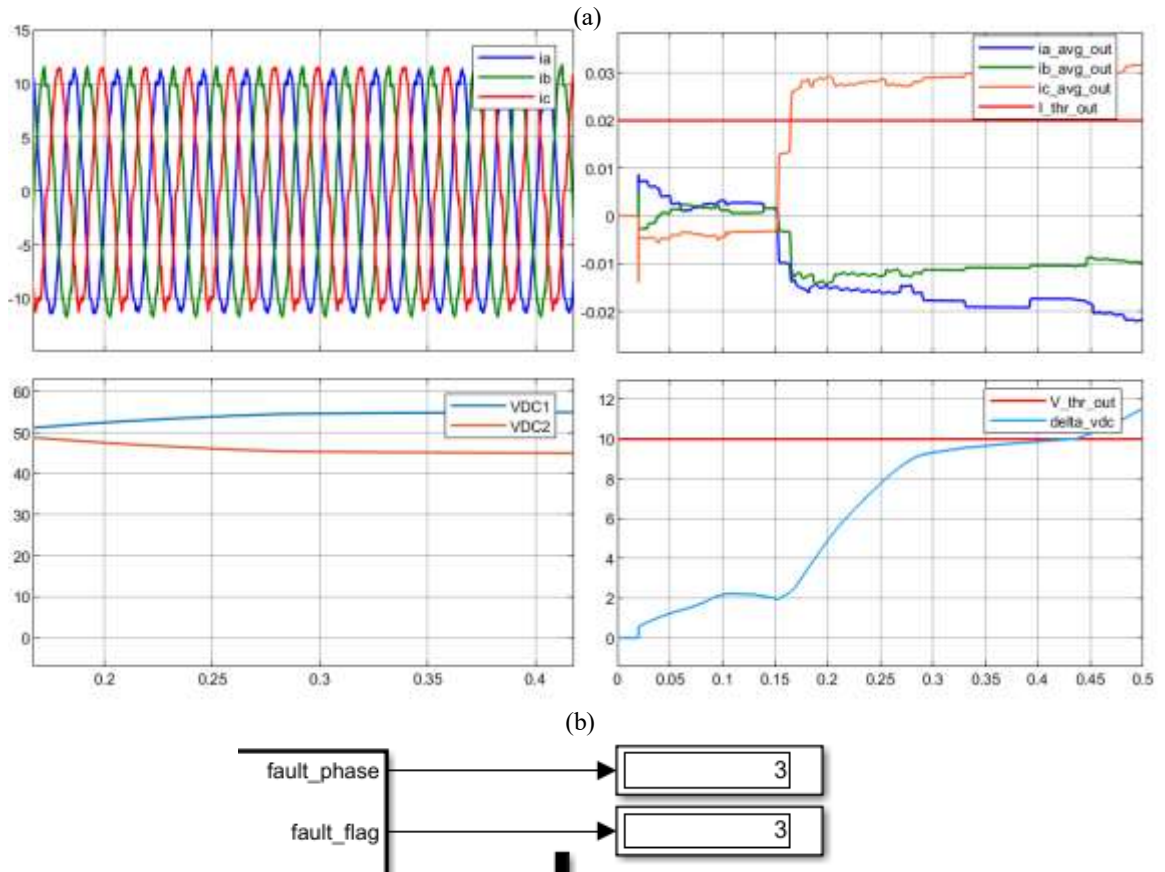
vẫn bị lệch rõ về phía âm. Điện áp $V_{DC1} < V_{DC2}$ và sự chênh lệch điện áp tăng tiến không quá nhanh dẫn đến giá trị trung gian V_d vượt ngưỡng khá muộn (sau 0.2s kể từ khi lỗi). Kết quả chẩn đoán trong Hình 5.8 (b) vẫn chính xác.



Hình 5. 8 Kết quả mô phỏng van S_{b2} bị lỗi
(a) Đồ thị các tín hiệu (b) Kết quả chẩn đoán

(c) Trường hợp van S_{x3} lỗi

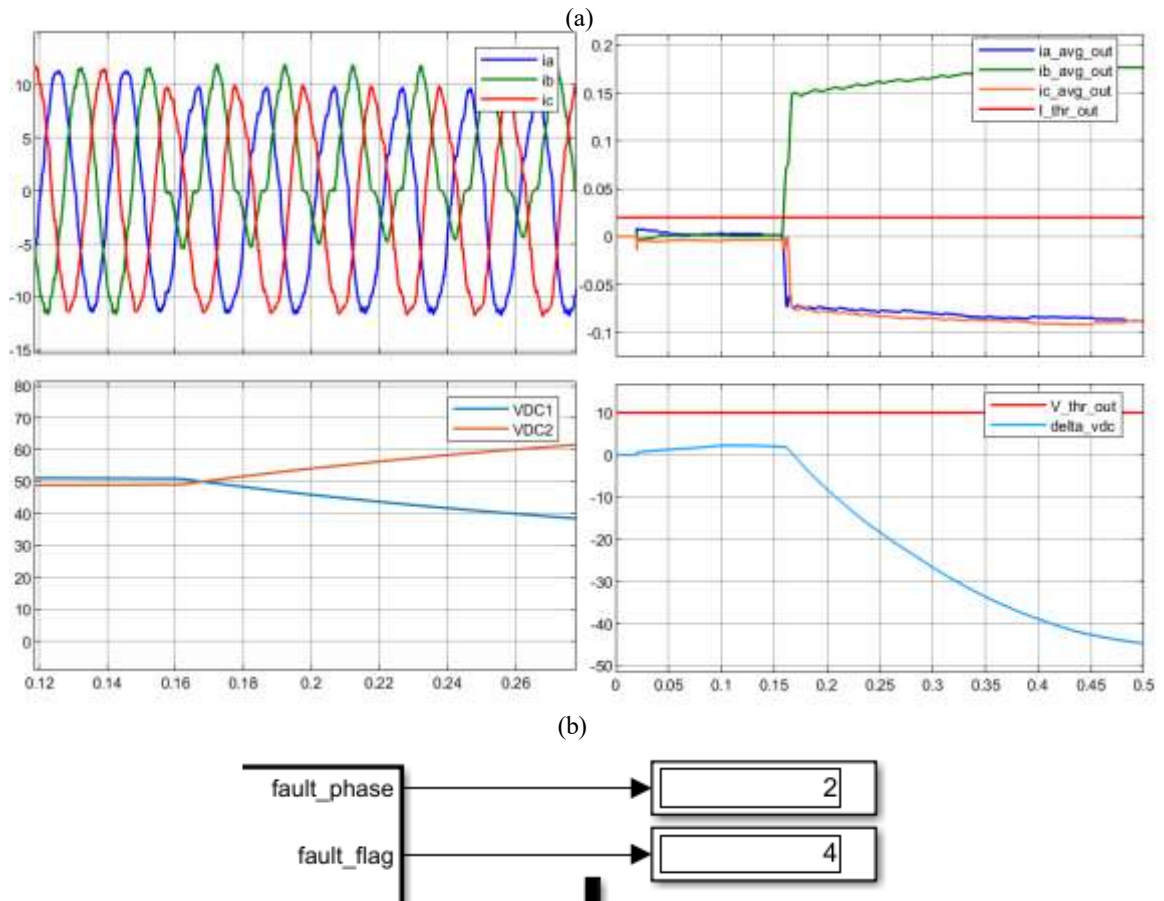
Lỗi van số 3 được giả định là S_{c3} , có thể thấy kết quả trong Hình 5.9 có nhiều điểm tương đồng với trường hợp van S_{x2} bị lỗi: Dòng điện pha C không có nhiều sự biến dạng, điện áp $V_{DC1} > V_{DC2}$ và chênh lệch cũng không tăng nhanh, vẫn cần một khoảng thời gian lâu hơn (0.25s) để chẩn đoán ra lỗi chính xác. Điều này cũng phần nào phản ánh đúng lý thuyết của mạch nghịch lưu kiểu T khi 2 van S_{x2} và S_{x3} không chịu toàn bộ điện áp DC-link như hai van còn lại.



Hình 5. 9 Kết quả mô phỏng van S_{c3} bị lỗi
(a) Đồ thị các tín hiệu (b) Kết quả chẩn đoán

(d) Trường hợp van S_{x4} lỗi

Giả định lỗi nằm ở van S_{b4} . Sự biến dạng dòng điện lại một lần nữa được thể hiện rõ giống như van S_{x1} . Hình 5.10 (a) cho thấy rõ rằng dòng điện pha B bị biến dạng mạnh ở nửa âm, tạo nên sự lệch lớn của giá trị trung bình chuẩn hóa của dòng pha B về phía dương. Điện áp $V_{DC1} < V_{DC2}$ và sự chênh lệch cũng tăng tiến nhanh. Sau 0.05s kể từ khi lỗi, chẩn đoán đưa ra là chính xác (Hình 5.10 (b)).



Hình 5. 10 Kết quả mô phỏng van S_{b4} bị lỗi
(a) Đồ thị các tín hiệu (b) Kết quả chẩn đoán

Tổng hợp bốn kết quả trên cho thấy, kết quả mô phỏng cho ra chính xác và đúng với lý thuyết, thời gian chẩn đoán đưa ra cũng không quá chậm. Như vậy, thuật toán đã được chứng minh tính đúng đắn của mình.

5.5. Kết luận

Chương này đã đề xuất một thuật toán chẩn đoán lỗi hở mạch một van cho mạch nghịch lưu của inverter PVH-L2550E. Mô phỏng đã được thực hiện cho ra kết quả chẩn đoán chính xác và tương đối nhanh. Các đặc tính lý thuyết cũng đã được xác minh tính đúng đắn. Chương tiếp theo sẽ xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi dựa trên thuật toán này, cho thấy tính thực tiễn và ứng dụng của đề tài.

Chương 6

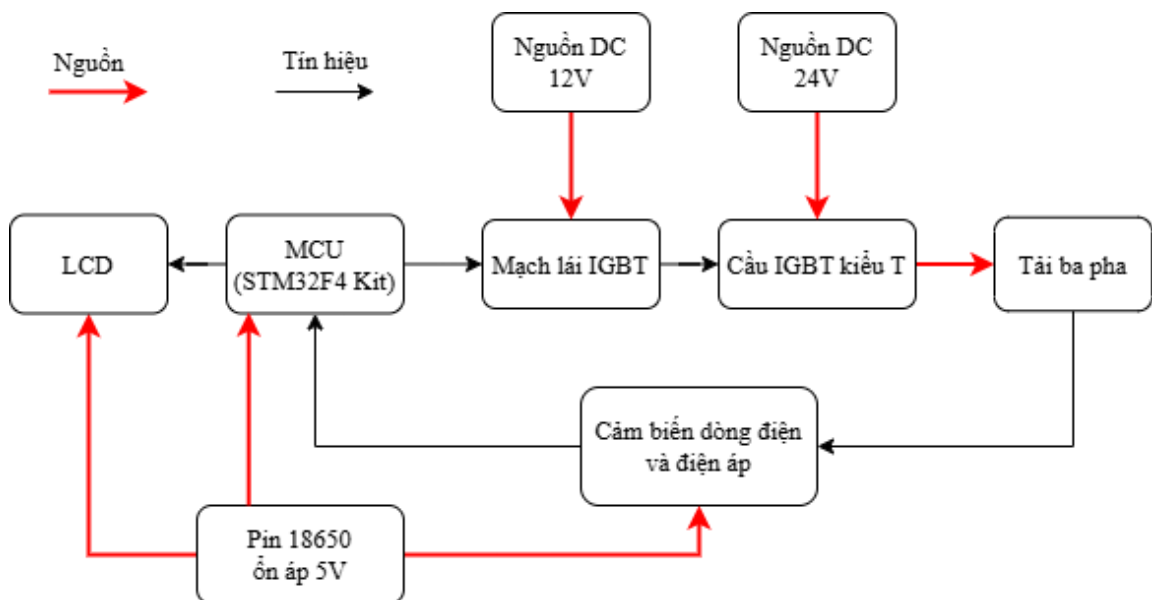
XÂY DỰNG MÔ HÌNH CHẨN ĐOÁN LỖI VÀ THỰC NGHIỆM KẾT QUẢ

6.1. Xây dựng phần cứng mô hình chẩn đoán lỗi

6.1.1. Sơ đồ tổng quan phần cứng

Mô hình gồm các phần:

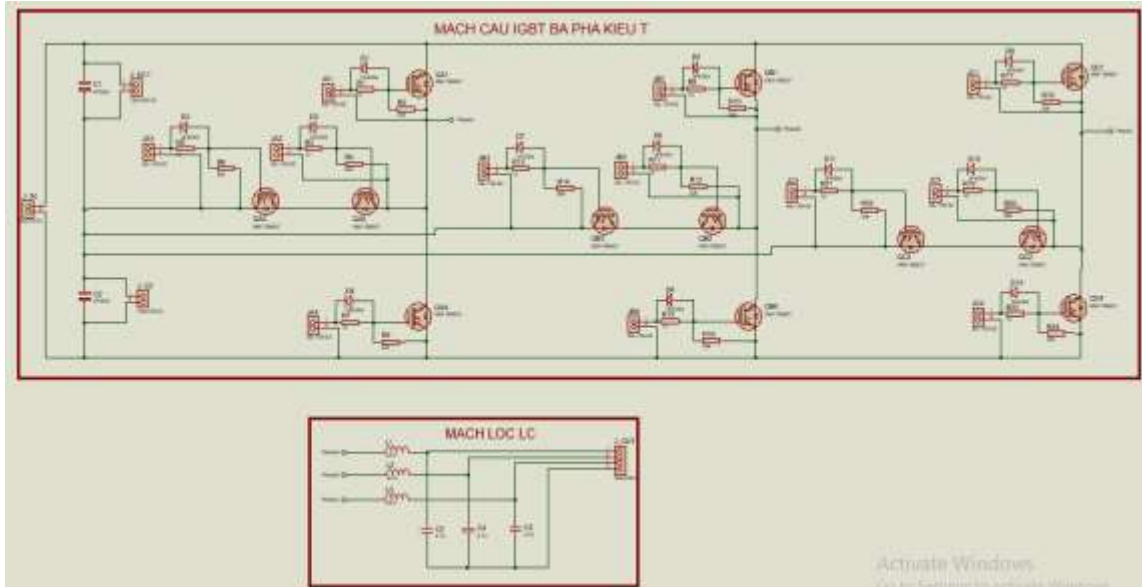
- MCU: khối đóng vai trò trung tâm, nhiệm vụ phát xung PWM cho mạch lái, đọc tín hiệu từ cảm biến và tính toán.
- Mạch lái IGBT: nhận xung PWM từ MCU và biến đổi sang mức điện áp thích hợp để kích đóng mở các IGBT.
- Mạch công suất (cầu IGBT ba pha kiểu T kèm mạch lọc sóng sin): nhận tín hiệu đóng mở IGBT, biến đổi nguồn điện DC thành nguồn AC ba pha.
- Cảm biến: đọc tín hiệu dòng điện ba pha và điện áp DC.
- LCD: hiển thị trạng thái cầu IGBT.
- Các khối nguồn và pin: cung cấp nguồn cho mô hình hoạt động.



Hình 6. 1 Sơ đồ tổng quan phần cứng mô hình chẩn đoán lỗi

6.1.2. Thiết kế mạch nguyên lý

(a) Mạch cầu IGBT ba pha kiểu T



Hình 6. 2 Sơ đồ nguyên lý mạch cầu IGBT kiểu T

Trong mô hình này, nguồn DC được sử dụng để nghịch lưu có giá trị 24V. Với phạm vi đề tài là xây dựng mô hình, không yêu cầu dòng tải quá lớn (dưới 5A), vì vậy IGBT được chọn là loại IGBT kích thước nhỏ có dòng điện tối đa và điện áp chịu đựng trung bình, có mã là XNF15N60T, thông số IGBT được trình bày trong Phụ lục 1. Mạch lọc LC được tính toán như sau:

- Tần số cắt (f_c) được chọn trong khoảng từ tần số cơ bản (f) đến tần số chuyển mạch (f_{sw}), thường là 1/5 đến 1/10 f_{sw} . Mô hình được thiết kế với tần số chuyển mạch 10 kHz, do vậy chọn tần số cắt $f_c = 1500$ Hz.
- Ta có công thức:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6.1)$$

Chọn cuộn cảm có giá trị 2.3 mH, từ đó tính được giá trị tụ lọc:

$$f_c C = \frac{1}{(2\pi f_c)^2 L} = \frac{1}{(2\pi \times 1500)^2 \cdot 2.3 \times 10^{-3}} = 4.89 \text{ } (\mu F) \quad (6.2)$$

Vậy chọn tụ CBB22 giá trị 4.7 μF .

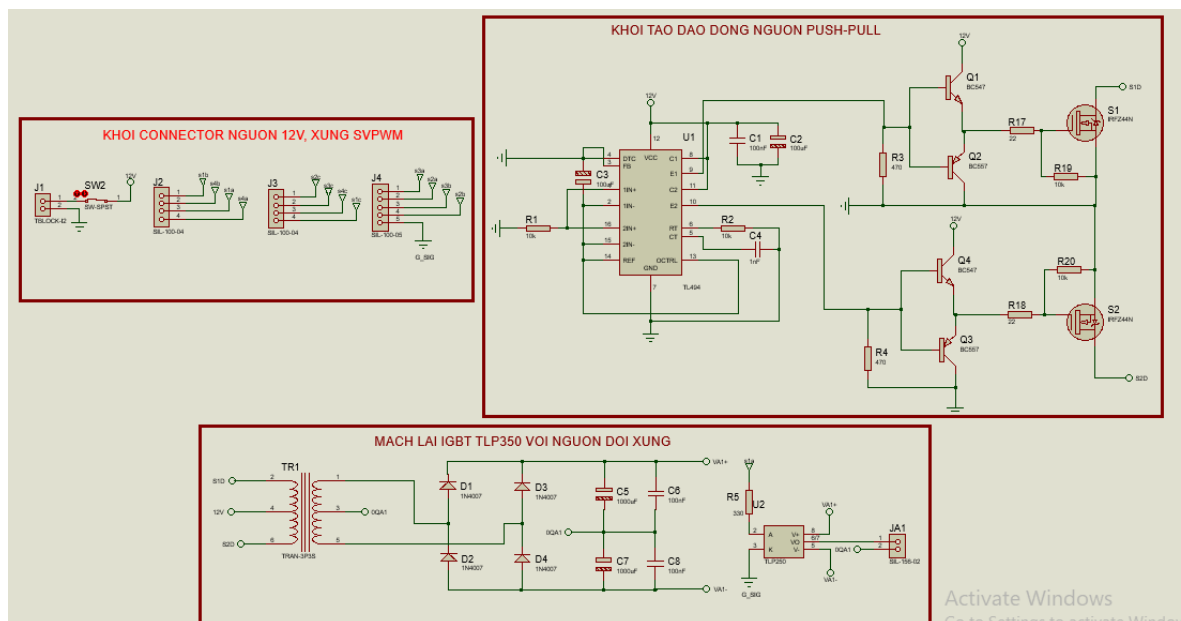
(b) Mạch lái IGBT

Vì xung PWM do MCU phát ra có điện áp rất thấp (3.3V) và dòng điện rất nhỏ, không đủ công suất để kích đóng cắt IGBT, do đó cần có một mạch lái để biến đổi tín hiệu PWM từ MCU ra dạng xung đóng cắt có điện áp đạt yêu cầu V_{GE} để đóng cắt các van IGBT.

Các yêu cầu thiết kế:

- *Chọn mức điện áp đóng cắt:* Từ đồ thị đặc tính của IGBT XNF15N60T trong Phụ lục B có thể thấy, với ứng dụng có dòng điện bé hơn 5A, ta có thể sử dụng điện áp 12V để kích IGBT dẫn hoàn toàn. Để đảm bảo ngắt hoàn toàn IGBT, chọn điện áp ngắt là -12 V.
- *Chọn cấu hình mạch lái:* Mỗi nhánh cầu IGBT trong ba pha đều có các van phía cao ở trạng thái nổi, để điều khiển đóng cắt được các van này, yêu cầu phải có một nguồn cung cấp nổi để luôn cung cấp được mức điện áp V_{GE} cần thiết. Với 12 van, ta cần tổng cộng 12 nguồn cách ly nhau hoàn toàn.
- *Cách ly giữa vi điều khiển và mạch lái:* Để tránh trường hợp sự cố ở mạch điện áp cao xông ngược về làm hỏng vi điều khiển.

Từ các yêu cầu trên, nhóm đã thiết kế nguyên lý mạch lái như hình dưới:



Hình 6. 3 Sơ đồ nguyên lý mạch lái kích xung IGBT

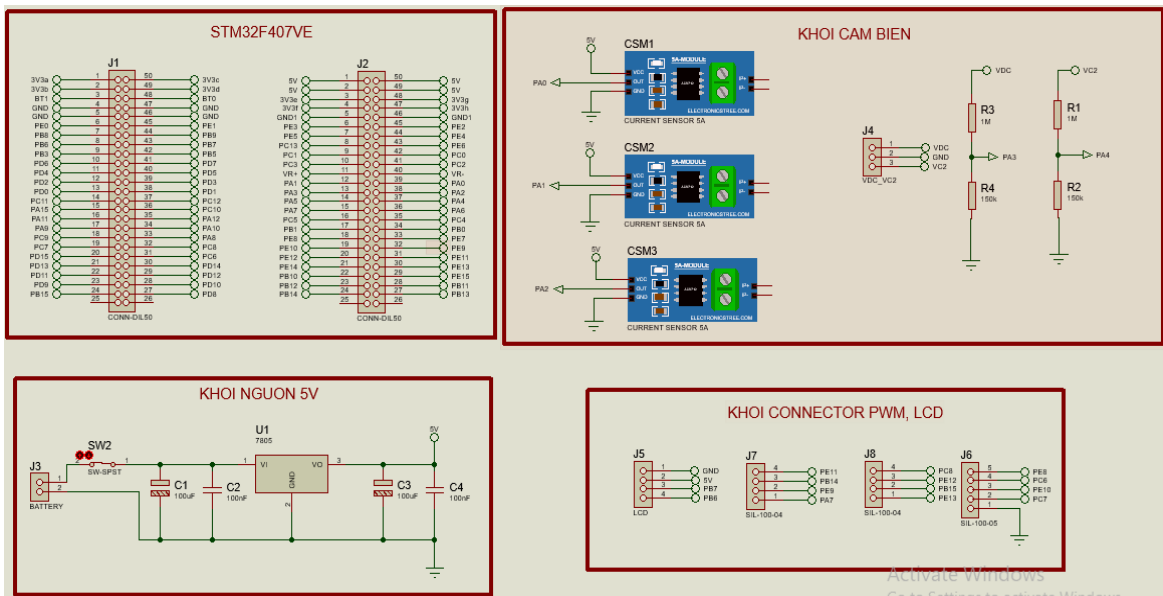
Mạch gồm các khối:

- Khối connector: cấp nguồn DC 12V đầu vào, cấp các xung PWM từ MCU vào mạch.

Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hệ mạch cho cầu IGBT kiểu T

- Khối nguồn xung: chọn kiến trúc nguồn đẩy-kéo, sử dụng IC TL494 tạo ra 2 xung PWM đối xứng với tần số rất cao (50 kHz), kết hợp với biến áp xung tạo ra nguồn xoay chiều. Ở phía thứ cấp sau khi chỉnh lưu ta được nguồn đối xứng $\pm 12\text{ V}$. Với 12 biến áp xung ta có tất cả 12 nguồn đối xứng độc lập với nhau, thỏa mãn yêu cầu 1 và 2. Cách tính toán số vòng dây sơ cấp và thứ cấp của biến áp xung được trình bày trong Phụ lục 2.
- Khối IC lái: sử dụng optocoupler TLP350, với đầu vào xung mức thấp – cao là 0 – 3.3V, đầu ra nhận được sẽ là -12V – +12V và cách ly hoàn toàn với vi điều khiển, thỏa mãn yêu cầu 3.

(c) Mạch phát xung, đo lường và hiển thị.



Hình 6. 4 Sơ đồ nguyên lý mạch phát xung, đo lường và hiển thị

Mạch sử dụng module STM32F407VET6 Black Board làm vi điều khiển chính. Module được cấp nguồn từ 2 viên pin 18650, qua mạch ổn áp tuyến tính 5V L7805. STM32F4 có sẵn 2 timer nâng cao hỗ trợ 6 kênh PWM và 6 kênh PWM bổ sung có thời gian chết, phù hợp với yêu cầu điều khiển 12 van đối nghịch.

Khối cảm biến bao gồm 2 loại là cảm biến dòng điện ACS712-5A và mạch chia điện áp dùng để đo điện áp trên tụ DC-link:

- Cảm biến ACS712-5A được cấp nguồn 5V, có offset là 2.5V tương ứng với dòng điện 0 A, độ nhạy là 0.185 V/A. Điện áp tối đa mà bộ ADC của STM32F4 đọc được là 3.3V, từ đây ta giới hạn giá trị dòng điện tải tối đa:

$$I_{max} = \frac{3.3 - 2.5}{0.185} = 4.3 \text{ (A)} \quad (6.3)$$

Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hở mạch cho cầu IGBT kiểu T

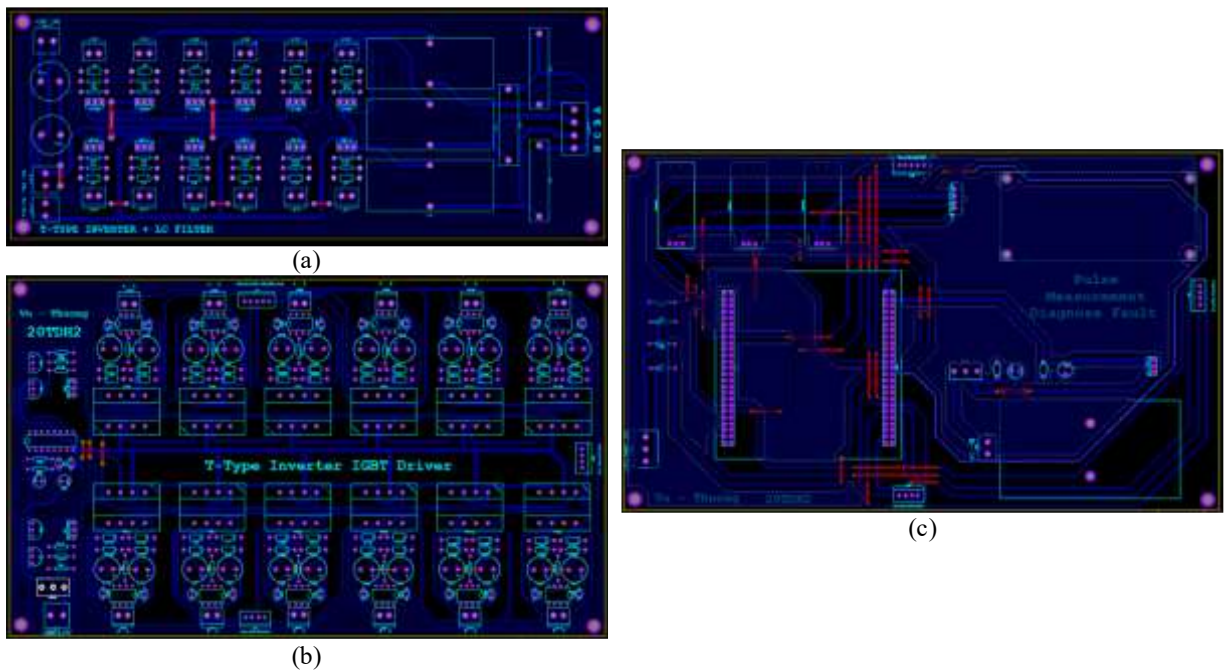
- Mạch chia điện áp: Điện áp nguồn DC đi qua cầu phân áp để giảm điện áp xuống mức mà vi điều khiển có thể đọc được (0 V đến +3.3V). Với mức điện áp DC tối đa là 24V, chọn giá trị điện trở mạch chia áp lần lượt là $R_1 = 1 \text{ M}\Omega$ và $R_2 = 150 \text{ k}\Omega$. Điện áp vi điều khiển đọc được là:

$$V_{out_max} = \frac{V_{DC} \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{24 \times 150.10^3}{1.10^6 + 150.10^3} = 3.13 \text{ (V)} < 3.3 \text{ (V)} \quad (6.4)$$

6.1.3. Thiết kế mạch PCB

(a) Bố trí và đi dây các mạch PCB

Thiết kế PCB và đi dây cho các thành phần mạch được trình bày trong Hình 6.5.

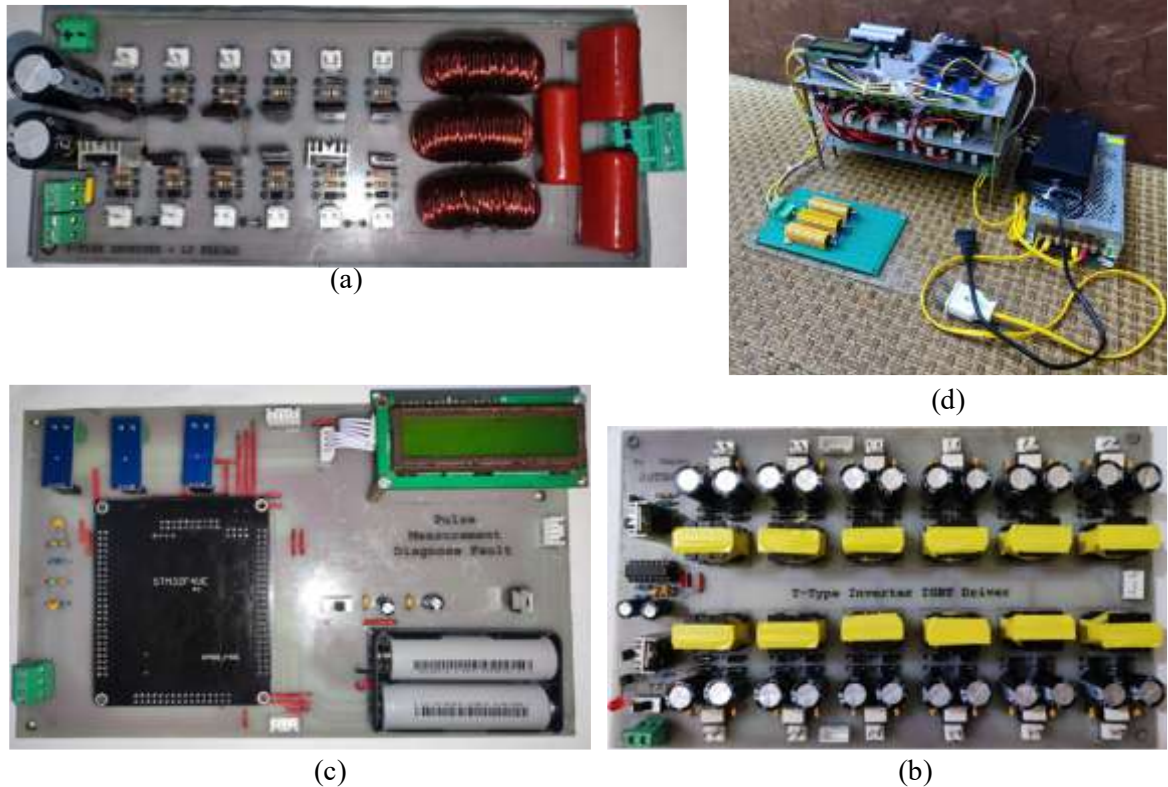


Hình 6. 5 Thiết kế các mạch PCB

- (a) Mạch cầu IGBT (b) Mạch lái phát xung (c) Mạch phát xung, đo lường và hiển thị
- (b) Mạch phần cứng thực tế

Hình 6.6 trình bày hình ảnh thực tế của phần cứng mô hình chẩn đoán lỗi.

Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hệ mạch cho cầu IGBT kiểu T



Hình 6. 6 Phân cứng thực tế

a) Mạch cầu IGBT b) Mạch lái

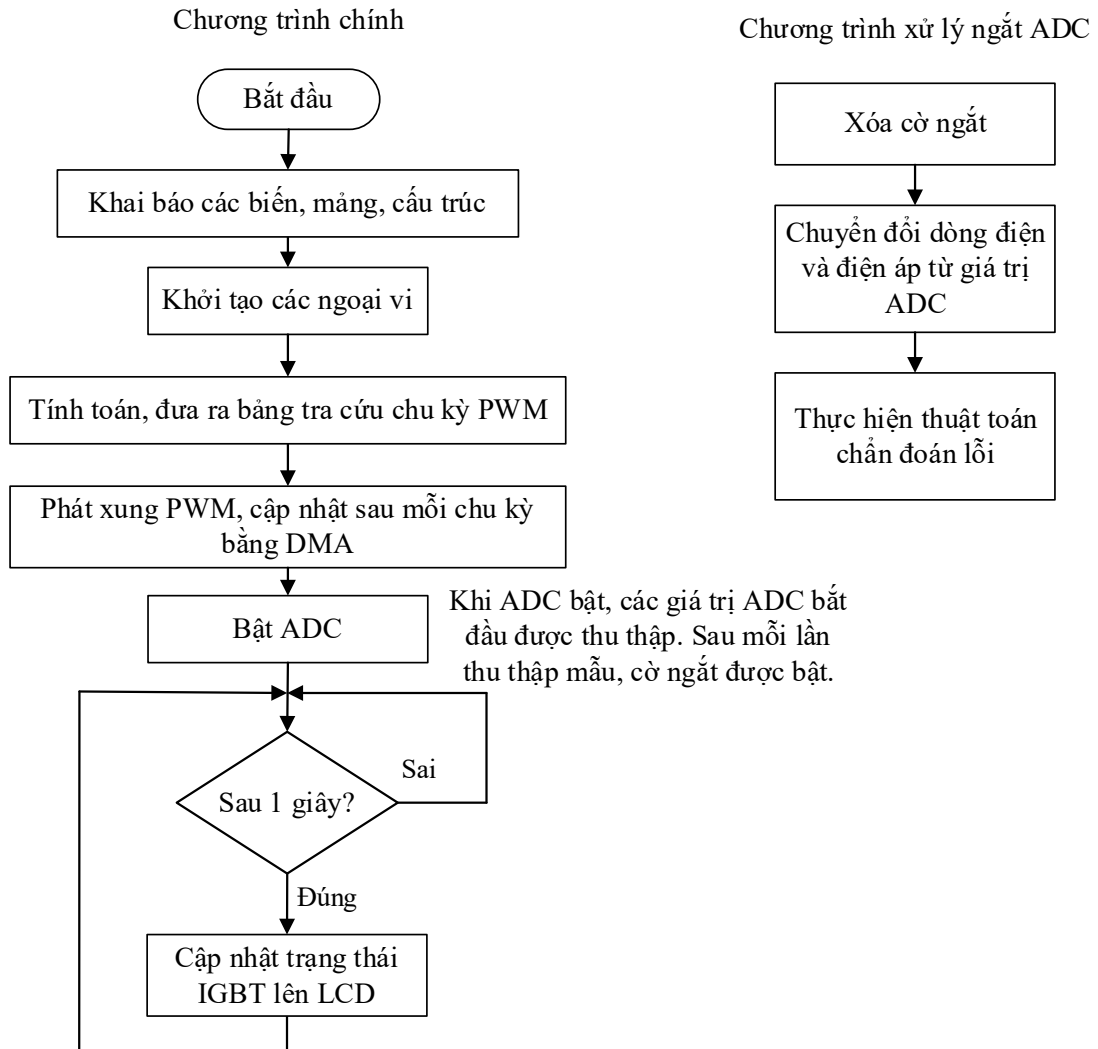
c) Mạch phát xung đo lường và hiển thị d) Tổng thể phần cứng

6.2. Xây dựng phần mềm mô hình chẩn đoán lỗi

Phần mềm của mô hình được lập trình trên board STM32F407VET6 bằng ứng dụng STM32CubeIDE của hãng STMicroelectronics. Chương trình lập trình có các chức năng sau:

- Tính toán phát xung điều khiển theo phương pháp SVPWM.
- Đo lường các thông số điện áp và dòng điện.
- Thực hiện thuật toán chẩn đoán lỗi.
- Hiển thị kết quả chẩn đoán lỗi lên LCD.

Hình 5.5 đã thể hiện lưu đồ thuật toán cho thuật toán chẩn đoán lỗi đã giới thiệu, việc lập trình chức năng chẩn đoán lỗi được thực hiện theo lưu đồ này. Hình 6.7 thể hiện lưu đồ thuật toán cấu trúc của chương trình lập trình để thực hiện các chức năng còn lại.



Hình 6. 7 Lưu đồ thuật toán cấu trúc chương trình lập trình

6.3. Kiểm tra kết quả

6.3.1. Thông số thực nghiệm

Các thông số thực nghiệm được sử dụng cho mô hình chẩn đoán lỗi được tổng hợp trong Bảng 6.1.

Bảng 6. 1 Thông số thực nghiệm của mô hình chẩn đoán lỗi

Thông số	Giá trị
Điện áp DC-link	24 V
Tần số chuyển mạch	10 kHz
Tần số dòng điện	50 Hz
Tải	R = 5 Ω
Bộ lọc sóng sin	L _f = 2.3 mH, C _f = 4.7 uF

Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hở mạch cho cầu IGBT kiểu T

Tần số lấy mẫu ADC	3 kHz
Ngưỡng I_{th} , V_{th}	$I_{th} = 0.008$, $V_{th} = 1.5$ V;

6.3.2. Chất lượng bộ nghịch lưu

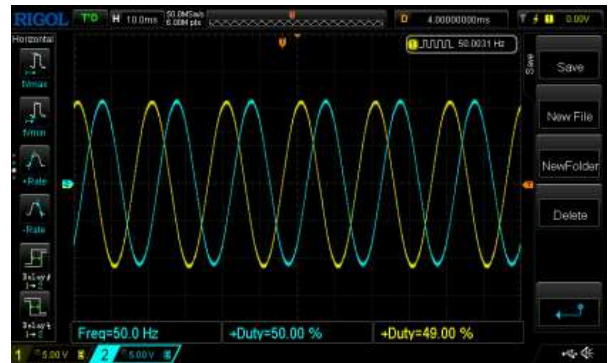
Mong muốn về chất lượng của bộ nghịch lưu là: Điện áp sau nghịch lưu dạng đủ ba bậc, điện áp sau bộ lọc dạng hình sin gần chuẩn ba pha đối xứng, tần số 50 Hz. Nhìn vào Hình 6.8, có thể thấy điện áp sau bộ lọc đã có dạng sin thuần, tần số đúng 50 Hz.



(a)



(b)



(c)

Hình 6. 8 Chất lượng điện áp đầu ra

(a) Điện áp dây (b) Điện áp pha (c) Điện áp 2 pha sau lọc

6.3.3. Chất lượng chẩn đoán lỗi

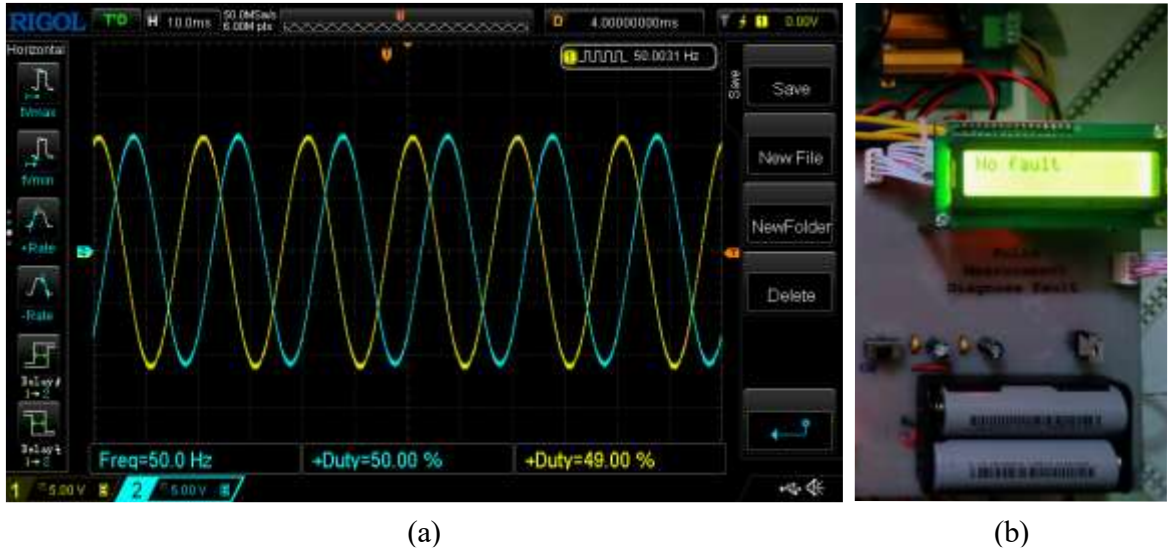
Yêu cầu đặt ra là, trong trạng thái bình thường, bộ kit cho ra kết quả chẩn đoán hiển thị trên màn hình LCD là “No fault”. Còn trong trạng thái lỗi với mỗi van, dòng điện bị biến dạng đúng với mô phỏng trong Simulink. Trên màn hình LCD hiển thị đúng pha và vị trí van bị lỗi. Kết quả chẩn đoán đúng với tất cả 12 van.

(a) Trạng thái bình thường

Hình 6.9 thể hiện kết quả thực nghiệm mô hình trong trạng thái hoạt động bình thường. Dạng sóng điện áp pha ra của 2 pha đạt chuẩn hình sin, đúng chu kỳ và tần

Nghiên cứu mô phỏng inverter PVH-L2550E và xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi hở mạch cho cầu IGBT kiểu T

số như Hình 6.9 (a). Kết quả chẩn đoán hiển thị trên LCD ổn định là “No fault” như Hình 6.9 (b).

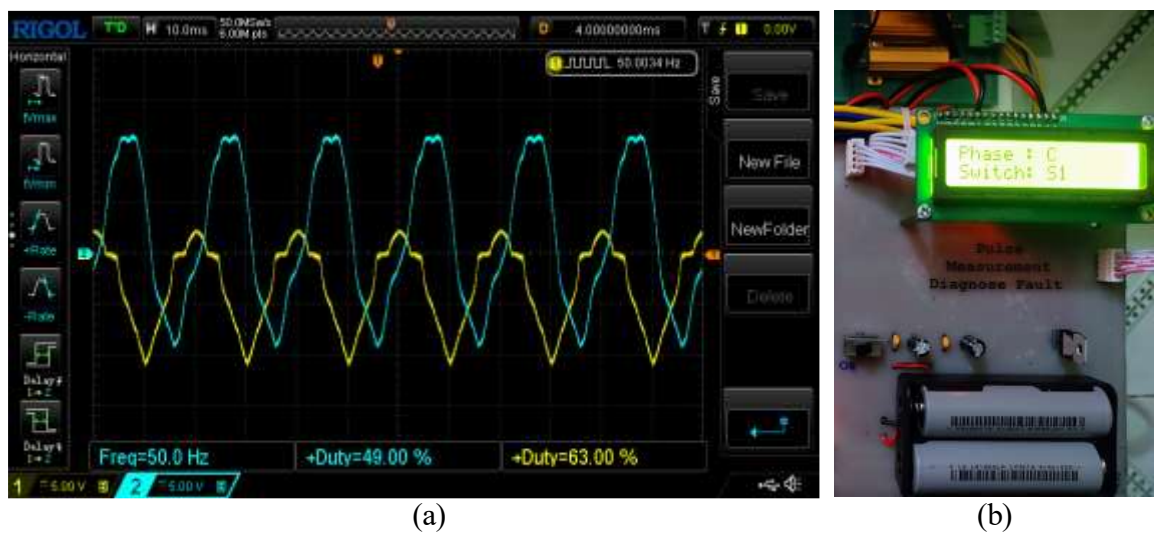


Hình 6. 9 Kết quả thực nghiệm trạng thái bình thường

(a) Điện áp 2 pha sau lọc (b) Hiển thị kết quả chẩn đoán trên LCD

(b) Trường hợp lỗi van S_{x1}

Các trường hợp lỗi được thực nghiệm đại diện các van số 1, 2, 3, 4 của các pha bất kì. Hình 6.10 thể hiện kết quả thực nghiệm van số 1 được đại diện tại pha C. Có thể thấy đường màu vàng (ứng với điện áp ra pha C) có sự biến dạng mạnh khi mất đi phần dương, đường màu xanh (ứng với điện áp ra pha A) cũng bị biến dạng nhẹ do ảnh hưởng lỗi. Kết quả chẩn đoán trên LCD là chính xác và ổn định.



Hình 6. 10 Kết quả thực nghiệm van S_{x1} lỗi

(a) Điện áp ra pha A (xanh) và C (vàng) (b) Kết quả LCD

(c) Trường hợp lỗi van S_{x2}

Lỗi được đại diện với van 2 của pha C. Dạng sóng điện áp ra pha C và A có sự biến dạng nhẹ. Kết quả hiển thị LCD tuy chính xác nhưng thực tế không ổn định.



(a)

(b)

Hình 6. 11 Kết quả thực nghiệm van S_{x2} lỗi

(a) Điện áp ra pha A (xanh) và C (vàng) (b) Kết quả LCD

(d) Trường hợp lỗi van S_{x3}

Van đại diện thực nghiệm là van 3 pha B. Kết quả trên Hình 6.12 cho thấy dạng sóng điện áp ra pha B và C không biến dạng nhiều. Kết quả chẩn đoán trên LCD cũng chính xác và ổn định.



(a)

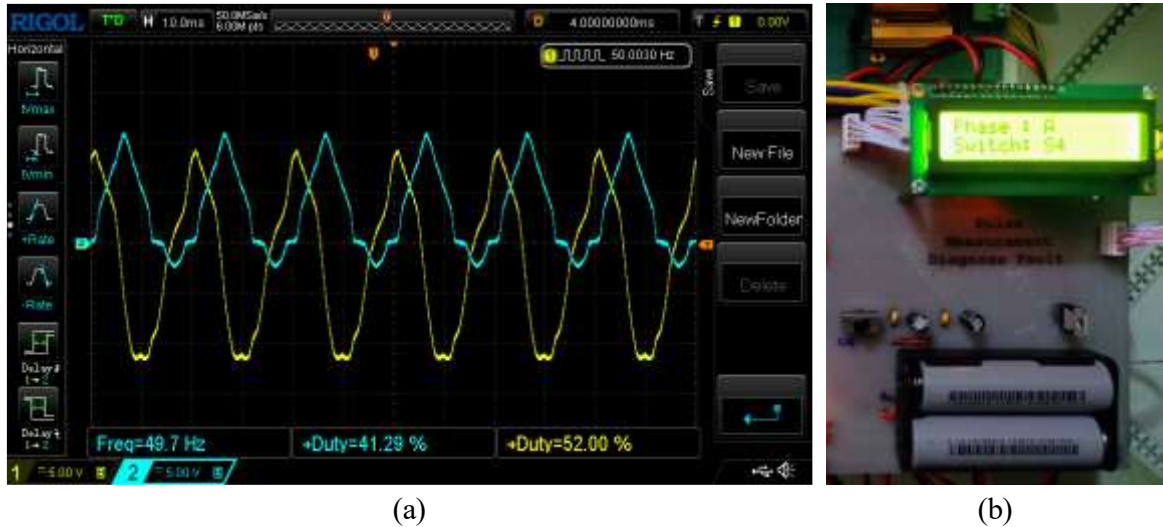
(b)

Hình 6. 12 Kết quả thực nghiệm van S_{x3} lỗi

(a) Điện áp ra pha B (xanh) và C (vàng) (b) Kết quả LCD

(e) Trường hợp lỗi van S_{x4}

Van đại diện là van 4 pha A. Hình 6.13 (a) cho thấy dạng sóng điện áp đầu ra pha A bị biến dạng mạnh ở nửa dương, điện áp pha C cũng bị ảnh hưởng mà biến dạng nhẹ. Kết quả chẩn đoán LCD hiển thị chính xác và ổn định.



Hình 6. 13 Kết quả thực nghiệm van S_{x4} lỗi

(a) Điện áp ra pha A (xanh) và C (vàng) (b) Kết quả LCD

Tổng kết lại các kết quả thực nghiệm, nhận xét được rằng mô hình chẩn đoán lỗi được xây dựng đã hoạt động khá chính xác và ổn định cả chất lượng nghịch lưu và chẩn đoán. Điểm trừ là việc chẩn đoán ra lỗi van số 2 không ổn định như 3 vị trí khác trong nhánh van, nguyên nhân khách quan là cảm biến có ảnh hưởng bởi nhiễu điện từ và nguyên nhân chủ quan do chưa tối ưu phần tính toán trong chương trình vi điều khiển.

6.4. Kết luận

Chương này đã thiết kế, xây dựng, hoàn thiện và thực nghiệm kết quả cho mô hình chẩn đoán lỗi. Có thể thấy mô hình đã hoạt động tốt, chất lượng đầu ra đảm bảo và kết quả chẩn đoán có độ chính xác cao (khoảng 80% chẩn đoán chính xác), các yêu cầu đề ra cũng đã đạt được.

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

1. Kết luận

Tổng kết lại, những kết quả mà đề tài đã đạt được là:

- Mô phỏng được hệ thống điện mặt trời sử dụng inverter PVH-L2550E, các kết quả, tiêu chí đã đạt yêu cầu về tính chính xác.
- Đề xuất được mô hình thuật toán chẩn đoán lỗi cho mạch nghịch lưu kiểu T của inverter PVH-L2550E. Mô phỏng Matlab cũng được thực hiện thành công để đảm bảo tính đúng đắn của thuật toán.
- Mô hình chẩn đoán lỗi được xây dựng dưới dạng mô hình thu nhỏ, đầu ra mạch nghịch lưu ổn định, và thuật toán chẩn đoán lỗi đã được áp dụng.

Tuy nhiên, vẫn còn những vấn đề mà đề tài chưa đạt được:

- Thuật toán chẩn đoán lỗi quá đặc thù, trong khi thực tế vẫn còn có rất nhiều dạng lỗi khác với vai trò và tính cấp thiết tương đương.
- Mô hình chẩn đoán lỗi được xây dựng chỉ là mô hình thu nhỏ, không trực tiếp làm việc với inverter PVH-L2550E để xây dựng, do đó chưa hoàn toàn đáp ứng được tính thực tiễn. Mặt khác, kết quả chẩn đoán ra chưa hoàn toàn ổn định.

2. Hướng phát triển của đề tài

Trong tương lai, nếu được tiếp tục làm việc với đề tài, nhóm đưa ra một số hướng phát triển cho đề tài như sau:

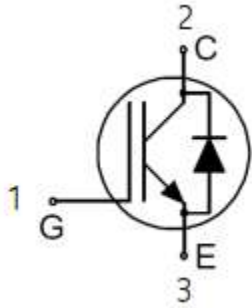
- Trực tiếp làm việc với inverter PVH-L2550E để xây dựng mô hình chẩn đoán lỗi với quy mô công nghiệp, chất lượng hơn cho kết quả tốt hơn.
- Mở rộng phạm vi chẩn đoán lỗi, xây dựng các thuật toán đa dụng hơn cho nhiều trường hợp lỗi hơn.
- Ngoài ra, có thể phát triển bộ mô hình thành một thiết bị được hoạt động online kèm với inverter, mở rộng thêm các chức năng để ứng dụng trong các hệ thống SCADA, DCS,...

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Chandra Bajracharya, “Control of VSC-HVDC for wind power”, Norwegian University of Science and Technology, June 2008.
- [2]. Ui-Min Choi, Kyo-Beum Lee, Frede Blaabjerg, “Diagnosis and Tolerant Strategy of an Open-Switch Fault for T-Type Three-Level Inverter Systems”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 50, No. 1, January/February 2014.
- [3]. Zhixi WU, Jin ZHAO, “Open-Circuit Fault Diagnosis for the Grid-Tied T-Type Inverter Based Only on Three-Phase Currents”, CPSS Transactions On Power Electronics And Applications, Vol. 9, No. 3, September 2024.
- [4]. Nguyễn Bình Nam, Nguyễn Văn Tấn, Lê Thành Bắc, Trương Đình Minh Đức, “Đánh giá Hiệu quả các Thuật toán MPPT P&O, Inc và Fuzzy Logic trong Hệ thống Pin năng lượng Mặt Trời”, Tạp chí Khoa Học và Công Nghệ - Đại Học Đà Nẵng, Vol. 18, No. 5.1, 2020.
- [5]. AYACHI AMOR Yacine, KHELDOUN Aissa, METIDJI Brahim, HAMOUDI Farid, MERAZKA Abdeslam, LAZOUECHE Youssouf, “Implementation of Modified SVPWM for Three-level Inverter Using STM32F4”, 3rd CISTEM’18 - Algiers, Algeria, October 29-31, 2018.
- [6]. [Trang thông tin điện tử - EVN SPC](#).
- [7]. TMEIC, “PV Inverter Operation & Maintenance – PVH-L2550E”.
- [8]. TMEIC, “Technical Specification SOLAR WARE PVH-L2550E (2550kW Indoor PV Inverter)”.
- [9]. IEEE, “IEEE 519-2022 IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems”.
- [10]. Alex Dumais, Sabarish Kalyanaraman, “Grid-Connected Solar Microinverter Reference Design”, Microchip Technology Inc

PHỤ LỤC 1

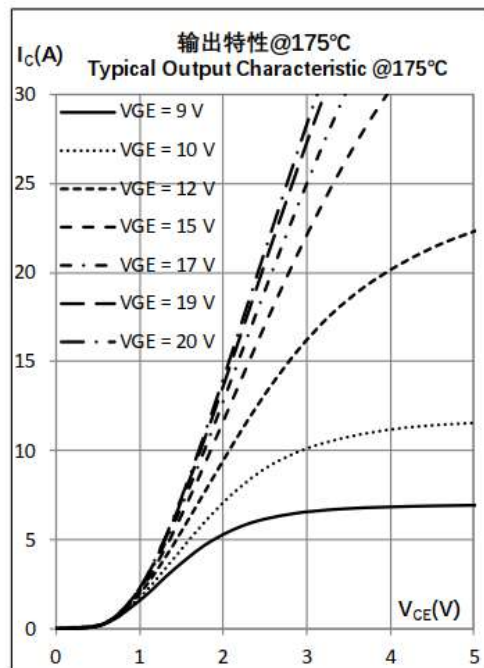
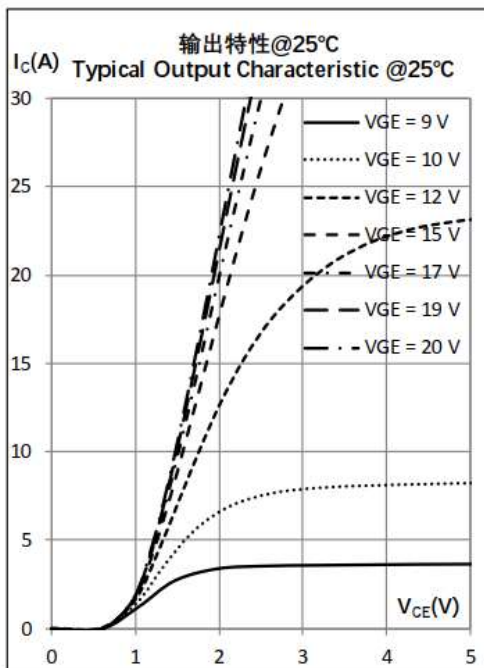
Thông số kỹ thuật van bán dẫn IGBT XNF15N60T



Kí hiệu và hình ảnh thực tế

Bảng thông số kỹ thuật

Thông số tối đa	Giá trị
V_{CE}	600 V
I_C	30 A (25°C), 15 A (175°C)
V_{GES}	± 30 V
T_{vj}	-40 ~ +175 °C

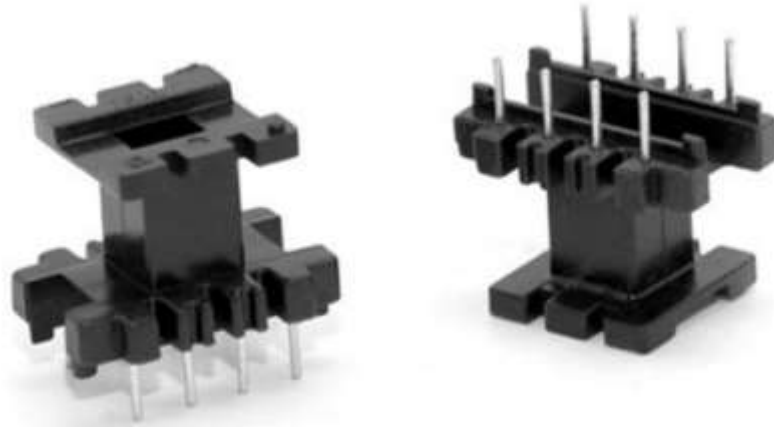


Đồ thị đặc tính đầu ra

PHỤ LỤC 2

Tính toán số vòng dây cho biến áp xung

Chọn biến áp xung EE25, lõi có cạnh 6.2 mm.



Công thức tính số vòng sơ cấp:

$$N_{pri} = \frac{V_{in} \cdot 10^8}{4 \cdot f \cdot B_{max} \cdot A_C}$$

Với V_{in} : điện áp đầu vào, 12V.

f : tần số xung, 50 kHz.

B_{max} : mật độ từ thông lớn nhất tính bằng Gauss, thường chọn trong khoảng 1300G đến 2000G, chọn 2000G.

A_C : diện tích mặt cắt ngang hiệu dụng tính bằng cm^2 .

Vậy số vòng sơ cấp là:

$$N_{pri} = \frac{12 \times 10^8}{4 \times 50000 \times 2000 \times 6.2^2 \times 10^{-2}} = 7.8$$

Ta làm tròn $N_{pri} = 8$ vòng.

Với điện áp thứ cấp mong muốn cũng là 12 V, ta quấn số vòng thứ cấp bằng sơ cấp, $N_{sec} = 8$ vòng.

Vì kiến trúc nguồn là đẩy kéo và đầu ra đối xứng $\pm 12 V$ nên ta sẽ quấn kiểu center-tapped, 8 + 8 vòng sơ cấp và 8 + 8 vòng thứ cấp.