

**ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA ĐIỆN**

**ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP
CAPSTONE PROJECT**

NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN VÀ TỰ ĐỘNG HÓA

ĐỀ TÀI:

**NGHIÊN CỨU NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG ĐIỀU
KHIỂN HỆ THỐNG PHÁT ĐIỆN GIÓ PMSG**

Người hướng dẫn: **TS. TRƯƠNG THỊ BÍCH THANH
TS. NGUYỄN VĂN TẤN**

Sinh viên thực hiện:

- 1. TRƯƠNG QUANG VŨ – MSSV: 105200440 – LỚP: 20TDHCLC2**
- 2. NGUYỄN THẾ QUÂN – MSSV: 105200465 – LỚP: 20TDHCLC3**

Đà Nẵng, 6/2025

TÓM TẮT

Tên đề tài: NGHIÊN CỨU NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG PHÁT ĐIỆN GIÓ PMSG

Sinh viên thực hiện: Trương Quang Vũ – Nguyễn Thế Quân

Số thẻ SV: 105200440 - 105200465

Lớp: 20TDHCLC2 – 20TDHCLC3

Đề tài "Nghiên cứu nâng cao chất lượng điều khiển hệ thống phát điện gió PMSG" tập trung vào việc cải thiện hiệu suất và độ ổn định của các hệ thống tuabin gió sử dụng máy phát đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSG) trong bối cảnh nhu cầu ngày càng tăng đối với năng lượng tái tạo và những thách thức khi tích hợp các nguồn năng lượng biến đổi vào lưới điện. Mục tiêu chính của nghiên cứu là thiết kế, so sánh và ứng dụng các phương pháp điều khiển hiện đại để tối ưu hóa việc khai thác năng lượng và đảm bảo chất lượng điện năng. Nội dung cốt lõi của đề tài xoay quanh việc xây dựng mô hình toán học và tiến hành mô phỏng toàn bộ hệ thống trên nền tảng MATLAB/Simulink, bao gồm các thành phần chính như tuabin gió, máy phát PMSG, và các bộ biến đổi công suất. Hai khía cạnh điều khiển chính được nghiên cứu sâu: thuật toán theo dõi điểm công suất cực đại (MPPT) và chiến lược điều khiển máy phát. Đối với MPPT, phương pháp "Leo đồi" (Hill Climbing Search - HCS) truyền thống được so sánh với một giải pháp cải tiến sử dụng logic mờ (Fuzzy Logic Controller - FLC). Kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán FLC thể hiện sự vượt trội trong việc giảm thiểu dao động công suất và duy trì hệ số hiệu suất ở mức tối ưu, từ đó giúp khai thác năng lượng gió một cách hiệu quả và ổn định hơn. Đối với việc điều khiển máy phát và bộ biến đổi, đề tài thực hiện so sánh giữa bộ điều khiển PI kinh điển và phương pháp Điều khiển dự báo mô hình (Model Predictive Control - MPC). Phân tích mô phỏng đã chứng minh rằng MPC mang lại hiệu quả cao hơn đáng kể so với PI. Cụ thể, MPC không chỉ cải thiện độ ổn định của tốc độ rotor và công suất phát ra mà còn xử lý hiệu quả các ràng buộc vật lý của hệ thống như giới hạn về dòng điện và điện áp, một yếu tố mà bộ điều khiển PI gặp khó khăn trong việc đảm bảo, đặc biệt là trong các điều kiện vận hành quá độ. Nhìn chung, nghiên cứu đã khẳng định rằng việc áp dụng các thuật toán điều khiển tiên tiến như FLC cho MPPT và MPC cho điều khiển máy phát có thể cải thiện đáng kể chất lượng vận hành của hệ thống phát điện gió PMSG, góp phần nâng cao hiệu quả của các dự án năng lượng gió.

NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

TT	Họ tên sinh viên	Số thẻ SV	Lớp	Ngành
1	Trương Quang Vũ	105200440	20TDHCLC2	Kỹ thuật điều khiển & tự động hóa
2	Nguyễn Thế Quân	105200465	20TDHCLC3	Kỹ thuật điều khiển & tự động hóa

1. Tên đề tài đồ án:

NGHIÊN CỨU NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG PHÁT ĐIỆN GIÓ PMSG

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	Trương Quang Vũ	- Viết báo cáo và thuyết minh. - Nghiên cứu tổng quan về các hệ thống điện gió và máy phát PMSG.
2	Nguyễn Thế Quân	- Nghiên cứu tổng quan về các phương pháp điều khiển hiện đại (PI, MPC, MPPT).

b. Phần riêng:

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung
1	Trương Quang Vũ	<ul style="list-style-type: none"> - Nghiên cứu và thiết kế phương pháp điều khiển dự báo mô hình (MPC) trong điều khiển momen máy điện. - Xây dựng mô hình mô phỏng tổng thể hệ thống trên MATLAB/Simulink. - Phân tích, so sánh và đánh giá kết quả mô phỏng giữa các phương pháp điều khiển (PI và MPC).
2	Nguyễn Thế Quân	<ul style="list-style-type: none"> - Xây dựng mô hình toán học và mô phỏng hệ thống máy phát sức gió PMSG (tuabin, máy phát, bộ biến đổi công suất). - Nghiên cứu, thiết kế và so sánh các thuật toán MPPT (HCS truyền thống và cải tiến bằng Fuzzy Logic). - Thiết kế, tính toán và lựa chọn tham số cho bộ điều khiển PI.

5. Các bản vẽ, đồ thị (ghi rõ các loại và kích thước bản vẽ):

a. Phần chung:

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung
1	Trương Quang Vũ	<ul style="list-style-type: none"> - Sơ đồ cấu trúc chung của hệ thống phát điện gió PMSG. - Sơ đồ cấu trúc điều khiển tổng quát của hệ thống.
2	Nguyễn Thế Quân	

b. Phần riêng:

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung
1	Trương Quang Vũ	<ul style="list-style-type: none"> - Sơ đồ nguyên lý và sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển MPC. - Các đồ thị mô phỏng so sánh hiệu năng giữa các phương pháp.

		- Hình vẽ minh họa các thành phần trong hệ thống gió
2	Nguyễn Thế Quân	- Lưu đồ thuật toán và mô hình các phương pháp MPPT (HCS, FLC). - Sơ đồ khối và các hàm truyền của bộ điều khiển PI.

6. <i>Họ tên người hướng dẫn:</i>	<i>Phần/ Nội dung:</i>
TS. Trương Thị Bích Thanh	- Tư vấn về mô hình hóa hệ thống và các phương pháp điều khiển nâng cao. - Hỗ trợ giải đáp các vấn đề chuyên sâu trong quá trình nghiên cứu. - Theo dõi tiến độ của dự án.
TS. Nguyễn Văn Tân	- Hướng dẫn tư vấn giải pháp, lựa chọn công nghệ cho dự án. - Hướng dẫn làm thuyết trình báo cáo dự án. - Đánh giá kết quả mô phỏng của dự án.

7. Ngày giao nhiệm vụ đồ án: 17/2/2025

8. Ngày hoàn thành đồ án: 30/5/2025

Đà Nẵng, ngày 14 tháng 6 năm 2025

Trưởng Bộ môn Tự động hóa

Người hướng dẫn

TS. Giáp Quang Huy

TS. Trương Thị Bích Thanh

PHIẾU KIỂM SOÁT TIẾN ĐỘ LÀM ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

(Phiếu dành cho người hướng dẫn/sinh viên)

- Họ tên sinh viên: Trương Quang Vũ
Nguyễn Thế Quân
- Số thẻ SV: 105200440
105200465
- Tên đề tài ĐATN: *Nghiên cứu nâng cao chất lượng điều khiển hệ thống phát điện gió PMSG*
- Họ tên người HD1: TS. Trương Thị Bích Thanh
Đơn vị: Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQĐHN
- Họ tên người HD2: TS. Nguyễn Văn Tấn
Đơn vị: Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQĐHN

Tuần	Ngày	Khối lượng		GVHD ký tên
		Đã thực hiện (%)	Tiếp tục thực hiện (%)	
1	17/02/2025	Nhận đề tài.	Gặp người hướng dẫn hướng đề án.	
2	25/02/2025	Nghiên cứu tổng quan về hệ thống điện gió và lựa chọn máy phát PMSG.	Những vấn đề đang có của hệ thống điện gió.	
3	04/03/2025	Xác định những yêu cầu và bài toán đặt ra của hệ thống.	Bắt đầu xây dựng mô hình toán học cho tuabin gió.	
4	11/03/2025	Duyệt lần 1: Đánh giá khối lượng công việc hoàn thành: % Được tiếp tục làm ĐATN <input type="checkbox"/> Không tiếp tục thực hiện ĐATN <input type="checkbox"/>		

5	18/03/2025	Xây dựng mô hình toán học cho tuabin gió.	Xây dựng mô hình toán bộ biến đổi công suất, mô hình toán máy phát, và mô hình toán phía lưới.	
6	25/03/2025	Hoàn thành mô hình toán của cả hệ thống. Bắt đầu nghiên cứu thuật toán MPPT.	Mô phỏng thuật toán MPPT TSR truyền thống.	
7	01/04/2025	Duyệt lần 2: Đánh giá khối lượng công việc hoàn thành: % Được tiếp tục làm ĐATN <input type="checkbox"/> Không tiếp tục thực hiện ĐATN <input type="checkbox"/>		
8	08/04/2025	Thiết kế bộ điều khiển PI dựa trên mô hình toán đã xây dựng. Mô phỏng đáp ứng của mô hình toán tuabin khi sử dụng TSR MPPT.	Mô phỏng thuật toán MPPT HCS.	
9	15/04/2025	Mô phỏng đáp ứng của mô hình toán tuabin khi sử dụng HCS MPPT.	Nghiên cứu và thiết kế MPPT cải tiến bằng Logic mờ.	
10	22/04/2025	Mô phỏng đáp ứng của mô hình toán tuabin khi sử dụng FLC HCS MPPT.	Gỡ lỗi thuật toán FLC HCS MPPT.	
11	29/04/2025	Hoàn thành FLC HCS MPPT.	Xây dựng mô hình Simscapse của cả hệ thống thay thế mô hình toán.	
12	06/05/2025	Duyệt lần 3: Đánh giá khối lượng công việc hoàn thành: % Được tiếp tục làm ĐATN <input type="checkbox"/> Không tiếp tục thực hiện ĐATN <input type="checkbox"/>		

13	13/05/2025	Tìm hiểu sơ lược bộ điều khiển MPC.	Nghiên cứu vị trí MPC được sử dụng trong điều khiển máy điện. Xây dựng bộ điều khiển MPC.	
14	20/05/2025	Hoàn thành mô hình Simscapse của cả hệ thống. Tích hợp các phương pháp MPPT cũng như điều khiển PI, MPC trong hệ mô phỏng vật lý.	Chạy mô phỏng và gỡ lỗi với các phương pháp.	
15	27/05/2025	Thu thập dữ liệu và các đồ thị kết quả.	Viết kết luận (Chương 6) và hoàn thiện toàn bộ nội dung báo cáo.	
16	03/06/2025	Rà soát, chỉnh sửa lỗi chính tả, định dạng báo cáo. Chuẩn bị slide thuyết trình.		

LỜI NÓI ĐẦU VÀ CẢM ƠN

Ngày nay, cùng với sự phát triển không ngừng của nền kinh tế thì nhu cầu năng lượng là hết sức cần thiết đối với mỗi quốc gia, nhất là đối với các nước đang phát triển. Với tình trạng các nguồn năng lượng hóa thạch như than đá, dầu mỏ đang dần cạn kiệt, thì các nguồn năng lượng sạch (như mặt trời, gió...) đang được Nhà nước hết sức chú trọng và tạo điều kiện đặc biệt để phát triển. Trong đó, năng lượng gió được coi là một nguồn năng lượng rẻ, vô tận, là một nguồn năng lượng sạch có thể dần thay thế cho các nguồn năng lượng truyền thống, từ đó giảm thiểu biến đổi khí hậu, tạo nền tảng phát triển lâu dài cho đất nước. Tuy nhiên, khi lưới điện có sự tham gia của nhiều nguồn năng lượng tái tạo như gió và mặt trời sẽ dẫn đến những ảnh hưởng đến các chế độ vận hành và hoạt động của lưới điện. Điều này đặt ra những thách thức cho việc thiết kế, vận hành hệ thống điện một cách hiệu quả và an toàn và tối ưu nhất, đảm bảo khả năng cung cấp điện cho các hộ tiêu thụ.

Đề tài “NGHIÊN CỨU NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG PHÁT ĐIỆN GIÓ PMSG” được thực hiện với mong muốn có thể tích hợp các phương pháp điều khiển nâng cao để có thể đáp ứng các yêu cầu về chất lượng, hiệu quả, an toàn và tối ưu như đã đề ra. Trong suốt quá trình thực hiện đề án, nhóm em đã nhận được sự hướng dẫn và hỗ trợ quý báu từ nhiều cá nhân và thầy cô. Trước hết, em xin gửi lời cảm ơn chân thành đến TS. Trương Thị Bích Thanh – giảng viên hướng dẫn và TS. Nguyễn Văn Tấn – giảng viên đồng hướng dẫn đã tận tình định hướng, giải đáp và hỗ trợ em trong suốt quá trình nghiên cứu, thực hiện đề tài.

Nhóm em xin gửi lời tri ân sâu sắc đến gia đình và bạn bè đã luôn là chỗ dựa tinh thần, đồng hành và động viên chúng em trong suốt chặng đường học tập và hoàn thiện đề án. Và mặc dù đã cố gắng hết sức để hoàn thành đề án, thì đây cũng là một đề tài mà chúng em mới được tiếp cận về mảng năng lượng tái tạo vì vậy trong quá trình làm đề án, nhóm không tránh khỏi những sai sót và hạn chế về kiến thức. Chúng em rất mong nhận được sự góp ý, chỉ bảo và đánh giá từ các quý thầy cô giáo trong bộ môn để có thể hoàn thiện hơn nữa kiến thức chuyên môn của mình.

Cuối cùng, chúng em xin kính chúc các thầy cô luôn dồi dào sức khỏe, hạnh phúc và tiếp tục đào tạo thêm nhiều thế hệ kỹ sư chất lượng cho ngành Điện.

Chúng em xin chân thành cảm ơn!

LỜI CAM ĐOAN LIÊM CHÍNH HỌC THUẬT

Chúng em xin cam đoan rằng toàn bộ nội dung của báo cáo đề án tốt nghiệp với đề tài “Nghiên cứu nâng cao hiệu quả vận hành trong hệ thống máy phát sức gió PMSG” là kết quả của quá trình nghiên cứu và thực hiện nghiêm túc, dưới sự hướng dẫn khoa học của giảng viên TS. Trương Thị Bích Thanh và TS. Nguyễn Văn Tấn.

Tất cả các số liệu, kết quả thực nghiệm, mô hình xây dựng, phần mềm phát triển và nội dung phân tích trong báo cáo đều do chính nhóm chúng em thực hiện. Các tài liệu, hình ảnh, thuật toán và nội dung tham khảo từ các nguồn khác đều được trích dẫn rõ ràng theo đúng quy định về học thuật.

Chúng em tuyệt đối không sao chép hoặc sử dụng trái phép nội dung từ các công trình nghiên cứu khác. Nếu phát hiện có bất kỳ hành vi vi phạm đạo đức nghiên cứu nào, chúng em xin hoàn toàn chịu trách nhiệm trước hội đồng khoa học, nhà trường và các cơ quan chức năng có thẩm quyền.

Sinh viên thực hiện

Trương Quang Vũ

Nguyễn Thế Quân

MỤC LỤC

CHƯƠNG 1. GIỚI THIỆU ĐỀ TÀI	1
1.1. Các nguồn năng lượng tái tạo phổ biến hiện nay.....	1
1.2. Thực trạng hiện nay.....	5
1.3. Mục tiêu đề tài.....	7
1.4. Phạm vi của đề tài.....	7
CHƯƠNG 2. GIỚI THIỆU VỀ NĂNG LƯỢNG GIÓ.....	9
2.1. Tổng quan về năng lượng gió.....	9
2.2. Cấu tạo của turbine gió	9
2.3. Các hệ thống máy phát điện gió điển hình	11
2.4. Kết luận chương	13
CHƯƠNG 3. CẤU TRÚC HỆ THỐNG VÀ MÔ HÌNH HÓA HỆ THỐNG MÁY PHÁT SỨC GIÓ	14
3.1. Cấu trúc chung của hệ thống	14
3.2. Đặc tính tua bin gió.....	15
3.3. Mô hình cơ truyền động	16
3.4. Mô hình hóa máy điện đồng bộ PMSG.....	17
3.5. Các bộ biến đổi công suất.....	20
3.6. Thuật toán MPPT	21
3.7. Kết luận chương	29
CHƯƠNG 4. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN.....	30
4.1. Sơ đồ cấu trúc điều khiển	30
4.2. Lựa chọn tham số bộ điều khiển.....	34
4.3. Phương pháp điều khiển dự báo mô hình	43
4.4. Kết luận chương	49
CHƯƠNG 5. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ.....	50
5.1. So sánh các phương pháp MPPT	53

5.2. So sánh phương pháp MPC và PI	58
KẾT LUẬN.....	62
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	63

DANH SÁCH CÁC BẢNG, HÌNH VẼ

Bảng 3.1 Bảng luật mờ	28
Bảng 5.1 Thông số cả hệ thống.....	51
Bảng 5.2 Tham số điều khiển	51
Hình 1.1. Sơ đồ của nhà máy thủy điện kiểu đập	2
Hình 1.2. Sơ đồ của nhà máy thủy điện kiểu kênh dẫn	2
Hình 1.3. Sơ đồ hệ thống quang điện mặt trời nối lưới	3
Hình 1.4. Sơ đồ hệ thống điện mặt trời tập trung	3
Hình 1.5. Sơ đồ hệ thống điện gió nối lưới.....	5
Hình 1.6 Công suất lắp đặt của Việt Nam từ 2016 – 2024	7
Hình 2.1 Cấu tạo tuabin gió	9
Hình.2.2 Mô hình Hệ thống điện gió tốc độ không đổi	11
Hình 2.3 Hệ thống dựa trên máy không đồng bộ và bộ chuyển đổi công suất điện tử	12
Hình 2.4 Hệ thống dựa trên máy không đồng bộ kép (Doubly-fed).....	12
Hình 2.5 Hệ thống dựa trên máy đồng bộ từ trường vĩnh cửu.....	12
Hình 3.1 Cấu trúc động lực chung hệ thống	14
Hình.3.2 Đường đặc tính công suất gió	16
Hình 3.3 Sơ đồ đơn giản hóa cho hệ thống truyền động	16
Hình 3.4. Mặt cắt của một máy phát PMSG 2 cực	18
Hình 3.5. Bộ biến đổi DC/AC.....	21
Hình 3.6. Chiến lược điều khiển tua bin gió dựa trên bốn vùng tốc độ.....	22
Hình 3.7. Mô hình thuật toán TSR.....	23
Hình 3.8. Sơ đồ công suất tuabin theo vận tốc rotor.....	24

Hình 3.9 Nguyên lý thuật toán HCS	24
Hình 3.10 Sơ đồ cấu trúc HCS.....	25
Hình 3.11 Cấu trúc bộ điều khiển mờ.....	26
Hình 3.12 Các hàm membership của hệ thống	27
Hình 3.13 Mô hình thuật toán HCS cải tiến	28
Hình 4.1. Cấu trúc điều khiển tổng quát của hệ thống điện gió.....	30
Hình 4.2 giản đồ pp RFOC	31
Hình 4.3 Sơ đồ điều khiển phía máy phát.....	32
Hình 4.4 Sơ đồ điều khiển phía lưới	33
Hình 4.5 Sơ đồ cấu trúc điều khiển dòng điện.....	36
Hình 4.6 Mạch vòng của bộ điều khiển dòng điện	36
Hình 4.7.Mạch vòng của bộ điều khiển tốc độ	38
Hình 4.8 Sơ đồ khối PLL	39
Hình 4.9 Sơ đồ Bộ điều khiển dòng điện.....	40
Hình 4.10 Sơ đồ bộ điều khiển công suất	42
Hình 4.11 Nguyên lý MPC rời rạc	44
Hình 4.12 Cấu trúc bộ điều khiển MPC.....	44
Hình 4.13 Sơ đồ điều khiển sử dụng MPC	45
Hình 4.14 Biểu diễn ràng buộc các đại lượng điện trên mặt phẳng hai chiều	48
a) Ràng buộc điện áp. b) Ràng buộc dòng điện	48
Hình 5.1 Cấu trúc hệ thống	50
Hình 5.2 Mô hình hóa hệ thống trên MATLAB/SIMULINK	50
Hình 5.1 Kịch bản vận tốc gió	53
Hình 5.2 So sánh tốc độ rotor	54
Hình 5.3 So sánh hệ số hiệu suất C_p	55
Hình 5.4 So sánh công suất tuabin P.....	55
Hình 5.5 So sánh công suất máy phát.....	56

Hình 5.6 So sánh công suất lưới điện	57
Hình 5.7 So sánh điện áp bus DC	57
Hình 5.8 So sánh đáp ứng dòng điện	59
Hình 5.9 So sánh tốc độ rotor	60
Hình 5.10 So sánh công suất máy phát	60
Hình 5.11 So sánh điện áp bus DC	61

DANH SÁCH CÁC KÝ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT

KÝ HIỆU:

- R_t : Bán kính cánh quạt tuabin, đơn vị mét (m).
- ρ : Mật độ không khí, đơn vị kg/m^3 .
- V_ω : Tốc độ gió tại vị trí tuabin, đơn vị mét trên giây (m/s).
- β : Góc nghiêng cánh quạt (góc pitch), đơn vị độ ($^\circ$).
- C_p : Hệ số hiệu suất công suất (Power Coefficient).
- λ : Tỷ số tốc độ đầu cánh (Tip Speed Ratio – TSR).
- J : Momen quán tính, đơn vị $\text{kg}\cdot\text{m}^2$.
- D_t : Hệ số giảm dần phía trục tuabin, đơn vị $\text{Nm}\cdot\text{s}/\text{rad}$.
- N : Tỷ lệ hộp số giữa trục tuabin và trục máy phát.
- P : Công suất, đơn vị MW.
- I : Dòng điện, đơn vị A.
- p : Số đôi cực từ của máy phát.
- R : Điện trở, đơn vị Ω .
- L : Cảm kháng, đơn vị H.
- ψ : Từ thông, đơn vị Weber (Wb).
- C_{DC} : Dung lượng tụ DC-link, đơn vị Farad (F).
- V : Điện áp, đơn vị Volt (V).

CHỮ VIẾT TẮT:

- PSGM: Máy phát điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu (Permanent Magnet Synchronous Generator).
- PI: Bộ điều khiển tỉ lệ – tích phân (Proportional-Integral Controller).
- MPC: Điều khiển dự báo mô hình (Model Predictive Control).
- MPPT: Thuật toán theo dõi điểm công suất tối đa (Maximum Power Point Tracking).
- HCS: Thuật toán leo đồi (Hill Climbing Search).
- TSR: Tỷ số tốc độ đầu cánh (Tip Speed Ratio).

FLC: Bộ điều khiển logic mờ (Fuzzy Logic Controller).

MSC: Bộ biến đổi phía máy phát (Machine-Side Converter).

GSC: Bộ biến đổi phía lưới (Grid-Side Converter).

VSC: Bộ biến đổi nguồn áp (Voltage Source Converter).

PLL: Bộ đồng bộ pha (Phase-Locked Loop).

PWM: Điều chế độ rộng xung (Pulse Width Modulation).

SVPWM: Điều chế độ rộng xung vectơ không gian (Space Vector Pulse Width Modulation).

DFIG: Máy phát không đồng bộ kép (Doubly-Fed Induction Generator).

SCIG: Máy phát cảm ứng rotor lồng sóc (Squirrel Cage Induction Generator).

DC: Dòng điện một chiều (Direct Current).

AC: Dòng điện xoay chiều (Alternating Current).

WECS: Hệ thống chuyển đổi năng lượng gió (Wind Energy Conversion System).

DSP: Bộ xử lý tín hiệu số (Digital Signal Processor).

FPGA: Mảng cổng lập trình được trường (Field Programmable Gate Array).

LVRT: Khả năng đi qua điện áp thấp (Low Voltage Ride Through).

QP: Quy hoạch toàn phương (Quadratic Programming).

RFOC: Điều khiển định hướng từ thông rotor (Rotor Flux Oriented Control).

VOC: Điều khiển định hướng vector (Vector Oriented Control).

MỞ ĐẦU

Trong bối cảnh nhu cầu năng lượng ngày càng tăng cao, cùng với xu hướng chuyển dịch sang các nguồn năng lượng sạch và bền vững, năng lượng gió đã và đang trở thành một trong những giải pháp quan trọng nhằm giảm thiểu sự phụ thuộc vào các nguồn nhiên liệu hóa thạch truyền thống, góp phần bảo vệ môi trường và phát triển kinh tế bền vững. Đặc biệt, tại Việt Nam, với tiềm năng gió dồi dào, việc phát triển các hệ thống điện gió hiện đại, hiệu quả và ổn định là một trong những định hướng chiến lược của ngành năng lượng quốc gia.

Đề tài “NGHIÊN CỨU NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG PHÁT ĐIỆN GIÓ PMSG” được thực hiện nhằm nghiên cứu, phân tích và đề xuất các giải pháp kỹ thuật tiên tiến để tối ưu hóa hiệu quả vận hành của hệ thống máy phát điện gió sử dụng máy phát đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSG). Thông qua việc ứng dụng các phương pháp điều khiển hiện đại, đề tài hướng đến việc nâng cao hiệu suất chuyển đổi năng lượng, đảm bảo tính ổn định, an toàn và chất lượng điện năng khi tích hợp vào lưới điện quốc gia, đồng thời góp phần giải quyết các thách thức thực tiễn trong vận hành hệ thống điện gió tại Việt Nam.

Mục tiêu của đề tài: Phân tích tổng quan về các hệ thống điện gió, đặc biệt là hệ thống sử dụng máy phát PMSG, làm rõ các ưu điểm và thách thức trong vận hành thực tế. Xây dựng mô hình toán học và mô phỏng hệ thống máy phát sức gió PMSG, từ đó đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả vận hành. Nghiên cứu, thiết kế và so sánh các phương pháp điều khiển hiện đại (như điều khiển PI, điều khiển dự báo mô hình MPC, các thuật toán MPPT truyền thống và cải tiến) nhằm tối ưu hóa hiệu suất và độ ổn định của hệ thống.

Đề tài tập trung nghiên cứu hệ thống máy phát điện gió sử dụng máy phát đồng bộ PMSG với cấu hình nối lưới, bao gồm các thành phần chính như tuabin gió, máy phát PMSG, các bộ chuyển đổi công suất, hệ thống điều khiển và lưu trữ năng lượng. Đối tượng nghiên cứu là các giải pháp điều khiển và tối ưu hóa vận hành cho hệ thống này trong điều kiện thực tế tại Việt Nam, với các đặc thù về khí hậu, tốc độ gió và yêu cầu tích hợp lưới điện.

Phương pháp nghiên cứu: Nghiên cứu tổng quan tài liệu, các công trình khoa học trong và ngoài nước liên quan đến hệ thống điện gió, máy phát PMSG và các phương pháp điều khiển hiện đại, xây dựng mô hình toán học và mô phỏng hệ thống trên phần mềm MATLAB/Simulink để phân tích, đánh giá hiệu quả các giải pháp điều khiển. Thực hiện so sánh, phân tích các kết quả mô phỏng giữa các phương pháp điều khiển khác nhau (PI, MPC, MPPT truyền thống và cải tiến) để lựa chọn giải pháp tối ưu.

Đề án được bố cục thành các chương như sau:

- **Chương 1:** Đặt vấn đề – Trình bày bối cảnh, lý do chọn đề tài, tổng quan về năng lượng tái tạo và vai trò của năng lượng gió.
- **Chương 2:** Giới thiệu về năng lượng gió – Tổng quan về nguyên lý, cấu tạo tuabin, các hệ thống máy phát điện gió điển hình.
- **Chương 3:** Cấu trúc và mô hình hóa hệ thống máy phát sức gió – Phân tích chi tiết cấu trúc, mô hình toán học của hệ thống PMSG, các bộ chuyển đổi công suất và thuật toán MPPT.
- **Chương 4:** Thiết kế bộ điều khiển – Trình bày các phương pháp điều khiển hiện đại, thiết kế và lựa chọn tham số bộ điều khiển, so sánh các phương pháp điều khiển PI và MPC.
- **Chương 5:** Mô phỏng và kết quả – Mô phỏng hệ thống trên MATLAB/Simulink, phân tích và đánh giá kết quả đạt được.
- **Kết luận:** Tổng hợp các kết quả nghiên cứu, đánh giá hiệu quả các giải pháp đề xuất, nêu ra những đóng góp và hướng phát triển tiếp theo.
- **Tài liệu tham khảo và Phụ lục:** Tổng hợp các tài liệu sử dụng và các dữ liệu, hình vẽ, bảng biểu bổ sung.

Với cấu trúc và nội dung như trên, đồ án kỳ vọng sẽ đóng góp một phần vào việc phát triển các giải pháp kỹ thuật nâng cao hiệu quả vận hành cho hệ thống điện gió, góp phần thúc đẩy quá trình chuyển dịch năng lượng xanh và phát triển bền vững.

CHƯƠNG 1. GIỚI THIỆU ĐỀ TÀI

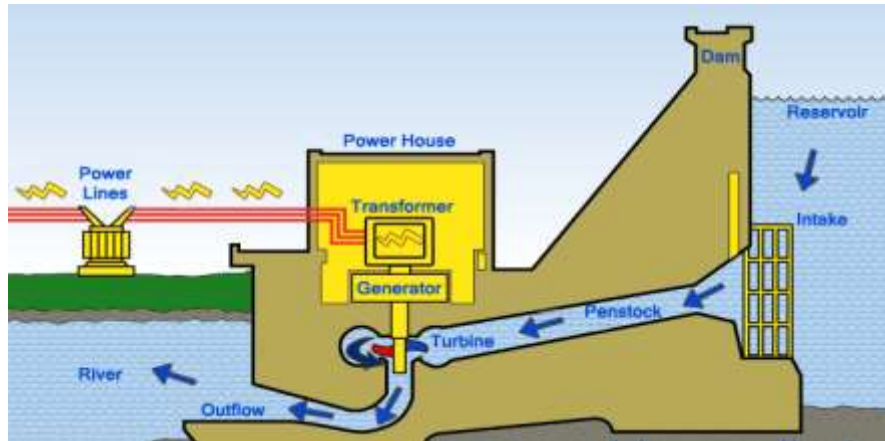
Cùng với sự phát triển kinh tế và nâng cao chất lượng cuộc sống, nhu cầu sử dụng năng lượng ngày càng tăng cao, kéo theo đó là những thách thức lớn về môi trường và an ninh năng lượng. Các nguồn năng lượng truyền thống như than đá, dầu mỏ và khí đốt không chỉ dần cạn kiệt mà còn gây ra nhiều hệ lụy nghiêm trọng đối với môi trường như ô nhiễm không khí, nước, đất và đặc biệt là hiện tượng biến đổi khí hậu do phát thải khí nhà kính. Trước thực trạng đó, việc tìm kiếm và phát triển các nguồn năng lượng tái tạo, thân thiện với môi trường trở thành một xu hướng tất yếu và cấp bách đối với mọi quốc gia trên thế giới.

Năng lượng tái tạo là các nguồn năng lượng được tạo ra từ các nguồn tài nguyên tự nhiên không giới hạn và có khả năng tái tạo trong thời gian ngắn. Các nguồn năng lượng tái tạo bao gồm năng lượng mặt trời, gió, nước, nhiệt đất, sinh học và các nguồn năng lượng từ biến đổi cảnh quan như biển, dòng chảy sông, hoặc các nguồn năng lượng từ sinh vật sống. So với các nguồn năng lượng hóa thạch như than đá, dầu mỏ, và khí đốt, các nguồn năng lượng tái tạo không chỉ không gây ra khí thải carbon và các chất gây ô nhiễm môi trường mà còn không làm cạn kiệt nguồn tài nguyên thiên nhiên. Việc sử dụng nguồn năng lượng tái tạo giúp giảm thiểu ảnh hưởng của biến đổi khí hậu, bảo vệ môi trường, và tạo ra một nguồn năng lượng sạch, tiết kiệm và bền vững cho cuộc sống hàng ngày.

1.1. Các nguồn năng lượng tái tạo phổ biến hiện nay

1.1.1 Năng lượng nước

Trong sản xuất điện năng, nguồn năng lượng nước thường được biết đến trong các nhà máy thủy điện. Nguyên lý hoạt động của nhà máy thủy điện là tích trữ nguồn năng lượng nước bằng cách xây dựng đập ngăn sông hay điều chỉnh dòng nước sử dụng các hệ thống kênh dẫn để tạo ra cơ năng do sự chênh lệch độ cao địa hình làm quay các tuabin nước của máy phát điện, từ đó tạo ra điện năng (Hình 1.1, 1.2). Mặc dù sử dụng nguồn năng lượng tái tạo nhưng để xây dựng được một nhà máy thủy điện thì con người cần phải can thiệp rất nhiều vào địa hình tự nhiên, gây ra nhiều tranh cãi xoay quanh vấn đề bảo vệ môi trường [1].



Hình 1.1. Sơ đồ của nhà máy thủy điện kiểu đập



Hình 1.2. Sơ đồ của nhà máy thủy điện kiểu kênh dẫn

1.1.2 Năng lượng mặt trời

Năng lượng mặt trời nằm trong số các nguồn năng lượng tái tạo được sử dụng rộng rãi nhất trên toàn thế giới. Năng lượng mặt trời có thể được biến đổi thành điện năng sử dụng các hệ thống quang điện (Photovoltaic – PV) (Hình 1.3) hay sử dụng gián tiếp thông qua các hệ thống năng lượng mặt trời tập trung (Hình 1.4)

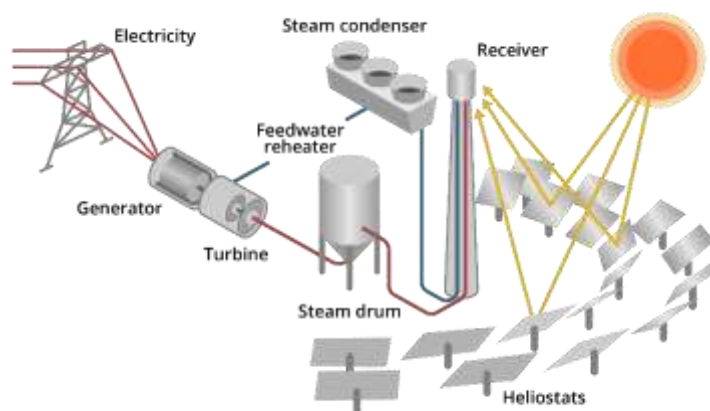
Đối với các hệ thống PV, công nghệ phổ biến nhất đó là sử dụng các tấm pin bán dẫn, tạo ra điện một chiều (DC) nhờ vào hiệu ứng quang điện. Trong thực tế, điện một chiều từ hệ thống pin quang điện phần lớn sẽ được chuyển đổi thành điện xoay chiều (AC) sử dụng các bộ chuyển đổi điện tử công suất và đưa lên lưới điện, một phần nhỏ điện một chiều sẽ dùng để cung cấp cho các thiết bị công suất thấp như đèn chiếu sáng, hệ thống báo tín hiệu,... Các hệ thống PV được ứng dụng rộng rãi vào trong đời sống

sinh hoạt và sản xuất của con người, tiêu biểu là các hệ thống quy mô vừa và nhỏ như điện mặt trời áp mái, các nông trại điện mặt trời hay quy mô lớn như các nhà máy điện mặt trời nổi lưới và độc lập.

Đối với các hệ thống năng lượng mặt trời tập trung, năng lượng được tận dụng là nhiệt lượng từ các tia bức xạ mặt trời. Công nghệ này sử dụng các thiết bị như gương, thấu kính hay các hệ thống hội tụ nhằm thu được nhiệt năng lớn nhất tập trung tại một diện tích nhỏ. Lượng nhiệt năng này sẽ được sử dụng cho các mục đích sinh hoạt như sưởi ấm, nấu ăn, đun nước,... hay dùng trong các lò hơi, lò đốt trong công nghiệp [2].



Hình 1.3. Sơ đồ hệ thống quang điện mặt trời nổi lưới

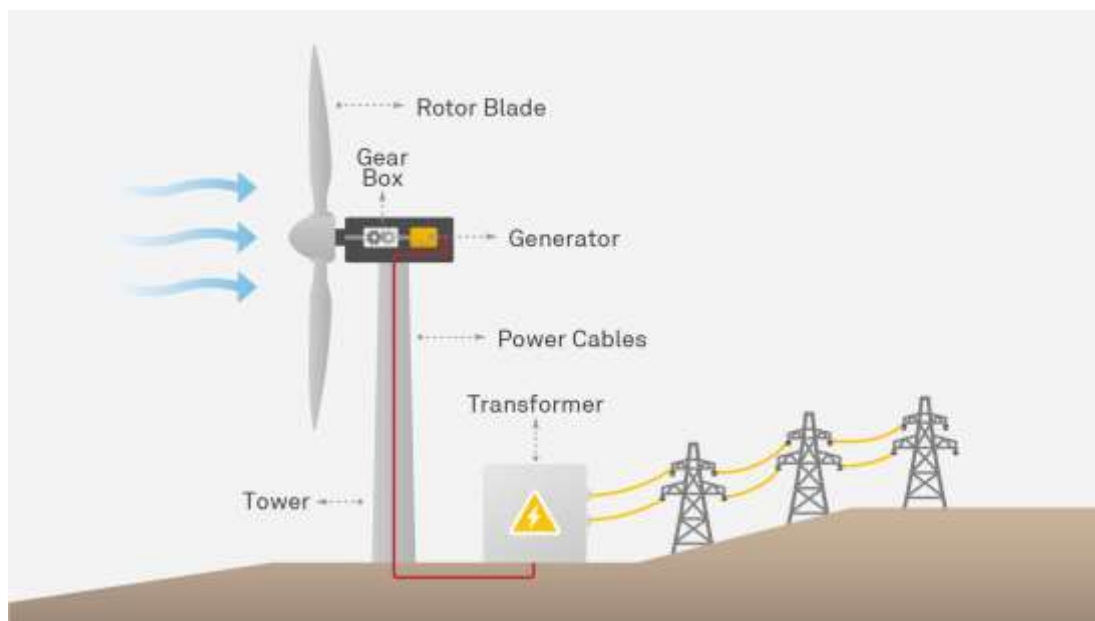


Hình 1.4. Sơ đồ hệ thống điện mặt trời tập trung

1.1.3 Năng lượng gió

Tương tự như nguồn năng lượng nước, năng lượng gió được khai thác dựa trên quy tắc chuyển đổi nguồn năng lượng sơ cấp là cơ năng thành năng lượng thứ cấp là điện năng, bằng cách sử dụng các tuabin gió thay cho tuabin nước. So với các nguồn năng lượng tái tạo khác, năng lượng gió có tiềm năng rất lớn do diện tích lắp đặt nhỏ. Hơn nữa, các tuabin gió có thể được xây dựng cả trên đất liền (on-shore) lẫn ngoài khơi (off-shore), làm cho diện tích khả dụng cho việc lắp đặt hệ thống điện gió lớn hơn rất nhiều so với các hệ thống năng lượng chỉ có khả năng lắp đặt đất liền khác. Năng lượng gió được coi là một trong những công nghệ hứa hẹn nhất cho việc sản xuất điện năng, dần dần thay thế các nguồn năng lượng hóa thạch truyền thống. Theo nguồn số liệu về gió được thu thập chủ yếu từ các trạm khí tượng thủy văn, tốc độ gió trung bình năm đo được từ các trạm ở trong đất liền tương đối thấp, khoảng 2-3 m/s. Tuy nhiên, ở khu vực ven biển có tốc độ gió cao hơn, từ 6-10 m/s [3]. Đánh giá của Ngân hàng thế giới (WB) cũng cho thấy khoảng 8% lãnh thổ đất liền của Việt Nam có tiềm năng về năng lượng gió, cao hơn hẳn so với các nước trong khu vực [4]. Do đó, phát triển năng lượng gió, đặc biệt là điện gió ngoài khơi, sẽ là xu hướng phát triển của các dự án năng lượng tái tạo trong tương lai.

Các công nghệ tuabin gió là một trong những khía cạnh mà các nhà nghiên cứu lẫn nhà đầu tư đều chú trọng. Công suất định mức của tuabin gió hiện nay dao động từ 500 kW đến vài MW, bao gồm các tuabin loại trục dọc và trục ngang [5]. Sản lượng điện tạo ra từ tuabin phụ thuộc vào tốc độ gió và do đó, vị trí lắp đặt tuabin gió thường được chọn ở những nơi có gió mạnh và ít thay đổi, như ở ngoài khơi và các vị trí cao độ. Ngoài ra, các công nghệ máy phát điện trong các tuabin gió như là PMSG, DFIG (các loại máy phát không đồng bộ),... cũng là chủ đề đáng lưu tâm khi nghiên cứu về điện gió.



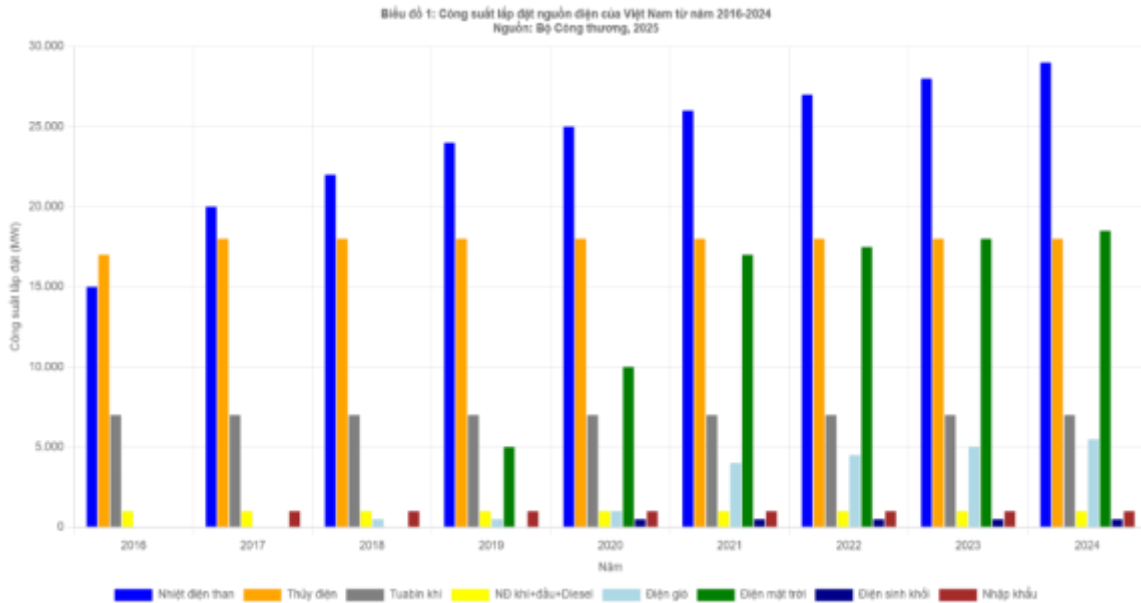
Hình 1.5. Sơ đồ hệ thống điện gió nối lưới

1.2. Thực trạng hiện nay

Việt Nam đang bước vào một giai đoạn quan trọng trong chiến lược phát triển năng lượng, với mục tiêu cân bằng giữa tăng trưởng kinh tế nhanh chóng và bảo vệ môi trường, hướng tới đạt mức phát thải ròng bằng 0 (Net Zero) vào năm 2050. Trong bối cảnh này, năng lượng tái tạo, đặc biệt là năng lượng gió, được xác định là một trong những trụ cột quan trọng để đáp ứng nhu cầu năng lượng ngày càng tăng, đồng thời giảm sự phụ thuộc vào các nguồn nhiên liệu hóa thạch gây ô nhiễm. Theo dữ liệu cập nhật từ bài báo [6], tính đến năm 2024, tổng công suất nguồn điện toàn hệ thống của Việt Nam đạt khoảng 80.555 MW, trong đó năng lượng tái tạo (bao gồm điện gió và điện mặt trời) đóng góp 21.664 MW, chiếm tỷ trọng 27%. Riêng về năng lượng gió, công suất lắp đặt đã đạt 9 GW (tương đương 9.000 MW), bao gồm 5 GW từ điện gió trên bờ và 4 GW từ điện gió ngoài khơi. Với đường bờ biển dài hơn 3.000 km và điều kiện gió thuận lợi, Việt Nam sở hữu tiềm năng to lớn để phát triển điện gió, đặc biệt tại các khu vực ven biển miền Trung và Nam Bộ, ước tính đạt khoảng 512 GW [7]. So với năm 2023, khi tổng công suất điện gió chỉ đạt khoảng 4.134 MW theo báo cáo của Bộ Công Thương [8], con số này cho thấy một bước tăng trưởng ấn tượng trong vòng một năm, khẳng định sự đầu tư mạnh mẽ của Việt Nam vào lĩnh vực năng lượng gió. Bên cạnh đó, sản lượng điện từ các nguồn năng lượng tái tạo trong năm 2023 đạt 118.826 triệu kWh [8], trong đó điện gió đóng góp một phần quan trọng, giúp Việt Nam duy trì vị thế dẫn đầu khu vực ASEAN về công suất nguồn điện (hình 1.6).

Sự phát triển của năng lượng gió không chỉ dừng lại ở hiện tại mà còn được định hướng dài hạn thông qua Quy hoạch Điện VIII [9]. Theo kế hoạch này, đến năm 2030, tổng công suất nguồn điện dự kiến đạt 150 GW, trong đó điện gió được kỳ vọng đóng góp từ 47 đến 58 GW, chiếm khoảng 31-39% tổng công suất. Đến năm 2050, con số này có thể tăng lên 490-573 GW, với năng lượng tái tạo chiếm 67,5-71,5% tổng sản lượng điện quốc gia. Những mục tiêu này không chỉ thể hiện tham vọng chuyển đổi sang nền kinh tế xanh mà còn phù hợp với các cam kết quốc tế của Việt Nam, như Hiệp định Paris và Thỏa thuận Đối tác Chuyển dịch Năng lượng Công bằng (JETP), nhằm giảm phát thải carbon xuống còn 170 triệu tấn CO₂ vào năm 2030.

Tuy nhiên, bên cạnh những thành tựu đáng ghi nhận, thực trạng phát triển và vận hành năng lượng gió tại Việt Nam vẫn đang đối mặt với nhiều thách thức đáng kể. Thứ nhất, hiệu suất vận hành của các hệ thống tuabin gió chưa thực sự ổn định do đặc tính không liên tục của nguồn gió năng lượng gió thể hiện qua khí hậu nhiệt đới gió mùa với các hiện tượng thời tiết khắc nghiệt như mưa lớn, gió giật mạnh, lũ lụt,... [5]. Gây ra khó khăn trong việc tích hợp vào lưới điện quốc gia và đảm bảo sự ổn định của nguồn cung. Thứ hai, chi phí bảo trì và sửa chữa các tuabin gió, đặc biệt là các dự án ngoài khơi, vẫn ở mức cao, một phần do điều kiện khí hậu nhiệt đới khắc nghiệt của Việt Nam – bao gồm bão, độ ẩm cao và sự ăn mòn từ môi trường biển. Thứ ba, tiềm năng điện gió ngoài khơi, dù được đánh giá có thể lên tới 600 GW [2], vẫn chưa được khai thác hiệu quả do hạn chế về công nghệ, cơ sở hạ tầng và các chính sách hỗ trợ chưa đồng bộ. Những vấn đề này không chỉ làm giảm hiệu quả kinh tế của các dự án điện gió mà còn gây chậm trễ trong việc đạt được các mục tiêu năng lượng tái tạo đã đề ra. Từ đó, cần có yêu cầu lớn về kỹ thuật và công nghệ để đảm bảo hiệu suất, chất lượng và độ tin cậy của các hệ thống điện gió trong điều kiện vận hành thực tế [6].



Hình 1.6 Công suất lắp đặt của Việt Nam từ 2016 – 2024

1.3. Mục tiêu đề tài

Trong các công nghệ máy phát điện gió hiện nay, máy phát điện sức gió sử dụng máy phát PMSG là một thành phần quan trọng trong các hệ thống điện gió hiện đại nhờ hiệu suất cao và khả năng hoạt động linh hoạt. Tuy nhiên, để khai thác tối đa tiềm năng của PMSG tại Việt Nam, cần khắc phục các thách thức liên quan đến điều kiện thời tiết và tích hợp với lưới điện quốc gia. Điều này đòi hỏi sự phát triển của các giải pháp kỹ thuật tiên tiến nhằm nâng cao khả năng vận hành của PMSG, từ đó tối ưu hóa hiệu quả và độ ổn định của hệ thống điện gió.

Qua những tiềm năng, sự tăng trưởng ấn tượng về công suất, và thách thức đã phân tích, có thể thấy rằng việc phát triển năng lượng gió tại Việt Nam không chỉ là bài toán về quy mô lắp đặt mà còn là một bài toán sâu sắc về công nghệ và hiệu quả vận hành. Để giải quyết các thách thức này, hướng đi tất yếu là tập trung vào việc cải tiến và tối ưu hóa công nghệ cốt lõi bên trong hệ thống phát điện. Do đó, đề tài “**Nghiên cứu nâng cao chất lượng điều khiển hệ thống phát điện gió PMSG**” được thực hiện với định hướng là cải thiện chất lượng điều khiển trên mô hình các máy phát điện gió PMSG và điều khiển công suất tác dụng, công suất phản kháng trên cơ sở đó định lượng lấy công suất tối ưu để hòa vào lưới điện.

1.4. Phạm vi của đề tài

Để đạt được các mục tiêu trên, đề tài sẽ tập trung vào các phạm vi nghiên cứu chính sau:

NGHIÊN CỨU NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG PHÁT ĐIỆN GIÓ PMSG

- Tìm hiểu về năng lượng gió và máy phát điện gió nói chung , tổng quan các cấu trúc sử dụng máy phát điện gió SCIG - PMSG – DFIG.
- Lý thuyết về máy phát điện gió PMSG và điều khiển máy phát điện. Phân tích bộ chuyển đổi và cấu trúc bộ điều khiển cho AC/DC –DC/AC.
- Định hướng lấy công suất tối ưu từ tuabin phát lên lưới.
- Lưới điện luôn được vận hành ổn định
- Cải thiện đáp ứng công suất thông qua bộ điều khiển hiện đại cho momen máy phát.

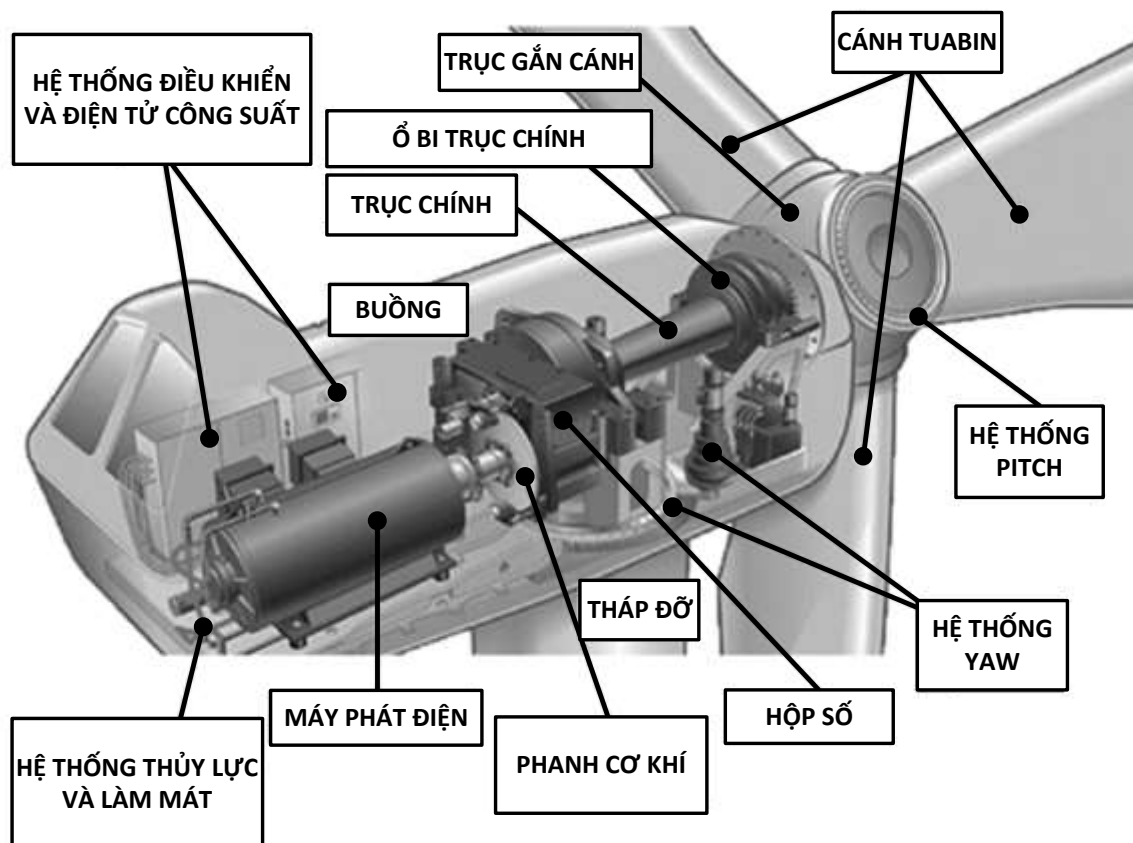
CHƯƠNG 2. GIỚI THIỆU VỀ NĂNG LƯỢNG GIÓ

2.1. Tổng quan về năng lượng gió

Năng lượng gió được khai thác bằng cách sử dụng sức gió để làm quay các cánh tuabin. Tuabin gió là thiết bị giúp chuyển đổi động năng của gió thành năng lượng cơ học, và năng lượng này sau đó được máy phát điện chuyển hóa thành điện năng để đưa vào sử dụng [10].

2.2. Cấu tạo của turbine gió

Các bộ phận chủ yếu của hệ thống tuabin gió bao gồm các cánh gió liên kết với trục, hộp số giúp tăng tốc độ quay, máy phát điện (MFD) chuyển động cơ năng thành điện năng, cùng với thiết bị điều hướng gió để tối ưu hóa việc hứng gió. Tất cả các chi tiết này được thể hiện một cách sinh động và dễ hiểu trong Hình 2.1, cung cấp một cái nhìn toàn diện và chi tiết về cấu trúc và chức năng của mỗi thành phần trong hệ thống phát điện gió [11].



Hình 2.1 Cấu tạo tuabin gió

- Cánh tuabin: Cánh quạt là yếu tố chính giúp gió thúc đẩy tuabin gió quay. Sự chuyển động của gió qua cánh quạt tạo ra lực ly tâm, khiến các cánh quay và phát sinh năng lượng.
- Trục gắn cánh: Nối các cánh quạt lại với nhau và truyền chuyển động quay từ cánh quạt vào trục chính.
- Ổ bi trục chính: Hỗ trợ và giảm ma sát cho trục chính khi quay, giúp chuyển động mượt mà và bền bỉ.
- Hệ thống Pitch: Góc cắt của cánh có thể được điều chỉnh bởi các bánh răng hoặc bằng thủy lực để kiểm soát lượng năng lượng thu được từ gió, giúp tối ưu hóa hiệu suất và bảo vệ tuabin khi gió quá mạnh.
- Hệ thống Yaw: Hệ thống này cho phép rotor luôn hướng về phía gió chính, điều chỉnh theo các thay đổi hướng gió để luôn nhận được lượng gió tối đa.
- Phan cơ khí: Bộ phận này giúp hãm tốc độ rotor, đảm bảo tuabin không quay quá nhanh dưới tác động mạnh của gió, từ đó tránh hỏng hóc và tăng tuổi thọ của thiết bị.
- Trục chính: Đây là trục nối liền với rotor, chịu trách nhiệm truyền tốc độ quay thấp từ các cánh quạt đến hộp số.
- Hộp số: Hộp số là một bộ phận quan trọng trong tuabin gió, có chức năng tăng tốc độ quay của trục từ mức thấp lên cao, thường từ 30-60 vòng/phút lên đến 1200-1500 vòng/phút. Đây là tốc độ cần thiết để máy phát điện có thể sinh ra điện hiệu quả.
- Máy phát điện: Là thiết bị cuối cùng trong chuỗi chuyển đổi năng lượng, máy phát có nhiệm vụ chuyển đổi năng lượng cơ học thành điện năng, cung cấp nguồn điện sạch từ gió.
- Hệ thống điều khiển và điện tử công suất: Đây là trung tâm điều khiển của tuabin gió, có nhiệm vụ điều chỉnh máy phát điện dựa trên tốc độ gió và giữ máy phát không hoạt động khi tốc độ gió quá cao để đảm bảo an toàn và ngăn ngừa hư hỏng.
- Bộ đo gió: Thiết bị này đo lường tốc độ gió và gửi dữ liệu đến bộ điều khiển để điều chỉnh hoạt động của tuabin sao cho phù hợp với điều kiện gió hiện tại.
- Van gió: Vây gió giúp xác định hướng gió và phối hợp với yaw drive để điều chỉnh hướng quay của tuabin cho phù hợp với hướng gió, tối ưu hóa khả năng thu năng lượng gió.
- Buồng máy: Là vỏ bọc ngoài, được đặt trên đỉnh trụ và bao gồm các bộ phận như hộp số, trục quay tốc độ thấp và cao, máy phát, bộ điều khiển và phanh. Buồng máy thiết kế để bảo vệ các thành phần bên trong và có không gian cho kỹ thuật viên làm việc bên trong.

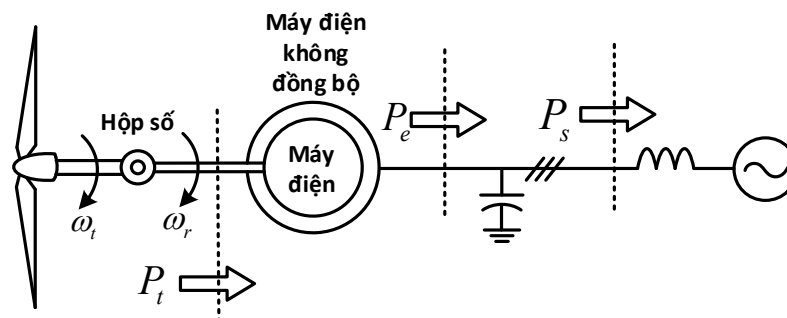
- Tháp đỡ: Cấu trúc được làm từ thép hoặc bê tông, nâng đỡ buồng máy và các bộ phận khác lên cao để thu được lượng gió nhiều hơn, từ đó tăng hiệu suất phát điện của tuabin.

2.3. Các hệ thống máy phát điện gió điển hình

Hệ thống điện gió được phân loại thành hai loại chính là hệ thống điện gió tốc độ không đổi và hệ thống điện gió tốc độ thay đổi [12]

2.3.1 Hệ thống điện gió tốc độ không đổi

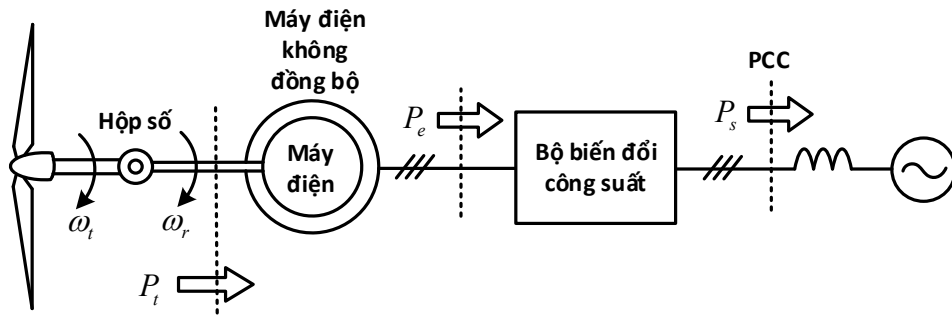
Hệ thống này bao gồm một tuabin gió kết nối với một máy phát điện không đồng bộ qua một hộp số (hình 2.2). Tuabin gió quay ở tốc độ tương đối thấp, và hộp số được sử dụng để nâng cao tốc độ quay của rotor lên gần bằng tốc độ đồng bộ của máy. Trong hệ thống điện gió tốc độ không đổi, máy phát không đồng bộ kết nối trực tiếp với lưới điện, do đó tần số đồng bộ của máy được áp đặt bởi lưới. Tốc độ quay của máy không đồng bộ thường trong khoảng $\pm 3-8\%$ so với tốc độ đồng bộ. Máy này cũng hấp thụ công suất phản kháng, vì vậy cần có tụ bù để ổn định điện áp và đảm bảo hoạt động ổn định của hệ thống, đặc biệt là trong điều kiện tải không đầy đủ.



Hình.2.2 Mô hình Hệ thống điện gió tốc độ không đổi

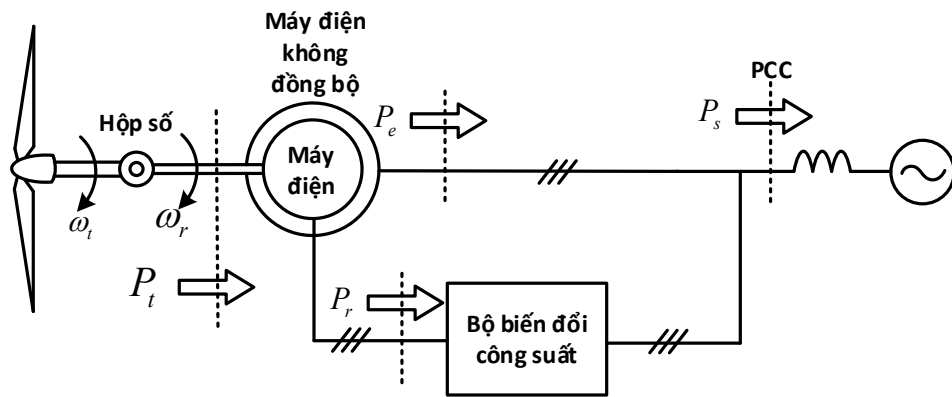
2.3.2 Hệ thống điện gió tốc độ thay đổi

Hệ thống dựa trên máy không đồng bộ và bộ chuyển đổi công suất điện tử: Trong hệ thống này, tốc độ và tần số của máy không đồng bộ được điều chỉnh bởi bộ chuyển đổi điện tử công suất, cho phép điều khiển linh hoạt hơn tốc độ quay của máy phát và cung cấp điện năng cho lưới điện tần số không đổi (hình 2.3).



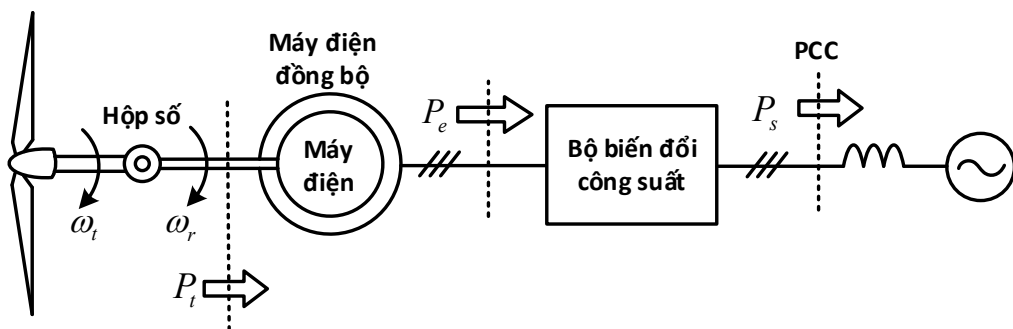
Hình 2.3 Hệ thống dựa trên máy không đồng bộ và bộ chuyển đổi công suất điện tử

Hệ thống dựa trên máy không đồng bộ kép (Doubly-fed): Máy phát trong hệ thống này có hai cuộn dây, với cuộn dây stator kết nối trực tiếp với lưới và cuộn dây rotor được điều khiển bằng bộ chuyển đổi điện tử công suất (hình 2.4). Điều này cho phép điều chỉnh tốc độ rotor một cách hiệu quả và phản ứng tải một cách nhanh chóng.



Hình 2.4 Hệ thống dựa trên máy không đồng bộ kép (Doubly-fed)

Hệ thống dựa trên máy đồng bộ từ trường vĩnh cửu hoặc điều khiển từ trường: Hệ thống này có thể loại bỏ hộp số nếu sử dụng máy phát tốc độ thấp (hình 2.5). Máy đồng bộ có thể là loại từ trường vĩnh cửu hoặc điều khiển từ trường, và tốc độ quay của rotor được điều chỉnh thông qua bộ chuyển đổi công suất điện tử, giúp thích nghi tốt hơn với sự biến động của gió và tải.



Hình 2.5 Hệ thống dựa trên máy đồng bộ từ trường vĩnh cửu

Tùy theo cấu tạo, tính chất làm việc và mục đích sử dụng người ta có nhiều cách phân loại hệ thống phát điện gió. Theo cấu tạo turbine gió ta có loại máy phát điện gió turbine trục đứng, trục ngang; theo công suất ta có loại công suất nhỏ, trung bình và lớn; theo tính chất làm việc ta có loại biến tốc hoặc loại có tốc độ không đổi; theo hình thức làm việc ta có loại làm việc độc lập, loại hòa mạng v.v... Đồ án tập trung nghiên cứu nâng cao khả năng vận hành của hệ thống máy phát sức gió có tốc độ thay đổi PMSG bởi nó có tốc độ biến thiên linh hoạt hơn tất cả các loại máy phát khác nên mang lại hiệu suất cao ở tốc độ thấp, cấu trúc điều khiển đơn giản, khả năng hoạt động linh hoạt trên dải tốc độ gió rộng, cải thiện được chất lượng điện năng, và không cần hộp số giúp giảm tổn hao cơ khí cũng như chi phí bảo trì so với các loại máy phát khác như máy phát cảm ứng rotor lồng sóc [13].

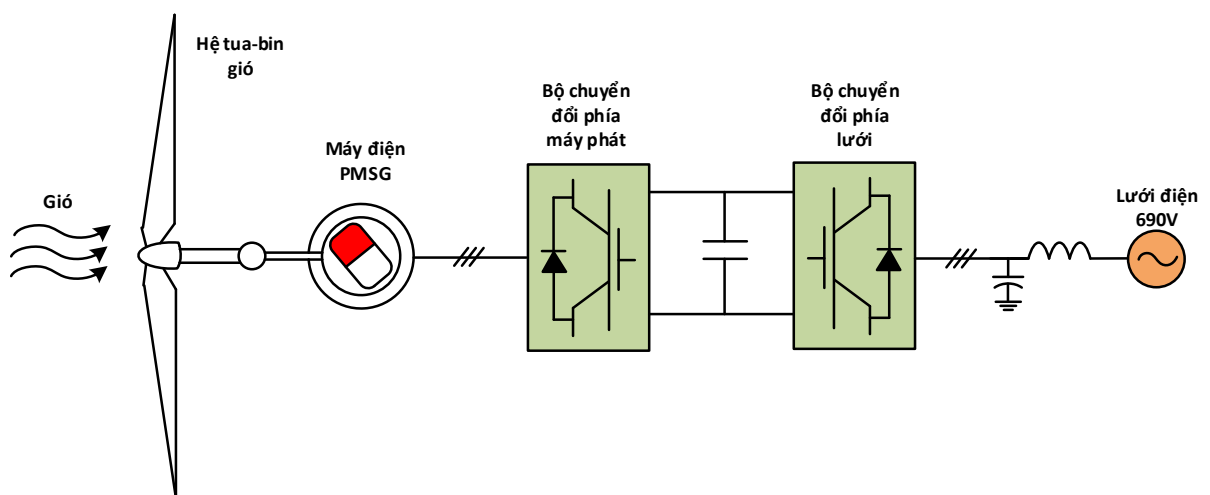
2.4. Kết luận chương

Qua những nội dung tổng quan, Chương 2 đã cung cấp cái nhìn chung về năng lượng gió, từ cấu tạo của một tuabin gió hiện đại đến việc phân loại các hệ thống phát điện phổ biến. Qua đó, hệ thống PMSG đã được xác định là công nghệ trọng tâm của đề tài nhờ những ưu điểm vượt trội về hiệu suất và khả năng điều khiển. Trên cơ sở đó, để có thể đi sâu vào việc phân tích và nâng cao chất lượng điều khiển, việc nắm vững cấu trúc và mô hình toán học của hệ thống là yêu cầu tiên quyết. Chương 3 sẽ tập trung mô tả chi tiết cấu trúc của hệ thống phát điện gió PMSG và xây dựng các phương trình toán học đặc tả hoạt động của từng thành phần, từ đặc tính khí động học của tuabin đến mô hình động học của máy phát.

CHƯƠNG 3. CẤU TRÚC HỆ THỐNG VÀ MÔ HÌNH HÓA HỆ THỐNG MÁY PHÁT SỨC GIÓ

3.1. Cấu trúc chung của hệ thống

Về mặt tổng quan, một hệ thống phát điện gió nối lưới sử dụng PMSG bao gồm các thành phần chính: tuabin gió, máy phát PMSG, bộ chuyển đổi công suất phía máy phát, bộ chuyển đổi công suất phía lưới và các bộ điều khiển tương ứng (hình 3.1). Tuabin gió thu năng lượng động lực từ gió và làm quay trục máy phát. Máy phát PMSG sẽ chuyển đổi cơ năng quay trục thành điện năng xoay chiều có biên độ và tần số biến thiên theo tốc độ gió. Để có thể hòa vào lưới điện, điện năng này được xử lý qua hệ thống chuyển đổi điện tử công suất nối tiếp (back-to-back) gồm hai bộ phận: bộ chuyển đổi phía máy phát (AC-DC) và bộ chuyển đổi phía lưới (DC-AC), liên kết với nhau qua tụ DC trung gian. Bộ chuyển đổi phía máy phát thực hiện chỉnh lưu dòng điện xoay chiều từ PMSG thành dòng một chiều, đồng thời được điều khiển theo thuật toán MPPT để điều chỉnh tải và tốc độ quay của máy phát, giúp tuabin gió luôn vận hành tại điểm tối ưu tương ứng với từng mức gió nhằm thu được công suất cực đại. Trong khi đó, bộ chuyển đổi phía lưới đảm nhiệm nghịch lưu dòng điện một chiều thành xoay chiều đồng bộ với lưới điện, đồng thời duy trì ổn định điện áp trên khâu DC và điều khiển công suất tác dụng cũng như công suất phản kháng trao đổi với lưới theo yêu cầu. Sự phối hợp nhịp nhàng giữa hai khối biến đổi và hệ thống điều khiển này cho phép máy phát gió PMSG phát tối đa năng lượng thu được vào lưới điện với chất lượng điện năng đảm bảo.



Hình 3.1 Cấu trúc động lực chung hệ thống

Hình 3.1 thể hiện chi tiết cấu trúc của khối năng lượng gió cũng như hệ thống điện gió tổng quát, với các thành phần được thiết kế cẩn thận để đạt hiệu suất tối ưu.

3.2. Đặc tính tua bin gió

Dựa vào các đặc tính khí động học, công suất gió được tuabin gió thu nhận có thể được biểu diễn như sau [12]:

$$P_t = \frac{1}{2} \pi \rho R_t^2 V_w^3 C_p \quad (3.1)$$

Trong đó, ρ : Mật độ không khí, R_t : Bán kính cánh quạt tuabin gió, V_w : Tốc độ gió, β : Góc nghiêng cánh quạt, $C_p(\lambda, \beta)$ là hệ số công suất của tuabin gió, phụ thuộc vào tỷ lệ tốc độ đầu cánh (λ) và góc nghiêng cánh quạt (β). $C_p(\lambda, \beta)$ được xác định bằng công thức:

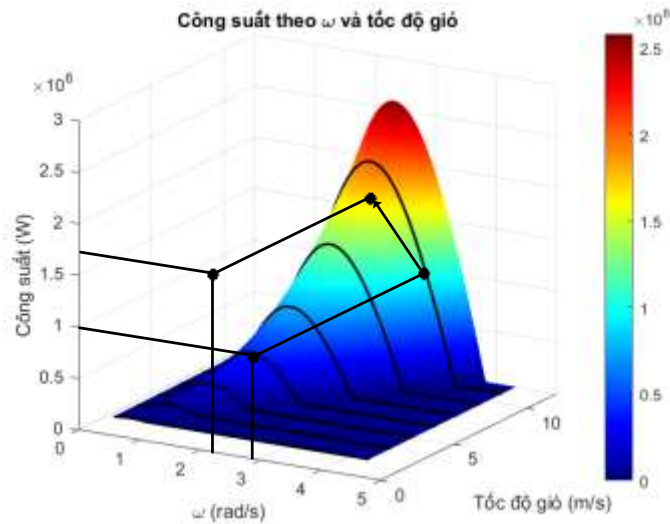
$$C_p = k_1 \cdot \left(\frac{k_2}{\lambda_i} - k_3 \cdot \beta - k_4 \right) \cdot e^{-\frac{k_5}{\lambda_i}} + k_6 \cdot \lambda \quad (3.2)$$

$$\lambda = \frac{r \omega_{tur}}{V_w} \quad (3.3)$$

Tồn tại một tỷ lệ tốc độ đầu cánh tối ưu (λ_{opt}) có thể tối đa hóa C_p cũng như P_{tur} . Khi đó, công suất gió tối đa ($P_{t,max}$) mà tuabin gió thu nhận được có thể được mô tả như sau:

$$P_{t,max} = \frac{1}{2} C_{p,max} \rho \pi R_t^5 \frac{\omega_t^3}{\lambda_{opt}^3} \quad (3.4)$$

Đường đặc tính công suất cơ học đầu ra so với tốc độ quay của tuabin gió ($P-\omega$) cho các tốc độ gió khác nhau được thể hiện bởi các đường cong trong Hình 3.2.

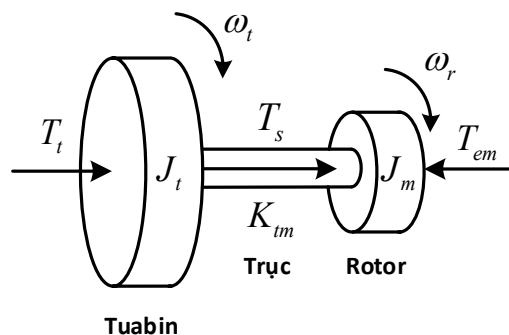


Hình.3.2 Đường đặc tính công suất gió

3.3. Mô hình cơ truyền động

Cấu trúc cơ học của toàn bộ tuabin gió rất phức tạp. Các thành phần cơ học của tuabin và các lực tác động qua các bộ phận của nó rất đa dạng. Do đó, cần xác định những động lực học nào sẽ được đưa vào mô hình biểu diễn. Đồng thời, cần làm rõ các giá trị điển hình của các tham số đặc trưng liên quan đến các động lực học này [12]. Yếu tố đầu tiên là tần số cộng hưởng của hệ thống truyền động. Hệ thống truyền động công suất được cấu thành bởi các cánh quạt gắn với trục chính, kết nối với trục chậm, trục này được liên kết với hộp số, có nhiệm vụ tăng tốc độ quay của trục nhanh được nối với máy phát điện.

Đối với mục đích của mô hình mô phỏng, việc biểu diễn tần số cộng hưởng cơ bản của hệ truyền động là đủ. Hệ truyền động có thể được mô hình hóa bằng mô hình hai khối lượng. Hình 3.3 là mô hình điển hình để mô tả hệ thống truyền động [12].



Hình 3.3 Sơ đồ đơn giản hóa cho hệ thống truyền động

Tất cả các đại lượng đều được xét trên trục nhanh. Moment Quán tính J_t liên quan đến khối lượng phía tuabin, trong khi J_m liên quan đến khối lượng phía máy điện.

Hệ số độ cứng (K_m) và hệ số giảm chấn (D_m) xác định khớp nối linh hoạt giữa hai khối quán tính. Đối với các giá trị quán tính, các hệ số này không phải lúc nào cũng được liên kết trực tiếp với trục nhanh mà với tần số cộng hưởng cơ bản, có thể nằm ở vị trí khác. Hệ số ma sát D_t và D_m đại diện cho tổn thất cơ học do ma sát trong chuyển động quay. Tốc độ quay của tuabin và mô-men dẫn động được biểu diễn trên trục nhanh bằng.

$$\Omega_{t_ar} = N\Omega_t \quad (3.5)$$

$$T_{t_ar} = \frac{T_t}{N} \quad (3.6)$$

Với N là tỷ lệ hộp số.

$$J_t \frac{d\Omega_{t_ar}}{dt} = -T_{t_ar} - D_t \Omega_{t_ar} - T_{em} \quad (3.7)$$

$$J_m \frac{d\Omega_m}{dt} = T_{em} - D_m \Omega_m + T_{em} \quad (3.8)$$

$$\frac{dT_{em}}{dt} = K_{tm} (\Omega_{t_ar} - \Omega_m) + D_{tm} \left(\frac{d\Omega_{t_ar}}{dt} - \frac{d\Omega_m}{dt} \right) \quad (3.9)$$

Biến đổi laplace các phương trình vi phân trên ta có công thức chuyển hóa momen quay của tuabin sang momen quay của máy phát:

$$\Omega_{t_ar} = \frac{-T_{t_ar} - T_{em}}{(J_t s + D)} \quad (3.10)$$

$$T_{em} = (\Omega_{t_ar} - \Omega_m) \left(\frac{K_{tm} + sD_{tm}}{s} \right) \quad (3.11)$$

$$\Omega_m = (T_{em} - T_e) \frac{1}{J_m s + D_m} \quad (3.12)$$

3.4. Mô hình hóa máy điện đồng bộ PMSG

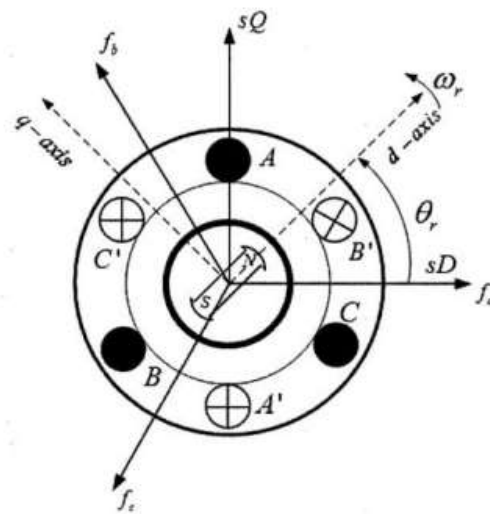
Máy phát PMSG giữ vai trò chính trong hệ thống phát điện gió truyền động trực tiếp, biến đổi năng lượng gió thành điện năng. Mô hình toán học chặt chẽ về PMSG là điều kiện tiên quyết cho việc thiết kế các thuật toán điều khiển cũng như phân tích các trạng thái ổn định và tính năng của hệ thống chuyển đổi năng lượng gió. Trong phần này

mô hình toán học của một máy phát điện PMSG mô tả trong hệ trục tọa độ abc và hệ trục tọa độ dq sẽ được phân tích.

3.4.1 Mô hình máy phát điện gió PMSG trong hệ tọa độ abc

Trước khi phân tích các mô hình toán học của PMSG, một số giả định quan trọng phải được xem xét:

- 1) Hiệu ứng rung động trong nam châm và các cánh quạt là không đáng kể.
- 2) Ảnh hưởng của từ trường bão hòa được bỏ qua.
- 3) Dòng xoáy và tổn thất do từ trễ không đáng kể.
- 4) Sức điện động cảm ứng sinh ra trong cuộn dây stator là hình sin.



Hình 3.4. Mặt cắt của một máy phát PMSG 2 cực

Mối liên hệ giữa điện áp stator và từ thông liên kết và dòng stator được thể hiện như sau [14]:

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Trong đó, v_{as} , v_{bs} , v_{cs} là điện áp ba pha tức thời, i_{as} , i_{bs} , i_{cs} là dòng ba pha tức thời trên cuộn dây stator, R_s là điện trở cuộn dây stator, ψ_{as} , ψ_{bs} , ψ_{cs} là từ thông liên kết tức thời được tạo ra bởi dòng 3 pha AC và nam châm vĩnh cửu, được thể hiện trong biểu thức sau.

$$\begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_r \cos(\theta_r) \\ \psi_r \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \psi_r \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Trong đó, L_{aa} , L_{bb} , L_{cc} là tự cảm của 3 pha a, b, c. L_{ab} , L_{ac} , L_{ba} , L_{bc} , L_{ca} , L_{cb} là hồ cảm giữa các pha, ψ_r là từ thông rotor tạo ra bởi nam châm vĩnh cửu. Tự cảm và hồ cảm là hàm của θ_r , như vậy điện cảm là thông số thay đổi theo thời gian.

3.4.2 Mô hình máy phát điện gió PMSG trong hệ tọa độ dq

Chuyển đổi sang hệ tọa độ dq (hệ tọa độ từ thông rotor) là một biến đổi toán học nhằm mục đích đơn giản hóa việc phân tích mô hình các máy điện, và lần đầu tiên được giới thiệu bởi R. H. Park vào năm 1929 [15]. Ma trận chuyển đổi từ hệ tọa độ abc sang hệ tọa độ dq0 được biểu diễn như sau:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_o \end{bmatrix} = \frac{2}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Trong các biểu thức trên, có thể biểu diễn các đại lượng, điện áp stator, dòng điện stator, từ thông liên kết tương ứng. Theo điều kiện cân bằng, $u_o = 0$, điện áp trong máy phát có thể được mô tả trong hệ tọa độ dq như sau [16]:

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s i_{ds} + L_d \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_e L_q i_{qs} \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + L_q \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_e L_d i_{ds} + \omega_e \psi_r \end{aligned} \quad (3.16)$$

Với R_s là điện trở dây quấn stator.

i_{ds}, i_{qs} là dòng điện dây quấn stator trong hệ tọa độ dq.

ω_e là tốc độ quay đồng bộ.

ψ_r là từ thông tản rotor.

L_d, L_q là điện cảm stator trên hệ tọa độ dq.

v_{ds}, v_{qs} là điện áp stator trên hệ tọa độ dq.

Đồng thời, momen điện từ của một PMSG có thể được suy ra như sau:

$$T_e = \frac{3}{2} \rho (i_{qs} \psi_{ds} - i_{ds} \psi_{qs}) = \frac{3}{2} \rho (i_{qs} \psi_r + (L_q - L_d) i_{ds} i_{qs}) \quad (3.17)$$

Trong đó, p là số đôi cực từ của máy phát.

Từ mô hình điện (3.16), mô hình toán học phần điện của máy phát được biểu diễn theo dòng như sau:

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{L_d} (v_{ds} + \omega_e L_q i_{qs} - R_s i_{ds}) \quad (3.18)$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{L_q} (v_{qs} + \omega_e L_d i_{ds} - \omega_e \psi_r - R_s i_{qs}) \quad (3.19)$$

Ngoài mô hình điện ra, máy điện còn có mô hình cơ học với phương trình cân bằng momen như sau:

$$T_{em} - T_{load} = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} \quad (3.20)$$

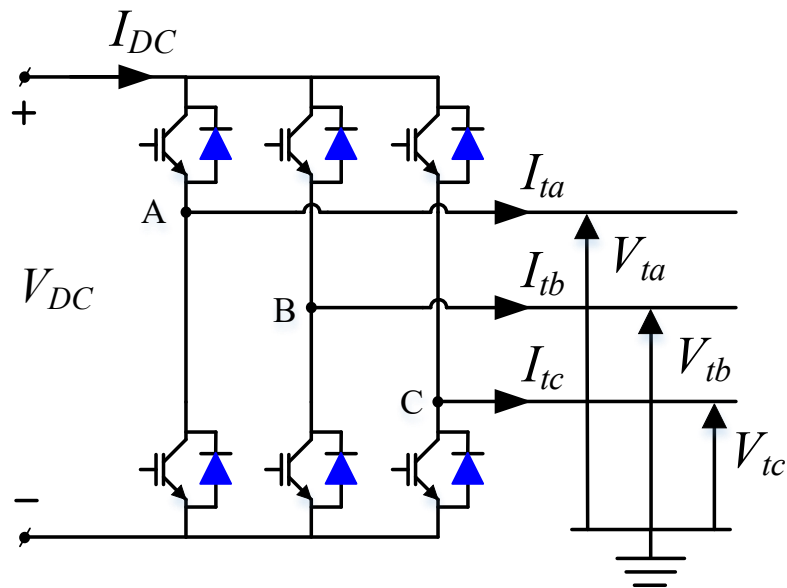
3.5. Các bộ biến đổi công suất

Bộ biến đổi công suất (VSC) cung cấp và biến đổi điện áp từ AC sang DC với chế độ chỉnh lưu, và cũng có thể từ DC sang AC với chế độ nghịch lưu. Đối với máy phát điện gió PMSG, điện áp điều khiển sẽ được đưa trực tiếp vào hai bộ Converter back-to-back. Nguồn điện áp một chiều chính là tụ điện DC, với điện áp V_{DC} . Linh kiện trong bộ nghịch lưu áp có khả năng kích đóng, ngắt dòng qua nó. Trong các ứng dụng nhỏ và vừa có thể sử dụng transistor BJT, MOSFET, IGBT. Ở phạm vi công suất lớn có thể dùng GTO, IGCT hoặc SCR kết hợp với bộ chuyển mạch.

Điện áp phía AC (V_{ta}, V_{tb}, V_{tc}) được xác định bởi các tín hiệu điều chế (m_a, m_b, m_c). Dòng điện một chiều (I_{DC}) là một hàm theo dòng điện xoay chiều đầu ra (I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}), và các tín hiệu điều chế (m_a, m_b, m_c). Hơn nữa, điện áp và dòng điện xoay chiều được chuyển đổi dưới dạng biến đổi Park để tương thích với thiết kế bộ điều khiển của bộ converter theo trục d và q . Đầu ra điện áp theo trục d và q (tương ứng V_{sd}, V_{sq}) được xác định bằng các hàm chuyển đổi trong trục d và q (m_d, m_q) được thể hiện theo công thức dưới đây [17]:

$$V_{id}(t) = \frac{V_{dc}}{2} m_d(t) \quad (3.21)$$

$$V_{tq}(t) = \frac{V_{dc}}{2} m_q(t) \quad (3.22)$$

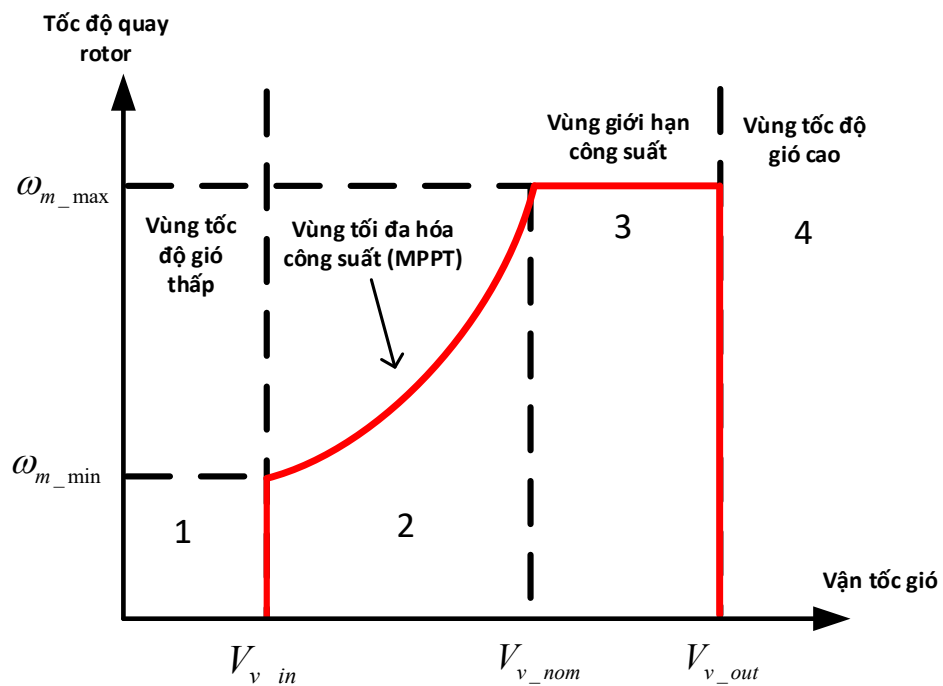


Hình 3.5. Bộ biến đổi DC/AC

3.6. Thuật toán MPPT

3.6.1 Giới thiệu về MPPT

MPPT là viết tắt của Maximum Power Point Tracking, nghĩa là Bộ theo dõi điểm công suất tối đa.



Hình 3.6. Chiến lược điều khiển tua bin gió dựa trên bốn vùng tốc độ.

Các tuabin gió được điều khiển để chỉ hoạt động trong một khoảng tốc độ gió xác định, giới hạn bởi tốc độ cắt vào và cắt ra, nếu vượt quá các giới hạn này, tuabin nên dừng lại để bảo vệ máy điện lẫn tua bin [18], [19], [20]. Ở hình trên (hình 3.6), có thể quan sát thấy rằng có ba chế độ vận hành tương ứng với 4 vùng khác nhau. Đầu tiên là vùng vận tốc gió thấp, nơi tua bin nên dừng lại và ngắt kết nối với lưới điện để ngăn nó bị dẫn động bởi máy phát điện. Tại vùng thứ 2, khi vận tốc gió nằm giữa tốc độ cắt vào và tốc độ định mức, mục tiêu là khai thác tối đa công suất từ gió. Trong vùng này, hệ thống điều khiển sẽ áp dụng thuật toán Theo dõi điểm công suất tối đa (MPPT). Thuật toán này điều chỉnh tốc độ quay của rotor (ω_r) sao cho tuabin luôn hoạt động ở hiệu suất khí động học tối ưu nhất. Thứ ba, khi vận tốc gió vượt quá tốc độ định mức, công suất từ gió có thể vượt ngưỡng an toàn của máy phát. Do đó, mục tiêu điều khiển chuyển từ tối đa hóa sang giới hạn công suất ở mức định mức bằng cách thay đổi góc pitch beta để tuabin. Vùng thứ tư xảy ra khi vận tốc gió vượt quá tốc độ cắt ra (cut-out speed), gió quá mạnh có thể gây hư hỏng cho kết cấu cơ khí của tuabin. Hệ thống sẽ kích hoạt chế độ dừng khẩn cấp, thường bằng cách xoay cánh quạt ra khỏi hướng gió để bảo vệ toàn bộ hệ thống.

Như đã trình bày ở trên, trong vùng hoạt động 2, mục tiêu chính là khai thác tối đa công suất từ gió thông qua việc áp dụng thuật toán Theo dõi điểm công suất tối đa (MPPT). Để thực hiện được mục tiêu này, có nhiều phương pháp (thuật toán) MPPT khác nhau đã được nghiên cứu và phát triển. Mỗi phương pháp có những ưu và nhược điểm riêng về độ phức tạp, tốc độ hội tụ, và độ chính xác trong các điều kiện gió khác nhau. Dưới đây là một số phương pháp MPPT phổ biến được sử dụng cho tuabin gió mà nhóm đã tìm hiểu như TSR (Tip speed ratio), HSC (Hill climbing search),...

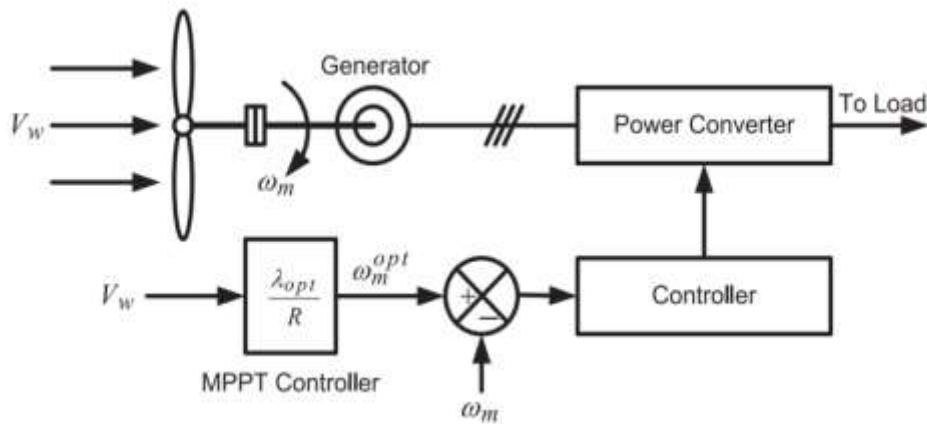
3.6.2 Các thuật toán MPPT

- **Thuật toán tỷ lệ tốc độ đầu cánh (Tip Speed Ratio-TSR)**

Thuật toán này yêu cầu giá trị đo được của tốc độ gió cũng như tốc độ máy phát để đạt được TSR tối ưu của tuabin [21], [22], nhằm giúp hệ thống khai thác công suất tối đa có thể đạt được. Tốc độ quay tối ưu được xác định như sau:

$$\omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt} V_w}{R} \quad (3.23)$$

Trong đó λ_{opt} là hệ số tối ưu giữa vận tốc gió và tốc độ quay tuabin. Cần tính chọn hệ số này chính xác để tránh việc tổn thất công suất gió.



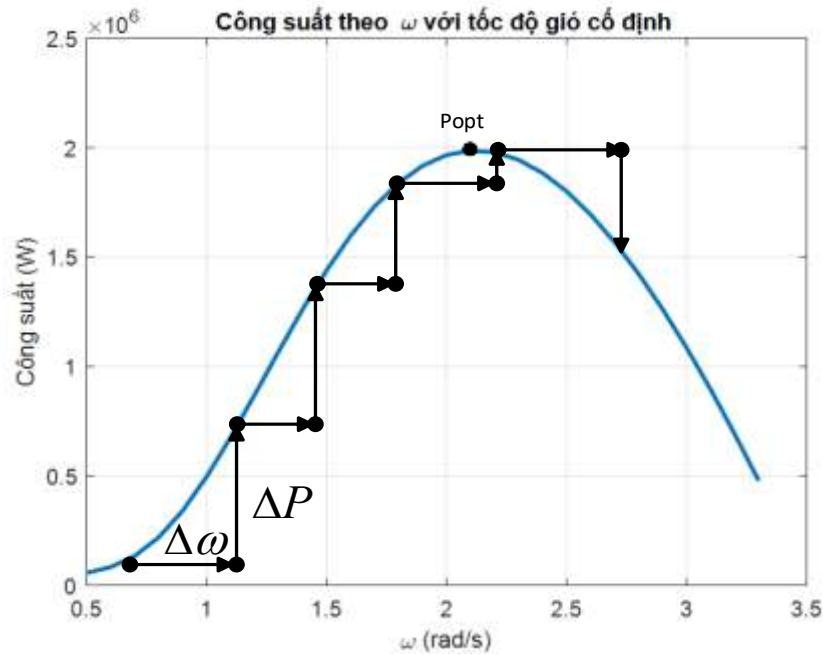
Hình 3.7. Mô hình thuật toán TSR.

Thuật toán TSR rất dễ để triển khai, bằng cách sử dụng vận tốc gió đo được để chuyển thành tín hiệu tốc độ rotor (hình 3.7). Tuy nhiên, việc cần sử dụng một máy đo gió chính xác để đo tốc độ gió làm tăng chi phí của hệ thống, đặc biệt đối với các hệ thống chuyển đổi năng lượng gió (WECS) quy mô nhỏ [23]

- **Thuật toán leo đồi (Hill Climbing Search-HCS)**

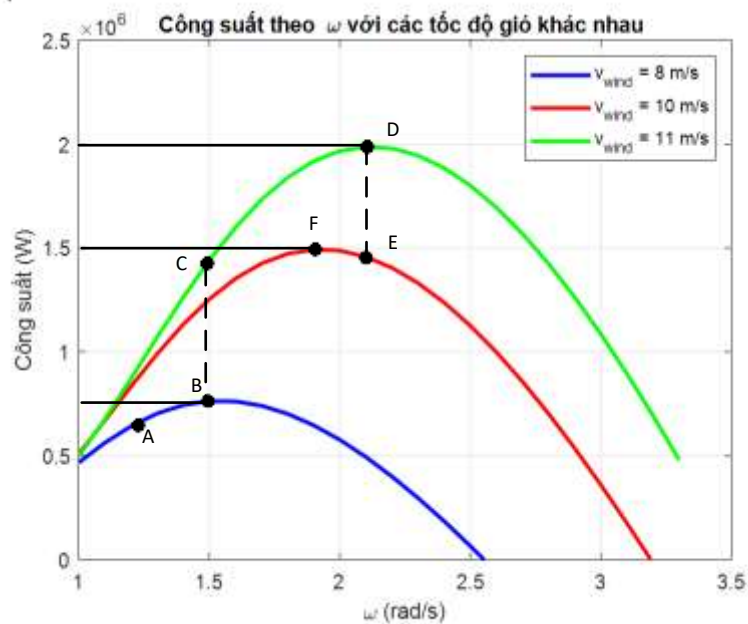
HCS (Hill Climbing Search) là một chiến lược tối ưu hóa toán học được sử dụng để tìm điểm cực đại cục bộ của một hàm số cho trước. Trong chiến lược này, nếu điểm vận hành nằm ở phía bên trái của điểm cực đại, bộ điều khiển phải di chuyển nó về phía bên phải để gần với điểm cực đại hơn, và ngược lại nếu nó nằm ở phía bên trái [22], [24], [25]. Thuật toán HCS được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống chuyển đổi năng lượng gió (WECS) để khai thác công suất tối đa bằng cách tìm kiếm điểm vận hành tối ưu.

Thuật toán HCS MPPT hoạt động dựa trên việc làm nhiều một biến điều khiển với một kích thước bước nhất định và quan sát sự thay đổi trong hàm mục tiêu cho đến khi độ dốc trở về bằng không [25].



Hình 3.8. Sơ đồ công suất tuabin theo vận tốc rotor.

Thuật toán có thể được mô tả chi tiết như sau:

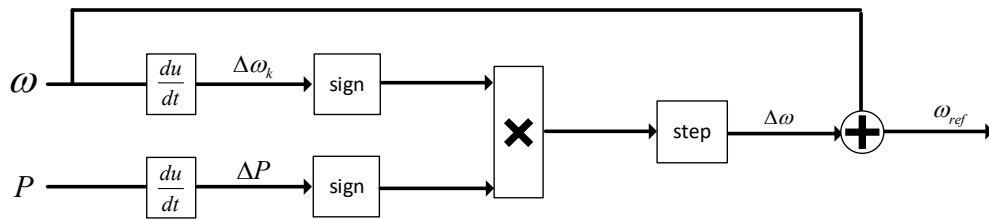


Hình 3.9 Nguyên lý thuật toán HCS

Giả sử tuabin gió đang hoạt động tại điểm A trên đường cong đặc tính được hiển thị trong Hình 3.9 Tốc độ quay của tuabin gió được tăng lên và công suất cơ học tương ứng được theo dõi. Nếu công suất tăng so với bước trước đó, quá trình tìm kiếm đang đi đúng hướng và tốc độ quay của tuabin gió tiếp tục được tăng lên. Nếu công suất giảm so với bước trước đó, quá trình tìm kiếm sẽ đảo ngược hướng. Quá trình này tiếp tục

cho đến khi thay đổi của công suất là nhỏ nhất, cho thấy thuật toán HCS đã thành công đạt được điểm MPP, tương ứng với điểm B. Nếu tốc độ gió thay đổi từ V_3 sang V_1 , điểm vận hành của tuabin sẽ nhảy từ điểm B đến điểm C ngay lập tức. Khi đó, công suất được tăng lên trong khi tốc độ quay của rotor không đổi, tốc độ rotor sẽ được tăng lên dựa vào mức tăng của công suất. Khi đó, tuabin gió có thể theo dõi điểm công suất tối đa, tức là nó sẽ hoạt động tại điểm D. Bây giờ, nếu tốc độ gió giảm từ V_1 xuống V_2 , điểm vận hành có thể cuối cùng dịch chuyển từ điểm D đến điểm F, dựa trên cùng nguyên tắc.

Ta có sơ đồ cấu trúc của phương pháp HCS như sau:



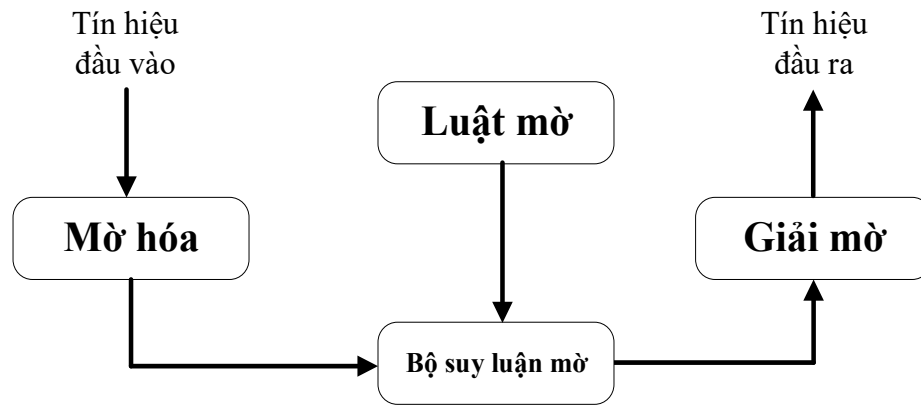
Hình 3.10 Sơ đồ cấu trúc HCS

- **Fuzzy logic dựa vào thuật toán HCS**

Việc triển khai thuật toán HCS thông thường rất đơn giản và không phụ thuộc vào đặc tính của tuabin, nhưng vẫn tồn tại một số vấn đề như việc lựa chọn kích thước bước nhảy [26]. Một bước nhảy lớn có thể giúp theo dõi điểm công suất tối đa (MPP) nhanh chóng, nhưng đồng thời cũng có thể gây ra dao động mạnh xung quanh điểm công suất tối đa. Giảm kích thước bước nhảy có thể giảm thiểu dao động xung quanh MPP. Tuy nhiên, kích thước bước nhảy nhỏ có thể làm chậm quá trình theo dõi MPPT, đặc biệt khi tốc độ gió thay đổi nhanh chóng. Để giải quyết tình huống mâu thuẫn này, ta sẽ sử dụng một thuật toán điều khiển logic mờ với kích thước bước nhảy thay đổi. Thuật toán FLC này có thể theo dõi MPP một cách nhanh chóng và mượt mà.

Trong phần thiết lập tốc độ quay tham chiếu của tuabin gió, thuật toán HCS thông thường được thay thế bằng thuật toán FLC (Fuzzy Logic Controller) được đề xuất, cho phép kiểm soát kích thước bước nhảy thay đổi. Thông qua điều khiển mờ, kích thước bước nhảy có thể lớn khi điểm vận hành cách xa điểm MPP và có thể nhỏ lại khi điểm vận hành tiến gần đến MPP. Do đó, thuật toán FLC có khả năng thay đổi kích thước bước nhảy một cách linh hoạt, tùy thuộc vào điều kiện vận hành của tuabin.

Cấu hình của bộ điều khiển logic mờ được mô tả như hình sau (hình 3.11) [27]:



Hình 3.11 Cấu trúc bộ điều khiển mờ

Đầu tiên, một tập dữ liệu đầu vào dạng rõ ràng (crisp) được thu thập và chuyển đổi thành một tập mờ bằng cách sử dụng các biến ngôn ngữ mờ, các thuật ngữ ngôn ngữ mờ và các hàm thành viên. Bước này được gọi là làm mờ hóa (fuzzification). Sau đó, quá trình suy luận được thực hiện dựa trên một tập hợp các luật. Cuối cùng, đầu ra mờ thu được sẽ được chuyển đổi thành đầu ra rõ ràng bằng cách sử dụng các hàm thành viên, trong bước giải mờ hóa (defuzzification) [28].

Cấu hình của bộ điều khiển logic mờ được mô tả như sau: các biến đầu vào là ΔP_k và $\Delta \omega_k$, trong khi biến đầu ra là $\omega_{ref}(k)$. ΔP_k và $\Delta \omega_k$ có thể được tính thông qua:

$$\Delta P_k = P_k - P_{k-1} \quad (3.24)$$

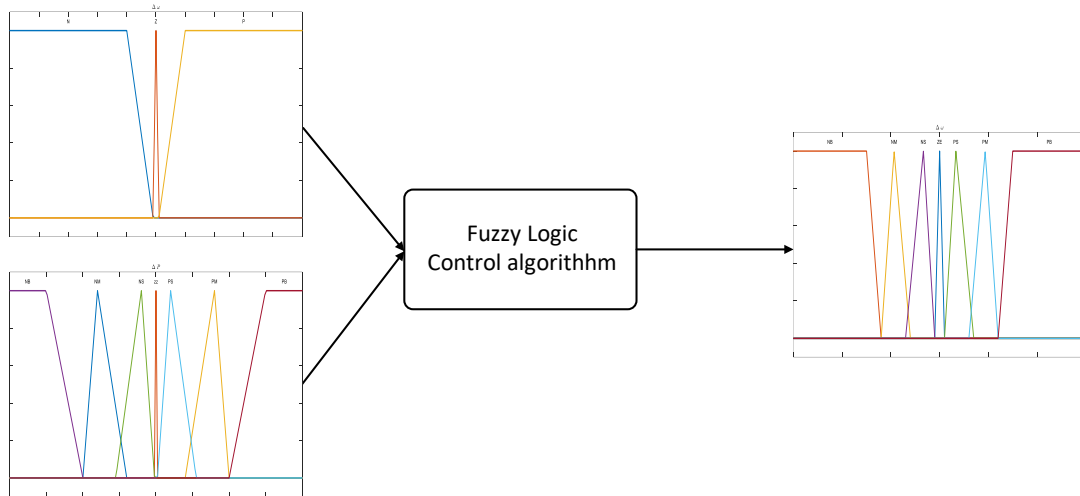
$$\Delta \omega_k = \omega_k - \omega_{k-1} \quad (3.25)$$

Các biến đầu vào trong bộ điều khiển logic mờ được định nghĩa trong MATLAB như sau:

- Biến đầu vào $\Delta P(k)$ có bảy giá trị, bao gồm:
 - PB** Positive Big - Dương lớn
 - PM** Positive Medium - Dương trung bình
 - PS** Positive Small - Dương nhỏ
 - ZE** Zero - Bằng không
 - NS** Negative Small - Âm nhỏ
 - NM** Negative Medium - Âm trung bình
 - NB** Negative Big - Âm lớn

- Biến đầu vào $\Delta \omega(k)$ có ba giá trị, bao gồm:
 - P** Positive - Dương

Z Zero - Bằng không
N Negative - Âm



Hình 3.12 Các hàm membership của hệ thống

Các hàm membership được sử dụng bao gồm hàm trapmf ở hai biên và các hàm trimf ở giữa. Việc sử dụng hàm trapmf ở biên mang lại ưu điểm tính toán đơn giản, đồng thời giúp xác định giá trị ở biên một cách hiệu quả khi hệ thống xuất hiện sự thay đổi đột ngột. Nhờ có phần bằng phẳng, trapmf còn giúp giảm sự nhạy cảm với nhiễu hoặc dao động nhỏ tại các giá trị biên, góp phần làm cho hệ mờ hoạt động ổn định hơn. Trong khi đó, các hàm trimf ở giữa giúp hệ thống nhận diện rõ ràng sự biến đổi của công suất lớn hay nhỏ, từ đó đưa ra tín hiệu đầu ra phù hợp cho từng trường hợp cụ thể [29]. Mối quan hệ giữa công suất cơ học của tuabin và tốc độ quay của tuabin có thể được biểu diễn bằng các phương trình:

$$\frac{dP}{d\omega} > 0, (\omega < \omega_{mpp}) \quad (3.26)$$

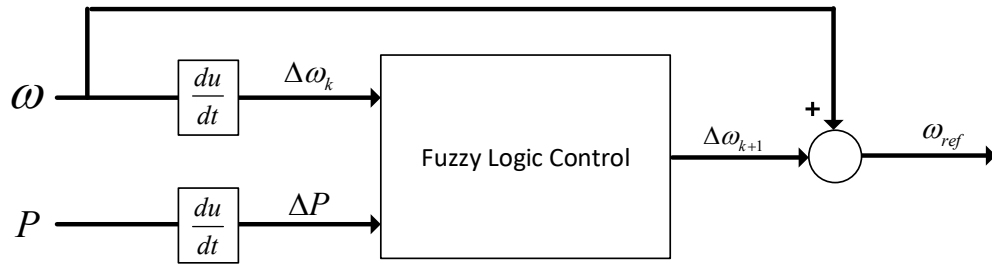
$$\frac{dP}{d\omega} = 0, (\omega = \omega_{mpp}) \quad (3.27)$$

$$\frac{dP}{d\omega} < 0, (\omega > \omega_{mpp}) \quad (3.28)$$

Trong đó, ω_{mpp} là tốc độ quay của tuabin tương ứng với điểm công suất tối đa (MPP). Sau đó, tốc độ quay tham chiếu mới có thể được cập nhật bằng công thức:

$$\omega_{ref}(k) = \omega_{ref}(k-1) + \Delta\omega_{ref}(k) \quad (3.29)$$

Mô hình MPPT sử dụng FLC:



Hình 3.13 Mô hình thuật toán HCS cải tiến

Bảng 3.1 luật mờ được thiết kế được theo mô tả dưới đây:

Bảng 3.1 Bảng luật mờ

$\Delta P \backslash \Delta \omega$	NB	NM	NS	ZZ	PS	PM	PB
N	PB	PM	PS	PS	NS	NM	NB
Z	PM	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	NM
P	NB	NM	NS	NS	PS	PM	PB

Các luật được xác định như sau:

R1: Nếu $\Delta \omega$ là N và ΔP là NB thì output là PB.

R2: Nếu $\Delta \omega$ là N và ΔP là NM thì output là PB.

...

R21: Nếu $\Delta \omega$ là P và ΔP là PB thì output là PB.

Loại hệ suy luận phổ biến nhất là hệ mờ Mamdani [30]. Đối với hệ mờ Mamdani, mức kích hoạt của từng luật được xác định là α_i , với $i = 1, 2, \dots, 21$:

$$\alpha_i = \min[F_i(\Delta \omega), F_i(\Delta P)] \quad (3.30)$$

Trong đó, đầu ra của từng luật được tính như sau:

$$F'_i = \min[\alpha_i, F_i(\text{output})] \quad (3.31)$$

Sau đó, đầu ra tổng thể của hệ thống được xác định bằng cách lấy giá trị lớn nhất trong các đầu ra của từng luật:

$$F' = \max[F'_1, F'_2, F'_3, \dots, F'_{21}] \quad (3.32)$$

Cuối cùng là bước giải mờ, chuyển kết quả mờ thành giá trị rõ ràng. Một trong những phương pháp phổ biến nhất là phương pháp trọng tâm (Center-of-Gravity - COG), tính toán trọng tâm của vùng hợp thành đại diện cho đầu ra mờ, được biểu diễn như sau:

$$z_{COG} = \frac{\int z \mu_F(z) dz}{\int \mu_F(z) dz} \quad (3.33)$$

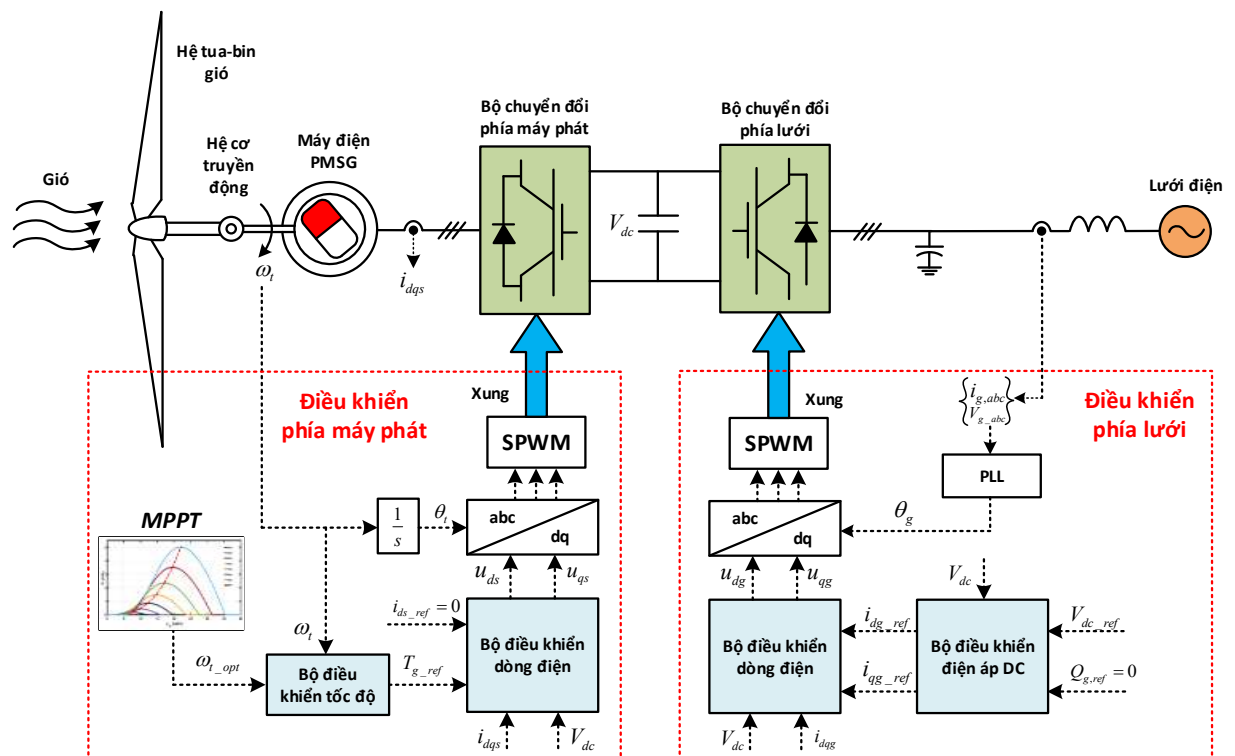
3.7. Kết luận chương

Chương 3 đã trình bày chi tiết về hệ thống phát điện gió PMSG, từ cấu trúc vật lý đến các mô hình toán học như là: công suất tuabin thu được từ gió, các biểu thức cơ học mô tả quá trình chuyển đổi từ momen quay của tuabin sang momen quay của máy phát, cũng như các công thức mô hình toán máy phát điện. Các khía cạnh cốt lõi như đặc tính khí động học của tuabin, mô hình cơ-điện của hệ thống truyền động, và mô hình máy phát PMSG trong các hệ tọa độ khác nhau đã được phân tích cặn kẽ. Đặc biệt, chương đã đi sâu vào các thuật toán Tối đa hóa công suất (MPPT), nền tảng để khai thác hiệu quả năng lượng gió, đồng thời giới thiệu giải pháp cải tiến sử dụng logic mờ. Với mô hình toán học vững chắc đã được thiết lập, hệ thống giờ đây đã sẵn sàng cho bước tiếp theo: thiết kế các chiến lược điều khiển. Ở chương tiếp theo, sẽ vận dụng các mô hình này để xây dựng và tinh chỉnh những bộ điều khiển cho cả phía máy phát và lưới điện, nhằm đảm bảo hệ thống vận hành ổn định và hiệu quả.

CHƯƠNG 4. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

4.1. Sơ đồ cấu trúc điều khiển

Trong các hệ thống điện gió tích hợp vào lưới điện nhỏ hoặc khu vực biệt lập, việc đảm bảo hiệu suất và ổn định của máy phát PMSG là một yêu cầu thiết yếu, đặc biệt khi nguồn gió biến thiên và tải thay đổi liên tục. Các yếu tố như nguồn cung không ổn định từ năng lượng mặt trời, gió, hoặc tải thay đổi liên tục đòi hỏi các giải pháp kỹ thuật tiên tiến. Bộ biến đổi phía máy phát (Machine-Side Converter - MSC) đóng vai trò trung tâm, không chỉ chuyển đổi năng lượng cơ học từ tuabin gió thành điện năng mà còn điều chỉnh công suất đầu ra và tốc độ quay. Bên cạnh đó, Bộ biến đổi nguồn không kém phần quan trọng, không chỉ chuyển đổi năng lượng mà còn điều chỉnh dòng điện và điện áp để đáp ứng các tiêu chuẩn vận hành của lưới. Cấu trúc điều khiển của bộ biến đổi bên phía máy phát và phía lưới được thể hiện trong sơ đồ sau (hình 4.1)

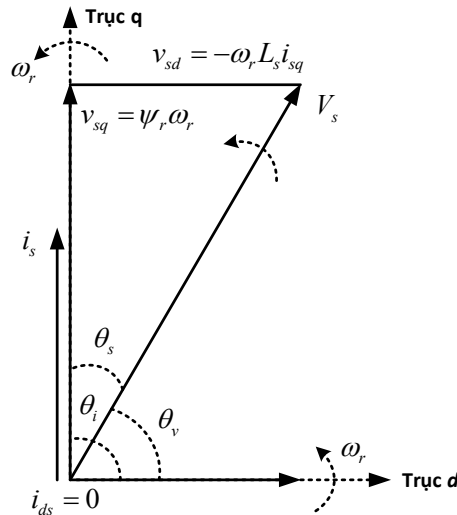


Hình 4.1. Cấu trúc điều khiển tổng quát của hệ thống điện gió

4.1.1 Bộ biến đổi phía máy phát (MSC)

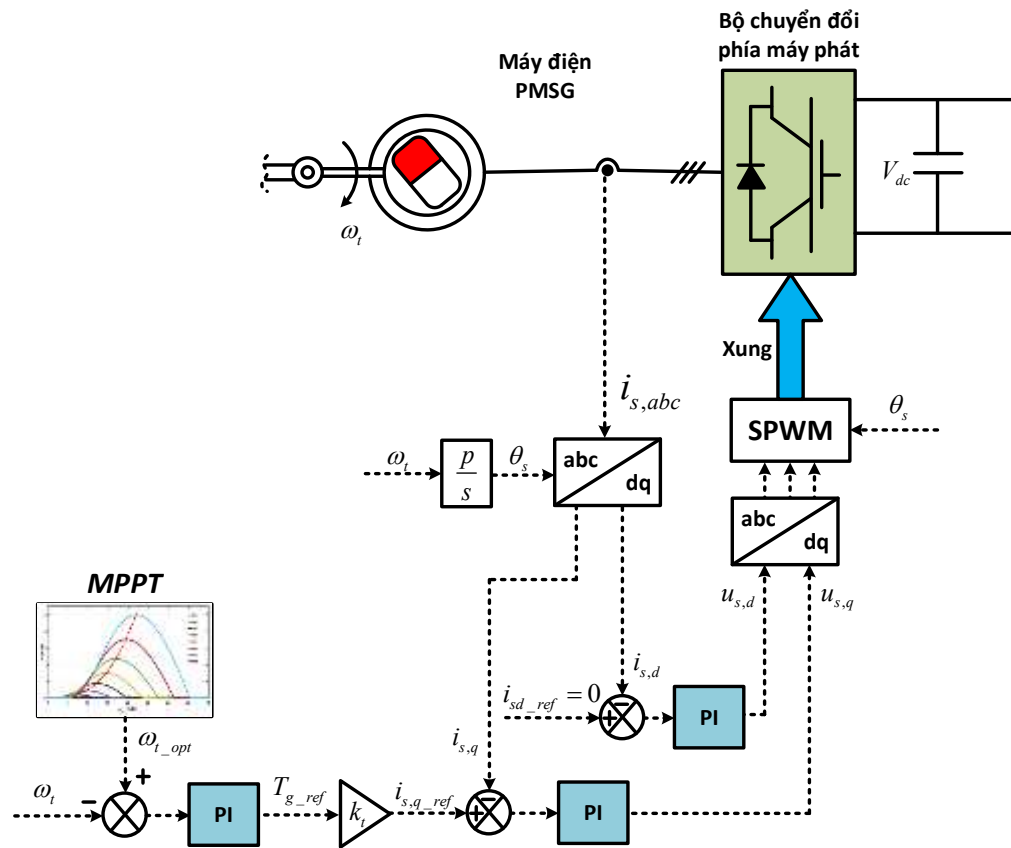
Bộ MSC trong hệ thống điện gió sử dụng máy phát PMSG có vai trò cực kỳ quan trọng. MSC đảm nhận nhiệm vụ điều khiển mô-men và dòng điện của máy phát nhằm khai thác tối ưu năng lượng gió, thực hiện các thuật toán MPPT cũng như đảm bảo các

ràng buộc kỹ thuật về chất lượng điện, an toàn và bảo vệ thiết bị. Cấu trúc điều khiển MSC hiệu quả nhất cho PMSG là điều khiển theo từ thông rotor của máy phát (RFOC), tách bạch vòng điều khiển dòng và vòng điều khiển mômen. Thông thường, toàn bộ đều được triển khai với bộ điều khiển PI dạng số nhờ khả năng loại bỏ sai lệch tĩnh và cấu trúc đơn giản, dễ hiện thực trên vi xử lý số (DSP/FPGA).



Hình 4.2 giản đồ pp RFOC

Ở mọi thời điểm vận hành, cần xác định lượng momen điện từ (hay tốc độ quay) phù hợp với điều kiện gió. Thuật toán MPPT, dựa trên mô hình động học tuabin, sẽ xác lập giá trị tốc độ tối ưu gửi về MSC. Vòng ngoài thực hiện điều khiển tốc độ, nhận phản hồi tốc độ thực tế và phát ra dòng điện $i_{s,q}^*$ mong muốn. Vòng trong là điều khiển dòng điện (dòng trục dq) với hai nhánh tách biệt: dòng $i_{s,d}$ chủ yếu kiểm soát từ thông (thường đặt bằng 0 để tối đa hóa momen trên mỗi đơn vị dòng), dòng $i_{s,q}$ trực tiếp kiểm soát momen. Bởi vì theo phương trình (3.17), khi $i_{s,d}$ được giữ tại giá trị 0 thì momen điện từ của máy phát tỷ lệ thuận với dòng $i_{s,q}$. Các bộ điều khiển PI truyền thống có nhiệm vụ thực hiện điều chỉnh dòng điện thực tế theo dòng điện đặt, từ đó đưa ra điện áp điều khiển phù hợp cho bộ biến đổi công suất phía máy phát. Dòng điện thực tế ở mỗi pha được đo bằng cảm biến dòng chính xác, qua biến đổi Clark-Park thành giá trị dòng $i_{s,d}$, $i_{s,q}$ để đưa vào bộ điều khiển. Sơ đồ điều khiển đầy đủ của MSC có thể trình bày như hình 4.3.



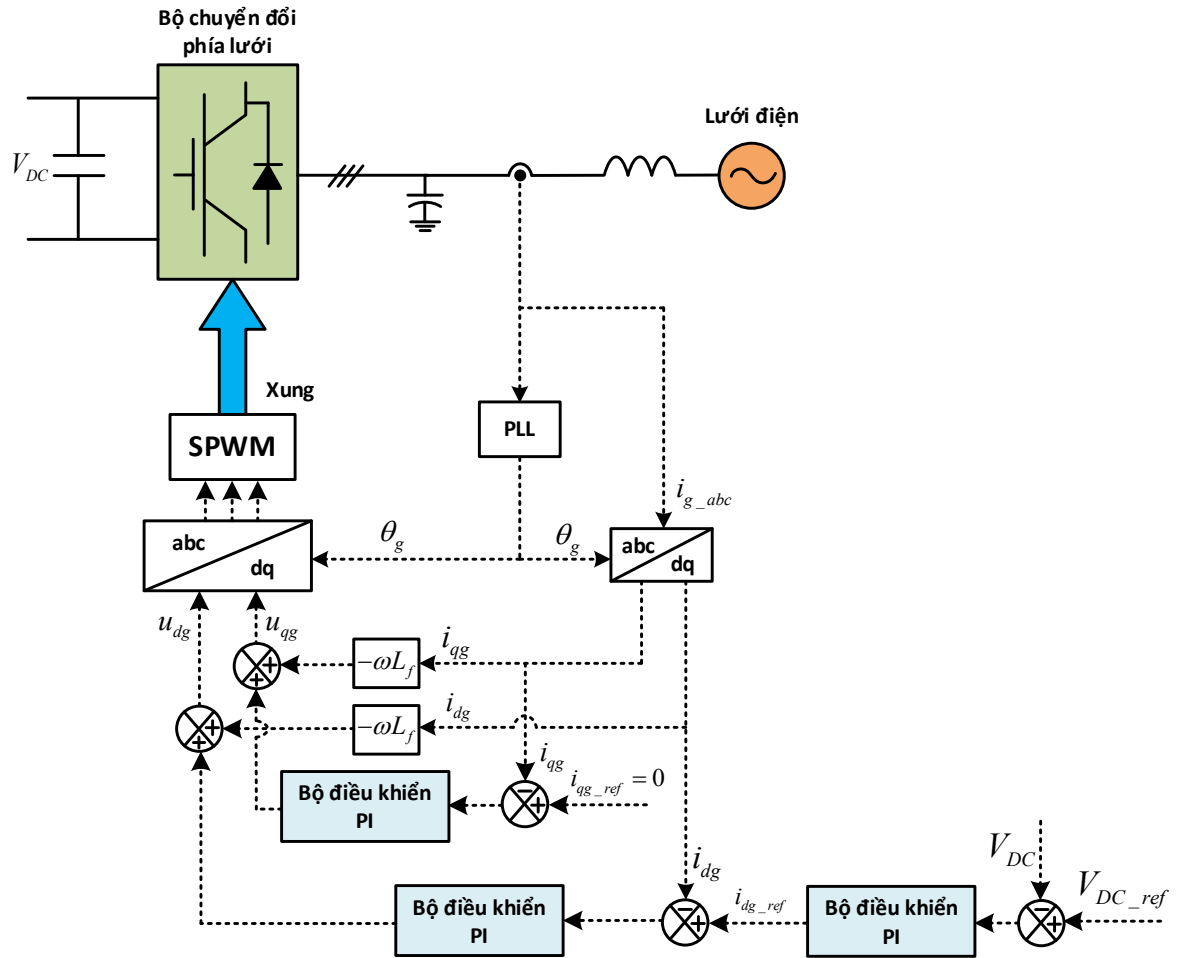
Hình 4.3 Sơ đồ điều khiển phía máy phát

Cấu trúc điều khiển MSC với các vòng PI cho phép kiểm soát chính xác dòng điện, momen phát và do đó điều tiết tốc độ PMSG tối ưu hóa khai thác năng lượng gió ở mọi điều kiện, giữ ổn định hệ thống, giảm dao động. Sơ đồ và phân tích trên đây là nền tảng cho mọi nghiên cứu chuyên sâu về điều khiển số cho điện gió hiện đại.

4.1.2 Bộ biến đổi phía lưới điện (GSC)

Trong các hệ thống năng lượng tái tạo, đặc biệt là turbine gió sử dụng máy phát PMSG, GSC đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo truyền tải năng lượng hiệu quả từ nguồn điện DC sang lưới điện AC. Cấu trúc điều khiển của GSC được thiết kế nhằm đảm bảo kiểm soát chính xác dòng điện và công suất trong quá trình kết nối với lưới. Sơ đồ điều khiển đầy đủ phía lưới có thể trình bày như hình 4.4.

Phương pháp điều khiển chủ đạo thường được áp dụng là điều khiển vector (Vector Oriented Control - VOC), cho phép tách biệt và điều chỉnh độc lập các thành phần công suất thông qua hệ tọa độ quay dq



Hình 4.4 Sơ đồ điều khiển phía lưới

Trước khi thiết kế bộ điều khiển phía lưới với các phương pháp kinh điển, cần phải xem xét mô hình toán liên quan giữa dòng điện và điện áp ở phía lưới. Việc áp dụng phương pháp VOC thì mô hình toán phía lưới phải được thể hiện ở tọa độ dq để thuận lợi thiết kế bộ điều khiển [17]:

$$L_f \frac{di_d}{dt} = L_f \omega i_q - R_f i_d + V_{td} - V_{sd} \quad (4.1)$$

$$L_f \frac{di_q}{dt} = L_f \omega i_d - R_f i_q + V_{tq} - V_{sq} \quad (4.2)$$

Với V_{td}, V_{tq} là điện áp đầu ra của bộ VSC có tác dụng bù điện áp để điều khiển dòng điện; ω là tần số lưới điện; L_f là trở kháng lọc trên đường dây; V_{sd}, V_{sq} là điện áp phía lưới. Điện áp bù này sẽ được thể hiện qua với tín hiệu điều chế được tính từ bộ điều khiển bằng các công thức sau:

$$m_d = \frac{2}{V_{dc}}(u_d - L_f \omega i_q + V_{sd}) \quad (4.3)$$

$$m_q = \frac{2}{V_{dc}}(u_q - L_f \omega i_d + V_{sq}) \quad (4.4)$$

Với m_d, m_q lần lượt là tín hiệu điều chế tương ứng cho điện áp đầu ra trục d và trục q ; u_d, u_q lần lượt là tín hiệu điều khiển từ bộ điều khiển ở đồ án này là PI. Dòng điện trục ngang i_q được đặt bằng 0 để có hệ số công suất bằng 1 và dòng điện trục i_d được tính toán bởi bộ điều khiển điện áp một chiều và điều khiển điện áp tại bus DC trung gian thông qua điều động dòng công suất tác dụng của nguồn cấp.

Việc điều chỉnh điện áp bus DC được thông qua đại lượng công suất điều động lên lưới, điều này thể hiện rõ ở mô hình toán bus DC như sau [31]:

$$\frac{C}{2} V_{DC} \frac{dV_{DC}}{dt} = P_{MSC} - P_{GSC} \quad (4.5)$$

Đồng thời, Biểu thức công suất tác dụng và công suất phản kháng bơm vào lưới được cho bởi biểu thức sau [32].

$$P_g = \frac{3}{2}(V_{dg} i_{dg} + V_{qg} i_{qg}) \quad (4.6)$$

$$Q_g = \frac{3}{2}(V_{qg} i_{dg} - V_{dg} i_{qg}) \quad (4.7)$$

Với mục đích cho việc điều khiển dễ dàng và thuận tiện hơn thì giá trị $V_{g,q}$ sẽ mặc định bằng 0 thông qua bộ PLL (sẽ đề cập ở mục sau), từ đó biểu thức công suất tác dụng và công suất phản kháng đưa vào lưới trở thành:

$$P_g = \frac{3}{2} V_{dg} i_{dg} = V_{DC} i_{DC} \quad (4.8)$$

$$Q_g = -\frac{3}{2} V_{dg} i_{qg} \quad (4.9)$$

Từ hai biểu thức trên, ta thấy rằng công suất tác dụng và công suất phản kháng có thể được điều khiển một cách độc lập bởi dòng điện trục d và trục q .

4.2. Lựa chọn tham số bộ điều khiển

Bộ điều khiển PI (Proportional-Integral) là một trong những phương pháp điều khiển tự động phổ biến nhất hiện nay nhờ cấu trúc đơn giản, dễ triển khai và hiệu quả đối với nhiều hệ thống tuyến tính, ổn định. Bộ điều khiển PI hoạt động dựa trên hai thành phần

chính: thành phần tỉ lệ (P) và thành phần tích phân (I). Mỗi thành phần này đóng vai trò riêng biệt trong việc điều chỉnh tín hiệu điều khiển nhằm giảm sai số giữa giá trị đặt và giá trị thực tế của hệ thống. Khâu tỉ lệ (P) có nhiệm vụ tạo ra tín hiệu điều khiển tỉ lệ với sai lệch hiện tại giữa giá trị đặt và giá trị thực tế. Nhờ đó, hệ thống phản ứng nhanh với sự thay đổi của sai số, giúp giảm sai số lớn một cách tức thời. Tuy nhiên, khâu P không thể loại bỏ hoàn toàn sai số xác lập (sai số tĩnh) khi hệ thống đã ổn định. Khâu tích phân (I) có vai trò tích lũy sai số theo thời gian, nghĩa là nó cộng dồn tất cả các sai số trong quá khứ. Trong khoảng thời gian nhất định, tác động của khâu tích phân sẽ làm tăng dần tín hiệu đầu ra để đưa hệ thống về trạng thái ổn định, từ đó giảm thiểu sai lệch giữa giá trị thực tế và giá trị mong muốn.

Việc lựa chọn thông số cho bộ điều khiển PI là một bước quan trọng quyết định đến hiệu quả của hệ thống điện gió. Để đạt được hiệu suất tối ưu, hệ thống điều khiển của bộ biến đổi thường được thiết kế với cấu trúc đa vòng lặp, kết hợp các cơ chế phản hồi. Một trong những phương pháp điều khiển hiệu quả là sử dụng cấu trúc xếp tầng (cascaded control structure). Bên phía máy phát sẽ bao gồm hai vòng điều khiển dòng điện và tốc độ, bên phía lưới sẽ bao gồm 2 vòng điều khiển điện áp và dòng điện.

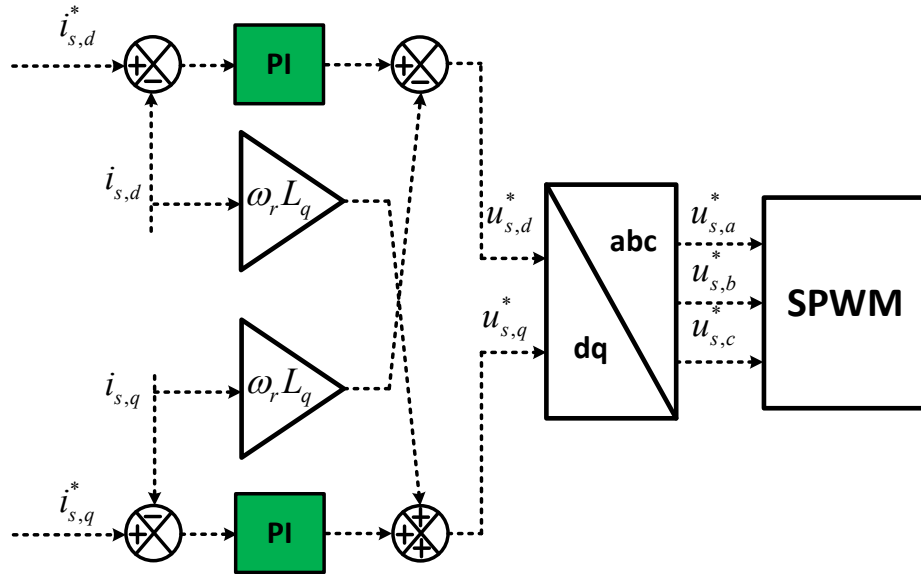
4.2.1 Tính chọn tham số Bộ điều khiển bên phía máy phát

- **Bộ điều khiển dòng điện**

Phương trình điện áp máy phát trong hệ tọa độ dq [33]

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + L_d \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_e L_q i_{qs} \quad (4.10)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + L_q \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_e L_d i_{ds} + \omega_e \psi_r \quad (4.11)$$



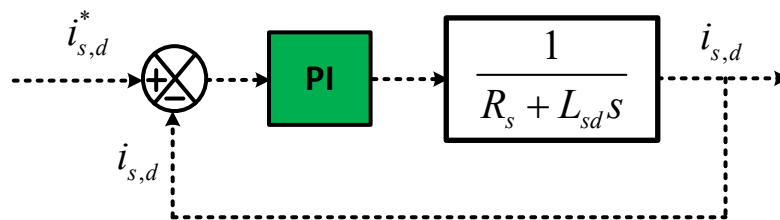
Hình 4.5 Sơ đồ cấu trúc điều khiển dòng điện

Biến đổi laplace hai phương trình (4.10) và (4.11) ta được hàm truyền đạt của hệ thống:

$$I_{ds} = \frac{1}{R_s + sL_d} V_{ds}(s) \quad (4.12)$$

$$I_{qs} = \frac{1}{R_s + sL_q} V_{qs}(s) \quad (4.13)$$

Ta có sơ đồ mạch vòng điều khiển dòng điện ids:



Hình 4.6 Mạch vòng của bộ điều khiển dòng điện

Gán các tham số của hàm truyền đạt đối tượng như sau:

$$G(s) = \frac{1}{R_s + sL_d} \quad (4.14)$$

Và hàm truyền đạt của bộ điều khiển PI là:

$$C(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (4.15)$$

Từ (4.14) và (4.15) ta có hàm truyền đạt kín của mạch vòng điều khiển dòng điện là:

$$T(s) = \frac{G(s)C(s)}{1+G(s)C(s)} = \frac{\frac{K_p s + K_i}{R_s s + s^2 L_d}}{1 + \frac{K_p s + K_i}{R_s s + s^2 L_d}} = \frac{K_p s + K_i}{R_s s + s^2 L_d + K_p s + K_i} \quad (4.16)$$

Gán (4.16) vào hàm truyền mẫu [34]:

$$\frac{\frac{K_p s + K_i}{L_d}}{s^2 + \frac{(R_s + K_p)}{L_d} s + \frac{K_i}{L_d}} = \frac{as + b}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.17)$$

Từ đó hệ số K_p và K_i của đối tượng sẽ là:

$$K_p = 2\zeta\omega_n L_d - R_s \quad (4.18)$$

$$K_i = \omega_n^2 L_d \quad (4.19)$$

Với $\omega_n = \frac{2\pi}{0.1}$ là tần số riêng, $\zeta = 0.707$ là hệ số tắt dần, và $T_s = \frac{5\zeta}{\omega_n}$ là thời gian xác

lập. Tương tự với dòng điện i_d , ta có hệ số K_p , K_i của dòng $i_{s,q}$ là:

$$K_c = 2\zeta\omega_n L_q - R_s \quad (4.20)$$

$$K_i = \omega_n^2 L_q \quad (4.21)$$

- **Bộ điều khiển tốc độ**

Ta có mối quan hệ giữa dòng điện và tốc độ [33]:

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) (\psi_r i_{qs} + (L_d - L_q) i_{qs} i_{ds}) \quad (4.22)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p}{J} \left(T_{em} - \frac{B}{p} \omega_r - T_{load} \right) \quad (4.23)$$

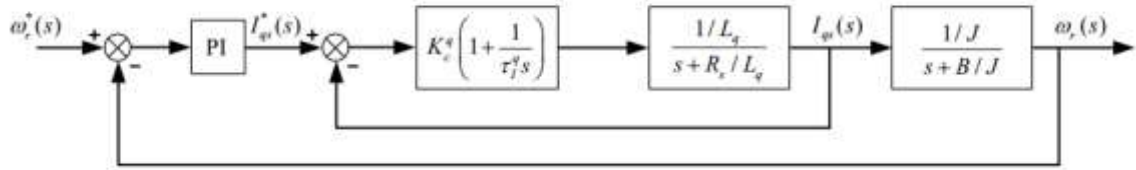
Vì $L_d = L_q$ nên ta rút gọn phương trình động học:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = -\frac{B}{J} \omega_r + \frac{3}{2} \frac{p^2 \psi_r}{J} i_{qs} - \frac{p}{J} T_{load} \quad (4.24)$$

Biến đổi Laplace các phương trình (4.24) trên:

$$\left(s + \frac{B}{J} \right) \omega_r(s) = \frac{3}{2} \frac{p^2 \psi_r}{J} i_{qs}(s) \quad (4.25)$$

Ta có mạch vòng điều khiển tốc độ được mô tả như hình 4.7



Hình 4.7. Mạch vòng của bộ điều khiển tốc độ

Sau khi thiết kế bộ điều chỉnh cho đại lượng $i_{s,q}$, Hàm truyền đạt của mạch vòng kín dòng $i_{s,q}$:

$$\frac{i_{qs}(s)}{i_{qs}^*(s)} = \frac{(2\zeta\omega_n - \frac{R_s}{L_q})s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.26)$$

Từ (4.25) và (4.26) ta có hàm truyền giữ ω_r và $i_{s,q}$:

$$\frac{\omega_r(s)}{i_{qs}^*(s)} = \frac{\frac{3}{2} \frac{p^2 \psi_r}{J} (2\zeta\omega_n - \frac{R_s}{L_q})s + \omega_n^2}{\left(s + \frac{B}{J}\right) s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.27)$$

Việc xác định được thông số bộ điều khiển PI phụ thuộc vào việc chuyển mô hình hệ thống từ bậc ba xuống bậc một. Bởi vì động học của vòng dòng điện nhanh hơn rất nhiều so với động học của vòng tốc độ nên ta chọn ω_n lớn để bỏ qua động học của mạch vòng dòng điện, khi đó ta có thể xấp xỉ hàm truyền đạt như sau [34]:

$$\frac{\omega_r(s)}{i_{qs}^*(s)} \approx \frac{\frac{3}{2} \frac{p^2 \psi_r}{J}}{\left(s + \frac{B}{J}\right)} \quad (4.28)$$

Sử dụng bộ điều khiển tốc độ có hàm truyền đạt như sau:

$$C(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (4.29)$$

Hàm truyền kín mạch vòng điều khiển tốc độ:

$$T(s) = \frac{G(s)C(s)}{1 + G(s)C(s)} = \frac{\frac{3}{2} \frac{p^2 \psi_r}{J} (K_p s + K_i)}{s^2 + \frac{B}{J} s + \frac{3}{2} \frac{p^2 \psi_r}{J} (K_p s + K_i)} \quad (4.30)$$

Biến đổi (4.30) ta có phương trình:

$$T(s) = \frac{\frac{3}{2} \frac{p^2 \psi_r}{J} (K_p s + K_i)}{s^2 + \left(\frac{B}{J} + \frac{3}{2} \frac{p^2 \psi_r}{J} K_p\right) s + \frac{3}{2} \frac{p^2 \psi_r}{J} K_i} = \frac{as + b}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.31)$$

Hệ số K_p, K_i của mạch vòng tốc độ là:

$$K_p = \frac{2\zeta \omega_n J}{\frac{3}{2} p \psi_r} \quad (4.32)$$

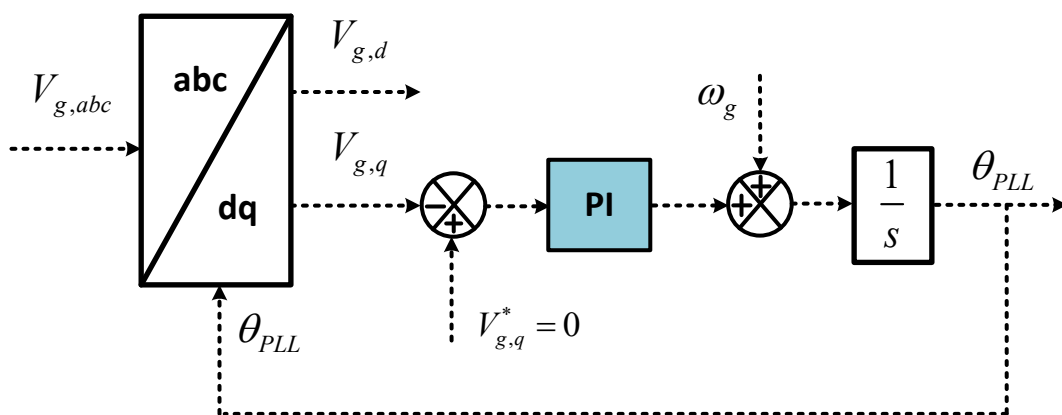
$$K_i = \frac{\omega_n^2 J}{\frac{3}{2} p \psi_r} \quad (4.33)$$

Ta chọn $\omega_n = \frac{2\pi}{0.009}$ của mạch vòng tốc độ nhỏ hơn nhiều so với mạch vòng dòng điện.

4.2.2 Tính chọn tham số các bộ điều khiển bên phía lưới điện

- **Bộ đồng bộ pha lưới (PLL)**

Để đảm bảo bộ nghịch lưu hoạt động đồng bộ với lưới điện, một vòng khóa pha (PLL) được sử dụng. Nguyên lý hoạt động của PLL là điều khiển thành phần q (trục vuông góc) của điện áp đầu vào về 0 thông qua một bộ điều khiển PI. Khi đó, vector điện áp đầu vào sẽ được căn chỉnh với trục d của hệ quy chiếu quay, giúp xác định chính xác góc pha của lưới điện. Sơ đồ khối của PLL được minh họa trong hình 4.8.



Hình 4.8 Sơ đồ khối PLL

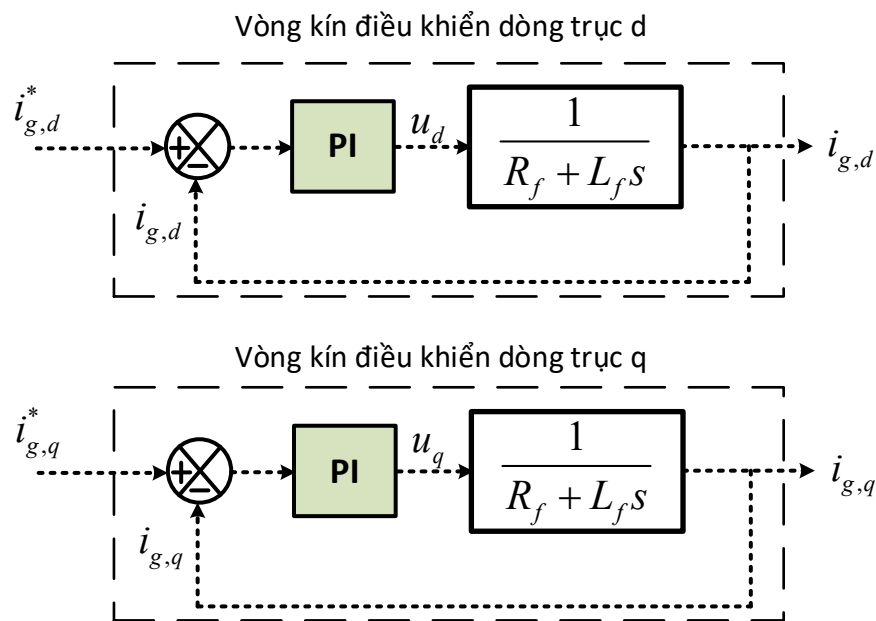
Nguyên lý hoạt động của PLL là điều chỉnh $V_{g,q}$ về 0, Vector điện áp đầu vào sẽ được căn chỉnh với trục d của hệ quy chiếu quay. Khi đó, $\theta_{PLL} = \theta_{PCC}$ và góc pha của điện áp đầu vào sẽ được khóa và trích xuất. Hàm truyền tín hiệu nhỏ vòng kín của PLL có thể được viết như sau:

$$\frac{\theta_{PCC}(s)}{\theta_{PLL}(s)} = \frac{T(s)}{1+T(s)} = \frac{V_{PCC}K_p s + V_{PCC}K_i}{s^2 + V_{PCC}K_p s + V_{PCC}K_i} \quad (4.34)$$

trong đó V_{PCC} là biên độ điện áp đầu vào, K_p và K_i là các hệ số của bộ điều khiển PI. Để đảm bảo PLL hoạt động ổn định và đáp ứng nhanh, các thông số của bộ điều khiển PI được lựa chọn dựa trên hệ số tắt dần ζ và tần số riêng ω_n như sau:

$$K_p = \frac{2\zeta\omega_n}{V_{PCC}}, \quad K_i = \frac{\omega_n^2}{V_{PCC}}$$

- **Bộ điều khiển dòng điện**



Hình 4.9 Sơ đồ Bộ điều khiển dòng điện

Thế hai phương trình (3.21) và (3.22) vào hai phương trình (4.3) và (4.4) ta được:

$$V_{td}(t) = (u_d - L_f \omega i_q + V_{sd}) \quad (4.35)$$

$$V_{tq}(t) = (u_q - L_f \omega i_d + V_{sq}) \quad (4.36)$$

Từ đây, ta thế hai phương trình trên vào hai phương trình (4.1) và (4.2) ta được phương trình:

$$L_f \frac{di_d}{dt} = -R_f i_d + u_d \quad (4.37)$$

$$L_f \frac{di_q}{dt} = -R_f i_q + u_q \quad (4.38)$$

Biến đổi Laplace hai phương trình trên ta được hàm truyền đạt cho mạch vòng dòng điện:

$$i_d = U_{sd} \frac{1}{L_f s + R} \quad (4.39)$$

$$i_q = U_{sq} \frac{1}{L_f s + R_f} \quad (4.40)$$

Hàm truyền của hệ thống là:

$$G(s) = \frac{1}{L_f s + R_f} \quad (4.41)$$

Và hàm truyền đạt của bộ PID:

$$C(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (4.42)$$

Từ đó, suy ra hàm truyền hệ hở của hệ thống:

$$L(s) = \frac{k_p s + k_i}{L_f s^2 + R_f s} = \frac{k_p}{L_f} \left(\frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{s + \frac{R_f}{L_f}} \right) \quad (4.43)$$

Có hàm truyền hệ hở rút ra được hàm truyền đạt kín của mạch vòng điều khiển dòng điện:

$$T(s) = \frac{G(s)C(s)}{1 + G(s)C(s)} = \frac{k_p s + k_i}{L_f s^2 + R_f s + k_p s + k_i} \quad (4.44)$$

Gán vào hàm truyền mẫu ta được:

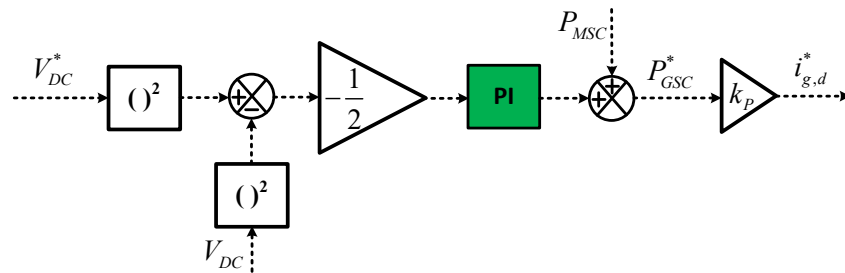
$$T(s) = \frac{\frac{k_p s + k_i}{L_f}}{s^2 + \frac{(R_f + k_p)}{L_f} s + \frac{k_i}{L_f}} = \frac{as + b}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.45)$$

Ta chọn $\omega_n = \frac{2\pi}{0.04}$, $\zeta = 0.707$, từ đó thế vào $T(s)$ và tính được hệ số K_p , K_i như sau:

$$K_p = \zeta L_f \omega_n - R_f \quad (4.46)$$

$$K_i = L_f \omega_n^2 \quad (4.47)$$

• **Bộ điều khiển công suất**



Hình 4.10 Sơ đồ bộ điều khiển công suất

Trong các hệ thống năng lượng gió, bộ biến đổi phía máy thường được điều khiển nhằm tối đa hóa công suất tác dụng truyền lên lưới điện. Khi đó, điện áp tại DC-link không còn giữ giá trị không đổi mà sẽ phụ thuộc vào sự cân bằng công suất giữa bộ biến đổi phía máy và bộ biến đổi phía lưới (GSC). Sự biến thiên của điện áp DC-link kéo theo sự thay đổi của chu kỳ làm việc (duty cycle) theo thời gian, khiến cho quá trình mô hình hóa và điều khiển hệ thống trở nên phi tuyến và phức tạp hơn. Để đơn giản hóa thiết kế, bộ điều khiển điện áp DC-link thường được lựa chọn có tốc độ đáp ứng chậm hơn đáng kể so với vòng điều khiển dòng điện của bộ biến đổi.

Đối với bộ điều khiển điện áp DC-link, sự trao đổi công suất trung bình trên thanh DC được sử dụng để tính toán dòng điện xoay chiều tham chiếu, từ đó duy trì điện áp DC-link không đổi. Năng lượng lưu trữ trong tụ DC-link có thể được biểu diễn như sau:

$$P_{dc} = \frac{dW_{dc}}{dt} = \frac{1}{2} C_{dc} \frac{d(v_{dc})^2}{dt} \quad (4.48)$$

Từ đó, có thể thấy rằng ta có thể điều khiển sai số công suất bằng cách sử dụng bình phương sai số điện áp DC-link. Do đó, luật điều khiển cho công suất tham chiếu phía AC (bỏ qua tổn hao bộ biến đổi) được xác định như sau:

$$P^* = (K_{p,dc} + \frac{K_{i,dc}}{s}) \frac{(V_{dc}^*)^2 - v_{dc}^2}{2} \quad (4.49)$$

Vì tốc độ đáp ứng của vòng điều khiển dòng điện nhanh hơn, nên vòng điều khiển dòng điện hoặc công suất GSC có vòng kín là khâu khuếch đại bằng 1. Ta có hàm truyền vòng kín của đối tượng DC-link khi áp dụng bộ điều khiển PI là:

$$T(s) = \frac{G(s)C(s)}{1+G(s)C(s)} = \frac{b(c_1s+c_0)}{s(s+a)+b(c_1s+c_0)} = \frac{K_{P,DC}s + K_{I,DC}}{C_{DC}s^2 + K_{P,DC}s + K_{I,DC}} \quad (4.50)$$

Sử dụng phương pháp gán hàm truyền mẫu và gán điểm cực, ta có:

$$T(s) = \frac{-K_{P,DC}s - K_{I,DC}}{C_{DC}s^2 - K_{P,DC}s - K_{I,DC}} = \frac{b(c_1s+c_0)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.51)$$

Với phương pháp gán cực, ta chọn $\omega_n = \frac{\pi}{2}e^{-4}$ và $\zeta = 0.707$, từ đó thế vào $T(s)$ ta tính được hệ số $K_{P,DC}$, $K_{I,DC}$ là:

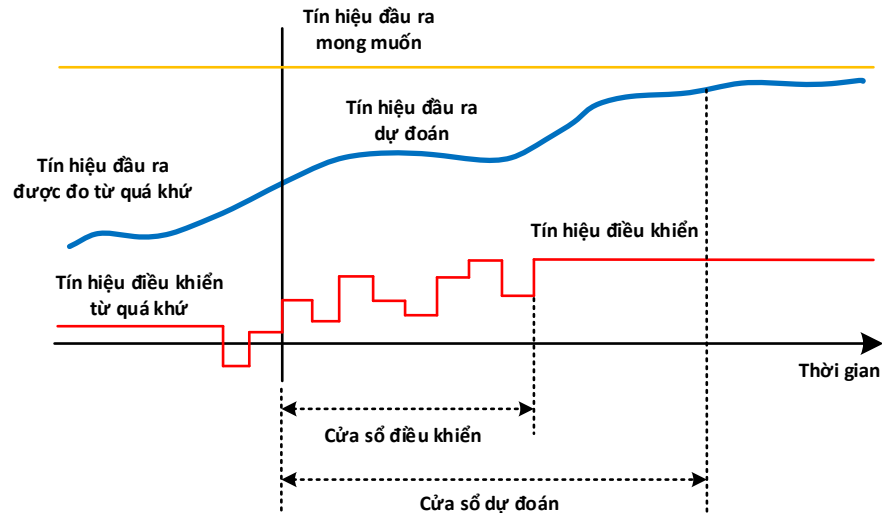
$$K_{P,DC} = 2C_{DC}\zeta\omega_n \quad (4.52)$$

$$K_{I,DC} = C_{DC}\omega_n^2 \quad (4.53)$$

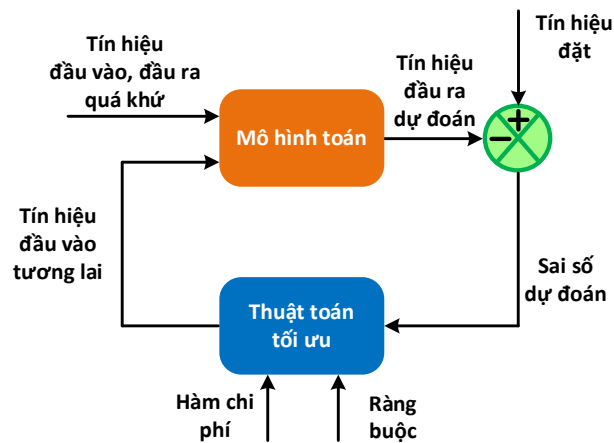
Như vậy trong mục này, nhóm đã trình bày tính toán chi tiết để lựa chọn tham số bộ điều khiển PI truyền thống cho các khâu trong hệ thống. Phần tiếp theo, nhóm em đề xuất sử dụng giải pháp điều khiển hiện đại để đối sánh với bộ điều khiển truyền thống.

4.3. Phương pháp điều khiển dự báo mô hình

Điều khiển dự báo (MPC) là một phương pháp điều khiển hiện đại, trong đó hệ thống sẽ dự đoán trước hành vi tương lai của quá trình dựa trên mô hình toán học, từ đó lựa chọn các giá trị điều khiển sao cho sai lệch giữa đầu ra dự kiến và giá trị mong muốn được giảm thiểu trong một khoảng thời gian nhất định [35]. Tại mỗi chu kỳ lấy mẫu (T_s), bộ điều khiển sẽ tính toán và lựa chọn một chuỗi tín hiệu điều khiển tối ưu. Sau khi áp dụng tín hiệu điều khiển đầu tiên trong chuỗi này, trạng thái thực tế của hệ thống sẽ được cập nhật và quá trình dự đoán, tối ưu lại được lặp lại cho các bước tiếp theo (như minh họa trên hình 4.11) [35], [36].



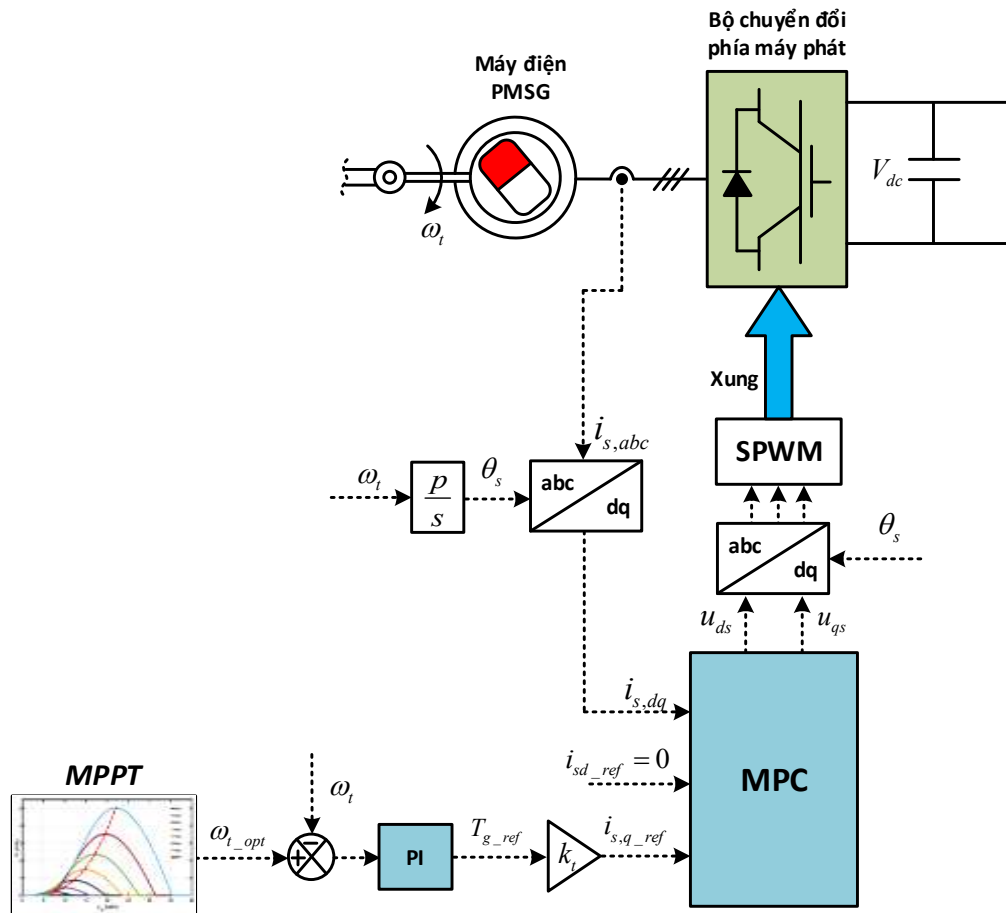
Hình 4.11 Nguyên lý MPC rời rạc



Hình 4.12 Cấu trúc bộ điều khiển MPC

Phương pháp điều khiển MPC đặc biệt hiệu quả trong các hệ thống có ràng buộc, chẳng hạn như PMSG, nơi mà điện áp và dòng điện bị giới hạn bởi các thông số vật lý của động cơ và bộ chuyển đổi công suất. Phương pháp MPC, thay thế các bộ điều khiển PI trong vòng lặp dòng điện của cấu trúc FOC truyền thống bằng MPC [37]. Điều này tận dụng khả năng của MPC trong việc xử lý trực tiếp các ràng buộc điện áp và dòng điện, đồng thời duy trì tần số chuyển mạch cố định thông qua bộ điều chế xung, một ưu điểm quan trọng trong ứng dụng công nghiệp. Phạm vi của đề án tập trung vào việc áp dụng MPC cho vòng lặp trong của hệ thống điều khiển PMSG. Đề án không xét tới việc áp dụng MPC cho vòng lặp ngoài (vòng điều khiển tốc độ), mà tập trung vào vòng trong để điều khiển mô-men xoắn và dòng điện. Lý do cho sự giới hạn này là vì động lực học điện (dòng điện, điện áp) diễn ra nhanh, đòi hỏi tần số lấy mẫu cao để đáp ứng kịp thời - phù hợp cho vòng trong nhờ khả năng dự đoán và tối ưu hóa nhanh chóng [38]. Ngược

lại, động lực học cơ của máy phát (tốc độ) chậm hơn nhiều, và bộ điều khiển PI truyền thống đã đủ hiệu quả cho vòng trong MPC [34], [38]. Cấu trúc điều khiển của MPC bao gồm hai vòng lặp nối tầng (cấu trúc cascade) được mô tả ở hình 4.13, tương tự FOC truyền thống.



Hình 4.13 Sơ đồ điều khiển sử dụng MPC

Việc đầu tiên trong thiết kế bộ điều khiển MPC chính là xác định được mô hình toán của đối tượng để phục vụ cho việc dự đoán các trạng thái trong tương lai. Mô hình toán của PMSG vốn có tính phi tuyến nhẹ, cụ thể ở ma trận hệ thống PMSG có thành phần thay đổi là tốc độ rotor [34], [33]. Để triển khai MPC một cách thuận tiện, mô hình được tuyến tính hóa tại giá trị tốc độ định mức của máy điện $\omega_r = \omega_0$ [38]. Cụ thể, việc tuyến tính hóa giúp cho việc xây dựng các ma trận dự đoán cho bài toán tối ưu không phải diễn ra liên tục (online). Sau khi tuyến tính hóa, mô hình được rời rạc hóa với thời gian lấy mẫu T_s để thu được mô hình toán hệ thống rời rạc tuyến tính bất biến theo thời gian chính của đối tượng ở đây chính là PMSG. Dựa vào phương trình điện (3.18) và (3.19), ta có:

$$\begin{cases} x(k+1) = A(k) + Bu(k) + Gv(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (4.54)$$

Trong đó:

- $x(k) = [i_{s,d}(k) \ i_{s,q}(k)]^T$ là vector trạng thái.
- $u(k) = [u_{s,d}(k) \ u_{s,q}(k)]^T$ là vector đầu vào điều khiển.
- $v(k) = \omega(k)$ là nhiễu đầu vào đo được (tốc độ quay rotor).
- $y(k) = [i_{s,d}(k) \ i_{s,q}(k)]^T$ là vector đầu ra.
- $A = e^{A_c T_s}; B = \int_0^{T_s} e^{A_c \tau} d\tau B_c; G = \int_0^{T_s} e^{A_c \tau} d\tau G_c; C = C_c$

Với:

$$A_c = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \omega_0 \\ \omega_0 & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \quad B_c = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_d} \end{bmatrix}$$

$$G_c = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\psi}{L_q} \end{bmatrix} \quad C_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tại mỗi bước k , điều khiển MPC giải quyết bài toán tối ưu hóa với hàm chi phí và các ràng buộc tổng quát như sau [38]:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta u} \quad & \sum_{i=0}^{N-1} \|Q(y_{k+i|k} - r(k))\|_2^2 + \sum_{j=0}^{N_u-1} \|R\Delta u_{k+j|k}\|_2^2 + \|P(y_{k+N|k} - r(k))\|_2^2 \\ & x_{k|k} = x(k) \\ & x_{k+i+1|k} = Ax_{k+i|k} + B \\ & y_{k+i|k} = Cx_{k+i|k} \\ & \Delta u_{k+N_u+j|k} = 0 \\ & u_{k+i|k} \in U \\ & x_{k+i+1|k} \in X \\ & i = 0, 1, \dots, N_p - 1 \\ & j = 0, 1, \dots, N_p - N_C - 1 \end{aligned} \quad (4.55)$$

Trong đó: N là số lượng bước cửa sổ dự đoán; N_C là số lượng bước cửa sổ điều khiển; Q, R, P là các ma trận trọng số điều chỉnh ưu tiên giữa theo dõi tham chiếu và giảm biến

động đầu vào; $r(k) = [i_{d,ref}(k) \ i_{q,ref}(k)]^T$ là vector tham chiếu; $\Delta u_{k+j|k} = u_{k+j|k} - u_{k+j-1|k}$. Từ đó, hàm chi phí trên được chuyển thành dạng Quy hoạch toàn phương (Quadratic Programming - QP) lồi đơn giản [39]:

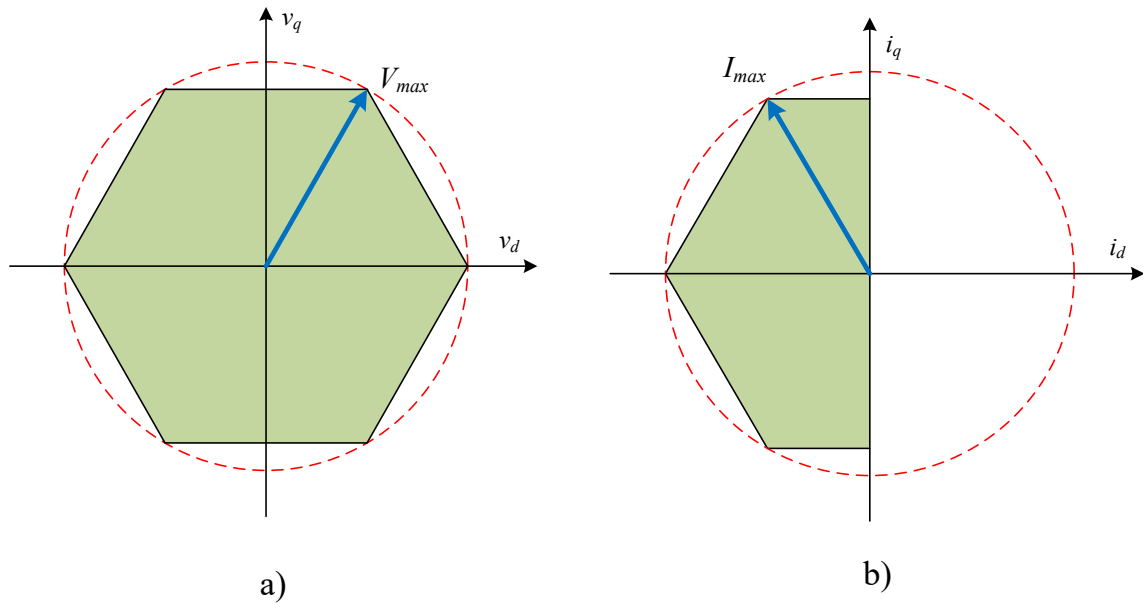
$$\begin{aligned} \min_z \quad & \frac{1}{2} z^T H z + z^T F \\ \text{s.t.} \quad & G z \leq W \end{aligned} \quad (4.56)$$

Trong đó:

- z : Vector biến tối ưu hóa (chuỗi các $\Delta u_{k+j|k}$).
- H, F, G, W : Các ma trận và vector được xây dựng từ mô hình và ràng buộc

Ràng buộc là một trong những đặc điểm nổi bật của MPC, cho phép hệ thống vận hành trong các giới hạn vật lý và an toàn. Trong điều khiển PMSG, các ràng buộc đóng vai trò quan trọng để đảm bảo động cơ không vượt quá khả năng của phần cứng (MSC) và tránh hỏng hóc do quá dòng. Cụ thể, giới hạn điện áp pha được áp đặt bởi điện áp DC-bus tối đa mà bộ biến tần chịu được. Điện áp pha có liên quan nội tại đến sơ đồ điều chế và, với điện áp DC-bus VDC, điện áp tối đa cho phép có thể được đặt thành $V_{\max} = \frac{V_{DC}}{\sqrt{3}}$ cho cả hai phương pháp điều chế vectơ không gian (SVPWM) và điều chế độ rộng xung (SPWM) [40]. Trong hệ tọa độ dq , ràng buộc về điện áp được biểu diễn dưới dạng giới hạn norm bậc 2 của vector điện áp:

$$\|u\|_2 = \sqrt{u_{s,d}^2 + u_{s,q}^2} \leq V_{\max} \quad (4.57)$$



Hình 4.14 Biểu diễn ràng buộc các đại lượng điện trên mặt phẳng hai chiều
 a) Ràng buộc điện áp. b) Ràng buộc dòng điện

Tuy nhiên, vì bài toán tối ưu hóa QP yêu cầu các ràng buộc tuyến tính, giới hạn norm (vôn phi tuyến) này cần được xấp xỉ bằng một đa giác [41]. Một cách phổ biến là sử dụng hình lục giác để xấp xỉ hình tròn ràng buộc $\|u\|_2 \leq V_{max}$, tạo ra một tập hợp các bất đẳng thức tuyến tính [40], [41]. Ví dụ tại hình 4.14.a, với hình lục giác thì ràng buộc điện áp sẽ. mỗi cạnh của đa giác tương ứng với một bất đẳng thức tuyến tính dạng $a_i u_d + b_i u_q \leq c_i$, trong đó a_i, b_i, c_i được tính toán dựa trên V_{max} . Phương pháp này vừa đơn giản hóa bài toán tính toán, vừa đảm bảo độ chính xác đủ để áp dụng thực tế.

Tương tự, dòng điện stator $i_{s,d}$ và $i_{s,q}$ cũng phải được giới hạn để bảo vệ động cơ khỏi quá nhiệt hoặc hư hỏng cơ học/điện. Giới hạn này phụ thuộc vào đặc tính nhiệt và cấu trúc vật lý của PMSM, được biểu diễn dưới dạng:

$$\|x\|_2 = \sqrt{i_{s,d}^2 + i_{s,q}^2} \leq I_{max} \quad (4.58)$$

Trong đó, I_{max} là dòng điện tối đa cho phép, thường được nhà sản xuất quy định. Giống như ràng buộc điện áp, giới hạn norm của dòng điện cũng phi tuyến và cần được xấp xỉ bằng đa giác để tích hợp vào QP. Hình lục giác được sử dụng để xấp xỉ ràng buộc dòng điện đường tròn như hình 4.14.b, dẫn đến các bất đẳng thức tuyến tính dễ dàng được áp dụng cho trạng thái dự đoán $x_{k+i|k}$. Ngoài ra, một điểm đặc biệt trong điều khiển PMSG là $i_{s,d}$ thường được giữ gần 0 hoặc âm (trong chế độ làm yếu từ thông - flux weakening), dẫn đến dòng điện chỉ phép hoạt động trong vùng đa giác là nửa trái của

hình lục giác như hình 4.14.b. Do đó, có thể áp dụng thêm ràng buộc $i_{s,d} \leq 0$ để giảm số lượng bất đẳng thức, đơn giản hóa bài toán tối ưu hóa mà vẫn đảm bảo tính khả thi. Các bất đẳng thức này được áp dụng trực tiếp cho trạng thái dòng điện trong cửa sổ dự đoán, đảm bảo rằng dòng điện stator không vượt quá ngưỡng an toàn trong quá trình vận hành.

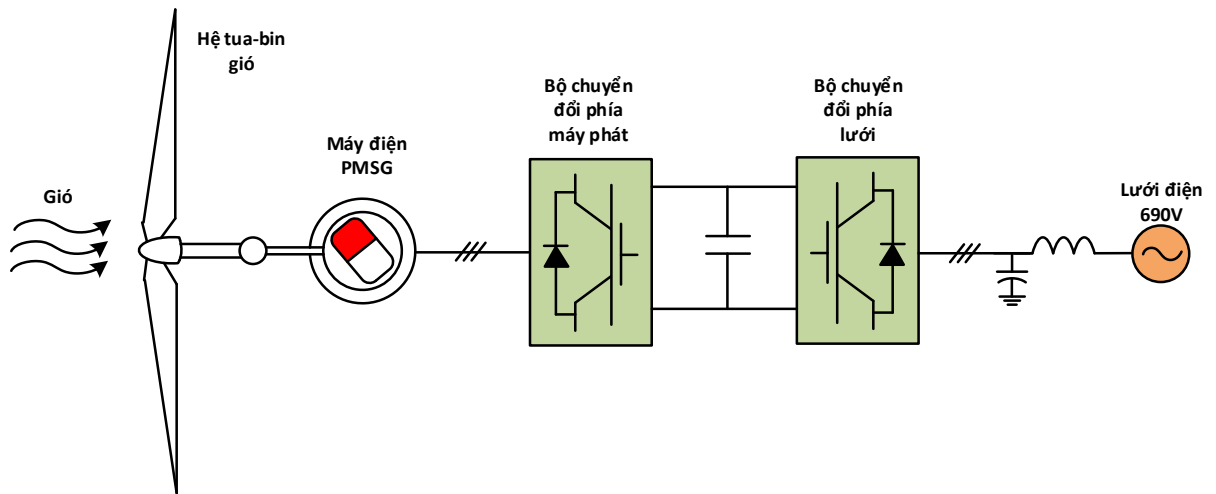
Sau khi giải phương trình toàn phương QP, phần tử đầu tiên của chuỗi điều khiển tối ưu $u_{k|k}$ được áp dụng cho động cơ [39]. Điện áp u_{sd} và u_{sq} sau đó được điều chế bằng PWM để tạo tín hiệu chuyển mạch cho bộ biến đổi công suất phía máy phát, đảm bảo tần số chuyển mạch cố định. Kết quả mô phỏng phương pháp điều khiển này sẽ được trình bày trong chương tiếp theo.

4.4. Kết luận chương

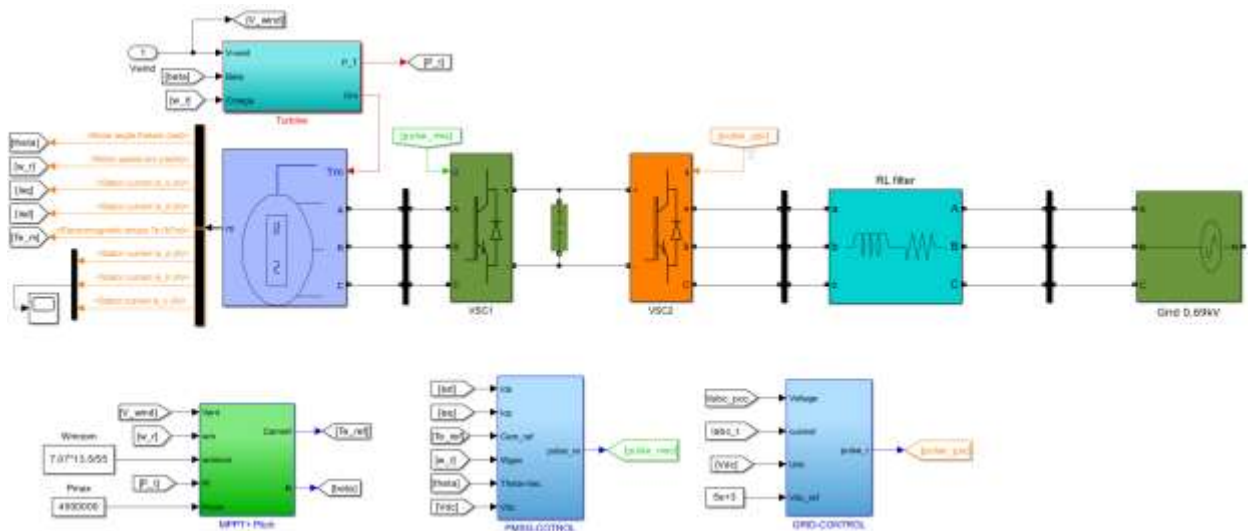
Trên cơ sở mô hình toán học từ Chương 3, Chương 4 đã tập trung vào nhiệm vụ trọng tâm là thiết kế các bộ điều khiển cho hệ thống. Chương đã trình bày chi tiết cấu trúc điều khiển xếp tầng, một phương pháp hiệu quả cho cả bộ biến đổi phía máy phát và phía lưới. Các phương pháp tính toán, lựa chọn tham số cho bộ điều khiển PI kinh điển đã được phân tích một cách có hệ thống cho từng vòng lặp. Song song đó, chương cũng đề xuất một giải pháp điều khiển hiện đại – Điều khiển dự báo mô hình (MPC) – và làm rõ cách thức áp dụng cho vòng điều khiển dòng điện, nhấn mạnh khả năng xử lý các ràng buộc phức tạp của hệ thống. Để kiểm chứng hiệu quả và so sánh ưu nhược điểm của từng phương pháp trong các điều kiện vận hành khác nhau, Chương 5 sẽ triển khai các bộ điều khiển này trên phần mềm MATLAB/Simulink, từ đó đưa ra những đánh giá và kết luận xác đáng về hiệu năng.

CHƯƠNG 5. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ

Để đánh giá hiệu quả của các thuật toán điều khiển nâng cao trong hệ thống điện gió, nhóm đã tiến hành xây dựng mô hình mô phỏng trên phần mềm MATLAB/Simulink. Quá trình mô phỏng tập trung vào việc so sánh giữa các phương pháp MPPT leo đồi và cải tiến với logic mờ, cũng như giữa hai chiến lược điều khiển PI và MPC. Sơ đồ lưới nghiên cứu được thể hiện trên hình 5.1 và 5.2.



Hình 5.1 Cấu trúc hệ thống



Hình 5.2 Mô hình hóa hệ thống trên MATLAB/SIMULINK

Bảng thông số hệ thống cũng như tham số điều khiển được thể hiện trong bảng 5.1 và 5.2.

Bảng 5.1 Thông số cả hệ thống

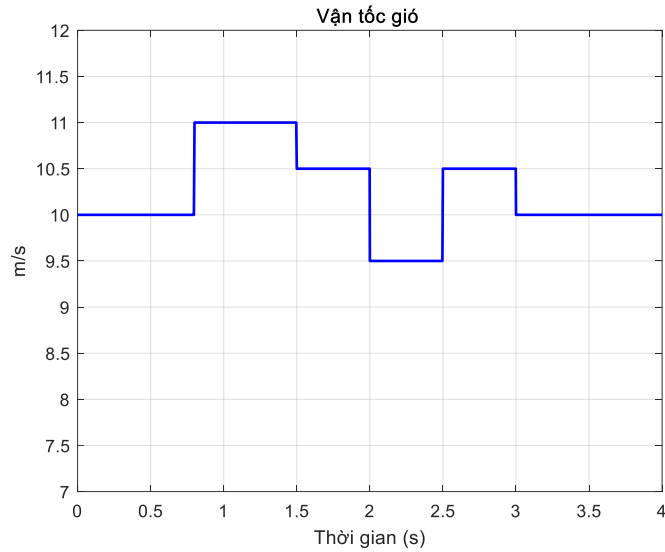
Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị
Tuabin gió		
Bán kính cánh quạt tuabin	R_t (m)	55
Mật độ không khí	ρ (kg/m ³)	1.22
Momen quán tính phía trục tuabin	J_t (kg.m ²)	10000
Hệ số giảm dần phía trục tuabin	D_t (Nm.s/rad)	0.1
Tỷ lệ của hộp số	N	1
PMSG		
Công suất định mức	$P_{N,Gen}$ (MW)	4
Dòng điện định mức	$I_{N,Gen}$ (A)	3000
Số đôi cực từ	p	75
Điện trở stator	R_s (Ω)	6.25e-3
Cảm kháng stator	$L_{sd} = L_{sq}$ (H)	4.229e-3
Từ thông tản rotor	ψ_r (Wb)	11.1464
DC-link, Đường dây nối lưới		
Tụ DC	C_{DC} (F)	0.06
Điện áp định mức DC-link	$V_{N,DC}$ (V)	5000
Điện trở dây	R_g (Ω)	1.19e-3
Cảm kháng dây	L_g (H)	1e-3
Điện áp định mức lưới	V_g (V)	690

Bảng 5.2 Tham số điều khiển

Tham số	Giá trị
PI	
$K_{P,id,MSC}$	0.52782
$K_{I,id,MSC}$	1.855
$K_{P,iq,MSC}$	0.52782
$K_{I,iq,MSC}$	1.855
$K_{P,\omega,MSC}$	9.87e6

$K_{I,\omega,MSG}$	4.874e9
$K_{P,id,GSC}$	0.6621
$K_{I,id,GSC}$	24.67
$K_{P,iq,GSC}$	0.6621
$K_{I,iq,GSC}$	24.67
$K_{P,VDC,GSC}$	66.633
$K_{I,VDC,GSC}$	5921.8
$K_{P,Q,GSC}$	0.02
$K_{I,Q,GSC}$	0.2
MPC	
N_P	10
N_C	10
V_{max} (V)	5000
I_{max} (A)	3000
Q và P	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
R	$\begin{bmatrix} 0.01 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix}$
T_S (s)	0.1e-5

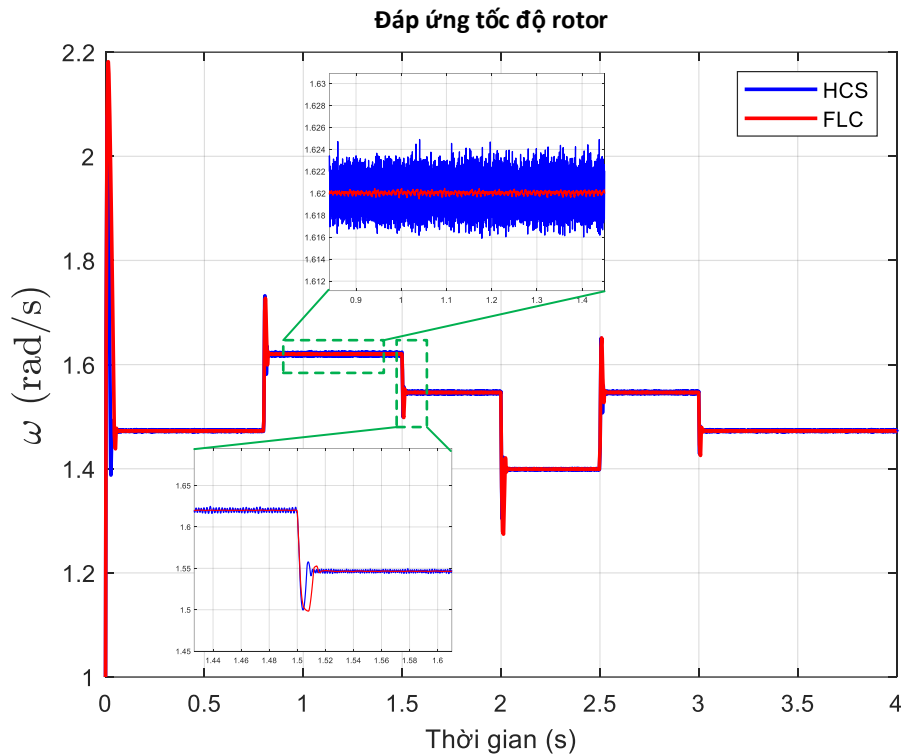
Trong suốt quá trình này, kịch bản vận tốc gió được xây dựng với các thay đổi đột ngột tại các thời điểm 0.8 s, 1.5 s, 2 s, 2.5 s và 3 s (hình 5.1). Vận tốc gió biến thiên theo từng bậc rõ rệt, mô phỏng các giai đoạn thay đổi nhanh của gió. Kịch bản này được lựa chọn nhằm kiểm tra khả năng đáp ứng của các hệ thống hoặc thiết bị trước các biến động gió đột ngột. Việc lựa chọn kịch bản như vậy là do đề tài tập trung vào vùng gió thứ hai, đồng thời nhằm đánh giá hiệu quả của các thuật toán MPPT và các bộ điều khiển. Trong tương lai, khi hệ thống được phát triển đầy đủ cho cả bốn vùng gió, nhóm sẽ xây dựng các kịch bản vận tốc gió có sự biến thiên phức tạp và đa dạng hơn để kiểm tra toàn diện hơn hiệu suất của hệ thống.



Hình 5.1 Kịch bản vận tốc gió

5.1. So sánh các phương pháp MPPT

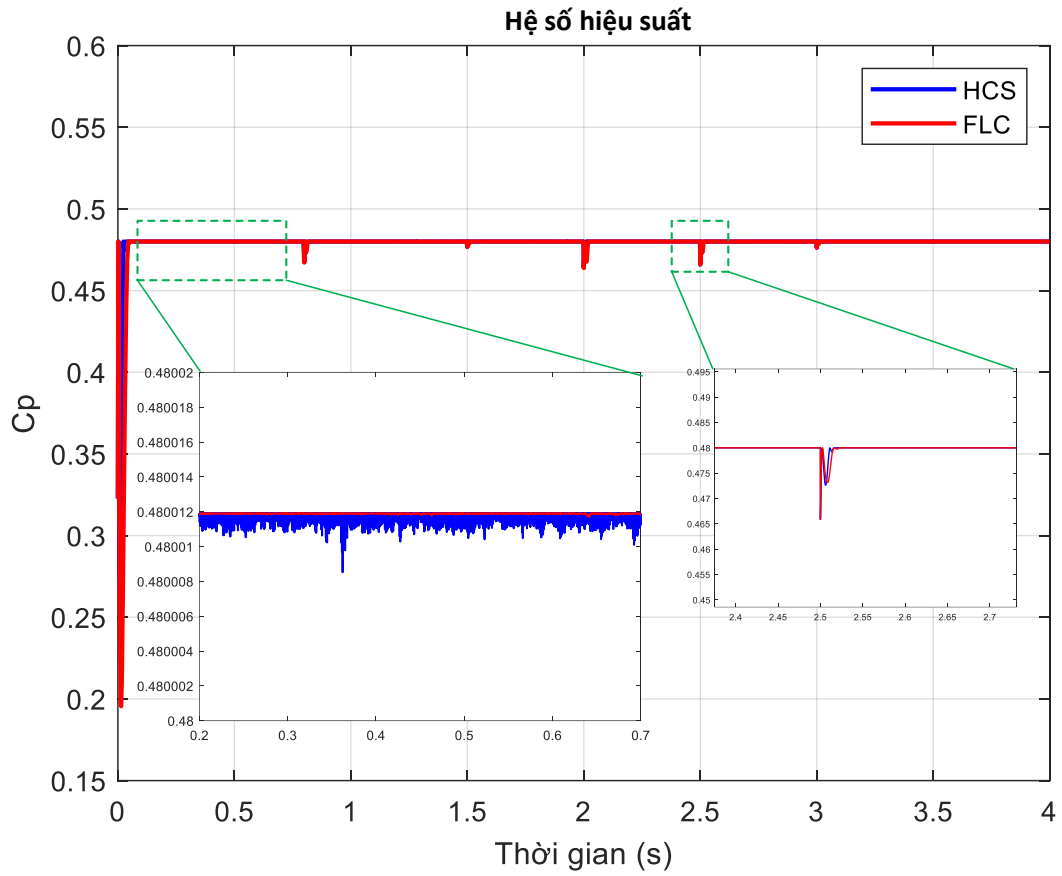
Đối với việc đánh giá hiệu quả của các thuật toán MPPT, nhóm tập trung phân tích các đồ thị so sánh giữa phương pháp HCS và FLC. Cụ thể, các kết quả được thể hiện qua các đồ thị vận tốc góc (hình 5.2), công suất tua bin (hình 5.3) và công suất máy phát (hình 5.4). Qua từng đồ thị, có thể nhận thấy rõ sự cải thiện về hiệu suất và khả năng đáp ứng của thuật toán FLC so với phương pháp truyền thống. Để làm rõ hơn những ưu điểm cũng như hạn chế của từng phương pháp, phần tiếp theo sẽ đi sâu phân tích chi tiết các đồ thị đã trình bày ở trên, bao gồm, vận tốc góc, công suất tua bin và công suất máy phát.



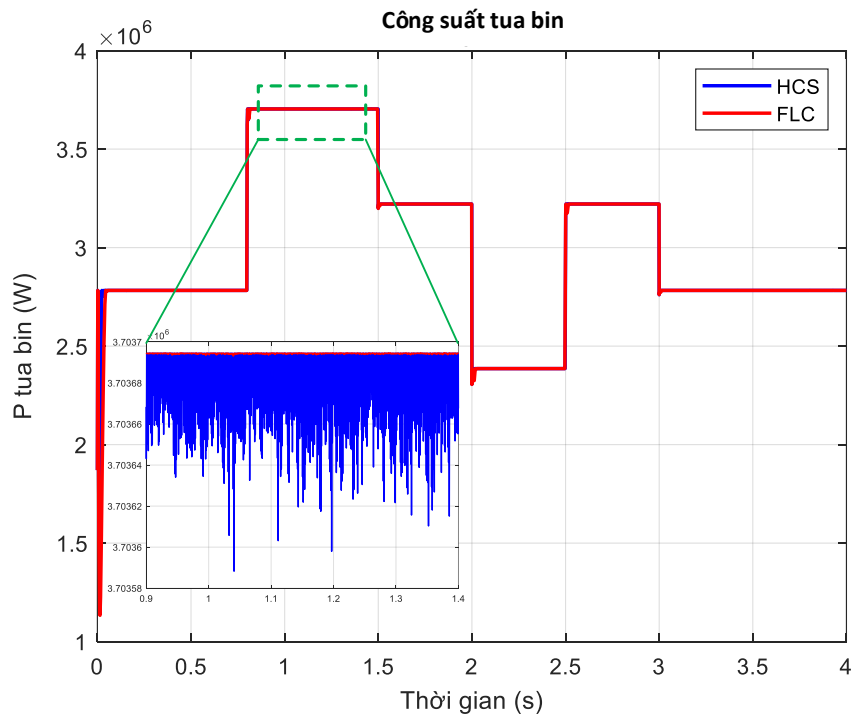
Hình 5.2 So sánh tốc độ rotor

Quan sát đồ thị tốc độ rotor (hình 5.2) cho thấy, tại các thời điểm vận tốc gió thay đổi đột ngột, cả hai thuật toán đều đảm bảo hệ thống bám theo giá trị tham chiếu với thời gian đáp ứng nhanh. Tuy nhiên, mức độ dao động tốc độ rotor khi sử dụng thuật toán cải tiến (FLC) thấp hơn rõ rệt so với phương pháp truyền thống (HCS). Điều này thể hiện khả năng giảm dao động và nâng cao độ ổn định của hệ thống khi áp dụng thuật toán FLC.

Một điểm cần lưu ý là trong quá trình mô phỏng, bước nhảy lớn nhất của thuật toán FLC đã được lựa chọn bằng với bước nhảy của phương pháp truyền thống. Nhờ đó, đáp ứng của hệ thống khi vận tốc gió biến thiên đột ngột ở cả hai trường hợp đều gần như tương đồng về tốc độ bám giá trị mới. Tuy nhiên, ưu điểm nổi bật của thuật toán FLC vẫn được thể hiện ở việc giảm biên độ dao động của tốc độ rotor, góp phần nâng cao chất lượng điều khiển và giảm ảnh hưởng tiêu cực lên các thành phần cơ khí của hệ thống. Để đánh giá rõ hơn tác động của các thuật toán đến hiệu suất làm việc của hệ thống, phần tiếp theo sẽ phân tích các đồ thị hệ số hiệu suất C_p và công suất tua bin P .



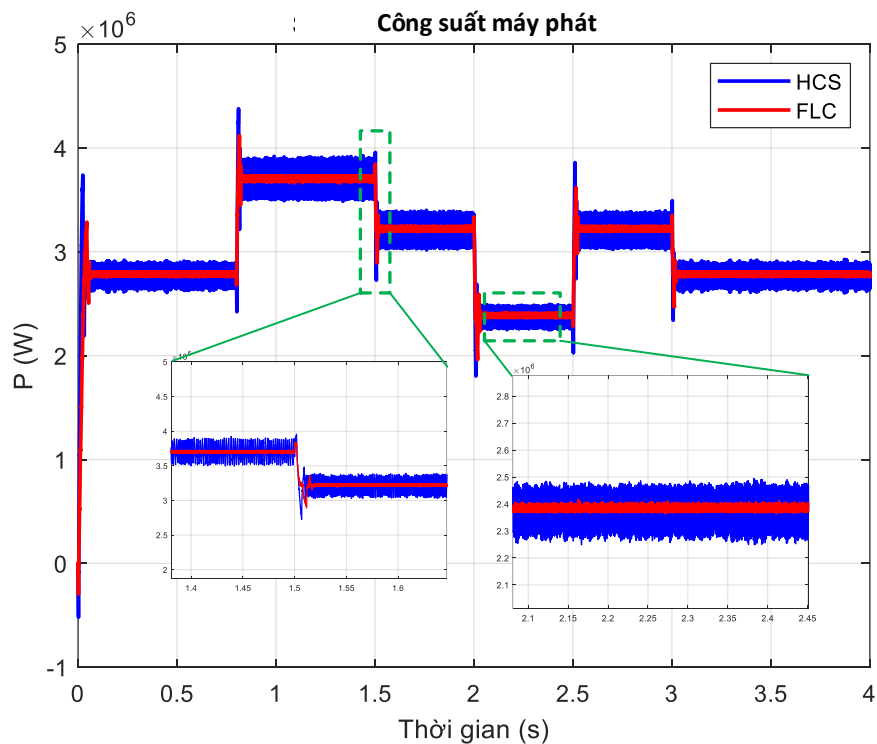
Hình 5.3 So sánh hệ số hiệu suất C_p



Hình 5.4 So sánh công suất tua bin P

Quan sát các đồ thị hệ số hiệu suất C_p (hình 5.3) và công suất tua bin P (hình 5.4) cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa hai thuật toán điều khiển. Với phương pháp HCS, tổn hao công suất thu được từ gió là khá lớn, thể hiện qua việc giá trị C_p thường xuyên thấp hơn so với khi sử dụng phương pháp FLC. Điều này đồng nghĩa với việc hệ thống chưa khai thác tối ưu nguồn năng lượng gió sẵn có. Đặc biệt, khi xét đến dao động công suất của tua bin, có thể thấy thuật toán truyền thống gây ra các dao động rất lớn, với biên độ dao động của công suất tua bin nằm trong khoảng từ 700 W đến 1000 W. Ngược lại, khi áp dụng thuật toán cải tiến, biên độ dao động này giảm đáng kể, chỉ còn dao động trong khoảng 20 W đến 50 W. Sự ổn định này không chỉ giúp hệ thống vận hành trơn tru hơn mà còn giảm thiểu tổn thất năng lượng trong quá trình chuyển đổi.

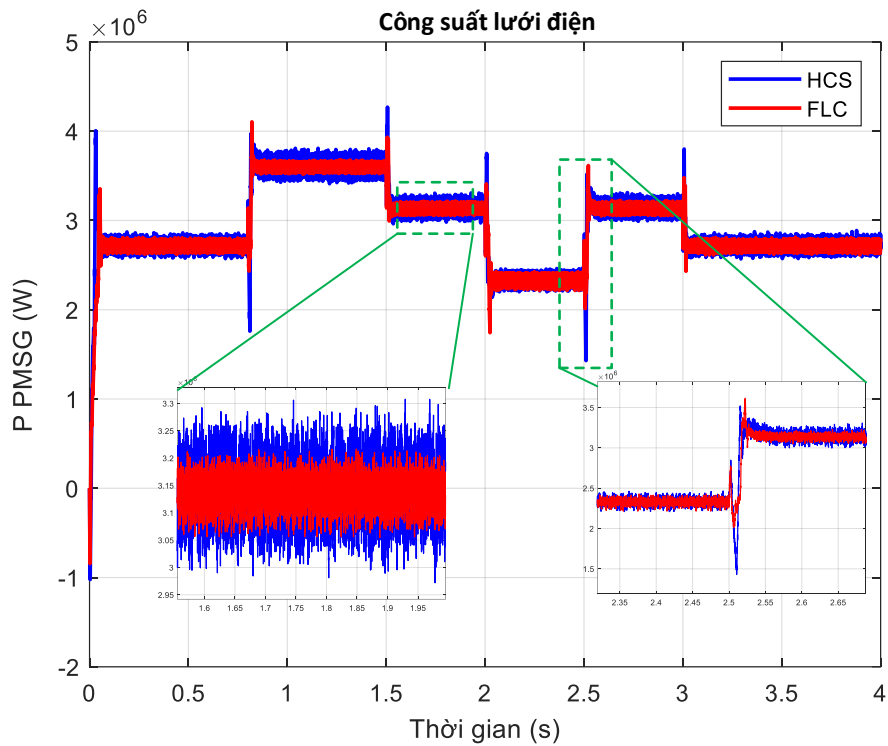
Việc công suất tua bin dao động mạnh khi sử dụng thuật toán truyền thống sẽ tác động trực tiếp đến đầu ra của công suất máy phát, làm cho công suất phát ra cũng trở nên kém ổn định. Để đánh giá rõ hơn ảnh hưởng này, phần tiếp theo sẽ phân tích chi tiết các đồ thị công suất máy phát.



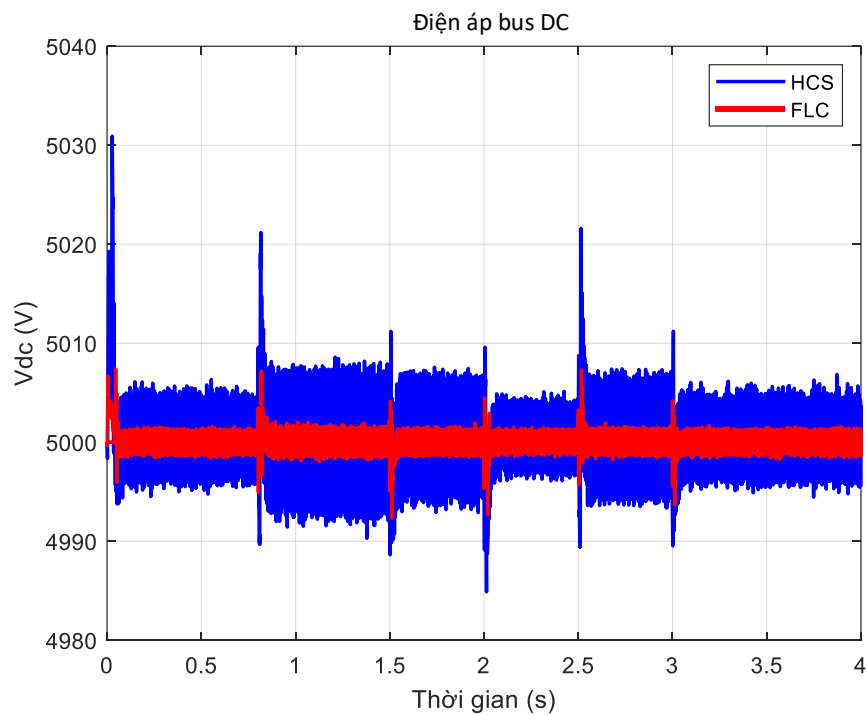
Hình 5.5 So sánh công suất máy phát

Đồ thị công suất máy phát (hình 5.5) cho thấy sự khác biệt rõ rệt về mức độ ổn định giữa hai thuật toán điều khiển. Khi sử dụng phương pháp HCS, công suất máy phát xuất hiện các dao động khá lớn, phản ánh trực tiếp từ sự dao động mạnh của công suất tua bin ở phần trước. Ngược lại, với thuật toán MPPT cải tiến, công suất máy phát duy trì

ổn định hơn, biên độ dao động nhỏ, thể hiện khả năng kiểm soát tốt hơn và giảm thiểu các biến động không mong muốn trong suốt quá trình vận hành.



Hình 5.6 So sánh công suất lưới điện



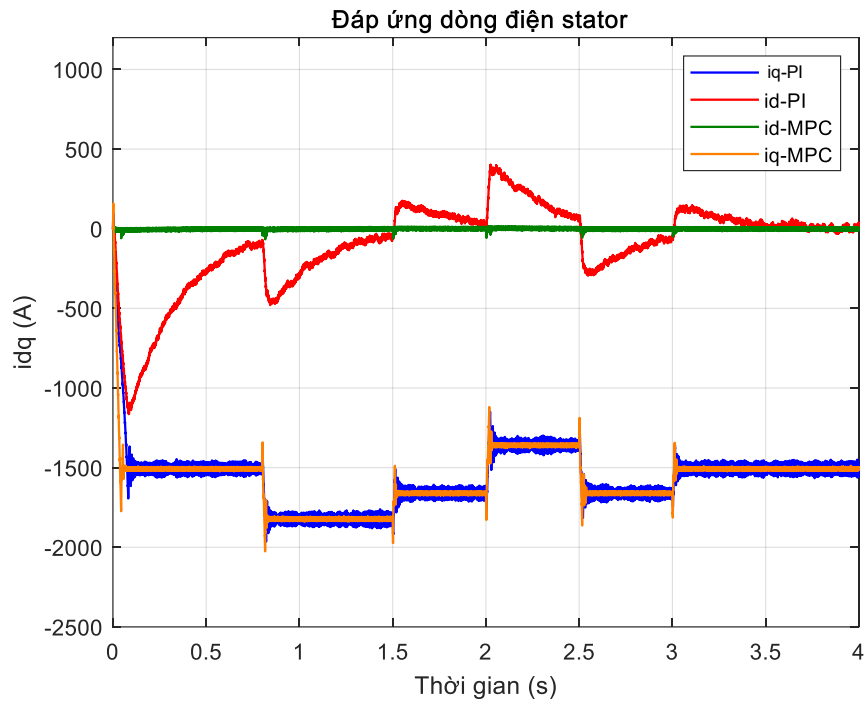
Hình 5.7 So sánh điện áp bus DC

So sánh đồ thị công suất lưới điện (hình 5.6) của hai phương pháp cho thấy, thuật toán cải tiến cũng giúp giảm đáng kể biên độ dao động công suất hòa lưới so với phương pháp truyền thống. Vì độ chênh lệch công suất lưới điện và công suất máy phát ảnh hưởng đến độ ổn định của điện áp bus DC. Nên khi công suất máy phát ổn định, lượng công suất điều động hòa lưới cũng dễ dàng duy trì trạng thái ổn định hơn, hạn chế được các dao động không mong muốn. Từ đó, điện áp bên phía bus DC sẽ dao động ít hơn, ta có thể thấy rõ ràng ở hình 5.7 rằng với phương pháp điều khiển cải tiến, điện áp DC dao động ít hơn đáng kể so với phương pháp truyền thống. Góp phần đảm bảo vận hành an toàn và tin cậy cho toàn hệ thống.

5.2. So sánh phương pháp MPC và PI

Để đánh giá phương pháp MPC, nhóm sẽ tiến hành so sánh kết quả với phương pháp PI. Với các tiêu chí về omega, dòng điện stator, công suất máy phát. Các đồ thị dưới đây thể hiện rõ sự vượt trội của phương pháp MPC so với PI.

Trước hết, ràng buộc giữa dòng điện i_d và i_q được MPC đảm bảo tốt hơn so với PI. Điều này thể hiện ở việc các giá trị i_d và i_q của MPC luôn duy trì trong giới hạn cho phép, trong khi với PI, các ràng buộc này đôi khi bị vi phạm trong quá trình quá độ. Cụ thể là tại thời điểm 0.8 s, 1.5 s, 2 s, 2.5 s và 3 s; $i_{s,q}$ bám theo giá trị đặt từ bộ điều khiển tốc độ nhưng dòng quá độ $i_{s,d}$ xảy hiện tượng quá điều chỉnh với các biên độ lần lượt là 1200A, -460A, 200A, 450A, -250A, và 135A. Tổng bình phương dòng điện stator tại các thời điểm có quá điều chỉnh đều tăng lớn vượt dòng điện giới hạn là 3000A khi dùng phương pháp PI. So với phương pháp MPC thì ràng buộc được đảm bảo với $i_{s,d}$ luôn giữ quanh ở mức 0A khi tốc độ gió có thay đổi. Việc kiểm soát tốt các ràng buộc giúp hệ thống tránh bị hiện tượng quá dòng, quá nhiệt và đảm bảo vận hành an toàn, ổn định hơn.

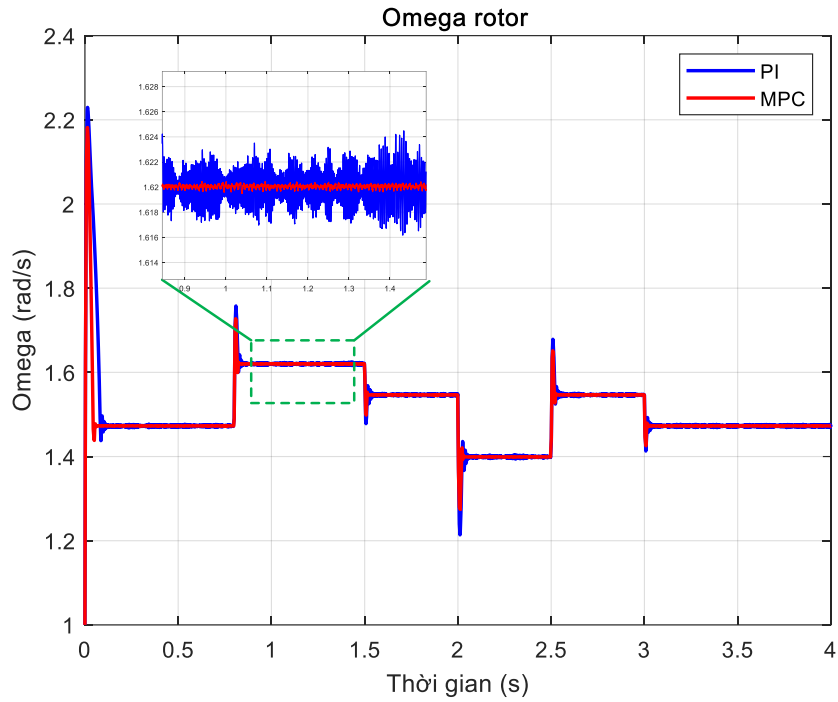


Hình 5.8 So sánh đáp ứng dòng điện

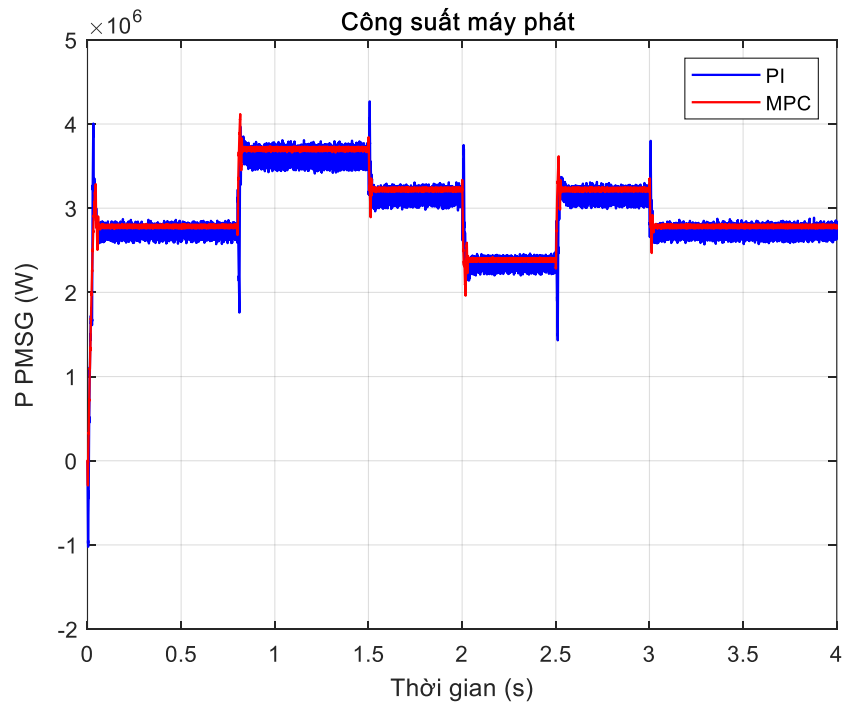
Bảng 5.3 Tiêu chí của bộ điều khiển

	PI	MPC
Thời gian xác lập	0.15	0.06
Độ vọt lố	18.5%	6.9%
Sai số xác lập	2.6%	1.2%
Thời gian tăng	0.03	0.004

Tiếp theo, mức độ dao động khi sử dụng bộ điều khiển MPC nhỏ hơn so với khi sử dụng bộ điều khiển PI. Cụ thể, dòng điện i_q khi sử dụng MPC dao động ít hơn rõ rệt so với khi dùng PI. Nhờ đó, mô-men điện từ (T_e) cũng dao động ít hơn, giúp giảm thiểu các biến động cơ học trong hệ thống. Hệ quả của việc T_e dao động ít hơn là tốc độ quay của rotor (ω_r) cũng ổn định hơn khi sử dụng MPC. Điều này rất quan trọng vì tốc độ rotor ổn định sẽ giúp công suất phát ra của máy phát ít dao động hơn, từ đó nâng cao chất lượng điện năng (hình).

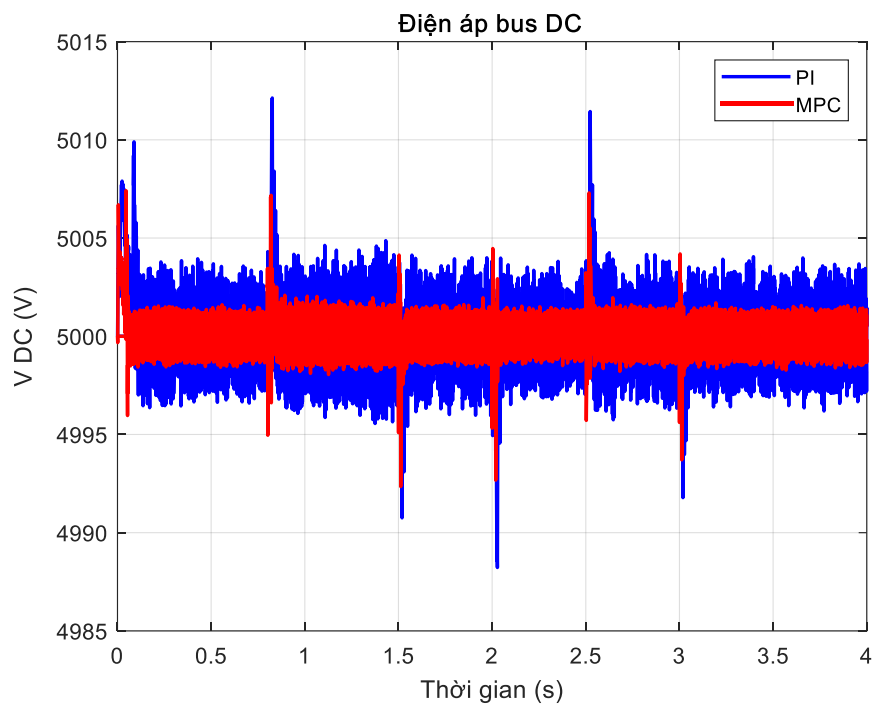


Hình 5.9 So sánh tốc độ rotor



Hình 5.10 So sánh công suất máy phát

Cuối cùng, điện áp bus DC cũng được cải thiện khi sử dụng MPC. Do công suất máy phát dao động ít hơn, điện áp bus DC cũng ổn định hơn, giảm thiểu các biến động không mong muốn trên lưới điện.



Hình 5.11 So sánh điện áp bus DC

KẾT LUẬN

- Kết luận:

Đề tài nghiên cứu đã hoàn thành mục tiêu nghiên cứu, qua đó chứng minh và khẳng định hiệu quả của việc ứng dụng các giải pháp điều khiển hiện đại để nâng cao chất lượng cho hệ thống phát điện gió PMSG. Thông qua kết quả mô phỏng, nghiên cứu đã cho thấy rõ ràng sự vượt trội của bộ điều khiển Logic mờ so với phương pháp Leo đòi truyền thống trong việc tối ưu hóa công suất thu được. FLC không chỉ giúp hệ thống bám điểm công suất cực đại nhanh chóng mà còn giảm thiểu đáng kể dao động công suất, giúp tối đa hóa sản lượng và giảm tải cơ khí lên hệ thống. Song song đó, phương pháp Điều khiển dự báo mô hình cũng thể hiện ưu thế vượt trội so với bộ điều khiển PI kinh điển trong việc điều khiển máy phát. MPC đã chứng tỏ khả năng xử lý hiệu quả các ràng buộc vật lý của hệ thống, đặc biệt là ngăn chặn thành công hiện tượng quá dòng khi vận hành, qua đó nâng cao độ an toàn, tin cậy và chất lượng điện năng cung cấp cho lưới. Nhìn chung, nghiên cứu đã thành công trong việc khẳng định các thuật toán FLC và MPC là những lựa chọn hiệu quả, cần thiết để cải thiện cả về mặt kỹ thuật lẫn kinh tế cho các hệ thống điện gió PMSG hiện đại.

- Hướng phát triển

Trên cơ sở các kết quả đã đạt được, hướng phát triển trong tương lai của đề tài cần tập trung vào việc đưa các thuật toán vào ứng dụng thực tế và giải quyết các thách thức ở cấp độ hệ thống. Bước đi hợp lý đầu tiên là kiểm chứng các bộ điều khiển trên nền tảng mô phỏng phần cứng trong vòng lặp để đánh giá độ tin cậy trước khi triển khai thực nghiệm. Đồng thời, để hệ thống thông minh và thích ứng hơn nữa, có thể nghiên cứu ứng dụng Học tăng cường cho bài toán MPPT, cho phép tuabin tự học và tối ưu hóa theo sự thay đổi của môi trường và chính bản thân thiết bị theo thời gian. Ở quy mô lớn hơn, việc nghiên cứu các chức năng hỗ trợ lưới là tối quan trọng, đặc biệt là khả năng vượt qua sự cố sụt áp (LVRT) thông qua chiến lược điều khiển phối hợp giữa hai bộ biến đổi. Hơn thế nữa, để giải quyết các vấn đề phức tạp như hiện tượng sụt tần số thứ cấp khi cung cấp quán tính ảo, việc tích hợp hệ thống lưu trữ năng lượng (BESS) và xây dựng thuật toán điều khiển phối hợp là một hướng đi đầy hứa hẹn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] seho, "Ảnh hưởng của thủy điện đến môi trường," seho.vn, 27 07 2022. [Online]. Available: <https://seho.vn/tintuc/nhung-anh-huong-cua-thuy-dien-den-moi-truong-sinh-thai/>. [Accessed 12 06 2024].
- [2] T. G. Institute, "Energy for Everyone: What is Energy Equity and How Do We Achieve It?," The Greenlining Institute, 2022. [Online]. Available: <https://greenlining.org/2022/energy-for-everyone-what-is-energy-equity-and-how-do-we-achieve-it/>.
- [3] V. K. h. K. t. T. v. v. B. đ. k. hậu, "Báo cáo tiềm năng gió, sóng ngoài khơi tại các vùng biển Việt Nam," IMHEN, 27 3 2022. [Online]. Available: <https://imh.ac.vn/bao-cao-tiem-nang-gio-song-ngoai-khoi-tai-cac-vung-bien-viet-nam>.
- [4] N. h. T. g. t. V. Nam, "Chiến lược phát triển ngành điện: Quản lý tăng trưởng và cải cách," tailieudientu.lrc.tnu.edu.vn, 2006. [Online]. Available: https://tailieudientu.lrc.tnu.edu.vn/Upload/Collection/brief_50979_54726_2322_016134542chienluocphattriennganhdien.pdf.
- [5] N. V. Đoàn, "Nghiên cứu tổng quan về tuabin gió và các yếu tố ảnh hưởng đến sản lượng điện của tuabin," *Tạp chí Khoa học Lạc Hồng*, pp. 21-25, 2017.
- [6] B. T. Minh, "Nhu cầu, giải pháp phát triển năng lượng tái tạo ở Việt Nam hướng đến tăng trưởng bền vững," Lao Động, 2024. [Online]. Available: <https://laodong.vn/kinh-doanh/nhu-cau-giai-phap-phat-trien-nang-luong-tai-tao-o-viet-nam-huong-den-tang-truong-ben-vung-1514538.ldo>.
- [7] PetroTimes, "Năng lượng gió tại Việt Nam: Tiềm năng và thách thức," 08 08 2024. [Online]. Available: <https://petrotimes.vn/nang-luong-gio-tai-viet-nam-tiem-nang-va-thach-thuc-715571.html>.

- [8] B. C. T. Cục Điện lực và Năng lượng tái tạo, "Báo cáo tình hình thực hiện năm 2023 – Chiến lược phát triển năng lượng tái tạo Việt Nam đến năm 2030, tầm nhìn 2050," Bộ Công Thương, Hà Nội, 2024.
- [9] C. p. V. Nam, "TOÀN VĂN: Quy hoạch điện VIII," 18 5 2023. [Online]. Available: <https://xaydungchinh sach.chinhphu.vn/toan-van-quy-hoach-phat-trien-dien-luc-quoc-gia-11923051616315244.htm>.
- [10] ThuyVy, "Năng lượng gió là gì? Kiến thức chi tiết nhất về năng lượng gió," 12 6 2021. [Online]. Available: <https://dakiatech.com/nang-luong-gio-la-gi-kien-thuc-ve-nang-luong-gio/>.
- [11] E. Academia, "Wind Turbine Parts and Functions," Electrical Academia, 2024. [Online]. Available: <https://electricalacademia.com/renewable-energy/wind-turbine-parts-functions/>.
- [12] R. I. Amirnaser Yazdani, "Variable-Speed Wind-Power," in *Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications*, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [13] M. B. J. F. C. Seifeddine Benelghali, "DFIG versus PMSG for marine current turbine applications," *Journal of Renewable Energies*, vol. 15, no. 1, 2012.
- [14] R. I. Amirnaser Yazdani, "Variable-Frequency VSC System," in *Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications*, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [15] R. H. Park, "Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part I," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 48, no. 3, pp. 716-727, 1929.
- [16] M. B. H. L. S. Omessaad Elbeji, "PMSG Wind Energy Conversion System: Modeling and Control," *International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application*, vol. 3, no. 3, 2014.

- [17] R. I. Amirnaser Yazdani, "Controlled-Frequency VSC System," in *Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications*, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [18] N. R. B. Ramji Tiwari, "Recent developments of control strategies for wind energy conversion system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 268-285, 2016.
- [19] J. C. C. G. Jiawei Chen, "New Overall Power Control Strategy for Variable-Speed Fixed-Pitch Wind Turbines Within the Whole Wind Velocity Range," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, p. 2652–2660, 2013.
- [20] K. C. Dipesh Kumar, "A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 957-970, 2016.
- [21] A. C. M. R. A. K. C. Patsios, "A comparison of maximum-power-point tracking control techniques for low-power variable-speed wind generators," in *2009 8th International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric Drives Joint Symposium*, Lille, France, 2009.
- [22] K. K. E. Koutroulis, "Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, p. 486–494, 2006.
- [23] A. H. V. O. B. Meisam Shirazi, "A comparative study of maximum power extraction strategies in PMSG wind turbine system," in *2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference*, Montreal, QC, Canada, 2009.
- [24] L. C. Quincy Wang, "An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp. 1242-1249, 2004.
- [25] H. L. G. Shravana Musunuri, "A fast maximum power extraction algorithm for wind energy systems," in *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, MI, USA, 2011.

- [26] A. Y. C. W. T. Majid A. Abdullah, "A study of maximum power point tracking algorithms for wind energy system," in *2011 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CET)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2011.
- [27] A. K. M. K. D. A. K. Saeed Heshmatian, "Fuzzy logic based MPPT for a Wind Energy Conversion System using Sliding Mode Control," in *2017 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC)*, Mashhad, Iran, 2017.
- [28] P. M. J. K. W. P. Oscar Castillo, "Type-2 Fuzzy Logic: Theory and Applications," in *2007 IEEE International Conference on Granular Computing*, Fremont, CA, USA, 2007.
- [29] E. Kozlovska, "Basic principles of fuzzy logic," 1 8 2012. [Online]. Available: <https://access.fel.cvut.cz/rservicef19b.html?akce=tisk&cisloclanku=2012080002>
- [30] A. M. A. M. El-SebaII, "Sensorless MPPT Technique for Grid-Connected PMSG Wind Turbine," Alexandria, 2014.
- [31] F. (. Blaabjerg, *Control of Power Electronic Converters and Systems: Volume 3*, Academic Press, 2018.
- [32] R. I. Amirnaser Yazdani, "Grid-Imposed Frequency VSC," in *Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications*, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [33] N. Huang, "Simulation of power control of a wind turbine permanent magnet synchronous generator system," 2013.
- [34] N. V. Q. Bình, *Truyền động điện hiện đại*, Đà Nẵng, 2025.
- [35] A. Bemporad, "Model Predictive Control Design: New Trends and Tools," in *45th IEEE Conference on Decision and Control*, San Diego, 2006.
- [36] Schwenzer, M., Ay, M., Bergs, T. et al, "Review on model predictive control: an engineering perspective," in *Int J Adv Manuf Technol 117*, 2021.

- [37] S. Chai, L. Wang and E. Rogers, "Cascade model predictive control of a PMSM with periodic disturbance rejection," in *Australian Control Conference*, Melbourne, VIC, Australia,, 2011.
- [38] D. B. A. B. a. S. L. G. Cimini, "Online model predictive torque control for Permanent Magnet Synchronous Motors," in *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology*, Seville, Spain,, 2015.
- [39] L. Wang, *Model predictive control system design and implementation using MATLAB (Vol. 3)*, London: Springer, 2009.
- [40] S. B. a. C. D. M. Preindl, "Model Predictive Torque Control with PWM using fast gradient method," in *Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Long Beach, CA, USA, 2013.
- [S. B. L. P. a. M. Z. S. Bolognani, "Design and Implementation of Model
41] Predictive Control for Electrical Motor Drives," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009.

DANH SÁCH ĐỀ TÀI THAM DỰ HỘI NGHỊ SINH VIÊN NCKH KHOA ĐIỆN NĂM HỌC 2024-2025
NGÀY 29/3/2025

TT	Tên đề tài	Sinh viên chịu trách nhiệm chính (Số điện thoại, Email)	Nhóm sinh viên thực hiện	Lớp	Giảng viên hướng dẫn (Ghi đây đủ học hàm học vị)	Đạt giải
1.	Nghiên cứu và thiết kế cấu trúc bộ chuyển đổi DC-DC mới với hệ số khuếch đại điện áp cao sử dụng cuộn cảm ghép	Hồ Xuân Khánh 0356369826 105200304@sv1.dtu.udn.vn	Hồ Xuân Khánh Phạm Dương Thạch Hoàng Ngọc Sơn Nguyễn Hữu Đạt Phan Tấn Đăng Khôi	20TDH1 20TDH1 22TDH2 22TDH2 22TDH2	TS. Trần Thái Anh Âu	Giải Nhì
2.	Bộ biến đổi DC-DC hai chiều	Phạm Ngọc Linh 0764746690 1052005000@sv1.dtu.udn.vn	Phạm Ngọc Linh Nguyễn Anh Quốc Nguyễn Tuấn Thành Phạm Tuấn Tài Trương Anh Nhì	20TDHCLC4 20TDHCLC4 22TDH1 22TDH1 22TDH1	TS. Trần Thái Anh Âu	

3.	Thiết kế, chế tạo đèn đèn giao thông di động ứng dụng công nghệ IOT và năng lượng mặt trời	Võ Quốc Đạt 0356672250 105220337@sv1.dut.udn.vn	Võ Quốc Đạt Phạm Duy Vũ Đặng Bảo Chiến Bùi Thái Phước	22TDH3 22TDH3 22TDH3 22TDH3	ThS. Nguyễn Quang Tân	Giải Khuyến kích
4.	Nâng cao độ chính xác của dự báo công suất phát điện mặt trời áp mái	Nguyễn Ngọc Khánh 0845500105 105210038@sv1.dut.udn.vn	Nguyễn Ngọc Khánh Phạm Việt Hoàng Phan Quốc Trung Nguyễn Văn Phước Cao Thế Anh	21TDH1 21TDH1 21TDH1 21TDH1 21TDH1	TS. Nguyễn Thị Thanh Quỳnh	
5.	Dự báo công suất phát năng lượng tái tạo hướng đến tối ưu hoá chi phí vận hành đa lưới điện siêu nhỏ bằng phương pháp thông minh	Vân Trọng Nhân 0931952714 105200170@sv1.dut.udn.vn	Vân Trọng Nhân Nguyễn Thị Cát Tường Nguyễn Hồng Duy An	20DCLC1 20DCLC4 20DCLC2	PGS.TS. Dương Minh Quần	Giải Nhì
6.	Nghiên cứu thuật toán điều khiển hợp tác cho hệ thống nhiều AGV (automated guided vehicle)	Nguyễn Văn Hậu 0359760715 105200330@sv1.dut.udn.vn	Nguyễn Văn Hậu Lê Hữu Khang	20TDH2 20TDH2	TS. Trần Thị Minh Dung	
7.	Chẩn đoán lỗi và đánh giá tình trạng của đầu cách điện máy biến áp dụng kỹ thuật học máy	Lê Huy Hoàng 0865056584 105200406@sv1.dut.udn.vn	Lê Huy Hoàng Phùng Bá Tú	20TDHCLC2 20TDHCLC3	TS. Nguyễn Kim Anh	Giải Ba
8.	Xây dựng mô hình ước lượng hiệu suất của hệ thống điện mặt trời ứng dụng trí tuệ nhân tạo	Đoàn Ngọc Bảo 105200410@sv1.dut.udn.vn	Đoàn Ngọc Bảo Ngô Minh Hiến Nguyễn Ngọc Khai Trình Hoàng Khoa Đỗ Đoàn Tuấn Hưng	20TDHCLC2 20TDHCLC2 20TDHCLC2 20TDHCLC2 20TDHCLC2	TS. Nguyễn Kim Anh	
9.	Nghiên cứu và phát triển bộ điều khiển tốc độ không cảm biến cho truyền động động cơ PMSM bằng thuật toán FOC kết hợp bộ quan sát trượt trên nền tảng FPGA	Hà Đức Phi 0765378801 haducphi246@gmail.com	Hà Đức Phi Lê Phú Vũ Phan Minh Tuấn Nguyễn Hữu Anh Quân Phạm Ngọc Linh	21TDH1 21TDH1 21TDH1 21TDH2 20TDHCLC4	TS. Nguyễn Khánh Quang	Giải Ba

10.	Xây dựng hệ thống giám sát bức xạ và các tham số của môi trường từ xa phục vụ cho việc ước lượng công suất điện mặt trời	Ngô Minh Hiền, 0353 274090 105200404@sv1.dut.udn.vn	Ngô Minh Hiền Đoàn Ngọc Bảo Nguyễn Ngọc Khai Trịnh Hoàng Khoa Đỗ Đoàn Tuấn Hùng	20TDHCLC2 20TDHCLC2 20TDHCLC2 20TDHCLC2 20TDHCLC2	TS. Nguyễn Khánh Quang	
11.	Nghiên cứu thuật toán điều khiển tối ưu dòng công suất của hệ thống điện gió	Nguyễn Đức Đức 0987554047 105210081@sv1.dut.udn.vn	Nguyễn Đức Đức Đỗ Như Hưng Lê Nguyễn Chương Trần Công Tân	21TDHCLC1 21TDHCLC1 21TDHCLC1 21TDHCLC1	TS. Giáp Quang Huy	
12.	Quy hoạch hệ thống để đánh giá khả năng cung cấp điện và phát triển nguồn	Trương Kim Thắng 07777560790 105200177@sv1.dut.udn.vn	Trương Kim Thắng Lê Văn Tiến Lê Hữu Quốc Anh	20DCLC1 20DCLC1 20DCLC2	TS. Lê Hồng Lâm	
13.	Nghiên cứu mô hình toán tối đa lợi nhuận cho công ty bán lẻ trong thị trường điện bán lẻ cạnh tranh	Trần Minh Thành 0971872876 Tranhanh05032002@gmail.com	Trần Minh Thành Hoàng Đức Biên	20D1 20D2	TS. Lê Hồng Lâm	Giải Ba
14.	Đánh giá ảnh hưởng của trạm sạc xe điện đến chất lượng điện năng của lưới điện phân phối	Trần Kim Nhật 0949007025 105200137@sv1.dut.udn.vn	Trần Kim Nhật	20D2	TS. Trịnh Trung Hiếu	Giải Khuyến khích
15.	Nghiên cứu chế tạo robot 4 DoF kê chi sơn đường bộ ứng dụng thị giác máy tính	Lê Văn Quý Thới 0373421392 lehoi1603@gmail.com	Lê Văn Quý Thới Trương Ngọc Bình Nguyễn Minh Duyên Nguyễn Đăng Nhật Trung Nguyễn Trần Văn Vũ	21TDHCLC1 21TDHCLC1 21TDHCLC1 21TDHCLC1 21TDHCLC1	TS. Nguyễn Hoàng Mai	

16.	Ứng dụng điều khiển trượt cho hệ thống tuabin gió sử dụng PMSG	Nguyễn Thế Quân 0949205833 105200465@sv1.dut.udn.vn	Nguyễn Thế Quân Trương Quang Vũ Trần Nguyễn Khánh	20TDHCLC3 20TDHCLC2 21TDHCLC2	TS. Trương Thị Bích Thanh	
17.	Ứng dụng thuật toán thích nghi PID cho điều khiển quán tính ảo	Trương Quang Vũ 0935388071 105200440@sv1.dut.udn.vn	Trương Quang Vũ Nguyễn Minh Duyên	20TDHCLC2 21TDHCLC1	TS. Nguyễn Văn Tân	
18.	Thiết bị IoT tích hợp công nghệ LoRaWan quản lý chất lượng điện năng của nhà máy theo thời gian thực	Phùng Hữu Gia Hưng 0773088445 105210084@sv1.dut.udn.vn	Phùng Hữu Gia Hưng Phan Lê Văn Luy Nguyễn Trần Văn Vũ	21TDHCLC1 21TDHCLC1 21TDHCLC1	TS. Ngô Đình Thanh	
19.	Characteristics output of a photovoltaic cell under normal and partial shading conditions	Trần Văn Quốc 105210211@sv1.dut.udn.vn	Trần Văn Quốc Nguyễn Nhật Hữu Lương Thành Nhon	21DCLC2 22D4 22D1	TS. Nguyễn Hồng Việt Phuong	
20.	Mô hình để xuất xác định các vùng đầu thầu trong thị trường điện dựa trên giá biến tại vị trí và các thuật toán phân cụm	Trần Nguyễn Thu Trang 0856405724 105200182@sv1.dut.udn.vn	Trần Nguyễn Thu Trang Lê Trọng Minh Đức Nguyễn Hải Đức	20DDCLC1 20DDCLC1 20DDCLC3	TS. Lê Hồng Lâm	
21.	Nghiên cứu và thiết kế hệ thống điều khiển giám sát xe tự hành AGV ứng dụng thuật toán SLAM trong xác định tọa độ và điều hướng vị trí	Nguyễn Duy An 0376020524 105200353@sv1.dut.udn.vn	Nguyễn Duy An Nguyễn Ngọc Kiên Lý Văn Thương	20TDHCLC1 20TDHCLC3 20TDHCLC3	TS. Ngô Đình Thanh	Giải Khuyến khích

22.	Ứng dụng điều khiển trượt quan sát để theo dõi điểm công suất cực đại MPPT cho hệ pin mặt trời	Trần Nguyễn Khánh 0935769055 tramnguyengkhanh1608@gmail.com	Trần Nguyễn Khánh Phùng Hữu Gia Hưng Trương Quang Vũ	21TDHCLC2 21TDHCLC1 20TDHCLC2	TS. Nguyễn Văn Tân	
23.	Nghiên cứu thuật toán dự báo công suất nhà máy điện mặt trời	Phùng Quốc Khánh 0928736246 105200497@sv1.dut.udn.vn	Phùng Quốc Khánh	20TDHCLC4	TS. Nguyễn Thị Kim Trúc	
24.	Hệ thống hỗ trợ chẩn đoán bệnh hô hấp bằng AI tích hợp xử lý hình ảnh, âm thanh và trợ lý sức khỏe số	Nguyễn Quốc Hiến 0964480852 quochienhl@gmail.com	Nguyễn Quốc Hiến Nguyễn Văn Viên	20TDHCLC4 20TDH1	TS. Nguyễn Thị Kim Trúc	Giải Nhất
25.	Nghiên cứu và thiết kế mô phỏng băng tải đa hướng	Hoàng Việt Thắng 0787311799 Vietthang7122002@gmail.com	Hoàng Việt Thắng Nguyễn Hữu Trung Nguyễn Phú Toàn	20TDHCLC1 20TDHCLC1 20TDHCLC1	TS. Trần Thị Minh Dung	Giải Khuyến khích
26.	Ứng dụng công nghệ xử lý ảnh trong thiết kế từ thuốc thông minh phục vụ cho các bệnh viện	Mai Văn Hiếu 0971249827 105210370@sv1.dut.udn.vn	Mai Văn Hiếu Lê Hữu Bảo Thuận Lê Thị Thu Nguyễn Huỳnh Gia Bảo	21TDHCLC2 21CDTCLC2 22TDH1 22TDH3	TS. Nguyễn Hồ Sĩ Hùng	
27.	Nghiên cứu và xây dựng hệ thống giám sát tự động đàn báo an toàn tại bể bơi qua camera giám sát	Hồ Tuấn Phong 0368137168 105200375@sv1.dut.udn	Hồ Tuấn Phong Trần Gia Linh Nguyễn Cao Huỳnh	20TDHCLC1 20TDHCLC1 20TDHCLC1	TS. Nguyễn Thị Kim Trúc	
28.	Nghiên cứu và chế tạo hệ thống xử lý rác thải sử dụng robot delta và công nghệ xử lý ảnh	Lưu Chí Cường 0703748734 luucuongl306@gmail.com	Nguyễn Cao Huỳnh Phan Phúc Tài Lưu Chí Cường	20TDHCLC1 20TDHCLC1 20TDHCLC1	TS. Nguyễn Thị Kim Trúc	

29.	Nghiên cứu và xây dựng hệ thống tự động phát hiện khói lửa qua camera giám sát	Phan Thanh Huy 0385448427 105200495@sv1.dut.udn.vn	Phan Thanh Huy Nguyễn Kim Hoàng	20TDHCLC4 20TDHCLC4	TS. Nguyễn Thị Kim Trúc	
30.	Nghiên cứu và phát triển thuật toán phát hiện khuyết tật trên bề mặt mạch in (PCB) sử dụng phương pháp học sâu	Hoàng Xuân Phát 0932403248 binhoang2001dn@gmail.com	Hoàng Xuân Phát Vũ Văn Duy	19TDHCLC4 19TDHCLC2	TS. Nguyễn Thị Kim Trúc	
31.	Ứng dụng Artificial Neural Networks đa tầng và BIGRU với kết hợp tính năng Cross Self-Attention cho chẩn đoán lỗi vòng bi	Lưu Mạnh Tiến 0946980318 luumanh tien26122002@gmail.com	Lưu Mạnh Tiến Nguyễn Anh Trung Nguyễn Thành Long	20D2 20DCLC2 20DCLC3	TS. Nguyễn Hồ Sĩ Hùng	
32.	Nghiên cứu ảnh hưởng của sóng hài đối với máy biến áp nguồn dựa trên phương pháp FEM	Trần Văn Lợi 0399110521 tvloi.elec.vn@gmail.com	Trần Văn Lợi Hồ Nguyễn Thảo Hồ Văn Trung	21D2 21D2 21D2	PGS. TS. Lê Đình Dương	
33.	Nghiên cứu hiệu suất và tính ổn định của hệ thống pin lưu trữ trong lưới điện cơ nguồn năng lượng tái tạo	Lê Văn Thành 0397896050 le138235@gmail.com	Lê Văn Thành Nguyễn Hoàng Nhân Trần Vinh Tường	21D2 21D2 21D2	TS. Nguyễn Thị Ái Nhi	
34.	Giải pháp lưu trữ năng lượng mặt trời kết hợp quang điện với công nghệ pin	Huỳnh Hồ Huy Hoàng 0973521159 105230188@sv1.dut.udn.vn	Huỳnh Hồ Huy Hoàng Khuông Anh Minh Lê Anh Khoa Phạm Gia Khánh	23D4 23D4 23D4 23TDH1	TS. Nguyễn Hồ Sĩ Hùng	
35.	Xây dựng mô hình suy thoái của thiết bị điện	Mai Vũ Phúc 0971514805 105230262@sv1.dut.udn.vn	Mai Vũ Phúc Phạm Tấn Quốc Tuấn Nguyễn Nho Minh Bảo Nguyễn Hoàng Phúc Nguyễn Gia Huy	23D5 23D5 23D2 23D1 23D2	TS. Nguyễn Hồ Sĩ Hùng	

36.	Đánh giá ảnh hưởng của Nhà máy điện ao dơi với các chế độ Vận hành Hệ thống điện	Vân Ngọc Quý 0945132357 quyngocvan1808@gmail.com	Vân Ngọc Quý Trần Văn Hai Nguyễn Trường Phước	20DDCLC2 20DDCLC3 20DDCLC3	PGS. TS. Lê Đình Dương	
37.	Nhận dạng và phân loại bệnh về Khối U Não (Brain Tumor)	Nguyễn Quốc Hiến 0964480852 quochienh1@gmail.com	Nguyễn Quốc Hiến Huỳnh Thái Bảo Đặng Nhật Huy	20TDHCLC4 20TDHCLC3 20TDHCLC3	TS. Trần Thị Minh Dung	
38.	Sử dụng thuật toán GAOA để tối ưu kết nối các turbine gió vào lưới điện phân phối	Phạm Minh Công (0357805215, 105200117@sv1.dtu.tdn.vn)	Phạm Minh Công Nguyễn Công Minh	20D2 20D2	PGS.TS. Phan Đình Chung	
39.	Xây dựng thuật toán hòa lưới bán tải cho hệ thống điện mặt trời tại Khu Công Nghiệp Thăng Long 2, Hưng Yên	Võ Văn Vũ (0905686290, 105200351@sv1.dtu.tdn.vn)	Võ Văn Vũ Lê Văn Thái Nguyễn Hữu Tuấn	20TDDH2 20TDHCLC4 20TDHCLC4	PGS.TS. Lê Tiến Dũng	
40.	Thiết kế hệ thống quản lý và giám sát năng lượng cho kho hàng Dana Logistics tại Đà Nẵng	Lê Ngọc Thành (0935334550, 105200514@sv1.dtu.tdn.vn)	Lê Ngọc Thành Trần Văn Vinh	20TDHCLC4 20TDHCLC4	PGS.TS. Lê Tiến Dũng	

KT. TRƯỞNG KHOA
PHÓ TRƯỞNG KHOA



PGS.TS. LÊ ĐÌNH DƯƠNG