

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

TÊN ĐỀ TÀI:

**NGHIÊN CỨU HỆ THỐNG ĐIỆN
MẶT TRỜI CÓ LƯU TRỮ NỐI LƯỚI**

Người hướng dẫn: **TS. NGUYỄN KIM ÁNH**

KS. VÕ VĂN QUYẾT

Sinh viên thực hiện:

1. LÊ MINH ĐỨC – MSSV: 105200445 – LỚP: 20TDHCLC3

2. NGUYỄN HỮU THÀNH ĐẠT – MSSV: 105200444 – LỚP 20TDHCLC3

Đà Nẵng, 6/2025

LỜI CẢM ƠN

Nhóm em xin gửi lời tri ân sâu sắc đến Khoa Điện, Trường Đại học Bách Khoa – Đại học Đà Nẵng, đặc biệt là TS. Nguyễn Kim Ánh – người thầy tận tâm dẫn dắt, cùng KS. Võ Văn Quyết, những người đã luôn đồng hành và mở đường cho nhóm thực hiện đồ án tốt nghiệp với đề tài “Nghiên cứu hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nổi lưới”.

Bên cạnh đó, nhóm xin bày tỏ lòng biết ơn đến các thầy cô trong khoa, những người đã không ngừng truyền đạt kiến thức từ nền tảng cơ bản đến chuyên sâu, tạo nên bộ phận vững chắc để nhóm hoàn thành tốt nhiệm vụ được giao.

Cảm ơn thầy Nguyễn Kim Ánh, nhóm xin khắc ghi sự hỗ trợ tận tâm của thầy trong suốt hành trình từ khi bắt đầu đề tài đến lúc hoàn thiện. Những đánh giá, hướng dẫn của thầy là con đường mở ra những kiến thức nền tảng và sự trau dồi trong quá trình hoàn thiện đề tài.

Qua quá trình thực hiện, nhóm đã gặt hái được một số kết quả đáng ghi nhận, dù vẫn còn những điểm chưa hoàn hảo về mô hình phần cứng và nội dung trình bày. Nhóm hy vọng nhận được những lời nhận xét chân thành từ thầy cô và các bạn để thế hệ sau có thể tiếp nối và nâng cấp tốt hơn.

Cuối cùng, nhóm xin gửi đến quý thầy cô lời chúc sức khỏe tràn đầy, thành tựu rực rỡ trong sự nghiệp và niềm vui trọn vẹn trong cuộc sống.

.

NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

TT	Họ tên sinh viên	Mã số SV	Lớp	Ngành
1	Nguyễn Hữu Thành Đạt	105200444	20TDHCLC3	Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa
2	Lê Minh Đức	105200445	20TDHCLC3	Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

1. Tên đề tài

NGHIÊN CỨU HỆ THỐNG ĐIỆN MẶT TRỜI CÓ LƯU TRỮ NỐI LƯỚI

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	Nguyễn Hữu Thành Đạt Lê Minh Đức	Viết báo cáo và thuyết minh Nghiên cứu về tổng quan hệ thống điện mặt trời Khảo sát thực tế Phương hướng phát triển và kết luận

b. Phần riêng

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung
1	Lê Minh Đức	- Nghiên cứu hệ thống pin năng lượng mặt trời. - Nghiên cứu, mô phỏng và thực nghiệm mạch tăng áp, mạch tăng- giảm áp, mạch nghịch lưu 2 chiều - Nghiên cứu và triển khai thuật toán MPPT (P&O), EMS, VOC.

		– Xây dựng, mô phỏng và thực nghiệm hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nối lưới bằng Matlab/Simulink.
2	Nguyễn Hữu Thành Đạt	– Nghiên cứu cấu tạo hệ thống pin lưu trữ – Nghiên cứu liên kết DC link – Nghiên cứu và mô phỏng mạch nghịch lưu 2 chiều – Nghiên cứu mạch lọc AC (LCL filter) – Nguyên lý hoạt động của hệ thống

5. Các bản vẽ, đồ thị

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung
1	Lê Minh Đức	Các hình ảnh, sơ đồ và đồ thị được vẽ bằng Microsoft Visio, trình bày và chèn trong báo cáo khổ A4. Bao gồm: + Sơ đồ cấu trúc của các hệ thống năng lượng mặt trời phổ biến + Sơ đồ cấu trúc hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nối lưới. + Cấu trúc mạch của hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nối lưới + Cấu trúc mạch: Boost, Buck-Boost 2 chiều, nghịch lưu DC/AC, DC-link. + Sơ đồ điều khiển: MPPT (P&O), EMS các chế độ 1, 2, 3, vòng khóa pha (SF-PLL), điều khiển dq. + Các đồ thị mô phỏng: Công suất, dòng điện, điện áp, SOC, công suất, THD... trong mô phỏng thành phần và mô phỏng toàn hệ thống.
2	Nguyễn Hữu Thành Đạt	Các hình ảnh, sơ đồ và đồ thị được vẽ bằng Microsoft Visio, trình bày và chèn trong báo cáo khổ A4. Bao gồm: + Sơ đồ cấu trúc hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nối lưới. + Cấu trúc mạch tương đương của tụ điện Dc link + Trình tự đóng ngắt của các IGBT

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung
		+ Mạch lọc AC (LCL Filter) + Thuật toán điều khiển DC/AC + Bảng trạng thái đóng ngắt của IGBT và giá trị điện áp tại các giá trị vector điện áp

6. Giảng viên hướng dẫn

Họ và tên người hướng dẫn	Phân/ Nội dung:
TS. Nguyễn Kim Ánh	Theo dõi, hướng dẫn và đóng góp ý kiến trong quá trình thực hiện đề tài
KS. Võ Văn Quyết	Cung cấp thông tin, tài liệu liên quan đến đề tài

7. Thời gian thực hiện

- Ngày giao nhiệm vụ đồ án: 24/02/2025
- Mốc 1: Báo cáo đầu kỳ: 24/03/2025
- Mốc 2: Báo cáo giữa kỳ: 28/04/2025
- Ngày hoàn thành đồ án: 17/06/2025.

Đà Nẵng, ngày 24 tháng 02 năm 2025

Trưởng Bộ môn

Người hướng dẫn 1

Người hướng dẫn 2

TS. Giáp Quang Huy

TS. Nguyễn Kim Ánh

KS. Võ Văn Quyết

**PHIẾU KIỂM SOÁT TIẾN ĐỘ LÀM ĐỒ ÁN TỐT
NGHIỆP**

1. Họ tên sinh viên:
Lê Minh Đức Số thẻ SV: 105200445
Nguyễn Hữu Thành Đạt Số thẻ SV: 105200444
2. Tên đề tài ĐATN:
**NGHIÊN CỨU HỆ THỐNG ĐIỆN MẶT TRỜI CÓ LƯU TRỮ NỒI
LƯỚI**
3. Họ và tên người hướng dẫn
TS. Nguyễn Kim Ánh, Khoa Điện, Trường Đại học Bách Khoa – Đại học Đà Nẵng
KS. Võ Văn Quyết, Công ty TNHH MTV DAMINTECH

Tuần	Ngày	Khối lượng		GVHD ký tên
		Đã thực hiện (%)	Tiếp tục thực hiện (%)	
1	24/02/2025	Nhận đề tài	Gặp giảng viên hướng dẫn và trao đổi với đại diện doanh nghiệp	
2	01/03/2025	Tìm hiểu các kiến thức liên quan, xây dựng giải pháp cho vấn đề	Báo cáo hoạt động với giảng viên và đại diện doanh nghiệp	
3	10/3/2025	Tiếp tục thu thập các kiến thức liên quan và đánh giá và so sánh giữa các hệ thống: Hòa lưới không lưu trữ, năng lượng mặt trời độc lập và hệ thống năng lượng mặt trời Hybrid	Viết báo cáo chương 1	
4	17/03/2025	Duyệt lần 1: Đánh giá khối lượng công việc hoàn thành: %		

		Được tiếp tục làm ĐATN ☐ Không tiếp tục thực hiện ĐATN ☐		
5	10/04/2025	Nghiên cứu cấu trúc hệ thống PV lưu trữ và các chiến lược điều khiển	Xác định được cấu trúc tổng quan của hệ thống	
6	17/04/2025	Tìm hiểu và nghiên cứu mạch tăng áp 1 chiều (boost converter)	Xác định nguyên lý hoạt động, mô phỏng và mô hình hóa mạch tăng áp 1 chiều	
7	25/04/2025	Tìm hiểu và nghiên cứu mạch tăng và giảm áp 2 chiều (buck-boost converter)	Xác định nguyên lý hoạt động, mô phỏng và mô hình hóa mạch tăng giảm áp 2 chiều	
8	15/05/2025	Tìm hiểu và nghiên cứu bộ nghịch lưu DC/AC	Xác định nguyên lý hoạt động, mô phỏng và mô hình hóa bộ nghịch lưu DC/AC	
9	30/05/2025	Duyệt lần 2: Đánh giá khối lượng công việc hoàn thành: % Được tiếp tục làm ĐATN ☐ Không tiếp tục thực hiện ĐATN ☐		
10	05/06/2025	Kiểm tra lại toàn bộ hệ thống	Cho ra kết quả mô phỏng và đánh giá kết quả	
11	13/06/2025	Tổng hợp các tài liệu, hoàn thiện các phần trong báo cáo		

LỜI CAM ĐOAN LIÊM CHÍNH HỌC THUẬT

Chúng tôi xin cam đoan rằng đồ án tốt nghiệp với đề tài “ Nghiên cứu hệ thống điện mặt trời lưu trữ nổi lưới” là nghiên cứu độc lập của tôi với sự hỗ trợ từ giảng viên hướng dẫn TS. Nguyễn Kim Ánh và KS. Võ Văn Quyết.

Chúng tôi xin cam đoan toàn bộ số liệu được cung cấp từ báo cáo đều là kết quả nghiên cứu hoàn toàn trung thực, không sao chép từ bất kì một công trình nghiên cứu khác nào. Những tài liệu trích dẫn đều đã được ghi rõ nguồn gốc.

Chúng tôi xin chịu hoàn toàn trách nhiệm nếu có bất kỳ sự sao chép, gian dối kết quả nào trong sản phẩm đồ án này.

Sinh viên thực hiện

Sinh viên thực hiện

Lê Minh Đức

Nguyễn Hữu Thành Đạt

MỤC LỤC

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI..... 1

1.1	Bối cảnh và xu hướng phát triển của năng lượng mặt trời.....	1
1.2	Cấu trúc hệ thống PV lưu trữ và các chiến lược điều khiển tích hợp.....	2
1.2.1	Tổng quan các cấu trúc hệ thống năng lượng mặt trời hiện nay	2
1.2.2	Tích hợp bộ lưu trữ và vấn đề điều khiển công suất	3
1.3	Mục tiêu, phạm vi và đóng góp của đề tài	4
1.3.1	Mục tiêu kỹ thuật và ứng dụng	4
1.3.2	Phạm vi thực hiện và giới hạn mô phỏng	5
1.4	Kết luận	5

CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT 7

2.1	Các thành phần trong hệ thống hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nói lưới	7
2.2	Tấm pin năng lượng mặt trời.....	8
2.2.1	Cấu trúc và nguyên lý hoạt động của tế bào quang điện	8
2.2.2	Mô hình hóa hệ thống pin năng lượng mặt trời	10
2.3	Pin lưu trữ.....	12
2.3.1	Cấu tạo và nguyên lý hoạt động.....	12
2.3.2	Mô hình mạch pin lưu trữ Lithium-ion	13
2.4	Mạch tăng áp 1 chiều	14
2.4.1	Cấu trúc mạch và chức năng của các thành phần	14
2.4.2	Nguyên lý hoạt động	15
2.4.3	Mô hình hóa mạch tăng áp 1 chiều	15
2.5	Mạch tăng-giảm áp 2 chiều	17
2.5.1	Cấu trúc mạch tăng-giảm áp 2 chiều.....	17
2.5.2	Nguyên lý hoạt động	18
2.5.3	Mô hình hóa mạch tăng-giảm áp 2 chiều.....	20
2.6	Liên kết DC	25
2.6.1	Khái niệm và vai trò.....	25
2.6.2	Mô hình mạch điện tương đương.....	26
2.7	Mạch nghịch lưu 2 chiều.....	26
2.7.1	Cấu trúc mạch và nguyên lý hoạt động của mạch chuyển đổi DC/AC	26

2.7.2	Mô hình hóa trạng thái đóng cắt của IGBT	29
2.8	Mạch lọc AC	32
2.8.1	Mô hình hóa cho mạch lọc LCL	33
2.9	Kết luận	34

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ HỆ THỐNG ĐIỆN MẶT TRỜI CÓ LƯU TRỮ NỒI LƯỚI

36

3.1	Kiến trúc hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nôi lưới.....	36
3.1.1	Cấu trúc mạch của hệ thống.....	36
3.1.2	Nguyên lý hoạt động của hệ thống.....	36
3.2	Phân tích và tính chọn linh kiện	37
3.2.1	Mạch tăng áp 1 chiều	37
3.2.2	Mạch tăng-giảm áp 2 chiều.....	38
3.2.3	Mạch lọc AC	44
3.3	Thuật toán điều khiển hệ thống	45
3.3.1	Thuật toán theo dõi điểm công suất tối đa	45
3.3.2	Thuật toán điều khiển theo hướng điện áp.....	46
3.3.3	Chiến lược quản lý năng lượng.....	55
3.4	Kết luận	58

CHƯƠNG 4: THỰC NGHIỆM MÔ HÌNH VÀ ĐÁNH GIÁ.

59

4.1	Mô phỏng hệ thống sử dụng Matlab/Simulink	59
4.1.1	Mô hình kiểm nghiệm mạch tăng áp 1 chiều.....	59
4.1.2	Mô hình kiểm nghiệm mạch tăng-giảm áp 2 chiều.....	60
4.1.3	Mô hình kiểm nghiệm mạch nghịch lưu	62
4.2	Mô hình kiểm nghiệm hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nôi lưới	63
4.2.1	Cấu hình các tham số phân cứng	63
4.3	Kết quả mô phỏng và đánh giá	65
4.3.1	Đáp ứng các thành phần riêng biệt trong hệ thống	65
4.3.2	Đáp ứng toàn hệ thống trong kịch bản vận hành	69
4.3.3	Kết luận.....	73

CHƯƠNG 5: KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN.....

74

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1.1 Các cấu trúc phổ biến của hệ thống năng lượng mặt trời, a) Hệ năng lượng mặt trời nối lưới, b) Hệ năng lượng mặt trời độc lập, c) Hệ điện mặt trời có lưu trữ nối lưới	2
Hình 2.1 Cấu trúc của hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nối lưới.....	7
Hình 2.2 Phổ bức xạ mặt trời và vùng hấp thụ khả kiến [17]	8
Hình 2.3 Cấu trúc điển hình trong tế bào quang điện	9
Hình 2.4 Mô hình dải năng lượng trong bán dẫn.....	9
Hình 2.5 Mô hình diode đơn của PV lý thuyết và mô đun PV thực tế	12
Hình 2.6 Đường đặc tính I-V của tấm pin mặt trời.....	12
Hình 2.7 Mô hình bậc nhất cho pin lithium [21]	14
Hình 2.8 Cấu trúc mạch tăng áp 1 chiều	14
Hình 2.9 Boost Converter ở trạng thái S1 mở.....	15
Hình 2.10 Boost Converter ở trạng thái S1 đóng.....	15
Hình 2.11 Đáp ứng của dòng cuộn cảm với trạng thái IGBT	15
Hình 2.12 Cấu trúc mạch tăng-giảm áp 2 chiều.....	18
Hình 2.13 Cấu trúc mạch Buck-Boost Converter khi S3 mở trong chế độ giảm áp	19
Hình 2.14 Cấu trúc mạch Buck-Boost Converter khi S3 đóng trong chế độ giảm áp	19
Hình 2.15 Biến thiên của dòng cuộn cảm trong chế độ giảm áp	19
Hình 2.16 Cấu trúc mạch Buck-Boost Converter khi S2 đóng trong chế độ tăng áp	20
Hình 2.17 Cấu trúc mạch Buck-Boost Converter khi S2 mở trong chế độ giảm áp.	20
Hình 2.18 Biến thiên của dòng cuộn cảm trong chế độ tăng áp	20
Hình 2.19 Cấu trúc mạch tương đương của tụ điện DC-link [29]	26
Hình 2.20 Cấu trúc mạch nghịch lưu 3 pha 2 mức	27
Hình 2.21 Trình tự V1: S1 đóng, S3 và S5 mở.....	31
Hình 2.22 Trình tự V2: S1 và S2 đóng, S3 mở.....	31

Hình 2.23 Trình tự của vector v	31
Hình 2.24 Mạch tương đương 1 pha	33
Hình 3.1 Cấu trúc mạch của hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nối lưới.....	36
Hình 3.2 Lưu đồ thuật toán MPPT nhiễu loạn và quan sát P&O.....	46
Hình 3.3 Sơ đồ khối của thuật toán điều khiển SF-PLL	46
Hình 3.4 Thuật toán điều khiển DC/AC theo phương pháp điều khiển vector.....	48
Hình 3.5 Lưu đồ thuật toán EMS tại chế độ 1	56
Hình 3.6 Lưu đồ thuật toán EMS tại chế độ 2	57
Hình 3.7 Lưu đồ thuật toán EMS tại chế độ 3	58
Hình 4.1 Cấu trúc mạch của quá trình kiểm nghiệm mạch tăng áp 1 chiều	59
Hình 4.2 Đường đặc tính I-V và P-V của tấm pin mặt trời SUNPOWER SPR-305-WHT.....	60
Hình 4.3 Đồ thị bức xạ cấu hình tại tấm pin mặt trời	60
Hình 4.4 Cấu trúc mạch tăng giảm áp tại chế độ giảm áp	61
Hình 4.5 Cấu trúc mạch tăng giảm áp tại chế độ tăng áp	62
Hình 4.6 Cấu trúc mạch chuyển đổi DC/AC trong mô phỏng Matlab/Simulink.....	62
Hình 4.7 Tổng quan hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nối lưới mô phỏng bằng Matlab/Simulink.....	64
Hình 4.8 Điện áp và dòng điện đáp ứng tại điểm MPP	65
Hình 4.9 Đáp ứng công suất PV và công suất DC	65
Hình 4.10 Đáp ứng hệ thống trong kiểm nghiệm mạch tăng giảm áp chế độ giảm áp: a) Đáp ứng điện áp, b) Đáp ứng dòng điện , c) Trạng thái SOC	66
Hình 4.11 Trạng thái SOC trong kiểm nghiệm chế độ tăng áp.....	67
Hình 4.12 Đáp ứng dòng điện trong kiểm nghiệm chế độ tăng áp	67
Hình 4.13 Đáp ứng điện áp tại DC bus trong kiểm nghiệm chế độ tăng áp	67
Hình 4.14 Đáp ứng của hệ thống trong kiểm nghiệm mạch DC/AC; a) Đáp ứng điện áp, b) Đáp ứng dòng điện, c) Công suất đẩy lên lưới, d) Méo sóng hài dòng điện ..	68
Hình 4.15 Đáp ứng công suất hệ thống trong kiểm nghiệm Mode 2.2.....	70
Hình 4.16 Trạng thái SoC trong kiểm nghiệm Mode 2.2	70

Hình 4.17 Méo sóng hài dòng điện trong kiểm nghiệm Mode 2.2	70
Hình 4.18 Đáp ứng công suất hệ thống trong kiểm nghiệm Mode 3.4.....	72
Hình 4.19 Trạng thái SoC trong kiểm nghiệm Mode 3.4	72
Hình 4.20 Méo sóng hài dòng điện trong kiểm nghiệm Mode 3.4	72

DANH MỤC BẢNG

Bảng 2.1 Bảng so sánh giữa các công nghệ PV phổ biến [17]	9
Bảng 2.2 Thông số cơ bản của tấm pin năng lượng mặt trời SUNPOWER SPR-305WHT	10
Bảng 2.3 Bảng trạng thái đóng ngắt của IGBT và giá trị điện áp tại các giá trị vector điện áp	30
Bảng 4.1 Các tham số sử dụng trong kiểm nghiệm mạch tăng áp 1 chiều	60
Bảng 4.2 Thông số cho mạch Buck-Boost Converter tại chế độ giảm áp	61
Bảng 4.3 Thông số cho mạch Buck-Boost Converter tại chế độ tăng áp	62
Bảng 4.4 Thông số sử dụng trong kiểm nghiệm Inverter	63
Bảng 4.5 Các thông số sử dụng trong mô phỏng hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nối lưới	64

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI

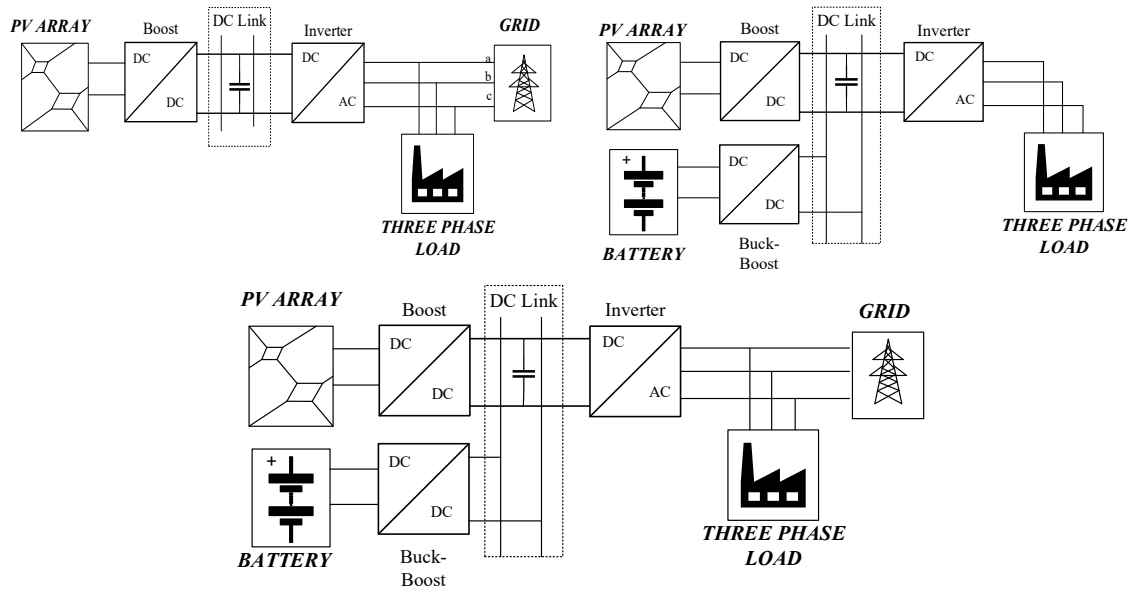
1.1 Bối cảnh và xu hướng phát triển của năng lượng mặt trời

Trước các thách thức toàn cầu như biến đổi khí hậu, khủng hoảng năng lượng và yêu cầu giảm phát thải khí nhà kính, thế giới đang có xu hướng chuyển dịch mạnh mẽ sang sử dụng các nguồn năng lượng tái tạo. Trong số đó, năng lượng mặt trời nổi bật như một trong những nguồn điện sạch, dồi dào và có tốc độ tăng trưởng nhanh nhất. Theo báo cáo *World Energy Outlook 2024* của Cơ quan Năng lượng Quốc tế (IEA), công suất điện tái tạo toàn cầu đã đạt mức tăng kỷ lục hơn 560 GW trong năm 2023, trong đó năng lượng mặt trời chiếm tỷ trọng lớn nhất [30]. Dự báo đến năm 2030, công suất điện tái tạo có thể đạt gần 10.000 GW, đủ để đáp ứng hoàn toàn mức tăng nhu cầu điện toàn cầu [30]. Tuy nhiên, sự phát triển nhanh của điện mặt trời cũng đặt ra thách thức lớn về ổn định hệ thống, do tính gián đoạn và không ổn định theo thời gian của nguồn phát. Điều này dẫn đến nhu cầu cấp thiết phải tích hợp hệ thống lưu trữ năng lượng, nhằm ổn định điện áp DC, cân bằng công suất tức thời và hỗ trợ điều độ lưới điện một cách linh hoạt và hiệu quả [30].

Tại Việt Nam, nhu cầu điện năng được dự báo sẽ tăng mạnh, với tổng công suất cần đạt khoảng 124.000 MW vào năm 2030, đưa Việt Nam trở thành quốc gia có nhu cầu điện đứng thứ hai Đông Nam Á [31]. Trong khi đó, tiềm năng thủy điện gần như đã khai thác hết, và khả năng khai thác than trong nước đang giảm dần. Trước thực trạng này, điện mặt trời kết hợp lưu trữ nổi lên như một giải pháp chiến lược, không chỉ góp phần đảm bảo an ninh năng lượng, mà còn giúp Việt Nam đạt được các mục tiêu phát triển bền vững và giảm phát thải theo cam kết tại COP26 [31]. Đặc biệt nhấn mạnh vai trò quan trọng của hệ thống năng lượng mặt trời có lưu trữ và hòa lưới, nhằm tăng tỷ lệ tự tiêu thụ, giảm áp lực lên lưới điện truyền thống và tận dụng tối đa tiềm năng năng lượng sạch tại chỗ [31].

1.2 Cấu trúc hệ thống PV lưu trữ và các chiến lược điều khiển tích hợp

1.2.1 Tổng quan các cấu trúc hệ thống năng lượng mặt trời hiện nay



Hình 1.1 Các cấu trúc phổ biến của hệ thống năng lượng mặt trời, a) Hệ năng lượng mặt trời nối lưới, b) Hệ năng lượng mặt trời độc lập, c) Hệ điện mặt trời có lưu trữ nối lưới

Cấu trúc hệ thống năng lượng mặt trời hiện nay gồm 3 cấu trúc chính

- Hệ năng lượng mặt trời độc lập (standalone/off-grid PV system) là hệ thống không kết nối với lưới điện, sử dụng trực tiếp nguồn năng lượng mặt trời để cung cấp điện cho các tải tại chỗ, thường áp dụng ở vùng sâu vùng xa hoặc khu vực không có điện lưới. Cấu trúc cơ bản gồm mảng pin mặt trời, bộ điều khiển MPPT, bộ điều khiển sạc, bộ lưu trữ và bộ chuyển đổi DC/AC, đảm bảo cung cấp điện liên tục kể cả khi không có nắng nhờ năng lượng dự trữ trong pin[32-35]. Ưu điểm là độc lập hoàn toàn với lưới, giảm chi phí truyền tải, phù hợp cho khu vực hẻo lánh; tuy nhiên nhược điểm là chi phí đầu tư và bảo trì pin cao, hiệu suất tổng thể thấp hơn do tổn thất lưu trữ và phụ thuộc nhiều vào điều kiện bức xạ mặt trời[32-33]. Thiết kế tối ưu hệ thống cần cân nhắc kỹ nhu cầu tải, dữ liệu khí tượng và các chỉ số tin cậy như xác suất mất tải để đảm bảo cung cấp điện ổn định, kinh tế[32].

- Hệ thống năng lượng mặt trời nối lưới (Grid-Connected PV System) bao gồm các thành phần chính sau: mảng pin mặt trời (PV array), bộ nghịch lưu (inverter), hệ

thống điều khiển MPPT và hệ thống phân phối điện [3][36-38]. Mảng pin mặt trời chuyển đổi ánh sáng thành điện DC, sau đó được bộ nghịch lưu chuyển đổi thành điện AC đồng pha với lưới điện[37]. Hệ thống hoạt động song song với lưới điện tiện ích mà không cần hệ thống lưu trữ năng lượng[36]. Khi sản xuất điện dư thừa, năng lượng được cung cấp trở lại lưới điện, giúp giảm khí thải nhà kính và tổn thất truyền tải[36]. Một số hệ thống tiên tiến có thể tích hợp thêm hệ thống lưu trữ năng lượng sạc (RESS) để tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng mặt trời trong trường hợp mất điện lưới[39].

- Hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nối lưới là giải pháp tích hợp hiệu quả, kết hợp tấm pin mặt trời, hệ thống lưu trữ pin và kết nối với lưới điện quốc gia [40][41]. Hệ thống sử dụng kiến trúc bus DC chung, nơi tấm pin mặt trời kết nối qua bộ chuyển đổi DC/DC boost với thuật toán MPPT để tối ưu công suất [42]. Pin lưu trữ được kết nối qua bộ chuyển đổi DC/DC hai chiều cho phép sạc/xả năng lượng [43]. Inverter ba pha chuyển đổi DC thành AC để cung cấp tải và kết nối lưới [40]. Hệ thống quản lý năng lượng thông minh ưu tiên sử dụng nguồn PV, sau đó đến pin lưu trữ, và cuối cùng là lưới điện, đồng thời có khả năng bán điện thừa về lưới khi sản lượng vượt nhu cầu [42][43].

1.2.2 Tích hợp bộ lưu trữ và vấn đề điều khiển công suất

Tích hợp hệ thống lưu trữ năng lượng pin với các hệ thống quang điện (PV) đang trở thành một giải pháp quan trọng để giải quyết tính gián đoạn vốn có của năng lượng mặt trời. Việc kết hợp PV–battery với lưới điện đòi hỏi một thuật toán quản lý năng lượng tối ưu để điều phối dòng năng lượng giữa nguồn sản xuất, hệ thống lưu trữ và lưới điện [42].

Các thách thức chính trong điều khiển công suất bao gồm việc đồng bộ hóa giữa các nguồn năng lượng và quản lý trạng thái sạc/xả của pin [44]. Một phương pháp quản lý năng lượng hiệu quả có thể bao gồm hai chế độ hoạt động chính: chế độ công suất tối đa (MPP) khi lưới có thể hấp thụ toàn bộ năng lượng dư thừa, và chế độ giới hạn công suất (LPP) khi công suất được điều chỉnh theo yêu cầu của tải bằng cách tích lũy năng lượng vào pin lưu trữ[43]. Thuật toán quản lý này có thể giảm thời gian hoàn vốn của hệ thống PV và giúp giảm kích thước hệ thống PV dân dụng [43].

Từ góc độ mô hình hóa, việc phát triển các mô hình BESS chính xác giúp dự đoán hiệu suất trong các điều kiện vận hành khác nhau [27]. Các yếu tố như nhiệt độ, hồ sơ dòng điện, trạng thái sạc (SoC) và độ sâu xả (DoD) đều ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất của pin, do đó cần được tích hợp vào các chiến lược điều khiển [27]. Pin trong hệ thống PV phải hoạt động trong điều kiện khác biệt so với các ứng dụng truyền thống, đặc biệt là chu trình xả/nạp hàng ngày và khả năng sạc không hoàn toàn [20].

Các chiến lược điều khiển hiện đại đang tập trung vào việc tối ưu hóa việc sử dụng dung lượng lưu trữ năng lượng trong các điều kiện khác nhau, đảm bảo điện áp của đường dây cung cấp duy trì trong phạm vi cho phép [44]. Hệ thống BESS không chỉ giải quyết vấn đề cung cấp điện gián đoạn mà còn tăng cường hiệu quả của đường truyền tải bằng cách lưu trữ điện năng vào ban ngày và xả điện vào lưới trong thời gian ban đêm [44].

1.3 Mục tiêu, phạm vi và đóng góp của đề tài

1.3.1 Mục tiêu kỹ thuật và ứng dụng

Nghiên cứu này nhằm đạt được các mục tiêu chính sau:

- **Phân tích cấu trúc hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nối lưới**, bao gồm mối quan hệ năng lượng giữa các thành phần chính: mảng PV, bộ lưu trữ năng lượng, các bộ biến đổi công suất, DC-link, mạch lọc AC và lưới điện
- **Xây dựng mô hình toán học và hàm truyền đạt** cho các thành phần trong hệ thống.
- **Nghiên cứu các thuật toán điều khiển** cho từng khối chức năng, bao gồm:
 - Thuật toán theo dõi điểm công suất tối đa (MPPT – phương pháp P&O)
 - Thuật toán điều khiển mạch sạc/xả cho bộ lưu trữ (Buck-Boost hai chiều)
 - Thuật toán vòng khóa pha (PLL)
 - Thuật toán điều khiển bộ biến đổi DC/AC hai mức ba pha
 - Chiến lược điều phối hoạt động các thành phần trong hệ thống
- **Đánh giá hiệu năng hệ thống thông qua mô phỏng các kịch bản vận hành**, bao gồm: quá tải, thiếu tải, sạc/xả pin, bảo vệ pin; đồng thời phân tích chất lượng điện năng đầu ra theo tiêu chuẩn IEEE 1547.

1.3.2 Phạm vi thực hiện và giới hạn mô phỏng

Phạm vi thực hiện

Xây dựng mô hình mô phỏng trên MATLAB/Simulink cho hệ thống gồm mảng PV, pin lithium-ion, bộ DC/DC hai chiều, nghịch lưu DC/AC ba pha, DC-link và mạch lọc. Tích hợp các thuật toán MPPT (P&O), điều khiển sạc/xả, PLL, EMS và VOC. Đánh giá thông qua các kịch bản dư tải, thiếu tải, sạc/xả và phân tích chất lượng điện theo IEEE 1547.

Giới hạn mô phỏng

- Không xét tổn hao phi tuyến thiết bị, tổn thất đường dây và ảnh hưởng nhiệt độ.
- Xét hệ thống vận hành trong điều kiện đảm bảo độ tin cậy lưới điện.
- Mô hình pin lý tưởng, không bao gồm lão hóa và kiểm soát nhiệt.
- Phụ tải giả lập đơn giản, không dựa trên dữ liệu thực tế.
- Chỉ mô phỏng, chưa thực nghiệm để xác thực.

1.4 Kết luận

Chương này đã trình bày tổng quan về sự phát triển và vai trò của năng lượng mặt trời trong bối cảnh toàn cầu và tại Việt Nam, từ đó làm rõ nhu cầu cấp thiết của việc tích hợp hệ thống lưu trữ trong các ứng dụng điện mặt trời nhằm đảm bảo sự ổn định và tối ưu hóa vận hành. Ba cấu trúc hệ thống PV phổ biến hiện nay đã được phân tích, bao gồm hệ độc lập, hệ nối lưới và hệ nối lưới có lưu trữ nối lưới – trong đó hệ điện mặt trời có lưu trữ nối lưới được xác định là cấu trúc tiên tiến, phù hợp cho ứng dụng công nghiệp và dân dụng hiện đại.

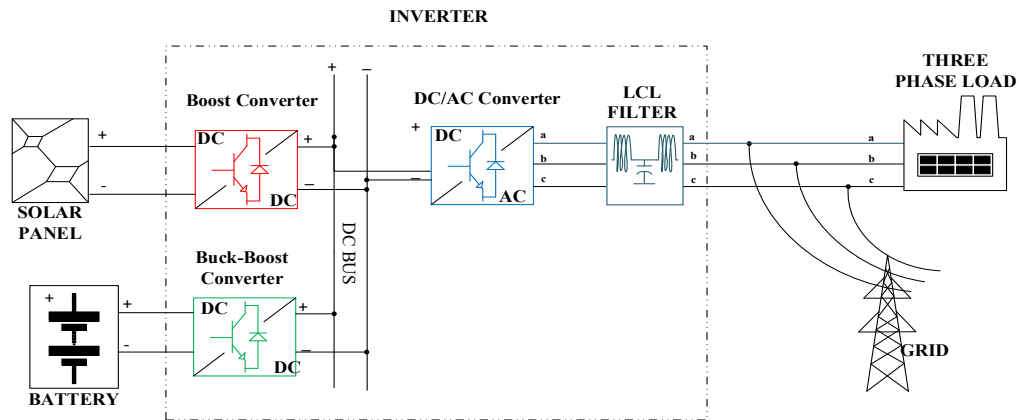
Tiếp theo, chương đã mô tả cấu trúc hệ thống PV hybrid điển hình, phân tích vai trò của từng thành phần trong chuỗi chuyển đổi năng lượng và khẳng định tầm quan trọng của bộ lưu trữ trong việc điều phối công suất. Các vấn đề điều khiển công suất, điều kiện vận hành phức tạp, cũng như những chiến lược quản lý năng lượng hiệu quả đã được thảo luận, đặt nền móng cho việc xây dựng mô hình và thuật toán điều khiển ở các chương sau.

Cuối cùng, chương đã nêu rõ mục tiêu nghiên cứu, phạm vi thực hiện và giới hạn mô phỏng của đề tài, từ đó làm rõ hướng tiếp cận và đóng góp cụ thể. Những nội

dung này là cơ sở lý luận vững chắc để chuyển sang Chương 2, trong đó sẽ trình bày chi tiết các cơ sở lý thuyết và mô hình hóa toán học cho từng khối chức năng của hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nổi lưới.

CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1 Các thành phần trong hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nối lưới



Hình 2.1 Cấu trúc của hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nối lưới

Hình 2.1 thể hiện cấu trúc tổng quan của hệ thống, bao gồm các thành phần chính là:

Tấm pin năng lượng mặt trời: Chuyển đổi năng lượng ánh sáng mặt trời thành điện năng dưới dạng dòng điện một chiều (DC). Các tấm pin thường được làm từ vật liệu silicon, có công suất và hiệu suất khác nhau dựa trên công nghệ (monocrystalline, polycrystalline, thin-film).

Bộ lưu trữ (Battery): Pin lưu trữ đóng vai trò quan trọng trong hệ thống năng lượng mặt trời, giúp tích trữ năng lượng dư thừa trong ban ngày để sử dụng vào ban đêm hoặc khi nguồn năng lượng mặt trời không đủ. Điều này giúp tối ưu hóa hiệu quả, tăng tính ổn định và giảm phụ thuộc vào lưới điện.

Lưới điện (Grid): Cung cấp điện bổ sung khi hệ thống thiếu nguồn cung năng lượng từ mặt trời và pin lưu trữ, đồng thời nhận điện dư thừa để hòa lưới.

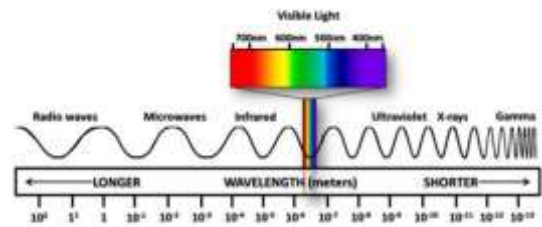
Bộ biến đổi công suất (Inverter): Duy trì điện áp đầu vào từ tấm pin năng lượng mặt trời, chuyển đổi dòng điện một chiều (DC) sang dòng xoay chiều (AC). Kết hợp các thuật toán như: MPPT, EMS, PLL,... nhằm tối ưu quá trình vận hành và điều phối dòng điện của hệ thống Hybrid.

2.2 Tấm pin năng lượng mặt trời

Tấm pin mặt trời (PV module) là thành phần quan trọng nhất trong hệ thống điện mặt trời, có chức năng chuyển đổi bức xạ mặt trời thành điện năng một chiều (DC) nhờ hiệu ứng quang điện nội. Mỗi mô-đun bao gồm nhiều tế bào quang điện (PV cells) được kết nối với nhau để cung cấp mức điện áp và dòng điện phù hợp với tải và bộ biến đổi công suất [17].

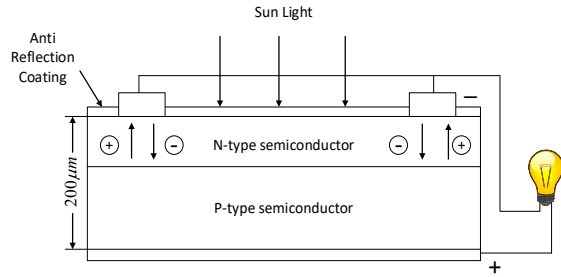
2.2.1 Cấu trúc và nguyên lý hoạt động của tế bào quang điện

Bức xạ Mặt Trời bao gồm toàn bộ dải phổ điện từ, từ tia gamma mang năng lượng cực cao, tiếp đến là tia X, tia tử ngoại, ánh sáng khả kiến, tia hồng ngoại, sóng vi ba và sóng vô tuyến năng lượng thấp. Các dạng bức xạ này có thể được mô tả như những hạt photon không có khối lượng, di chuyển với vận tốc ánh sáng và mang theo năng lượng đặc trưng. Người ta phân loại các bức xạ khác nhau dựa trên mức năng lượng chứa trong mỗi photon [17]. minh họa một

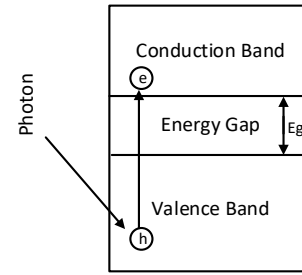


Hình 2.2 Phổ bức xạ mặt trời và vùng hấp thụ khả kiến [17]

phần của phổ điện từ này. Cấu trúc của tế bào quang điện được đề cập tại Hình 2.3. Tế bào quang điện hoạt động dựa trên hiệu ứng quang điện nội. Khi photon từ ánh sáng mặt trời có năng lượng vượt quá vùng cấm (bandgap) của vật liệu bán dẫn (ví dụ: 1.12 eV với silicon) chiếu vào mối nối p-n, chúng kích thích electron từ dải hóa trị lên dải dẫn, tạo ra cặp electron-lỗ trống. Điện trường nội tại tại mối nối p-n tách các cặp này, sinh ra dòng điện khi kết nối với mạch ngoài. Quá trình này phụ thuộc vào khả năng hấp thụ photon và giảm thiểu tổn thất năng lượng, như tái hợp electron hoặc phản xạ ánh sáng [17-19]. Từ nguyên lý hoạt động vật lý nói trên, mô hình điện tương đương của tế bào PV có thể được xây dựng, bao gồm nguồn dòng quang điện I_{ph} , một diode, điện trở nối tiếp R_s và điện trở song song R_p .



Hình 2.3 Cấu trúc điển hình trong tế bào quang điện



Hình 2.4 Mô hình dải năng lượng trong bán dẫn

Để giảm thiểu tổn thất do ánh sáng bị phản xạ, một lớp phủ chống phản xạ (anti-reflection coating) được phủ lên bề mặt tế bào nhằm tăng lượng photon hấp thụ, nhờ tạo hiệu ứng giao thoa triệt tiêu giữa các sóng phản xạ. Lớp phủ này thường dày khoảng 70–100 nm và được chế tạo từ các vật liệu như Si_3N_4 , MgF_2 , hoặc TiO_2 [17]. Các công nghệ PV khác nhau tùy thuộc vào quy trình sản xuất, vật liệu có thể đưa ra các chi phí và hiệu suất khác nhau. Bảng 2-1 cho thấy sự so sánh giữa các công nghệ PV phổ biến hiện nay [17].

Bảng 2.1 Bảng so sánh giữa các công nghệ PV phổ biến [17]

	Mono-Si	Poly-Si	Thin Film
Hiệu suất	Cao (Khoảng 18-22%)	Thấp (14-18%)	Rất thấp (10-12%)
Công nghệ chế tạo	Từ tinh thể Si	Kết hợp tinh thể Si	Rất nhiều lớp vật liệu
Phù hợp cho	Nhiệt độ tiêu chuẩn	Nhiệt độ vừa phải	Nhiệt độ cao
Diện tích cần thiết/kW	Ít nhất	Ít hơn	Lớn
Hiệu suất (Tại điều kiện ánh sáng yếu)	Thấp	Thấp	Vừa phải
Khoảng cách giữa Voc và Vmp	15-20%	15-20%	22-28%
Hệ số nhiệt độ	Cao	Cao	Thấp
Hệ số lấp đầy	70-80%	70-80%	60-68%

Hiệu suất của hệ thống điện mặt trời (PV) phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau, bao gồm cả yếu tố nội tại lẫn các điều kiện bên ngoài. Về phía tấm pin, các yếu tố quan trọng bao gồm sự suy giảm chất liệu theo thời gian, điện trở ký sinh trong mạch và hệ số lấp đầy (fill-factor) của tế bào quang điện. Bên cạnh đó, các yếu tố môi trường như cường độ bức xạ mặt trời, nhiệt độ vận hành của tấm pin, góc nghiêng lắp đặt cũng tác động đáng kể đến hiệu suất hệ thống. Ngoài ra, các vấn đề thực tế như hiện tượng che bóng, bụi bẩn bám trên bề mặt hay hiệu ứng suy thoái cảm ứng điện thế (PID) cũng làm giảm hiệu quả hoạt động của hệ thống PV [17]. Những yếu tố này cần được đánh giá toàn diện để tối ưu hóa hiệu suất và tuổi thọ của hệ thống điện mặt trời.

Bảng 2-2 thể hiện các thông số đặc trưng của tấm pin năng lượng mặt trời SUNPOWER SPR-305WHT. Các thông số đặc trưng của tấm pin quang điện mặt trời (PV) là những chỉ số kỹ thuật quan trọng, thể hiện giá trị mà tấm pin mang lại và đóng vai trò quyết định trong việc lựa chọn loại tấm pin phù hợp với yêu cầu của hệ thống.

Bảng 2.2 Thông số cơ bản của tấm pin năng lượng mặt trời SUNPOWER SPR-305WHT

Các tham số	Giá trị	Đơn vị
Công suất tối đa	305 W	(W)
Số tế bào quang điện trên 1 Module	96	(Ncell)
Điện áp hở mạch Voc	64.2 V	(V)
Dòng ngắn mạch Isc	5.96 A	(A)
Điện áp tại điểm công suất tối đa Vmpp	54.7 V	(V)
Dòng điện tại điểm công suất tối đa Impp	5.58 A	(A)
Hệ số nhiệt độ của điện áp hở mạch	-0.2727 %/°C	(%/deg.C)
Hệ số nhiệt độ của dòng điện hở mạch	0.016745 %/°C	(%/deg.C)
Hiệu suất	18.7 %	%

2.2.2 Mô hình hóa hệ thống pin năng lượng mặt trời

Tế bào quang điện hoạt động dựa trên hiệu ứng quang điện, chuyển đổi trực tiếp photon thành điện năng thông qua cấu trúc bán dẫn p-n. Khi photon có năng lượng đủ lớn (lớn hơn bandgap) chiếu vào lớp tiếp giáp, các cặp electron-hole được sinh ra, tạo ra dòng điện một chiều (DC) [16]. Mô hình toán học của tế bào PV lý tưởng được mô tả bởi phương trình (2.1):

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{akT}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

Trong đó, I_{pv} là dòng điện tạo ra bởi ánh sáng chiếu tới, I_0 là dòng bão hòa ngược của Diode, q là điện tích của electron ($1.60217646 \times 10^{-19} C$), k là hằng số Boltzmann [$1,3806503.10^{-23} J / K$], $T [K]$ là nhiệt độ của tiếp giáp P-N và a là hằng số lý tưởng diode.

Hình 2.5 thể hiện mạch tương đương của pin quang điện lý tưởng và Mô-đun PV thực tế. Trong mô hình PV lý tưởng, dòng điện đầu ra chỉ phụ thuộc vào dòng quang sinh và dòng diode, giả định là không tổn hao. Tuy nhiên, đối với thực tế, các tế bào quang điện có sự tổn thất năng lượng do các yếu tố vật lý, mô hình PV thực tế sử dụng 2 điện trở: R_s (Đại diện cho các tổn thất điện năng do sự cản trở dòng điện khi di chuyển qua các vật liệu của tế bào quang điện) và R_p (Phản ánh sự rò rỉ dòng điện giữa các điểm trên bề mặt tế bào do các khiếm khuyết hoặc tạp chất) [12, 16]. Phương trình 2.2 thể hiện Mô-đun PV thực tế

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (2.2)$$

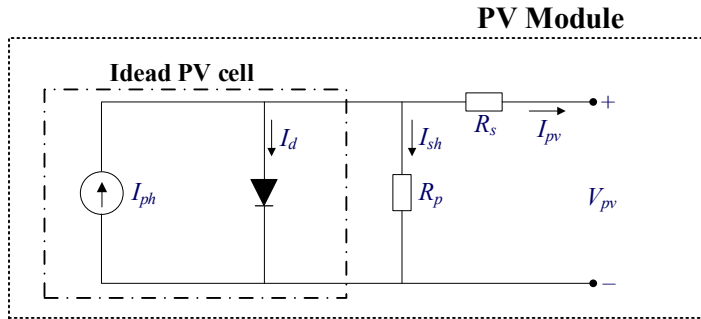
Trong đó, $V_t = N_s \cdot (kT / q)$ là điện áp nhiệt của mảng PV với N_s là số tế bào mắc nối tiếp.

Dòng quang sinh I_{ph} tỷ lệ thuận tuyến tính với cường độ bức xạ, được thể hiện trong phương trình (2.3). Nhiệt độ cũng gây ra ảnh hưởng phi tuyến lên điện áp hở mạch V_{oc} , phương trình (2.4) thể hiện dòng bão hòa ngược I_0 phụ thuộc vào nhiệt độ. Các nghiên cứu của Ma et al. [12] chỉ ra rằng mô hình single-diode khi được tham số hóa đúng có thể dự đoán chính xác hiệu suất của hệ thống PV dưới các điều kiện vận hành thực tế với sai số dưới 1%. Hình 2.6 thể hiện đường đặc tính I-V với ba điểm đặc trưng: ngắn mạch (I_{sc}), công suất cực đại (V_{mp}, I_{mp}) và hở mạch (V_{oc}) [14, 16].

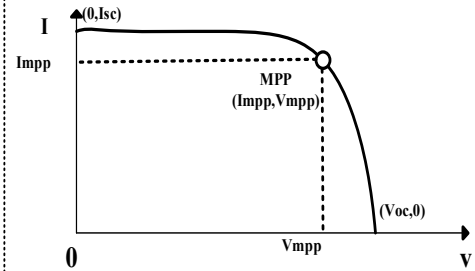
$$I_{ph} = (I_{sc,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (2.3)$$

$$I_0(T) = I_{0,n} \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \exp\left(\frac{qE_g}{ak} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (2.4)$$

Về mặt cấu trúc vật lý, hệ thống PV được tổ chức theo nhiều cấp độ phân cấp: từ tế bào quang điện đơn (cell) đến dây tế bào (cell string), mô-đun (module), chuỗi mô-đun (string) và mảng PV (array) [15]. Cấu trúc này cho phép thiết kế linh hoạt để đáp ứng yêu cầu về điện áp và công suất đầu ra của hệ thống. Các kết quả nghiên cứu thực nghiệm từ Keshavani et al. [14] và Banu et al. [13] cho thấy sự phù hợp cao giữa mô hình toán học và dữ liệu đo được, đặc biệt là trong việc dự đoán ảnh hưởng của điều kiện môi trường lên đặc tính I-V và P-V của mảng PV.



Hình 2.5 Mô hình diode đơn của PV lý thuyết và mô-đun PV thực tế



Hình 2.6 Đường đặc tính I-V của tấm pin mặt trời

2.3 Pin lưu trữ

2.3.1 Cấu tạo và nguyên lý hoạt động

Pin lưu trữ đóng vai trò thiết yếu trong hệ thống năng lượng mặt trời độc lập, thực hiện ba chức năng chính [20]. Đầu tiên, pin hoạt động như bộ đệm để loại bỏ sự không khớp giữa năng lượng có sẵn từ tấm pin mặt trời và nhu cầu năng lượng của tải [20]. Thứ hai, pin cung cấp dự trữ năng lượng trong những ngày thời tiết xấu, với hệ thống thường được thiết kế cho 2,5 ngày tự chủ hoặc hơn [47]. Thứ ba, pin ngăn ngừa biến động điện áp lớn có thể gây tổn hại cho thiết bị [20].

Pin hoạt động dựa trên các phản ứng điện hóa xảy ra giữa anode, cathode và chất điện phân [27]. Trong hệ thống PV, pin trải qua chu kỳ sạc-xả hàng ngày với độ sâu xả thường từ 2-30% mỗi ngày [47]. Các yếu tố như nhiệt độ, tốc độ dòng điện và

trạng thái sạc ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất pin [47]. Pin được sạc khi tấm pin mặt trời sản xuất điện năng dư thừa và xả khi cung cấp điện cho tải [20]

Với yêu cầu về hiệu suất cao, tuổi thọ dài và khả năng đáp ứng nhanh trong hệ thống PV có lưu trữ nổi lưới, pin Lithium-ion là lựa chọn phù hợp hơn cả. Mặc dù chi phí đầu tư ban đầu cao hơn so với các công nghệ truyền thống như axit–chì, nhưng lợi ích lâu dài về hiệu quả chuyển đổi năng lượng, mật độ năng lượng và khả năng điều khiển chính xác trong các thuật toán sạc/xả thông minh khiến pin Lithium-ion trở thành giải pháp tối ưu cho các hệ thống năng lượng mặt trời hiện đại [27].

2.3.2 Mô hình mạch pin lưu trữ Lithium-ion

Mô hình RC (Resistor-Capacitor) là một trong những mô hình mạch tương đương phổ biến để mô phỏng hành vi của pin Lithium-ion. Hình 2.7 minh họa mô hình RC bậc nhất cho pin lithium. Tuy hiệu suất động học và khả năng dự báo điện áp đầu ra của mô hình RC bậc nhất thường thấp hơn so với các mô hình bậc cao hơn (ví dụ: mô hình RC bậc hai hoặc mô hình DP – Dual Polarization), nhưng mạch này vẫn được ưa chuộng nhờ cấu trúc đơn giản, dễ cài đặt, ít tham số cần xác định và khả năng mô phỏng đáp ứng tạm thời một cách hiệu quả trong các hệ thống điều khiển thời gian thực [21]. Phương trình mô tả động học của mạch RC bậc nhất được thể hiện qua các phương trình dưới đây:

Phương trình điện áp đầu ra:

$$V_p(t) = V_{ocv}(t) - R.I_s(t) - V_n(t) \quad (2.5)$$

Phương trình điện áp nhánh mạch RC:

$$\frac{dV_n(t)}{dt} = -\frac{1}{R_n C_n} V_n(t) + \frac{1}{C_n} I_s(t) \quad (2.6)$$

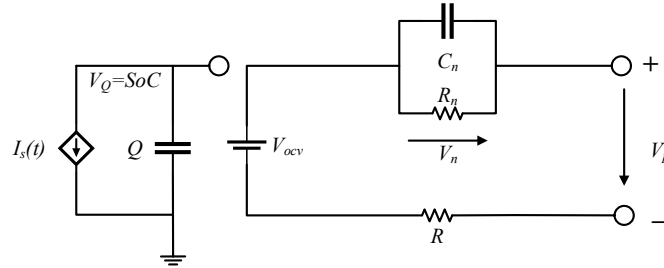
Mối quan hệ giữa SoC và V_{ocv} :

$$V_{ocv}(t) = f(SoC(t)) \quad (2.7)$$

Phương trình cập nhật SoC:

$$SoC(t) = SoC(t - \Delta t) + \frac{\eta}{Q_{nom}} \int_{t-\Delta t}^t I_s(\tau) d\tau \quad (2.8)$$

Trong đó: $I_s(t)$ là dòng pin (chảy ra là xả, vào là sạc), R là điện trở thuần, V_n là điện áp phân cực, nhánh, C_n và R_n là điện dung phân cực và điện trở phân cực, Q_{nom} là dung lượng danh định, η là hiệu suất sạc/xả

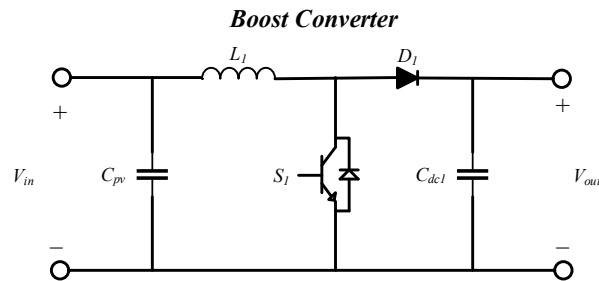


Hình 2.7 Mô hình bậc nhất cho pin lithium [21]

2.4 Mạch tăng áp 1 chiều

Trong hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nối lưới, mạch Boost đóng vai trò quan trọng trong việc nâng điện áp đầu ra từ tấm pin PV lên mức phù hợp để cung cấp cho bộ biến tần hoặc sạc pin. Do điện áp đầu ra của PV thay đổi theo điều kiện môi trường, mạch Boost giúp ổn định điện áp và hỗ trợ thuật toán MPPT nhằm tối ưu hóa công suất khai thác được từ năng lượng mặt trời [24-25].

2.4.1 Cấu trúc mạch và chức năng của các thành phần



Hình 2.8 Cấu trúc mạch tăng áp 1 chiều

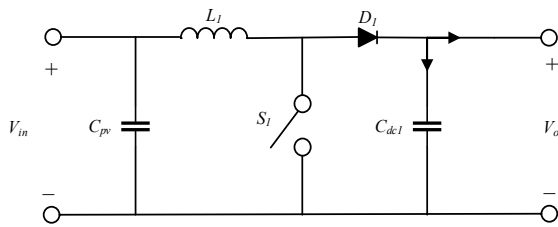
Các thành phần chính của mạch Boost Converter bao gồm:

- Cuộn Cảm (L): Cuộn cảm có vai trò lưu trữ năng lượng dưới dạng từ trường khi dòng điện chảy qua nó.
- Diode(D): Cho phép dòng điện đi theo 1 chiều từ cuộn cảm đến tụ điện và ngăn không cho dòng chảy ngược quay về phía cuộn cảm.

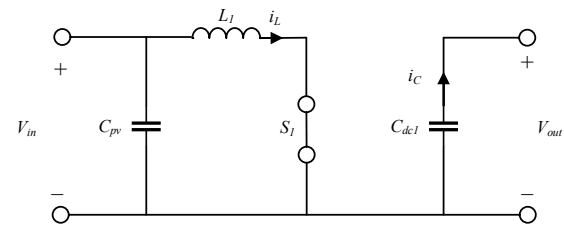
- Tụ điện(C_{dc} & C_{pv}): Lọc điện áp đầu vào và đầu ra của mạch.
- IGBT: Là công tắc bán dẫn, điều khiển chu kì đóng/mở của mạch, từ đó quyết định quá trình tích/xả năng lượng bên trong cuộn cảm.

2.4.2 Nguyên lý hoạt động

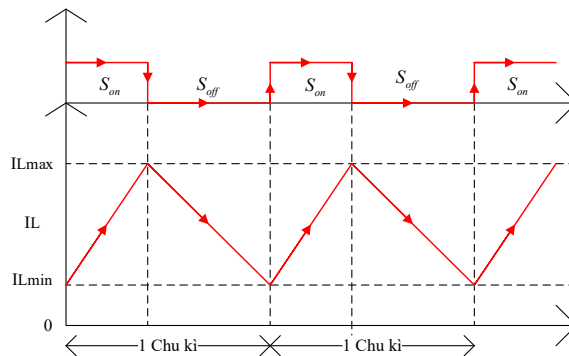
Mạch Boost sẽ dựa trên 2 trạng thái Đóng và Mở của công tắc bán dẫn. Hai trạng thái này được thể hiện tại Hình 2.9 và Hình 2.10. Khi công tắc bán dẫn S_1 mở, cuộn cảm L xả năng lượng tích lũy, tạo điện áp cảm ứng cộng hưởng với điện áp nguồn. Dòng điện chảy qua diode (phân cực thuận), chuyển năng lượng vào tụ điện, cung cấp điện áp cho tải, khiến v_{out} cao hơn v_{in} . Năng lượng từ cuộn cảm cũng tăng điện áp tụ C_1 cho chu kỳ tiếp theo. Khi S_1 đóng, dòng điện từ nguồn tích lũy năng lượng trong cuộn cảm dưới dạng từ trường, diode D_1 phân cực ngược ngăn dòng từ tụ C_2 quay lại, còn V_{out} được duy trì nhờ năng lượng trong tụ C_2 , đảm bảo cung cấp điện liên tục cho tải [24-26].



Hình 2.9 Boost Converter ở trạng thái S_1 mở



Hình 2.10 Boost Converter ở trạng thái S_1 đóng



Hình 2.11 Đáp ứng của dòng cuộn cảm với trạng thái IGBT

2.4.3 Mô hình hóa mạch tăng áp 1 chiều

Khi công tắc S_1 ở trạng thái đóng

$$V_L = V_{in} \quad (2.9)$$

$$i_C = -\frac{V_{out}}{R} \quad (2.10)$$

Khi công tắc S1 ở trạng thái mở

$$V_L = V_{in} - V_{out} \quad (2.11)$$

$$i_C = I_L - \frac{V_{out}}{R} \quad (2.12)$$

Từ phương trình (2.9), (2.10), (2.11) và (2.12), suy ra được phương trình trung bình của điện áp tại cuộn cảm (L) và dòng điện tại tụ (Cdc) trong một chu kì vận hành là:

$$\bar{V}_L = \frac{\bar{V}_{in}.t_{on} + (\bar{V}_{in} - \bar{V}_{out}).t_{off}}{t_{on} + t_{off}} \quad (2.13)$$

$$i_C = \frac{-\frac{\bar{V}_{out}}{R}.t_{on} + (\bar{I}_L - \frac{\bar{V}_{out}}{R}).t_{off}}{t_{on} + t_{off}} \quad (2.14)$$

Với $D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$, thay vào phương trình (2.13) và (2.14), ta thu được:

$$\bar{V}_L = \bar{V}_{in} - (1 - \bar{D}).\bar{V}_{out} \quad (2.15)$$

$$\bar{i}_c = (1 - \bar{D}).\bar{I}_L - \frac{\bar{V}_{out}}{R} \quad (2.16)$$

Từ phương trình (2.15) và (2.16), phương trình trạng thái của cuộn cảm (L) và tụ điện (C) được thể hiện như sau:

$$L \frac{d}{dt} \bar{I}_L = \bar{V}_{in} - (1 - \bar{D}).\bar{V}_{out} \quad (2.17)$$

$$C \frac{d}{dt} \bar{V}_{out} = (1 - \bar{D}).\bar{I}_L - \frac{\bar{V}_{out}}{R} \quad (2.18)$$

Trong trạng thái ổn định, các đạo hàm theo thời gian bằng 0, vậy từ phương trình (2.17) và (2.18), thu được:

$$\bar{V}_{out} = \frac{\bar{V}_{in}}{1 - \bar{D}} \quad (2.19)$$

$$\bar{I}_L = \frac{\bar{V}_{out}}{R(1 - \bar{D})} \quad (2.20)$$

Giả thiết hệ thống đang biến thiên tại điểm làm việc, ta sử dụng mô hình tín hiệu nhỏ. Từ phương trình (2.17) và (2.18), suy ra:

$$L \frac{d}{dt} \tilde{i}_L = \tilde{v}_{in} - (1 - \bar{D})\tilde{v}_{out} + \bar{V}_{out} \tilde{d} \quad (2.21)$$

$$C \frac{d}{dt} \tilde{v}_{out} = (1 - \bar{D})\tilde{i}_L - \tilde{d} \bar{I}_L - \frac{\tilde{v}_{out}}{R} \quad (2.22)$$

Biến đổi Laplace phương trình (2.21) và (2.22), thu được hàm truyền đạt tín hiệu nhỏ thể hiện mối quan hệ giữa điện áp đầu ra và duty cycle:

$$G_{vd}(s) = \frac{\tilde{v}_{out}(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{\frac{\bar{V}_{out}}{1 - \bar{D}}(1 - \frac{s}{w_z})}{1 + \frac{s}{w_o Q} + (\frac{s}{w_o})^2} \quad (2.23)$$

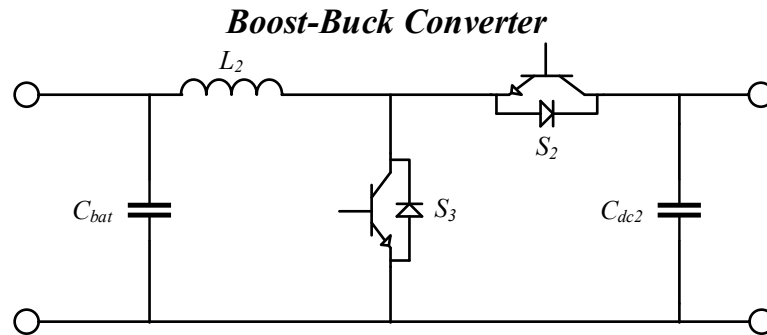
Trong đó: $\tilde{v}_{out}(s)$ là biến Laplace điện áp tín hiệu nhỏ, $\tilde{d}(s)$ là biến độ rộng xung nhiễu nhỏ, $\bar{V}_{out}$ là điện áp đầu ra ở chế độ xác lập, $w_o = 1/\sqrt{LC}$ là tần số cộng hưởng, $Q = \frac{R(1 - \bar{D})}{\sqrt{L/C}}$ là hệ số chất lượng.

2.5 Mạch tăng-giảm áp 2 chiều

2.5.1 Cấu trúc mạch tăng-giảm áp 2 chiều

Bộ chuyển đổi DC/DC hai chiều (Bidirectional Buck-Boost Converter) đóng vai trò then chốt trong hệ thống năng lượng mặt trời tích hợp pin lưu trữ. Mạch này hoạt động như cầu nối linh hoạt giữa DC bus và hệ thống pin, cho phép dòng năng lượng đi chuyển theo hai hướng: từ DC bus đến pin (chế độ Buck - sạc pin) khi năng lượng

từ tấm pin mặt trời dư thừa, và từ pin đến DC bus (chế độ Boost - xả pin) khi cần bổ sung năng lượng cho tải [22]. Với cấu trúc đơn giản gồm cuộn cảm, tụ điện và hai khóa bán dẫn điều khiển được, mạch chuyển đổi này đảm bảo hiệu suất cao trong quản lý dòng năng lượng, góp phần tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng tái tạo và nâng cao độ tin cậy của hệ thống [23]. Cấu trúc mạch tăng-giảm áp 2 chiều được minh họa tại Hình 2.12



Hình 2.12 Cấu trúc mạch tăng-giảm áp 2 chiều

Các thành phần chính của mạch Buck-Boost Converter bao gồm:

- L (Cuộn cảm): Lưu trữ năng lượng trong trường từ của nó trong quá trình chuyển mạch. Đây là thành phần quan trọng cho quá trình truyền năng lượng trong bộ chuyển đổi.
- S2 và S3 (Các khóa chuyển mạch): Đây là các khóa bán dẫn (có thể là MOSFET hoặc IGBT) điều khiển dòng năng lượng trong mạch. Việc đóng mở phối hợp của chúng cho phép thực hiện các chế độ buck (giảm áp) và boost (tăng áp).
- C_{bat} và C_{dc} (Tụ điện): Ổn định điện áp đầu vào và đầu ra cho hệ thống.

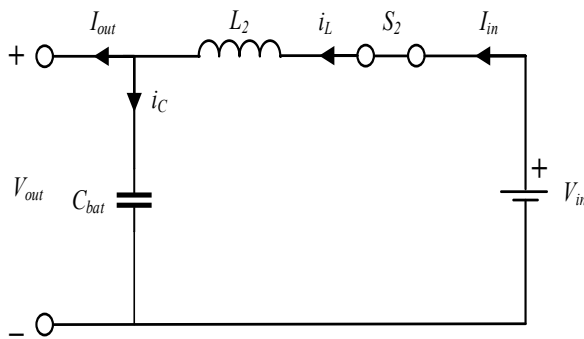
2.5.2 Nguyên lý hoạt động

Với mạch chuyển đổi 2 chiều DC/DC (Mạch tăng-giảm áp), nguyên lý hoạt động của mạch được chia ra thành 2 phần: Trạng thái Tăng áp và Trạng thái Giảm áp. Mạch chuyển đổi giữa 2 chế độ thông qua chiều của dòng điện, với dòng điện âm, tương ứng với chiều từ pin lưu trữ đến DC bus để cung cấp năng lượng vào hệ thống, thực hiện chế độ xả pin. Ngược lại, với dòng điện dương, chiều sẽ là từ DC bus đến pin lưu trữ nhằm sạc pin lưu trữ, thực hiện chế độ sạc pin. Trong 2 trạng thái, 2 công tắc S2

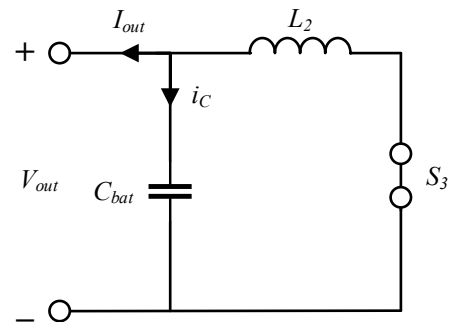
và S3 sẽ thay nhau thực hiện quá trình dẫn dòng và đóng ngắt, nhằm đáp ứng yêu cầu tăng hoặc giảm áp [22, 23].

a) Chế độ giảm áp

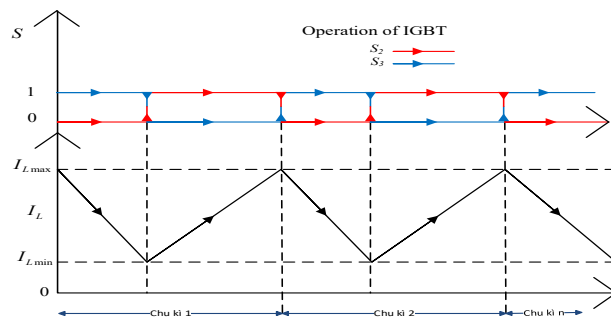
Trong chế độ giảm áp (buck), công tắc S2 được điều khiển đóng ngắt theo chu kỳ, trong khi S3 được xem như là 1 Diode để dẫn dòng. Mạch lúc này hoạt động như một bộ chuyển đổi buck truyền thống. Cấu trúc mạch trong từng trạng thái đóng/ngắt của mạch Buck-Boost được minh họa tại Hình 2.13 và Hình 2.14. Khi S2 dẫn (ON), dòng điện từ nguồn V_{in} đi qua S2, cuộn cảm L , và trở về cực âm, khiến cuộn cảm tích trữ năng lượng, dòng điện qua cuộn cảm tăng tuyến tính. Khi S2 ngắt (OFF), cuộn cảm xả năng lượng qua diode, duy trì dòng qua tải và tụ điện, làm dòng giảm tuyến tính. Dạng sóng dòng điện cuộn cảm tương ứng với trạng thái hoạt động của S2 và S3 được thể hiện tại Hình 2.15.



Hình 2.13 Cấu trúc mạch Buck-Boost Converter khi S3 mở trong chế độ giảm áp



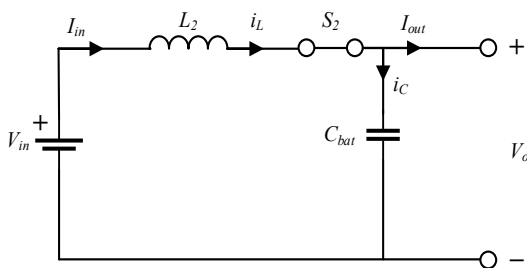
Hình 2.14 Cấu trúc mạch Buck-Boost Converter khi S3 đóng trong chế độ giảm áp



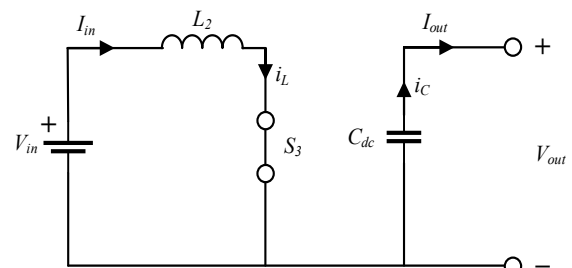
Hình 2.15 Biến thiên của dòng cuộn cảm trong chế độ giảm áp

b) Chế độ tăng áp

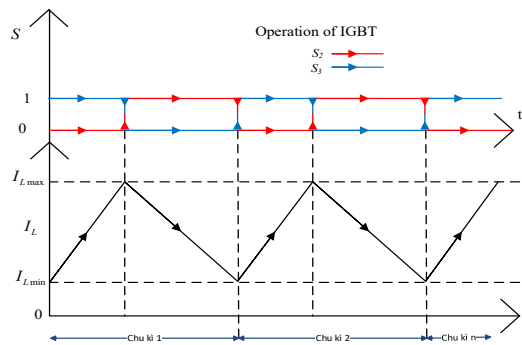
Trong chế độ tăng áp (boost), công tắc S3 được điều khiển đóng ngắt theo chu kỳ, trong khi S2 đóng liên tục và đóng vai trò như một diode. Mạch hoạt động tương tự bộ chuyển đổi boost truyền thống. Hình 2.16 và Hình 2.17 minh họa cấu trúc mạch trong hai trạng thái đóng/ngắt của S3. Khi S3 dẫn (ON), dòng điện từ nguồn V_{in} đi qua S2, cuộn cảm L, và trở về cực âm, khiến cuộn cảm tích trữ năng lượng, dòng điện qua cuộn cảm tăng tuyến tính. Khi S3 ngắt (OFF), năng lượng từ cuộn cảm được xả thông qua S3 đến tải và tụ điện, làm tăng điện áp đầu ra; dòng điện giảm tuyến tính. Dạng sóng dòng điện cuộn cảm tương ứng với trạng thái hoạt động của S2 và S3 được thể hiện ở Hình 2.18.



Hình 2.16 Cấu trúc mạch Buck-Boost Converter khi S2 đóng trong chế độ tăng áp



Hình 2.17 Cấu trúc mạch Buck-Boost Converter khi S2 mở trong chế độ tăng áp



Hình 2.18 Biến thiên của dòng cuộn cảm trong chế độ tăng áp

2.5.3 Mô hình hóa mạch tăng-giảm áp 2 chiều

a. Mô hình hóa mạch tăng-giảm áp 2 chiều chế độ giảm áp

Từ Hình 2.13 và Hình 2.14, điện áp tại cuộn cảm và dòng điện tại tụ trong 2 trạng thái đóng/ngắt của S3 là:

Khi Công tắc S3 đóng

$$V_L = -V_{out} \quad (2.24)$$

$$i_c = i_L - \frac{V_{out}}{R} \quad (2.25)$$

Khi Công tắc S3 mở

$$V_L = V_{in} - V_{out} \quad (2.26)$$

$$i_c = i_L - \frac{V_{out}}{R} \quad (2.27)$$

Từ các phương trình (2.24), (2.25), (2.26) và (2.27), suy ra được phương trình trung bình hóa:

$$\bar{V}_L = \frac{(\bar{V}_{in} - \bar{V}_{out}) \cdot t_{on} - \bar{V}_{out} \cdot t_{off}}{t_{on} + t_{off}} \quad (2.28)$$

$$\bar{i}_c = \frac{(\bar{i}_L - \frac{\bar{V}_{out}}{R}) \cdot t_{on} + (\bar{i}_L - \frac{\bar{V}_{out}}{R}) \cdot t_{off}}{t_{on} + t_{off}} \quad (2.29)$$

Với $D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$, thay vào phương trình (2.28) và (2.29), ta thu được:

$$\bar{V}_L = \bar{V}_{in} \cdot D - \bar{V}_{out} \quad (2.30)$$

$$\bar{i}_c = \bar{i}_L - \frac{\bar{V}_{out}}{R} \quad (2.31)$$

Từ phương trình (2.30) và (2.31), phương trình trạng thái của cuộn cảm (L) và tụ điện (C) được thể hiện như sau:

$$L \frac{d}{dt} \bar{i}_L = \bar{V}_{in} \cdot D - \bar{V}_{out} \quad (2.32)$$

$$C \frac{d}{dt} \bar{V}_{out} = \bar{i}_L - \frac{\bar{V}_{out}}{R} \quad (2.33)$$

Trong trạng thái ổn định, các đạo hàm theo thời gian bằng 0, vậy từ phương trình (2.32) và (2.33), thu được:

$$\bar{V}_{out} = \bar{V}_{in} \cdot \bar{D} \quad (2.34)$$

$$\bar{i}_L = \frac{\bar{V}_{out}}{R} \quad (2.35)$$

Giả thiết hệ thống đang biến thiên tại điểm làm việc, tuyến tính hóa quanh điểm làm việc, với $x(t) = \bar{X} + \tilde{x}$. Trong đó, $\bar{X}$ là giá trị tín hiệu lớn và $\tilde{x}$ là giá trị tín hiệu nhỏ. Áp dụng với phương trình (2.34) và (2.35), thu được phương trình tín hiệu nhỏ được thể hiện như sau:

$$L \frac{d}{dt} \tilde{i}_L = \tilde{v}_{in} \cdot \bar{D} + \bar{V}_{in} \cdot \tilde{d} - \tilde{v}_{out} \quad (2.36)$$

$$C \frac{d}{dt} \tilde{v}_{out} = \tilde{i}_L - \frac{\tilde{v}_{out}}{R} \quad (2.37)$$

Chuyển đổi phương trình (2.36) và (2.37) sang miền Laplace, thu được:

$$sL\tilde{i}_L(s) = \bar{D}\tilde{v}_{in}(s) + \bar{V}_{in}\tilde{d}(s) - \tilde{v}_{out}(s) \quad (2.38)$$

$$sC\tilde{v}_{out}(s) = \tilde{i}_L(s) - \frac{\tilde{v}_{out}(s)}{R} \quad (2.39)$$

Từ 2 phương trình (2.38) và (2.39), rút ra được các hàm truyền:

- Hàm truyền từ duty cycle đến điện áp ra:

$$G_{vd}(s) = \frac{\tilde{v}_{out}(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{\bar{V}_{in}}{s^2 LC + \frac{sL}{R} + 1} \quad (2.40)$$

- Hàm truyền từ điện áp vào đến điện áp ra:

$$G_{vg}(s) = \frac{\tilde{v}_{out}(s)}{\tilde{v}_{in}(s)} = \frac{\bar{D}}{s^2 LC + \frac{sL}{R} + 1} \quad (2.41)$$

- Hàm truyền từ dòng cuộn cảm đến duty cycle:

$$G_{id}(s) = \frac{\tilde{i}_L(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{\bar{V}_{in}(1 + sCR)}{R(s^2 LC + \frac{sL}{R} + 1)} \quad (2.42)$$

- Hàm truyền từ dòng cuộn cảm đến điện áp ra:

$$G_{vi}(s) = \frac{\tilde{v}_{out}(s)}{\tilde{i}_L(s)} = \frac{R}{1 + sCR} \quad (2.43)$$

b. Mô hình hóa mạch tăng-giảm áp 2 chiều chế độ tăng áp

Từ Hình 2.16 và Hình 2.17, điện áp tại cuộn cảm và dòng điện tại tụ trong 2 trạng thái đóng/ngắt của S3 là:

Khi Công tắc S2 đóng

$$V_L = V_{in} \quad (2.44)$$

$$i_c = -\frac{V_{out}}{R} \quad (2.45)$$

Khi Công tắc S2 mở

$$V_L = V_{in} - V_{out} \quad (2.46)$$

$$i_c = I_L - \frac{V_{out}}{R} \quad (2.47)$$

Từ các phương trình (2.44), (2.45), (2.46) và (2.47), suy ra được phương trình trung bình hóa:

$$\bar{V}_L = \frac{\bar{V}_{in}.t_{on} + (\bar{V}_{in} - \bar{V}_{out}).t_{off}}{t_{on} + t_{off}} \quad (2.48)$$

$$i_C = \frac{-\frac{\bar{V}_{out}}{R}.t_{on} + (\bar{I}_L - \frac{\bar{V}_{out}}{R}).t_{off}}{t_{on} + t_{off}} \quad (2.49)$$

Với $D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$, thay vào phương trình (2.48) và (2.49), ta thu được:

$$\bar{V}_L = \bar{V}_{in} \cdot \bar{D} - \bar{V}_{out} \quad (2.50)$$

$$\bar{i}_C = \bar{i}_L - \frac{\bar{V}_{out}}{R} \quad (2.51)$$

Từ phương trình (2.50) và (2.51), phương trình trạng thái của cuộn cảm (L) và tụ điện (C) được thể hiện như sau:

$$L \frac{d}{dt} \bar{I}_L = \bar{V}_{in} - (1 - \bar{D}) \cdot \bar{V}_{out} \quad (2.52)$$

$$C \frac{d}{dt} \bar{V}_{out} = (1 - \bar{D}) \cdot \bar{I}_L - \frac{\bar{V}_{out}}{R} \quad (2.53)$$

Trong trạng thái ổn định, các đạo hàm theo thời gian bằng 0, vậy từ phương trình (2.52) và (2.53), thu được:

$$\bar{V}_{out} = \frac{\bar{V}_{in}}{1 - \bar{D}} \quad (2.54)$$

$$\bar{I}_L = \frac{\bar{V}_{out}}{R(1 - \bar{D})} \quad (2.55)$$

Giả thiết hệ thống đang biến thiên tại điểm làm việc, tuyến tính hóa quanh điểm làm việc, với $x(t) = \bar{X} + \tilde{x}$. Trong đó, $\bar{X}$ là giá trị tín hiệu lớn và $\tilde{x}$ là giá trị tín hiệu nhỏ. Áp dụng với các phương trình (2.54) và (2.55), thu được phương trình tín hiệu nhỏ được thể hiện như sau:

$$L \frac{d}{dt} \tilde{i}_L = \tilde{v}_{in} - (1 - \bar{D}) \tilde{v}_{out} + \bar{V}_{out} \tilde{d} \quad (2.56)$$

$$C \frac{d}{dt} \tilde{v}_{out} = (1 - \langle D \rangle) \tilde{i}_L - \tilde{d} \cdot \langle I_L \rangle - \frac{\tilde{v}_{out}}{R} \quad (2.57)$$

Chuyển đổi phương trình (2.56) và (2.57) sang miền Laplace, thu được:

$$sL\tilde{i}_L = \tilde{v}_{in}(s) - (1 - \bar{D})\tilde{v}_{out}(s) + \bar{V}_{out}\tilde{d}(s) \quad (2.58)$$

$$sC\tilde{v}_{out} = (1 - \bar{D})\tilde{i}_L(s) - \bar{I}_L\tilde{d}(s) + \frac{\tilde{v}_{out}(s)}{R} \quad (2.59)$$

Từ 2 phương trình (2.58) và (2.59), rút ra được các hàm truyền:

- Hàm truyền từ duty cycle đến điện áp ra:

$$G_{vd}(s) = \frac{\tilde{v}_{out}(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{(1 - \bar{D})\bar{V}_{out} - s\bar{I}_L L}{s^2 LC + s\frac{L}{R} + (1 - \bar{D})^2} \quad (2.60)$$

- Hàm truyền từ duty cycle đến dòng cuộn cảm:

$$G_{id}(s) = \frac{\tilde{i}_L(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{\bar{V}_{out}sC + \frac{\bar{V}_{out}}{R} + \bar{I}_L(1 - \bar{D})}{s^2 LC + s\frac{L}{R} + (1 - \bar{D})^2} \quad (2.61)$$

- Hàm truyền từ dòng cuộn cảm đến điện áp ra:

$$G_{vi}(s) = \frac{\tilde{v}_{out}(s)}{\tilde{i}_L(s)} = \frac{1 - \bar{D}}{sC + \frac{1}{R}} \quad (2.62)$$

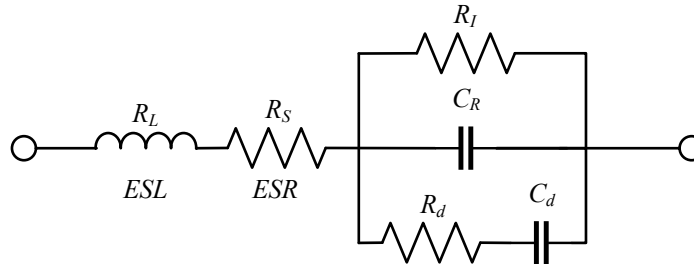
2.6 Liên kết DC

2.6.1 Khái niệm và vai trò

DC-link là phần tử trung gian đóng vai trò kết nối và truyền tải năng lượng giữa các khối chức năng trong hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nối lưới, đặc biệt là giữa bộ chuyển đổi DC/DC (Boost, Buck-Boost) và bộ nghịch lưu DC/AC. DC-link thường được tạo thành bởi một tụ điện công suất lớn, có nhiệm vụ ổn định điện áp DC bus, hấp thụ dao động công suất tức thời, và làm mềm nhiễu xung do chuyển mạch gây ra. Việc đảm bảo điện áp ổn định tại DC-link là điều kiện cần thiết để bộ nghịch

lưu hoạt động chính xác, đồng thời góp phần nâng cao chất lượng điện năng đầu ra. Trong một số ứng dụng, chúng cũng được sử dụng để cung cấp đủ năng lượng trong thời gian chờ [27].

2.6.2 Mô hình mạch điện tương đương



Hình 2.19 Cấu trúc mạch tương đương của tụ điện DC-link [29]

Cấu trúc mạch tương đương của tụ điện được minh họa trong Hình 2.19. Trong đó: C_R là điện dung, R_S điện trở tổn hao nội tại của tụ ở tần số cao, R_L là cảm kháng và tổn hao do dây dẫn bên trong tụ, R_I là điện trở cách điện, thường lớn; R_d là điện trở tương đương tổn thất điện môi do hấp thụ điện môi và phân cực phân tử; và C_d là điện dung hấp thụ điện môi vốn có, cả hai thường chỉ cần được xem xét trong tụ điện phân hoạt động ở tần số cao [29]. Đối với mạch RLC nối tiếp tương đương, phương trình cơ bản có dạng:

$$LC \frac{d^2 v_C}{dt^2} + RC \frac{dv_C}{dt} + v_C = v_{in} \quad (2.63)$$

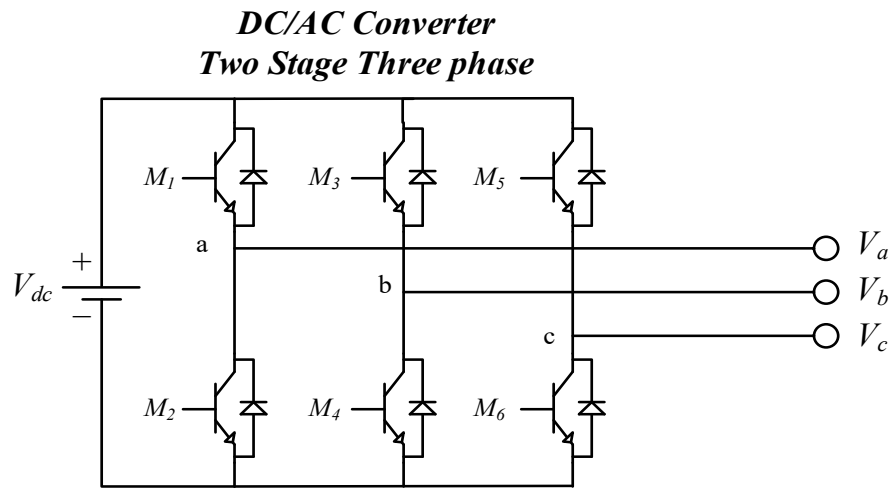
Trong đó, điện áp trên tụ điện chính C_R được tính theo định luật Kirchhoff.

2.7 Mạch nghịch lưu 2 chiều

2.7.1 Cấu trúc mạch và nguyên lý hoạt động của mạch chuyển đổi DC/AC

Mạch nghịch lưu 3 pha chuyển đổi điện áp một chiều (DC) thành điện áp xoay chiều (AC) 3 pha. Cấu trúc cơ bản gồm 6 khóa bán dẫn công suất (thường là IGBT) được bố trí thành 3 nhánh, mỗi nhánh điều khiển một pha. Trong mỗi nhánh, hai khóa bán dẫn hoạt động đối xứng với nhau, khi một khóa đóng thì khóa còn lại mở, tạo ra hai mức điện áp đầu ra ($+V_{dc}/2$ và $-V_{dc}/2$), trình tự đóng cắt IGBT được mô tả ở Hình 2.22, Hình 2.23 và Hình 2.24

Các khóa được điều khiển bằng kỹ thuật điều chế độ rộng xung (PWM), trong đó tín hiệu tham chiếu hình sin ba pha (lệch nhau 120°) được so sánh với sóng mang hình tam giác để tạo ra các xung điều khiển. Điện áp đầu ra dây-dây có ba mức (+V_{dc}, 0, -V_{dc}) với dạng sóng xấp xỉ hình sin. Thông qua việc điều chỉnh độ sâu điều chế và tần số của tín hiệu tham chiếu, mạch nghịch lưu có thể điều khiển linh hoạt cả biên độ và tần số của điện áp đầu ra.



Hình 2.20 Cấu trúc mạch nghịch lưu 3 pha 2 mức

a. Phương trình trạng thái của DC Bus trong mạch nghịch lưu DC/AC

Phương trình trạng thái của DC bus được xây dựng dựa trên định luật Kirchhoff và mối quan hệ giữa dòng điện qua tụ DC-link và điện áp trên tụ [48]:

$$I_{C_{DC}} = C_{DC} \frac{dV_{DC}}{dt} \quad (2.64)$$

Dòng điện qua tụ được xác định bởi [48]:

$$I_{C_{DC}} = I_{DC,in} - I_{DC,out} \quad (2.65)$$

Trong đó : $I_{DC,in}$ là dòng điện vào DC bus và $I_{DC,out}$ dòng điện từ DC bus vào bộ nghịch lưu

Dòng điện $I_{DC,out}$ là tổng dòng điện được rút ra từ DC bus bởi các nhánh trong bộ nghịch lưu. Dòng điện $I_{DC,out}$ phụ thuộc vào trạng thái đóng cắt của IGBT dòng điện pha (I_a, I_b, I_c) [26]. Ta biểu diễn được dòng điện $I_{DC,out}$:

$$I_{DC,out} = S_1 I_a + S_3 I_b + S_5 I_c \quad (2.66)$$

Thay phương trình (2.66),(2.65) vào phương trình (2.64). Ta có

$$C_{DC} \frac{dV_{DC}}{dt} = I_{DC,in} - (S_1 I_a + S_3 I_b + S_5 I_c) \quad (2.67)$$

Trong đó: S_1, S_3, S_5 là trạng thái đóng/mở của IGBT được điều khiển bởi PWM

Khi mạch nghịch lưu DC/AC được kết nối với lưới, dòng điện pha (I_a, I_b, I_c) sẽ chuyển đổi sang hệ tọa độ dq (qua các phép biến đổi Clark và Park). Ma trận Clark [54] :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

Dòng điện pha sau khi chuyển đổi từ hệ abc sang $\alpha\beta$

$$I_\alpha = \frac{2}{3} \left(I_a - \frac{1}{2} I_b - \frac{1}{2} I_c \right) \quad (2.69)$$

$$I_\beta = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} I_b - \frac{\sqrt{3}}{2} I_c \right) \quad (2.7)$$

Tiếp tục sử dụng phép biến đổi Park chuyển đổi từ hệ $\alpha\beta$ sang dq [54]

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

Dòng điện sau khi được chuyển đổi:

$$I_d = I_\alpha \cos(\theta) + I_\beta \sin(\theta) \quad (2.72)$$

$$I_q = -I_\alpha \sin(\theta) + I_\beta \cos(\theta) \quad (2.73)$$

Trong hệ tọa độ dq, công suất tức thời ở AC được tính như sau [51]:

$$P_{AC} = \frac{3}{2} V_d I_d + V_d I_d \quad (2.74)$$

Công suất từ DC bus được liên kết với công suất AC:

$$P_{DC} = V_{DC} I_{DC,out} \approx P_{AC} + P_{loss}$$

P_{loss} là tổn hao do quá trình đóng ngắt IGBT và rất là nhỏ

Từ phương trình (2.68) ta suy ra được phương trình dòng điện $I_{DC,out}$ trong hệ tọa độ dq [51]:

$$I_{DC,out} = \frac{3}{2} \frac{V_d I_d + V_d I_d}{V_{DC}} \quad (2.75)$$

Thay phương trình (2.69) và phương trình trạng thái (2.67) ta có phương trình trạng thái của Dc bus trong tọa độ dq [51]:

$$C_{DC} \frac{dV_{DC}}{dt} = I_{DC,in} - \frac{3}{2} \frac{V_d I_d + V_q I_q}{V_{DC}} \quad (2.76)$$

2.7.2 Mô hình hóa trạng thái đóng cắt của IGBT

Mạch chuyển đổi DC/AC 3 pha 2 mức gồm: 6 IGBT được sắp xếp thành 3 nhánh, mỗi nhánh gồm 2 IGBT, Nguồn DC cung cấp điện áp V_{DC} . Điều khiển đóng cắt IGBT và phương pháp được sử dụng là phương pháp PWM. Mỗi nhánh của mạch tạo ra 1 điện áp đầu ra 2 mức $+V_{DC}$ hoặc $-V_{DC}$ tùy thuộc vào trạng thái đóng cắt của IGBT. Nguyên tắc hoạt động: Trong cùng 1 nhánh 2 IGBT sẽ không bao giờ đóng cắt cùng một lúc để tránh ngắn mạch nguồn DC. Do đó S_1, S_2 cần có trạng thái bổ sung, với 3 nhánh mỗi nhánh có 2 trạng thái từ đó ta có thể tính có tổng cộng 8 trạng thái đóng cắt [50] (vector điện áp)

- Quy tắc đóng cắt [47] :

- Trong mỗi nhánh, 2 IGBT hoạt động bổ sung: $S_1 + S_2 = 1$
- Nếu $m_a > V_{carrier}$ $S_1=1$ (đóng), $S_2=0$ (mở) $\rightarrow V_{sa} = +V_{DC}/2$
- Nếu $m_a \leq V_{carrier}$ $S_1=0$ (đóng), $S_2=1$ (mở) $\rightarrow V_{sa} = -V_{DC}/2$

Bảng 2.3 Bảng trạng thái đóng ngắt của IGBT và giá trị điện áp tại các giá trị vector điện áp

Vector	S_1	S_3	S_5	V_{sa}	V_{sb}	V_{sc}	Điều kiện PWM
V_0	0	0	0	$-V_{DC}/2$	$-V_{DC}/2$	$-V_{DC}/2$	$m_a, m_b, m_c \leq V_{carrier}$
V_1	1	0	0	$+V_{DC}/2$	$-V_{DC}/2$	$-V_{DC}/2$	$m_a > V_{carrier}$ $m_b, m_c \leq V_{carrier}$
V_2	1	1	0	$+V_{DC}/2$	$+V_{DC}/2$	$-V_{DC}/2$	$m_a, m_b > V_{carrier}$ $m_c \leq V_{carrier}$
V_3	0	1	0	$-V_{DC}/2$	$+V_{DC}/2$	$-V_{DC}/2$	$m_b > V_{carrier}$ $m_a, m_c \leq V_{carrier}$
V_4	0	1	1	$-V_{DC}/2$	$+V_{DC}/2$	$+V_{DC}/2$	$m_b, m_c > V_{carrier}$ $m_a \leq V_{carrier}$
V_5	0	0	1	$-V_{DC}/2$	$-V_{DC}/2$	$+V_{DC}/2$	$m_c > V_{carrier}$ $m_b, m_a \leq V_{carrier}$
V_6	1	0	1	$+V_{DC}/2$	$-V_{DC}/2$	$+V_{DC}/2$	$m_a, m_c > V_{carrier}$ $m_b \leq V_{carrier}$
V_7	1	1	1	$+V_{DC}/2$	$+V_{DC}/2$	$+V_{DC}/2$	$m_a, m_b, m_c > V_{carrier}$

Trong đó:

- V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : điện áp pha so với điểm giữ điểm giữa nguồn DC
- $V_{carrier}$: sóng tam giác, có biên độ từ -1 đến 1
- Điều kiện PWM: dựa trên việc so sánh với tín hiệu tham chiếu

a. Chu kỳ đóng cắt của các IGBT

Phương trình tổng hợp vector điện áp [54].

$$\vec{v} = \frac{T_1}{T_s} V_1 + \frac{T_2}{T_s} V_2 + \frac{T_0}{T_s} V_0 \quad (2.77)$$

Trong đó: $\vec{v}$ là Vector điện áp tham chiếu, T_s là Chu kỳ lấy mẫu PWM

Trình tự đóng cắt được sắp xếp đối xứng: $V_0 \rightarrow V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_7 \rightarrow V_2 \rightarrow V_1 \rightarrow V_0$ [47]

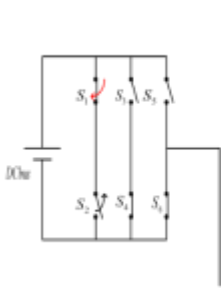
- Bắt đầu với V_0 (000): Tất cả các IGBT nhánh trên mở
- Chuyển sang V_1 (100): S_1 đóng, S_3 và S_5 mở
- Tiếp tục chuyển sang V_2 (110): S_1 và S_3 đóng, S_5 mở
- Kết thúc bằng V_7 (111): tất cả IGBT nhánh trên đóng
- Sau đó, trình tự đảo ngược lại để đảm bảo đối xứng

Tính toán thời gian đóng cắt:

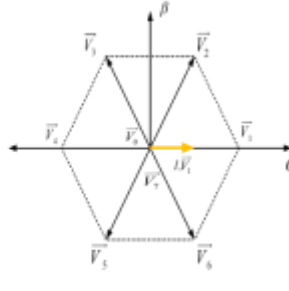
$$\vec{v}.T_s = V_1.T_1 + V_2.T_2 + V_0.T_0 \quad (2.78)$$

Tác động đến IGBT:

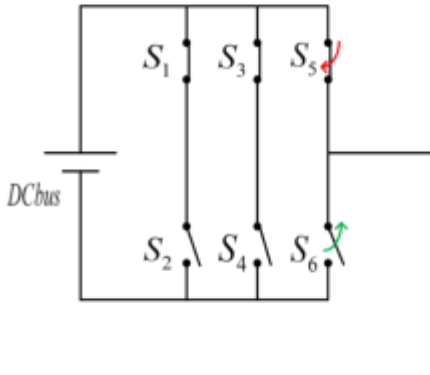
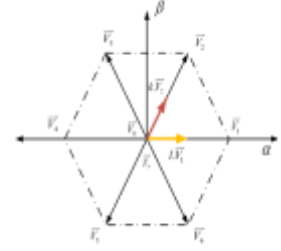
- Mỗi IGBT chịu tần số chuyển mạch, dẫn đến tổn hao dẫn điện
- Trình tự đóng ngắt hoạt động đối xứng giúp giảm sóng hài [54]



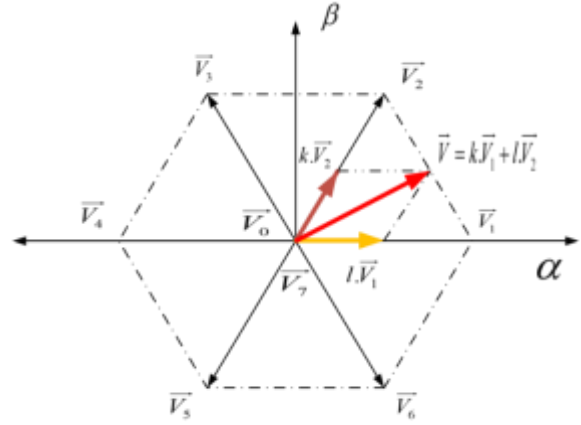
Hình 2.21 Trình tự V1: S1 đóng, S3 và S5 mở



Hình 2.22 Trình tự V2: S1 và S2 đóng, S3 mở



Hình 2.23 Trình tự của vector $\vec{v}$



b. Điều chế PWM

Điện áp đầu ra từ nguồn DC sang điện áp Ac 3 pha [54] :

$$V'_{sa} = m_a(t) \frac{V_{DC}}{2} \quad (2.79)$$

$$V'_{sb} = m_b(t) \frac{V_{DC}}{2} \quad (2.80)$$

$$V_{sc}' = m_c(t) \frac{V_{DC}}{2} \quad (2.81)$$

Từ các phương trình (2.79)(2.80)(2.81) để đảm bảo điện áp và dòng điện 3 pha của bộ nghịch lưu cân bằng các tín hiệu điều chế m_a , m_b , m_c cần được tạo ra sao cho tạo thành một hệ thống 3 pha cân bằng[65], và thường chúng được tạo ra bởi 1 sơ đồ điều khiển vòng kín. Tín hiệu điều chế 3 pha cân bằng, tạo ra tín hiệu điều chế 3 pha lệch nhau 120° để đảm bảo điện áp 3 pha AC cân bằng [53] .

$$m_a = \hat{m}(t) \cos[\omega t] \quad (2.82)$$

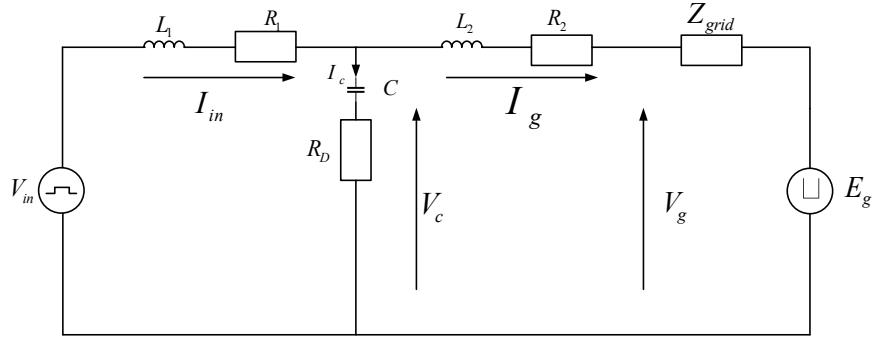
$$m_b = \hat{m}(t) \cos\left[\omega t - \frac{2\pi}{3}\right] \quad (2.83)$$

$$m_c = \hat{m}(t) \cos\left[\omega t + \frac{2\pi}{3}\right] \quad (2.84)$$

Công thức này đảm bảo điện áp đầu ra là 1 hệ thống 3 pha đồng bộ, phù hợp với lưới điện. Sử dụng hàm cos với các góc lệch pha $\frac{2\pi}{3}$ để tạo hệ thống 3 pha đồng bộ[66] ,được sử dụng để mô phỏng hình sin lý tưởng vốn là đặc trưng của lưới AC[66]. Từ đó cho phép điều khiển công suất phản kháng và công suất hoạt động thông qua việc thay đổi $\hat{m}(t)$ và $\varepsilon(t)$ trong sơ đồ điều khiển vòng kín[65].

2.8 Mạch lọc AC

Một bộ lọc LCL thường được sử dụng để kết nối bộ chuyển đổi hòa lưới điện nhằm lọc các bậc hài bậc cao do bộ chuyển đổi tạo ra. Để đạt được hiệu suất lọc cao đáp ứng yêu cầu nghiêm ngặt của lưới điện cũng như cân bằng chi phí, một thiết kế tối ưu cho bộ lọc LCL là rất cần thiết. Mạch 3 pha của bộ chuyển được kết nối với lưới và mạch lọc LCL và chuyển đổi sang mạch tương đương 1 pha (Hình 2.24) để đơn giản hóa phân tích.



Hình 2.24 Mạch tương đương 1 pha

2.8.1 Mô hình hóa cho mạch lọc LCL

Hàm truyền cho bộ lọc LCL

$$H(s) = \frac{I_g(s)}{V_{in}(s)} \quad (2.85)$$

Trong đó: $I_g(s)$ dòng điện lưới và $V_{in}(s)$ điện áp của biến tần

Áp dụng định luật Kirchhoff để xây dựng mô hình toán học trong miền s (Laplace)

$$I_{in} - I_c - I_g = 0 \quad (2.86)$$

Điện áp trên cuộn cảm L_1 :

$$V_{in} - V_c = I_{in}(sL_1 + R_1) \quad (2.87)$$

Điện áp trên cuộn cảm L_2 (với $V_g = 0$ tại tần số hài):

$$V_c - V_g = I_g \left(\frac{1}{sC} + R_2 \right) \quad (2.88)$$

Điện áp trên tụ C và điện trở giảm chấn R_D

$$V_c = I_c \left(\frac{1}{sC} + R_D \right) \quad (2.89)$$

Từ phương trình (2.82) và (2.83). Ta suy ra được hàm truyền

$$I_g(sL_2 + R_2) = I_c \left(\frac{1}{sC} + R_D \right) \quad (2.90)$$

Suy ra:

$$I_c = I_g \cdot \frac{s^2 CL_2 + sCR_2}{sCR_D + 1} \quad (2.91)$$

Thay phương trình (2.91) vào phương trình (2.80). Ta có:

$$I_{in} = I_g + I_g \cdot \frac{s^2 CL_2 + sCR_2}{sCR_D + 1} \quad (2.92)$$

Thay phương trình (2.86) và phương trình (2.83) vào phương trình (2.81). Ta có

$$\begin{aligned} V_{in} &= I_g (sL_2 + R_2) + (sL_1 + R_1) \left[I_g + I_g \cdot \frac{s^2 CL_2 + sCR_2}{sCR_D + 1} \right] \\ &= I_g \left[(sL_2 + R_2) + (sL_1 + R_1) \cdot \left(1 + \frac{s^2 CL_2 + sCR_2}{sCR_D + 1} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.93)$$

Thay phương trình (2.87) vào hàm truyền của bộ lọc LCL:

$$H_{LCL} = \frac{sCR_D + 1}{S^3 CL_1 L_2 + s^2 C [L_1 (R_2 + R_D) + L_2 (R_1 + R_D)] + s [L_1 + L_2 + C (R_1 R_2 + R_1 R_D + R_2 R_D)] + R_1 + R_2} \quad (2.94)$$

Nếu không có điện trở giảm chấn ($R_D = 0$). Ta có:

$$H_{LCL} = \frac{1}{S^3 CL_1 L_2 + s^2 C [L_1 R_2 + L_2 R_1] + s [L_1 + L_2 + C (R_1 R_2)] + R_1 + R_2} \quad (2.95)$$

2.9 Kết luận

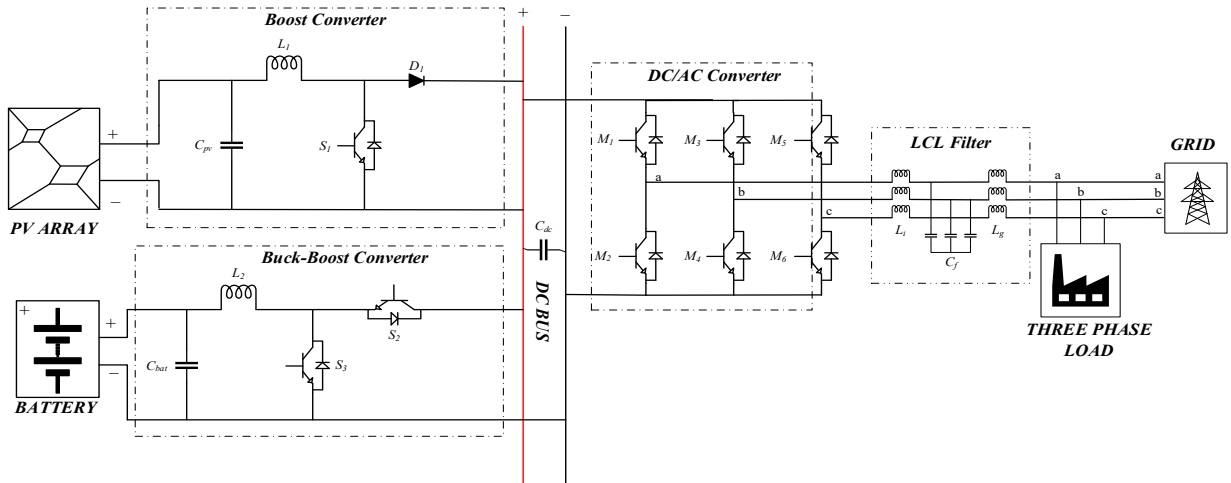
Chương này đã xây dựng một cách hệ thống các cơ sở lý thuyết cần thiết cho hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nổi lưới. Các mô hình toán học đã được thiết lập cho từng thành phần chính, bao gồm: mô hình diode đơn cho tấm pin PV với đặc tuyến I–V, mô hình RC bậc nhất cho pin lithium-ion, phương trình trạng thái cho các bộ chuyển đổi DC/DC, DC/AC, tụ DC-link và mạch lọc LCL. Việc phân tích nguyên lý hoạt động của mạch Boost, Buck-Boost hai chiều, nghịch lưu hai mức ba pha và bộ lọc LCL đã tạo nền tảng vững chắc cho thiết kế điều khiển. Từ các phương trình đặc trưng, các hàm truyền đạt được xây dựng nhằm phục vụ việc tổng hợp bộ điều khiển và phân tích ổn định trong các chế độ vận hành khác nhau. Đặc biệt, mô hình hóa nghịch lưu trong hệ tọa độ dq cùng với phân tích chi tiết bộ lọc LCL là cơ sở then chốt cho việc điều khiển chất lượng điện năng và đồng bộ lưới. Những cơ sở lý thuyết này

đóng vai trò tiền đề cho việc thiết kế các thuật toán điều khiển MPPT, EMS và bộ điều khiển PI trình bày trong chương tiếp theo

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ HỆ THỐNG ĐIỆN MẶT TRỜI CÓ LƯU TRỮ NỔI LƯỚI

3.1 Kiến trúc hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nổi lưới

3.1.1 Cấu trúc mạch của hệ thống



Hình 3.1 Cấu trúc mạch của hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nổi lưới

3.1.2 Nguyên lý hoạt động của hệ thống

Hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nổi lưới hoạt động linh hoạt và hiệu quả bằng cách tối ưu hóa nguồn PV, pin lưu trữ và lưới điện để đảm bảo cung cấp điện liên tục và ổn định trong mọi điều kiện :

1 Khi dư thừa nguồn năng lượng từ PV

Trong điều kiện này tấm pin năng lượng mặt trời tạo ra nhiều hơn năng lượng tải yêu cầu. Bộ Boost converter sẽ thông qua thuật toán MPPT điều chỉnh giá trị điện áp sao cho đạt tại điểm công suất tối đa. Năng lượng từ DC Bus sẽ qua bộ nghịch lưu DC/AC biến đổi dòng điện từ DC sang AC để cung cấp cho tải. Với năng lượng dư thừa thì hệ thống sẽ sạc cho pin tùy vào SOC của pin, nếu SOC pin đầy thì năng lượng dư thừa sẽ được đẩy lên lưới điện.

2 Khi thiếu hụt nguồn năng lượng từ PV

Lúc này năng lượng từ tấm pin năng lượng mặt trời ít hơn năng lượng tải yêu cầu. PV sẽ cung cấp 1 phần năng lượng thông qua Boost Converter và sau đó qua bộ nghịch lưu DC/AC để cung cấp năng lượng cho tải và (sạc cho pin nếu SOC quá thấp),

với yêu cầu năng lượng của tải còn thiếu sẽ được cung cấp từ pin lưu trữ. Khi mà năng lượng từ pin lưu trữ và PV không đủ với như cầu của tải thì hệ thống sẽ lấy thêm từ lưới.

3 Khi không có năng lượng từ PV (ban đêm hoặc trời âm u không đủ ánh sáng)

Lúc này tấm pin năng lượng mặt trời không tạo ra năng lượng và Boost converter sẽ không hoạt động. Tải sẽ được cung cấp năng lượng từ pin lưu trữ và lưới. Pin lưu trữ sẽ cung cấp năng lượng thông qua bộ Buck-Boost nâng điện áp lên mức phù hợp với DC Bus và qua bộ nghịch lưu DC/AC để cung cấp cho tải. Trong trường hợp năng lượng pin không đủ thì sẽ lấy thêm từ tải. Và trong trường hợp SOC pin quá thấp thì tải sẽ lấy năng lượng từ mỗi lưới và 1 phần sẽ sạc cho pin lưu trữ.

3.2 Phân tích và tính chọn linh kiện

3.2.1 Mạch tăng áp 1 chiều

Dựa vào các phương trình được đưa ra tại phần 2.4.3, ta đưa ra được các công thức tính chọn tham số cho linh kiện trong mạch tăng áp 1 chiều.

Từ phương trình (2.19), Hệ số chu kì được tính theo công thức:

$$D = 1 - \frac{V_{in(min)} \cdot \eta}{V_{out}} \quad (3.1)$$

Với $V_{in(min)}$ là điện áp vào tối thiểu, V_{out} là điện áp ra mong muốn, η là hiệu suất của bộ chuyển đổi.

Dòng gợn cuộn cảm:

$$\Delta i_L = \frac{V_{in(min)} \cdot D}{L \cdot f_s} \quad (3.2)$$

Với $V_{in(min)}$ là điện áp vào tối thiểu, D là hệ số chu kì được tính tại phương trình (3.1), f_s là tần số chuyển mạch tối thiểu, L là giá trị cuộn cảm được chọn.

Từ đó, giá trị cuộn cảm là:

$$L = \frac{V_{in}(V_{out} - V_{in})}{\Delta i_L \cdot f_s \cdot V_{out}} \quad (3.3)$$

Với V_{in} là điện áp đầu vào, V_{out} là điện áp ra mong muốn, ΔI_L là dòng gợn cuộn cảm được tính tại phương trình (3.2), f_s là tần số chuyển mạch tối thiểu.

Giá trị tụ điện là:

$$C = \frac{I_{out(max)} \cdot D}{f_s \cdot \Delta V_{out}} \quad (3.4)$$

Với $I_{out(max)}$ là dòng điện đầu ra tối đa, D là hệ số chu kì được tính tại phương trình (3.1),

f_s là tần số chuyển mạch tối thiểu, ΔV_{out} là gợn sóng điện áp đầu ra mong muốn.

3.2.2 Mạch tăng-giảm áp 2 chiều

Trong thuật toán điều khiển cho mạch sạc/xả pin lưu trữ, ngoài việc sử dụng vòng điều khiển dòng điện để thực hiện quá trình nạp và xả năng lượng, cần bổ sung thêm vòng điều khiển điện áp nhằm đảm bảo tính ổn định và an toàn cho toàn hệ thống. Cụ thể, trong quá trình sạc, vòng điều khiển điện áp giúp duy trì chế độ sạc điện áp không đổi (Constant Voltage – CV) sau giai đoạn sạc dòng không đổi (CC), nhằm tránh hiện tượng dòng điện vượt mức giới hạn, có thể gây gia tăng tổn hao và giảm tuổi thọ pin. Trong quá trình xả, điều khiển điện áp có vai trò giữ ổn định điện áp tại điểm DC-Link, đảm bảo rằng năng lượng cung cấp cho bộ nghịch lưu và tải không bị gián đoạn. Nếu điện áp DC bus giảm quá mức, có thể gây mất ổn định cho toàn hệ thống và ảnh hưởng đến hiệu suất vận hành.

a. Thiết kế PI cho chế độ giảm áp

- Vòng điều khiển dòng điện:

Hàm truyền PI cho vòng dòng điện có dạng: $C_i(s) = K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s}$

Từ hàm truyền duty cycle đến dòng cuộn cảm cho trạng thái giảm áp (Buck Mode) (2.42), sử dụng kỹ thuật chuẩn hóa mẫu số, thu được:

$$G_{id}(s) = \frac{\bar{V}_{in}(1 + sCR)}{RLC(s^2 + s\frac{1}{LC} + \frac{1}{LC})} \quad (3.5)$$

Từ phương trình (3.5), suy ra hàm truyền vòng hở:

$$H_i(s) = C_i(s).G_{id}(s) = (K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s}).\frac{\bar{V}_{in}(1+sCR)}{RLC(s^2 + s\frac{1}{LC} + \frac{1}{LC})} \quad (3.6)$$

Với $1 + H(s) = 0$, từ hàm truyền vòng hở (3.6) rút ra được phương trình đặc tính:

$$s^3 + (\frac{1}{RC} + \frac{\bar{V}_{in}K_{pi}}{RLC})s^2 + (\frac{1}{LC} + \frac{\bar{V}_{in}K_{pi}C}{LC} + \frac{\bar{V}_{in}K_{ii}}{RLC})s + \frac{\bar{V}_{in}CK_{ii}}{LC} = 0 \quad (3.7)$$

Chọn băng thông (tốc độ đáp ứng) là w_n và hệ số tắt dần ζ , giả định hệ thống bậc 3 với 2 cực chính và một cực phụ p:

$$(s+p)(s^2 + \zeta w_n s + w_n^2) = s^3 + (p + 2\zeta w_n)s^2 + (2\zeta w_n p + w_n^2)s + pw_n^2 = 0 \quad (3.8)$$

Từ 2 phương trình (3.7) và (3.8), vậy thông số cho khâu P và I thuộc mạch vòng điều khiển dòng điện được tính theo:

$$K_{pi} = \frac{(p + 2\zeta w_n)RLC - \frac{L}{R}}{\bar{V}_{in}} \quad (3.9)$$

$$K_{ii} = \frac{(2\zeta w_n p + w_n^2 - \frac{1}{LC} - \frac{\bar{V}_{in}K_{pi}C}{LC})RLC}{\bar{V}_{in}} \quad (3.10)$$

- **Vòng điều khiển điện áp:**

Hàm truyền PI cho vòng điện áp có dạng: $C_v(s) = K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s}$

Kết hợp hàm truyền dòng cuộn cảm đến điện áp ra cho trạng thái giảm áp (Buck Mode) (2.43), thu được hàm truyền vòng hở:

$$H_v(s) = C_v(s).G_{iv}(s) = (K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s}).\frac{R}{1+sCR} \quad (3.9)$$

Với $1 + H(s) = 0$, từ hàm truyền vòng hở (3.11) rút ra được phương trình đặc tính:

$$s^2 + \frac{1+RK_{pv}}{CR}s + \frac{RK_{iv}}{CR} = 0 \quad (3.10)$$

Phương trình đặc trưng bậc 2:

$$s^2 + 2\zeta w_n + w_n^2 = 0 \quad (3.11)$$

Từ phương trình đặc tính (3.10) kết hợp với phương trình đặc trưng bậc 2 của hệ thống dao động (3.11), vậy thông số cho khâu P và I thuộc mạch vòng điều khiển điện áp được tính theo:

$$K_{pv} = \frac{2\zeta w_n CR - 1}{R} \quad (3.12)$$

$$K_{iv} = \frac{w_n^2 CR}{R} \quad (3.13)$$

Kết luận:

Từ các phương trình (3.9), (3.10), (3.12) và (3.13), phương trình tính toán cho thông số P và I cho mạch vòng điều khiển dòng điện và điện áp là:

Mạch vòng điện áp:

$$K_{pv} = \frac{2\zeta w_n CR - 1}{R} \quad (3.14)$$

$$K_{iv} = \frac{w_n^2 CR}{R} \quad (3.15)$$

Mạch vòng dòng điện:

$$K_{pi} = \frac{(p + 2\zeta w_n)RLC - \frac{L}{R}}{\bar{V}_{in}} \quad (3.16)$$

$$K_{ii} = \frac{(2\zeta w_n p + w_n^2 - \frac{1}{LC} - \frac{\bar{V}_{in} K_{pi} C}{LC})RLC}{\bar{V}_{in}} \quad (3.17)$$

b. Thiết kế bộ điều khiển PI cho trạng thái tăng áp

- Vòng điều khiển dòng điện:**

Hàm truyền PI cho vòng dòng điện có dạng: $C_i(s) = K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s}$

Kết hợp hàm truyền PI với hàm truyền dòng cuộn cảm đến duty cycle (2.43), thu được hàm truyền vòng hở:

$$H_i(s) = C_i(s).G_{id}(s) = (K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s}). \frac{\bar{V}_{out}sC + \frac{\bar{V}_{out}}{R} + \bar{I}_L(1-\bar{D})}{s^2LC + \frac{sL}{R} + (1-\bar{D})^2} \quad (3.18)$$

Với $1 + H(s) = 0$, từ hàm truyền vòng hở (3.18) rút ra được phương trình đặc tính:

$$s^3LC + s^2(\frac{L}{R} + K_{pi}\bar{V}_{out}C) + s((1-\bar{D})^2 + K_{pi}(\frac{\bar{V}_{out}}{R} + \bar{I}_L(1-\bar{D})) + K_{ii}\bar{V}_{out}C) + K_{ii}(\frac{\bar{V}_{out}}{R} + \bar{I}_L(1-\bar{D})) = 0 \quad (3.19)$$

Chọn băng thông (tốc độ đáp ứng) là w_n và hệ số tắt dần ζ , giả định hệ thống bậc 3 với 2 cực chính và một cực phụ p:

$$(s+p)(s^2 + \zeta w_n s + w_n^2) = s^3 + (p + 2\zeta w_n)s^2 + (2\zeta w_n p + w_n^2)s + pw_n^2 = 0 \quad (3.19)$$

Từ 2 phương trình (3.19) và (3.20), Vậy thông số cho khâu P và I thuộc mạch vòng điều khiển dòng điện được tính theo:

$$K_{pi} = \frac{p + 2\zeta w_n - \frac{1}{RC}}{\frac{\bar{V}_{out}}{L}} \quad (3.20)$$

$$K_{ii} = \frac{2\zeta w_n p + w_n^2 - \frac{(1-\bar{D})^2}{LC} - \frac{K_{pi} \frac{\bar{V}_{out}}{R} + \bar{I}_L(1-\bar{D})}{LC}}{\frac{\bar{V}_{out}}{L}} \quad (3.21)$$

- **Vòng điều khiển điện áp:**

Hàm truyền PI cho vòng điện áp có dạng: $C_v(s) = K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s}$

Kết hợp hàm truyền dòng cuộn cảm đến điện áp ra cho trạng thái tăng áp (2.62) và hàm truyền PI, thu được hàm truyền vòng hở:

$$H_v(s) = C_v(s).G_{iv}(s) = (K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s}).\frac{1-\bar{D}}{\frac{1}{R} + sC} \quad (3.22)$$

Với $1 + H(s) = 0$, từ hàm truyền vòng hở (3.23) rút ra được phương trình đặc tính:

$$s^2 + s(\frac{1}{RC} + \frac{1-\bar{D}}{C}K_{pv}) + \frac{1-\bar{D}}{C}K_{iv} = 0 \quad (3.23)$$

Phương trình đặc trưng bậc 2:

$$s^2 + 2\zeta w_n + w_n^2 = 0 \quad (3.24)$$

Từ phương trình đặc tính (3.24) kết hợp với phương trình đặc trưng bậc 2 của hệ thống dao động (3.25), Vậy thông số cho khâu P và I thuộc mạch vòng điều khiển điện áp được tính theo:

$$K_{pv} = \frac{2\zeta w_n - \frac{1}{RC}}{\frac{1-\bar{D}}{C}} \quad (3.25)$$

$$K_{iv} = \frac{w_n^2 C}{1-\bar{D}} \quad (3.26)$$

Kết luận:

Từ các phương trình (3.21), (3.22), (3.26) và (3.27), phương trình tính toán cho thông số P và I cho mạch vòng điều khiển dòng điện và điện áp là:

Mạch vòng điện áp:

$$K_{pv} = \frac{2\zeta w_n - \frac{1}{RC}}{\frac{1-\bar{D}}{C}} \quad (3.27)$$

$$K_{iv} = \frac{w_n^2 C}{1-\bar{D}} \quad (3.28)$$

Mạch vòng dòng điện:

$$K_{pi} = \frac{p + 2\zeta w_n - \frac{1}{RC}}{\frac{\bar{V}_{out}}{L}} \quad (3.29)$$

$$K_{ii} = \frac{2\zeta w_n p + w_n^2 - \frac{(1-\bar{D})^2}{LC} - \frac{K_{pi} \frac{\bar{V}_{out}}{R} + \bar{I}_L(1-\bar{D})}{LC}}{\frac{\bar{V}_{out}}{L}} \quad (3.30)$$

c. Tính chọn linh kiện cho mạch tăng-giảm áp

Để đảm bảo khả năng điều khiển dòng và điện áp trong các chế độ sạc/xả, việc lựa chọn linh kiện công suất cần dựa trên phân tích lý thuyết kết hợp với yêu cầu thực tế của hệ thống.

Hệ số chu kì trong chế độ sạc và xả được tính theo công thức:

$$D_{sac} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (3.31)$$

$$D_{xa} = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}} \quad (3.32)$$

Cuộn cảm làm nhiệm vụ giữ vai trò ổn định dòng trong cả hai chế độ buck (sạc) và boost (xả), được tính theo công thức:

$$L_{min} = \frac{V_{in} \cdot D_{sac} \cdot (1 - D_{sac})}{f_{sw} \cdot \Delta I} \quad (3.34)$$

$$L_{max} = \frac{V_{in} \cdot D_{xa}}{f_{sw} \cdot \Delta I} \quad (3.35)$$

Trong đó: V_{in} là điện áp vào, D_{sac} và D_{xa} là hệ số chu kì trong quá trình sạc và xả, ΔI là độ gợn dòng điện, f_{sw} là tần số chuyển mạch

Độ gợn điện áp ΔV được chọn trong khoảng $\pm 1\%$ so với điện áp ra

Vật tụ điện được tính theo công thức:

$$C = \frac{I_{out} \cdot D_{xa}}{f_{sw} \cdot \Delta V} \quad (3.36)$$

Trong đó: I_{out} là dòng điện đầu ra, D_{xa} là hệ số chu kì trong quá trình xả, f_{sw} là tần số chuyển mạch, ΔV là độ gợn điện áp.

3.2.3 Mạch lọc AC

a. Các tiêu chí thiết kế bộ lọc LCL

Giới hạn công suất phản kháng (VAR) để đảm bảo hệ số công suất gần bằng 1

Tối ưu hóa kích thước và chi phí của các link kiện (L1, L2, C)

Giảm THD xuống dưới 0,003(3%) để đáp ứng tiêu chí IEEE 519

Chọn tần số cộng hưởng f_{res} trong khoảng: $10f_g \leq f_{res} \leq 0.5f_{sw}$ ($500\text{Hz} \leq f_{res} \leq 8000\text{Hz}$)

Phương pháp thiết kế bộ lọc LCL nhằm mục đích đáp ứng các yêu cầu của lưới thông qua việc triệt tiêu các thành phần hài bậc cao dòng điện bên phía lưới

b. Thiết kế các tham số của bộ lọc LCL

Đầu tiên chúng ta phải thiết kế độ cảm ứng phía bộ biến tần. Phương pháp được đề xuất bởi [63] được áp dụng:

$$\Delta I_{L_{\max}} = \frac{2V_{DC}}{3L_1} (1-m)mT_{sw} \quad (3.31)$$

Trong đó: m là chỉ số điều chế và $T_{sw} = \frac{1}{f_{sw}}$ (f_{sw} là tần số chuyển mạch = 16000Hz)

Do độ dao động dòng tối đa xảy ra với độ gợn (10%) và khi $m=0.5$ [65]. Ta có công thức tính cuộn cảm phía nghịch lưu (L1):

$$\Delta I_{L_{\max}} = \frac{V_{DC}}{6f_{sw}L_1} \quad (3.32)$$

$$\Delta I_{L_{\max}} = 0.1I_{\max} \quad (3.33)$$

Ta có

$$I_{\max} = \frac{\sqrt{2}P_n}{3V_{ph}} \quad (3.34)$$

$$L_1 = \frac{V_{DC}}{6f_{sw}\Delta I_{L_{max}}} \quad (3.35)$$

Giá trị nhỏ hơn của tụ lọc C sẽ làm giảm dòng chảy không cần thiết của công suất phản kháng lớn hơn qua nó. Chúng ta biết rằng dòng chảy của công suất phản kháng liên quan đến ổn định của điện áp[68]. Do đó, 1 giá trị lớn hơn của C có thể tạo ra vấn đề không ổn định điện áp trong lưới điện. Công suất phản kháng (Q_c) được giới hạn dưới 5% công suất định mức[69]: $Q_c = n\%.P_n$

mà

$$Q_c = -E_n^2 C \omega_g \quad (3.36)$$

Suy ra:

$$Q_c = C_{\max} = 0.05 \left(\frac{P_n}{3V_g^2 \omega_g} \right) \quad (3.37)$$

Để đạt được sự suy giảm độ gợn sóng 20% ở phía lưới so với độ gợn sóng dòng điện ở biến tần[68]. L_2 được chọn để tăng cường khả năng suy giảm sóng hài ở phía lưới, đảm bảo dòng điện ở gần lưới dạng sóng sin.

$$L_2 = \frac{\sqrt{\frac{1}{k^2} + 1}}{Cf_{sw}} \text{ với } k = 0.2 \quad (3.39)$$

3.3 Thuật toán điều khiển hệ thống

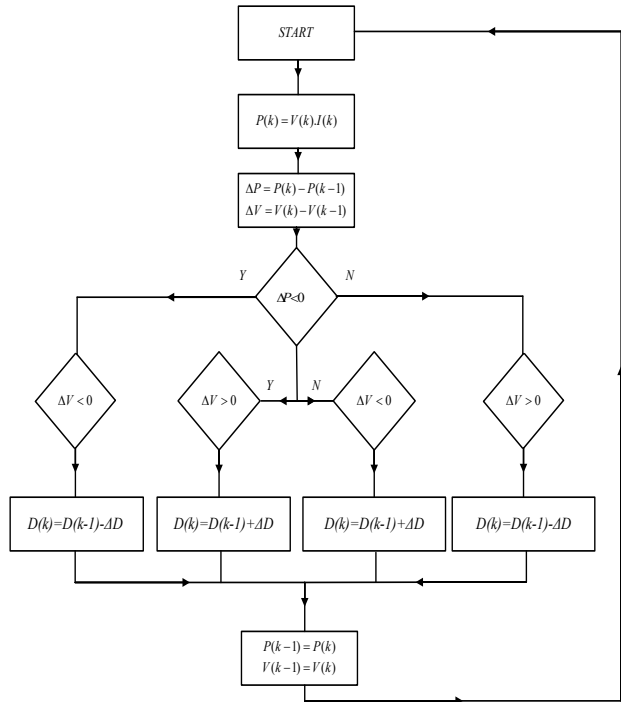
3.3.1 Thuật toán theo dõi điểm công suất tối đa

Trong hệ thống năng lượng mặt trời, việc tối ưu hóa công suất của tấm pin là yếu tố then chốt để nâng cao hiệu quả vận hành. Để đạt được điều này, các thuật toán MPPT (Maximum Power Point Tracking) được sử dụng nhằm liên tục tìm và duy trì điểm công suất cực đại (MPP) dưới các điều kiện môi trường biến đổi. Trong số các phương pháp MPPT phổ biến, Perturb & Observe (P&O) nổi bật nhờ tính đơn giản, dễ triển khai và chi phí thấp [1,2].

Phương pháp này hoạt động dựa trên nguyên lý điều chỉnh điện áp của tấm pin theo một bước nhiễu loạn nhỏ, sau đó quan sát sự thay đổi của công suất để xác định

hướng điều chỉnh tiếp theo nhằm tiến gần hơn tới điểm MPP [1-11]. Lý do lựa chọn P&O trong nghiên cứu này là để đơn giản hóa quá trình thiết kế và giảm độ phức tạp tính toán, đặc biệt khi hệ thống không yêu cầu độ chính xác cực cao hoặc xử lý các điều kiện phức tạp như che bóng một phần hoặc biến đổi nhanh của ánh sáng mặt trời [3, 10]. Theo các nghiên cứu của Jain, Gupta, và Bohre (2018), phương pháp P&O đạt hiệu suất trên 97% trong các điều kiện ổn định [3]. Các phương pháp nâng cao như InC hay Fuzzy Logic Control (FLC) có thể tối ưu hơn trong điều kiện biến đổi nhanh hoặc che bóng, tuy vậy chúng đòi hỏi bộ xử lý mạnh hơn, tăng chi phí và độ phức tạp trong hiệu chỉnh tham số [2,3]. Trong khi đó, đối với thuật toán P&O chỉ cần đo lường công suất và điều chỉnh điện áp theo hướng tăng hoặc giảm, giúp giảm thiểu độ trễ và dễ dàng triển khai trong các hệ thống thực tế [1-11]. Lưu đồ thuật toán MPPT cho phương pháp P&O được thể hiện tại Hình 3.2, điện áp đầu ra của mảng PV được thay đổi (nhiều loạn) một lượng nhỏ, từ đó dẫn đến sự thay đổi công suất, ký hiệu là ΔP . Nếu ΔP là dương, tức công suất tăng lên,

thì việc nhiễu loạn đã đưa điểm vận hành tiến gần đến điểm công suất cực đại (MPP), và hệ thống sẽ tiếp tục nhiễu loạn theo cùng hướng đó. Ngược lại, nếu ΔP là âm, tức công suất giảm, điều đó cho thấy hệ thống đang hoạt động xa điểm tối ưu, do đó cần giảm kích thước bước nhiễu loạn ΔD để điều chỉnh điểm vận hành tiến gần hơn đến MPP. Nhược điểm của phương pháp P&O là không thể xác định được điểm MPP thực tế, điểm làm việc dao động quanh MPP do sự thay đổi liên tục trong hướng nhiễu loạn sau khi đo ΔP [8, 11]. Đồng thời, trong trường hợp bức xạ mặt trời thay đổi, điểm MPP cũng không được xác định rõ ràng, khiến hệ thống hao tổn năng lượng [9-11].



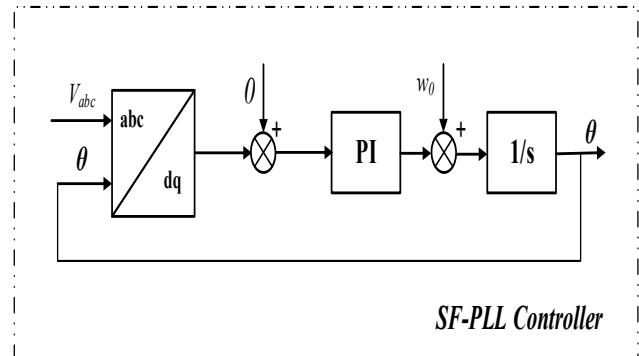
Hình 3.2 Lưu đồ thuật toán MPPT nhiễu loạn và quan sát P&O

3.3.2 Thuật toán điều khiển theo hướng điện áp

a. Thuật toán vòng khóa pha (PLL)

Đối với các thiết bị điện tử công suất nối lưới, việc xác định góc pha của lưới điện là một vấn đề hết sức quan trọng nhằm đảm bảo việc điều khiển dòng năng lượng giữa hệ thống và lưới điện.

Trong trường hợp điện áp lưới lý tưởng: biên độ điện áp và tần số không thay đổi thì việc xác định góc đồng bộ không gặp vấn đề lớn. Tuy nhiên, khi các điều kiện này không thỏa mãn (thực tế thường hay gặp) thì cần có thuật toán xác định được chính xác góc pha điện áp lưới [65]. Vì vậy thuật toán vòng khóa pha ra đời để giải quyết nhiệm vụ trên cho bộ biến đổi một pha nối lưới.



Hình 3.3 Sơ đồ khối của thuật toán điều khiển SF-PLL

Synchronous Frame PLL (SF-PLL) được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống ba pha. Sơ đồ khối của SF-PLL được minh họa trong Hình 3.3, nơi góc pha tức thời θ được phát hiện bằng cách đồng bộ hóa hệ quy chiếu quay của PLL với vector điện áp tiện ích. Bộ điều khiển PI đặt điện áp tham chiếu trục trực tiếp hoặc trục vuông góc về 0 [54], kết quả là tham chiếu bị khóa với góc pha của vector điện áp tiện ích. Quy trình gồm:

1. **Chuyển đổi tín hiệu:** Biến đổi Clarke chuyển điện áp ba pha (V_{abc}) thành $V_{\alpha\beta}$, sau đó dùng $\alpha\beta/dq$ để có V_d (trục d) và V_q (trục q).
2. **Điều khiển PI:** Đặt $V_q=0$ để trục d thẳng hàng với vector điện áp lưới. Tín hiệu sai lệch V_q được đưa vào bộ PI, điều chỉnh tần số góc (ω) sao cho $V_q \rightarrow 0$.
3. **Vòng lặp kín:** Tần số ω tích phân ($1/s$) thành góc pha ωt , cập nhật lại phép biến đổi $\alpha\beta/dq$. Quá trình lặp đến khi hệ thống đồng bộ hoàn toàn ($V_q=0$). SF-PLL đảm bảo phát hiện chính xác pha/biên độ điện áp lưới trong điều kiện lý tưởng, nhờ băng thông cao và cơ chế hồi tiếp ổn định.

b. Mô hình hóa cho PLL

Chuyển đổi dòng điện áp 3 pha (abc) sang hệ tọa độ $\alpha\beta$. Sử dụng phép biến đổi Clark Điện áp lưới 3 pha [64]

$$V_a = V_g \cos(\omega t) \quad (3.41)$$

$$V_b = V_g \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (3.42)$$

$$V_c = V_g \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (3.43)$$

Sử dụng pháp biến đổi Clark, chuyển sang hệ $\alpha\beta$. Ta có:

$$V_\alpha = \frac{2}{3} \left(V_a - \frac{1}{2} V_b - \frac{1}{2} V_c \right) \quad (3.44)$$

$$V_\beta = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} V_b - \frac{\sqrt{3}}{2} V_c \right) \quad (3.45)$$

Thay (3.41)-(3.43) vào (3.44) (3.45). Ta có:

$$V_\alpha = V_g \cos(\omega t) \quad (3.46)$$

$$V_\beta = V_g \sin(\omega t) \quad (3.47)$$

Sau khi chuyển đổi từ (abc) sang hệ tọa độ $\alpha\beta$ ta tiếp tục sử dụng phép biến đổi Park sang hệ tọa độ dq. Sử dụng góc pha ước lượng θ từ PLL, sử dụng phép biến đổi Park chuyển đổi $\alpha\beta$ sang dq

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Thay $V_\alpha = V_g \cos(\omega t)$ và $V_\beta = V_g \sin(\omega t)$. Ta được:

$$V_d = V_g \cos(\omega t) \cos(\theta) + V_g \sin(\omega t) \sin(\theta) = V_g \cos(\omega t - \theta) \quad (3.49)$$

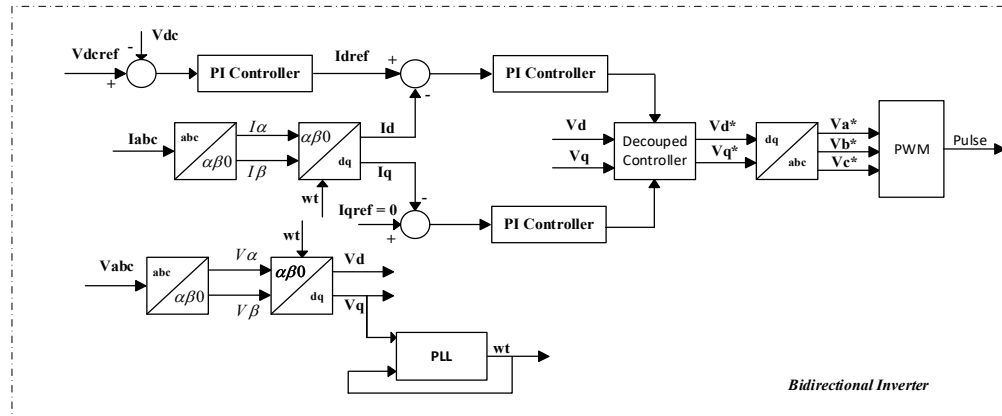
$$V_q = V_g \cos(\omega t) \sin(\theta) + V_g \sin(\omega t) \cos(\theta) = V_g \sin(\omega t - \theta) \quad (3.50)$$

- Đưa tín hiệu $V_{qref} = 0$ so sánh với tín hiệu tham chiếu $V_{qref} = 0$. Sai số $e = V_{dref} - V_d$ được đưa vào bộ điều khiển PI để điều chỉnh sai số để tạo tần số góc ω
- Tín hiệu đầu ra của bộ PI ω được kết hợp với tín hiệu ω_0 (tần số lưới điện) để cung cấp tần số tổng quát cho ω , đảm bảo cho PLL có thể theo dõi được biến thiên của tần số
- Đưa tín hiệu ω vào khối tích phân để tạo ra góc θ

$$\theta = \int (\omega + \omega_0) dt \quad (3.51)$$

- Góc θ sẽ được phản hồi lại khối chuyển đổi abc/dq để cập nhật khung tham chiếu, tạo thành 1 vòng lặp khép kín
- Khi PLL đồng bộ ($\theta = \omega t$, tức là $\theta =$ góc pha tại lưới)
 - $V_d = V_g \cos(\omega t) = V_g$ (điện áp tại lưới)
 - $V_q = V_g \sin(\omega t) = 0$ (Trục d thẳng hàng với vector điện áp lưới)

c. Thuật toán điều khiển DC/AC theo phương pháp điều khiển vector



Hình 3.4 Thuật toán điều khiển DC/AC theo phương pháp điều khiển vector

Các bước hoạt động của thuật toán điều khiển DC/AC

- Đưa tín hiệu V_{dcref} điện áp dc tham chiếu và tín hiệu điện áp V_{dc} dc thực so sánh với nhau để tạo ra sai số rồi và đưa vào bộ điều khiển PI để tạo I_{dcref} dòng điện tham chiếu.

- Chuyển đổi dòng điện I_{abc} từ hệ tọa độ abc sang tọa độ dq (sử dụng phương pháp Clark và tiếp tục chuyển từ tín hiệu sang bằng phương pháp Park và góc pha ωt từ PLL) để tạo ra dòng điện hệ tọa độ quay dq
- So sánh tín hiệu với tín hiệu, và sai số được đưa vào bộ điều khiển PI để tạo ra điện áp tham chiếu
- So sánh tín hiệu với tín hiệu, và sai số sẽ được xử lý bằng bộ điều khiển PI khác để tạo điện áp tham chiếu
- Chuyển điện áp V_{abc} từ tọa độ abc sang hệ tọa độ dq (sử dụng phương pháp Clark và tiếp tục chuyển từ tín hiệu sang bằng phương pháp Park và góc pha ωt từ PLL)
- PLL sẽ theo dõi dự thay đổi pha của lưới điện và cung cấp góc pha ωt chính xác để đảm bảo các biến của tọa độ dq luôn đồng bộ với lưới

d. Quy trình vận hành của thuật toán điều khiển DC/AC

• **Bộ điều khiển DC/AC kết nối với bộ lọc LCL FILTER và lưới điện**

Bộ điều khiển DC/AC được liên kết với bộ lọc. Bộ lọc này giúp làm mịn dòng điện, giảm sóng hài do PWM gây ra, đảm bảo dòng điện đầu ra có dạng sóng sin gần lý tưởng khi kết nối với lưới [59].

Mục đích điều khiển: tạo ra điện áp và dòng điện 3 pha cân bằng đồng bộ với lưới, điều chỉnh công suất hoạt động và công suất phản kháng và đảm bảo đồng bộ pha với lưới thông qua PLL[64].

Điện áp rơi trên cuộn cảm L_1 nhằm cản trở sự thay đổi đột ngột của dòng điện, giảm sóng hài cao do quá trình chuyển mạch PWM gây ra, xuất hiện do sự thay đổi của dòng điện pha $i(t)$: [59]

$$V'_{sa} = L_1 \frac{di_{1,a}}{dt} + V_{C,a} \quad (3.52)$$

$$V'_{sa} = L_1 \frac{di_{1,a}}{dt} + V_{C,a} \quad (3.53)$$

$$V'_{sb} = L_1 \frac{di_{1,b}}{dt} + V_{C,b} \quad (3.54)$$

Dòng điện đi qua tụ:

$$I_{C,a} = C \frac{dV_{C,a}}{dt} \quad (3.55)$$

Điện áp trên tụ C được chia điện áp rơi trên cuộn cảm L_2 (do sự thay đổi dòng của i_2 và điện áp lưới V_g). Cuộn cảm L_2 giúp làm giảm thêm sóng hài khi dòng điện vào lưới:

$$V_{C,a} = L_2 \frac{di_{2,a}}{dt} + V_{ga} \quad (3.55)$$

$$V_{C,b} = L_2 \frac{di_{2,b}}{dt} + V_{gb} \quad (3.56)$$

$$V_{C,c} = L_2 \frac{di_{2,c}}{dt} + V_{gc} \quad (3.57)$$

Ta có công thức điện áp của biến tần khi điện áp đầu ra liên kết với điện áp lưới qua bộ lọc LCL

$$V'_{sa} = L_1 \frac{di_{1,a}}{dt} + L_2 \frac{di_{2,a}}{dt} + V_{ga} \quad (3.58)$$

$$V'_{sb} = L_1 \frac{di_{1,b}}{dt} + L_2 \frac{di_{2,b}}{dt} + V_{gb} \quad (3.59)$$

$$V'_{sc} = L_1 \frac{di_{1,c}}{dt} + L_2 \frac{di_{2,c}}{dt} + V_{gc} \quad (3.60)$$

Ta có $i_{1,a} = i_{C,a} + i_{2,a} = i_{2,a} + C \frac{dV_{C,a}}{dt}$ [59]. Ta biểu diễn $V_{C,a}$ theo $i_{2,a}$. Đạo hàm (3.55) ta có:

$$\frac{dV_{C,a}}{dt} = L_2 \frac{d^2 i_{2,c}}{dt^2} + \frac{dV_{ga}}{dt} \quad (3.61)$$

Do đó:

$$I_{C,a} = C \left(L_2 \frac{d^2 i_{2,c}}{dt^2} + \frac{dV_{ga}}{dt} \right) \quad (3.62)$$

$$i_{1,a} = i_{2,a} + C \left(L_2 \frac{d^2 i_{2,c}}{dt^2} + \frac{dV_{ga}}{dt} \right) \quad (3.63)$$

Lấy đạo hàm của $i_{1,a}$ ta có:

$$\frac{di_{1,a}}{dt} = \frac{di_{2,a}}{dt} + C \left(L_2 \frac{d^2 i_{2,c}}{dt^2} + \frac{dV_{ga}}{dt} \right) \quad (3.64)$$

Thay phương trình (3.41) vào phương trình (3.36) và chứng minh tương tự cho V'_{sb} và V'_{sc}

$$\begin{aligned} V'_{sa} &= L_1 \left(\frac{di_{2,a}}{dt} + C \left(L_2 \frac{d^3 i_{2,a}}{dt^3} + \frac{d^2 V_{ga}}{dt^2} \right) \right) + L_2 \frac{di_{2,a}}{dt} + V_{ga} \\ &= (L_1 + L_2) \frac{di_{2,a}}{dt} + L_1 L_2 C \frac{d^3 i_{2,a}}{dt^3} + L_1 C \frac{d^2 V_{ga}}{dt^2} + V_{ga} \end{aligned} \quad (3.65)$$

$$V'_{sb} = (L_1 + L_2) \frac{di_{2,b}}{dt} + L_1 L_2 C \frac{d^3 i_{2,b}}{dt^3} + L_1 C \frac{d^2 V_{gb}}{dt^2} + V_{gb} \quad (3.66)$$

$$V'_{sc} = (L_1 + L_2) \frac{di_{2,c}}{dt} + L_1 L_2 C \frac{d^3 i_{2,c}}{dt^3} + L_1 C \frac{d^2 V_{gc}}{dt^2} + V_{gc} \quad (3.67)$$

Điện áp tại lưới:

$$V_{ga} = V_g \cos(\omega t) \quad (3.68)$$

$$V_{gb} = V_g \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.69)$$

$$V_{gc} = V_g \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.70)$$

$V_{ga}(t)$, $V_{gb}(t)$, $V_{gc}(t)$ điện áp lưới tại cái pha hoạt động như một nguồn đối kháng, xác định hướng dòng và công suất truyền từ biến tần vào lưới.

Sự chênh lệch giữa điện áp biến tần và điện áp lưới là lực đẩy để tạo ra dòng điện $i_a(t)$ chảy từ biến tần vào lưới $V'_{sa}(t) > V_{ga}(t)$

$$V'_{sa} - V_{ga} = L_1 \frac{di_{1,a}}{dt} + L_2 \frac{di_{2,a}}{dt} > 0 \quad (3.71)$$

Trong chế độ chỉnh lưu, biến tần hoạt động như 1 bộ chỉnh lưu chủ động để nạp năng lượng vào pin hoặc duy trì điện áp DC-link (V_{DC}) để duy trì hoạt động của hệ thống $V'_{sa}(t) < V_{ga}(t)$:

$$V'_{sa} - V_{ga} = L_1 \frac{di_{1,a}}{dt} + L_2 \frac{di_{2,a}}{dt} < 0 \quad (3.72)$$

- **Sử dụng phép biến đổi Clark để chuyển đổi từ hệ abc sang $\alpha\beta$**

Phép biến đổi Clark:

$$\begin{bmatrix} V'_{s\alpha} \\ V'_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

Chuyển đổi điện áp từ hệ abc sang $\alpha\beta$ giúp tối giản hóa phân tích và điều khiển và dòng điện $i_{2,\alpha}, i_{2,\beta}$ được điều khiển để đảm bảo dạng sóng sin và đồng bộ với lưới[60]

$$V'_{s\alpha} = (L_1 + L_2) \frac{di_{2,\alpha}}{dt} + L_1 L_2 C \frac{d^3 i_{2,\alpha}}{dt^3} + L_1 C \frac{d^2 V_{g\alpha}}{dt^2} + V_{g\alpha} \quad (3.74)$$

$$V'_{s\beta} = (L_1 + L_2) \frac{di_{2,\beta}}{dt} + L_1 L_2 C \frac{d^3 i_{2,\beta}}{dt^3} + L_1 C \frac{d^2 V_{g\beta}}{dt^2} + V_{g\beta} \quad (3.75)$$

Chuyển đổi điện áp lưới từ hệ abc sang $\alpha\beta$

$$V_{g\alpha} = V_g \cos(\omega t) \quad (3.76)$$

$$V_{g\beta} = V_g \sin(\omega t) \quad (3.77)$$

- **Sử dụng phép biến đổi Park biến đổi từ $\alpha\beta$ sang dq**

Phép biến đổi Park

$$\begin{bmatrix} V'_{sd} \\ V'_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_{s\alpha} \\ V'_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

Chuyển đổi từ tín hiệu từ tọa độ tĩnh $\alpha\beta$ sang hệ tọa độ quay dq và sử dụng góc pha θ từ PLL để đồng bộ với lưới điện, cho phép điều khiển độc lập các thành phần trục d và q trong các bộ chuyển đổi kết nối lưới[61].

Trong đó θ là góc ước lượng từ PLL: $\theta = \arctan\left(\frac{V_{g\alpha}(t)}{V_{g\beta}(t)}\right)$

Chuyển đổi điện áp lưới từ $\alpha\beta$ sang dq. Sử dụng phép biến đổi ta có

$$V_{gd} = V_g \cos(\omega t) \cos(\theta) + V_g \sin(\omega t) \sin(\theta) = V_g \cos(\omega t - \theta) \quad (3.79)$$

$$V_{gq} = -V_g \cos(\omega t) \sin(\theta) + V_g \sin(\omega t) \cos(\theta) = V_g \sin(\omega t - \theta) \quad (3.80)$$

Khi PLL đồng bộ ($\theta = \omega t$) trục d thẳng hàng với vector điện áp lưới. Thay vào phương trình (3.65)(3.66)

$$V_{gd} = V_g \cos(0) = V_g \quad (3.81)$$

$$V_{gq} = V_g \sin(0) = 0 \quad (3.82)$$

Điện áp V'_{sd} và V'_{sq} được điều chỉnh để kiểm soát $i_{2,d}$ và $i_{2,q}$ từ đó để điều chỉnh công suất P và Q

Sử dụng phép biến đổi Park biến đổi điện áp từ $\alpha\beta$ sang dq đối với phương trình (3.53)(3.54). Để chuyển đổi sang hệ dq, ta cần tính đạo hàm các đại lượng trong hệ quay. Ma trận Park ảnh hưởng đến các đạo hàm do sự quay của hệ tọa độ:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{2,d} \\ i_{2,q} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{2,\alpha} \\ i_{2,\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & \cos(\theta) \\ -\cos(\theta) & -\sin(\theta) \end{bmatrix} \omega \begin{bmatrix} i_{2,\alpha} \\ i_{2,\beta} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{di_{2,\alpha}}{dt} \cos(\theta) + \frac{di_{2,\beta}}{dt} \sin(\theta) - \omega i_{2,\alpha} \sin(\theta) + \omega i_{2,\beta} \cos(\theta) \\ -\frac{di_{2,\alpha}}{dt} \sin(\theta) + \frac{di_{2,\beta}}{dt} \cos(\theta) - \omega i_{2,\alpha} \cos(\theta) + \omega i_{2,\beta} \sin(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{di_{2,d}}{dt} - \omega i_{2,q} \\ \frac{di_{2,q}}{dt} + \omega i_{2,d} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.83)$$

Chứng minh tương tự đối với các hàm bậc cao. Sau khi áp dụng phép biến đổi Park và đồng bộ với PLL, ta có công thức điện áp:

$$V'_{sd} = (L_1 + L_2) \left(\frac{di_{2,d}}{dt} - \omega i_{2,q} \right) + L_1 L_2 C \left(\frac{d^3 i_{2,d}}{dt^3} - 3\omega \frac{d^2 i_{2,q}}{dt^3} - 3\omega^2 \frac{d^3 i_{2,d}}{dt^3} + \omega^3 i_{2,q} \right) - L_1 C \omega^2 V_g + V_g \quad (3.84)$$

$$V'_{sq} = (L_1 + L_2) \left(\frac{di_{2,q}}{dt} + \omega i_{2,d} \right) + L_1 L_2 C \left(\frac{d^3 i_{2,q}}{dt^3} - 3\omega \frac{d^2 i_{2,d}}{dt^3} - 3\omega^2 \frac{d^3 i_{2,q}}{dt^3} + \omega^3 i_{2,d} \right) \quad (3.85)$$

Trong đó : Thành phần $(L_1 + L_2) \left(\frac{di_{2,d}}{dt} - \omega i_{2,q} \right)$: điện áp rơi trên cuộn cảm với thành phần chéo $-\omega i_{2,q}$ do hệ tọa độ quay

- $L_1 L_2 C \left(\frac{d^3 i_{2,d}}{dt^3} - 3\omega \frac{d^2 i_{2,q}}{dt^2} - 3\omega^2 \frac{d^3 i_{2,d}}{dt^3} + \omega^3 i_{2,q} \right)$:ảnh hưởng của tụ C
- $-L_1 C \omega^2 V_g + V_g$:liên quan đến điện áp lưới

• **Đưa tín hiệu điện áp vào khối decoupling**

Do xuất hiện các tín hiệu chéo trong phương trình điện áp trong hệ tọa độ dq mà tại đó các đại lượng trên trục d và trục q (vuông góc) ảnh hưởng lẫn nhau[8]. Chúng xuất hiện do sự quay của hệ tọa độ dq với tần số góc ω , dẫn đến các thành phần phụ thuộc vào ω

- Các tín hiệu chéo làm cho việc điều khiển $i_{2,d}$ và $i_{2,q}$ trở nên phức tạp vì chúng không độc lập với nhau. Vì vậy ta cần bù tín hiệu chéo này tránh làm thay đổi V'_{sd} sẽ ảnh hưởng đến dòng điện $i_{2,d}$ và ngược lại, và các thành phần chéo gây nhiễu làm cho dòng điện thay đổi ngoài ý muốn dẫn đến sai lệch trong tính toán công suất[60].
- Để bù tín hiệu chéo đó ta sử dụng khối decouple(tách rời) để tách rời các trục d và q, sao cho các tín hiệu điện áp và dòng điện d và q không ảnh hưởng đến nhau [61].

Để tách rời các trục, ta thêm các thành phần bù ngược dấu vào tín hiệu điều khiển V'_{sd} và V'_{sq} . Giả sử bộ điều khiển PI tạo ra các dòng điện tham chiếu V_{sd}^* và V_{sq}^* , điện áp thực tế được áp dụng[8]:

$$V'_{sd} = V_{sd}^* + (L_1 + L_2)\omega i_{2,q} - \omega^3 i_{2,q} L_1 L_2 C + 3\omega L_1 L_2 C \frac{d^2 i_{2,q}}{dt^2} \quad (3.86)$$

$$V'_{sq} = V_{sq}^* + (L_1 + L_2)\omega i_{2,d} - \omega^3 i_{2,d} L_1 L_2 C + 3\omega L_1 L_2 C \frac{d^2 i_{2,d}}{dt^2} \quad (3.87)$$

Thay các thành phần bù ở phương trình (3.86)(3.87) vào phương trình (3.84)(3.85) Ta có tín hiệu điện áp sau khi qua khối decoupling (tách rời)

$$V_{sd}^* = (L_1 + L_2) \frac{di_{2,d}}{dt} + L_1 L_2 C \left(\frac{d^3 i_{2,d}}{dt^3} - 3\omega^2 \frac{d^3 i_{2,d}}{dt^3} \right) - L_1 C \omega^2 V_g + V_g \quad (3.88)$$

$$V_{sq}^* = (L_1 + L_2) \frac{di_{2,q}}{dt} + L_1 L_2 C \left(\frac{d^3 i_{2,q}}{dt^3} - 3\omega^2 \frac{d^3 i_{2,q}}{dt^3} \right) \quad (3.89)$$

Lúc này bộ điều khiển PI sẽ tính toán V_{sd}^* dựa trên sai số giữa $i_{2,d}$ và giá trị dòng điện tham chiếu $i_{2,d}^*$ và sau khi bù V_{sd}^* chỉ phụ thuộc vào $i_{2,d}$, giúp PI điều khiển chính xác và không bị nhiễu từ tín hiệu $i_{2,q}$ tục [65].

- **Chuyển đổi tín hiệu V_{sd}^* và V_{sq}^* về hệ abc để tạo tín hiệu PWM**

Phép Park ngược chuyển đổi từ hệ dq sang $\alpha\beta$

$$V_\alpha = V_d^* \cos(\theta) - V_q^* \sin(\theta) \quad (3.90)$$

$$V_\beta = V_d^* \sin(\theta) + V_q^* \cos(\theta) \quad (3.91)$$

Tiếp tục sử dụng phép biến đổi Clark ngược để chuyển từ hệ $\alpha\beta$ sang hệ abc

$$V_a = V_\alpha \quad (3.92)$$

$$V_b = -\frac{1}{2}V_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}V_\beta \quad (3.93)$$

$$V_c = -\frac{1}{2}V_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}V_\beta \quad (3.94)$$

Sau khi chuyển đổi sang hệ abc ta có tín hiệu V_a, V_b, V_c ta có thể chuyển hóa thành m_a, m_b, m_c (bằng cách chia cho $V_a/2$) và dùng tín hiệu này để so sánh với sóng tam giác và tạo tín hiệu PWM cho IGBT

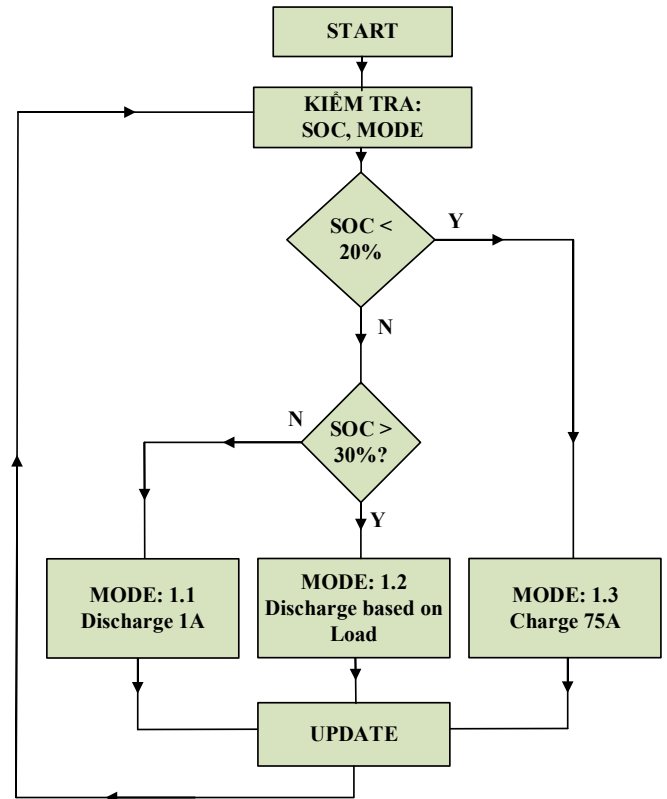
3.3.3 Chiến lược quản lý năng lượng

Hệ thống quản lý năng lượng (Energy Management System - EMS) đóng vai trò trung tâm trong việc tối ưu hóa hiệu suất và đảm bảo độ tin cậy cho hệ thống điện mặt trời nối lưới có lưu trữ. EMS vận hành dựa trên ba tham số chính: trạng thái sạc (State of Charge - SOC) của bộ lưu trữ, công suất phát từ tấm pin mặt trời (Ppv), và công suất tiêu thụ của tải (Pload). Các tham số này là cơ sở để EMS xác định trạng thái vận hành phù hợp, nhằm duy trì cân bằng giữa nguồn phát, nhu cầu tiêu thụ và sự tương tác với lưới điện [40,45–46]. Trong phạm vi báo cáo này, các chế độ điều khiển được lựa chọn dựa trên sự so sánh giữa Ppv và Pload kết hợp với ngưỡng SOC của pin để đưa ra quyết định vận hành tương ứng. Trạng thái SOC được chia thành các khoảng giá trị cụ thể, qua đó hệ thống sẽ quyết định thực hiện sạc, xả hoặc chuyển

sang chế độ “ngắt xả” (giảm dòng xả để bảo vệ pin) tùy theo tình trạng năng lượng hiện tại.

a. Chế độ 1: Vào ban đêm, không có bức xạ mặt trời

Chế độ 1 được triển khai khi vào ban đêm, lượng bức xạ mà tấm pin mặt trời có thể tạo ra là không có, do đó cần đảm bảo quá trình xả pin để bù tải cùng với lưới đồng thời tránh việc lượng pin giảm quá mức dẫn tới ảnh hưởng đến chất lượng của pin lưu trữ, chiến lược điều khiển trong chế độ 1 được thể hiện trong Hình 3.5.

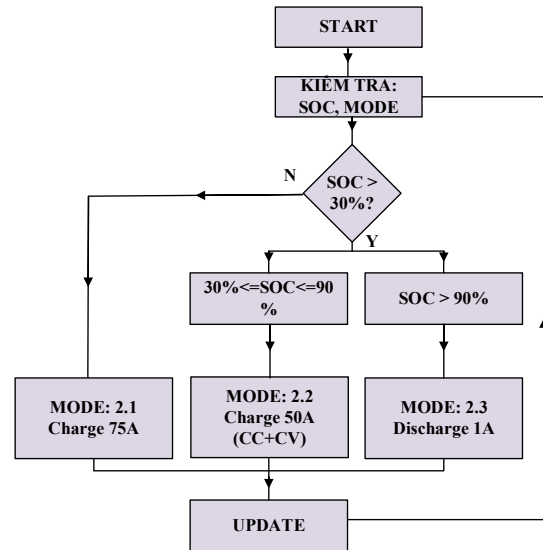


Hình 3.5 Lưu đồ thuật toán EMS tại chế độ 1

b. Chế độ 2: Khi công suất hệ thống PV dư thừa

Chế độ 2 được kích hoạt khi công suất phát từ hệ thống PV vượt quá nhu cầu của tải. Trong trường hợp này, phần năng lượng dư thừa cần được điều phối hợp lý: ưu tiên sạc cho pin lưu trữ, và nếu pin đã đạt đến ngưỡng an toàn, phần còn lại sẽ được truyền lên lưới điện.

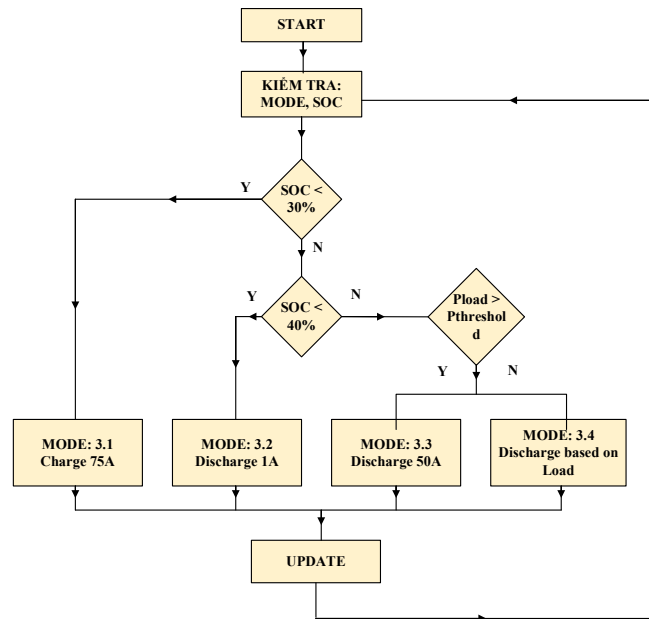
Quá trình sạc pin được thực hiện theo hai giai đoạn: giai đoạn dòng không đổi (Constant Current – CC) nhằm nạp nhanh đến mức SOC đặt, sau đó chuyển sang giai đoạn điện áp không đổi (Constant Voltage – CV) để đảm bảo an toàn cho pin lưu trữ. Ngoài ra, quá trình sạc pin cũng cần phải kiểm soát chặt chẽ nhằm ngắt sạc kịp thời khi SOC đạt đến giới hạn cho phép, tránh vượt quá dung lượng thiết. Chiến lược điều khiển cho chế độ 2 được minh họa tại Hình 3.6.



Hình 3.6 Lưu đồ thuật toán EMS tại chế độ 2

c. Chế độ 3: Khi Công suất PV thiếu

Chế độ 3 được kích hoạt khi công suất từ hệ thống PV vẫn tồn tại nhưng không đủ đáp ứng tải, hệ thống sẽ phối hợp sử dụng thêm nguồn từ pin lưu trữ để đảm bảo cung cấp điện liên tục. Dựa trên mức SOC, quá trình xả pin được điều chỉnh phù hợp nhằm vừa có thể bù tải trong giới hạn công suất cho phép, vừa giới hạn ngưỡng an toàn của pin để tránh xả sâu, ảnh hưởng đến tuổi thọ của pin lưu trữ. Hình 3.7 thể hiện chiến lược điều khiển trong chế độ 3.



Hình 3.7 Lưu đồ thuật toán EMS tại chế độ 3

3.4 Kết luận

Chương này đã trình bày hoàn chỉnh quá trình thiết kế hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nổi lưới, bao gồm cấu trúc phần cứng và các thuật toán điều khiển. Hệ thống được cấu hình với các khối chính: bộ Boost cho PV, bộ Buck-Boost hai chiều cho pin lưu trữ, nghịch lưu ba pha và bộ lọc LCL, tạo thành chuỗi chuyển đổi năng lượng hiệu quả từ nguồn đến lưới.

Quá trình thiết kế được thực hiện có hệ thống, từ tính toán tham số linh kiện đến xây dựng các bộ điều khiển PI cho từng chế độ hoạt động. Các thuật toán điều khiển đã được phát triển, gồm: MPPT theo phương pháp P&O, điều khiển theo tọa độ dq kết hợp PLL để hòa lưới, và chiến lược quản lý năng lượng EMS với ba chế độ vận hành theo bức xạ và SOC.

Những cơ sở lý thuyết và mô hình hóa đã trình bày là tiền đề quan trọng cho chương 4, nơi hệ thống sẽ được kiểm chứng thông qua mô phỏng trong môi trường MATLAB/Simulink với các kịch bản vận hành thực tế.

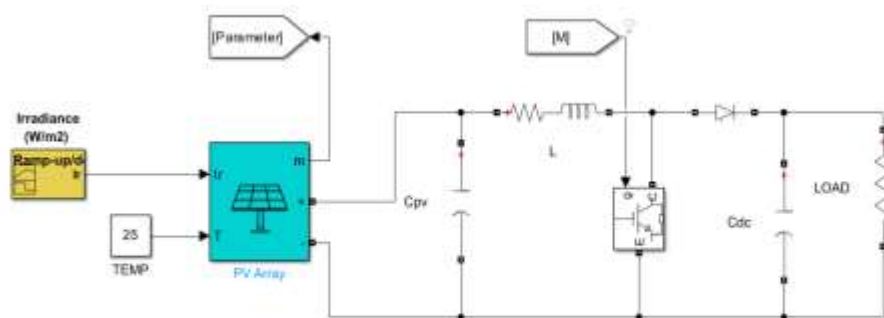
CHƯƠNG 4: THỰC NGHIỆM MÔ HÌNH VÀ ĐÁNH GIÁ.

4.1 Mô phỏng hệ thống sử dụng Matlab/Simulink

Việc mô phỏng hệ thống là bước quan trọng nhằm đánh giá hiệu quả vận hành và điều khiển trong điều kiện thực tế. Trong phần này, các khối chức năng chính của hệ thống như tấm pin mặt trời, bộ chuyển đổi DC-DC, bộ nghịch lưu hai chiều và khối lưu trữ năng lượng sẽ được mô hình hóa trong môi trường Matlab/Simulink. Các thông số kỹ thuật thực tế được áp dụng để đảm bảo tính sát thực, từ đó phân tích được đáp ứng công suất, độ ổn định và khả năng thích nghi của hệ thống với điều kiện bức xạ thay đổi.

4.1.1 Mô hình kiểm nghiệm mạch tăng áp 1 chiều

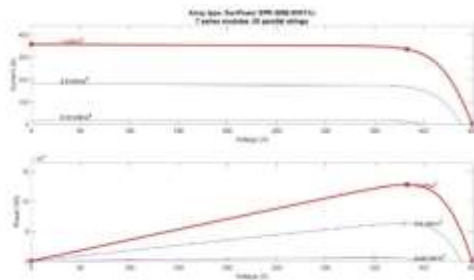
Hình 4.1 thể hiện mô hình mô phỏng mạch tăng áp, mạch được kiểm nghiệm với nối với tấm pin mặt trời và đồng thời nối với tải lý tưởng, các thông số trong mô phỏng được đưa ra tại Bảng 4.1. Tấm pin mặt trời sử dụng là SUNPOWER SPR-305-WHT, với 60 chuỗi pin và 7 mô-đun cho mỗi chuỗi, cho ra được công suất tối đa khoảng 128kW, đường đặc tính I-V và V-P được thể hiện tại Hình 4.2. Lượng bức xạ cấu hình cho lần mô phỏng lần này là từ 1000W/m² giảm dần xuống 500W/m² và quay trở lại, đồ thị về lượng bức xạ đưa vào hệ thống được thể hiện tại Hình 4.3.



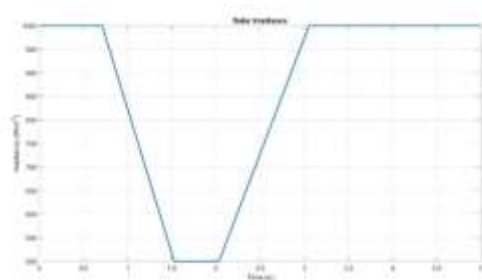
Hình 4.1 Cấu trúc mạch của quá trình kiểm nghiệm mạch tăng áp 1 chiều

Bảng 4.1 Các tham số sử dụng trong kiểm nghiệm mạch tăng áp 1 chiều

Nhiệt độ	$T^o = 25^o C$
Tụ điện đầu vào	$C_{pv} = 100e^{-6}(F)$
Tụ điện đầu ra	$C_{dc} = 6000e^{-6}(F)$
Cuộn cảm	$L = 5e^{-3}(H)$
Tải	$R_{load} = 2.8(\Omega)$



Hình 4.2 Đường đặc tính I-V và P-V của tấm pin mặt trời SUNPOWER SPR-305-WHT



Hình 4.3 Đồ thị bức xạ cầu hình tại tấm pin mặt trời

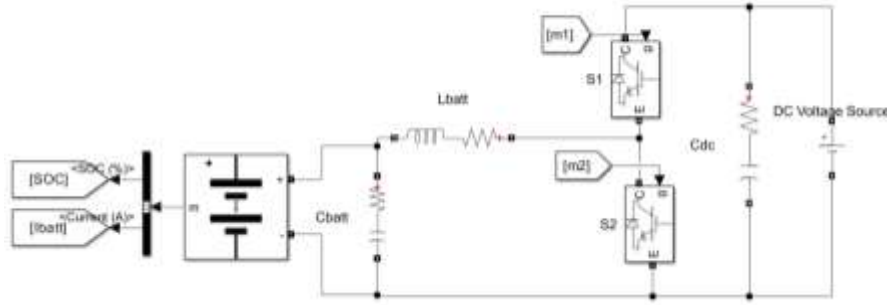
4.1.2 Mô hình kiểm nghiệm mạch tăng-giảm áp 2 chiều

Mạch tăng giảm áp hai chiều vừa giảm áp để sạc pin khi dư năng lượng từ PV, vừa tăng áp để xả pin hỗ trợ tải khi thiếu. Dù dùng chung phần cứng, mạch hoạt động theo hai chế độ với điều kiện và điều khiển khác nhau. Pin lưu trữ dùng trong kiểm nghiệm có điện áp danh định 360V và dung lượng 150Ah.

a) Chế độ giảm áp

Hình 4.4 thể hiện cấu trúc mạch tăng giảm áp hai chiều trong chế độ giảm áp. Trong chế độ này, mạch được nối thêm với một nguồn DC lý tưởng có điện áp 600 V, đóng vai trò cung cấp năng lượng cho quá trình sạc pin lưu trữ. Nhằm đảm bảo an toàn cho pin và kéo dài tuổi thọ, quá trình sạc được chia thành hai giai đoạn: dòng điện không đổi (CC – Constant Current) và điện áp không đổi (CV – Constant Voltage). Ngưỡng chuyển đổi giữa hai giai đoạn được đặt tại mức SOC = 80%. Do đó, giá trị SOC khởi đầu được đặt là 79.980% để làm rõ đáp ứng điều khiển trong thời

điểm chuyển tiếp giữa hai giai đoạn sạc. Các thông số cấu hình cho quá trình mô phỏng được trình bày trong Bảng 4.2.



Hình 4.4 Cấu trúc mạch tăng giảm áp tại chế độ giảm áp

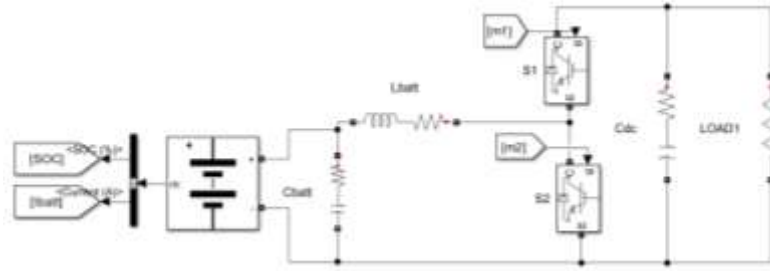
Bảng 4.2 Thông số cho mạch Buck-Boost Converter tại chế độ giảm áp

Điện áp đầu vào tại DC bus	$V_{dc} = 600V$
Điện áp tham chiếu	$V_{batt_ref} = 390(V)$
Dòng điện tham chiếu	$I_{batt_ref} = 50(A)$
Tụ điện	$C_{pv} = 20e^{-6}(F)$ và $C_{dc} = 100e^{-6}(F)$
SOC khởi đầu	$SOC = 79.990\%$
Thông số PI cho mạch vòng điện áp	$K_{pv} = 2$ và $K_{iv} = 5000$
Thông số PI cho mạch vòng dòng điện	$K_{pi} = 5$ và $K_{ii} = 100$

a) Chế độ tăng áp

Hình 4.5 thể hiện cấu trúc mạch tăng giảm áp hai chiều khi hoạt động ở chế độ tăng áp (xả pin lưu trữ). Trong chế độ này, mạch được nối với 1 tải điện trở lý tưởng, đại diện cho phụ tải DC cần cấp điện từ nguồn pin.

Mục tiêu điều khiển trong chế độ tăng áp là duy trì điện áp đầu ra ổn định tại tải (thanh cái DC), trong khi dòng xả từ pin được điều chỉnh phù hợp để đáp ứng công suất yêu cầu. Do điện áp danh định của pin lưu trữ thường thấp hơn điện áp DC bus, bộ chuyển đổi hoạt động theo nguyên lý boost để nâng điện áp và cung cấp năng lượng một cách hiệu quả. Thông số sử dụng cho quá trình mô phỏng được trình bày tại Bảng 4.3



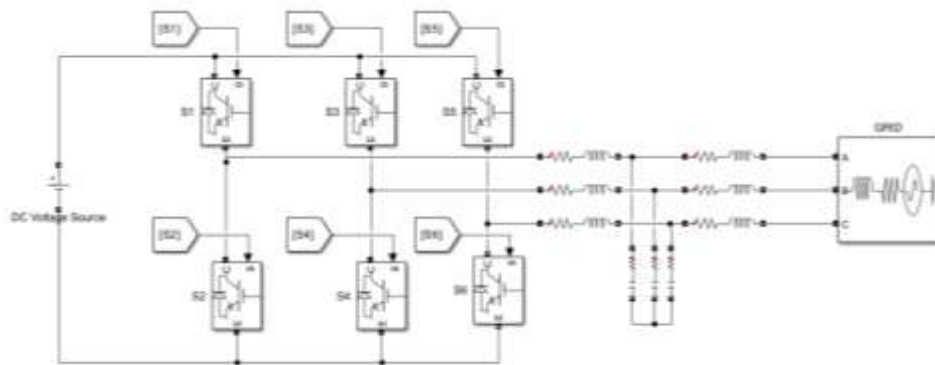
Hình 4.5 Cấu trúc mạch tăng giảm áp tại chế độ tăng áp

Bảng 4.3 Thông số cho mạch Buck-Boost Converter tại chế độ tăng áp

Điện áp đặt DC bus	$V_{dc} = 600V$
SOC khởi tạo	$SOC = 50\%$
Tụ điện	$C_{pv} = 20e^{-6}(F)$ và $C_{dc} = 100e^{-6}(F)$
Thông số PI cho mạch vòng điện áp	$K_{pv} = 0.00375$ và $K_{iv} = 5$
Thông số PI cho mạch vòng dòng điện	$K_{pi} = 1.73$ và $K_{ii} = 41.13$

4.1.3 Mô hình kiểm nghiệm mạch nghịch lưu

Hình 4.6 thể hiện cấu trúc mạch nghịch lưu 2 mức 3 pha. Mạch được nối với bộ lọc LCL nhằm giảm sóng hài từ dòng điện do đóng cắt van bán dẫn trong quá trình chuyển đổi DC/AC. Mạch được nối với lưới điện với điện áp pha 400V và tần số 50hz, nguồn năng lượng tạo ra được đẩy lên lưới điện. Các thông số trong mô phỏng được trình bày tại Bảng 4.4



Hình 4.6 Cấu trúc mạch chuyển đổi DC/AC trong mô phỏng Matlab/Simulink

Bảng 4.4 Thông số sử dụng trong kiểm nghiệm Inverter

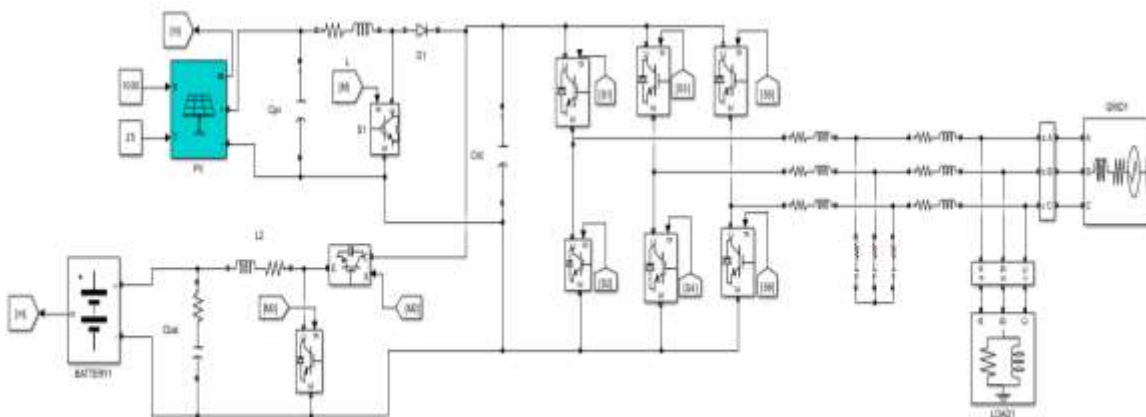
Lưới điện	Điện áp pha	$V_{RMS} = 400V$
	Tần số	$50Hz$
LCL Filter	Cuộn cảm	$L_i = 500\mu H$ và $L_g = 500\mu H$
	Tụ điện	$C_f = 100\mu F$
	Nguồn DC	$V_{DC} = 600V$
	Dòng điện tham chiếu	$I_d = -205A$

4.2 Mô hình kiểm nghiệm hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nối lưới

Trong phần này, hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nối lưới sẽ được kiểm nghiệm thông qua mô phỏng nhằm đánh giá khả năng vận hành và đáp ứng các tiêu chí đặt ra.

4.2.1 Cấu hình các tham số phần cứng

Cấu trúc mạch của hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nối lưới được thể hiện trong Hình 4.7. Hệ thống vận hành theo 3 chiến lược điều khiển chính đặt ra được đề cập tại chương 3, trong chế độ chính còn có các chế độ nhỏ để vận hành hệ thống sao cho đảm bảo tính ổn định, và chuyển đổi chế độ mượt mà trong vận hành hệ thống. Tấm pin mặt trời sử dụng là SUNPOWER SPR-305-WHT, với 60 chuỗi pin và 7 mô-đun cho mỗi chuỗi, cho ra được công suất tối đa khoảng 128kW. Pin lưu trữ sử dụng là pin Lithium-Ion, có điện áp danh định 360V và dung lượng 150Ah. Đi kèm với các thông số khác trong quá trình kiểm nghiệm được thể hiện tại Bảng 4.5.



Hình 4.7 Tổng quan hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nổi lưới mô phỏng bằng Matlab/Simulink

Bảng 4.5 Các thông số sử dụng trong mô phỏng hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nổi lưới

Cấu hình hệ thống	Phiên bản Matlab/Simulink	R2023a
	Thời gian kiểm nghiệm	5 s
	Thời gian lấy mẫu	1 μ s
	Loại trình giải	Variable-step
	Thuật toán giải số	ode23t
Tấm pin mặt trời	Công suất tối đa:	128195 kW
	V_{mpp}:	382.3 V
	I_{mpp}:	334.8 A
Bộ lưu trữ	Điện áp danh định	360 V
	Dung lượng	150 Ah
Lưới điện	Điện áp pha-pha	400 V
	Tần số	50 Hz
Mạch lọc LCL	Cuộn cảm (L_i-L_g)	500 μ H
	Tụ điện (C_f)	100 μ F

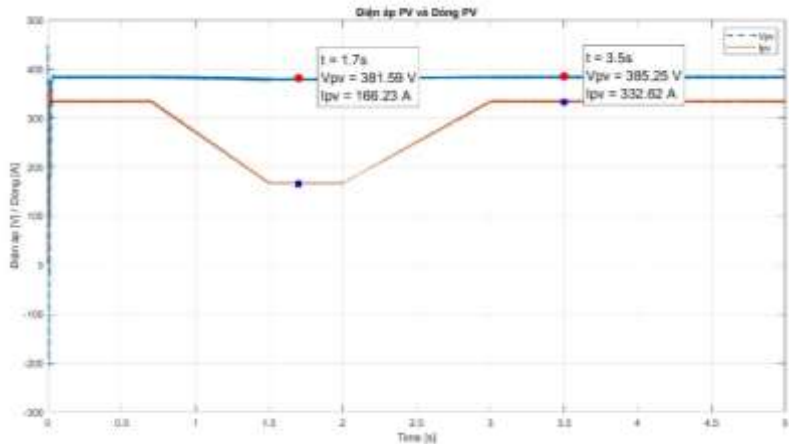
4.3 Kết quả mô phỏng và đánh giá

4.3.1 Đáp ứng các thành phần riêng biệt trong hệ thống

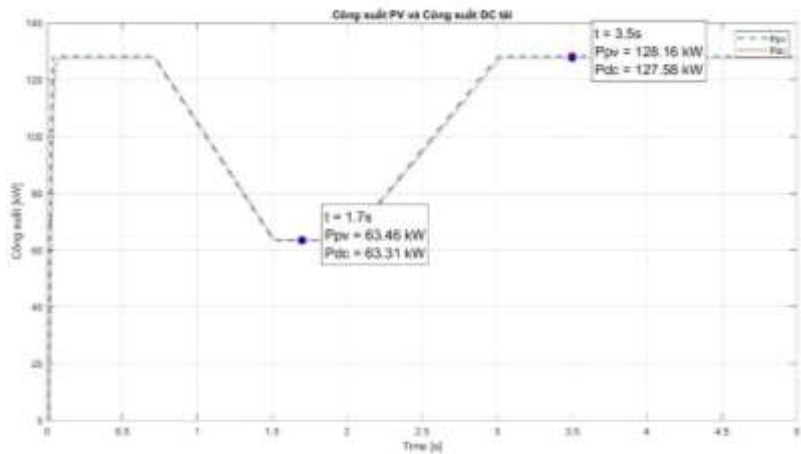
a. Mạch tăng áp 1 chiều

Hình 4.8 mô tả đáp ứng điện áp/dòng điện đầu ra PV và công suất khi bức xạ giảm từ 1000 W/m^2 xuống 500 W/m^2 (0.7-1.5 s). Thuật toán MPPT điều chỉnh liên tục duty cycle để bám điểm MPP di chuyển theo bức xạ. Từ Hình 4.9, tại bức xạ ổn định:

- 1000 W/m^2 : đo tại 3.5s, công suất PV đạt 128.16 kW và Công suất sau chuyển đổi DC đạt 127.58 kW.
- 500 W/m^2 : đo tại 1.7s Công suất PV đạt 63.46 kW và công suất sau chuyển đổi DC đạt 63.31 kW



Hình 4.8 Điện áp và dòng điện đáp ứng tại điểm MPP

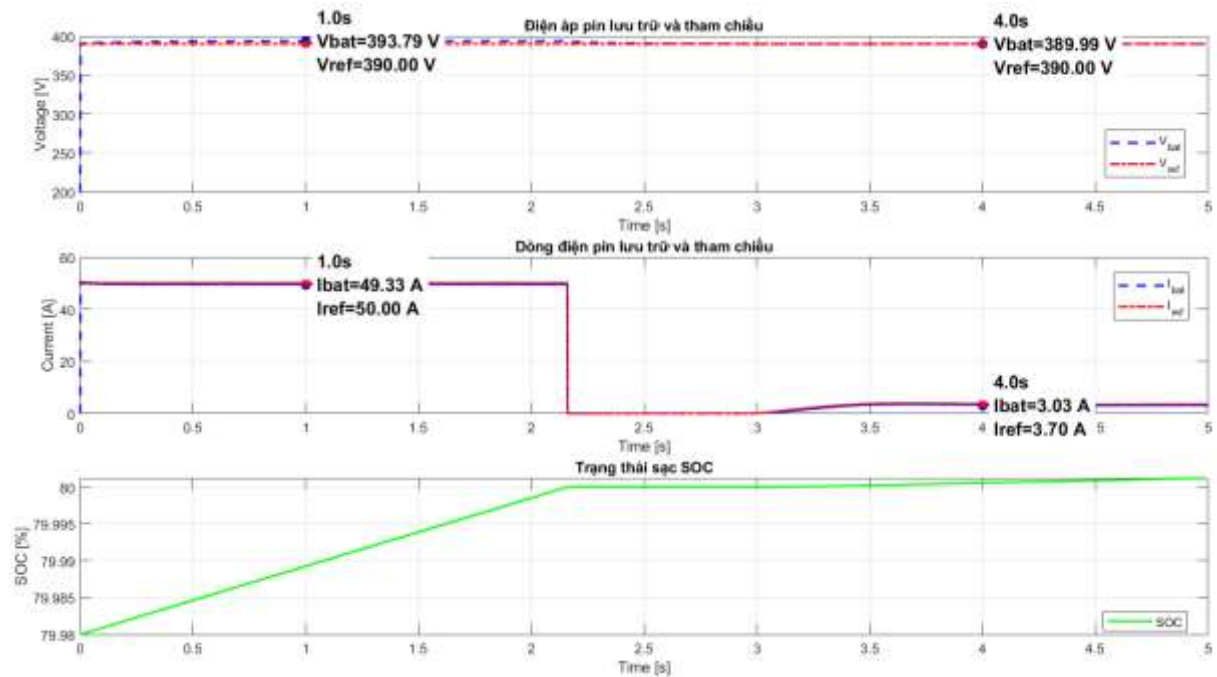


Hình 4.9 Đáp ứng công suất PV và công suất DC

b. Mạch tăng-giảm áp 2 chiều

Chế độ giảm áp (Sạc pin lưu trữ)

Hình 4.10 mô phỏng quá trình sạc pin theo chế độ CC–CV. Giai đoạn đầu (0–2.1 s), dòng sạc giữ ổn định 50 A (chế độ CC), làm SOC tăng từ 79.98% lên 80%. Khi đạt ngưỡng, hệ thống chuyển sang chế độ CV, dòng giảm nhanh về ~3 A để giữ điện áp 390 V. Sự thay đổi SOC và dòng sạc phản ánh đúng đặc tính pin thực tế, cho thấy thuật toán điều khiển hoạt động ổn định và hiệu quả.

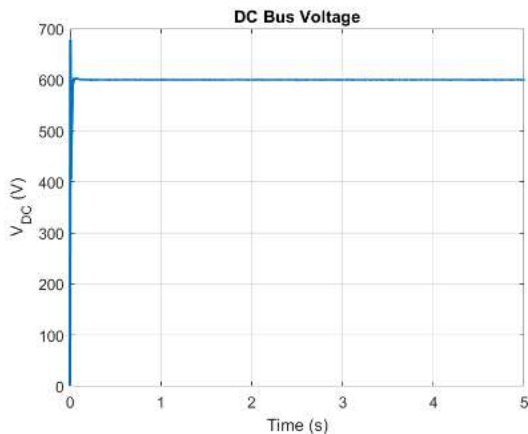


Hình 4.10 Đáp ứng hệ thống trong kiểm nghiệm mạch tăng giảm áp chế độ giảm áp:
a) Đáp ứng điện áp, b) Đáp ứng dòng điện , c) Trạng thái SOC

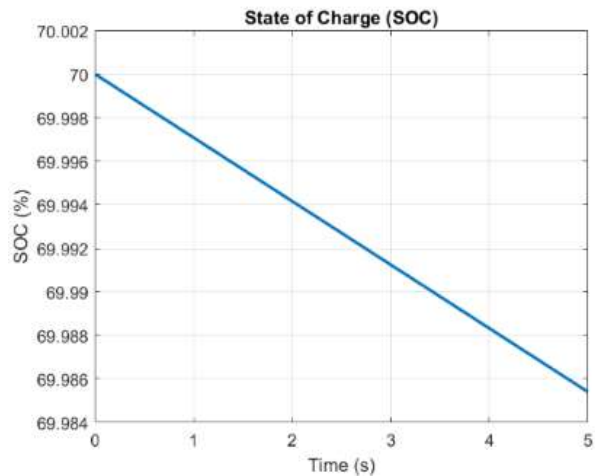
Chế độ tăng áp (Xả pin lưu trữ)

Kết quả mô phỏng quá trình xả pin tại chế độ tăng áp được thể hiện qua Hình 4.11 đến Hình 4.12, bao gồm trạng thái xả SOC, đáp ứng dòng điện và đáp ứng điện áp của hệ thống.

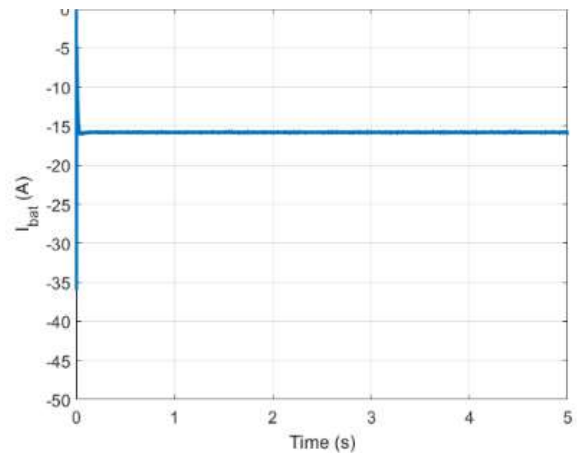
Quá trình xả diễn ra trong khoảng thời gian 5 giây với đặc tính ổn định và khả năng điều khiển tốt. SOC giảm tuyến tính từ 70% xuống 69.984%, thể hiện sự tiêu thụ năng lượng của hệ thống pin. Đáp ứng dòng điện trong cho thấy dòng xả ổn định ở mức -15A sau giai đoạn quá độ ngắn, với độ dao động tối thiểu, chứng tỏ bộ điều khiển dòng hoạt động hiệu quả. Điện áp đầu ra tăng nhanh từ khoảng 300 V lên 600 V trong thời gian quá độ rất ngắn (dưới 0.1 giây) và duy trì ổn định ở mức 600 V trong suốt quá trình xả.



Hình 4.13 Đáp ứng điện áp tại DC bus trong kiểm nghiệm chế độ tăng áp



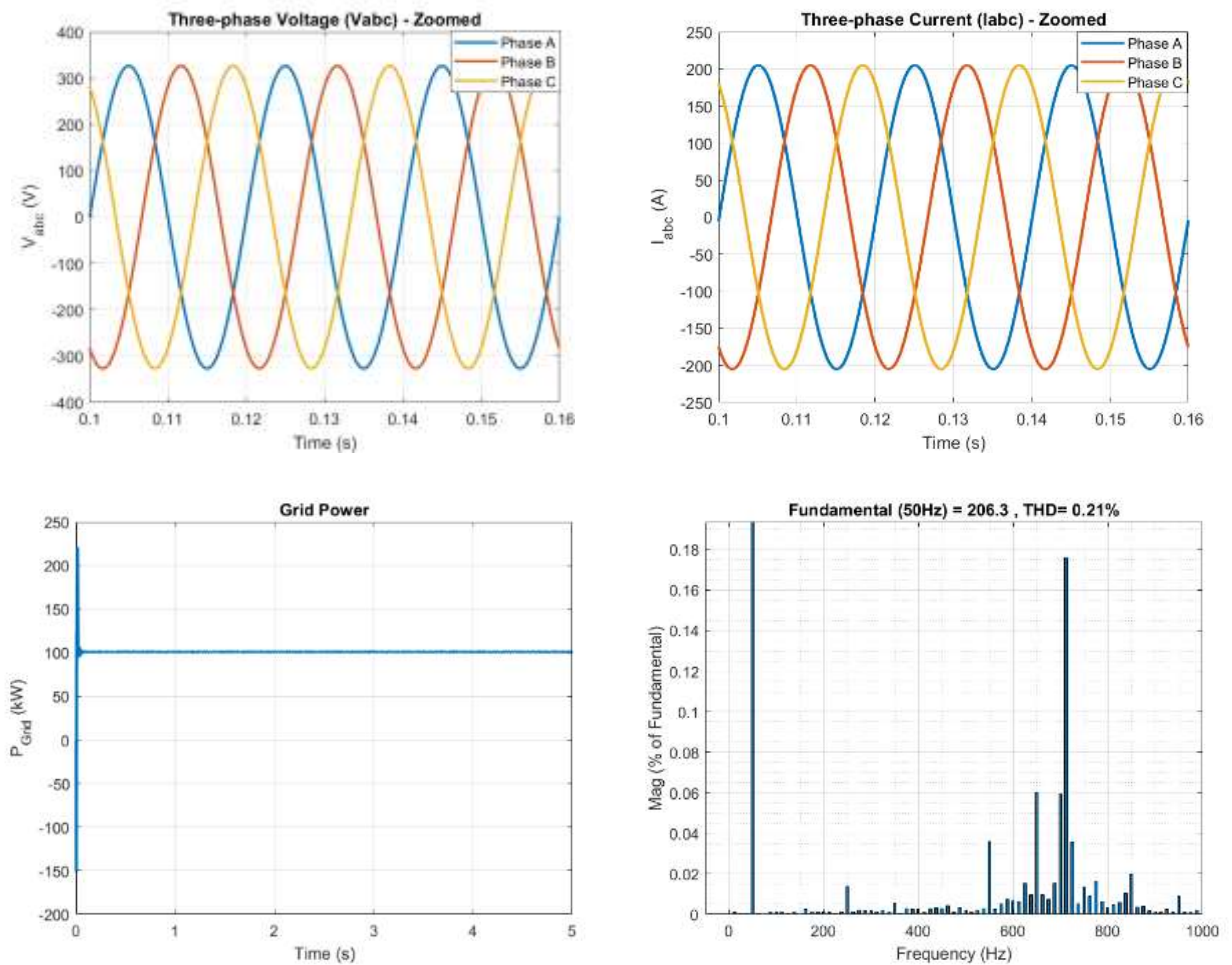
Hình 4.11 Trạng thái SOC trong kiểm nghiệm chế độ tăng áp



Hình 4.12 Đáp ứng dòng điện trong kiểm nghiệm chế độ tăng áp

c. Mạch nghịch lưu

Kết quả mô phỏng của mạch nghịch lưu hai pha ba mức được trình bày trong Hình 4.14. Hiệu suất hệ thống kết nối lưới được đánh giá qua các thông số công suất lưới, điện áp, dòng điện và tổng méo hài (THD). Đồ thị điện áp và dòng điện được khảo sát trong 4 chu kì, thể hiện rõ sự ổn định và đáp ứng của hệ thống. Công suất lưới duy trì tại -100 kW, cung cấp công suất ổn định vào lưới. Phổ hài với THD chỉ 0,20% tại tần số cơ bản 50 Hz, với các hài bậc cao giảm nhanh, tuân thủ tiêu chuẩn IEEE 519-1992 (<5%).



Hình 4.14 Đáp ứng của hệ thống trong kiểm nghiệm mạch DC/AC; a) Đáp ứng điện áp, b) Đáp ứng dòng điện, c) Công suất đẩy lên lưới, d) Méo sóng hài dòng điện

4.3.2 Đáp ứng toàn hệ thống trong kịch bản vận hành

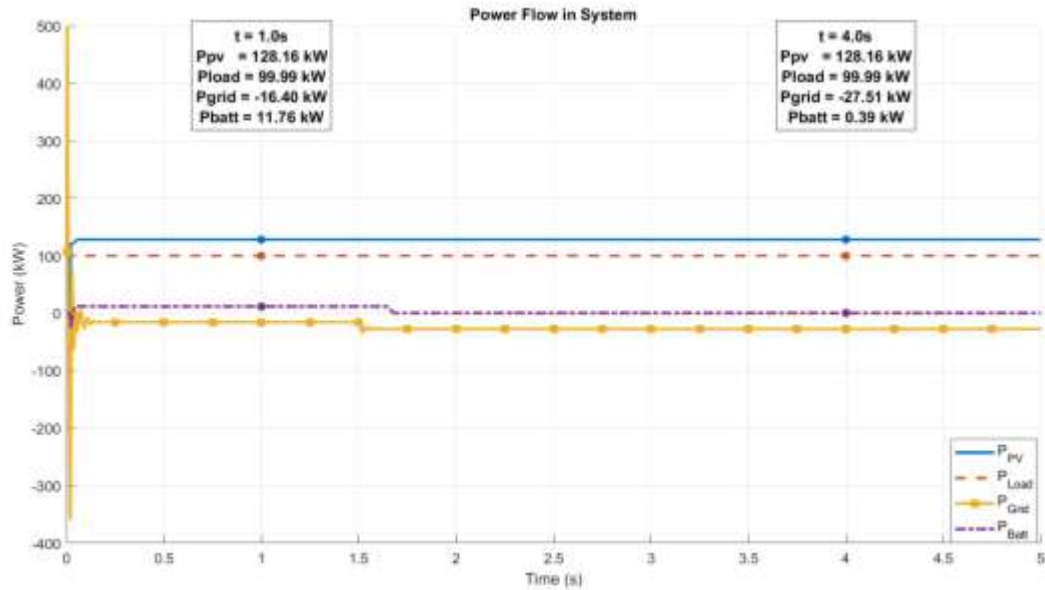
Phần này đánh giá hiệu quả của hệ thống trong các kịch bản vận hành đặt ra

a. Kiểm nghiệm tại Mode 2.2:

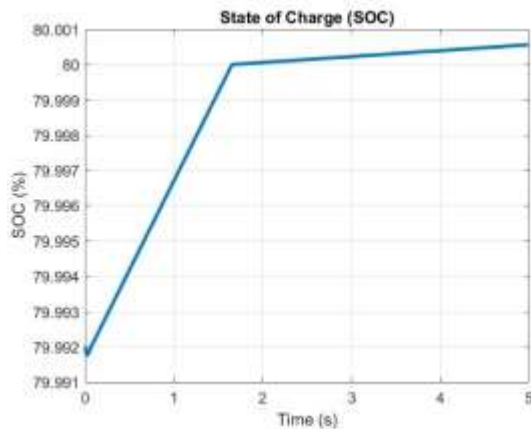
Trong Mode 2.2, kịch bản đặt ra là công suất từ hệ thống PV cao hơn so với tải, pin lưu trữ sẽ sạc tại chế độ CC và CV, năng lượng dư thừa sẽ được đẩy lên lưới. Trạng thái pin ban đầu được thiết lập là 79.92%, công suất tại tải là 100 kW, lượng bức xạ đầu vào là 1000 W/m². Kết quả mô phỏng được thể hiện tại Hình 4.15 đến Hình 4.17.

Kết luận: Hệ thống PV tạo ra công suất duy trì tại 128kW.

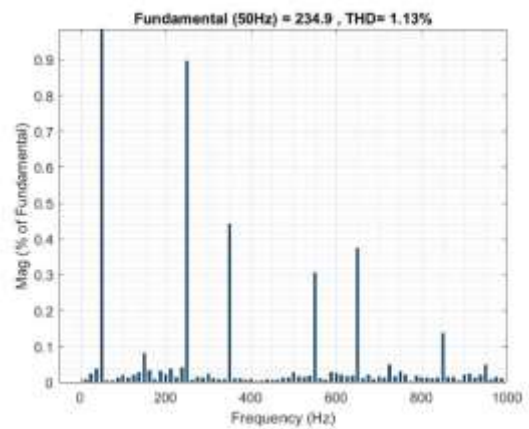
- Pin lưu trữ trong khoảng từ 0 đến 1.3 giây trong chế độ sạc CC với dòng duy trì tại 30 A với công suất 12 kW, sau khi SOC đạt 80%, pin lưu trữ chuyển sang chế độ sạc CV với dòng sạc nhẹ với công suất 0.39kW.
- Công suất tại lưới ban đầu được đẩy lên từ hệ thống vào khoảng 16 kW, sau khi công suất sạc cho pin lưu trữ giảm xuống, công suất tại lưới đo được là 27.5 kW.
- Méo sóng hài đo được tại giây thứ 4 trong 4 chu kì hiện đạt 1.13% (<5% theo tiêu chuẩn IEEE).



Hình 4.15 Đáp ứng công suất hệ thống trong kiểm nghiệm Mode 2.2



Hình 4.16 Trạng thái SoC trong kiểm nghiệm Mode 2.2



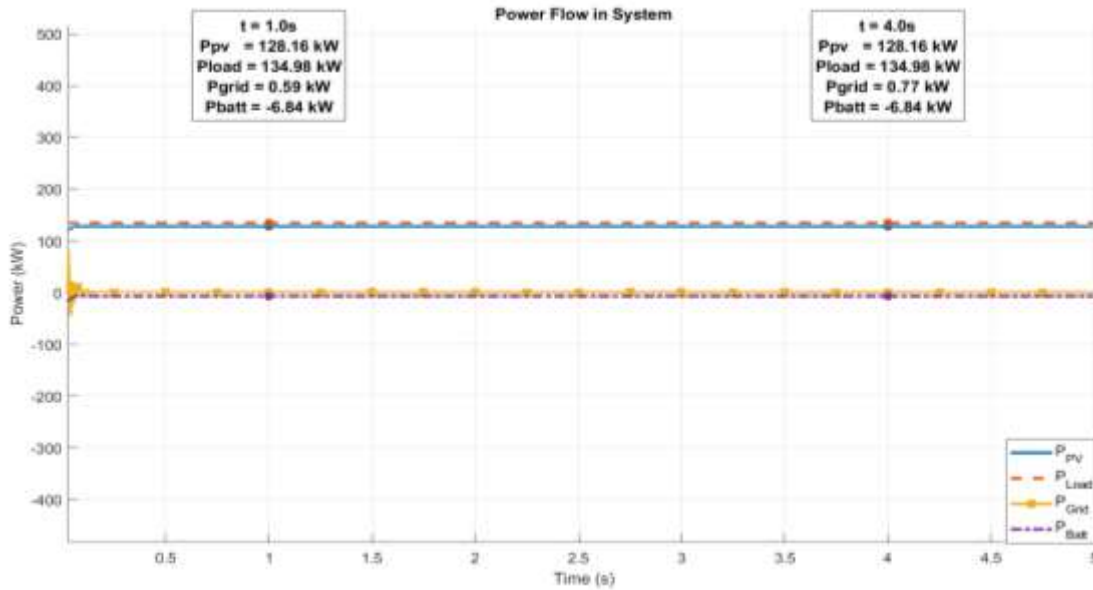
Hình 4.17 Méo sóng hài dòng điện trong kiểm nghiệm Mode 2.2

b. Kiểm nghiệm tại Mode 3.4

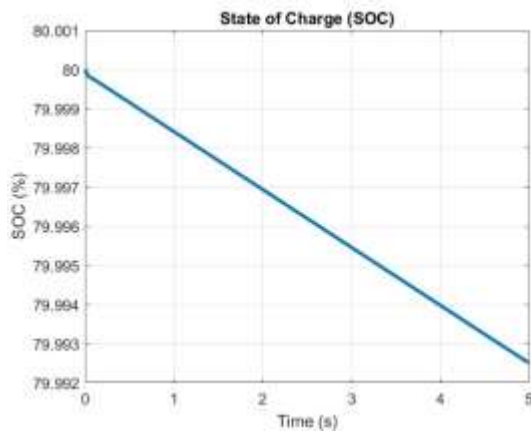
Trong Mode 3.4, kịch bản đặt ra là công suất từ hệ thống PV thấp hơn hơn so với tải, pin lưu trữ sẽ xả dựa theo công suất còn thiếu hụt, không sử dụng năng lượng từ lưới. Trạng thái pin ban đầu được thiết lập là 80%, công suất tại tải là 135 kW, lượng bức xạ đầu vào là 1000 W/m^2 . Kết quả mô phỏng được thể hiện tại Hình 4.18 đến Hình 4.20.

Kết luận:

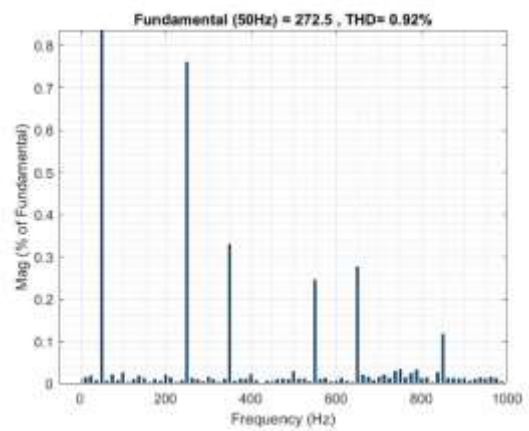
- Hệ thống PV tạo ra công suất duy trì tại 128 kW.
- Công suất tại pin lưu trữ đo được là -7 kW, đang ở trạng thái xả bù cho công suất thiếu tại tải 135 kW.
- Công suất tại lưới đo được là rất nhỏ, bé hơn 1 kW .
- Méo sóng hài đo được tại giây thứ 4 trong 4 chu kì hiện đạt 0.92% (<5% theo tiêu chuẩn IEEE).



Hình 4.18 Đáp ứng công suất hệ thống trong kiểm nghiệm Mode 3.4



Hình 4.19 Trạng thái SoC trong kiểm nghiệm Mode 3.4



Hình 4.20 Méo sóng hài dòng điện trong kiểm nghiệm Mode 3.4

4.3.3 Kết luận

Chương này đã hoàn thành việc kiểm nghiệm hiệu quả vận hành của hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nối lưới thông qua mô phỏng trên nền tảng MATLAB/Simulink R2023a. Quá trình đánh giá được triển khai qua hai giai đoạn: kiểm tra riêng từng khối chức năng và kiểm chứng toàn hệ thống tích hợp trong các chế độ vận hành thực tế.

Kết quả mô phỏng các khối thành phần cho thấy độ ổn định và hiệu quả cao: bộ Boost điều khiển bằng thuật toán MPPT P&O khai thác tối ưu công suất từ mảng PV; bộ Buck-Boost hai chiều điều khiển sạc lithium-ion theo chế độ CC–CV và sau đó xả với điện áp được duy trì tại giá trị đặt; bộ nghịch lưu ba pha điều khiển theo phương pháp VOC kết hợp PLL đảm bảo đồng bộ lưới. Trong điều kiện lý tưởng, hệ thống đạt THD chỉ 0.20%, đáp ứng yêu cầu của tiêu chuẩn IEEE 519-2014.

Hệ thống sau đó được kiểm nghiệm với hai kịch bản vận hành điển hình:

- **Chế độ 2.2 – PV dư thừa, bán lưới:** Khi công suất PV lớn hơn nhu cầu tải, EMS điều phối năng lượng theo thứ tự ưu tiên: cấp tải, sạc pin và đẩy phần dư thừa lên lưới. Hệ thống vận hành ổn định trong quá trình chuyển tiếp giữa các giai đoạn cấp tải và sạc pin, đồng thời vẫn duy trì chất lượng điện áp và dòng điện đầu ra. Tổng độ méo hài THD đo được trong chế độ này là 1.13%, vẫn nằm trong giới hạn cho phép theo tiêu chuẩn.
- **Chế độ 3.4 – PV thiếu, pin lưu trữ xả bám tải:** Trong điều kiện bức xạ thấp hoặc tải cao hơn công suất PV, pin được điều khiển xả để bù công suất thiếu hụt. Hệ thống bám tải hoàn toàn, không xuất công suất lên lưới (công suất lưới bằng 0). EMS giám sát SOC pin và phân phối công suất phù hợp, giữ ổn định điện áp đầu ra. THD đo được trong chế độ này là 0.92%, cho thấy khả năng duy trì chất lượng điện năng tốt ngay cả khi chuyển đổi dòng năng lượng diễn ra liên tục.

Những kết quả này tạo nền tảng vững chắc cho việc đánh giá tổng thể và đề xuất hướng phát triển trong chương kết luận.

CHƯƠNG 5: KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

a. Kết luận chung

Đề tài “Nghiên cứu hệ thống điện mặt trời có lưu trữ nổi lưới” đã hoàn thành các mục tiêu đề ra, bao gồm xây dựng mô hình hệ thống PV lai kết hợp bộ lưu trữ và kết nối lưới điện. Các khối chức năng như mạch Boost, Buck-Boost hai chiều, bộ nghịch lưu DC/AC ba pha, bộ lọc LCL và các thuật toán điều khiển (MPPT, VOC, EMS, PLL) đã được mô hình hóa, tích hợp và kiểm nghiệm trong môi trường Matlab/Simulink.

Hệ thống được giả lập dưới giả định lưới điện ổn định (lưới tin cậy). Các kịch bản mô phỏng tập trung vào hai trường hợp chính: dư công suất và thiếu công suất. Đồng thời, đề tài cũng tiến hành kiểm nghiệm đáp ứng động của từng khối chức năng riêng biệt, nhằm đánh giá độ ổn định, khả năng điều khiển và phối hợp của từng thành phần trong hệ thống.

Các nội dung nổi bật đã được thực hiện gồm:

- Xây dựng mô hình toán học cho từng khối chức năng của hệ thống (PV, pin lưu trữ, mạch chuyển đổi DC/DC, DC/AC...).
- Thiết kế chiến lược điều khiển hệ thống bao gồm thuật toán MPPT (phương pháp Perturb & Observe), điều khiển mạch sạc/xả pin, điều khiển vòng khóa pha (PLL), điều khiển theo hướng điện áp (VOC) và chiến lược điều phối năng lượng (Energy Management Strategy - EMS).
- Mô phỏng đa kịch bản vận hành hệ thống trên nền tảng MATLAB/Simulink, bao gồm cả các tình huống dư thừa công suất, thiếu tải, trạng thái SOC cao/thấp, có/không có ánh sáng mặt trời.
- Phân tích chất lượng điện năng thông qua đáp ứng điện áp, dòng điện, công suất và tổng độ méo sóng hài THD. Kết quả cho thấy hệ thống đáp ứng tốt, với THD dòng điện đầu ra nhỏ hơn 5% – phù hợp tiêu chuẩn IEEE 519.

Từ kết quả thu được, có thể khẳng định rằng hệ thống được thiết kế có khả năng hoạt động ổn định, hiệu quả, đáp ứng các yêu cầu điều khiển công suất, ổn định điện áp DC-link và chất lượng điện năng trong điều kiện vận hành khác nhau.

b. Hạn chế mô hình hiện tại và hướng phát triển

Dù đạt được nhiều kết quả tích cực, mô hình hiện tại vẫn còn một số điểm cần phải cải thiện:

- Mô hình mô phỏng chưa tính đến tổn hao phi tuyến trong linh kiện thực tế như điện trở tiếp xúc, tổn thất chuyển mạch, tổn thất đường dây.
- Chưa xét tới hiện tượng lão hóa pin lưu trữ, tổn hao nhiệt hay ảnh hưởng của nhiệt độ của môi trường.
- Phụ tải khá đơn giản nên chưa phản ánh được các đặc tính thay đổi theo thời gian hoặc có hệ số công suất thấp.
- Các thuật toán trên hiện tại áp dụng cho hệ thống có lưới tin cậy, chưa bao gồm các trường hợp mất lưới hoặc đảo lưới.
- Chưa có mô hình phần cứng để kiểm nghiệm thực tế từ đó đánh giá sai số giữa mô phỏng và thực tế.

c. Hướng phát triển của đề tài:

- Cải thiện mô hình mô phỏng bao gồm các yếu tố thực như tổn hao, hiệu ứng nhiệt,...
- Thêm các thuật toán điều khiển hệ thống khi xảy ra vấn đề đảo lưới và mất lưới.
- Thực hiện thiết kế và thử nghiệm phần cứng quy mô nhỏ để đánh giá hiệu suất thực từ đó tinh chỉnh các thuật toán điều khiển.
- Áp dụng trí tuệ nhân tạo để tối ưu hóa chiến lược điều phối năng lượng và dự báo trạng thái pin.
- Mở rộng để tích hợp thêm các nguồn tài nguyên tái tạo khác như gió từ đó hướng tới lưới điện thông minh và bền vững

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

- [1] Jain, Kriti, Manju Gupta, and Aashish Kumar Bohre. "Implementation and comparative analysis of P&O and INC MPPT method for PV system." 2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE). IEEE, 2018.
- [2] Singh, Omveer, and Shailesh Kumar Gupta. "A review on recent Mppt techniques for photovoltaic system." 2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxT). IEEE, 2018.
- [3] Azad, Murari Lal, Pradip Kumar Sadhu, and Soumya Das. "Comparative study between P&O and incremental conduction MPPT techniques-a review." 2020 International Conference on Intelligent Engineering and Management (ICIEM). IEEE, 2020.
- [4] Beriber, Dalila, and Abdelaziz Talha. "MPPT techniques for PV systems." 4th International conference on power engineering, energy and electrical drives. IEEE, 2013.
- [5] Christopher, I. William, and R. Ramesh. "Comparative study of P&O and InC MPPT algorithms." American Journal of Engineering Research (AJER) 2.12 (2013): 402-408.
- [6] Mohapatra, Alivarani, et al. "A review on MPPT techniques of PV system under partial shading condition." Renewable and Sustainable Energy Reviews 80 (2017): 854-867.
- [7] Tajuddin, Mohammad Faridun Naim, et al. "Perturbative methods for maximum power point tracking (MPPT) of photovoltaic (PV) systems: a review." International Journal of Energy Research 39.9 (2015): 1153-1178.
- [8] Kamarzaman, Nur Atharah, and Chee Wei Tan. "A comprehensive review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems." Renewable and Sustainable Energy Reviews 37 (2014): 585-598.
- [9] Hohm, D. P., and M. E_ Ropp. "Comparative study of maximum power point tracking algorithms." Progress in photovoltaics: Research and Applications 11.1 (2003): 47-62.
- [10] Ahmed, Jubaer, and Zainal Salam. "An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency." Applied Energy 150 (2015): 97-108.

- [11] Kumari, J. Surya, Dr Ch Sai Babu, and A. Kamalakkar Babu. "Design and analysis of P&O and IP&O MPPT techniques for photovoltaic system." *International Journal of Modern Engineering Research* 2.4 (2012): 2174-2180.
- [12] Ma, Tao, Hongxing Yang, and Lin Lu. "Solar photovoltaic system modeling and performance prediction." *Renewable and sustainable energy reviews* 36 (2014): 304-315.
- [13] Banu, Ioan-Viorel, and Marcel Istrate. "Modeling and simulation of photovoltaic arrays." *Buletinul AGIR* 3 (2012): 161-166.
- [14] Kamal, Keshavani, et al. "Modelling and simulation of photovoltaic array using Matlab/Simulink." *International journal of engineering development and research* 2.4 (2014): 3742-3751.
- [15] Alsaid, Basim, and Jafar Jallad. "Modeling and simulation of photovoltaic cells/modules/arrays." *Int. J. Res. Rev. Comput. Sci.(IJRRCS)* 2.6 (2011).
- [16] Villalva, Marcelo Gradella, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho. "Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays." *2009 Brazilian power electronics conference. IEEE*, 2009.
- [17] Vidyanandan, K. V. "An overview of factors affecting the performance of solar PV systems." *Energy Scan* 27.28 (2017): 216.
- [18] Singh, Bhuwan Pratap, Sunil Kumar Goyal, and Prakash Kumar. "Solar PV cell materials and technologies: Analyzing the recent developments." *Materials Today: Proceedings* 43 (2021): 2843-2849.
- [19] Nayak, Pabitra K., et al. "Photovoltaic solar cell technologies: analysing the state of the art." *Nature Reviews Materials* 4.4 (2019): 269-285.
- [20] Spiers, David. "Batteries in PV systems." *Practical Handbook of Photovoltaics*. Academic Press, 2012. 721-776.
- [21] Thuy, Nguyễn Vĩnh, and Nguyễn Văn Chí. "ƯỚC LƯỢNG SoC CỦA PIN LITHIUM-ION SỬ DỤNG BỘ QUAN SÁT BÌNH PHƯƠNG CỰC TIỂU HỒI QUY." *TNU Journal of Science and Technology* 178.02 (2018): 79-84.
- [22] Fan, Haifeng. "Design tips for an efficient non-inverting buck-boost converter." *Analog Applications Journal, Texas Instruments* (2014): 20-25.

- [23] Kim, Sunghwan, Haiyoung Jung, and Seok-hyun Lee. "Modified Design of Two-Switch Buck-Boost Converter to Improve Power Efficiency Using Fewer Conduction Components." *Applied Sciences* 13.1 (2022): 343.
- [24] Babaa, Saleh E., et al. "Overview of boost converters for photovoltaic systems." *Journal of Power and Energy Engineering* 6.4 (2018): 16-31.
- [25] Nagarajan, R., et al. "Implementation of PI controller for boost converter in PV system." *International Journal of Advanced Research in Management, Architecture, Technology and Engineering (IJARMATE)* 11 (2016): 6-10.
- [26] Mohamed, H. A., et al. "Design, control and performance analysis of DC-DC boost converter for stand-alone PV system." *2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. IEEE, 2016.
- [27] Brivio, Claudio. "Battery energy storage systems: Modelling, applications and design criteria." (2017).
- [28] Wang, Huai, and Frede Blaabjerg. "Reliability of capacitors for DC-link applications in power electronic converters—An overview." *IEEE Transactions on Industry Applications* 50.5 (2014): 3569-3578.
- [29] Guo, Cheng, et al. "Review of the calculation of DC-link capacitor current." *Frontiers in Energy Research* 11 (2023): 1240755.
- [30] International Energy Agency (IEA). *World Energy Outlook 2024*. Paris: IEA, 2024.
- [31] Nguyen, M. P., Ponomarenko, T., & Nguyen, N. (2024). *Energy Transition in Vietnam: A Strategic Analysis and Forecast*. *Sustainability*, 16(5), 1969.
- [32] Khatib, Tamer, Ibrahim A. Ibrahim, and Azah Mohamed. "A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system." *Energy Conversion and Management* 120 (2016): 430-448.
- [33] Karthikeyan, V., et al. "Grid-connected and off-grid solar photovoltaic system." *Smart energy grid design for island countries: Challenges and opportunities* (2017): 125-157.
- [34] Ikaouassen, Halima, et al. "Modified predictive model control based MPPT for standalone PV in distribution system." *2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*. IEEE, 2018.
- [35] Hansen, Anca D., et al. "Models for a stand-alone PV system." (2001).

- [36] Sharma, Gourav. "A Review on Grid-Connected PV System." *International Journal of Trend in Scientific Research and Development* 1.4 (2017): 558-563.
- [37] Berwal, Anil K., et al. "Design and analysis of rooftop grid tied 50 kW capacity Solar Photovoltaic (SPV) power plant." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77 (2017): 1288-1299.
- [38] Karchi, Nalini, and Deepak Kulkarni. "LMS adaptive FIR filter-predictive controller based on DQ control theory for grid-connected solar PV system." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1272. No. 1. IOP Publishing, 2022.
- [39] Mathews, Neel, et al. "Grid tied roof top solar: problems, learnings and solutions." *2016 First International Conference on Sustainable Green Buildings and Communities (SGBC)*. IEEE, 2016.
- [40] Rekioua, Djamila, and Djamila Rekioua. "Hybrid renewable energy systems overview." *Hybrid Renewable Energy Systems: Optimization and Power Management Control* (2020): 1-37.
- [41] Badwawi, Rashid Al, Mohammad Abusara, and Tapas Mallick. "A review of hybrid solar PV and wind energy system." *Smart Science* 3.3 (2015): 127-138.
- [42] Chakir, Asmae, et al. "Optimal energy management for a grid connected PV-battery system." *Energy Reports* 6 (2020): 218-231.
- [43] Guichi, Amar, et al. "Energy management and performance evaluation of grid connected PV-battery hybrid system with inherent control scheme." *Sustainable cities and society* 41 (2018): 490-504.
- [44] Muriithi, Grace, and Sunetra Chowdhury. "Optimal energy management of a grid-tied solar pv-battery microgrid: A reinforcement learning approach." *Energies* 14.9 (2021): 2700.
- [45] Ibrahim, Marwa M. "Energy management strategies of hybrid renewable energy systems: A review." *Wind Engineering* 48.1 (2024): 133-161.
- [46] Olatomiwa, Lanre, et al. "Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62 (2016): 821-835.
- [47] Dufo-López, Rodolfo, et al. "Comparison of lead-acid and li-ion batteries lifetime prediction models in stand-alone photovoltaic systems." *Applied Sciences* 11.3 (2021): 1099.

- [48] Reddy, K. Shashidhar, et al. "Materials For Photovoltaics and Batteries: A Brief Review." E3S Web of Conferences. Vol. 616. EDP Sciences, 2025.
- [49] Rodriguez, Pedro, et al. "Control of power converters in distributed generation applications under grid fault conditions." 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. IEEE, 2011. Zmood, D. N., & Holmes, D. G. (2003). "Stationary Frame Current Regulation of PWM Inverters with Zero Steady-State Error." IEEE Transactions on Power Electronics.
- [50] Blaabjerg, Frede, et al. "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems." IEEE Transactions on industrial electronics 53.5 (2006): 1398-1409. Blaabjerg, F., & Consoli, A. (1998). "Control of Power Converters in Distributed Generation Applications." IEEE Transactions on Industrial Electronics
- [51] Chung, S. K. (2000). "A Phase Tracking System for Three-Phase Utility Interface Inverters." IEEE Transactions on Power Electronics, 15(3), 431-438
- [52] Holmes, D. G., & Lipo, T. A. (2003). Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice. Wiley-IEEE Press
- [53] Control of Power Electronic Converters and Systems: Volume 2 - Google Sách
- [54] Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems - Remus Teodorescu, Marco Liserre, Pedro Rodriguez - Google Sách
- [55] Kuznetsov, Nikolay V., et al. "Hidden attractors in dynamical models of phase-locked loop circuits: limitations of simulation in MATLAB and SPICE." Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation 51 (2017): 39-49.
- [56] Liserre, Marco, Frede Blaabjerg, and Steffan Hansen. "Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier." IEEE Transactions on industry applications 41.5 (2005): 1281-1291.
- [57] Analysis of Electric Machinery and Drive Systems | IEEE eBooks | IEEE Xplore
- [58] Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications - Amirnaser Yazdani, Reza Iravani - Google Sách
- [59] Zomood, N. "Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-error." IEEE Trans. Power Electronics 18.3 (2003): 814-822.
- [60] Luận án tiến sĩ Kỹ thuật: Điều khiển bộ nghịch lưu nối lưới trong mạng điện phân phối - TaiLieu.VN
- [61] Điều khiển nghịch lưu nối lưới ba pha khi mất cân bằng điện áp
- [62] Thiết kế bộ nghịch lưu ba pha ba bậc có nối lưới
- [63] Reznik A, Godoy Simoes M, Al-Durra A, Mueeen SM. LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid Interconnected Systems, IEEE Transactions on Industry Applications. 2014

- [64] Modelling, Design and Performance Analysis of LCL Filter for Grid Connected Three Phase Power Converters
- [65] Said-Romdhane, Marwa Ben, et al. "An improved LCL filter design in order to ensure stability without damping and despite large grid impedance variations." *Energies* 10.3 (2017): 336.