

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI

NGUYỄN TRỌNG THẮNG

**NÂNG CAO HIỆU QUẢ SỬ DỤNG MÁY ĐIỆN
DỊ BỘ NGUỒN KÉP CHO HỆ THỐNG PHÁT
ĐIỆN ĐỒNG TRỤC TRÊN TÀU THỦY**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI- 2014

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI

NGUYỄN TRỌNG THẮNG

**NÂNG CAO HIỆU QUẢ SỬ DỤNG MÁY ĐIỆN DI BỘ NGUỒN KÉP
CHO HỆ THỐNG PHÁT ĐIỆN ĐỒNG TRỰC TRÊN TÀU THỦY**

Chuyên ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa
Mã số: 62.52.02.16

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

1: PGS.TS Nguyễn Tiến Ban

2: PGS.TS Nguyễn Thanh Hải

HÀ NỘI- 2014

LỜI CAM ĐOAN

Tác giả xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tác giả dưới sự hướng dẫn của **PGS.TS Nguyễn Tiến Ban** và **PGS.TS Nguyễn Thanh Hải**. Các số liệu, kết quả nêu trong luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tác giả

Nguyễn Trọng Thắng

LỜI CẢM ƠN

Lời đầu tiên tác giả xin chân thành cảm ơn sâu sắc tới thầy PGS.TS Nguyễn Tiến Ban và thầy PGS.TS Nguyễn Thanh Hải đã tâm huyết hướng dẫn tác giả hoàn thành luận án này.

Đặc biệt tác giả xin chân thành cảm ơn các thầy giáo, cô giáo khoa Điện-Điện tử, Phòng đào tạo Sau đại học trường Đại học Giao thông vận tải đã giúp đỡ và đóng góp nhiều ý kiến quan trọng để tác giả có thể hoàn thành luận án của mình.

Tác giả cũng xin cảm ơn sâu sắc tới thầy GS.TSKH Thân Ngọc Hoàn và thầy GS.TS Lê Hùng Lân luôn động viên, khích lệ, giúp đỡ và tạo mọi điều kiện để tác giả thực hiện thành công luận án này.

Tác giả xin chân thành cảm ơn Quỹ phát triển khoa học và công nghệ quốc gia-Bộ Khoa học và Công nghệ đã tài trợ kinh phí cho tác giả trình bày kết quả nghiên cứu tại hội nghị quốc tế IEEE-ICMA tổ chức tại Nhật Bản.

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC	iii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT	vi
DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU	ix
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ	x
MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN HỆ THỐNG PHÁT ĐIỆN ĐỒNG TRỤC TRÊN TÀU THỦY SỬ DỤNG MÁY ĐIỆN DỊ BỘ NGUỒN KÉP VÀ CÁC CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU LIÊN QUAN	5
1.1 Khái quát hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy	5
1.2 Các hệ thống phát điện đồng trục trong thực tế.....	8
1.2.1 Các cách bố trí máy phát đồng trục để lấy cơ năng từ máy chính	8
1.2.2 Các cấu trúc phần điện của máy phát đồng trục.....	10
1.3 Sơ đồ tổng quát hệ thống điều khiển máy phát điện đồng trục sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép.....	15
1.4 Tổng hợp các kết quả nghiên, ứng dụng DFIG trong hệ thống phát điện	16
1.4.1 Cấu trúc điều khiển tĩnh Scherbius.....	17
1.4.2 Điều khiển vector không gian.....	17
1.4.3 Điều khiển trực tiếp momen (direct torque control-DTC)	19
1.4.4 Điều khiển trực tiếp công suất (direct power control-DPC)	19
1.4.5 Cấu trúc điều khiển DFIG không cảm biến.....	20
1.4.6 Cấu trúc điều khiển DFIG không chổi than (Brushless- Doubly- Fed Induction Generator- BDFIG)	21
1.5 Các vấn đề còn tồn tại và đề xuất giải pháp, mục tiêu của luận án	21
1.6 Nội dung và phương pháp nghiên cứu của luận án	23
Nhận xét và kết luận chương 1	23

CHƯƠNG 2: ĐỀ XUẤT CẤU TRÚC PHÁT ĐIỆN ĐỒNG TRỰC SỬ DỤNG DFIG BẰNG KỸ THUẬT ĐỒNG DẠNG TÍN HIỆU ROTOR	24
2.1 Các phương trình toán mô tả DFIG	24
2.1.1 Những giả thiết cơ bản	24
2.1.2 Các phương trình ở hệ trục pha	25
2.1.3 Phương trình biến đổi stator và rotor	26
2.1.4 Phương trình từ thông.....	28
2.1.5 Phương trình momen	30
2.1.6 Biểu diễn các phương trình của DFIG trên cơ sở vector không gian của đại lượng 3 pha.....	31
2.2 Các cấu trúc ghép nối DFIG ứng dụng trong hệ thống phát điện	34
2.2.1 Cấu trúc phát điện sử dụng DFIG không chổi than.....	35
2.2.2 Cấu trúc phát điện sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor.....	39
2.3 Mô hình toán hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor.....	41
2.3.1 Cấu trúc và nguyên lý hoạt động.....	41
2.3.2 Mô hình toán DFIG1 và DFIG2	42
2.3.3 Mô hình hệ thống khi DFIG2 chưa hòa với lưới điện.....	43
2.3.4 Mô hình hệ thống sau khi DFIG2 hòa với lưới điện	49
2.3.5 Các ưu điểm của cấu trúc phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor	52
2.4 Xác định tỷ số truyền của hộp số của máy phát đồng trục	53
2.4.1 Cấu tạo, chức năng của hộp số trong máy phát đồng trục	53
2.4.2 Các dòng năng lượng qua máy phát.....	54
2.4.3 Các thành phần công suất qua máy phát	55
2.4.4 Hiệu suất chuyển đổi cơ năng sang điện năng	60
Nhận xét và kết luận chương 2	63

CHƯƠNG 3: KHẢO SÁT BẰNG MÔ PHỎNG KIỂM CHỨNG TÍNH ĐÚNG ĐẲN CỦA HỆ THỐNG ĐỀ XUẤT	65
3.1 Mở đầu	65
3.2 Các khâu chức năng trong hệ thống	65
3.3 Xây dựng mô hình hệ thống	67
3.4 Cách chỉnh định và vận hành hệ thống.....	72
3.4.1 Chỉnh định hệ thống khi stator của DFIG2 chưa nối với lưới.....	72
3.4.2 Vận hành hệ thống sau khi stator của DFIG2 nối với lưới	72
3.5 Mô phỏng các đặc tính của các khâu trong hệ thống	72
3.5.1 Các kết quả mô phỏng khi hệ thống phát điện chưa hòa với lưới	72
3.5.2 Các kết quả mô phỏng khi hệ thống phát điện hòa với lưới	77
Nhận xét và kết luận chương 3	81
CHƯƠNG 4: THIẾT LẬP HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN MÁY PHÁT ĐIỆN BỘ NGUỒN KÉP LÀM VIỆC Ở TRẠM PHÁT ĐỒNG TRỤC TÀU THỦY	83
4.1 Mở đầu	83
4.2 Xác định cấu trúc đối tượng điều khiển.....	83
4.3 Thiết kế bộ điều khiển	86
4.3.1 Khái quát về hệ thống điều khiển mờ.....	87
4.3.2 Thiết kế bộ điều khiển PID chỉnh định mờ để điều khiển đối tượng ..	88
4.4 Phân chia tải hệ thống phát điện đồng trục với lưới điện tàu thủy.....	95
Nhận xét và kết luận chương 4	98
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	100
Kết luận.....	100
Kiến nghị.....	100
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN	101
TÀI LIỆU THAM KHẢO	103
Tiếng việt	103
Tiếng anh	104

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT

Các ký hiệu:

STT	Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
1	$\underline{u}_s^f, \underline{u}_r^f$	V	Vector điện áp stator, điện áp rotor trên hệ tọa độ dq
2	$\underline{i}_s^f, \underline{i}_r^f$	A	Vector dòng điện stator, dòng điện rotor trên hệ tọa độ dq
3	$\underline{\psi}_s^f, \underline{\psi}_r^f$	Wb	Vector từ thông stator, rotor trên hệ tọa độ dq
4	$\underline{i}_r^r, \underline{i}_s^r$	V	Vector dòng điện rotor, stator trên hệ tọa độ rotor
5	$\underline{u}_s^s$	V	Vector điện áp stator trên hệ tọa độ stator
6	$\underline{\psi}_s^s$	Wb	Vector từ thông stator trên hệ tọa độ stator
7	$\underline{u}_r^r$	V	Vector điện áp rotor trên hệ tọa độ rotor
8	R_s, R_r	Ω	Điện trở stator, điện trở rotor
9	L_s, L_r	H	Điện cảm stator, điện cảm rotor
10	L_m	H	Hỗ cảm giữa stator và rotor
11	ω_s, ω_r	rad/s	Tần số góc điện áp stator, rotor
12	ω_g	rad/s	Tần số góc điện áp lưới
13	ω	rad/s	Tốc độ góc quay của rotor
14	P	W	Công suất tác dụng
15	Q	VAR	Công suất phản kháng
16	P^*	W	Công suất tác dụng mong muốn
17	Q^*	VAR	Công suất phản kháng mong muốn
18	P_L	W	Công suất tác dụng của tải

19	Q_L	VAR	Công suất phản kháng của tải
20	P_c	W	Công suất cơ
21	i_{sd}, i_{sq}	A	Các thành phần của dòng stator trên hệ toạ độ dq
22	i_{rd}, i_{rq}	A	Các thành phần của dòng rotor trên hệ toạ độ dq
23	ψ_{sd}, ψ_{sq}	Wb	Các thành phần của từ thông stator trên hệ toạ độ dq
24	ψ_{rd}, ψ_{rq}	Wb	Các thành phần của từ thông rotor trên hệ toạ độ dq
25	u_{sd}, u_{sq}	V	Các thành phần của điện áp stator trên hệ toạ độ dq
26	u_{rd}, u_{rq}	V	Các thành phần của điện áp rotor trên hệ toạ độ dq
27	$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$	A	Các thành phần của dòng stator trên hệ toạ độ $\alpha\beta$
28	i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	A	Dòng điện các pha A, B, C của stator
29	i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}	A	Dòng điện các pha A, B, C của rotor
30	u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}	V	Điện áp các pha A, B, C của stator
31	u_{ra}, u_{rb}, u_{rc}	V	Điện áp các pha A, B, C của rotor
32	t	s	Thời gian
33	p		Toán tử laplace
34	q		Số cặp cực
34	$[A_{pt}]$		Ma trận chuyển đổi stator
35	$[A_{ptr}]$		Ma trận chuyển đổi rotor
36	KP		Hằng số tỷ lệ
37	KI		Hằng số tích phân
38	KD		Hằng số vi phân

39	e		Sai lệch
40	de		Vì phân của sai lệch

Các chữ viết tắt:

STT	Chữ viết tắt	Diễn giải nội dung
1	DFIG	Máy phát điện dị bộ nguồn kép
2	BDFIG	Máy phát điện dị bộ nguồn kép không chổi than
3	ME	Máy chỉnh lai chân vịt tàu thủy
4	SG	Máy phát điện đồng trục
5	DC	Dòng điện một chiều
6	DTC	Điều khiển trực tiếp momen
7	DPC	Điều khiển trực tiếp công suất
8	G-DC	Máy phát điện một chiều
9	M-DC	Động cơ điện một chiều
10	G3~	Máy phát điện xoay chiều 3 pha
11	R _u	Bộ điều khiển điện áp
12	R _f	Bộ điều khiển tần số
13	PID	Bộ điều khiển tỷ lệ, tích phân, vi phân

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Số hiệu	Nội dung bảng biểu	Trang
2.1	Các trường hợp của máy điện dị bộ nguồn kép không chổi than	36
3.1	Các thông số của DFIG1 và DFIG2	71
4.1	Phản ứng hệ thống kín khi thay đổi các tham số bộ điều khiển PID	90
4.2	Luật suy diễn bộ chỉnh định mờ	91

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ

Số hiệu	Nội dung	Trang
1.1	Sơ đồ hệ thống phát điện trên tàu thủy có sử dụng máy phát điện đồng trục	5
1.2	Máy phát đồng trục là một phần của trục chân vịt	8
1.3	Máy phát đồng trục được đặt đối diện với chân vịt qua máy chính	9
1.4	Máy phát đồng trục được truyền động qua hộp số cùng phía chân vịt	9
1.5	Máy phát đồng trục được truyền động qua hộp số phía đối diện với chân vịt	10
1.6	Máy phát đồng trục là hệ 3 máy điện G-DC/MC-DC/G3~	11
1.7	Máy phát đồng trục là máy phát đồng bộ	11
1.8	Máy phát đồng trục với bộ ổn định tần số thông qua ổn định tốc độ động cơ một chiều	12
1.9	Hệ thống phát điện đồng trục với ổn định tần số thông qua ổn định tốc độ máy điện xoay chiều	13
1.10	Cấu trúc hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG	14
1.11	Cấu trúc điều khiển máy điện dị bộ nguồn kép trong máy phát điện đồng trục	15
2.1	Sơ đồ đấu dây và chuyển tọa độ của DFIG	24
2.2	Biểu diễn vector dòng, điện áp, từ thông stator trên hệ tọa độ $\alpha\beta$ và dq	32
2.3	Cấu trúc ghép nối DFIG với bộ biến đổi công suất ở phía stator	35
2.4	Máy điện dị bộ nguồn kép không chổi than	36
2.5	Nguyên lý hoạt động của BDFIG	37
2.6	Giản đồ dòng năng lượng trong BDFIG	38
2.7	Cấu trúc phát điện sử dụng DFIG trên cơ sở kỹ thuật	39

	đồng dạng tín hiệu rotor	
2.8	Cấu trúc hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor	41
2.9	Sơ đồ khối hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor với mạch nghịch lưu nguồn áp khi chưa hòa lưới	46
2.10	Sơ đồ khối khâu tạo ${}^2 \underline{i}_{ro}$	47
2.11	Sơ đồ khối hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor với mạch điều khiển dòng điện khi chưa hòa lưới	47
2.12	Đồ thị vector quá trình tạo các thành phần dòng điện rotor DFIG2	48
2.13	Vector dòng điện và điện áp stator DFIG2 trên tọa độ tựa theo điện áp lưới	50
2.14	Sơ đồ khối mô hình hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor khi hòa lưới	52
2.15	Hộp số máy phát đồng trục trên tàu thủy	53
2.16	Vị trí của hộp số trong hệ thống phát điện đồng trục	54
2.17	Cấu trúc dòng năng lượng qua máy phát	55
2.18	Vector điện áp và dòng điện rotor trên hệ trục dq	58
3.1	Sơ đồ khối hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor	65
3.2	Mô hình mô phỏng hệ thống	68
3.3	Đồ thị vector quá trình tạo S_a'	69
3.4	Kết quả mô phỏng khâu xoay 90^0	70
3.5	Điều khiển dòng điện theo phương pháp Hysteresis	71
3.6	Kết mô phỏng mạch điều khiển dòng điện	71
3.7	Kết quả mô phỏng quá trình chỉnh đỉnh Gss	73

3.8	Đáp ứng hệ thống phát điện chưa hòa lưới khi tốc độ rotor ω thay đổi	75
3.9	Đáp ứng của hệ thống phát điện chưa hòa lưới khi sụt điện áp lưới	76
3.10	Đáp ứng hệ thống phát điện hòa lưới khi G_P và G_Q thay đổi	78
3.11	Đáp ứng hệ thống phát điện hòa lưới khi tốc độ thay đổi	79
3.12	Đáp ứng hệ thống phát điện hòa lưới khi sụt điện áp lưới	80
4.1	Đối tượng điều khiển	85
4.2	Sơ đồ khối đối tượng điều khiển	85
4.3	Mô hình hệ thống điều khiển với bộ điều khiển PID chỉnh định mờ	87
4.4	Cấu trúc một bộ điều khiển mờ	88
4.5	Hệ thống điều khiển các thành phần công suất bằng bộ điều khiển PID chỉnh định mờ	88
4.6	Bộ chỉnh định mờ và các hàm liên thuộc	90
4.7	Đồ thị quan hệ các biến vào ra của bộ chỉnh định mờ	91
4.8	Mô hình hệ thống điều khiển kín với bộ điều khiển PID chỉnh định mờ	93
4.9	Kết quả mô phỏng hệ thống với bộ điều khiển PID chỉnh định	94
4.10	Phân chia công suất chịu tải của máy phát đồng trục với lưới điện tàu thủy	95
4.11	Kết quả mô phỏng phân chia công suất tải giữa máy phát đồng trục với lưới điện tàu thủy	96
4.12	Kết quả mô phỏng khi phụ tải là động cơ xoay chiều 3 pha	97
4.13	Kết quả mô phỏng khả năng điều khiển bám giá trị đặt của hệ thống khi phụ tải là động cơ xoay chiều 3 pha	98

MỞ ĐẦU

Giới thiệu tóm tắt luận án

Luận án đi sâu nghiên cứu hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy, đặc biệt là hệ thống phát điện đồng trục sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép, để đưa ra giải pháp nâng cao hiệu quả sản xuất điện năng, góp phần giảm tiêu thụ nhiên liệu và giảm chi phí vận hành trên tàu thủy. Cụ thể, nội dung của luận án gồm 4 chương:

- Chương 1: Trình bày tổng quan về máy phát điện đồng trục trên tàu thủy và các ưu nhược điểm của nó, các cấu trúc phần cơ và phần điện của các máy phát đồng trục trong thực tế. Từ đó lựa chọn giải pháp hiệu quả nhất là sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép, phân tích các công trình nghiên cứu liên quan về điều khiển máy điện dị bộ nguồn kép trong hệ thống phát điện. Đề xuất phương hướng giải quyết để nâng cao hiệu quả sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép trong máy phát đồng trục trên tàu thủy.

- Chương 2: Trình bày đề xuất, cơ sở khoa học và mô hình toán của cấu trúc hệ thống phát điện đồng trục sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor, chứng minh và chỉ ra các ưu điểm của cấu trúc mới đề xuất. Đồng thời, trong chương 2 cũng nghiên cứu, đề xuất xác định tỷ lệ truyền của hộp số của máy phát đồng trục để hiệu suất chuyển đổi năng lượng cao nhất.

- Chương 3: Xây dựng mô hình và thực hiện mô phỏng hệ thống trên phần mềm Matlab để kiểm chứng các kết quả thu được ở chương 2. Đồng thời đưa ra cách thức chỉnh định và vận hành hệ thống. Từ đó phân tích sâu hơn và khẳng định thêm các ưu điểm của cấu trúc mới đề xuất.

- Chương 4: Thiết lập hệ thống điều khiển hệ thống phát điện đồng trục sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor.

Kết luận và một số vấn đề cần nghiên cứu tiếp.

Lý do chọn đề tài

Ngày nay, trên tàu thủy trạm phát điện luôn hướng tới khả năng khai thác tối ưu trong hành trình trên biển để giảm tiêu hao năng lượng, giảm thiểu tiếng ồn, giảm ô nhiễm môi trường, tránh tác động xấu tới con người cũng như thiên nhiên. Khi đi trên biển, trong môi trường ổn định về khí hậu và thời tiết, các động cơ chính lái chân vịt tàu thủy thường khai thác không hết công suất, để tận dụng sự dư thừa công suất này, các tàu trọng tải lớn thường được thiết kế có các máy phát điện đồng trục cùng làm việc với các cụm diesel–máy phát.

Nguồn điện cần thiết cho tàu thủy trong chế độ hành trình thường chỉ chiếm từ 5-10% công suất của máy chính. Vì thế, các tàu có thiết kế máy phát đồng trục đã tận dụng được cơ năng của máy chính để tiết kiệm nhiên liệu, tiết kiệm thời gian hoạt động của các diesel lái máy phát điện, giảm suất tiêu hao vật tư, phụ tùng, nâng cao tuổi thọ của trạm phát điện tàu thủy. Đặc biệt, chi phí sản xuất một đơn vị điện năng bằng máy phát đồng trục chỉ bằng 50% chi phí khi ta sử dụng cơ năng của hệ diesel-máy phát độc lập.

Tuy nhiên, khi hệ thống trạm phát có thêm máy phát đồng trục đã làm phức tạp thêm hệ thống điện năng trên tàu thủy, đặt ra các vấn đề kỹ thuật phải hoàn thiện. Một trong những vấn đề kỹ thuật phức tạp nhất là việc ổn định tần số và ổn định điện áp của máy phát khi tốc độ quay của máy chính thay đổi trong hành trình, một trong những giải pháp kỹ thuật hiệu quả là sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép làm việc ở chế độ máy phát.

Máy điện dị bộ nguồn kép trong hệ thống máy phát đồng trục có ưu điểm nổi bật là stator được nối trực tiếp với lưới điện, còn rotor nối với lưới qua thiết bị điện tử công suất điều khiển được. Chính vì thiết bị điều khiển nằm ở rotor nên công suất thiết bị điều khiển nhỏ hơn rất nhiều công suất máy phát và dòng năng lượng thu được chảy trực tiếp từ stator sang lưới, điều này rất hấp dẫn về mặt kinh tế, đặc biệt khi công suất của máy phát lớn. Tuy nhiên, kỹ thuật điều khiển rotor của máy điện dị bộ nguồn kép rất khó khăn, cấu trúc hệ thống phức tạp và khó điều khiển.

Từ những lý do trên cho thấy việc nghiên cứu và đề xuất các giải pháp nâng cao hiệu quả máy phát đồng trục sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép là rất cần thiết cho các tàu thủy hiện đại ngày nay, vì vậy tác giả chọn đề tài: “*Nâng cao hiệu quả sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép cho hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy*” để thực hiện luận án của mình.

Mục đích nghiên cứu

Việc áp dụng máy điện dị bộ nguồn kép cho hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy phải đảm bảo được 2 chế độ công tác: 1. Làm việc song song được với lưới “mềm” tàu thủy; 2. Làm việc độc lập khi cần thiết. Trong luận án tác giả đi sâu vào khả năng làm việc song song với lưới điện tàu thủy bằng đề xuất một cấu trúc mới với hệ điều khiển đơn giản, chất lượng cao, khả năng bám lưới “mềm” bền vững. Làm việc độc lập của máy phát đồng trục theo cấu trúc của tác giả không quá khó nhưng là vấn đề cần nghiên cứu sâu để đề ra một giải pháp hợp lý về kinh tế và kỹ thuật, tác giả dành cho một nghiên cứu khác.

Cũng trong luận án, tác giả cũng nghiên cứu khảo sát mối liên hệ giữa các thành phần công suất, từ đó xác định được tỉ lệ truyền của hộp số của máy phát đồng trục để hiệu suất chuyển đổi từ cơ năng sang điện năng cao nhất.

Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của luận án là máy phát đồng trục trên tàu thủy sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép, gồm:

- Máy điện dị bộ nguồn kép là máy điện không đồng bộ rotor dây quấn cấp nguồn từ 2 phía, đây là máy điện hứa hẹn hiệu quả kinh tế cao nhất trong các hệ thống máy phát đồng trục trên tàu thủy.

- Cấu trúc điều khiển máy điện dị bộ nguồn kép trong máy phát đồng trục.

Phạm vi nghiên cứu của luận án là: Nghiên cứu máy phát đồng trục làm việc trong chế độ hòa với lưới điện “mềm” trên tàu thủy.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

- Ý nghĩa khoa học của đề tài là đề xuất mô hình mới ứng dụng máy điện dị bộ nguồn kép làm chức năng máy phát điện đồng trục trên tàu thủy, nhằm nâng cao hiệu quả ứng dụng máy điện dị bộ nguồn kép trong máy phát đồng trục trên tàu thủy. Mở rộng phạm vi hoạt động của máy phát đồng trục trong trường hợp tốc độ máy chính thay đổi. Luận án đã giải quyết thành công cả về mặt lý thuyết lẫn mô hình mô phỏng.

- Ý nghĩa thực tiễn của đề tài là: giảm thiểu chi phí sản xuất điện năng, góp phần tiết kiệm chi phí vận hành trên tàu thủy. Giải quyết được trọn vẹn yêu cầu kỹ thuật khó, đó là hòa đồng bộ máy phát đồng trục với lưới điện “mềm”, đồng thời nâng cao tính ổn định và độ an toàn của lưới điện tàu thủy.

Những đóng góp của luận án

- Luận án đề xuất cấu trúc điều khiển máy điện dị bộ nguồn kép ở máy phát đồng trục trên tàu thủy trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor. Đây là đề xuất hoàn toàn mới đối với hệ thống điều khiển máy điện dị bộ nguồn kép. Với cách đề xuất này, tác giả đã cách li được 2 kênh điều khiển công suất tác dụng và công suất phản kháng độc lập nhau.

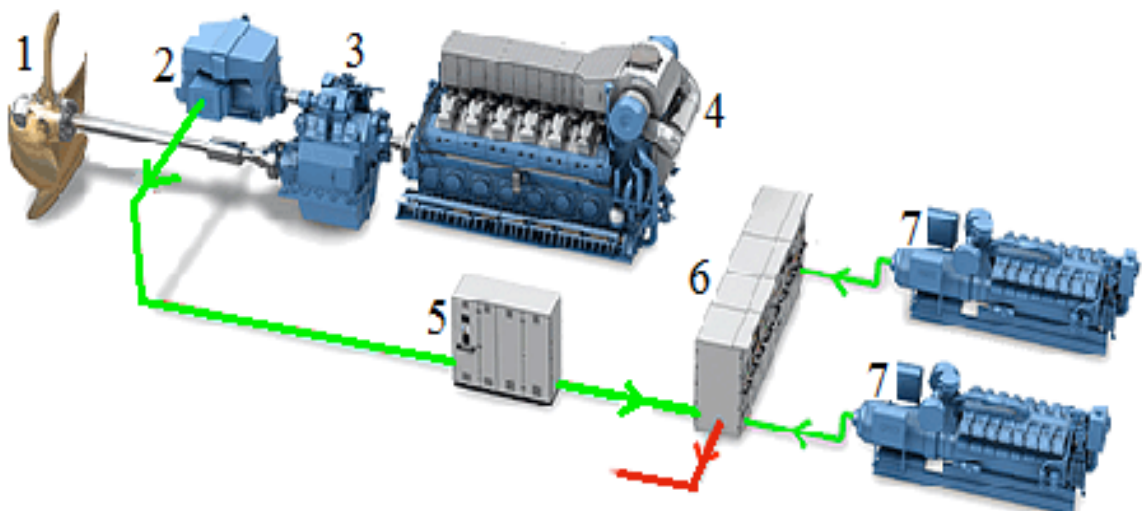
- Luận án đã đơn giản hóa được cấu trúc điều khiển máy điện dị bộ nguồn kép trong máy phát điện đồng trục.

- Nâng cao khả năng bám điện áp lưới “mềm” trên tàu thủy của hệ thống phát điện đồng trục sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép trong điều kiện tốc độ máy chính bị thay đổi.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN HỆ THỐNG PHÁT ĐIỆN ĐỒNG TRỰC TRÊN TÀU THỦY SỬ DỤNG MÁY ĐIỆN DỊ BỘ NGUỒN KÉP VÀ CÁC CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU LIÊN QUAN

1.1 Khái quát hệ thống phát điện đồng trực trên tàu thủy

Hệ thống phát điện đồng trực được giới thiệu đầu tiên vào năm 1982, sau một thời gian ngắn, công ty MAN B&W đã nghiên cứu các khả năng ứng dụng của nó, từ đó một vài mô hình phát điện đồng trực đã được phát triển và ứng dụng trong thực tiễn. Đến nay, máy phát đồng trực đã được nghiên cứu và ứng dụng nhiều trên tàu thủy. Qua khảo sát cho biết, các chủ tàu và nhà máy đóng tàu trên thế giới đã hoàn toàn bị thuyết phục bởi những lợi ích trong việc sử dụng thêm máy phát đồng trực hơn là việc chỉ bố trí đơn lẻ một máy chính lai chân vịt. Mô hình trạm phát điện sử dụng máy chính để truyền động cho máy phát điện kết hợp với một số tổ máy phát điện để sản xuất điện là một mô hình được đánh giá cao về hai mặt kỹ thuật và kinh tế, đặc biệt với một vùng hoạt động rộng lớn trên biển thì các máy phát đồng trực lắp đặt trong trạm phát được sử dụng là có hiệu quả rất lớn. Sơ đồ hệ thống phát điện trên tàu thủy có sử dụng máy phát điện đồng trực được thể hiện đơn giản hóa ở hình 1.1.



Hình 1.1: Sơ đồ hệ thống phát điện trên tàu thủy có sử dụng máy phát điện đồng trực

Các ký hiệu trong hình 1.1 như sau: 1.Chân vịt; 2. Máy phát đồng trục; 3. Hộp số; 4. Máy chính; 5. Bộ điều khiển công suất máy phát đồng trục; 6.Tủ phân phối điện; 7.Tổ hợp máy phát điện diesel.

Trong hình 1.1 cho thấy, máy chính ngoài nhiệm vụ kéo chân vịt, nó còn nhiệm vụ kéo máy phát đồng trục. Trạm phát điện tàu thủy trong trường hợp này gồm máy phát đồng trục làm việc song song với các tổ hợp diesel-máy phát.

Đối với Việt Nam, việc ứng dụng máy phát đồng trục trên đội tàu cũng đã có những bước phát triển nhưng số lượng còn hạn chế. Trạm phát đồng trục có trên các tàu container Diên Hồng, tàu nạo vét Thái Bình Dương, các tàu dịch vụ dầu khí như Vũng Tàu 01, Mỹ Đình.... Hiện nay, máy phát điện đồng trục đã được nghiên cứu và lắp đặt trên các con tàu đóng mới ở các nhà máy đóng tàu Việt Nam như Vinashin Orient trọng tải 564teu đóng tại Công ty đóng tàu Bến Kiền, tàu Vinashin trọng tải 610 teu đóng tại Tổng công ty đóng tàu Bạch Đằng và Tổng công ty đóng tàu Hạ Long. Những tàu này đều đã đi vào hoạt động và đã đem lại những hiệu quả cao về kinh tế.

Lý do máy phát đồng trục được ứng dụng nhiều trên tàu thủy bởi vì máy phát đồng trục có các lợi ích cơ bản như sau [5][12][49]:

- Yêu cầu không gian buồng máy nhỏ: Máy phát đồng trục được thiết kế lắp đặt hợp lý vào máy chính hoặc trên hệ trục, tận dụng được diện tích của buồng máy.

- Chi phí đầu tư thấp: Chi phí đầu tư phụ thuộc vào chủng loại và công nghệ chế tạo máy phát đồng trục, nhìn chung giá thành chế tạo máy phát đồng trục tương đối thấp, nhưng các thiết bị phụ trợ như hệ thống ổn định điện áp và tần số bằng thiết bị bán dẫn lại tương đối đắt.

- Chi phí lắp đặt thấp: Máy phát đồng trục không yêu cầu bộ lắp đặt riêng biệt hoặc có thì cũng rất đơn giản, không có hệ thống khí xả và chỉ yêu cầu một vài liên kết đến thiết bị phụ, thời gian tiêu tốn để lắp đặt một máy phát đồng trục cũng ngắn.

- Độ tin cậy: Các máy phát đồng trục có độ tin cậy cao, đáp ứng trong khai thác vận hành tốt.

- Chi phí giờ công thấp đối với việc bảo dưỡng: Việc bảo dưỡng theo định kỳ của một máy phát đồng trục chỉ thực hiện hàng năm bao gồm việc kiểm tra các thông số, đại lượng, chức năng làm việc và thay thế đều đặn dầu nhờn và bộ lọc.

- Chi phí dự phòng thấp do các máy phát đồng trục có độ tin cậy cao và chi phí bảo dưỡng định kỳ thấp.

- Tuổi thọ hệ thống cao: Một máy phát đồng trục nhìn chung là không hao mòn nhiều, tuy nhiên các thành phần như các ổ trục, các bơm dầu điều khiển bằng cơ học, các khớp ly hợp ma sát... cần được thay thế hoặc tu sửa lại sau nhiều năm hoạt động.

- Độ ồn thấp: Mức ồn của một máy phát đồng trục thấp hơn nhiều mức ồn của một tổ hợp máy phát điện kéo bởi động cơ diesel riêng biệt.

- Nâng cao hiệu suất sử dụng máy chính và tiết kiệm được mức tiêu hao nhiên liệu do các máy chính đa số sử dụng dầu nặng và là các máy trung tốc và thấp tốc hoạt động với độ tin cậy cao.

Tài liệu [49] đã đưa ra các thống kê thực tiễn về việc ứng dụng máy phát đồng trục trên tàu thủy cũng như hiệu suất chuyển đổi năng lượng của hệ thống. Theo thống kê, hiệu suất chuyển đổi năng lượng thấp nhất là 81% và cao nhất là 92%, qua đó thấy rõ hiệu quả việc áp dụng máy phát đồng trục trên tàu thủy là rất lớn. Và chi phí sản xuất một đơn vị điện năng bằng máy phát đồng trục chỉ bằng 50% chi phí khi ta sử dụng cơ năng của hệ diesel-máy phát độc lập.

Tuy nhiên khi hệ thống trạm phát trên tàu thủy có thêm máy phát đồng trục đã làm phức tạp thêm cấu trúc hệ thống trong thiết kế, chế tạo và phải giải quyết thêm một số vấn đề kỹ thuật. Một trong những vấn đề kỹ thuật phức tạp nhất là việc ổn định tần số và ổn định điện áp của máy phát khi tốc độ quay của máy chính thay đổi trong giới hạn rộng. Hiện nay đã có rất nhiều giải pháp kỹ thuật được nghiên cứu và đưa ra để lựa chọn, một trong những giải pháp kỹ

thuật hiệu quả là sử dụng máy phát dị bộ nguồn kép, vì vậy đây chính là giải pháp mà tác giả lựa chọn để phát triển nghiên cứu.

1.2 Các hệ thống phát điện đồng trục trong thực tế

Hệ thống phát điện đồng trục có thể chia làm 2 phần chính là phần cơ và phần điện. Phần cơ thể hiện phương pháp, cách thức bố trí máy phát đồng trục để lấy cơ năng từ máy chính, phần điện thể hiện cấu trúc máy điện và phương pháp điều khiển chúng để chuyển đổi từ cơ năng sang điện năng.

1.2.1 Các cách bố trí máy phát đồng trục để lấy cơ năng từ máy chính

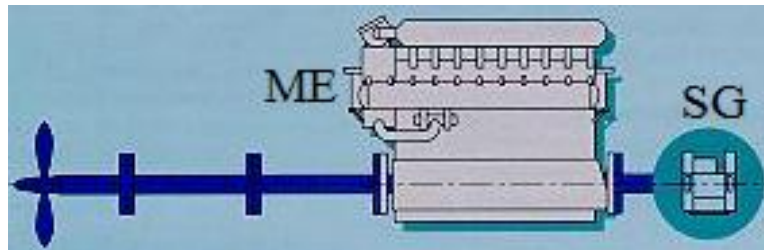
Các máy phát đồng trục được bố trí bằng nhiều cách khác nhau để lấy cơ năng từ máy chính (ME). Mỗi cách bố trí đều có các ưu và nhược điểm của riêng của nó, cụ thể có các cách bố trí như sau [5][12]:

- Máy phát đồng trục là một phần của trục chân vịt được thể hiện ở hình 1.2. Máy phát đồng trục có rotor là một đoạn của trục chân vịt, được đặt ở giữa chân vịt và máy chính. Đây là phương pháp đơn giản không cần có hộp số, khớp nối riêng để đóng máy phát đồng trục vào hoặc đưa ra. Tuy nhiên, khi tiến hành sửa chữa, bảo dưỡng máy phát phải tiến hành các thao tác phức tạp để tháo rời máy phát khỏi bộ và hệ trục. Trong trường hợp tốc độ chân vịt quá thấp, tần số chỉ đạt từ 15 - 20 Hz, hệ thống buộc phải trang bị thêm biến tần, như vậy làm tăng giá thành hệ thống, giảm hiệu suất của máy phát. Mặt khác với cấu trúc như trên do sự tác dụng của chấn động là lực xoắn nên khe khí của máy phát đồng trục phải lớn, hệ thống này có hiệu suất không cao.



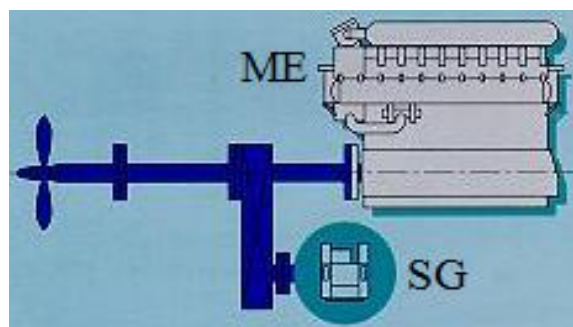
Hình 1.2: Máy phát đồng trục là một phần của trục chân vịt

- Máy phát đồng trục được đặt đối diện với chân vịt qua máy chính được thể hiện ở hình 1.3. Máy phát đồng trục được đặt sau máy chính, được nối với trục máy chính bằng khớp đàn hồi, vì vậy giảm khe hở giữa rotor và stator, giảm bớt từ trở cho máy. Tuy nhiên, hệ thống này có nhược điểm là hiệu suất cơ không cao và chiếm diện tích lớn trong buồng máy.



Hình 1.3: Máy phát đồng trục được đặt đối diện với chân vịt qua máy chính

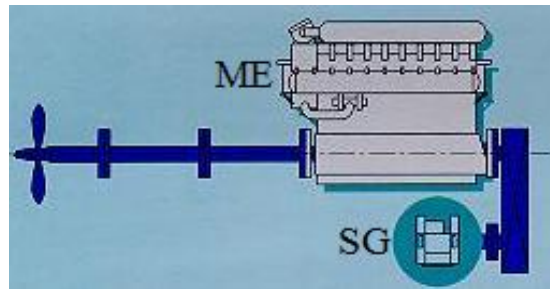
- Máy phát đồng trục được truyền động qua hộp số cùng phía chân vịt được thể hiện ở hình 1.4. Các động cơ diesel lai chân vịt phổ biến nhất hiện nay là loại trung tốc, truyền động thông qua hộp số cơ khí. Máy phát đồng trục với hộp số trong phương pháp truyền động này có giá thành thấp và công suất cơ máy phát tiêu thụ là không hạn chế. Trong hệ thống mà động cơ diesel là loại thấp tốc, khi truyền động cho máy phát đồng trục nhất thiết phải lắp đặt trực trung gian với hộp số, vì vậy làm tăng giá thành, gây thêm khó khăn cho việc bảo dưỡng, sửa chữa đường trục và hệ thống truyền động máy phát.



Hình 1.4: Máy phát đồng trục được truyền động qua hộp số cùng phía chân vịt

- Máy phát đồng trục được truyền động qua hộp số phía đối diện với chân vịt được thể hiện ở hình 1.5. Phần truyền động của máy phát đồng trục có thể

hoàn toàn tách được khỏi diesel để sửa chữa bảo dưỡng ngay cả khi diesel công tác. Hệ thống này có công suất giới hạn và diện tích đòi hỏi không lớn lắm.



Hình 1.5: Máy phát đồng trục được truyền động qua hộp số phía đối diện với chân vịt

- Ngoài ra còn có các phương pháp bố trí máy phát đồng trục khác như: máy phát đồng trục lắp đặt ngay trên diesel của máy chính tức là phần vỏ stator của máy phát đồng trục được bắt vít trực tiếp vào vỏ máy chính, rotor của máy phát được nối với trục diesel chính, vòng bi của động cơ diesel cũng là vòng bi nâng rotor máy phát đồng trục; Và máy phát đồng trục được truyền động qua hộp số ngược với chân vịt ngay cạnh máy chính, hộp số được truyền động trực tiếp từ trục quay của máy chính. Nhược điểm của 2 phương pháp trên là hệ thống cồng kềnh, dải hoạt động hẹp nên ít được ứng dụng trong thực tế.

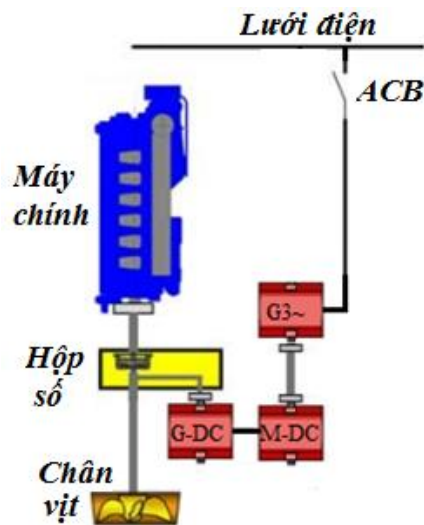
Trong tất cả các phương pháp bố trí máy phát đồng trục để lấy cơ năng từ máy chính đã được trình bày ở trên, thì phương pháp truyền động qua hộp số cùng phía chân vịt được ứng dụng trong thực tế nhiều nhất vì phương pháp này đơn giản, có giá thành thấp và công suất cơ cao.

1.2.2 Các cấu trúc phần điện của máy phát đồng trục

Cấu trúc phần điện thể hiện cách bố trí các máy điện, nguyên lý quá trình truyền năng lượng, và kỹ thuật điều khiển nguồn năng lượng tạo ra của máy phát để đạt các yêu cầu phù hợp với phụ tải hay yêu cầu hòa vào lưới điện trên tàu thủy.

Cấu trúc phần điện cũng thể hiện tư tưởng thiết kế, khả năng công nghệ và mức độ hiện đại của các thiết bị điều khiển. Qua nhiều giai đoạn, cấu trúc phần điện của máy phát đồng trục rất đa dạng, cụ thể có các cấu trúc như sau:

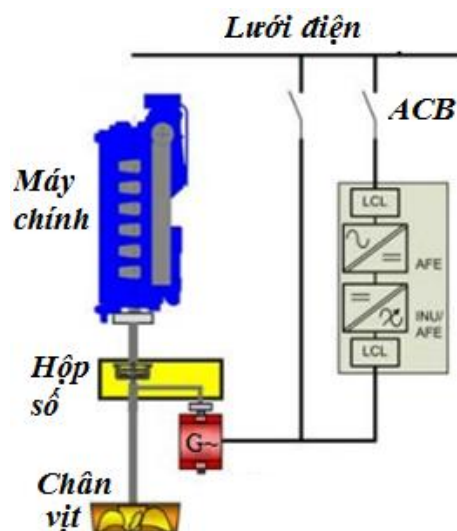
- Máy phát đồng trục là hệ 3 máy điện gồm: máy phát một chiều G-DC, động cơ một chiều M-DC, máy phát đồng bộ 3 pha G3~ được thể hiện ở hình 1.6 [5][12]:



Hình 1.6: Máy phát đồng trục là hệ 3 máy điện G-DC/MC- DC/G3~

Hệ thống có máy chính lại máy phát điện một chiều G-DC tạo ra nguồn điện cấp cho động cơ M-DC quay để lại máy phát đồng bộ 3 pha G3~ qua ACB cấp điện năng lên lưới. Hệ thống này có nhược điểm là sử dụng nhiều máy điện nên giá thành sẽ cao, chiếm nhiều diện tích, hiệu suất thấp, độ tin cậy không cao.

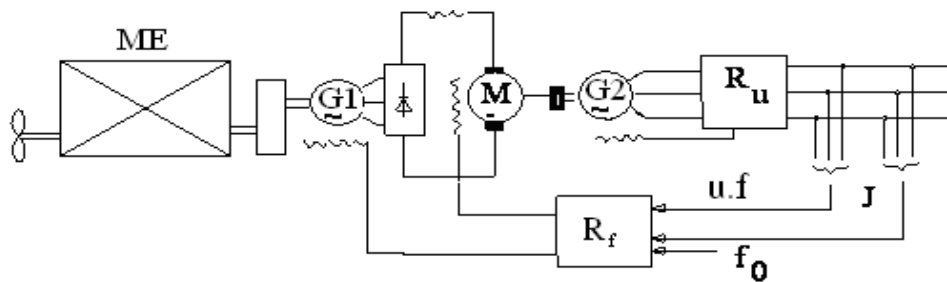
- Máy phát đồng trục là máy phát điện đồng bộ được thể hiện ở hình 1.7 [5][12]:



Hình 1.7: Máy phát đồng trục là máy phát đồng bộ

Hệ thống có máy chính lai máy phát điện đồng bộ 3 pha để tạo ra nguồn điện 3 pha, qua bộ chỉnh lưu ba pha diod công suất để tạo nên dòng điện một chiều. Dòng điện một chiều này được bộ nghịch lưu công suất biến đổi thành dòng điện xoay chiều 3 pha với điện áp và tần số có thể điều chỉnh được, nguồn điện được cấp lên lưới điện thông qua các ACB. Ưu điểm của hệ thống này là có thể làm việc trong dải tốc độ rộng.

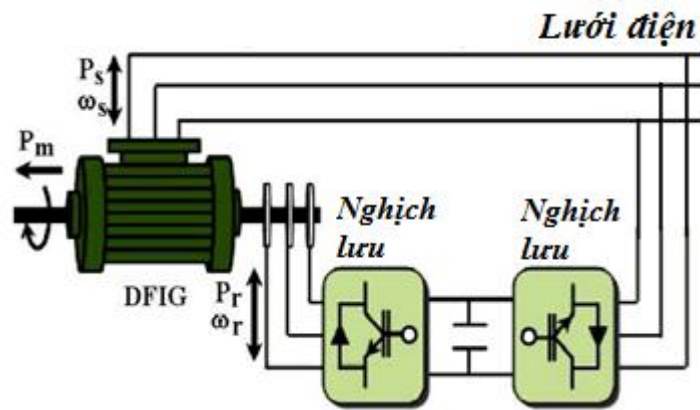
- Máy phát đồng trục với bộ ổn định tần số thông qua ổn định tốc độ động cơ một chiều [5][12], sơ đồ điều khiển được thể hiện ở hình 1.8.



Hình 1.8: Máy phát đồng trục với bộ ổn định tần số thông qua ổn định tốc độ động cơ một chiều

Hệ thống có máy chính ME lai máy phát đồng bộ ba pha (G1) thông qua hợp số. Máy phát G1 cấp năng lượng cho bộ chỉnh lưu ba pha diode công suất để tạo nên dòng điện một chiều cấp điện cho động cơ điện một chiều (M) để truyền động lai máy phát đồng bộ (G2) thông qua các khớp nối. Việc điều chỉnh điện áp và tần số của máy phát G2 được thông qua 2 bộ điều chỉnh là bộ điều chỉnh điện áp R_u và bộ điều chỉnh tần số R_f . Bộ điều khiển R_u trực tiếp điều khiển dòng kích từ của máy phát G2 qua đó điều chỉnh được điện áp phát ra lưới, bộ điều khiển R_f điều chỉnh dòng kích từ của máy phát đồng bộ ba pha G1 và động cơ một chiều M để điều chỉnh tốc độ động cơ M, qua đó điều khiển được tần số phát ra lưới.

Hệ thống máy phát đồng trục trên có khả năng hoạt động độc lập hoặc song song với lưới điện tàu thủy và có những ưu điểm cơ bản sau: ổn định điện áp và tần số rất dễ dàng, không gây nhiễu cho hệ thống năng lượng và điện áp thực tế là hình sin. Tuy nhiên nhược điểm của hệ thống là: công suất của máy phát



Hình 1.10: Cấu trúc hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG

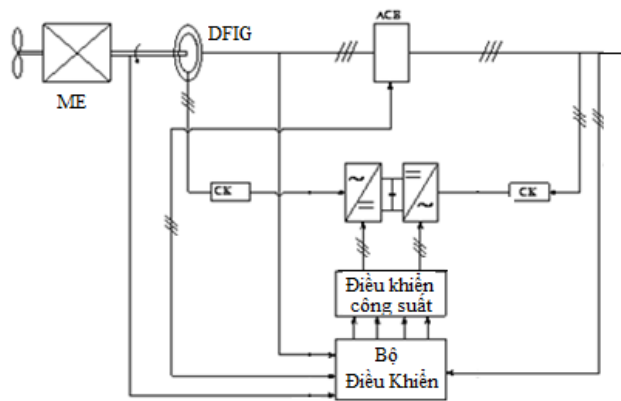
Hệ thống gồm máy chính ME trực tiếp lai máy phát điện dị bộ nguồn kép (DFIG), DFIG có cuộn dây stator được nối trực tiếp với lưới điện ba pha, cuộn dây phía rotor được nối với hệ thống biến tần có khả năng điều khiển dòng năng lượng đi theo hai chiều. Hệ thống có khả năng hoạt động với hệ số trượt trong một phạm vi khá rộng, cho phép tận dụng tốt nguồn năng lượng được lai bởi máy chính, đó là làm việc ở hai chế độ trên hoặc dưới đồng bộ. Ở hai chế độ, máy đều cung cấp năng lượng lên lưới ở phía stator. Ở phía rotor, máy lấy năng lượng từ lưới ở chế độ dưới đồng bộ và hoàn năng lượng trở lại lưới ở chế độ trên đồng bộ.

Hệ thống này có ưu điểm nổi bật là stator của DFIG được nối trực tiếp với lưới điện, còn rotor nối với lưới qua thiết bị điện tử công suất điều khiển được. Vì vậy, công suất thiết bị điều khiển nhỏ hơn nhiều công suất máy phát, hệ thống có kích thước nhỏ gọn, phạm vi hoạt động rộng, tần số điện áp phát ra không đổi trong khi tốc độ rotor thay đổi...

Chính vì những ưu điểm nổi bật của giải pháp máy phát đồng trục sử dụng DFIG, nên trong luận án, tác giả sẽ đi sâu nghiên cứu và đề xuất giải pháp để nâng cao hiệu quả sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép trong hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy.

1.3 Sơ đồ tổng quát hệ thống điều khiển máy phát điện đồng trục sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép

Máy điện dị bộ nguồn kép làm việc trong chế độ máy phát trước đây đã bị lãng quên do nó có đặc điểm phức tạp khó điều khiển. Tuy nhiên khi các bộ biến đổi công suất và kỹ thuật điều khiển số phát triển thì việc nghiên cứu ứng dụng máy điện dị bộ nguồn kép trong các hệ thống phát điện nói chung và trong hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy nói riêng đã được phát triển mạnh mẽ, vì hệ thống có ưu điểm là: thiết bị điều khiển công suất có công suất nhỏ hơn nhiều công suất máy phát ra lưới, kích thước nhỏ gọn, dải phạm vi hoạt động rộng. Cấu trúc điều khiển hệ thống được thể hiện ở hình 1.11[12]:



Hình 1.11: Cấu trúc điều khiển máy điện dị bộ nguồn kép trong máy phát điện đồng trục

Hệ thống điều khiển công suất bao gồm hai cụm: Cụm nghịch lưu phía lưới và cụm nghịch lưu phía máy phát, hai cụm được nối với nhau thông qua mạch điện một chiều trung gian.

Cụm điều khiển nghịch lưu phía máy phát [6][7][11][12] có nhiệm vụ là điều khiển công suất tác dụng và công suất phản kháng phát lên lưới độc lập với nhau, thông qua điều khiển các thành phần dòng điện rotor. Đồng thời đảm nhận việc hoà đồng bộ với lưới cũng như điều chỉnh tách máy phát ra khỏi lưới khi cần thiết.

Cụm điều khiển nghịch lưu phía lưới [6][7][11][12] dùng để duy trì trị số điện áp một chiều trung gian không đổi theo giá trị đặt của nó, phù hợp với bộ

biến đổi nghịch lưu phía máy phát và điều khiển hướng, trị số công suất phản kháng lên lưới. Cụm điều khiển nghịch lưu phía lưới không chỉ có nhiệm vụ chỉnh lưu lấy năng lượng từ lưới về, cụm còn có khả năng thực hiện nhiệm vụ hoàn trả năng lượng từ mạch một chiều trung gian trở lại lưới. Vì vậy, về cấu trúc mạch điện tử công suất, cụm điều khiển nghịch lưu phía lưới hoàn toàn giống như cụm điều khiển nghịch lưu phía máy phát. Cụm điều khiển nghịch lưu phía lưới còn có nhiệm vụ điều chỉnh $\cos\varphi$ phía lưới và qua đó có thể giữ vai trò bù công suất phản kháng.

Hệ thống aptomat có chức năng đóng cắt và bảo vệ hệ thống. Việc đóng cắt được thực hiện theo yêu cầu vận hành, khai thác. Việc bảo vệ được thực hiện khi có các trường hợp sự cố như: ngắn mạch, quá tải, mất pha, trạm mất. Ngoài ra aptomat còn được thực hiện theo yêu cầu của Đăng kiểm cho tàu thủy [70].

1.4 Tổng hợp các kết quả nghiên cứu, ứng dụng DFIG trong hệ thống phát điện

Ngày nay, máy điện dị bộ nguồn kép được ứng dụng rất rộng rãi trong các hệ thống phát điện, đặc biệt là trong các hệ thống phát điện với tốc độ thay đổi như hệ thống phát điện sức gió, hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy. Hiện tại cấu trúc phát điện sử dụng DFIG chiếm gần 50% thị trường phát điện sức gió [48], với dải công suất từ 1.5MW đến 3MW, gồm 93 model của các hãng sản xuất khác nhau trên thế giới [71].

Ngoài ra, nhà sản xuất năng lượng tái tạo của Đức (The German company Repower) đã có 2 model với công suất trên 3 MW là: model 6M với tổng công suất phát ra 6.150 kW; model 5M với tổng công suất phát ra 5MW [85].

Một trong những lý do chính để DFIG được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống phát điện là bộ biến đổi công suất nhỏ so với công suất phát lên lưới vì bộ biến đổi công suất được đặt ở phía rotor. Trong dải tốc độ giới hạn thì công suất của bộ biến đổi chỉ bằng 30% công suất phát lên lưới [58][62].

Vì DFIG trong hệ thống phát điện có nhiều ưu điểm và được ứng dụng rộng rãi trong thực tế nên có rất nhiều công trình trong nước và quốc tế nghiên cứu về điều khiển DFIG, sau đây là một số cấu trúc điều khiển DFIG điển hình.

1.4.1 Cấu trúc điều khiển tĩnh Scherbius

Cấu trúc Scherbius được đề xuất bởi kỹ sư người đức Arthur Scherbius vào những năm đầu của thế kỷ 20. Bộ biến đổi nằm ở rotor cho phép công suất đi theo 2 chiều nên hệ thống có thể hoạt động ở chế độ dưới đồng bộ và trên đồng bộ. Hai hệ thống đầu tiên sử dụng cấu trúc Scherbius là: 1. Hệ thống tĩnh Kramer [44] với mạch cầu diot ở phía rotor được thay thế bởi bộ biến đổi nguồn dòng với mạch trung gian một chiều (current-fed dc-link converter) [23][46][85][91]; 2. Hệ thống với bộ biến tần trực tiếp (cycloconverter) được nối giữa rotor và stator. Tuy nhiên 2 hệ thống này tạo ra sóng hài bậc cao ở dòng điện rotor và cảm ứng sang stator. Hạn chế này được khắc phục bằng cách sử dụng 2 bộ biến đổi 2 chiều (back to back inverter), điều chỉnh dòng điện bằng phương pháp băm xung điện áp (PWM) [13][33][47][58][62] [90][94][96]. Một giải pháp khác là áp dụng các bộ biến tần ma trận trực tiếp (matrix converters-MCs) hoặc gián tiếp (indirect matrix converters -IMCs) [29][67], tuy nhiên hạn chế của các giải pháp này là hiệu suất không cao.

1.4.2 Điều khiển vector không gian

Kỹ thuật điều chế vector không gian ban đầu được nghiên cứu phát triển để điều khiển máy điện dị bộ rotor lồng sóc, sau này được áp dụng mở rộng cho máy phát dị bộ rotor dây quấn DFIG. Trong kỹ thuật này, dòng điện rotor của DFIG được tính toán và điều khiển trong hệ trục tọa độ từ thông stator [68], hoặc trong hệ trục tọa độ tựa theo điện áp lưới [11].

Trong hệ trục tọa độ tựa theo từ thông stator, momen điện từ tỉ lệ với thành phần dòng điện ngang trục, và khi stator của DFIG được nối với lưới, công suất phản kháng có thể được điều khiển thông qua thành phần dòng điện dọc trục.

Một số công trình trong nước và quốc tế nghiên cứu điều khiển DFIG trên cơ sở vector không gian cho máy phát điện tàu thủy là [1][2][6][27], cụ thể:

Công trình [69] đã đề cập khả năng ứng dụng máy điện dị bộ nguồn kép cho hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy với bộ tự điều chỉnh điện áp điều khiển tựa theo từ thông stator. Công trình chủ yếu mang tính tổng quan, nêu cấu trúc chung của hệ thống, chưa chỉ ra rõ phương pháp điều khiển cụ thể.

Công trình [12] đã giải quyết được vấn đề ổn định tần số và điện áp bằng phương pháp tách kênh trực tiếp và tuyến tính hóa chính xác với bộ điều khiển phản hồi trạng thái. Vì công trình [12] xây dựng mô hình đối tượng trên cơ sở tuyến tính hóa nên đáp ứng chất lượng của hệ thống điều khiển chưa cao, tồn tại những dao động tương đối lớn ngay trong cả quá trình quá độ và quá trình xác lập.

Công trình [1] đã xây dựng mô hình hệ thống phát điện đồng trục sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép trên cơ sở phi tuyến với nguyên lý tựa phẳng. Công trình đã chứng minh được tính đúng đắn của việc áp dụng nguyên lý tựa phẳng cho hệ thống và chỉ ra được 2 biến phẳng là công suất tác dụng (hoặc momen) và hệ số công suất $\cos\varphi$. Công trình mới dừng ở bước đề xuất, chưa đưa ra cấu trúc hệ thống điều khiển cụ thể.

Tiếp theo công trình [1], công trình [2] đã đưa ra cấu trúc hệ thống điều khiển cụ thể với bộ điều khiển tỷ lệ tích phân kết hợp với phản hồi tín hiệu feedforward trên cơ sở hệ phẳng để tách kênh các tín hiệu điều khiển. Kết quả thu được của công trình tương đối tốt, tuy nhiên vẫn tồn tại sóng hài bậc cao ở các thông số điều khiển đầu ra của hệ thống.

Ngoài ra, có các công trình liên quan hay có sự tương đồng là các công trình nghiên cứu ứng dụng máy điện dị bộ nguồn kép vào hệ thống phát điện sức gió, cụ thể gồm:

Công trình [9] đã tổng hợp hệ thống theo các phương pháp tuyến tính và giải quyết được vấn đề điều khiển tách kênh momen (công suất tác dụng) và

công suất phản kháng trên cơ sở phân ly các thành phần i_{rd} và i_{rq} , các tài liệu [62][71][75] đã bù được các liên kết chéo để đảm bảo sự phân ly.

Tuy nhiên tốc độ máy phát thường xuyên thay đổi, tần số mạch rotor thay đổi theo và điện áp lưới là điện áp lưới “mềm”, các giải pháp điều khiển tuyến tính đều coi chúng là biến thiên chậm hay là nhiễu, các công trình [9][45][62][75] đều thực hiện loại bỏ bằng phương pháp bù đơn giản.

Công trình [11] đã cải thiện được chất lượng hệ thống đáng kể khi điều khiển hệ thống trên cơ sở phi tuyến bằng phương pháp cuốn chiếu (backstepping).

Tiếp theo, công trình [6] cũng điều khiển hệ thống phát điện sức gió sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép trên cơ sở phi tuyến tựa theo từ thông thụ động với thuật toán thiết kế tựa theo EL và Hamilton, kết quả của công trình là: với tải đối xứng, hệ thống đáp ứng được chất lượng khi hệ thống làm việc bình thường hoặc xảy ra xấp lưới đối xứng. Để giải quyết điều khiển bám lưới của hệ thống khi xảy ra lỗi lưới không đối xứng đã được [7] nghiên cứu và giải quyết. Đồng thời [7] cũng đã giải quyết vấn đề khắc phục méo điện áp lưới khi có tải phi tuyến.

1.4.3 Điều khiển trực tiếp momen (direct torque control-DTC)

Phương pháp điều khiển trực tiếp momen được ứng dụng rộng rãi trong máy điện dị bộ rotor lồng sóc, sau đó cũng được áp dụng để điều khiển momen điện từ của máy điện dị bộ rotor dây quấn vì nó có ưu điểm nổi bật là hiệu suất chuyển đổi năng lượng cao [14][15][18][22][73][74][90]. Hãng ABB đã phát triển bộ biến đổi công suất điều khiển DFIG bằng phương pháp này [92].

1.4.4 Điều khiển trực tiếp công suất (direct power control-DPC)

Phương pháp điều khiển trực tiếp công suất có kết cấu phần cứng tương tự như phương pháp DTC, nó có điểm khác là nghiên cứu ảnh hưởng của từ thông stator và rotor tới công suất tác dụng và công suất phản kháng của stator DFIG phát lên lưới. Các nghiên cứu [13][79][85][90] cho thấy: công suất tác

dụng tỷ lệ với thành phần từ thông rotor theo hướng vuông góc với từ thông stator, công suất phản kháng tỷ lệ với thành phần từ thông rotor theo hướng dọc trục với từ thông stator.

Trong các cấu trúc điều khiển DFIG làm máy phát điện [27][39][63][64][72], các cảm biến như encoder vị trí hay máy phát tốc đều gây nên một số hạn chế như sau: phải bảo trì, kinh phí cao, phải có cáp kết nối...vì vậy, đã có đề xuất về cấu trúc điều khiển DFIG để khắc phục các hạn chế này, đó là cấu trúc điều khiển DFIG không cảm biến (SENSORLESS CONTROL OF DFIG).

1.4.5 Cấu trúc điều khiển DFIG không cảm biến

Có một vài phương pháp điều khiển DFIG không cảm biến như sau:

- Phương pháp điều khiển DFIG không cảm biến trên cơ sở quan sát thích nghi theo mô hình mẫu (model reference adaptive system observers- MRAS): Đây là phương pháp điều khiển DFIG không cảm biến đầu tiên được đề xuất, nghiên cứu [83], và được ứng dụng trong thực tiễn đầu tiên ở các công trình [36][37], được nghiên cứu phát triển sâu hơn ở công trình [24][26]. Cơ sở của phương pháp này là quan sát hệ thống dựa trên 2 mô hình [16][25][28][30][34][40][61][66] [83]: mô hình tham chiếu và mô hình thích nghi, tốc độ và vị trí ước tính của rotor là cơ sở để chỉnh định mô hình thích nghi sao cho sai lệch bằng không.

- Phương pháp điều khiển DFIG không cảm biến vòng hở (Open-Loop Sensorless Methods): đây là phương pháp điều khiển DFIG không cảm biến mới nhất được đề xuất. Cơ sở của phương pháp này là so sánh dòng điện rotor ước lượng và dòng điện rotor đo được để xác định vị trí của rotor [17] [20] [32][41][57].

- Các phương pháp điều khiển DFIG không cảm biến khác: Điều khiển DFIG không cảm biến trên cơ sở vòng lặp khóa pha (Sensorless control of DFIGs based on phase-locked loop) [83]. Quan sát vị trí rotor trên cơ sở quan

sát momen [31][52][53], quan sát vị trí rotor trên cơ sở quan sát dòng điện rotor [50][51][52][53][65][66].

1.4.6 Cấu trúc điều khiển DFIG không chổi than (Brushless- Doubly – Fed Induction Generator- BDFIG)

Hạn chế của các hệ thống phát điện sử dụng DFIG là phải có chổi than và vành trượt để kết nối giữa rotor của DFIG với mạch của bộ biến đổi công suất. Một cấu trúc được đề xuất để khắc phục hạn chế này là tổ hợp máy phát điện dị bộ nguồn kép không chổi than, hệ thống này đã được ứng dụng khả thi trong thực tế [19][21][78][89][96]. Đã có những công trình nghiên cứu kỹ và so sánh chuyên sâu về chất lượng điện phát ra giữa BDFIG và DFIG đơn lẻ [38]. Kết quả cho thấy, hệ thống phát điện dùng BDFIG có chất lượng điện hòa với lưới và khả năng bám điện áp lưới tốt hơn rất nhiều so với DFIG đơn lẻ. Tuy nhiên hệ thống BDFIG có hạn chế là kích thước khá lớn và tổn hao công suất ở rotor lớn hơn so với DFIG đơn lẻ.

1.5 Các vấn đề còn tồn tại và đề xuất giải pháp, mục tiêu của luận án

Qua tổng hợp trên cho thấy số lượng công trình nghiên cứu DFIG ứng dụng trong hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy còn ít, trong khi đó các công trình nghiên cứu DFIG trong hệ thống phát điện sức gió đã phát triển nhiều và có những thành công. Tuy nhiên ta không thể ứng dụng hoàn toàn hệ thống phát điện sức gió cho hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy do chúng có một vài đặc điểm khác biệt cơ bản như sau:

- Hệ thống phát điện sức gió lấy cơ năng từ năng lượng tự nhiên là phong năng, vì vậy các nghiên cứu quan tâm đến việc lấy cơ năng từ gió hiệu quả nhất. Trong khi đó hệ thống phát điện đồng trục lấy cơ năng từ máy chính, vì vậy các công trình nghiên cứu quan tâm đến hiệu suất chuyển đổi năng lượng lớn nhất để giảm thiểu tiêu thụ nhiên liệu.

- Hệ thống phát điện sức gió có tốc độ máy phát bị thay đổi phụ thuộc không chỉ vào sức gió mà còn phụ thuộc vào momen cản (chủ yếu là momen điện từ hay công suất tác dụng). Còn hệ thống phát điện đồng trục, do cơ năng

của máy chính là rất lớn so với máy phát nên tốc độ của máy phát không bị phụ thuộc vào công suất điện phát lên lưới mà chỉ phụ thuộc vào các tình huống điều động tàu trên biển.

- Hệ thống phát điện sức gió được ứng dụng chủ yếu là hòa vào lưới điện trên bờ là lưới điện “cứng”. Trong khi đó trên tàu thủy, lưới điện là lưới điện “mềm” nên điện áp và tần số lưới điện thường xuyên thay đổi.

Tuy có những sự khác biệt nêu trên nhưng cấu trúc phần điều khiển phía lưới điện của hai hệ thống hoàn toàn giống nhau, nên ta có thể áp dụng kết quả nghiên cứu điều khiển phía lưới của các công trình phát điện sức gió cho hệ thống phát điện đồng trục. Vì vậy, luận án sẽ tập trung nghiên cứu, đề xuất các giải pháp điều khiển mạch công suất phía máy phát.

Các công trình nghiên cứu phương pháp điều khiển máy điện dị bộ nguồn kép trong hệ thống phát điện nói chung và hệ thống phát điện đồng trục nói riêng phần lớn bằng kỹ thuật điều chế vector không gian. Các nghiên cứu cho thấy, hệ thống có cấu trúc điều khiển rất phức tạp, khả năng bám lưới và chất lượng điện của máy phát phụ thuộc rất nhiều phương pháp điều khiển. Để máy phát có chất lượng điện tốt và bám lưới bền vững thì cấu trúc hệ thống phải bao gồm nhiều khâu chuyển đổi, tính toán và điều khiển phức tạp dẫn tới giá thành hệ thống cao. Ngoài ra, do có sự phản ứng nhanh nhạy và tác động điều chỉnh liên tục của bộ điều khiển nên tín hiệu đầu ra của đối tượng điều khiển còn tồn tại sóng hài bậc cao ngay trong cả quá trình xác lập.

Luận án sẽ đề xuất một phương án kỹ thuật mới là phương pháp điều khiển máy phát dị bộ nguồn kép trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor, với mục đích là làm đơn giản hóa hệ thống điều khiển máy phát đồng trục sử dụng DFIG, dẫn tới giảm giá thành hệ thống, nhưng vẫn đáp ứng được tốt các yêu cầu như: điện áp máy phát luôn bám điện áp lưới khi điện áp lưới thay đổi hoặc tốc độ lai rotor DFIG thay đổi. Cách ly được kênh điều khiển công suất tác dụng P với kênh điều khiển công suất phản kháng Q của máy phát lên lưới.

Một vấn đề nữa là trên tàu thủy, tốc độ máy chính thường ổn định trong hành trình trên biển với sai số trong phạm vi nhất định [5][49]. Vì vậy, nếu xác định được tốc độ góc của rotor DFIG để hệ thống có hiệu suất chuyển đổi cơ năng sang điện năng cao nhất, từ đó ta có thể cài đặt tỷ lệ truyền chuyển động giữa trục máy chính với trục rotor của DFIG để đạt hiệu suất chuyển đổi cao nhất. Xuất phát từ ý tưởng trên, luận án sẽ nghiên cứu khảo sát các mối liên hệ công suất trong hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG, xác định tốc độ góc rotor của DFIG để hiệu suất chuyển đổi cơ năng sang điện năng là cao nhất, từ đó có thể cài đặt được tỷ lệ truyền chuyển động giữa máy chính và rotor của DFIG để nhiên liệu cho sản xuất điện năng thấp nhất.

1.6 Nội dung và phương pháp nghiên cứu của luận án

Nội dung của luận án tập trung nghiên cứu hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy sử dụng DFIG. Trên cơ sở đó, đề xuất các giải pháp để nâng cao hiệu quả sử dụng DFIG trong hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy.

Phương pháp nghiên cứu của luận án là dựa trên các đặc điểm, tính chất và mô hình toán của DFIG, các đặc điểm của máy phát đồng trục trên tàu thủy để phân tích, chứng minh và đề xuất mô hình điều khiển DFIG mới hiệu quả cao. Đồng thời, kiểm chứng các kết quả thu được bằng mô phỏng trên phần mềm Matlab.

Nhận xét và kết luận chương 1

Chương 1 đã giải quyết được các vấn đề sau:

- Trình bày khái quát máy phát điện đồng trục, chỉ ra được các ưu điểm nổi bật của việc sử dụng máy phát điện đồng trục trên tàu thủy.
- Trình bày các cấu trúc cơ bản của máy phát điện đồng trục gồm các cấu trúc cơ và cấu trúc điện, xác định được cấu trúc có ưu điểm nổi bật là cấu trúc máy phát đồng trục sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép.
- Tổng hợp các kết quả nghiên cứu liên quan đến máy phát điện đồng trục sử dụng DFIG, từ đó đề xuất các phương hướng giải quyết.

CHƯƠNG 2: ĐỀ XUẤT CẤU TRÚC PHÁT ĐIỆN ĐỒNG TRỰC SỬ DỤNG DFIG BẰNG KỸ THUẬT ĐỒNG DẠNG TÍN HIỆU ROTOR

2.1 Các phương trình toán mô tả DFIG

2.1.1 Những giả thiết cơ bản

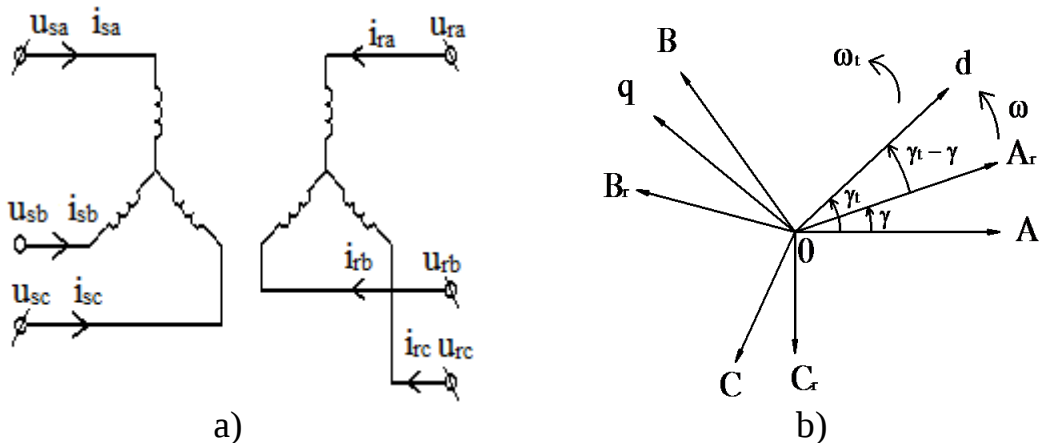
Để viết các phương trình toán học mô tả DFIG, ta giả thiết các điều kiện như sau [4]:

- Ba pha đối xứng.
- Bỏ qua bão hòa từ, dòng fuco và hiện tượng từ trễ.
- Dạng dòng và điện áp là hình sin.

Ngoài ra còn có các điều kiện để lựa chọn trục tọa độ DFIG nhằm biến các phương trình máy điện có hệ số phụ thuộc vào góc quay của rotor thành phương trình vi phân có hệ số không đổi là:

- Mạch rotor và stator của hệ thống biến đổi phải không chuyển động đối với nhau nghĩa là phải có chung hệ tọa độ.
- Trở kháng của động cơ theo các đường sức từ của vòng biến đổi phải không đổi.

Đối với DFIG, điều kiện thứ 2 luôn thỏa mãn cho bất kì hướng nào của hệ trục vì khe khí của máy DFIG là như nhau trên toàn bộ chu vi của rotor. Vì vậy ta chỉ cần quan tâm đến điều kiện thứ nhất, có nghĩa là DFIG có thể chọn trục tọa độ vuông góc nào và quay với tốc độ góc bất kỳ.



Hình 2.1: Sơ đồ đấu dây và chuyển tọa độ của DFIG

Trên hình 2.1 các ký hiệu như sau:

-A, B, C là hệ trục không quay stator;

-A_r, B_r, C_r, là các pha rotor quay với tốc độ góc ω

-d, q là hệ trục vuông góc quay với tốc độ ω_t

Ta có : $d\gamma/dt = \omega$; $d\gamma_t/dt = \omega_t$

Như vậy các biến số của stator và rotor có thể được chuyển sang một hệ trục tọa độ có tốc độ quay bất kỳ.

2.1.2 Các phương trình ở hệ trục pha

Phương trình tổng quát cho mạch stator và mạch rotor ở hệ trục không chuyển động (hệ trục pha) [4]:

$$[U_s] = \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Psi_s] = [R_s] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$[U_r] = \begin{bmatrix} u_{ra} \\ u_{rb} \\ u_{rc} \end{bmatrix} = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Psi_r] = [R_r] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{ra} \\ \psi_{rb} \\ \psi_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Trong đó :

u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} - điện áp pha của lưới đặt vào stator;

u_{ra}, u_{rb}, u_{rc} - điện áp pha trên vành trượt của rotor.

Từ thông có thể viết dưới dạng :

$$[\Psi_s] = \begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \end{bmatrix} = [L_{ss}] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

và

$$[\Psi_r] = \begin{bmatrix} \psi_{ra} \\ \psi_{rb} \\ \psi_{rc} \end{bmatrix} = [M_{rs}] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [L_{rr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Các ma trận $[R_s]$, $[R_r]$, $[L_{ss}]$, $[L_{rr}]$, $[M_{sr}]$, $[M_{rs}]$ như sau:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T = \begin{bmatrix} M_{AAr} & M_{ABr} & M_{ACr} \\ M_{BAr} & L_{BBr} & M_{BCr} \\ M_{CAr} & M_{CBr} & M_{CCr} \end{bmatrix}^T$$

$$\text{Hay } [M_{rs}] = [M_{sr}]^T = M_m \begin{bmatrix} \cos\gamma & \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos\gamma & \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos\gamma \end{bmatrix}^T$$

Trong đó : L_s, L_r - độ tự cảm của stator và rotor;

M_s, M_r, M_m - độ cảm ứng tương hỗ giữa 2 pha stator, giữa 2 pha rotor và giữa stator và rotor;

γ - góc giữa các trục dây quấn cùng tên của stator và rotor.

2.1.3 Phương trình biến đổi stator và rotor

Ma trận biến đổi stator như sau [4]:

$$[A_{pt}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\gamma_t & \cos(\gamma_t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\gamma_t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\gamma_t & -\sin(\gamma_t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\gamma_t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

γ_t là góc hợp bởi giữa trục pha stator A với một trục bất kỳ của một hệ thống vuông góc quay với tốc độ quay ω_t (hình 2.1b). Để có ma trận biến đổi của rotor $[A_{ptr}]$, ta chỉ việc thay γ_t bằng $(\gamma_t - \gamma)$. Như vậy, ma trận biến đổi $[A_{pt}]$ và $[A_{ptr}]$ là 2 ma trận cho phép biến đổi các đại lượng ở hệ trục pha sang hệ trục vuông góc quay với tốc độ ω_t trong đó :

$$\gamma_t = \int_0^t \omega_t dt + \gamma_{t0} \quad (2.6)$$

$$\gamma = \int_0^t \omega dt + \gamma_0 \quad (2.7)$$

Ma trận nghịch đảo của các ma trận biến đổi như sau:

$$[A_{pt}]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_t & -\sin \gamma_t & 1 \\ \cos(\gamma_t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\gamma_t - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\gamma_t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\gamma_t + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$[A_{ptr}]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma_t - \gamma) & -\sin(\gamma_t - \gamma) & 1 \\ \cos(\gamma_t - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\gamma_t - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\gamma_t - \gamma + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\gamma_t - \gamma + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Vậy các phương trình biến đổi như sau:

$$[U'_s] = [u_{sd} \quad u_{sq} \quad u_{s0}]^T = [A_{pt}][U_s] = [A_{pt}][u_{sa} \quad u_{sb} \quad u_{sc}]^T \quad (2.10)$$

$$[I'_s] = [i_{sd} \quad i_{sq} \quad i_{s0}]^T = [A_{pt}][I_s] = [A_{pt}][i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc}]^T \quad (2.11)$$

$$[\Psi'_s] = [\psi_{sd} \quad \psi_{sq} \quad \psi_{s0}]^T = [A_{pt}][\Psi_s] = [A_{pt}][\psi_{sa} \quad \psi_{sb} \quad \psi_{sc}]^T \quad (2.12)$$

$$[U'_r] = [u_{rd} \quad u_{rq} \quad u_{r0}]^T = [A_{ptr}][U_r] = [A_{ptr}][u_{ra} \quad u_{rb} \quad u_{rc}]^T \quad (2.13)$$

$$[I'_r] = [i_{rd} \quad i_{rq} \quad i_{r0}]^T = [A_{ptr}][I_r] = [A_{ptr}][i_{ra} \quad i_{rb} \quad i_{rc}]^T \quad (2.14)$$

$$[\Psi'_r] = [\psi_{rd} \quad \psi_{rq} \quad \psi_{r0}]^T = [A_{ptr}][\Psi_r] = [A_{ptr}][\psi_{ra} \quad \psi_{rb} \quad \psi_{rc}]^T \quad (2.15)$$

Để nhận được phương trình ở hệ trục vuông góc ta nhân về trái của phương trình $[U_s]$ và $[U_r]$ ở hệ trục tọa độ trục A, B, C với $[A_{pt}]$ và $[A_{ptr}]$ ta được:

$$\begin{aligned} [U'_s] &= [A_{pt}][U_s] = [A_{pt}][R_s][I_s] + [A_{pt}]p[\Psi_s] = [R_s][I'_s] + p[A_{pt}][\Psi_s] - p[A_{pt}][\Psi_s] \\ \Rightarrow [U'_s] &= [R_s][I'_s] + p[\Psi'_s] - p[A_{pt}][\Psi_s] \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} [U'_r] &= [A_{ptr}][U_r] = [A_{ptr}][R_r][I_r] + [A_{ptr}]p[\Psi_r] = [R_r][I'_r] + p[A_{ptr}][\Psi_r] - p[A_{ptr}][\Psi_r] \\ \Rightarrow [U'_r] &= [R_r][I'_r] + p[\Psi'_r] - p[A_{ptr}][\Psi_r] \end{aligned} \quad (2.17)$$

Đưa vào đạo hàm ma trận và biến đổi ma trận, triển khai ra ta có phương trình điện áp stator và rotor ở hệ tọa độ quay dq như sau:

$$\begin{bmatrix} u_{sd} & u_{sq} & u_{s0} \end{bmatrix}^T = [R_s] \begin{bmatrix} i_{sd} & i_{sq} & i_{s0} \end{bmatrix}^T + p \begin{bmatrix} \psi_{sd} & \psi_{sq} & \psi_{s0} \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} \psi_{sd} & \psi_{sq} & \psi_{s0} \end{bmatrix}^T p \gamma_t \quad (2.18)$$

$$\begin{bmatrix} u_{rd} & u_{rq} & u_{r0} \end{bmatrix}^T = [R_r] \begin{bmatrix} i_{rd} & i_{rq} & i_{r0} \end{bmatrix}^T + p \begin{bmatrix} \psi_{rd} & \psi_{rq} & \psi_{r0} \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} -\psi_{rq} & \psi_{rd} & 0 \end{bmatrix}^T p(\gamma_t - \gamma) \quad (2.19)$$

2.1.4 Phương trình từ thông

Sử dụng phương trình biến đổi, có phương trình từ thông ở hệ trục dq như sau [4]:

$$[\Psi'_s] = [A_{pt}] [\Psi_s] = [A_{pt}] [L_{ss}] [I_s] + [A_{pt}] [M_{sr}] [I_r] \quad (2.20)$$

$$[\Psi'_r] = [A_{ptr}] [\Psi_r] = [A_{ptr}] [L_{rr}] [I_r] + [A_{ptr}] [M_{rs}] [I_s] \quad (2.21)$$

Ở đây cần biểu diễn từ thông qua dòng, độ tự cảm và cảm ứng tương hỗ ở hệ trục vuông góc. Để có được các phương trình này cần sử dụng các ma trận nghịch đảo của ma trận biến đổi $[A_{pt}]^{-1}, [A_{ptr}]^{-1}$, ta có:

$$\begin{cases} [U_s] = [A_{pt}]^{-1} [U'_s] \\ [I_s] = [A_{pt}]^{-1} [I'_s] \\ [\Psi_s] = [A_{pt}]^{-1} [\Psi'_s] \end{cases} \quad (2.22.a, b, c)$$

$$\begin{cases} [U_r] = [A_{ptr}]^{-1} [U'_r] \\ [I_r] = [A_{ptr}]^{-1} [I'_r] \\ [\Psi_r] = [A_{ptr}]^{-1} [\Psi'_r] \end{cases} \quad (2.23.a, b, c)$$

Thay vào phương trình (2.20) và (2.21) có được:

$$[\psi'_s] = [A_{pt}] [L_{ss}] [A_{pt}]^{-1} [I'_s] + [A_{pt}] [M_{sr}] [A_{ptr}]^{-1} [I'_r] \quad (2.24)$$

$$[\psi'_r] = [A_{ptr}] [L_{rr}] [A_{ptr}]^{-1} [I'_r] + [A_{ptr}] [M_{rs}] [A_{pt}]^{-1} [I'_s] \quad (2.25)$$

Ở biểu thức (2.24), đứng trước ma trận dòng là ma trận biến đổi tự cảm và cảm ứng tương hỗ:

$$[L'_{ss}] = [A_{pt}] [L_{ss}] [A_{pt}]^{-1} \quad (2.26)$$

$$[M'_{sr}] = [A_{pt}] [M_{sr}] [A_{ptr}]^{-1} \quad (2.27)$$

Kết quả nhân ma trận về phải (2.26) và (2.27) ta được:

$$[L_{ss}'] = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega_s} \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X_0 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$[M_{sr}'] = \frac{3}{2} M_m \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = M_{sr} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega_s} X_{sr} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Trong đó: $L = L_q = L_d = (L_s - M_s)$ là hệ số tự cảm của thành phần thuận stator.

$L_0 = L_s - 2M_s$ là hệ số tự cảm của thành phần zero.

$M_{sr} = M_{srd} = M_{srq} = 3M_m / 2$ là hệ số cảm ứng tương hỗ 3 pha giữa stator và rotor.

Vậy biểu thức cho từ thông stator được viết như sau:

$$[\Psi_s'] = [L_{ss}'] [I_s'] + [M_{sr}'] [I_r'] = [L_{ss}'] [i_{sd} \ i_{sq} \ i_{s0}]^T + M_{sr}' [i_{rd} \ i_{rq} \ 0]^T \quad (2.30)$$

Tổng hợp lại ta có các phương trình của điện áp và từ thông ở stator như sau:

$$p \Psi_{sd} - \Psi_{sq} \cdot p \gamma_t + R_s \cdot i_{sd} = u_{sd} \quad (2.31)$$

$$p \Psi_{sq} + \Psi_{sd} \cdot p \gamma_t + R_s \cdot i_{sq} = u_{sq} \quad (2.32)$$

$$p \Psi_{s0} + R_s \cdot i_{s0} = u_{s0} \quad (2.33)$$

$$\Psi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M_{sr} \cdot i_{rd} = \frac{1}{\omega_s} (X_s \cdot i_{sd} + X_{sr} \cdot i_{rd}) \quad (2.34)$$

$$\Psi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + M_{sr} \cdot i_{rq} = \frac{1}{\omega_s} (X_s \cdot i_{sq} + X_{sr} \cdot i_{rq}) \quad (2.35)$$

$$\Psi_{s0} = L_{s0} \cdot i_{s0} = \frac{1}{\omega_s} X_{s0} \cdot i_{s0} \quad (2.36)$$

Tương tự như trên, ta có biểu thức cho từ thông rotor:

$$[\Psi_r'] = [M_{rs}'] [I_s'] + [L_{rr}'] [I_r'] = [L_{rr}'] [i_{rd} \ i_{rq} \ i_{r0}]^T + [M_{rs}'] [i_{sd} \ i_{sq} \ 0]^T \quad (2.37)$$

Trong đó:

$$[M_{rs}'] = \frac{3}{2} M_m \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = M_{rs} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega_s} X_{rs} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{r1} & 0 & 0 \\ 0 & L_{r1} & 0 \\ 0 & 0 & L_{r0} \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega_s} \begin{bmatrix} X_r & 0 & 0 \\ 0 & X_r & 0 \\ 0 & 0 & X_{r0} \end{bmatrix}$$

Trong đó: $X_{rs} = X_{rsd} = X_{rsq} = X_{sr} = \omega_s M_{rs} = \omega_s M_{sr}$ – trở kháng tương hỗ mạch rotor và stator;

$L_{r1} = L_r - M_r$ – độ tự cảm của thành phần thuận của rotor;

$L_{r0} = L_r - 2M_r$ – độ tự cảm của thành phần zero của rotor;

$X_r = X_{rd} = X_{rq} = \omega_s L_{r1}$ – tổng trở kháng của rotor;

$X_0 = \omega_s L_{r0}$ – trở kháng thành phần zero của rotor.

Cuối cùng ta có phương trình các thành phần điện áp và từ thông mạch rotor như sau:

$$p\psi_{rd} - \psi_{rq} \cdot p(\gamma_t - \gamma) + R_r i_{rd} = u_{rd} \quad (2.38)$$

$$p\psi_{rq} + \psi_{rd} \cdot p(\gamma_t - \gamma) + R_r i_{rq} = u_{rq} \quad (2.39)$$

$$p\psi_{r0} + R_r i_{r0} = u_{r0} \quad (2.40)$$

$$\psi_{rd} = M_{rs} i_{sd} + L_{r1} i_{rd} = \frac{1}{\omega_s} (X_r i_{rd} + X_{rs} i_{sd}) \quad (2.41)$$

$$\psi_{rq} = M_{sr} i_{sq} + L_{r1} i_{rq} = \frac{1}{\omega_s} (X_r i_{rq} + X_{sa} i_{sq}) \quad (2.42)$$

$$\psi_{r0} = L_{r0} i_{r0} = \frac{1}{\omega_s} X_{ro} i_{r0} \quad (2.43)$$

2.1.5 Phương trình momen

Phương trình momen ở dạng tổng quát như sau [3]:

$$Jp^2\gamma - M = M_0 \quad (2.44)$$

Với M và M_0 là momen điện từ và momen cản.

Biểu thức momen điện từ của DFIG như sau:

$$M = \frac{3}{2} M_{sr} (i_{rd} i_{sq} - i_{rq} i_{sd}) \quad (2.45)$$

Thay vào biểu thức (2.44) ta có :

$$Jp^2\gamma - \frac{3}{2} M_{sr} (i_{rd} i_{sq} - i_{rq} i_{sd}) = M_0 \quad (2.46)$$

Vì trên tàu thủy không dùng dây zero nên $i_{s0} = 0$.

Các phương trình điện áp, từ thông stator và rotor trên cho phép biểu diễn quá trình quá độ của máy điện dị bộ nguồn kép trong hệ trục vuông góc dq quay với những tốc độ khác nhau. Cụ thể khi:

- $p\gamma_t = p\gamma_s = \omega_t = \omega_s$: hệ trục dq quay với tốc độ đồng bộ.
- $p\gamma_t = p\gamma = \omega$: hệ trục dq quay với tốc độ quay dị bộ của rotor.
- $p\gamma_t = \omega_t$: tốc độ quay bất kì, hệ trục dq quay với tốc độ bất kì.
- $p\gamma_t = 0$: hệ trục dq được gắn vào stator.

2.1.6 Biểu diễn các phương trình của DFIG trên cơ sở vector không gian của đại lượng 3 pha

Theo lý thuyết điều khiển vector [10], trên mặt phẳng cơ học (mặt cắt ngang) của máy điện, vector không gian dòng điện stator của máy dị bộ nguồn kép được định nghĩa như sau:

$$\underline{i}_s(t) = \frac{2}{3} [\underline{i}_{sa}(t) + \underline{i}_{sb}(t).e^{j120^\circ} + \underline{i}_{sc}(t).e^{j240^\circ}] = |\underline{i}_s|.e^{j\omega_s t} \quad (2.46)$$

Trong đó i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} là các dòng điện hình sin, cùng biên độ, cùng tần số, lệch nhau 120° điện, chạy trong ba pha dây quấn stator A, B, C.

Như vậy $\underline{i}_s$ là vector không gian quay với tốc độ góc ω_s so với stator, với f_s là tần số mạch stator.

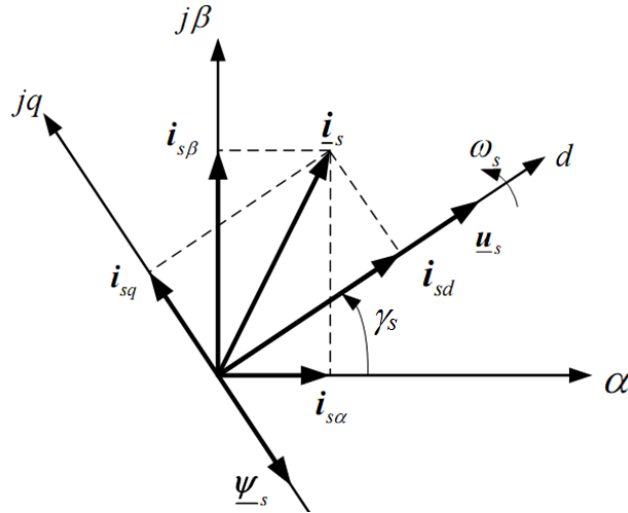
Đối với các đại lượng khác của mạch stator, như điện áp stator, từ thông stator, ta đều có thể xây dựng các vector không gian tương ứng tương tự như đối với dòng điện stator.

Với máy điện dị bộ nguồn kép, trên rotor cũng có cuộn dây ba pha A, B, C, trong đó có ba dòng điện i_{ra} , i_{rb} , i_{rc} với tần số góc ω_r , vector không gian dòng điện rotor cũng được định nghĩa như sau :

$$\underline{i}_r(t) = \frac{2}{3} [\underline{i}_{ra}(t) + \underline{i}_{rb}(t).e^{j120^\circ} + \underline{i}_{rc}(t).e^{j240^\circ}] = |\underline{i}_r|.e^{j\omega_r t} \quad (2.46)$$

Vector $\underline{i}_r$ là vector không gian quay với vận tốc góc ω_r so với rotor, vì rotor quay với vận tốc góc ω so với stator, nên $\underline{i}_r$ cũng quay với tốc độ ω_s so với stator.

Đối với các đại lượng khác của mạch rotor, như điện áp rotor, từ thông rotor, ta đều có thể xây dựng các vector không gian tương tự như đối với dòng điện rotor trên.



Hình 2.2: Biểu diễn vector dòng, điện áp, từ thông stator trên hệ tọa độ $\alpha\beta$ và dq

Trên mặt phẳng cơ học (mặt phẳng cắt ngang của máy điện), ta xây dựng một hệ tọa độ cố định $\alpha\beta$ có trục α trùng với trục cuộn dây pha A, và một hệ tọa độ quay dq có trục dọc d trùng với vector điện áp stator $\underline{u}_s$, nghĩa là hệ tọa độ dq này quay với tốc độ $\omega_s = 2\pi f_s$ so với stator (hình 2.2). Các thành phần của vector dòng điện stator trên trục tọa độ $\alpha\beta$ là $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ và trên trục tọa độ dq là i_{sd}, i_{sq} ta có mối liên hệ giữa các thành phần của dòng điện stator trên các hệ trục tọa độ và các dòng điện pha stator như sau:

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = i_{sa} \\ i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{sa} + 2i_{sb}) \end{cases} \quad (2.49)$$

$$\begin{cases} i_{sa} = i_{s\alpha} \\ i_{sb} = 0.5(-i_{s\alpha} + \sqrt{3}i_{s\beta}) \\ i_{sc} = -0.5(i_{s\alpha} + \sqrt{3}i_{s\beta}) \end{cases} \quad (2.50)$$

$$\begin{cases} i_{sd} = i_{s\alpha} \cdot \cos \gamma_s + i_{s\beta} \cdot \sin \gamma_s \\ i_{sq} = -i_{s\alpha} \cdot \sin \gamma_s + i_{s\beta} \cdot \cos \gamma_s \end{cases} \quad (2.51)$$

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = i_{sd} \cdot \cos \gamma_s - i_{sq} \cdot \sin \gamma_s \\ i_{s\beta} = i_{sd} \cdot \sin \gamma_s + i_{sq} \cdot \cos \gamma_s \end{cases} \quad (2.52)$$

Các công thức biến đổi cho vector dòng stator ở trên cũng đúng với các vector khác: vector điện áp stator, dòng rotor, từ thông stator, từ thông rotor.

Các phương trình điện áp stator, rotor trên hệ thống cuộn dây stator, rotor:

$$\begin{cases} \underline{u}_s^s = R_s \underline{i}_s^s + \frac{d\underline{\psi}_s^s}{dt} \\ \underline{u}_r^r = R_r \underline{i}_r^r + \frac{d\underline{\psi}_r^r}{dt} \end{cases} \quad (2.53.a, b)$$

Phương trình từ thông stator và rotor trên hệ thống cuộn dây stator, rotor:

$$\begin{cases} \underline{\psi}_s = \underline{i}_s \cdot L_s + \underline{i}_r \cdot L_m \\ \underline{\psi}_r = \underline{i}_s \cdot L_m + \underline{i}_r \cdot L_r \end{cases} \quad (2.54.a, b)$$

Do các cuộn dây stator và rotor có cấu tạo đối xứng về mặt cơ học nên các giá trị điện cảm là bất biến đổi với mọi hệ toạ độ quan sát. Do đó công thức (2.54) được dùng một cách tổng quát, không cần có các chỉ số phía trên bên phải, khi sử dụng trên hệ toạ độ cụ thể sẽ điền thêm chỉ số.

Sau khi chuyển (2.53), (2.54) sang biểu diễn trên hệ toạ độ dq là hệ toạ độ quay với vận tốc góc ω_s so với hệ toạ độ cố định, ta thu được hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} \underline{u}_s^f = R_s \underline{i}_s^f + \frac{d(\underline{\psi}_s^f)}{dt} + j \cdot \omega_s \cdot \underline{\psi}_s^f \\ \underline{u}_r^f = R_r \underline{i}_r^f + \frac{d(\underline{\psi}_r^f)}{dt} + j \cdot \omega_r \cdot \underline{\psi}_r^f \\ \underline{\psi}_s^f = \underline{i}_s^f \cdot L_s + \underline{i}_r^f \cdot L_m \\ \underline{\psi}_r^f = \underline{i}_s^f \cdot L_m + \underline{i}_r^f \cdot L_r \end{cases} \quad (2.55.a, b, c, d)$$

Với $\omega_s = \omega + \omega_r$

Chỉ số phía trên bên phải “ f ” để chỉ hệ toạ độ quay dq .

2.2 Các cấu trúc ghép nối DFIG ứng dụng trong hệ thống phát điện

Hệ thống phát điện sử dụng tổ hợp ghép nối 2 DFIG đã được đề xuất ở những năm cuối thế kỷ 20. So với hệ thống phát điện sử dụng DFIG đơn lẻ, hệ thống phát điện sử dụng tổ hợp ghép nối 2 DFIG có những ưu điểm nổi bật như: chất lượng điện phát ra cao hơn, khả năng bám điện áp lưới tốt hơn, đối tượng điều khiển dễ hơn.

Hệ thống phát điện sử dụng tổ hợp ghép nối 2 DFIG có cấu trúc điều khiển đơn giản do trong kết cấu tự nhiên của hệ thống ghép nối DFIG, các tính chất của quá trình chuyển hóa cơ-điện và chuyển hóa điện-cơ của 2 DFIG được thuận nghịch với nhau, triệt tiêu và giảm được phần lớn các thành phần phải điều khiển phức tạp.

Cấu trúc ghép nối DFIG đầu tiên được đề xuất là cấu trúc ghép nối với bộ biến đổi công suất nằm ở phía stator hay còn gọi là cấu trúc điều khiển DFIG không chổi than. Giải pháp này đã được nghiên cứu, ứng dụng nhiều trong thực tế và đã được thương mại hóa với sản phẩm tổ hợp ghép nối 2 DFIG trong cùng một khung máy.

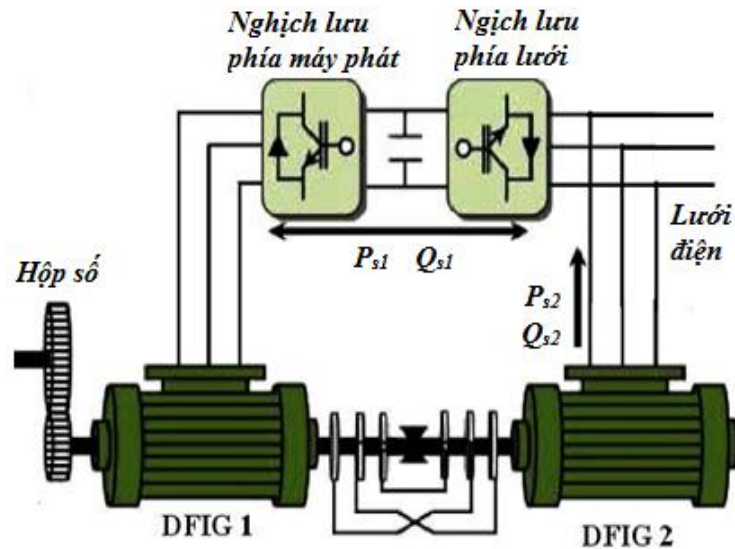
Cấu trúc ghép nối DFIG thứ 2 là cấu trúc với bộ biến đổi công suất nằm ở phía rotor hay còn gọi là cấu trúc điều khiển DFIG trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor, cấu trúc này được tác giả đề xuất và báo cáo ở các công trình [87][88].

Sau đây tác giả trình bày và phân tích tính chất của 2 giải pháp ghép nối DFIG ứng dụng trong hệ thống phát điện. Cụ thể, cấu trúc ghép nối với bộ biến đổi công suất nằm ở phía stator (cấu trúc điều khiển DFIG không chổi than) là cấu trúc đã được đề xuất và có nhiều kết quả công bố trong các công trình nghiên cứu trước đây, vì vậy tác giả chỉ trình bày mang tính chất khái quát, còn cấu trúc với bộ biến đổi công suất nằm ở phía rotor (cấu trúc điều khiển DFIG trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor) là cấu trúc mới, do tác giả đề xuất, vì vậy tác giả sẽ trình bày chuyên sâu và chi tiết hơn.

2.2.1 Cấu trúc phát điện sử dụng DFIG không chổi than

2.2.1.1 Cấu tạo và nguyên lý hoạt động

Cấu trúc ghép nối của hệ thống được mô tả đơn giản hóa ở hình 2.3:



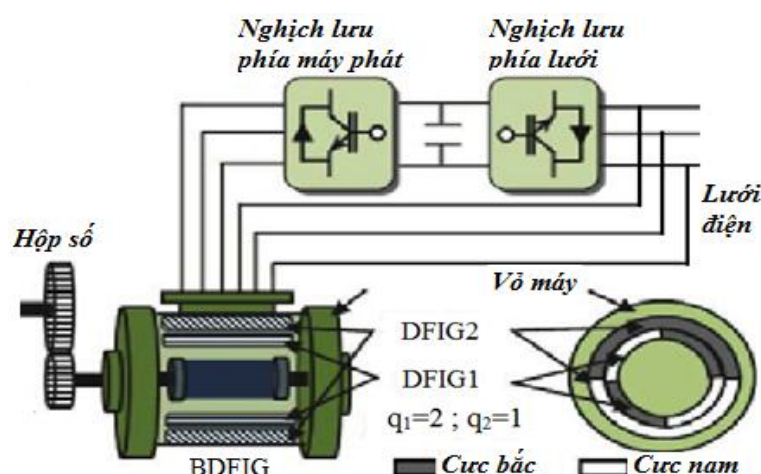
Hình 2.3: Cấu trúc ghép nối DFIG với bộ biến đổi công suất ở phía stator [97]

Hệ thống gồm 2 DFIG có rotor được ghép nối cứng trực với nhau về mặt cơ khí, đồng thời các cuộn dây rotor cũng được đấu nối trực tiếp với nhau về điện.

Các thiết bị điều khiển công suất được đặt ở phía stator của DFIG1, còn DFIG2 có mạch stator được nối và hòa trực tiếp với lưới điện.

Đặc điểm tự nhiên của hệ thống là khả năng đồng bộ giữa điện áp phát ra của DFIG2 và điện áp lưới là rất cao và rất bền vững [59], đồng thời chất lượng điện phát ra tốt hơn nhiều so với hệ thống phát điện sử dụng DFIG đơn lẻ [38]. Vì vậy, hệ thống này đang được ứng dụng ngày càng rộng rãi trong các máy phát điện hòa với lưới.

Ngày nay, hệ thống này đã được một số cơ sở nghiên cứu và cơ sở sản xuất trên thế giới tích hợp 2 DFIG trên cùng một khung máy, sơ đồ một máy điện tích hợp 2 DFIG được thể hiện như hình 2.4:



Hình 2.4: Máy điện dị bộ nguồn kép không chổi than [97]

Trong hình 2.4, stator của DFIG1 có số cặp cực $q_1=2$, stator của DFIG2 có số cặp cực $q_2=1$. Cuộn dây ở rotor của 2 DFIG được nối trực tiếp bên trong với nhau, vì vậy hệ thống này không cần vành góp và chổi than như hệ thống điều khiển DFIG đơn lẻ, do vậy hệ thống này còn gọi là hệ thống máy điện dị bộ nguồn kép không chổi than (Brushless Doubly Fed Induction Generator-BDFIG), kỹ thuật chế tạo BDFIG đã được nghiên cứu và trình bày chi tiết trong công trình [54].

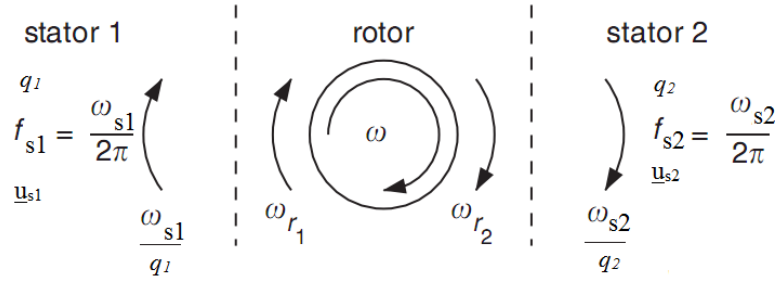
Vì số cặp cực của DFIG1 và DFIG2 có thể bằng nhau hoặc khác nhau, đầu nối giữa 2 cuộn dây rotor có 2 cách là đầu trùng pha hoặc đầu đảo pha, nên có 4 trường hợp để tích hợp lên máy điện BDFIG được thống kê ở bảng 2.1 [59][49]:

Bảng 2.1: Các trường hợp của máy điện dị bộ nguồn kép không chổi than

Đầu nối 2 rotor	$q_1 = q_2 = q$	Tốc độ đồng bộ	P_{s1} (pu)	P_{s2} (pu)	$P_g = P_{s1} + P_{s2}$
Trùng pha	có	Không sản xuất	$q \cdot \omega / \omega_g$	$-q \cdot \omega / \omega_g$	0
Trùng pha	không	$-\omega_g / \Delta q$	$q_1 \cdot \omega / \omega_g$	$-q_2 \cdot \omega / \omega_g$	$\Delta q \cdot \omega / \omega_g$
Đảo pha	có	$\omega_g / 2q$	$-q \cdot \omega / \omega_g$	$-q \cdot \omega / \omega_g$	$-2q \cdot \omega / \omega_g$
Đảo pha	không	$\omega_g / \sum q$	$-q_1 \cdot \omega / \omega_g$	$-q_2 \cdot \omega / \omega_g$	$-\sum q \cdot \omega / \omega_g$

Với q_1, q_2 là số cặp cực của DFIG1, DFIG2; Tốc độ đồng bộ là tốc độ quay của rotor mà tại đó điện áp ở stator của DFIG1 là điện áp một chiều; P_{s1} , P_{s2} và P_g là công suất tác dụng ở stator của DFIG1, DFIG2 và của lưới điện; ω là tốc độ góc của rotor; ω_g là tần số góc của điện áp lưới.

Nguyên lý hoạt động của BDFIG được thể hiện ở hình 2.5 với DFIG1 và DFIG2 lần lượt có tần số điện áp ở stator f_{s1}, f_{s2} ; tần số góc điện áp stator ω_{s1}, ω_{s2} ; tần số góc của từ thông stator $\omega_{s1}/q_1, \omega_{s2}/q_2$; tần số góc điện áp rotor ω_{r1}, ω_{r2} .



Hình 2.5: Nguyên lý hoạt động của BDFIG [54]

2.2.1.2 Phân tích các dòng năng lượng trong hệ thống

Xét trường hợp loại BDFIG có số cặp cực khác nhau, đầu nối dây ở rotor theo cách đảo pha.

Vì DFIG2 được nối trực tiếp với lưới nên tần số góc của điện áp stator bằng tần số góc của điện áp lưới $\omega_{s2} = \omega_g$.

Tần số góc điện áp stator của DFIG1 là [97]:

$$\omega_{s1} = (q_1 + q_2) \cdot \omega - \omega_{s2} \quad (2.56)$$

Tần số góc điện áp rotor của DFIG2 và DFIG1 lần lượt là:

$$\omega_{r2} = \omega_{s2} - q_2 \cdot \omega \quad (2.57)$$

$$\omega_{r1} = q_1 \cdot \omega - \omega_{s2} \quad (2.58)$$

Công suất ở stator của DFIG1 và DFIG2 là [59]:

$$P_{s1} = \frac{-q_1 \cdot \omega}{\omega_g} \cdot P_g \quad (2.59)$$

$$P_{s2} = \frac{-q_2 \cdot \omega}{\omega_g} \cdot P_g \quad (2.60)$$

Công suất ở rotor của DFIG1 và DFIG2 là [97]:

$$P_{r1} = -P_{s1} \frac{\omega_{r1}}{\omega_{s1}} \quad (2.61)$$

$$P_{r2} = -P_{s2} \frac{\omega_{r2}}{\omega_{s2}} \quad (2.62)$$

Vì 2 rotor của DFIG1 và DFIG2 được nối kín mạch nên $P_{r1} + P_{r2} = 0$, hay $P_{r1} = -P_{r2}$.

Công suất BDFIG phát lên lưới điện là P_g :

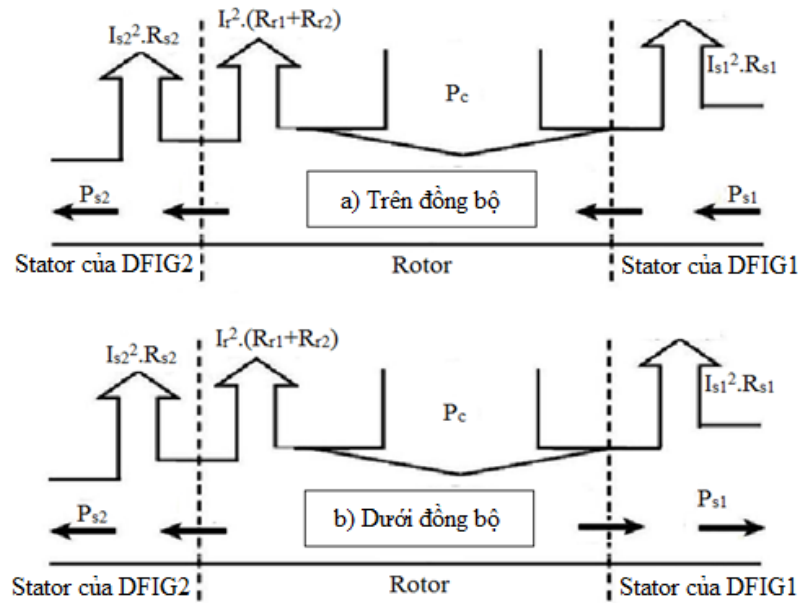
$$P_g = P_{s1} + P_{s2} \quad (2.63)$$

Từ các công thức (2.59) (2.60) (2.61) (2.62) ta có mối liên hệ công suất giữa stator của DFIG1 và DFIG2 như sau:

$$P_{s1} = -P_{s2} \frac{\omega_{s1}}{\omega_{s2}} \quad (2.64)$$

Công thức (2.64) cũng là công thức thể hiện mối liên hệ giữa công suất thiết bị điều khiển và công suất của DFIG2 phát lên lưới.

Trong thực tế, còn có tổn thất công suất ở stator và rotor của DFIG1 và DFIG2, giản đồ dòng năng lượng được thể hiện ở hình 2.6 [59][97]:



Hình 2.6: Giản đồ dòng năng lượng trong BDFIG

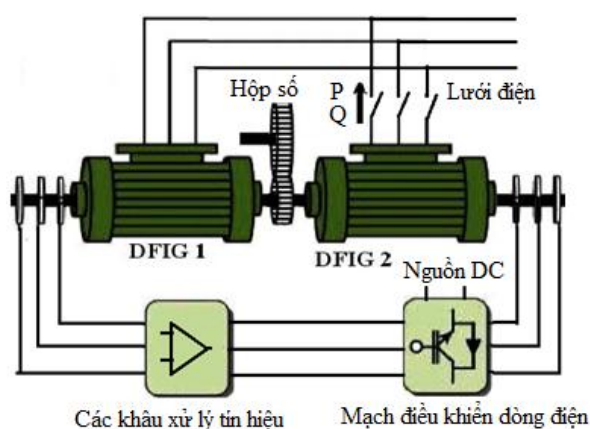
Theo giản đồ năng lượng, DFIG2 luôn phát công suất tác dụng, còn DFIG1 phát công suất tác dụng ở chế độ dưới đồng bộ và hấp thụ công suất tác dụng ở chế độ trên đồng bộ. Trên đây là giản đồ năng lượng trong trường hợp đấu đảo pha ở rotor. Khi đấu không đảo pha ở rotor thì dòng năng lượng qua DFIG1 sẽ theo chiều ngược lại, tức là DFIG1 phát công suất tác dụng ở chế độ trên đồng bộ và hấp thụ công suất tác dụng ở chế độ dưới đồng bộ.

Đã có những công trình nghiên cứu kỹ và so sánh chuyên sâu về chất lượng điện phát ra giữa BDFIG và DFIG đơn lẻ [38], kết quả cho thấy hệ thống phát điện dùng BDFIG có chất lượng điện hòa với lưới và khả năng bám điện áp lưới tốt hơn nhiều so với DFIG hoạt động độc lập. Tuy nhiên hệ thống BDFIG có hạn chế là kích thước khá lớn và tổn hao công suất ở rotor lớn hơn so với DFIG đơn lẻ.

Vì vậy, tác giả đề xuất một giải pháp ghép nối DFIG khác là giải pháp ghép với bộ biến đổi công suất ở phía rotor (cấu trúc điều khiển DFIG trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor), giải pháp này có kích thước giảm và tổn hao công suất ở rotor giảm so với giải pháp bộ biến đổi công suất nằm ở stator.

2.2.2 Cấu trúc phát điện sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor

Cấu trúc phát điện sử dụng DFIG trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor được thể hiện ở hình 2.7.



Hình 2.7: Cấu trúc phát điện sử dụng DFIG trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor

Hệ thống gồm: 2 máy điện dị bộ nguồn kép DFIG1 và DFIG2 có số cặp cực bằng nhau $q_1=q_2=q$, các khâu xử lý tín hiệu và mạch điều khiển dòng điện.

Nguyên lý hoạt động của hệ thống như sau:

DFIG1 có stator được nối trực tiếp với lưới điện nên tần số góc điện áp stator DFIG1 ω_{s1} bằng với tần số góc của điện áp lưới: $\omega_{s1} = \omega_g$.

Tần số góc của điện áp rotor DFIG1 là $\omega_{r1} = \omega_{s1} - q\omega$, tần số này được giữ nguyên qua các khâu xử lý tín hiệu và khâu điều khiển dòng điện, nên mạch điện rotor của DFIG2 có tần số góc là: $\omega_{r2} = \omega_{r1} = (\omega_{s1} - q\omega)$.

Tần số góc điện áp stator DFIG2 là:

$$\omega_{s2} = q\omega + \omega_{r2} = q\omega + (\omega_{s1} - q\omega) = \omega_{s1} = \omega_g$$

Vậy tần số góc điện áp stator của DFIG2 ω_{s2} luôn bằng với tần số góc của điện lưới ω_g và hoàn toàn không phụ thuộc vào tốc độ quay của rotor ω . Với tính chất tự nhiên này, hệ thống có khả năng bám điện áp lưới rất tốt và bền vững.

Trong cấu trúc hệ thống, DFIG1 không có chức năng phát công suất lên lưới mà chỉ có chức năng tạo các tín hiệu đồng dạng ở rotor, làm các tín hiệu đầu vào cho các khâu xử lý tín hiệu. Vì vậy, có thể lựa chọn DFIG1 là loại DFIG có kích thước và công suất nhỏ để giảm tổn thất công suất, giảm giá thành và giảm kích thước của hệ thống.

Các tín hiệu ở các khâu của cấu trúc này đều là các tín hiệu đồng dạng với tín hiệu điện áp cảm ứng ở rotor của DFIG1. Do vậy, phương pháp điều khiển DFIG theo cấu trúc này còn gọi là phương pháp điều khiển trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor.

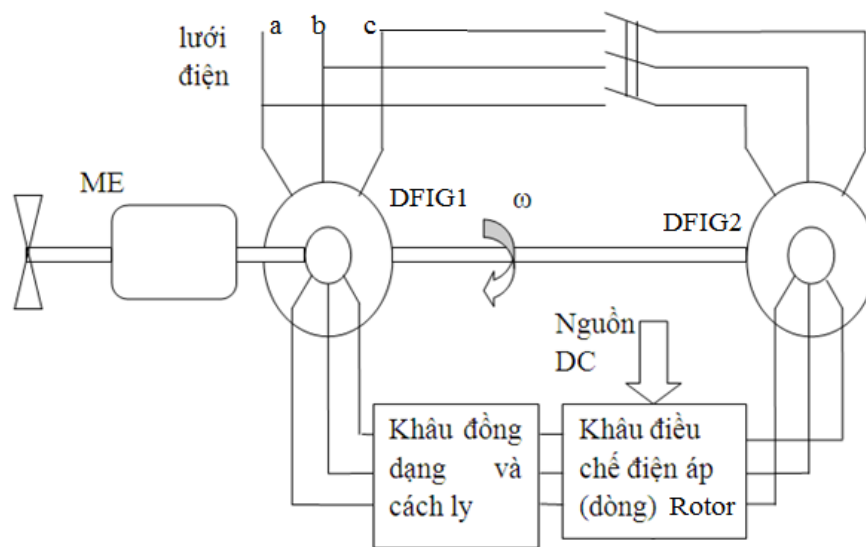
Ưu điểm đầu tiên của cấu trúc này như đã thấy là tần số điện áp của máy phát luôn trùng với tần số của điện áp lưới, và không phụ thuộc vào tốc độ quay của rotor, vì vậy cấu trúc này rất phù hợp ứng dụng trong máy phát đồng trục trên tàu thủy trong điều kiện tốc độ máy chính bị thay đổi. Các vấn đề còn lại là: giải quyết vấn đề trùng pha, trùng biên độ giữa điện áp máy phát với điện áp

lưới trước khi hòa đồng bộ với lưới; và điều khiển các thành phần công suất của máy phát đưa lên lưới sau khi hòa đồng bộ với lưới. Các vấn đề này sẽ được làm rõ ở khi ta phân tích mô hình toán của cấu trúc ghép nối này ứng dụng trong hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy.

2.3 Mô hình toán hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor

2.3.1 Cấu trúc và nguyên lý hoạt động

Kết cấu của hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor được thể hiện đơn giản hóa ở hình 2.8.



Hình 2.8: Cấu trúc hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor

Hệ thống gồm:

- Máy chính ME có trục được nối với DFIG1 và DFIG2.
- DFIG1: là máy điện dị bộ nguồn kép công suất nhỏ có tác dụng tạo tín hiệu suất điện động cảm ứng đồng dạng ở rotor.
- Khâu đồng dạng và cách ly: là mạch khuếch đại tín hiệu sử dụng khuếch đại thuật toán với trở kháng đầu vào vô cùng lớn.
- Mạch điều khiển dòng điện, điện áp rotor cho DFIG2

- DFIG2: là máy phát dị bộ nguồn kép có tác dụng phát ra điện áp hòa với lưới điện tàu thủy.

DFIG1 và DFIG2 có số cặp cực bằng nhau, được nối cứng trực với nhau sao cho tọa độ dây quấn ở rotor và stator của 2 máy trùng với nhau.

Vì trong hệ thống có 2 DFIG, nên các đại lượng và thông số của các DFIG được ký hiệu để phân biệt như sau: chỉ số 1 cho DFIG1, chỉ số 2 cho DFIG2, ví dụ: 1R là điện trở của DFIG1, 2L là điện cảm của DFIG2.

Theo mục 2.2.2, tần số góc của điện áp stator DFIG2 là $^2\omega_s$ luôn bằng với tần số góc của điện áp lưới ω_g và hoàn toàn không phụ thuộc vào tốc độ quay của rotor ω , vậy tần số của điện áp và dòng điện của máy phát lên lưới luôn bằng với tần số điện áp lưới. Với tính chất tự nhiên này, hệ thống có khả năng bám điện áp lưới rất tốt và bền vững.

2.3.2 Mô hình toán DFIG1 và DFIG2

Phương trình mô tả máy điện dị bộ nguồn kép trên hệ tọa độ tựa theo điện áp lưới, ứng dụng cho DFIG1 có hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} ^1\underline{u}_s^f = ^1R_s \cdot ^1\underline{i}_s^f + \frac{d(^1\underline{\psi}_s^f)}{dt} + j \cdot ^1\omega_s \cdot ^1\underline{\psi}_s^f \\ ^1\underline{u}_r^f = ^1R_r \cdot ^1\underline{i}_r^f + \frac{d(^1\underline{\psi}_r^f)}{dt} + j \cdot ^1\omega_r \cdot ^1\underline{\psi}_r^f \\ ^1\underline{\psi}_s^f = ^1\underline{i}_s^f \cdot ^1L_s + ^1\underline{i}_r^f \cdot ^1L_m \\ ^1\underline{\psi}_r^f = ^1\underline{i}_s^f \cdot ^1L_m + ^1\underline{i}_r^f \cdot ^1L_r \end{cases} \quad (2.65.a, b, c, d)$$

Vì điện trở của khâu đồng dạng và cách ly lớn, nên rotor của DFIG1 gần như hở mạch, nên $^1\underline{i}_r^f = 0$, thay vào phương trình (2.65c) và (2.65d), có từ thông stator và rotor của DFIG1 như sau:

$$\begin{cases} ^1\underline{\psi}_s^f = ^1\underline{i}_s^f \cdot ^1L_s \\ ^1\underline{\psi}_r^f = ^1\underline{i}_s^f \cdot ^1L_m \end{cases} \quad (2.66.a, b)$$

Thay $^1\underline{i}_r^f = 0$ và các phương trình từ thông (2.66.a,b) vào phương trình (2.65a) và (2.65b), có phương trình điện áp ở stator và rotor DFIG1 như sau:

$$\begin{cases} {}^1\underline{u}_s^f = {}^1R_s \cdot {}^1\underline{i}_s^f + {}^1L_s \cdot \frac{d({}^1\underline{i}_s^f)}{dt} + j\omega_s \cdot {}^1L_s \cdot {}^1\underline{i}_s^f \\ {}^1\underline{u}_r^f = {}^1L_m \cdot \frac{d({}^1\underline{i}_s^f)}{dt} + j\omega_r \cdot {}^1L_m \cdot {}^1\underline{i}_s^f \end{cases} \quad (2.67.a,b)$$

Tương tự, tập hợp hệ phương trình mô tả máy điện dị bộ nguồn kép trên hệ tọa độ quay theo vector điện áp lưới, áp dụng cho DFIG2, có hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} {}^2\underline{u}_s^f = {}^2R_s \cdot {}^2\underline{i}_s^f + \frac{d({}^2\underline{\psi}_s^f)}{dt} + j\omega_s \cdot {}^2\underline{\psi}_s^f \\ {}^2\underline{u}_r^f = {}^2R_r \cdot {}^2\underline{i}_r^f + \frac{d({}^2\underline{\psi}_r^f)}{dt} + j\omega_r \cdot {}^2\underline{\psi}_r^f \\ {}^2\underline{\psi}_s^f = {}^2\underline{i}_s^f \cdot {}^2L_s + {}^2\underline{i}_r^f \cdot {}^2L_m \\ {}^2\underline{\psi}_r^f = {}^2\underline{i}_s^f \cdot {}^2L_m + {}^2\underline{i}_r^f \cdot {}^2L_r \end{cases} \quad (2.68.a,b,c,d)$$

Để có kết quả mô hình toán thuận lợi cho quá trình điều khiển, cần phải xét hệ thống ở chế độ trước và sau khi hòa đồng bộ với lưới.

2.3.3 Mô hình hệ thống khi DFIG2 chưa hòa với lưới điện

DFIG2 chưa nối với lưới điện, tức là chưa có dòng điện phát ra ở stator của DFIG2 hay ${}^2\underline{i}_s^f = 0$, và dòng điện rotor lúc này là ${}^2\underline{i}_r^f = {}^2\underline{i}_{r0}^f$, thay ${}^2\underline{i}_s^f = 0$ và ${}^2\underline{i}_r^f = {}^2\underline{i}_{r0}^f$ vào phương trình (2.68c) và (2.68d), nhận được từ thông stator và rotor như sau:

$$\begin{cases} {}^2\underline{\psi}_s^f = {}^2\underline{i}_{r0}^f \cdot {}^2L_m \\ {}^2\underline{\psi}_r^f = {}^2\underline{i}_{r0}^f \cdot {}^2L_r \end{cases} \quad (2.69.a,b)$$

Thay các giá trị từ thông vào phương trình (2.68a) và (2.68b), có phương trình điện áp của stator và rotor của DFIG2 như sau:

$$\begin{cases} {}^2\underline{u}_s^f = {}^2L_m \cdot \frac{d({}^2\underline{i}_{r0}^f)}{dt} + j\omega_s \cdot {}^2L_m \cdot {}^2\underline{i}_{r0}^f \\ {}^2\underline{u}_r^f = {}^2R_r \cdot {}^2\underline{i}_{r0}^f + {}^2L_r \cdot \frac{d({}^2\underline{i}_{r0}^f)}{dt} + j\omega_r \cdot {}^2L_r \cdot {}^2\underline{i}_{r0}^f \end{cases} \quad (2.70.a,b)$$

Điện áp ra rotor của DFIG1 (ở phương trình 2.65b), qua khâu đồng dạng và cách ly, tạo điện áp là $\underline{u}_{ss}^f$ như sau:

$$\underline{u}_{ss}^f = G_{ss} \cdot \underline{u}_r^f = G_{ss} \cdot \left({}^1L_m \cdot \frac{d({}^1i_s^f)}{dt} + j \cdot \omega_r \cdot {}^1L_m \cdot {}^1i_s^f \right) \quad (2.71)$$

Ở khâu điều chế điện áp rotor DFIG2, bù thêm thành phần ${}^2R_r \cdot {}^2i_{r0}^f$, vậy điện áp đưa vào rotor của DFIG2 là:

$${}^2u_r^f = {}^1u_{ss}^f + {}^2R_r \cdot {}^2i_{r0}^f = {}^2R_r \cdot {}^2i_{r0}^f + G_{ss} \cdot \left({}^1L_m \cdot \frac{d({}^1i_s^f)}{dt} + j \cdot \omega_r \cdot {}^1L_m \cdot {}^1i_s^f \right) \quad (2.72)$$

So sánh với phương trình điện áp rotor của DFIG2 ở phương trình (2.70b) có:

$$\begin{aligned} {}^2R_r \cdot {}^2i_{r0}^f + G_{ss} \cdot \left({}^1L_m \cdot \frac{d({}^1i_s^f)}{dt} + j \cdot \omega_r \cdot {}^1L_m \cdot {}^1i_s^f \right) &= {}^2R_r \cdot {}^2i_{r0}^f + {}^2L_r \cdot \frac{d({}^2i_{r0}^f)}{dt} + j \cdot \omega_r \cdot {}^2L_r \cdot {}^2i_{r0}^f \\ \Rightarrow {}^2i_{r0}^f &= K_{12} \cdot {}^1i_s^f \quad (\text{với } K_{12} = G_{ss} \cdot {}^1L_m / {}^2L_r) \end{aligned} \quad (2.73)$$

Thay ${}^2i_{r0}^f = K_{12} \cdot {}^1i_s^f$ vào phương trình điện áp stator của DFIG2 (2.70a) nhận được:

$${}^2u_s^f = K_{12} \cdot \left({}^2L_m \cdot \frac{d({}^1i_s^f)}{dt} + j \cdot \omega_s \cdot {}^2L_m \cdot {}^1i_s^f \right) \quad (2.74)$$

Nghiên cứu lại phương trình (2.65a) là phương trình điện áp stator của DFIG1: ${}^1u_s^f = {}^1R_s \cdot {}^1i_s^f + {}^1L_s \cdot \frac{d({}^1i_s^f)}{dt} + j \cdot \omega_s \cdot {}^1L_s \cdot {}^1i_s^f$ (2.65.a)

Ta có nhận xét như sau:

- ${}^1u_s^f$ là điện áp của lưới điện.
- DFIG1 có rotor hở mạch nên không có từ trường phản ứng, không có phản ứng phản ứng và tất cả các đại lượng và thông số trong phương trình (2.65a) đều là không đổi, nên độ lệch pha của thành phần điện áp

${}^1u_{sl}^f = {}^1L_s \cdot \frac{d({}^1i_s^f)}{dt} + j \cdot \omega_s \cdot {}^1L_s \cdot {}^1i_s^f$ so với điện áp của lưới

${}^1u_s^f = {}^1R_s \cdot {}^1i_s^f + {}^1L_s \cdot \frac{d({}^1i_s^f)}{dt} + j \cdot \omega_s \cdot {}^1L_s \cdot {}^1i_s^f$ là không đổi.

- So sánh thành phần điện áp ${}^1\underline{u}_{sl} = L_s \cdot \frac{d({}^1\underline{i}_s^f)}{dt} + j\omega_s \cdot L_s \cdot {}^1\underline{i}_s^f$ với điện áp đầu ra của của DFIG2: ${}^2\underline{u}_s = K_{12}({}^2L_m \cdot \frac{d({}^1\underline{i}_s^f)}{dt} + j\omega_s \cdot {}^2L_m \cdot {}^1\underline{i}_s^f)$ ta thấy ${}^2\underline{u}_s / {}^1\underline{u}_{sl} = K_{12} \cdot {}^2L_m / L_s = \text{const}$, vậy ${}^2\underline{u}_s$ trùng pha với thành phần ${}^1\underline{u}_{sl}$.

Tới đây, ta có các kết quả quan trọng của hệ thống phát điện khi chưa hòa với lưới như sau:

- Điện áp đầu ra của máy phát luôn lệch pha so với điện áp lưới một góc $\alpha = \text{const}$ rất nhỏ và hoàn toàn không phụ thuộc vào tốc độ lai của máy chính.
- Vì độ lệch pha với góc α là cố định, nên để giải quyết việc triệt tiêu góc lệch pha này, ta chỉ cần xoay lệch trục DFIG1 và DFIG2 một góc α để bù lại sự lệch pha, hoặc độ lệch pha này rất nhỏ (do thành phần ${}^1R_s \cdot {}^1\underline{i}_s^f$ rất nhỏ so với điện áp lưới), nên có thể bỏ qua không cần hiệu chỉnh.
- Biên độ điện áp đầu ra của máy phát có thể điều chỉnh hoàn toàn tuyến tính thông qua điều chỉnh giá trị G_{ss} . Giả thiết để biên độ đầu ra của máy phát trùng với biên độ điện áp lưới, ta phải chỉnh giá trị $G_{ss} = G_0$. Có thể tìm G_0 từ hệ phương trình:

$$\begin{cases} {}^2\underline{u}_s / {}^1\underline{u}_{sl} = K_{12} \cdot {}^2L_m / L_s = 1 \\ K_{12} = G_{ss} \cdot {}^1L_m / {}^2L_r \end{cases} \quad (2.75)$$

Từ hệ phương 2.75, tính được G_0 như sau:

$$G_0 = K_{12} \cdot {}^2L_r / {}^1L_m = ({}^1L_s \cdot {}^2L_r) / ({}^1L_m \cdot {}^2L_m) \quad (2.76)$$

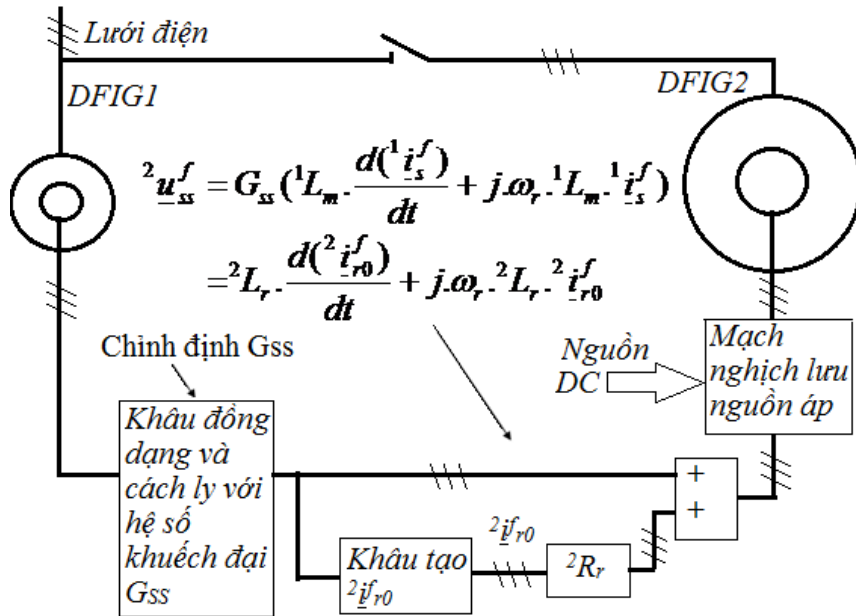
Như vậy có thể kết luận: trong trường hợp máy phát chưa nối với lưới, để điện áp đầu ra của máy phát trùng pha, trùng biên độ, trùng tần số với lưới ta thực hiện các khâu hiệu chỉnh và điều chỉnh sau:

- Giải quyết vấn đề trùng tần số giữa điện áp ra của máy phát với điện áp của lưới điện: ta thấy luôn được thỏa mãn (theo phần 2.2.2).
- Giải quyết vấn đề về trùng pha giữa điện áp máy phát và điện áp lưới: ta xoay lệch trục không gian giữa DFIG1 và DFIG2 một góc α để bù lại phần lệch pha, hoặc độ lệch này rất nhỏ có thể bỏ qua không cần hiệu chỉnh.

- Giải quyết vấn đề về trùng biên độ giữa điện áp máy phát với điện áp lưới ta thực hiện 2 khâu hiệu chỉnh:

- Bù thành phần điện áp ${}^2R_r \cdot {}^2\dot{i}_{r0}^f$ của rotor DFIG2 để có mối quan hệ điện áp stator giữa DFIG1 và DFIG2 là tỉ lệ.
- Chỉnh hệ số khuếch đại G_{ss} ở khâu đồng dạng và cách ly để điều chỉnh biên độ điện áp đầu ra của máy phát bằng biên độ của điện áp lưới.

Thấy rằng, ba khâu hiệu chỉnh trên đều không đổi, sau khi thiết kế các mạch hiệu chỉnh ở chế độ trước khi hòa đồng bộ, ta sẽ giữ nguyên trong chế độ hòa đồng bộ. Cuối cùng, ta có mô hình hệ thống khi chưa hòa với lưới được thể hiện như hình 2.9:



Hình 2.9: Sơ đồ khối hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor với mạch nghịch lưu nguồn áp khi chưa hòa lưới

Trong mô hình trên có khâu tạo dòng ${}^2\dot{i}_{r0}^f$, cần phân tích cấu tạo của khâu này.

Vì rotor của DFIG1 hở mạch, nên không có dòng chạy qua (hay ${}^1i_r^r=0$), nên phương trình điện áp rotor DFIG1 trên tọa độ cuộn dây rotor như sau:

$${}^1\dot{u}_r^r = {}^1R_r \cdot {}^1\dot{i}_r^r + \frac{d({}^1\psi_r^r)}{dt} = {}^1L_m \cdot \frac{d({}^1\dot{i}_s^r)}{dt} \quad (2.77)$$

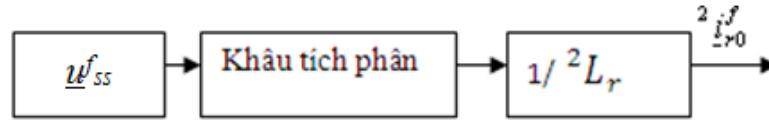
Từ phương trình (2.73), ta có ${}^1\dot{\underline{i}}_s^r = {}^2\dot{\underline{i}}_{r0}^r / K_{12}$, thay ${}^1\dot{\underline{i}}_s^r = {}^2\dot{\underline{i}}_{r0}^r / K_{12}$ vào phương trình (2.77) có:

$${}^2\dot{\underline{i}}_{r0}^r = \frac{K_{12}}{{}^1L_m} \int ({}^1\underline{u}_r^r) dt \quad (2.78)$$

Từ phương trình (2.75b) ta có $K_{12} = G_{ss} \cdot {}^1L_m / {}^2L_r$, thay vào phương trình (2.78) ta có:

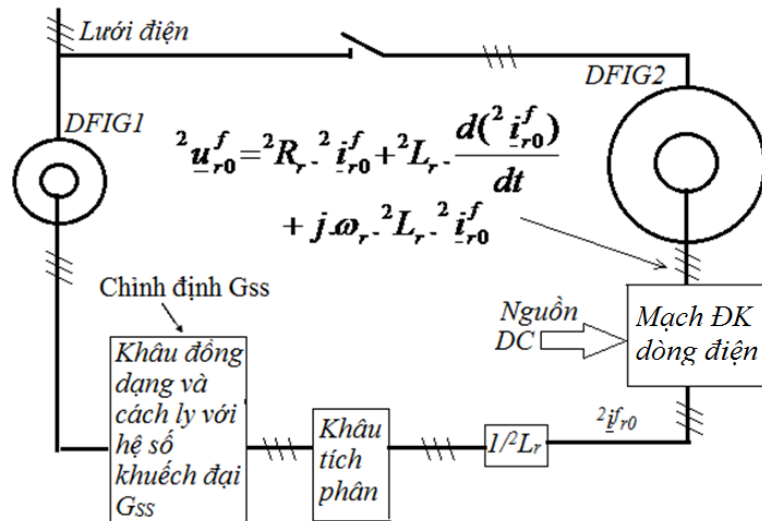
$${}^2\dot{\underline{i}}_{r0}^r = \frac{1}{{}^2L_r} \int (K_{ss} \cdot {}^1\underline{u}_r^r) dt = \frac{1}{{}^2L_r} \int (\underline{u}_{ss}^r) dt \quad (2.79)$$

Vậy có được khâu tạo dòng ${}^2\dot{\underline{i}}_{r0}^f$ như sau:



Hình 2.10: Sơ đồ khối khâu tạo ${}^2\dot{\underline{i}}_{r0}^f$

Trên đây là mô hình hệ thống hệ phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor với mạch điều khiển theo điện áp. Tuy nhiên, hệ thống với mạch điều khiển theo điện áp sẽ gây một số khó khăn trong quá trình tính toán điều khiển hệ thống sau này, vì vậy dựa vào mô hình hệ thống trên, ta xây dựng mô hình trên cơ sở mạch điều khiển theo dòng điện, được thể hiện như hình 2.11:



Hình 2.11: Sơ đồ khối hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor với mạch điều khiển dòng điện khi chưa hòa lưới

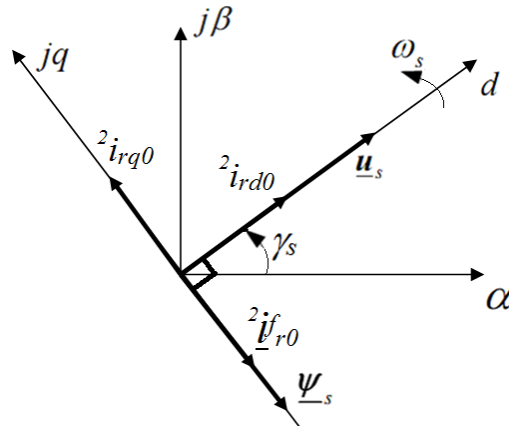
Các thành phần dòng điện rotor:

Phương trình điện áp stator của DFIG2 trên tọa độ cuộn dây stator (bỏ qua thành phần điện áp rơi trên điện trở) là ${}^2\underline{u}_s = \frac{d({}^2\underline{\psi}_s)}{dt}$ hoặc:

$${}^2\underline{u}_s = j \cdot \omega_s \cdot {}^2\underline{\psi}_s \quad (2.80)$$

Phương trình (2.80) cho thấy từ thông stator luôn chậm pha so với điện áp stator một góc khoảng 90° , và thành phần dòng ${}^2i_{r0}^f$ là thành phần tạo ra từ thông chính sinh ra điện áp ở stator, nên ${}^2i_{r0}^f$ trùng pha với từ thông chính, hay ${}^2i_{r0}^f$ chậm pha so với điện áp stator một góc 90° , vậy pha của $(-{}^2i_{r0}^f)$ chính là pha của dòng điện rotor ngang trục tựa theo vector điện áp lưới (${}^2i_{rq}$), và pha của dòng điện rotor dọc trục tựa theo vector điện áp lưới ${}^2i_{rd}$ sẽ chính là pha của $(-{}^2i_{r0}^f)$ trừ đi góc $\pi/2$, hay là pha của ${}^2i_{r0}^f$ cộng một góc $\pi/2$.

Vậy trong tọa độ tựa theo điện áp lưới, thành phần dòng điện đơn vị dọc trục của rotor (${}^2i_{rd0}$) có thể được tạo ra bằng cách cộng thêm pha của ${}^2i_{r0}^f$ một góc $\pi/2$. Thành phần dòng điện đơn vị ngang trục của rotor (${}^2i_{rq0}$) có thể được tạo ra bằng cách đảo pha ${}^2i_{r0}^f$. Quá trình tạo các thành phần dòng điện đơn vị dọc trục và ngang được thể hiện ở đồ thị vector hình 2.12.



Hình 2.12: Đồ thị vector quá trình tạo các thành phần dòng điện rotor DFIG2

Do ${}^2i_{r0}^f$ không đổi nên các thành phần dòng điện đơn vị ${}^2i_{rd0}$ và ${}^2i_{rq0}$ cũng không đổi. Vì vậy, ngay sau các tín hiệu thành phần dòng điện đơn vị ${}^2i_{rd0}$, ${}^2i_{rq0}$,

nếu thiết lập thêm các khâu khuếch đại, ta có thể điều khiển được độ lớn của các thành phần dòng điện dọc trục và ngang trục của rotor DFIG2.

2.3.4 Mô hình hệ thống sau khi DFIG2 hòa với lưới điện

Giả sử yêu cầu của máy phát là phải phát ra lưới điện dòng điện tải là ${}^2\dot{i}_s^f$, ta phải điều chỉnh dòng rotor có giá trị như sau: ${}^2\dot{i}_r^f = {}^2\dot{i}_{r0}^f + {}^2\dot{i}_{rt}^f$, với ${}^2\dot{i}_{r0}^f$ là thành phần dòng điện rotor ở chế độ không tải đã được điều chế cố định ở phần 2.3.3.

Như vậy ta phải điều chế thành phần dòng rotor bổ sung ${}^2\dot{i}_{rt}^f$ để stator của máy phát bơm ra lưới điện dòng ${}^2\dot{i}_s^f$ mà vẫn đảm bảo điện áp ra các cực stator của máy phát trùng pha, trùng tần số, trùng biên độ với điện áp lưới.

Thay ${}^2\dot{i}_r^f = {}^2\dot{i}_{r0}^f + {}^2\dot{i}_{rt}^f$ và ${}^2\dot{i}_s^f$ vào phương trình (2.68c), nhận được từ thông stator DFIG2 như sau:

$${}^2\psi_s^f = {}^2\dot{i}_s^f \cdot {}^2L_s + ({}^2\dot{i}_{r0}^f + {}^2\dot{i}_{rt}^f) \cdot {}^2L_m \quad (2.81)$$

Thay từ thông stator ${}^2\psi_s^f$ vào phương trình (2.68a), điện áp đầu ra stator DFIG2 như sau:

$${}^2\dot{u}_s^f = {}^2R_s \cdot {}^2\dot{i}_s^f + {}^2L_s \cdot \frac{d({}^2\dot{i}_s^f)}{dt} + {}^2L_m \cdot \frac{d({}^2\dot{i}_{r0}^f)}{dt} + {}^2L_m \cdot \frac{d({}^2\dot{i}_{rt}^f)}{dt} + j\omega_s \cdot {}^2\dot{i}_s^f \cdot {}^2L_s + j\omega_s \cdot {}^2\dot{i}_{r0}^f \cdot {}^2L_m + j\omega_s \cdot {}^2\dot{i}_{rt}^f \cdot {}^2L_m \quad (2.82)$$

Vì điện áp rơi trên điện trở stator 2R_s có thể bỏ qua được so với tổng điện áp rơi trên các thành phần còn lại nên:

$${}^2\dot{u}_s^f = {}^2L_s \cdot \frac{d({}^2\dot{i}_s^f)}{dt} + {}^2L_m \cdot \frac{d({}^2\dot{i}_{r0}^f)}{dt} + {}^2L_m \cdot \frac{d({}^2\dot{i}_{rt}^f)}{dt} + j\omega_s \cdot {}^2\dot{i}_s^f \cdot {}^2L_s + j\omega_s \cdot {}^2\dot{i}_{r0}^f \cdot {}^2L_m + j\omega_s \cdot {}^2\dot{i}_{rt}^f \cdot {}^2L_m \quad (2.83)$$

Vì DFIG2 nối với lưới, nên điện áp ra stator DFIG2 luôn bằng điện áp lưới và không đổi. Do vậy, so sánh phương trình (2.83) với phương trình (2.70b) có được:

$$\begin{aligned} {}^2\dot{u}_s^f &= {}^2L_m \cdot \frac{d({}^2\dot{i}_{r0}^f)}{dt} + j\omega_s \cdot {}^2\dot{i}_{r0}^f \cdot {}^2L_m = \\ & {}^2L_s \cdot \frac{d({}^2\dot{i}_s^f)}{dt} + {}^2L_m \cdot \frac{d({}^2\dot{i}_{r0}^f)}{dt} + {}^2L_m \cdot \frac{d({}^2\dot{i}_{rt}^f)}{dt} + j\omega_s \cdot {}^2\dot{i}_s^f \cdot {}^2L_s + j\omega_s \cdot {}^2\dot{i}_{r0}^f \cdot {}^2L_m + j\omega_s \cdot {}^2\dot{i}_{rt}^f \cdot {}^2L_m \end{aligned}$$

Cân bằng phương trình ta có:

$${}^2\dot{i}_{rt}^f = -({}^2L_s / {}^2L_m) \cdot {}^2\dot{i}_s^f \quad (2.84)$$

Viết lại phương trình (2.84) theo các thành phần dòng điện dọc trục và ngang trục ta có:

$$\begin{cases} {}^2i_{sd} = -(L_m/L_s)^2 i_{rd} \\ {}^2i_{sq} = -(L_m/L_s)^2 i_{rq} \end{cases} \quad (2.85.a,b)$$

Vấn đề về công suất:

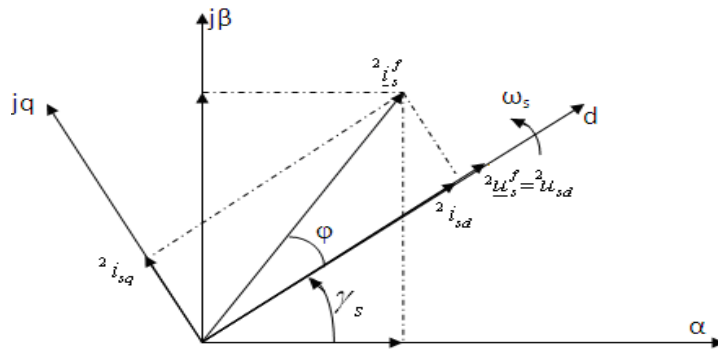
Công suất tác dụng và công suất phản kháng của máy phát DFIG2 là:

$$\begin{cases} P = 3 \cdot {}^2U_s \cdot {}^2I_s \cdot \cos\varphi \\ Q = 3 \cdot {}^2U_s \cdot {}^2I_s \cdot \sin\varphi \end{cases} \quad (2.86.a,b)$$

Với 2U_s , 2I_s là điện áp và cường độ dòng điện hiệu dụng một pha của máy phát, φ là độ lệch pha giữa điện áp và dòng điện trên một pha của máy phát.

Biểu diễn vector điện áp và dòng điện stator của máy phát trên tọa độ tựa theo điện áp lưới dq quay với vận tốc góc ω_s là ${}^2\underline{u}_s^f$ và ${}^2\underline{i}_s^f$, góc lệch pha giữa ${}^2\underline{u}_s^f$ và ${}^2\underline{i}_s^f$ vẫn là φ (hình 2.13), độ dài của vector ${}^2\underline{u}_s^f$ và ${}^2\underline{i}_s^f$ (ký hiệu là $|{}^2\underline{u}_s^f|$ và $|{}^2\underline{i}_s^f|$) chính là biên độ của điện áp và dòng điện nên ta có:

$$|{}^2\underline{u}_s^f| = {}^2U_s \cdot \sqrt{2}; |{}^2\underline{i}_s^f| = {}^2I_s \cdot \sqrt{2} \quad (2.87)$$



Hình 2.13: Vector dòng điện và điện áp stator DFIG2 trên tọa độ tựa theo điện áp lưới

Từ hình 2.13 có:

$$\begin{cases} {}^2u_{sd} = |{}^2\underline{u}_s^f| \\ {}^2i_{sd} = |{}^2\underline{i}_s^f| \cdot \cos\varphi \\ {}^2i_{sq} = |{}^2\underline{i}_s^f| \cdot \sin\varphi \end{cases} \quad (2.88.a,b,c)$$

Thay các phương trình (2.88.a,b,c) và các phương trình (2.87) vào các phương trình (2.86.a,b) có:

$$\begin{cases} P = (3/2) \cdot {}^2u_{sd} \cdot {}^2i_{sd} \\ Q = (3/2) \cdot {}^2u_{sd} \cdot {}^2i_{sq} \end{cases} \quad (2.89.a,b)$$

Thay ${}^2i_{sd}$ ở phương trình (2.85a) và ${}^2i_{sq}$ ở phương trình (2.85b) vào các phương trình (2.89.a,b) có:

$$\begin{cases} P = -(3/2) \cdot {}^2u_{sd} \cdot {}^2i_{rtd} \cdot ({}^2L_m / {}^2L_s) \\ Q = -(3/2) \cdot {}^2u_{sd} \cdot {}^2i_{rtq} \cdot ({}^2L_m / {}^2L_s) \end{cases} \quad (2.90.a,b)$$

Theo phần 2.3.3, các thành phần dòng điện đơn vị dọc trục và ngang trục của rotor DFIG2 (${}^2i_{rd0}, {}^2i_{rq0}$) là không đổi, và có thể điều khiển độ lớn dòng điện dọc trục ${}^2i_{rtd}$ và ngang trục ${}^2i_{rtq}$ bằng cách thay đổi các hệ số khuếch đại (đặt ngay sau các tín hiệu ${}^2i_{rd0}, {}^2i_{rq0}$), nên ta có:

$$\begin{cases} {}^2i_{rtd} = G_P \cdot {}^2i_{rd0} \\ {}^2i_{rtq} = G_Q \cdot {}^2i_{rq0} \end{cases} \quad (2.91.a,b)$$

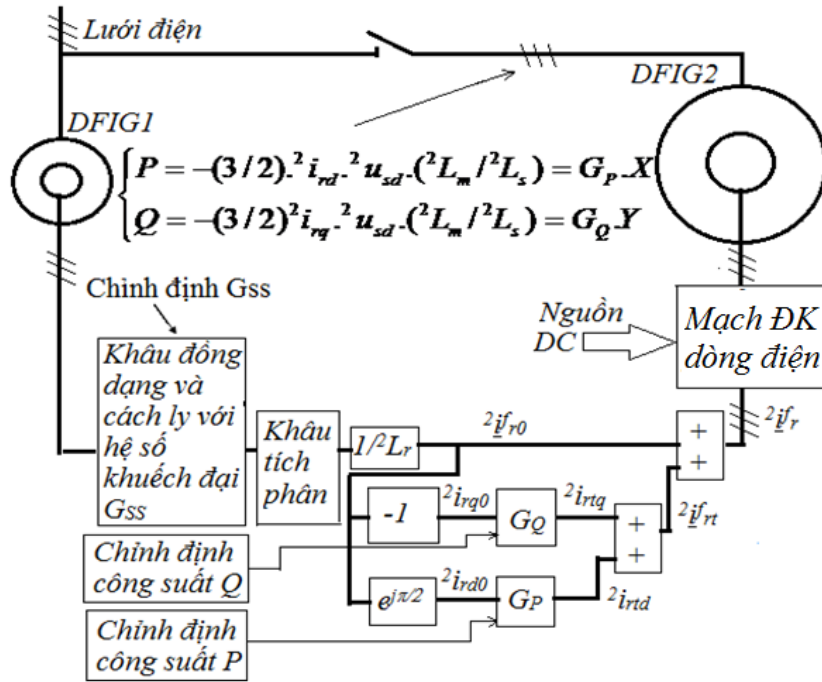
Thay ${}^2i_{rtd}$ và ${}^2i_{rtq}$ để tính P và Q có:

$$\begin{cases} P = -(3/2) \cdot (G_P \cdot {}^2i_{rd0}) \cdot {}^2u_{sd} \cdot ({}^2L_m / {}^2L_s) = G_P \cdot X \\ Q = -(3/2) \cdot (G_Q \cdot {}^2i_{rq0}) \cdot {}^2u_{sd} \cdot ({}^2L_m / {}^2L_s) = G_Q \cdot Y \end{cases} \quad (2.92.a,b)$$

Với X, Y là các thành phần không đổi vì trong tọa độ quay theo điện áp lưới, các thành phần ${}^2u_{sd}, {}^2i_{rd0}, {}^2i_{rq0}$ đều không đổi.

Vậy để điều chỉnh công suất tác dụng P của máy phát bơm ra lưới điện ta chỉ cần phải điều chỉnh hệ số G_P , điều chỉnh công suất phản kháng Q của máy phát bơm ra lưới điện ta chỉ cần phải điều chỉnh hệ số G_Q .

Sơ đồ khối mô hình tổng thể của hệ thống với mạch nghịch lưu nguồn dòng thể hiện ở hình 2.14:



Hình 2.14: Sơ đồ khối mô hình hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor khi hòa lưới

Thấy rằng các thành phần công suất tác dụng P và công suất phản kháng Q tỉ lệ với các hệ số G_P và G_Q . Như vậy, có thể điều chỉnh dễ dàng các thành phần công suất của máy phát bơm ra lưới bằng cách thay đổi các hệ số G_P và G_Q . Tuy nhiên, để điều chỉnh G_P và G_Q cần phải thực hiện qua thiết bị điều khiển.

2.3.5 Các ưu điểm của cấu trúc phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor

Phương pháp điều khiển DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor đã đáp ứng được rất tốt các vấn đề trùng pha, trùng biên độ, trùng tần số giữa điện áp ra của máy phát với điện áp của lưới điện tàu thủy.

Trong quá trình khảo sát cho thấy tín hiệu điện áp đồng dạng sẽ phản ứng tự nhiên tức thời khi điện áp lưới hoặc tốc độ rotor thay đổi. Vì vậy, phương pháp điều khiển DFIG dựa trên tín hiệu đồng dạng rotor sẽ cho kết quả điện áp đầu ra luôn bám theo điện áp lưới ngay cả khi điện áp lưới thay đổi hay tốc độ rotor của DFIG thay đổi. Do đó, mô hình này rất phù hợp ứng dụng trong máy phát đồng trục để hòa với lưới điện trên tàu thủy vì lưới điện tàu thủy là lưới

“mềm”, điện áp thường xuyên thay đổi và tốc độ máy chính (ME) cũng thường xuyên thay đổi theo các tình huống điều động trên biển.

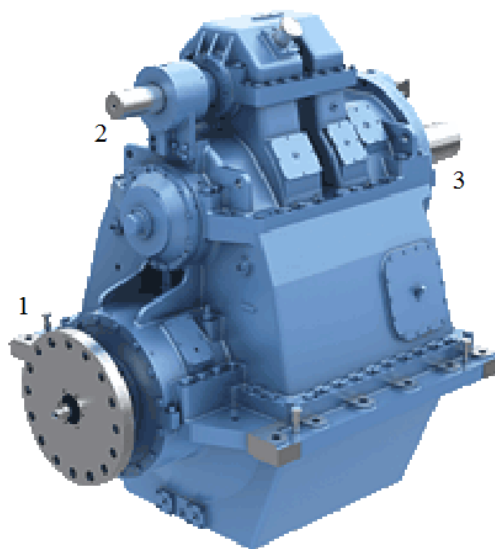
Mô hình có các khâu điều khiển các thành phần công suất cung cấp ra lưới điện rất đơn giản và hiệu quả: thành phần công suất tác dụng P tỷ lệ với hệ số G_P , thành phần công suất phản kháng Q tỷ lệ thuận với hệ số G_Q . Vì vậy, việc thiết kế bộ điều khiển các thành phần công suất sau này sẽ rất đơn giản. Bộ điều khiển trong hệ thống không phải tính toán nhiều nên không cần chọn chip điều khiển cấu hình cao, dẫn đến hạ giá thành bộ điều khiển của hệ thống.

Các mạch trong hệ thống đều là các mạch liên tục nên kết quả điện áp ra của máy phát hoàn toàn liên tục và sẽ có dạng sin chuẩn.

2.4 Xác định tỷ số truyền của hộp số của máy phát đồng trục

2.4.1 Cấu tạo, chức năng của hộp số trong máy phát đồng trục

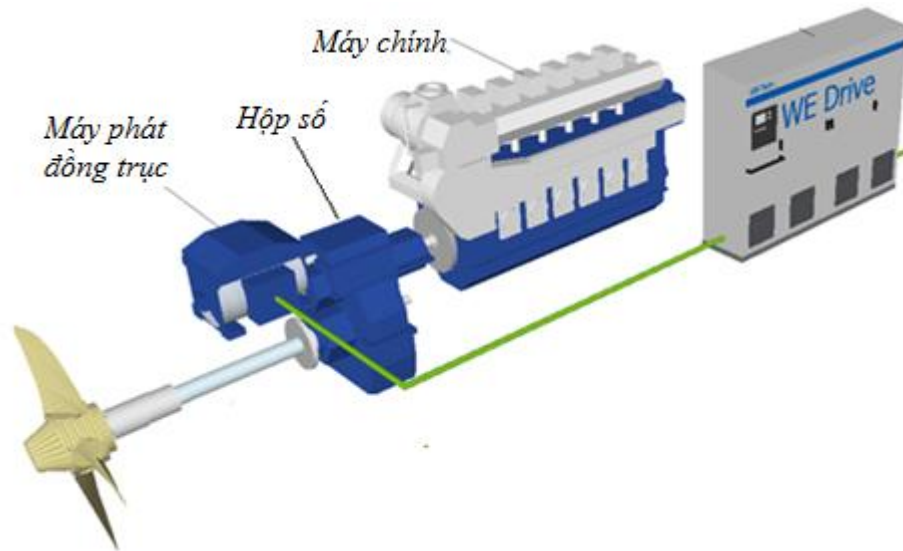
Hộp số trong máy phát đồng trục có chức năng truyền cơ năng từ máy chính sang chân vịt và sang máy phát điện. Hình ảnh một hộp số máy phát đồng trục được thể hiện ở hình 2.15.



Hình 2.15: Hộp số máy phát đồng trục trên tàu thủy

Trong hình 2.14, hộp số có 3 đầu trục để kết nối gồm: 1. Đầu trục đầu nối với trục chân vịt; 2. Đầu trục đầu nối với trục máy phát điện; 3. Đầu trục đầu nối với trục máy chính.

Vị trí của hộp số trong hệ thống phát điện đồng trục được thể hiện ở hình 2.16:



Hình 2.16: Vị trí của hộp số trong hệ thống phát điện đồng trục

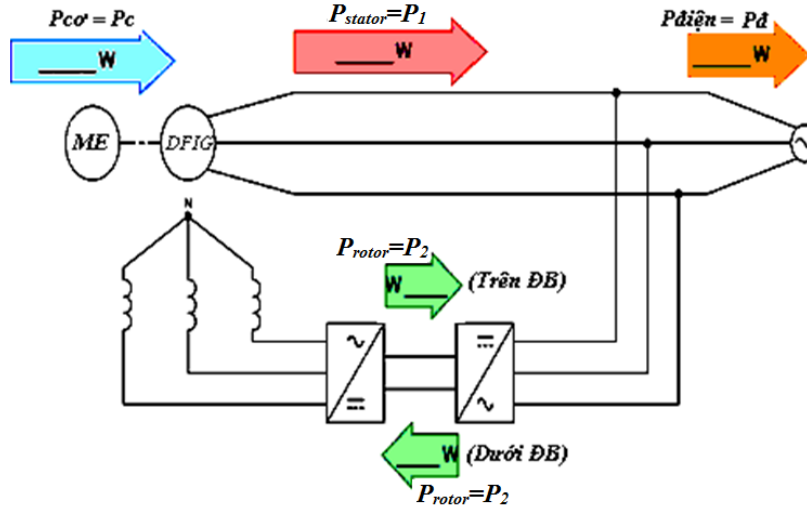
Với hành trình trên biển của tàu thủy, tốc độ máy chính thường ổn định với sai số trong phạm vi nhất định [5][49]. Vì vậy, có thể thiết kế hệ thống truyền chuyển động giữa máy chính và rotor của DFIG với tỉ số truyền hợp lý sao cho tốc độ góc của rotor DFIG ở hành trình trên biển nằm trong khoảng giá trị phù hợp để hiệu suất chuyển đổi cơ năng sang điện năng cao nhất, giảm chi phí nhiên liệu cho sản xuất một đơn vị điện năng trong hệ thống phát điện đồng trục. Vì vậy, phần tiếp theo sẽ nghiên cứu tìm khoảng tốc độ góc của rotor DFIG để hiệu suất chuyển đổi cơ năng từ máy chính sang điện năng của máy phát đồng trục là lớn nhất, trên cơ sở đó có thiết kế tỉ số truyền chuyển động giữa máy chính và rotor của DFIG hợp lý, nâng cao hiệu quả của máy phát điện đồng trục sử dụng DFIG.

2.4.2 Các dòng năng lượng qua máy phát

DFIG1 là máy điện dị bộ nguồn kép loại nhỏ, chỉ có chức năng tạo tín hiệu đồng dạng ở rotor, so với công suất máy phát thì công suất của DFIG1 rất nhỏ nên không ảnh hưởng tới các thành phần công suất trong hệ thống phát điện. Vì vậy trong mục 2.4 này, chỉ nghiên cứu các thành phần công suất ở DFIG2 (chức năng phát điện), các thông số máy điện, các thành phần công suất

trong mục 2.4 đều là của DFIG2, vì vậy không cần thêm chỉ số để phân biệt 2 DFIG như trong mục 2.3.

Cấu trúc dòng năng lượng qua DFIG2 được thể hiện ở hình 2.17:



Hình 2.17: Cấu trúc dòng năng lượng qua máy phát

DFIG2 có cuộn dây stator được nối trực tiếp với lưới điện ba pha, cuộn dây phía rotor được nối với hệ thống biến tần có khả năng điều khiển dòng năng lượng đi theo hai chiều. Hệ thống có khả năng hoạt động với hệ số trượt trong một phạm vi rộng đó là làm việc ở chế độ trên hoặc dưới đồng bộ, cho phép tận dụng tốt nguồn năng lượng được lai bởi máy chính (ME). Ở hai chế độ, máy đều cung cấp năng lượng lên lưới ở phía stator. Ở phía rotor, máy lấy năng lượng từ lưới ở chế độ dưới đồng bộ và hoàn năng lượng trở lại lưới ở chế độ trên đồng bộ.

2.4.3 Các thành phần công suất qua máy phát

Ta khảo sát hệ thống trên tọa độ tựa theo điện áp lưới tức là $u_{sd} = \text{const}$, $u_{sq} = 0$. Thông thường, hệ thống phát điện chỉ cung cấp ra lưới điện công suất công suất tác dụng P , còn công suất phản kháng nhỏ nên để đơn giản ta coi $Q = 0$. Tức là hệ thống phát điện chỉ cung cấp ra lưới dòng i_{sd} còn $i_{sq} = 0$.

Viết lại phương trình các thành phần điện áp stator (2.31) và (2.32) ở tọa độ dq trên cơ sở coi các thành phần từ thông không đổi (hay biến thiên chậm) và điện áp rơi trên R_s rất nhỏ so với điện áp lưới nên coi bằng 0 có:

$$\begin{cases} u_{sd} = -\omega_s \psi_{sq} \\ u_{sq} = \omega_s \psi_{sd} \end{cases} \quad (2.93.a,b)$$

Vì $u_{sd} = \text{const}$; $u_{sq} = 0$ nên:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = 0 \\ \psi_{sq} = \psi_g = -u_{sd} / \omega_s = \text{const} \end{cases} \quad (2.94.a,b)$$

Phương trình các thành phần từ thông stator:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \end{cases} \quad (2.95.a,b)$$

Thay các phương trình (2.95.a,b) vào phương trình 2.93a và 2.93b có:

$$\begin{cases} i_{sq} = \frac{\psi_g}{L_s} - \left(\frac{M_{sr}}{L_s} \right) i_{rd} \\ i_{sd} = - \left(\frac{M_{sr}}{L_s} \right) i_{rq} \end{cases} \quad (2.96.a,b)$$

Thay $i_{sq} = 0$ vào phương trình 2.96a ta có:

$$\psi_{sq} = \psi_g = i_{rq} M_{sr} \Rightarrow i_{rq} = \psi_{sq} / M_{sr} \quad (2.97)$$

Thay ψ_{sq} vào phương trình (2.93a) có:

$$u_{sd} = -\omega_s M_{sr} i_{rq} \quad (2.98)$$

Trên cơ sở các công thức trên, sau đây ta đi khảo sát chi tiết các thành phần công suất qua máy phát.

2.4.3.1 Công suất cơ của máy chính

Máy chính trên tàu thủy có tác dụng chính là lai chân vịt [5][49], trong hệ thống phát điện đồng trục máy chính lai thêm hệ thống máy phát, vì vậy phần tổn hao công suất để thắng các lực do ma sát ở các ổ trục, các cơ cấu truyền chuyển động ở máy chính hầu như sẽ không phát sinh thêm khi ta cho máy chính kéo thêm hệ thống máy phát. Vì vậy phần năng lượng thêm để tạo momen kéo máy phát đồng trục thể hiện rõ sự tiêu hao nhiên liệu của máy chính cho việc sản xuất ra điện năng.

Momen của máy chính kéo rotor DFIG là:

$$M_c = M + M_0$$

Trong đó M_0 là momen cản ở ổ đỡ rotor của DFIG:

$$M_0 = -P_0 / \omega < 0$$

M là momen điện từ :

$$M = \frac{3}{2} M_{sr} (i_{rd} i_{sq} - i_{rq} i_{sd})$$

Thay $i_{sq}=0$ và i_{sd} ở công thức (2.96b) vào công thức momen điện từ M có:

$$M = -\frac{3}{2} M_{sr} (i_{rq} i_{sd}) = \frac{3}{2} M_{sr} i_{rq} (M_{sr} / L_s) i_{rd} = \frac{3}{2} \left(\frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rq} i_{rd} \quad (2.99)$$

Vậy công suất cơ của máy chính để kéo rotor của DFIG là:

$$P_c = M_c \cdot \omega = \left(\frac{3}{2} \left(\frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} i_{rq} + M_0 \right) \omega \quad (2.100)$$

2.4.3.2 Công suất stator của DFIG

Công suất tác dụng của stator DFIG phát ra lưới điện là: $P_1 = 3U.I.\cos\varphi$, với U, I là điện áp và cường độ dòng điện hiệu dụng một pha của stator, φ là góc lệch pha giữa điện áp và dòng điện tức thời trên một pha của stator. Biểu diễn $[U_s]$ và $[I_s]$ trên tọa độ quay dq với vận tốc góc ω_s là $\underline{u}_s^f$ và $\underline{i}_s^f$, góc lệch pha giữa $\underline{u}_s^f$ và $\underline{i}_s^f$ vẫn là φ , độ dài của vector $\underline{u}_s^f$ và $\underline{i}_s^f$ (ký hiệu là $|\underline{u}_s^f|$ và $|\underline{i}_s^f|$) chính là biên độ của điện áp và dòng điện nên: $|\underline{u}_s^f| = U\sqrt{2}; |\underline{i}_s^f| = I\sqrt{2}$

Vậy, ta có công suất tác dụng của stator DFIG phát ra lưới điện:

$$P_1 = 3 \frac{|\underline{u}_s^f|}{\sqrt{2}} \frac{|\underline{i}_s^f|}{\sqrt{2}} \cos\varphi = (3/2) |\underline{u}_s^f| |\underline{i}_s^f| \cos\varphi$$

Theo hệ tọa độ tựa theo điện áp lưới: $|\underline{u}_s^f| = u_{sd}; |\underline{i}_s^f| \cos\varphi = i_{sd}$, nên ta có:

$$P_1 = (3/2) u_{sd} i_{sd} < 0 \quad (2.101)$$

Thay u_{sd} theo công thức (2.98), i_{sd} theo công thức (2.96b) có:

$$P_1 = \frac{3}{2} (-\omega_s M_{sr} i_{rq}) \left(-\frac{M_{sr}}{L_s} i_{rd} \right) = \frac{3}{2} \omega_s (M_{sr}^2 / L_s) i_{rd} i_{rq} \quad (2.102)$$

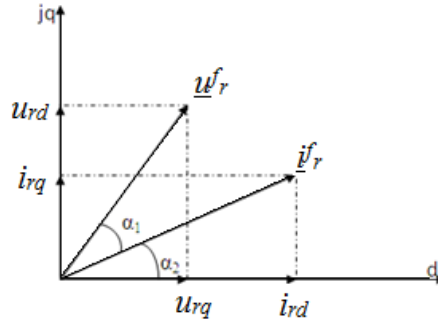
2.4.3.3 Công suất mạch rotor của DFIG

Biểu diễn $[U_r]$ và $[I_r]$ trên tọa độ quay dq với vận tốc góc ω_s là $\underline{u}_r^f$ và $\underline{i}_r^f$,

Giả sử $\underline{u}_r^f$ và $\underline{i}_r^f$ lệch pha nhau một góc α_1 như hình 2.18.

Ta có công suất tác dụng của mạch rotor:

$$P_2 = 3 \frac{|\underline{u}_r^f|}{\sqrt{2}} \frac{|\underline{i}_r^f|}{\sqrt{2}} \cos \alpha_1 = \frac{3}{2} |\underline{u}_r^f| \cdot |\underline{i}_r^f| \cos \alpha_1$$



Hình 2.18: Vector điện áp và dòng điện rotor trên hệ trục dq

Với $|\underline{u}_r^f|$ và $|\underline{i}_r^f|$ là độ dài vector $\underline{u}_r^f$ và $\underline{i}_r^f$

Theo hình 2.18 có:

$$\begin{aligned} |\underline{u}_r^f| \cdot |\underline{i}_r^f| \cos \alpha_1 &= |\underline{u}_r^f| \cdot |\underline{i}_r^f| \cdot \cos((\alpha_1 + \alpha_2) - \alpha_2) \\ &= |\underline{u}_r^f| \cdot |\underline{i}_r^f| \cdot [\cos(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot \cos(\alpha_2) + \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot \sin(\alpha_2)] \\ &= |\underline{u}_r^f| \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot |\underline{i}_r^f| \cos(\alpha_2) + |\underline{u}_r^f| \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot |\underline{i}_r^f| \sin(\alpha_2) = u_{rd} i_{rd} + u_{rq} i_{rq} \\ \Rightarrow P_2 &= (3/2)(u_{rd} i_{rd} + u_{rq} i_{rq}) \end{aligned} \quad (2.103)$$

Viết lại phương trình các thành phần điện áp rotor ở tọa độ dq (2.38) và (2.39) trên cơ sở coi các thành phần từ thông không đổi (hay biến thiên chậm), tuy nhiên ta không thể bỏ qua thành phần điện áp rơi trên R_r giống như trên mạch stator vì trong trường hợp tốc độ rotor gần bằng tốc độ đồng bộ thì thành phần điện áp rơi trên R_r sẽ đáng kể so với $\underline{u}_r^f$:

$$\begin{cases} u_{rd} = -(\omega_s - \omega) \psi_{rq} + R_r i_{rd} = -\omega_r \psi_{rq} + R_r i_{rd} \\ u_{rq} = (\omega_s - \omega) \psi_{rd} + R_r i_{rq} = \omega_r \psi_{rd} + R_r i_{rq} \end{cases} \quad (2.104.a,b)$$

Thay u_{rd} , u_{rq} vào phương trình (2.41) và (2.42) có:

$$\begin{cases} \psi_{rd} = L_r i_{rd} - (M_{sr}^2 / L_s) i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_r i_{rq} \end{cases} \quad (2.105.a,b)$$

Thay các công thức (2.105.a,b) vào phương trình (2.104.a,b) có:

$$\begin{cases} u_{rd} = -\omega_r L_r i_{rq} + R_r i_{rd} \\ u_{rq} = \omega_r (L_r i_{rd} - \frac{M_{sr}^2}{L_s} i_{rd}) + R_r i_{rq} \end{cases} \quad (2.106.a,b)$$

Thay u_{rq}, u_{rd} vào phương trình (2.103) có:

$$\begin{aligned} P_2 &= (3/2)(-\omega_r L_r i_{rq} + R_r i_{rd}) i_{rd} + (3/2)(\omega_r i_{rd} (L_r - M_{sr}^2 / L_s) + R_r i_{rq}) i_{rq} \\ &= -(3/2)\omega_r i_{rd} i_{rq} (M_{sr}^2 / L_s) + (3/2)R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) \\ \Rightarrow P_2 &= -\omega_r P_1 / \omega_s + (3/2)R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) \end{aligned} \quad (2.107)$$

Công thức (2.107) thể hiện rõ mối liên giữa công suất của thiết bị điều khiển P_2 với công suất phát lên lưới P_1 .

Xét $P_2=0$ khi:

$$\begin{aligned} -\omega_r P_1 / \omega_s + (3/2)R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) &= 0 \\ \Leftrightarrow \omega_r = \omega_{r0} = \omega_s \cdot \frac{(3/2)R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2)}{P_1} \end{aligned} \quad (2.108)$$

Từ phương trình (2.96.a,b) có:

$$\begin{cases} i_{rq} = \psi_g / M_{sr} \\ i_{rd} = -(L_s / M_{sr}) i_{sd} \end{cases}$$

Thay i_{rq}, i_{rd} vào biểu thức (2.108) có:

$$\omega_{r0} = \omega_s \frac{\frac{3}{2}R_r \left(\left(\frac{L_s}{M_{sr}} \right)^2 i_{sd}^2 + \left(\frac{\psi_g}{M_{sr}} \right)^2 \right)}{P_1} \quad (2.109)$$

Với ω_{r0} là tần số góc của dòng điện rotor để $P_2=0$.

Thay $\psi_g = -u_{sd} / \omega_s$ vào biểu thức tính ω_{r0} có:

$$\omega_{r0} = \omega_s \frac{\frac{3}{2}R_r \left(\left(\frac{L_s}{M_{sr}} \right)^2 u_{sd}^2 + \left(\frac{u_{sd}}{X_{sr}} \right)^2 \right)}{P_1} \quad (\text{với } X_{sr} = \omega_s M_{sr}).$$

Thay $\omega_{r0} = \omega_s - \omega_0$, biến đổi ta có:

$$\omega_0 = \omega_s \left(1 - \frac{\frac{3}{2} R_r \left(\left(\frac{L_s}{M_{sr}} \right)^2 i_{sd}^2 + \left(\frac{u_{sd}}{X_{sr}} \right)^2 \right)}{P_1} \right) \quad (2.110)$$

Với ω_0 là vận tốc góc của rotor để $P_2=0$.

2.4.4 Hiệu suất chuyển đổi cơ năng sang điện năng

Xét công thức tính công suất mạch stator (2.102):

$$P_1 = (3/2) \omega_s (M_{sr}^2 / L_s) i_{rd} i_{rq} \Rightarrow (3/2) \omega_s (M_{sr}^2 / L_s) i_{rd} i_{rq} = P_1 / \omega_s < 0$$

Thay vào công thức tính công suất cơ của máy chính (2.100) có:

$$P_c = (P_1 / \omega_s + M_0) \omega < 0 \quad (2.111)$$

Trên cơ sở các công thức trên, tiếp theo tác giả nghiên cứu hiệu suất chuyển đổi năng lượng trong hệ thống.

2.4.4.1 Xét trường hợp $\omega > \omega_0$

Khi $\omega > \omega_0$ thì $\omega_r < \omega_{r0}$, kết hợp với phương trình (2.107) ta có $P_2 \leq 0$, vậy mạch rotor phát công suất, giả sử hiệu suất của bộ biến tần là H_{bt} (H_{bt} giảm khi tần số đóng cắt của IGBT tăng và ngược lại [93]).

Mạch rotor phát công suất ra lưới điện công suất là: $P_2 \cdot H_{bt}$

Tổng công suất DFIG phát ra lưới điện là:

$$\begin{aligned} P_d &= P_1 + P_2 H_{bt} = (3/2) \omega_s (M_{sr}^2 / L_s) i_{rd} i_{rq} - (3/2) \omega_r i_{rd} i_{rq} \left(\frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) H_{bt} + (3/2) R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) H_{bt} \\ &= (3/2) \omega_s (M_{sr}^2 / L_s) i_{rd} i_{rq} - (3/2) (\omega_s - \omega) i_{rd} i_{rq} \left(\frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) H_{bt} + (3/2) R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) H_{bt} \end{aligned}$$

Hiệu suất chuyển đổi từ cơ năng sang điện năng của hệ thống phát điện đồng trục là:

$$H = \frac{P_1 + P_2 H_{bt}}{P_c} = \frac{(3/2)\omega_s (M_{sr}^2 / L_s) i_{rd} i_{rq} - (3/2)(\omega_s - \omega) i_{rd} i_{rq} \left(\frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) H_{bt} + (3/2)R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) H_{bt}}{\left(\frac{3}{2} \left(\frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} i_{rq} + M_0 \right) \omega} \quad (2.112)$$

Lấy đạo hàm hiệu suất H ta có:

$$\begin{aligned} H'_\omega &= \frac{(3/2)\omega_s (M_{sr}^2 / L_s) i_{rd} i_{rq} (1 - H_{bt}) + (3/2)R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) H_{bt}}{-\left(\frac{3}{2} \left(\frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} i_{rq} + M_0 \right) \omega^2} \\ &= \frac{P_1 (1 - H_{bt}) + (3/2)R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) H_{bt}}{-\left(\frac{P_1}{\omega_s} + M_0 \right) \omega^2} \end{aligned} \quad (2.113)$$

Mẫu số của H'_ω là: $-\left(\frac{P_1}{\omega_s} + M_0 \right) \omega^2 > 0$

Tử số của H'_ω : $T = P_1 (1 - H_{bt}) + (3/2)R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) H_{bt}$

Thành phần $P_{rt} = (3/2)R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) = (3/2)R_r |i_r^f|^2$ chính là phần công suất tổn thất nhiệt trên mạch rotor, hay chính là tổn hao đồng ở rotor [3], đặt $S_{rt} = P_{rt} / P_1$ (gọi là hệ số suy hao công suất đồng rotor). Với chế độ hoạt động bình thường của hệ thống phát điện đồng trục thì công suất tổn hao đồng rotor của DFIG rất nhỏ so với công suất stator DFIG phát ra lưới điện.

Đặt $S_{bt} = 1 - H_{bt}$ (gọi là hệ số suy hao công suất ở biến tần), suy ra $T = P_1 S_{bt} - P_1 S_{rt} H_{bt}$. Trong thực tế, hệ số suy hao công suất đồng ở rotor nhỏ hơn hệ số suy hao công suất ở biến tần: $S_{rt} < S_{bt}$ (vì độ dẫn điện của đồng ở rotor tốt hơn nhiều so với độ dẫn điện 2 IGBT mắc nối tiếp) nên:

$$T < P_1 S_{bt} - P_1 S_{rt} = P_1 (S_{bt} - S_{rt}) < 0 \quad (\text{vì } H_{bt} < 1; P_1 < 0)$$

Suy ra $H'_\omega < 0$, nên H_ω tăng khi ω giảm, vậy với trường hợp $\omega \geq \omega_0$ thì hiệu suất $H = \max$ khi tốc độ quay của rotor ω bằng ω_0 .

2.4.4.2 Xét trường hợp $\omega \leq \omega_0$

Từ phương trình (2.107) ta suy ra $P_2 \geq 0$, tức là mạch rotor tiêu thụ công suất.

Mạch rotor tiêu thụ lưới điện công suất là: P_2/H_{bt}

Tổng công suất DFIG phát ra lưới điện là:

$$P_d = P_1 + P_2 / H_{bt} = (3/2)\omega_s (M_{sr}^2 / L_s) i_{rd} i_{rq} - (3/2)\omega_r i_{rd} i_{rq} \left(\frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) / H_{bt} + (3/2)R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) / H_{bt}$$

$$\Rightarrow P_d = (3/2)\omega_s (M_{sr}^2 / L_s) i_{rd} i_{rq} - (3/2)(\omega_s - \omega) i_{rd} i_{rq} \left(\frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) / H_{bt} + (3/2)R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) / H_{bt} \quad (2.114)$$

Hiệu suất chuyển đổi từ cơ năng sang điện năng của hệ thống phát điện đồng trục là:

$$H = \frac{P_1 + P_2 / H_{bt}}{P_c} =$$

$$\frac{(3/2)\omega_s (M_{sr}^2 / L_s) i_{rd} i_{rq} - (3/2)(\omega_s - \omega) i_{rd} i_{rq} \left(\frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) / H_{bt} + (3/2)R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) / H_{bt}}{\left(\frac{3}{2} \left(\frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} i_{rq} + M_0 \right) \omega} \quad (2.115)$$

Lấy đạo hàm hiệu suất H ta có:

$$H'_\omega = \frac{(3/2)\omega_s (M_{sr}^2 / L_s) i_{rd} i_{rq} (1 - 1/H_{bt}) + (3/2)R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) / H_{bt}}{-\left(\frac{3}{2} \left(\frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} i_{rq} + M_0 \right) \omega^2}$$

$$= \frac{P_1 (1 - 1/H_{bt}) + (3/2)R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) / H_{bt}}{-\left(\frac{P_1}{\omega_s} + M_0 \right) \omega^2} \quad (2.116)$$

Mẫu số của H'_ω là: $-\left(\frac{P_1}{\omega_s} + M_0 \right) \omega^2 > 0$

Tử số của H'_ω : $T = P_1 - (P_1 - P_{rt}) / H_{bt}$

$$\Rightarrow T.H_{bt} = P_1(1 - S_{bt}) - P_1(1 - S_{rt}) = P_1(S_{rt} - S_{bt})$$

Hệ số suy hao công suất ở biến tần lớn hơn hệ số suy hao công suất đồng rotor nên $T > 0$, suy ra $H'_{\omega} > 0$, suy ra H tăng khi ω tăng, vậy với trường hợp $\omega \leq \omega_0$ thì hiệu suất $H = \max$ khi $\omega = \omega_0$.

Kết hợp 2 trường hợp ta có: để hiệu suất biến đổi từ cơ năng sang điện năng trong hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG đạt giá trị lớn nhất khi tốc độ góc rotor của DFIG là:

$$\omega_0 = \omega_s \left(1 - \frac{\frac{3}{2} R_r \left(\left(\frac{L_s}{M_{sr}} \right)^2 i_{sd}^2 + \left(\frac{u_{sd}}{X_{sr}} \right)^2 \right)}{P_1} \right) \quad (2.117)$$

Vậy trong quá trình khảo sát cả 2 trường hợp khi tốc độ góc rotor DFIG lớn hơn và nhỏ hơn ω_0 cho thấy: tốc độ góc rotor DFIG càng gần giá trị ω_0 thì hiệu suất chuyển đổi từ cơ năng sang điện năng càng cao. Trên cơ sở đó, ta có lựa chọn tỉ số truyền của hộp số giữa máy chính và máy phát đồng trục để tốc độ góc rotor của DFIG nằm trong khoảng giá trị gần ω_0 để nâng cao hiệu suất biến đổi cơ năng sang điện năng, tiết kiệm nhiên liệu sản xuất điện năng trên tàu thủy.

Nhận xét và kết luận chương 2

Trong chương 2, tác giả đã đề xuất và chứng minh mô hình hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor bằng các mô hình toán. Bước đầu chỉ ra các ưu điểm của mô hình đề xuất như:

Cấu trúc phát điện sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor đáp ứng được rất tốt các vấn đề trùng pha, trùng biên độ, trùng tần số giữa điện áp ra của máy phát với điện áp của lưới điện tàu thủy ngay cả khi điện áp lưới hay tốc độ rotor của DFIG thay đổi. Do đó, cấu trúc này rất phù hợp ứng dụng trong máy phát đồng trục để hòa với lưới điện trên tàu thủy vì lưới điện tàu thủy

là lưới “mềm”, điện áp thường xuyên bị thay đổi và tốc độ máy chính (ME) cũng thường xuyên thay đổi theo các tính hướng điều động trên biển.

Mô hình có các khâu điều khiển các thành phần công suất cung cấp ra lưới điện rất đơn giản. Vì vậy, việc thiết kế bộ điều khiển các thành phần công suất sau này sẽ đơn giản, dẫn đến hạ giá thành bộ điều khiển của hệ thống.

Các mạch trong hệ thống đều là các mạch liên tục, nên kết quả điện áp ra của máy phát hoàn toàn liên tục và sẽ có dạng sin chuẩn.

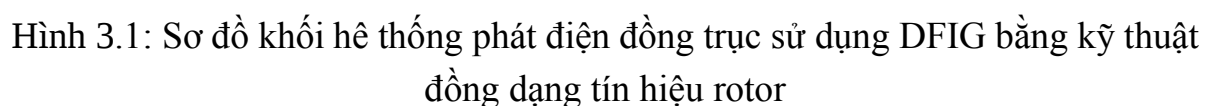
Cũng trong chương 2, tác giả đã khảo các dòng năng lượng qua hệ thống phát điện, nghiên cứu, đề xuất tìm khoảng tốc độ của DFIG để hiệu suất chuyển hóa cơ năng sang điện năng cao, làm cơ sở cho việc thiết kế hệ thống truyền chuyển động giữa máy chính và rotor của DFIG trong hộp số với tỉ số truyền hợp lý để nhiên liệu tiêu hao sản xuất cho một đơn vị điện năng là thấp nhất.

Giá trị tốc độ góc tối ưu không những chỉ phụ thuộc vào cấu trúc đặc điểm của DFIG mà nó còn phụ thuộc vào điện áp lưới và công suất máy phát cung cấp ra lưới (i_{sd}). Vậy để tính tốc độ góc tối ưu ta còn phải quan tâm tới công suất tác dụng phát ra lưới thường xuyên nhất của DFIG.

Trong quá trình khảo sát, tác giả cũng đưa ra những công thức chỉ mối liên hệ giữa công suất của thiết bị điều khiển với công suất phát lên lưới của hệ thống phát điện (ví dụ công thức 2.107), dựa vào mối liên hệ đó ta có thể chọn công suất mạch điều khiển rotor phù hợp.

Trong chương 2, tác giả đã đề xuất cấu trúc hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor và chứng minh tính đúng đắn và các ưu điểm của cấu trúc mới đề xuất bằng các mô hình toán hệ thống. Để làm rõ hơn nguyên lý hoạt động và phân tích được kỹ hơn các ưu nhược điểm của hệ thống đề xuất, trong chương 3, tác giả sẽ tiến hành khảo sát hệ thống bằng phương pháp mô phỏng trên phần mềm Matlab-Simulink.

Tổng hợp kết quả nghiên cứu ở mục 2.3 trong chương 2, ta có sơ đồ khối chi tiết của hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor được thể hiện ở hình 3.1:



Các khâu trong hệ thống gồm:

- *DFIG1*: là máy điện dị bộ nguồn kép công suất nhỏ, stator được nối trực tiếp với điện áp lưới, rotor hoạt động ở chế độ hở mạch. DFIG1 có tác dụng tạo tín hiệu suất điện động cảm ứng đồng dạng ở rotor.
- *Khâu đồng dạng và cách ly*: là mạch khuếch đại tín hiệu sử dụng IC khuếch đại thuật toán, với trở kháng đầu vào vô cùng lớn để rotor của DFIG1 hoạt động ở chế độ hở mạch.
- *Khâu tích phân*: thực hiện tích phân tín hiệu ở đầu ra của khâu đồng dạng và cách ly.
- *Các khâu khuếch đại tín hiệu G_P , G_Q và khâu đảo pha “-1”* được xây dựng bằng các IC khuếch đại thuật toán.
- *Khâu xoay 90° ($e^{j\pi/2}$)*: có nhiệm vụ tạo tín hiệu đầu ra vượt trước tín hiệu đầu vào một góc 90° .
- *Mạch công suất điều khiển dòng điện*: tạo ra dòng điện để đưa vào rotor của DFIG2. Mạch này có độ lớn dòng điện đầu ra bằng tín hiệu điện áp đầu vào.
- *DFIG2*: là máy phát điện dị bộ nguồn kép, có nhiệm vụ phát ra điện áp và dòng điện hòa với lưới điện.

DFIG1 và *DFIG2* có số cặp cực bằng nhau, được nối cứng trực với nhau sao cho các tọa độ góc của các cuộn dây rotor và stator của 2 máy trùng nhau.

Trong cấu trúc hệ thống, các khâu xử lý tín hiệu, mạch điều khiển dòng điện đều được thực ở mạch điện được nối trực tiếp với các cuộn dây pha của rotor DFIG1 và DFIG2. Và trong quá trình tính toán, điều khiển, các tín hiệu không phải chuyển đổi sang hệ trục tọa độ quay dq . Tuy nhiên, để làm rõ sự phù hợp và tính liên kết của các kết quả mô phỏng với các kết luận ở chương 2, tác giả chạy mô phỏng cả các đường đặc tính tín hiệu rotor của DFIG1 và DFIG2 ở hệ trục tọa độ quay theo vector điện áp lưới dq .

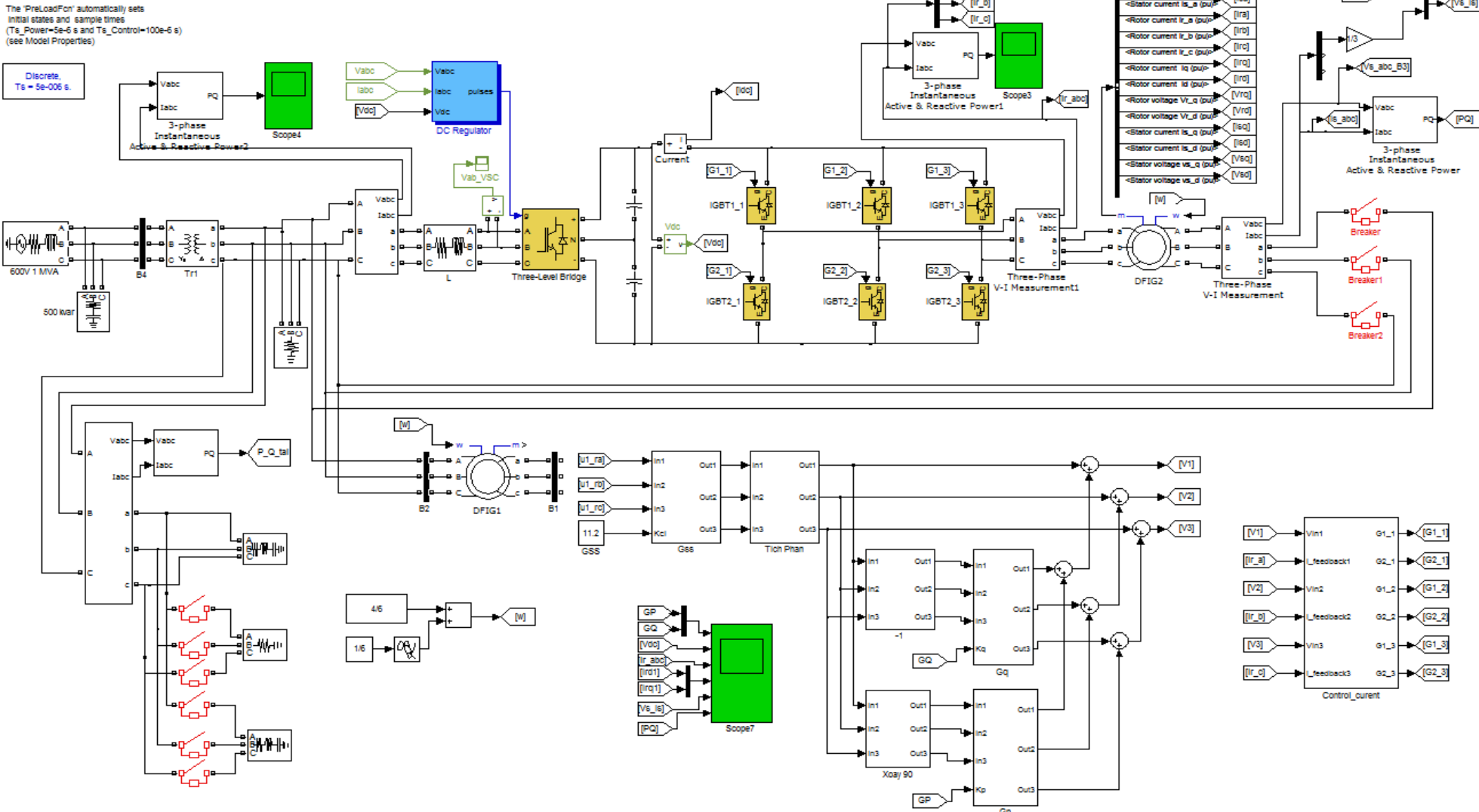
3.3 Xây dựng mô hình hệ thống

Tác giả xây dựng mô hình mô phỏng chi tiết toàn bộ các khâu trong hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor trên phần mềm Matlab-Simulink, được thể hiện đơn giản hóa ở hình 3.2, chi tiết các khâu như sau:

Các khâu khuếch đại G_{SS} , Khâu đảo pha “-1” và khâu tích phân: các khâu này sử dụng các phần tử có sẵn trong thư viện của matlab, kỹ thuật chế tạo các khâu này trong thực tế cũng rất đơn giản, thuận lợi bằng cách sử dụng các IC khuếch đại thuật toán.

Các khâu khuếch đại lập trình được G_P , G_Q (programable gain amplifier-PGA): là các mạch khuếch đại tín hiệu với hệ số khuếch đại có thể thay đổi được bằng cách lập trình. Các công trình nghiên cứu xây dựng PGA[81][82] cho thấy: hệ số khuếch đại có thể được điều khiển hoàn toàn tuyến tính nếu tần số tín hiệu nhỏ hơn 1MHz. Trong trường hợp cần mở rộng phạm vi hệ số khuếch đại, ta có thể thực hiện phương pháp ghép tầng các PGA[76].

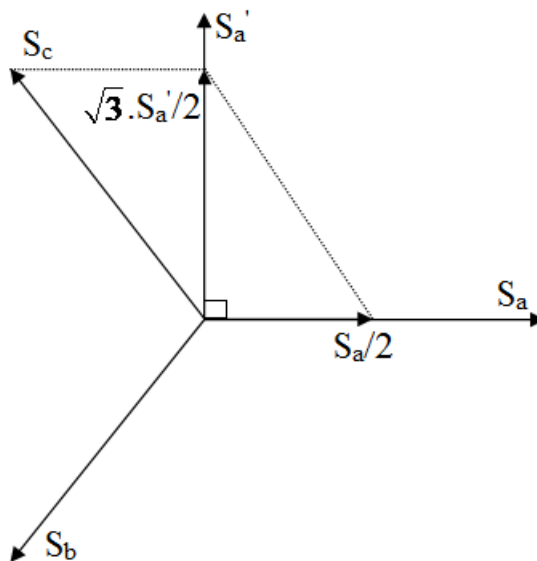
Nhiệm vụ của các PGA trong hệ thống là điều chỉnh trực tiếp các thành phần dòng điện rotor DFIG2 dọc trục và ngang trục $^2i_{rtd}$, $^2i_{rtq}$, từ đó điều chỉnh được công suất tác dụng P , và công suất phản kháng Q của DFIG2 phát lên lưới.



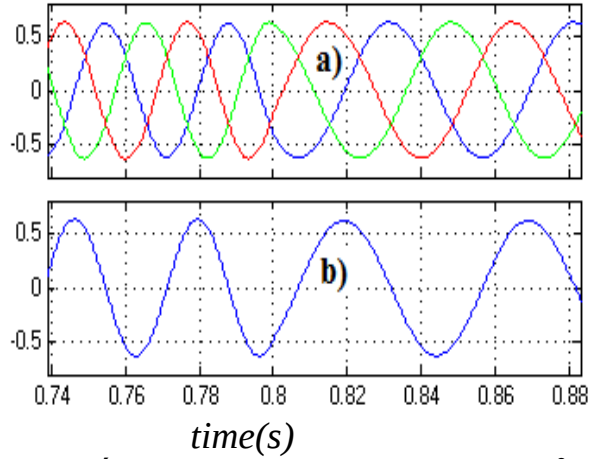
Hình 3.2: Mô hình mô phỏng hệ thống

Khâu xoay 90^0 : có nhiệm vụ tạo tín hiệu ở từng pha nhanh hơn 90^0 . Có thể thực hiện khâu này bằng cách thực hiện phép tính đạo hàm từng tín hiệu, tuy nhiên nhược điểm của phương pháp tính đạo hàm là biên độ đầu ra của tín hiệu bị thay đổi khi tần số của tín hiệu thay đổi. Vì vậy, tác giả đề xuất một phương pháp thực hiện khâu xoay 90^0 sau:

Giả sử khâu có 3 tín hiệu đầu vào là S_a, S_b, S_c và 3 tín hiệu phải tạo ở đầu ra là S_a', S_b', S_c' . Vì tín hiệu ở các pha là đối xứng nên có thể tạo tín hiệu S_a' nhanh pha hơn tín hiệu S_a một góc 90^0 bằng cách thực hiện công thức sau: $S_a' = (2/\sqrt{3}).(0.5S_a + S_c)$. Quá trình tạo S_a' được giải thích cụ thể ở đồ thị vector hình 3.3, chạy thử khâu này cho ta kết quả ở hình 3.4. Phương pháp này có ưu điểm là thực hiện đơn giản, tuy nhiên nó có nhược điểm là chỉ sử dụng được trong trường hợp các tín hiệu là ba pha đối xứng.



Hình 3.3 Đồ thị vector quá trình tạo S_a'

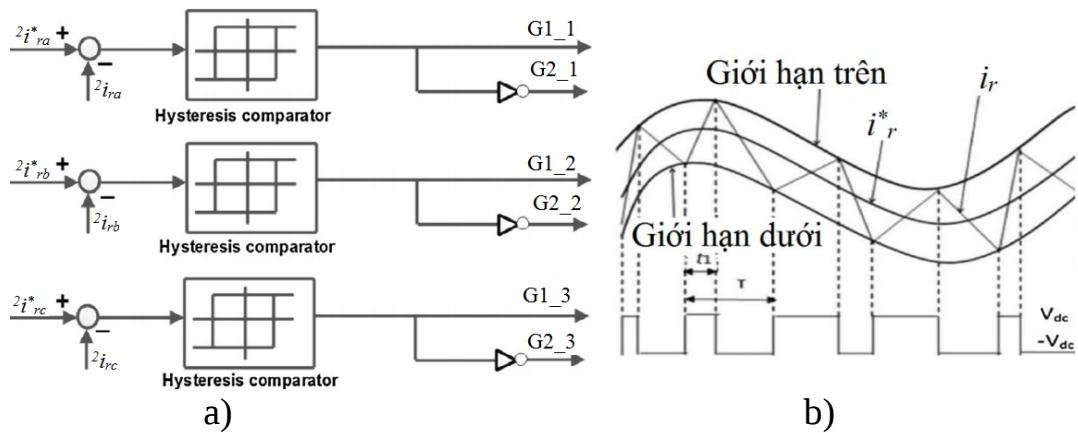


Hình 3.4: Kết quả mô phỏng khâu xoay 90°

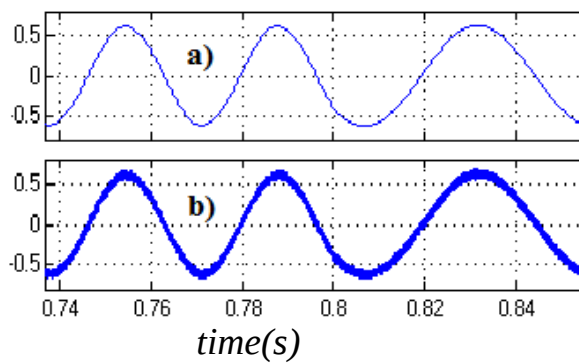
Mạch điều khiển dòng điện: các tín hiệu đầu vào của mạch được đưa đến từ các khâu xử lý tín hiệu, độ lớn của các tín hiệu đầu vào này chính là giá trị dòng điện mong muốn ($^2i_{r_abc}^*$). Trong mô hình, tác giả điều khiển độ lớn dòng điện đầu ra bằng phương pháp Hysteresis [55][60], thể hiện ở hình 3.5.

Phương pháp điều khiển dòng điện Hysteresis được ứng dụng trong các trường hợp khi cần điều khiển giá trị dòng điện bám theo giá trị của tín hiệu mẫu cho trước. Trong mô hình đề xuất (hình 3.1), giá trị của các tín hiệu 3 pha $^2i_{r_abc}^*$ từ các khâu xử lý tín hiệu chính là giá trị đặt của dòng điện rotor DFIG2 ($^2i_{r_abc}$).

Ví dụ xét pha A, nếu giá trị thực tế thực tế $^2i_{ra}$ nhỏ hơn giá trị đặt $^2i_{ra}^*$, IGBT1 mở để tăng dòng, và ngược lại, IGBT2 mở để giảm dòng. Để tránh hiện tượng trùng dẫn, trong khâu so sánh (Hysteresis comparator) có cài đặt thêm khâu trễ theo mức. Chạy mạch điều khiển dòng điện, có kết quả mô phỏng ở được thể hiện ở hình 3.6.



Hình 3.5: Điều khiển dòng điện theo phương pháp Hysteresis



Hình 3.6: Kết mô phỏng mạch điều khiển dòng điện

DFIG1 và *DFIG2*: là các máy phát dị bộ nguồn kép, có các tham số được thống kê chi tiết ở bảng 3.1:

Bảng 3.1: Các thông số của DFIG1 và DFIG2

	S(VA)	U(V)	f(HZ)	Rs (Ω)	Ls (H)	Rr(Ω)	Lr(H)	Lm(H)	q
DFIG1	1500	400	60	0.512	3.93e-3	0.690	3.92e-3	0.2344	2
DFIG2	1.000.000	400	60	1.56e-3	3.9e-4	1.62e-3	3.95e-4	0.0923	2

Các khâu khác: ngoài ra, trong mô hình mô phỏng còn có thêm các khâu khác để đảm bảo tính sát thực của toàn bộ mô hình hệ thống như: hệ thống điện áp lưới gồm máy phát và dây dẫn, tải tiêu thụ điện, máy biến áp Tr1, mạch chỉnh lưu–nghịch lưu ở phía lưới bằng phương pháp 3 mức, các thiết bị đóng cắt Breaker, các thiết bị đo điện áp, dòng điện...

3.4 Cách chỉnh định và vận hành hệ thống

3.4.1 Chỉnh định hệ thống khi stator của DFIG2 chưa nối với lưới

Ta cài đặt các hệ số khuếch đại G_P và G_Q bằng 0. Lúc này, pha và tần số của điện áp stator *DFIG2* luôn trùng pha và tần số với điện áp lưới, còn biên độ của điện áp ở stator *DFIG2* phụ thuộc vào độ lớn của hệ số khuếch đại G_{SS} ở khâu đồng dạng và cách ly. Vì vậy, có thể điều chỉnh biên độ điện áp stator *DFIG2* bằng cách điều chỉnh độ lớn G_{SS} . Sau khi điều chỉnh xong, các điều kiện để hòa stator của *DFIG2* với lưới đều thỏa mãn tốt (Điện áp máy phát trùng pha, trùng biên độ, trùng tần số với điện áp lưới), ta có thể nối stator của *DFIG2* với lưới.

3.4.2 Vận hành hệ thống sau khi stator của DFIG2 nối với lưới

Theo kết quả ở phần 2.3.4 trong chương 2, công suất tác dụng (P) và công suất phản kháng (Q) của stator *DFIG2* tỉ lệ với hệ số G_P và G_Q :

$$\begin{cases} P = G_P \cdot X \\ Q = G_Q \cdot Y \end{cases} \quad (3.1)$$

Với X, Y là các giá trị không đổi và không phụ thuộc vào tốc độ quay của rotor mà chỉ phụ thuộc vào cấu tạo *DFIG1* và *DFIG2*.

Vì vậy, công suất tác dụng (P) và công suất phản kháng (Q) của *DFIG2* phát lên lưới có thể được điều khiển độc lập bằng cách điều chỉnh độ lớn hệ số G_P và G_Q ở các khâu khuếch đại (tính chất này sẽ được thể hiện rõ hơn ở các kết quả mô phỏng hệ thống).

3.5 Mô phỏng các đặc tính của các khâu trong hệ thống

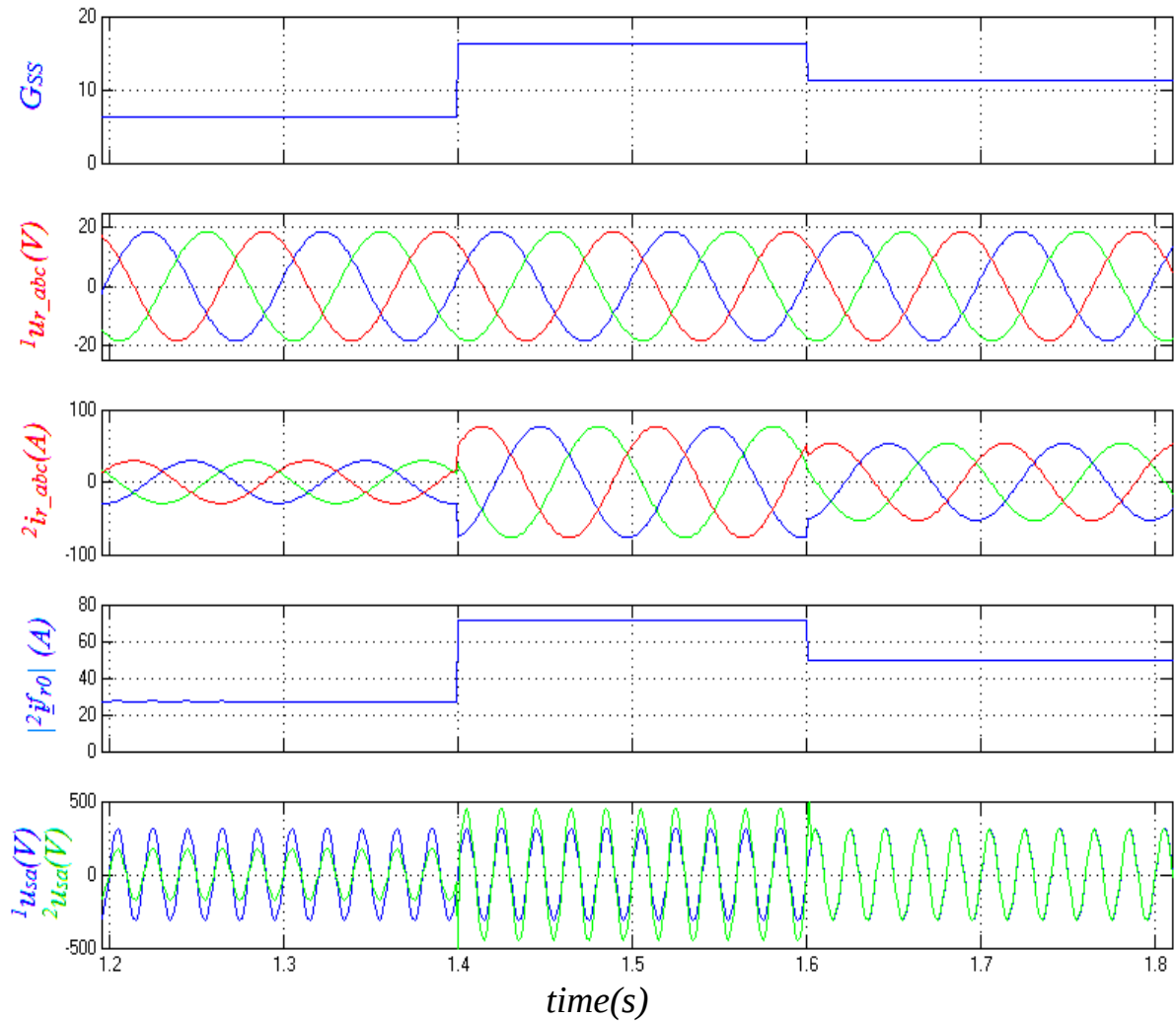
Ta chạy mô phỏng đặc tính các khâu ở 2 giai đoạn: trước khi máy phát hòa lưới và sau khi máy phát hòa lưới. Vì *DFIG2* có vai trò là máy phát, nên để thuận tiện, ta quy ước chiều dương dòng điện là chiều từ *DFIG2* đi ra lưới.

3.5.1 Các kết quả mô phỏng khi hệ thống phát điện chưa hòa với lưới

Quá trình chỉnh định G_{SS} : Theo kết luận ở mục 2.3.3, tần số và pha của điện áp máy phát luôn trùng với tần số và pha của điện áp lưới, còn biên độ của điện áp máy phát có thể điều chỉnh thông qua hệ số khuếch đại G_{SS} ở khâu đồng

dạng và cách ly. Vì vậy, ta thực hiện chạy mô phỏng hệ thống để kiểm chứng bằng cách cho hệ số G_{ss} thay đổi, kết quả được thể hiện ở hình 3.7, gồm các đường đặc tính sau: Giá trị hệ số khuếch đại của khâu cách ly G_{ss} ; Điện áp đồng dạng ở các pha rotor của DFIG1 ${}^1u_{r_abc}$; Dòng điện ở các pha của rotor DFIG2 ${}^2i_{r_abc}$; Độ lớn vector dòng điện rotor DFIG2 ở tọa độ quay theo vector điện áp lưới $|{}^2\vec{i}_{r0}|$; Điện áp pha A của DFIG1 và DFIG2 ${}^1u_{sa}, {}^2u_{sa}$.

Theo kết quả mô phỏng hình 3.7, điện áp pha A ở stator của máy phát ${}^2u_{sa}$ có tần số và pha luôn trùng với điện áp pha A của lưới ${}^1u_{sa}$, còn biên độ của ${}^2u_{sa}$ có thể điều chỉnh tỉ lệ bằng cách điều chỉnh hệ số khuếch đại G_{ss} . Tại thời điểm $t=1.6s$, ta chỉnh định $G_{ss}=11.2$, lúc đó điện áp ${}^2u_{sa}$ trùng biên độ, trùng pha, trùng tần số với điện áp lưới, đảm bảo đủ điều kiện sẵn sàng hòa hệ thống phát điện với lưới.



Hình 3.7: Kết quả mô phỏng quá trình chỉnh định G_{ss}

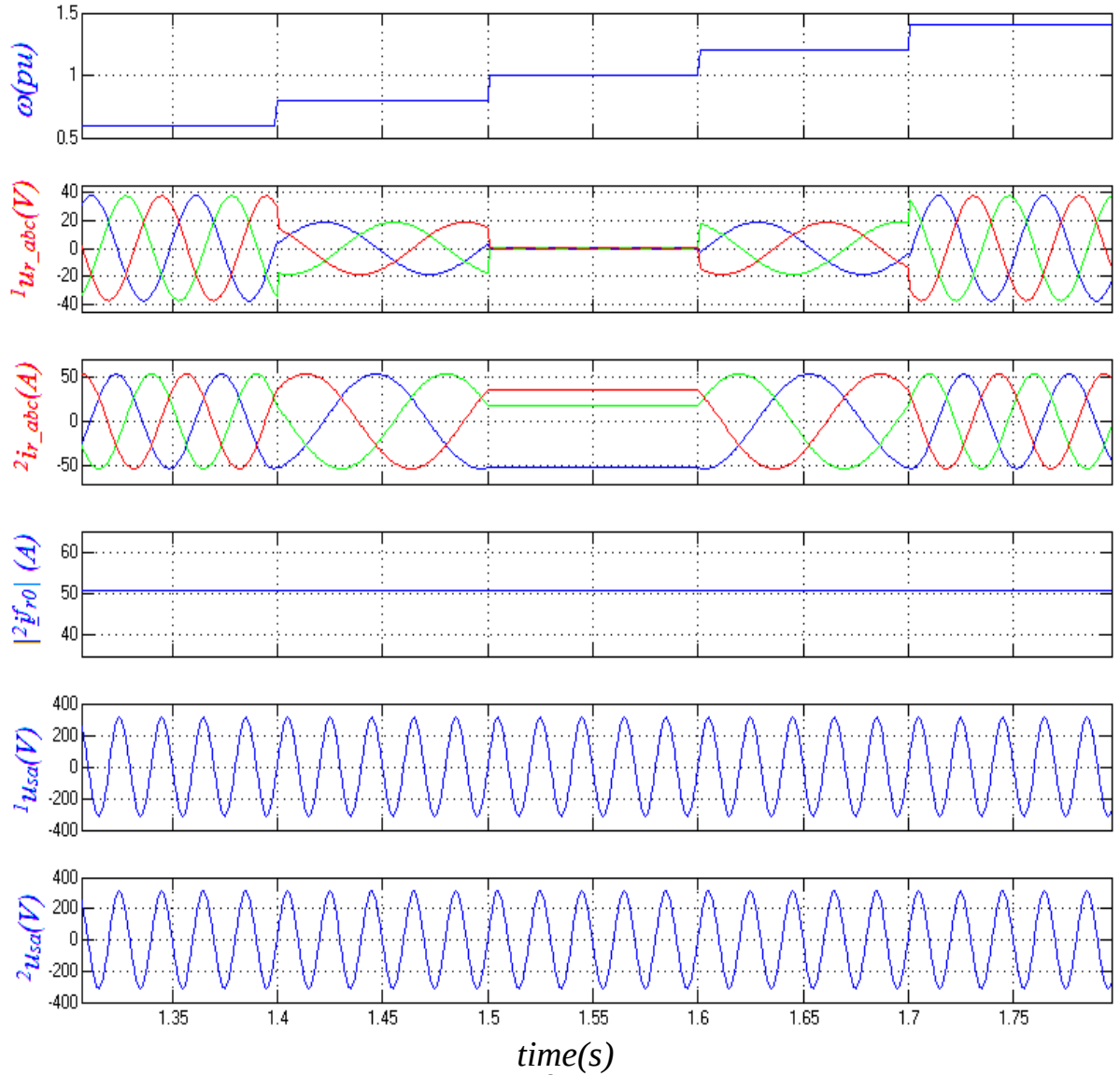
Tiếp theo, ta chạy thử mô hình để kiểm tra khả năng bám điện áp lưới của stator DFIG2 khi tốc độ rotor thay đổi hoặc điện áp lưới thay đổi.

Đáp ứng của hệ thống khi tốc độ rotor ω thay đổi: Để kiểm chứng kết luận trong chương 2 là: sau khi chỉnh định G_{ss} , điện áp của máy phát luôn bám theo điện áp lưới ngay cả khi tốc độ rotor thay đổi. Ta chạy mô phỏng hệ thống trong trường hợp tốc độ của máy chính thay đổi, tức là tốc độ rotor của DFIG thay đổi, các kết quả được thể hiện ở hình 3.8, gồm các đường đặc tính sau: Tốc độ góc của rotor ω ; Điện áp đồng dạng ở các pha của rotor DFIG1 $^1u_{r_abc}$; Dòng điện ở các pha của rotor DFIG2 $^2i_{r_abc}$; Độ lớn vector dòng điện rotor DFIG2 ở tọa độ quay theo vector điện áp lưới $|^2\dot{i}_{r0}^f|$; Điện áp pha A của DFIG1 và DFIG2 $^1u_{sa}, ^2u_{sa}$.

Theo kết quả mô phỏng, khi ω càng gần tốc độ đồng bộ (1 pu) thì điện áp đồng dạng ở các pha rotor của DFIG1 $^1u_{r_abc}$ có biên độ và tần số cùng giảm, dòng điện điều khiển các pha ở rotor DFIG2 $^2i_{r_abc}$ có biên độ cố định còn tần số giảm. Khi ω bằng tốc độ đồng bộ thì điện áp đồng dạng các pha rotor DFIG1 $^1u_{r_abc}$ đều bằng 0, các dòng điện rotor của DFIG2 $^2i_{r_abc}$ thành các dòng điện không đổi. Kết quả thu được là điện áp pha A ở stator của máy phát $^2u_{sa}$ luôn trùng biên độ, tần số và pha với điện áp pha A của lưới $^1u_{sa}$. Vậy khả năng bám điện áp lưới của máy phát DFIG2 khi tốc độ rotor thay đổi là rất tốt.

Ngoài ra, cũng theo kết quả mô phỏng ở hình 3.7 cho thấy: khi tốc độ rotor ω thay đổi, dòng điện rotor DFIG2 ở tọa độ quay theo vector điện áp lưới ($^2\dot{i}_{r0}^f$) luôn cố định, đặc điểm này phù hợp với kết luận ở mục 2.3.3 trong chương 2.

Và do trong tọa độ quay theo vector điện áp lưới, $^2\dot{i}_{r0}^f$ là thành phần cố định nên $^2\dot{i}_{r0}^f$ là thành phần cơ sở để điều chế các thành phần dòng điện rotor dọc trục và ngang trục của DFIG2 trong hệ trục tọa độ quay theo vector điện áp lưới dq .

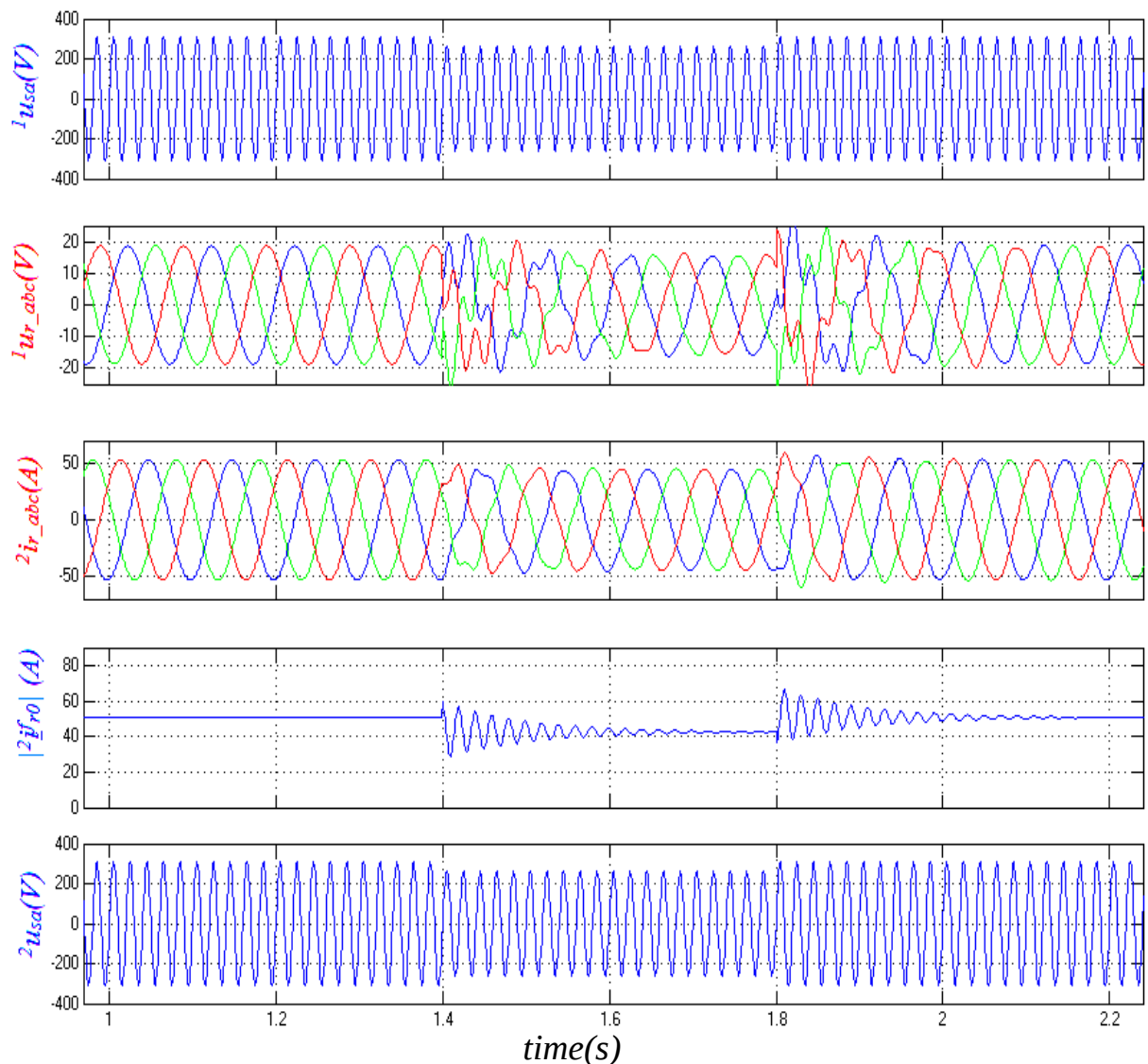


Hình 3.8: Đáp ứng hệ thống phát điện chưa hòa lưới
khi tốc độ rotor ω thay đổi

Đáp ứng của hệ thống khi sụt điện áp lưới: được thể hiện ở hình 3.9, gồm các đường đặc tính: Điện áp pha A của lưới $^1u_{sa}$; Điện áp đồng dạng ở các pha của rotor DFIG1 $^1u_{r_{abc}}$; Dòng điện ở các pha của rotor DFIG2 $^2i_{r_{abc}}$; Độ lớn vector dòng điện rotor DFIG2 ở tọa độ quay theo vector điện áp lưới $|^2i_{r0}^f|$; Điện áp pha A của máy phát $^2u_{sa}$.

Kết quả mô phỏng hình 3.9 cho thấy: khi sụt điện áp lưới pha A $^1u_{sa}$, điện áp đồng dạng ở các pha của rotor DFIG1 $^1u_{r_{abc}}$ và dòng điện điều khiển các pha ở rotor của DFIG2 $^2i_{r_{abc}}$ thay đổi phù hợp để điều khiển từ thông của DFIG2, kết quả là điện áp pha A ở stator của máy phát $^2u_{sa}$ luôn bám theo điện áp pha A

của lưới $^1u_{sa}$, vậy khả năng bám điện áp lưới của hệ thống phát điện khi điện áp lưới thay đổi hay có sự cố là rất tốt.



Hình 3.9: Đáp ứng của hệ thống phát điện chưa hòa lưới khi sụt điện áp lưới

Vậy trong trường hợp stator DFIG2 chưa nối với lưới ta có các kết luận sau: Điện áp máy phát luôn trùng pha, trùng tần số với điện áp lưới, còn biên độ của điện áp máy phát có thể điều chỉnh bằng cách điều chỉnh hệ số khuếch đại G_{SS} ở khâu đồng dạng và cách ly. Và sau khi chỉnh định G_{SS} xong, điện áp của máy phát luôn trùng pha, trùng tần số, trùng biên độ với điện áp lưới ngay cả khi tốc độ rotor thay đổi hay điện áp lưới thay đổi, đáp ứng rất tốt các điều kiện về hòa đồng bộ giữa hệ thống phát điện với lưới điện ”mềm” trên tàu thủy.

3.5.2 Các kết quả mô phỏng khi hệ thống phát điện hòa với lưới

Điều chỉnh độc lập các thành phần công suất thông qua G_P , G_Q :

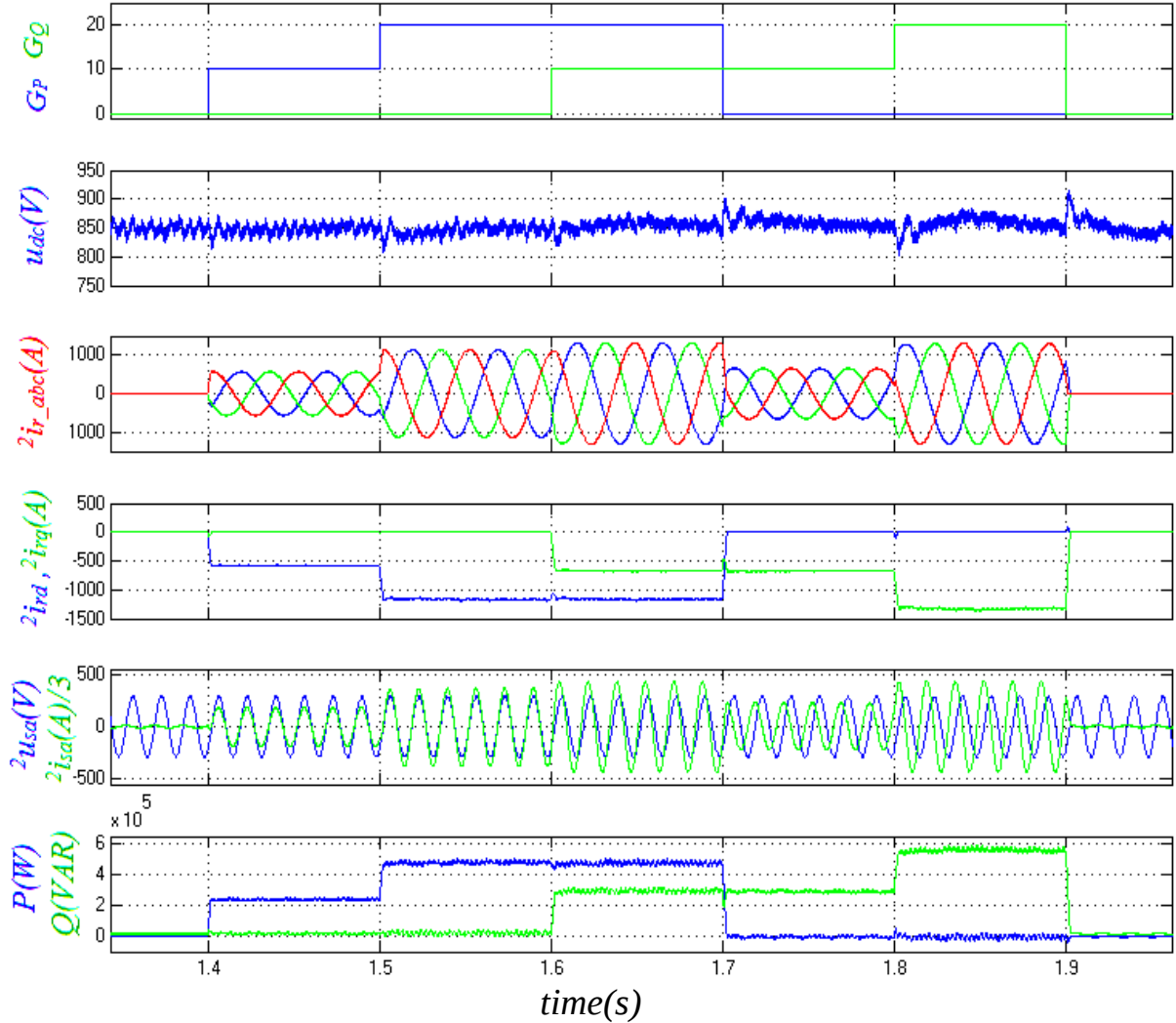
Sau khi điều chỉnh G_{SS} , các điều kiện để stator DFIG2 nối với lưới đều thỏa mãn tốt, ta nối stator DFIG2 với lưới. Theo kết quả ở mục 2.3.4, ta có thể điều khiển độc lập công suất tác dụng và công suất phản kháng của DFIG2 phát lên lưới thông qua điều chỉnh $^2i_{rd}$, $^2i_{rq}$, việc điều chỉnh $^2i_{rd}$, $^2i_{rq}$ lại được thực hiện thuận lợi bằng cách thay đổi hệ số G_P và G_Q . Vì vậy, có thể điều khiển công suất tác dụng và công suất phản kháng của DFIG2 phát lên lưới thông qua điều chỉnh hệ số G_P và G_Q . Để khảo sát tính chất của đối tượng ta chạy thử hệ thống khi các giá trị G_P và G_Q thay đổi, kết quả được thể hiện như hình 3.10, gồm các đường đặc tính sau: Hệ số khuếch đại G_P và G_Q ; Điện áp một chiều trung gian u_{dc} ; Các dòng điện các pha rotor của DFIG2 $^2i_{r_{abc}}$; Các thành phần dòng điện rotor dọc trục và ngang trục của DFIG2 trên tọa độ quay theo vector điện áp lưới $^2i_{rd}$, $^2i_{rq}$; Điện áp và dòng điện pha A của stator DFIG2 $^2u_{sa}$, $^2i_{sa}$; Công suất tác dụng và công suất phản kháng của DFIG2 phát lên lưới P , Q . Theo kết quả mô phỏng cho thấy:

Trong khoảng thời gian trước 1.4s và sau 1.9s: Các hệ số G_P và G_Q đều bằng 0, nên $^2i_{sa}=0$, do đó công suất tác dụng và công suất phản kháng của DFIG2 phát lên lưới đều bằng 0.

Trong khoảng thời gian 1.4s đến 1.6s: $G_P \neq 0$; $G_Q = 0$, dòng điện pha A của stator DFIG2 ($^2i_{sa}$) luôn trùng pha với điện áp pha A của lưới ($^2u_{sa}$), do đó DFIG2 phát lên lưới công suất tác dụng P . Và khi giá trị G_P tăng lên gấp đôi thì biên độ của dòng điện cũng tăng lên gấp đôi, tức công suất tác dụng của DFIG2 phát lên lưới tăng lên gấp đôi.

Trong khoảng thời gian 1.7s đến 1.9s: $G_P = 0$; $G_Q \neq 0$, dòng điện pha A của stator DFIG nhanh pha hơn so với điện áp pha A của lưới một góc $\pi/2$, do đó DFIG phát lên lưới công suất phản kháng Q . Và khi giá trị G_Q tăng lên gấp đôi thì biên độ của dòng điện cũng tăng lên gấp đôi, tức công suất phản kháng của DFIG2 phát lên lưới tăng lên gấp đôi.

Vậy từ kết quả mô phỏng cho thấy có thể điều khiển độc lập công suất tác dụng P và công suất phản kháng Q của DFIG2 phát lên lưới thông qua điều chỉnh hệ số G_P và G_Q trong các mạch khuếch đại lập trình được (*Programmable Gain Amplifier*).



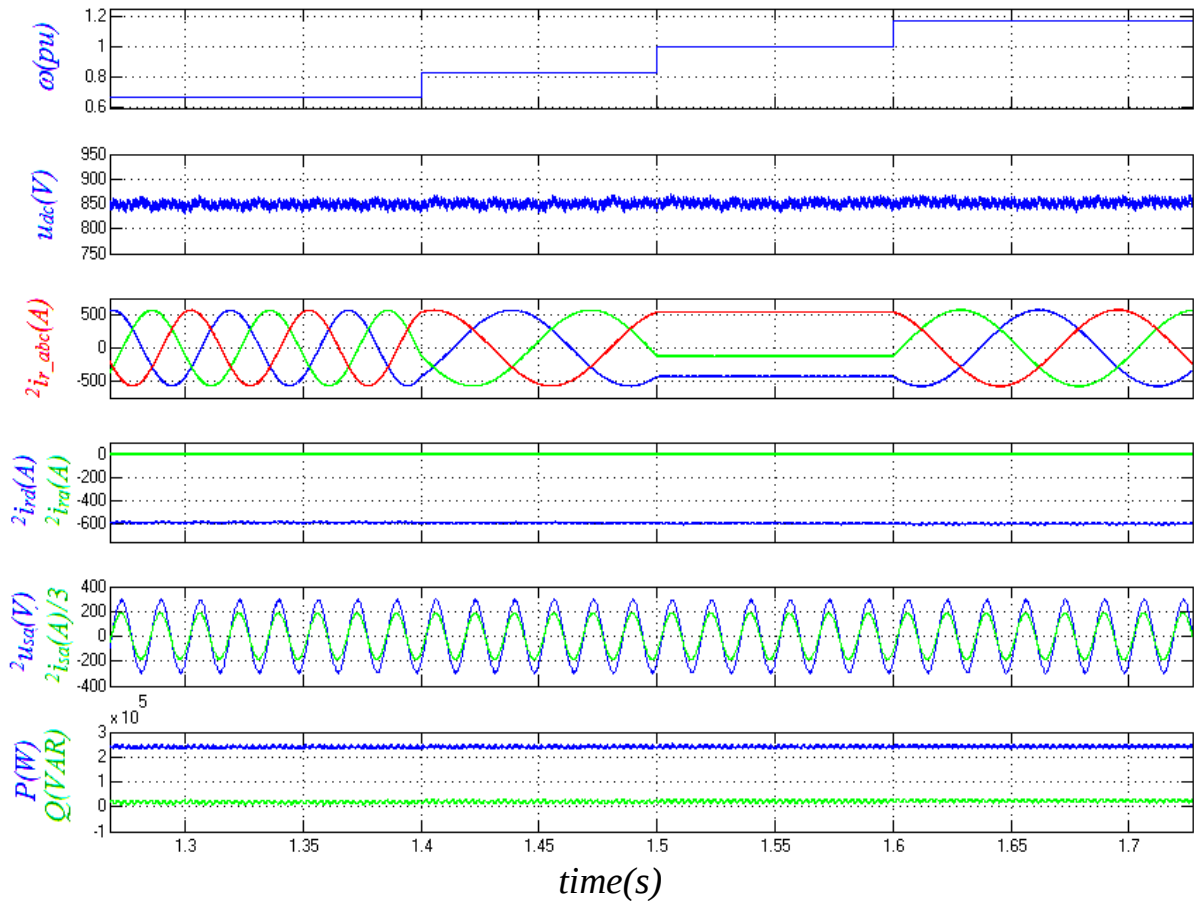
Hình 3.10: Đáp ứng hệ thống phát điện hòa lưới khi G_P và G_Q thay đổi

Tiếp theo ta khảo sát đáp ứng của hệ thống khi tốc độ máy chính thay đổi hoặc điện áp lưới thay đổi.

Đáp ứng hệ thống khi tốc độ rotor ω thay đổi: Ta cài đặt các hệ số khuếch đại G_P và G_Q cố định ($G_P=10$, $G_Q=0$), và chạy mô phỏng hệ thống khi cho tốc độ rotor của DFIG thay đổi, kết quả thể hiện ở hình 3.11, gồm các đường đặc tính: tốc độ góc của rotor ω ; Điện áp một chiều trung gian u_{dc} ; Các dòng điện các pha của rotor DFIG2 $^2i_{r_abc}$; Các thành phần dòng điện dọc trục

và ngang trục của rotor DFIG2 trên tọa độ quay theo vector điện áp lưới ${}^2i_{rd}, {}^2i_{rq}$; Điện áp và dòng điện pha A của stator DFIG2 ${}^2u_{sa}, {}^2i_{sa}$; Công suất tác dụng và công suất phản kháng của DFIG2 phát lên lưới P, Q .

Khi ω càng gần tốc độ đồng bộ (1 pu) thì dòng điện điều khiển các pha ở rotor của DFIG ${}^2i_{r_abc}$ có biên độ cố định còn tần số giảm, tức là các thành phần dòng điện dọc trục và ngang trục của rotor DFIG2 trên tọa độ quay theo vector điện áp lưới ${}^2i_{rd}, {}^2i_{rq}$ không đổi. Khi ω bằng tốc độ đồng bộ thì các dòng điện rotor của DFIG ${}^2i_{r_abc}$ thành các dòng điện không đổi. Kết quả là dòng điện một chiều trung gian u_{dc} , công suất tác dụng và công suất phản kháng của DFIG2 phát lên lưới không đổi. Vậy ta có kết luận: hệ thống phát điện đồng trục vẫn ổn định khi tốc độ máy chính thay đổi.

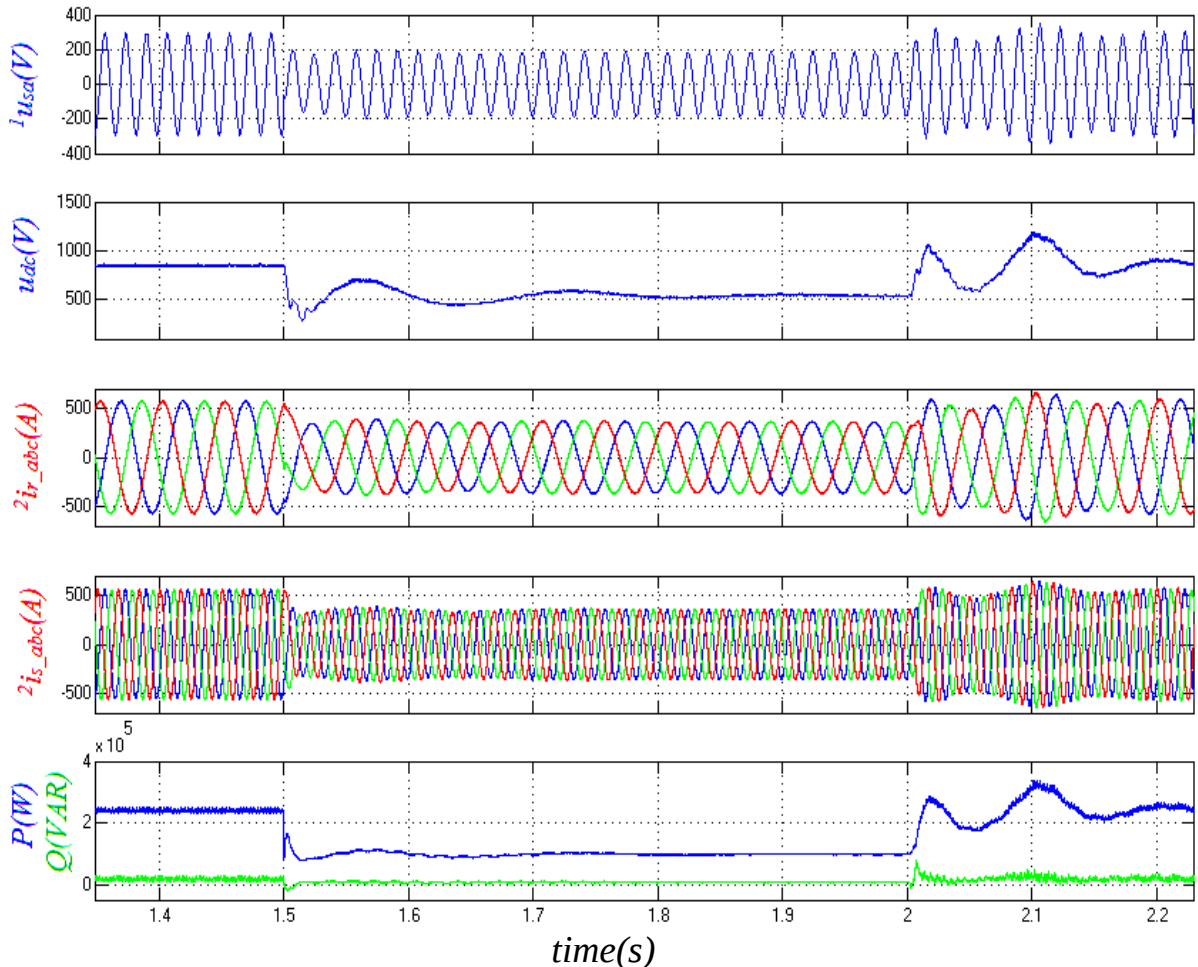


Hình 3.11: Đáp ứng hệ thống phát điện hòa lưới khi tốc độ thay đổi

Đáp ứng của hệ thống khi sụt điện áp lưới: Để khảo sát hệ thống khi sụt điện áp lưới, ta chạy mô phỏng hệ thống trong trường hợp đóng vào lưới một phụ tải công suất lớn, làm điện áp lưới bị sụt, kết quả được thể hiện ở hình 3.12,

gồm các đường đặc tính: Điện áp lưới ${}^1u_{sa}$; Điện áp một chiều trung gian u_{dc} ; Các dòng điện pha rotor của DFIG2 ${}^2i_{r_abc}$; Các dòng điện pha stator của DFIG2 ${}^2i_{s_abc}$; Công suất tác dụng và công suất phản kháng của DFIG2 phát lên lưới P , Q .

Với các hệ thống phát điện đơn giản trước đây, trong chế độ hòa máy phát với lưới, khi xảy ra hiện tượng sụt điện áp lưới, sự chênh lệch điện thế giữa đầu cực của máy phát với lưới điện tăng nhanh, dẫn tới hiện tượng quá dòng của máy phát. Nhưng với mô hình phát điện mới đề xuất, các kết quả mô phỏng cho thấy: khi sụt điện áp lưới với hệ số K , dòng điện các pha stator DFIG2 phát lên lưới cũng giảm với hệ số K , kết quả là công suất DFIG2 phát lên lưới giảm với hệ số K^2 . Vậy với đặc điểm tự nhiên này, hệ thống sẽ có phản ứng thích hợp trong điều kiện sụt điện áp lưới là không có nguy cơ bị quá dòng của máy phát khi xảy ra hiện tượng sụt điện áp lưới.



Hình 3.12: Đáp ứng hệ thống phát điện hòa lưới khi sụt điện áp lưới

Nhận xét và kết luận chương 3

Trong chương 3, tác giả đã xây dựng mô hình mô phỏng toàn bộ hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor. Mô hình mô phỏng được xây dựng chi tiết, tỉ mỉ tới từng phần tử như các van công suất, các thiết bị điều khiển, đối tượng điều khiển DFIG.

Các kết quả mô phỏng ở hình 3.7, 3.8 và 3.9 phù hợp với kết luận trong mục 2.3.3 ở chương 2: khi máy phát chưa hòa với lưới, sau khi chỉnh định G_{ss} , điện áp của máy phát luôn trùng pha, trùng tần số, trùng biên độ với điện áp lưới, ngay cả trong các trường hợp tốc độ rotor thay đổi hoặc điện áp lưới thay đổi, đáp ứng rất tốt các điều kiện hòa đồng bộ giữa máy phát với lưới điện.

Các kết quả mô phỏng ở hình 3.10, 3.11, 3.12 phù hợp với kết luận mục 2.3.4 trong chương 2: khi hòa máy phát với lưới điện, có thể điều khiển độc lập công suất tác dụng và công suất phản kháng của DFIG2 phát lên lưới thông qua điều chỉnh hệ số G_P và G_Q . Và các kênh điều khiển công suất không bị ảnh hưởng khi tốc độ quay của rotor thay đổi.

So với các mô hình trước đây, mô hình điều khiển DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor phải thêm một DFIG loại nhỏ để tạo tín hiệu đồng dạng, nhưng hệ thống lại giảm bớt được các phần tử khác như cảm biến tốc độ, vị trí.

Các khâu trong hệ thống được thiết kế rất đơn giản, dễ dàng. Vì vậy, giá thành của hệ thống điều khiển sẽ giảm so với các phương án trước đây, nhưng chất lượng thu được của hệ thống vẫn cao cụ thể như sau:

- Khả năng bám điện áp lưới của hệ thống phát điện trước khi hòa đồng bộ là rất tốt.
- Sau khi hệ thống phát điện nối với lưới, công suất tác dụng và công suất phản kháng của DFIG phát lên lưới được cách ly với nhau và có thể điều khiển độc lập thông qua việc điều chỉnh giá trị của hệ số G_P và G_Q .

Vậy hệ thống phát điện sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu cảm rotor rất phù hợp ứng dụng trong máy phát đồng trục để hòa với lưới điện

trên tàu thủy vì: lưới điện trên tàu thủy là lưới điện ”mềm”, tức là điện áp của lưới thường xuyên thay đổi và tốc độ máy chỉnh thường xuyên thay đổi.

CHƯƠNG 4: THIẾT LẬP HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN MÁY PHÁT DỊ BỘ NGUỒN KÉP LÀM VIỆC Ở TRẠM PHÁT ĐỒNG TRỰC TÀU THỦY

4.1 Mở đầu

Để hệ thống phát điện đồng trực trên tàu thủy hòa được với lưới, điều kiện đầu tiên là điện áp của máy phát phải luôn trùng pha, trùng biên độ, trùng tần số với điện áp lưới. Điều kiện tiếp theo là phải điều khiển được các thành phần công suất của máy phát lên lưới theo các yêu cầu sử dụng điện năng trên tàu thủy. Với hệ thống phát điện đồng trực sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor, thì điều kiện đầu tiên luôn được thỏa mãn (theo các kết quả đã chứng minh ở chương 2 và chương 3). Vậy vấn đề còn lại là phải thiết lập hệ thống điều khiển để điều khiển các thành phần công suất của máy phát lên lưới bám theo các giá trị mong muốn.

Với mô hình hệ thống phát điện đồng trực sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor, việc điều khiển các kênh công suất tác dụng, công suất phản kháng của máy phát lên lưới rất thuận lợi: Công suất tác dụng tỉ lệ với thành phần dòng điện rotor dọc trục (${}^2i_{rd}$), công suất phản kháng tỉ lệ với thành phần dòng điện rotor ngang trục (${}^2i_{rq}$). Các thành phần dòng điện rotor dọc trục và ngang trục (${}^2i_{rd}, {}^2i_{rq}$) lại được điều chế từ các tín hiệu đồng dạng và các khâu xử lý tín hiệu, độ lớn của ${}^2i_{rd}, {}^2i_{rq}$ có thể thay đổi được bằng cách điều khiển thay đổi hệ số khuếch đại G_P và G_Q ở các khâu khuếch đại. Vậy có thể điều chỉnh các kênh công suất tác dụng và công suất phản kháng của máy phát lên lưới thông qua việc điều chỉnh độ lớn hệ số G_P và G_Q . Tiếp theo, tác giả nghiên cứu thiết lập hệ thống điều khiển các kênh công suất của máy phát đồng trực.

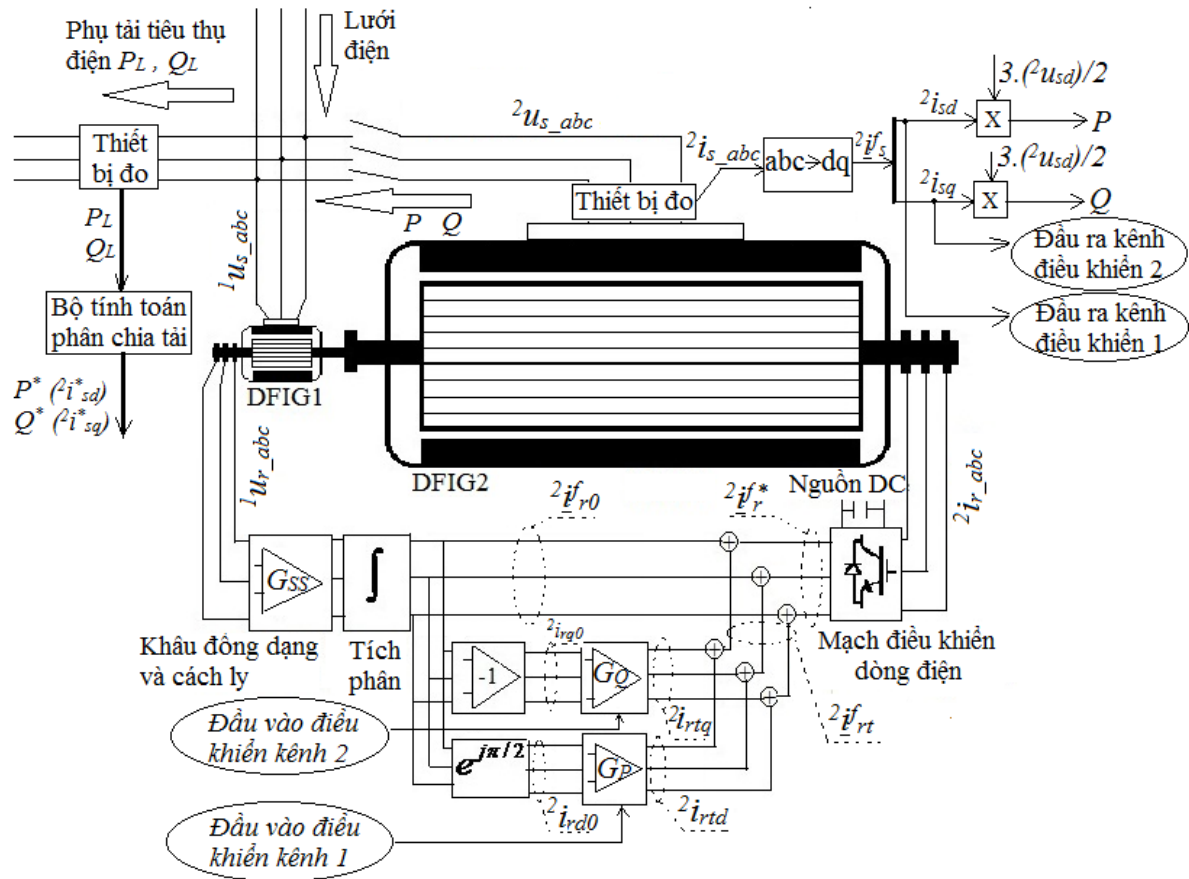
4.2 Xác định cấu trúc đối tượng điều khiển

Trước khi thiết lập hệ thống điều khiển, việc đầu tiên là phải xác định cấu trúc của đối tượng điều khiển. Cấu trúc của hệ thống phát điện đồng trực sử dụng DFIG bằng phương pháp đồng dạng tín hiệu rotor đã được xây dựng chi tiết trong chương 3 (hình 3.5), bao gồm rất nhiều khâu và phân tử như: các máy

điện đi bộ nguồn kép DFIG1 và DFIG2, các IGBT cấu thành lên mạch nghịch lưu phía lưới, các IGBT cấu thành lên mạch nghịch lưu phía máy phát, các khâu xử lý tín hiệu, mạch điện một chiều trung gian.... Vì vậy, việc xác định mô hình toán chính xác của toàn bộ hệ thống là rất khó khăn, nên để xác định được đối tượng điều khiển hiệu quả, ta phải chú ý tới mục đích điều khiển, từ đó xác định được đầu ra của đối tượng điều khiển, và phải tìm được các tín hiệu đầu vào hợp lý để kiểm soát hiệu quả các giá trị đầu ra đó, tức là xác định được đầu vào của đối tượng điều khiển.

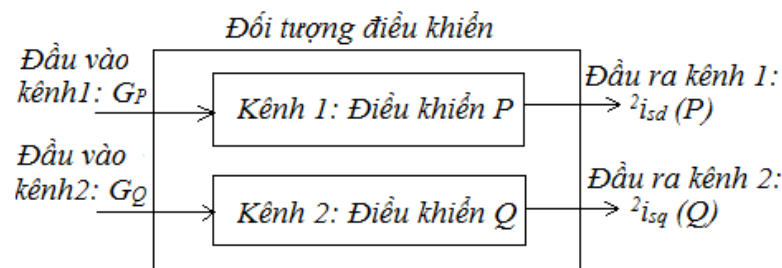
Theo kết quả ở mục 2.3.4 trong chương 2 và kết quả mô phỏng trong chương 3, có thể xác định đối tượng điều khiển gồm 2 kênh điều khiển độc lập, thể hiện ở hình 4.1, gồm: 1. kênh điều khiển dòng điện stator dọc trục của DFIG2 trên tọa độ quay theo vector điện áp lưới $^2i_{sd}$, với đầu vào là hệ số G_P , đầu ra là thành phần dòng điện stator dọc trục $^2i_{sd}$ (hay công suất tác dụng P); 2. Kênh điều khiển dòng điện stator ngang trục của DFIG2 trên tọa độ quay theo vector điện áp lưới $^2i_{sq}$, với đầu vào là hệ số G_Q , đầu ra là thành phần dòng điện stator ngang trục $^2i_{sq}$ (hay công suất phản kháng Q).

Công suất tác dụng và công suất phản kháng của phụ tải tiêu thụ điện (P_L , Q_L) được đo bởi *thiết bị đo*, qua *bộ tính toán phân chia tải*, có được giá trị đặt (giá trị mong muốn) của công suất tác dụng và công suất phản kháng của máy phát lên lưới (P^* , Q^*). Nhiệm vụ của hệ thống điều khiển là phải điều khiển các thành phần công suất (P , Q) của máy phát lên lưới bám theo các giá trị đặt (P^* , Q^*).



Hình 4.1: Đối tượng điều khiển

Với cấu trúc đối tượng điều khiển đề xuất, các kênh điều khiển không bị ảnh hưởng chéo nhau. Sơ đồ khối của đối tượng điều khiển được thể hiện đơn giản hóa ở hình 4.2.



Hình 4.2: Sơ đồ khối đối tượng điều khiển

Đặc điểm và tính chất từng kênh của đối tượng điều khiển đã được khảo sát qua mô hình toán ở mục 2.3.4 trong chương 2, và qua kết quả mô phỏng ở hình 3.10 trong chương 3. Tiếp theo, tác giả thiết kế bộ điều khiển phù hợp với đối tượng đã đề xuất.

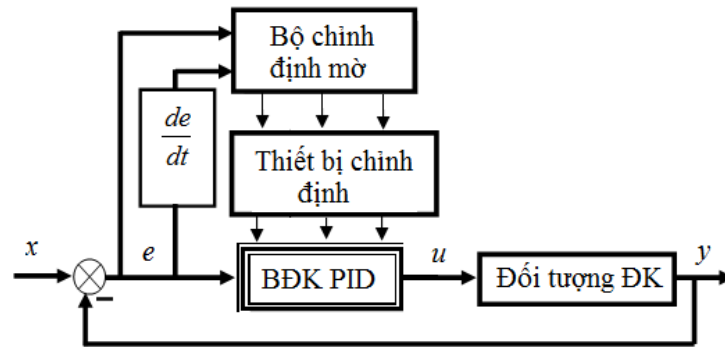
4.3 Thiết kế bộ điều khiển

Ngày nay, với các thành tựu của khoa học kỹ thuật điều khiển, có rất nhiều loại bộ điều khiển kinh điển và hiện đại đáp ứng được hiệu quả điều khiển như các bộ điều khiển mờ, noron, thích nghi, tối ưu... Trong số đó thì bộ khiển tỉ lệ, tích phân, vi phân (PID) có đặc điểm cấu trúc đơn giản nhưng bền vững nên được ứng dụng nhiều nhất trong công nghiệp. Tuy nhiên, với bộ điều khiển PID, thì chất lượng của hệ thống lại bị phụ thuộc rất nhiều vào các tham số K_P , K_I , K_D , các tham số này thường được tính toán, xác định để điều khiển tốt trong một trạng thái giới hạn của hệ thống. Do vậy, để phát huy tốt hiệu quả của bộ điều khiển, trong quá trình vận hành, cần phải chỉnh định các tham số K_P , K_I , K_D cho phù hợp với trạng thái thực tế của hệ thống. Quá trình chỉnh định các tham số này có thể được tính toán và thực hiện thông qua bộ chỉnh định mờ tự động. Cấu trúc bộ điều khiển PID có các tham số được chỉnh định bằng bộ điều khiển mờ được gọi là bộ PID chỉnh định mờ.

Bộ điều khiển PID chỉnh định mờ vừa có ưu điểm của bộ điều khiển PID, vừa có ưu điểm của một hệ thống điều khiển thích nghi vì: các tham số của bộ điều khiển PID luôn thay đổi để phù hợp với trạng thái và đặc điểm của đối tượng. Ngoài ra, với bộ điều khiển PID chỉnh định mờ, ta có thể tránh được bài toán nhận dạng và mô hình hóa phức tạp, và những kinh nghiệm về đặc tính của đối tượng điều khiển dễ dàng được đưa vào các luật điều khiển.

Hơn nữa, với đối tượng điều khiển đã được xác định như ở trên, bao gồm rất nhiều khâu và phần tử, nên việc tìm mô hình toán chính xác của đối tượng điều khiển cũng rất khó khăn.

Vì các lý do trên, tác giả đề xuất sử dụng bộ điều khiển PID chỉnh định mờ để điều khiển đối tượng. Mô hình hệ thống điều khiển với bộ điều khiển PID chỉnh định mờ được thể hiện ở hình 4.3:



Hình 4.3: Mô hình hệ thống điều khiển với bộ điều khiển PID chỉnh định mờ

Trong đó, bộ điều khiển PID có tín hiệu đầu ra $u(t)$ như sau:

$$u(t) = KP.e(t) + KI \int_0^t e(x)dx + KD \frac{de(t)}{dt} \quad (4.1)$$

Với các tham số KP , KI , KD được chỉnh định theo bộ chỉnh định mờ dựa trên sai lệch $e(t)$ và đạo hàm của sai lệch de/dt .

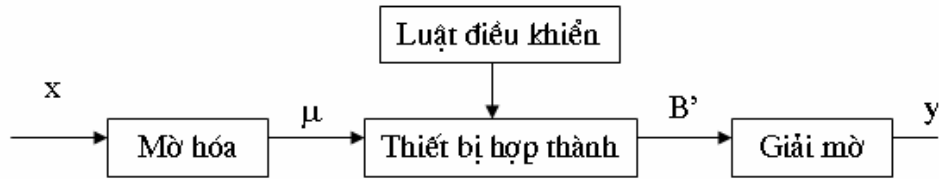
Để thuận tiện cho việc thiết chế bộ chỉnh định mờ, đầu tiên tác giả trình bày khái quát về hệ thống điều khiển mờ.

4.3.1 Khái quát về hệ thống điều khiển mờ

Hệ thống điều khiển mờ là tập hợp các qui tắc dưới dạng "if...then..." để tái tạo kinh nghiệm của con người và được tích hợp vào cấu trúc điều khiển của hệ thống. Việc thiết kế một hệ thống mờ mang rất nhiều tính chất chủ quan, nó tùy thuộc vào kinh nghiệm và kiến thức của người thiết kế.

Cấu trúc một bộ điều khiển mờ [8] thể hiện ở hình 4.4, gồm 3 khâu cơ bản sau:

- Khâu mờ hoá: Làm nhiệm vụ chuyển đổi từ giá trị rõ đầu vào xác định sang trạng thái đầu vào mờ.
- Thiết bị hợp thành: Triển khai luật hợp thành trên cơ sở luật điều khiển "if... then".
- Khâu giải mờ: Chuyển đổi từ giá trị mờ nhận được của thiết bị hợp thành sang giá trị thực để điều khiển đối tượng.



Hình 4.4: Cấu trúc một bộ điều khiển mờ

Trong đó:

x : là tập giá trị thực đầu vào.

μ : tập mờ của giá trị đầu vào.

B' : tập giá trị mờ của giá trị điều khiển thực.

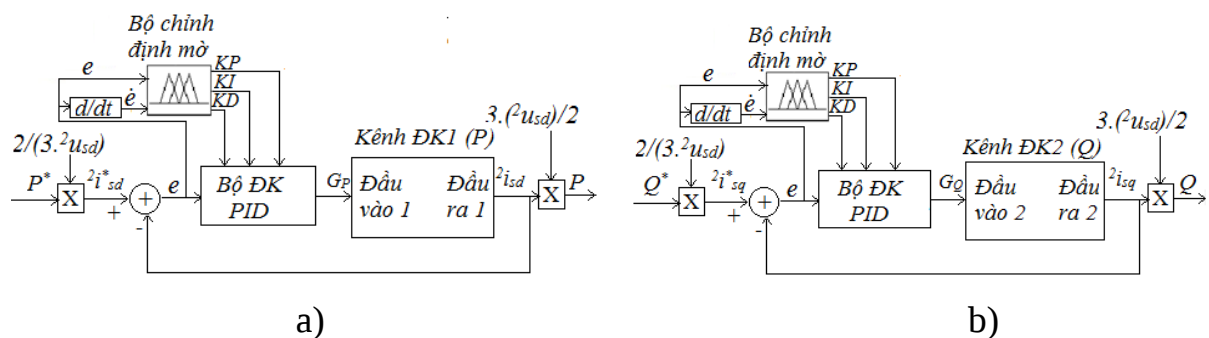
y : giá trị điều khiển thực.

Công việc thiết kế một bộ điều khiển mờ thông thường bao gồm các bước sau:

- Định nghĩa tất cả các biến ngôn ngữ vào/ra.
- Xác định các tập mờ cho từng biến vào/ra (mờ hoá).
- Xây dựng luật hợp thành.
- Chọn thiết bị hợp thành.
- Chọn phương pháp giải mờ.

4.3.2 Thiết kế bộ điều khiển PID chỉnh định mờ để điều khiển đối tượng

Sơ đồ hệ thống điều khiển đối tượng với bộ điều khiển PID chỉnh định mờ được thể hiện ở hình 4.5. Đối tượng điều khiển gồm 2 kênh điều khiển độc lập là kênh công suất tác dụng P và kênh công suất phản kháng Q , mỗi kênh được điều khiển bằng một bộ điều khiển PID với các tham số K_P , K_I , K_D được chỉnh định bởi các bộ chỉnh định mờ mô hình madani [77][84].



Hình 4.5: Hệ thống điều khiển các thành phần công suất bằng bộ điều khiển PID chỉnh định mờ

Xét kênh điều khiển công suất tác dụng P , Bộ điều khiển PID với các tham số KP , KI , KD được chỉnh định bởi bộ chỉnh định mờ. Đầu vào bộ chỉnh định mờ là sai lệch e và đạo hàm của sai lệch $\dot{e}$, đầu ra là các giá trị KP , KI , KD .

Việc thiết kế bộ chỉnh định các tham số KP , KI , KD bằng bộ chỉnh định mờ phải dựa trên kinh nghiệm. Sau đây, tác giả tiến hành thiết kế bộ chỉnh định mờ.

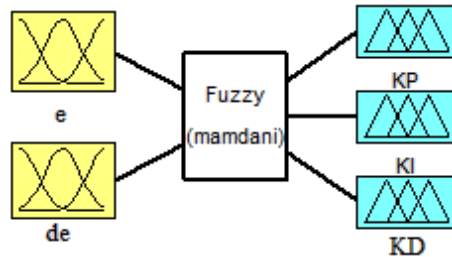
Chọn các hàm liên thuộc:

Đầu tiên ta phải xác định số lượng tập mờ cần thiết cho các biến vào và ra: thông thường số lượng các giá trị ngôn ngữ cho mỗi biến nên nằm trong khoảng từ 3 đến 10. Nếu số lượng quá ít thì mối quan hệ vào ra bộ chỉnh định quá thô và ít có ý nghĩa thực tiễn. Nếu số lượng quá nhiều thì mối quan hệ vào ra của bộ chỉnh định quá mịn, đôi khi con người cũng khó có đủ kinh nghiệm bao quát hết các trường hợp xảy ra, và chiếm nhiều bộ nhớ chương trình, làm chậm tốc độ tính toán. Với đặc điểm của đối tượng điều khiển, tác giả chọn số lượng tập mờ cho mỗi biến đầu vào và đầu ra bằng 5 là hợp lý.

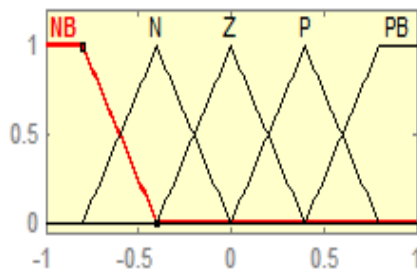
Chọn dạng cho các hàm liên thuộc: có rất nhiều dạng hàm thuộc như: *Gaussian*, *PI-shape*, *S-shape*, *Sigmoidal*, *Z-shape*... Vấn đề chọn hàm liên thuộc cũng rất quan trọng. Theo kinh nghiệm, tác giả chọn hàm liên thuộc dạng tam giác, bởi dạng hàm liên thuộc dạng này thể hiện rõ mức độ phụ thuộc của các tập mờ với từng giá trị rõ đầu vào, và dạng hàm liên thuộc này dễ dàng tổng hợp trong các thiết bị lập trình.

Dựa vào các nhận xét trên, tác giả chọn các hàm liên thuộc đầu vào e và $\dot{e}$ như hình 4.6b, mỗi giá trị đầu vào gồm 5 tập mờ: âm lớn (NB), âm (N), Không (Z), Dương (P), Dương lớn (PB), nằm trong dải giá trị $[-1 \ 1]$ pu. Do máy phát có công suất 1000(KVA) nên dòng $^2i_{sd}$ có độ lớn cực đại khoảng 2143(A), vì vậy giá trị thực tế của e (sai lệch giữa $^2i_{sd}$ và $^2i_{sd}^*$) và $\dot{e}$ sẽ nằm trong khoảng $[-2143 \ 2143]$. Do vậy, để e và $\dot{e}$ nằm trong dải giá trị $[-1 \ 1]$ pu thì ta chọn hệ số chuyển đổi e và $\dot{e}$ như sau: $X_e=1/2143$, $X_{\dot{e}}=1/2143$.

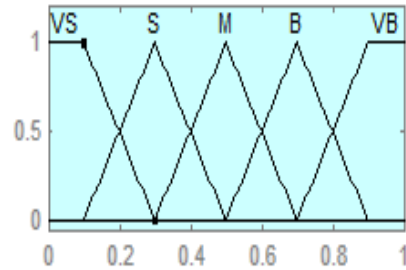
Tiếp theo ta chọn các hàm liên thuộc đầu ra KP , KI , KD như hình 4.6c, mỗi giá trị đầu ra gồm 5 tập mờ: Rất nhỏ (VS), Nhỏ (S), Trung bình (M), Lớn (B), Rất lớn (VB), nằm trong dải giá trị $[0 \ 1]$ pu, với hệ số chuyển đổi $X_{KP}=1/(6.10^{-2})$, $X_{KI}=1/(15.10^{-2})$, $X_{KD}=1/(3.10^{-2})$.



a)



b)



c)

Hình 4.6: Bộ chỉnh định mờ và các hàm liên thuộc

Các luật suy diễn: được thực hiện dựa trên kinh nghiệm và đặc điểm của đối tượng điều khiển.

Theo [80], giá trị các tham số KP , KI , KD sẽ ảnh hưởng trực tiếp tới các quá trình quá độ của hệ thống kín, phản ứng của hệ thống kín khi thay đổi các tham số KP , KI , KD được tổng hợp ở bảng 4.1:

Bảng 4.1: Phản ứng hệ thống kín khi thay đổi các tham số bộ điều khiển PID

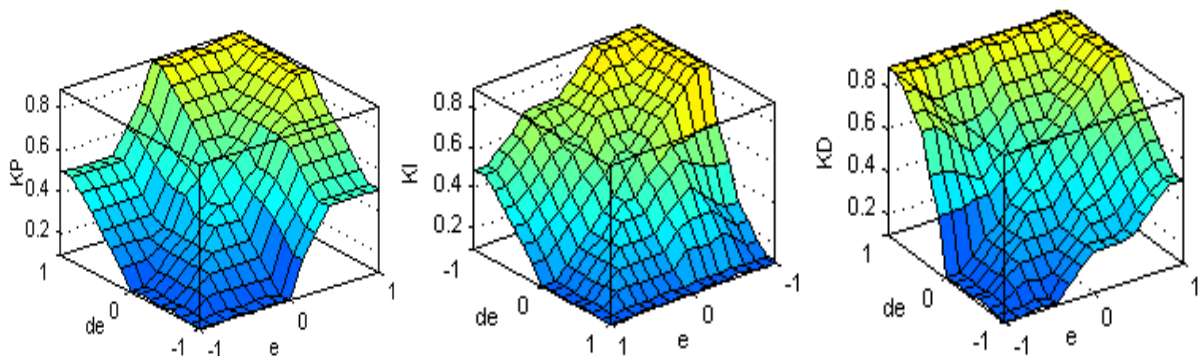
Điều chỉnh	Quá điều chỉnh	Thời gian quá độ	Sai số xác lập
Tăng KP	<i>Tăng</i>	<i>Tăng ít</i>	<i>Giảm</i>
Tăng KI	<i>Tăng</i>	<i>Tăng</i>	<i>Giảm nhiều</i>
Tăng KD	<i>Giảm</i>	<i>Giảm</i>	<i>Thay đổi nhỏ</i>

Dựa trên đặc điểm các phản ứng của hệ thống kín khi điều chỉnh các tham số K_P , K_I , K_D ở trong bảng 4.1, kinh nghiệm điều chỉnh của các công trình nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển PID chỉnh định mờ [43][95], và đặc điểm của đối tượng điều khiển, tác giả đề xuất thực hiện các luật suy diễn của bộ chỉnh định mờ phù hợp với đối tượng điều khiển, được tổng hợp ở bảng 4.2.

Bảng 4.2: Luật suy diễn bộ chỉnh định mờ

e		NB	N	Z	P	PB
NB	KP	VS	VS	VS	S	M
	KI	VB	VB	VB	S	VS
	KD	VS	VS	VS	B	VB
N	KP	VS	S	S	S	M
	KI	VB	B	B	M	VS
	KD	VS	S	S	M	VB
Z	KP	VS	S	M	B	VB
	KI	B	B	M	S	VS
	KD	S	S	M	B	VB
P	KP	M	B	B	B	VB
	KI	B	M	S	S	VS
	KD	S	M	B	B	VB
PB	KP	M	B	VB	VB	VB
	KI	M	S	VS	VS	VS
	KD	M	B	VB	VB	VB

Chọn luật hợp thành dạng *MAX-MIN*, giải mờ theo phương pháp điểm trọng tâm. Kết quả ta có các đồ thị biểu diễn mối quan hệ các biến vào ra của bộ chỉnh định mờ được thể hiện ở hình 4.7.

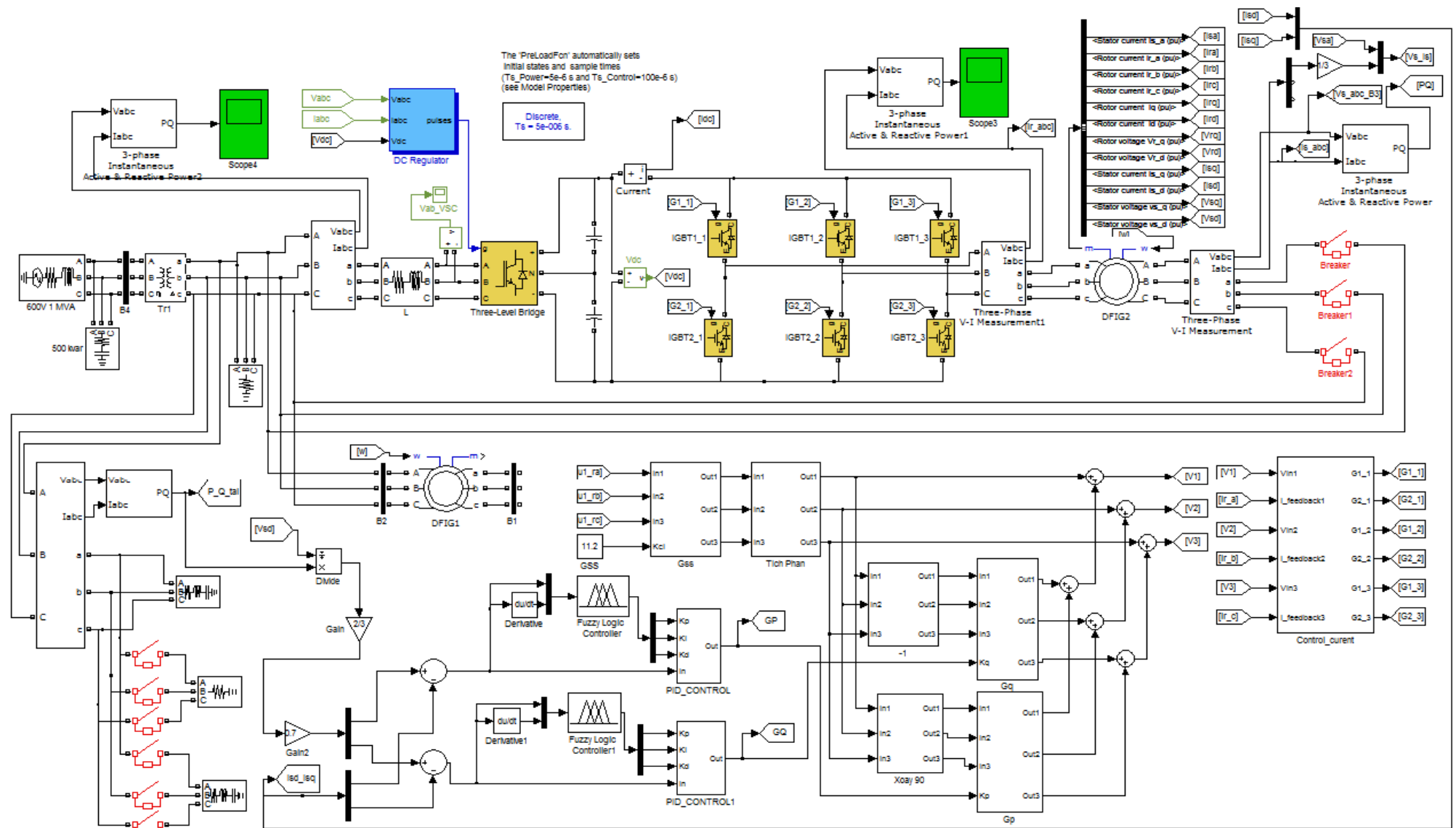


Hình 4.7: Đồ thị quan hệ các biến vào ra của bộ chỉnh định mờ

Tương tự, ta thiết kế bộ điều khiển cho kênh điều khiển công suất phản kháng Q giống hệt kênh điều khiển công suất tác dụng P , vì theo kết quả mô

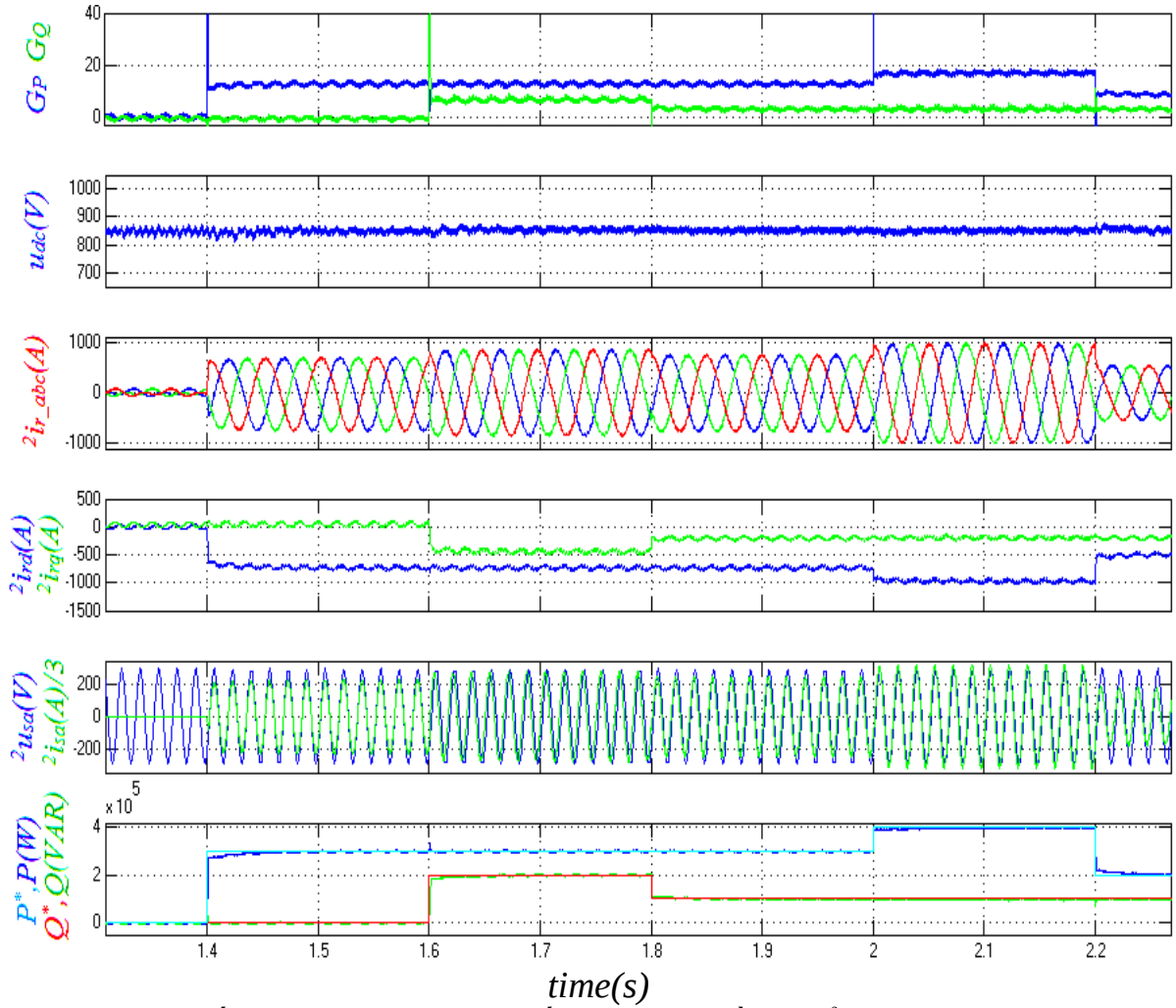
phòng ở chương 3 và kết luận ở mục 2.3.4 trong chương 2 thì đặc điểm của kênh điều khiển Q giống với đặc điểm của kênh điều khiển P .

Vậy tác giả đã thiết lập được toàn bộ hệ thống điều khiển kín máy phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor, mô hình mô phỏng toàn hệ thống được thể hiện ở hình 4.8.



Hình 4.8: Mô hình hệ thống điều khiển kín với bộ điều khiển PID chỉnh định mờ

Thực hiện chạy mô hình tổng thể hệ thống khi giá trị đặt (giá trị mong muốn P^* , Q^*) thay đổi như sau: ban đầu, cho giá trị đặt $P^*=Q^*=0$, và cho thay đổi ngẫu nhiên các giá trị đặt của công suất tác dụng và công suất phản kháng P^* , Q^* tại các thời điểm $t=1.4s$, $1.6s$, $1.8s$, $2.0s$, $2.2s$. Kết quả mô phỏng được thể hiện ở hình 4.9:



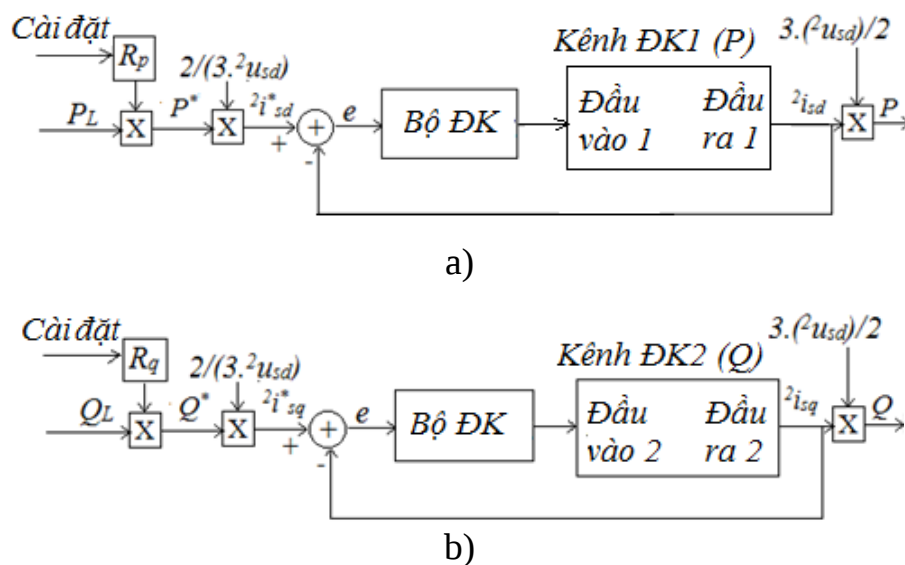
Hình 4.9: Kết quả mô phỏng hệ thống với bộ điều khiển PID chỉnh định mờ

Kết quả mô phỏng cho thấy các giá trị công suất tác dụng P và công suất phản kháng Q của stator DFIG2 phát ra lên lưới luôn bám theo các giá trị mong muốn P^* , Q^* với thời gian quá độ rất nhỏ (khoảng $0.01s$) và không có độ quá điều chỉnh. Trong khi đó, điểm lại kết quả của một số công trình nghiên cứu gần đây về điều khiển trực tiếp công suất tác dụng và công suất phản kháng của DFIG phát lên lưới [35][42][86][56] cho thấy: thời gian quá độ ngắn nhất là khoảng $0.05s$, một số công trình còn có độ dao động và độ quá điều chỉnh lớn.

Vậy, với đề xuất mới của tác giả về hệ thống điều khiển DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor đã cải thiện được đáng kể chất lượng của hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy.

4.4 Phân chia tải hệ thống phát điện đồng trục với lưới điện tàu thủy

Hệ thống phát điện đồng trục được hòa với lưới điện tàu thủy [4][16], hệ thống phải đảm bảo việc phân chia chịu tải giữa máy phát và lưới điện trên tàu. Có các phương pháp phân chia chịu tải của máy phát như: phân chia tải theo độ cứng đặc tính cơ-công suất, phân chia chịu tải theo tỉ lệ công suất đặt trước. Để tiến hành mô phỏng, tác giả thực hiện phân chia tải theo các tỉ lệ công suất đặt trước. Mô hình phân chia chịu tải của máy phát đồng trục với lưới điện tàu thủy thể hiện ở hình 4.10, với hệ số phân chia tỉ lệ tải công suất tác dụng là R_p , hệ số phân chia tỉ lệ công suất phản kháng là R_q , công suất tác dụng và công suất phản kháng của tải tiêu thụ lần lượt là P_L và Q_L .

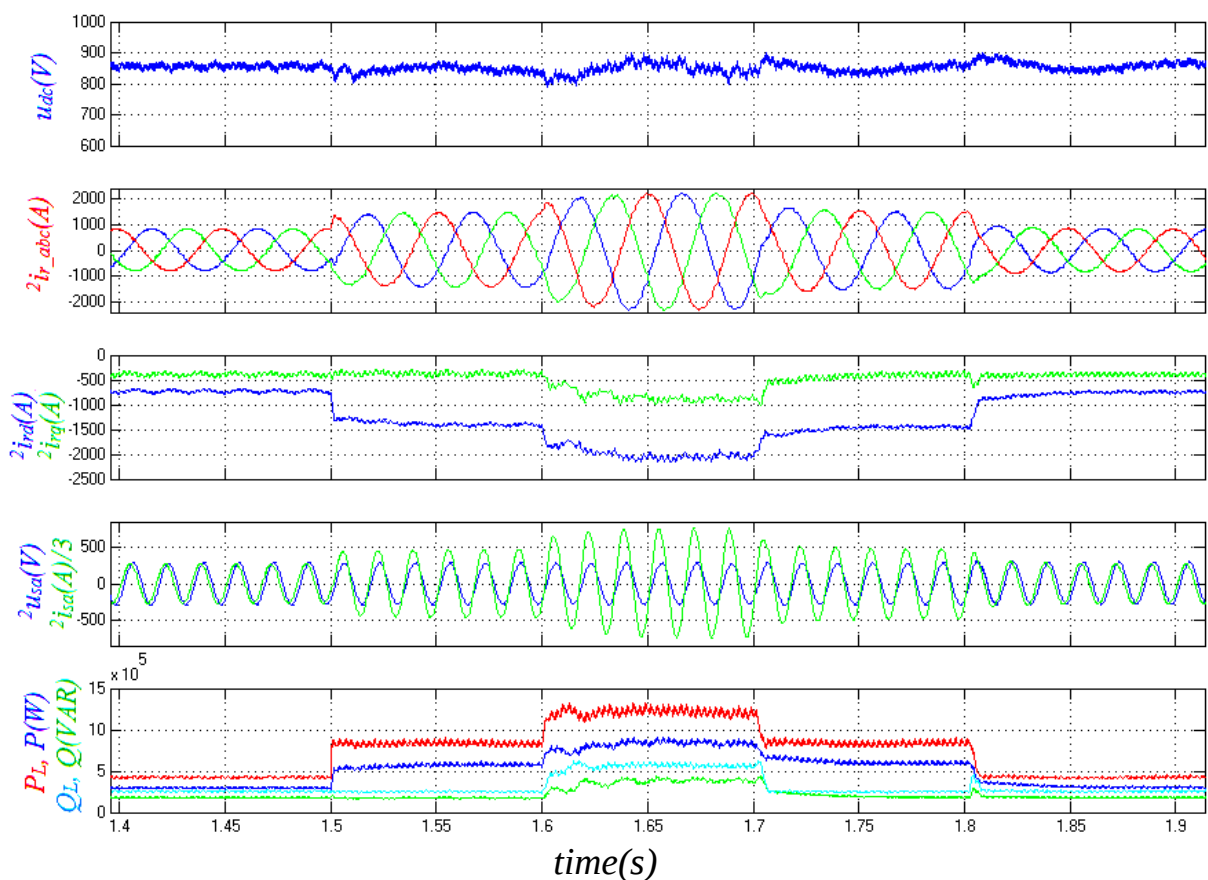


Hình 4.10: Phân chia công suất chịu tải của máy phát đồng trục với lưới điện tàu thủy

Tác giả chạy thử hệ thống như sau: cài đặt hệ số phân chia tải $R_p=R_q=70\%$. Ban đầu, nối với lưới phụ tải 1 có công suất tác dụng $P_{L1}=500kw$, công suất phản kháng $Q_{L1}=300kavr$. Tại thời điểm $t=1.5s$, nối thêm vào lưới phụ tải thứ 2 có công suất tác dụng $P_{L2}=400kw$, công suất phản kháng $Q_{L2}=0$.

Tại thời điểm $t=1.6s$, nối thêm vào lưới phụ tải thứ 3 có công suất tác dụng $P_{L3}=300kw$, công suất phản kháng $Q_{L3}=300\text{ kvar}$. Tại thời điểm $t=1.7s$, ngắt tải 3 ra khỏi lưới. Tại thời điểm $t=1.8s$, ngắt tải thứ 2 ra khỏi lưới. Kết quả mô phỏng được thể hiện ở hình 4.11.

Từ kết quả mô phỏng cho thấy, đáp ứng công suất tác dụng P và công suất phản kháng Q của DFIG2 phát lên lưới luôn bám theo giá trị công suất mong muốn của nó (70% công suất của tải) với thời gian quá độ rất nhỏ (hình 4.11).

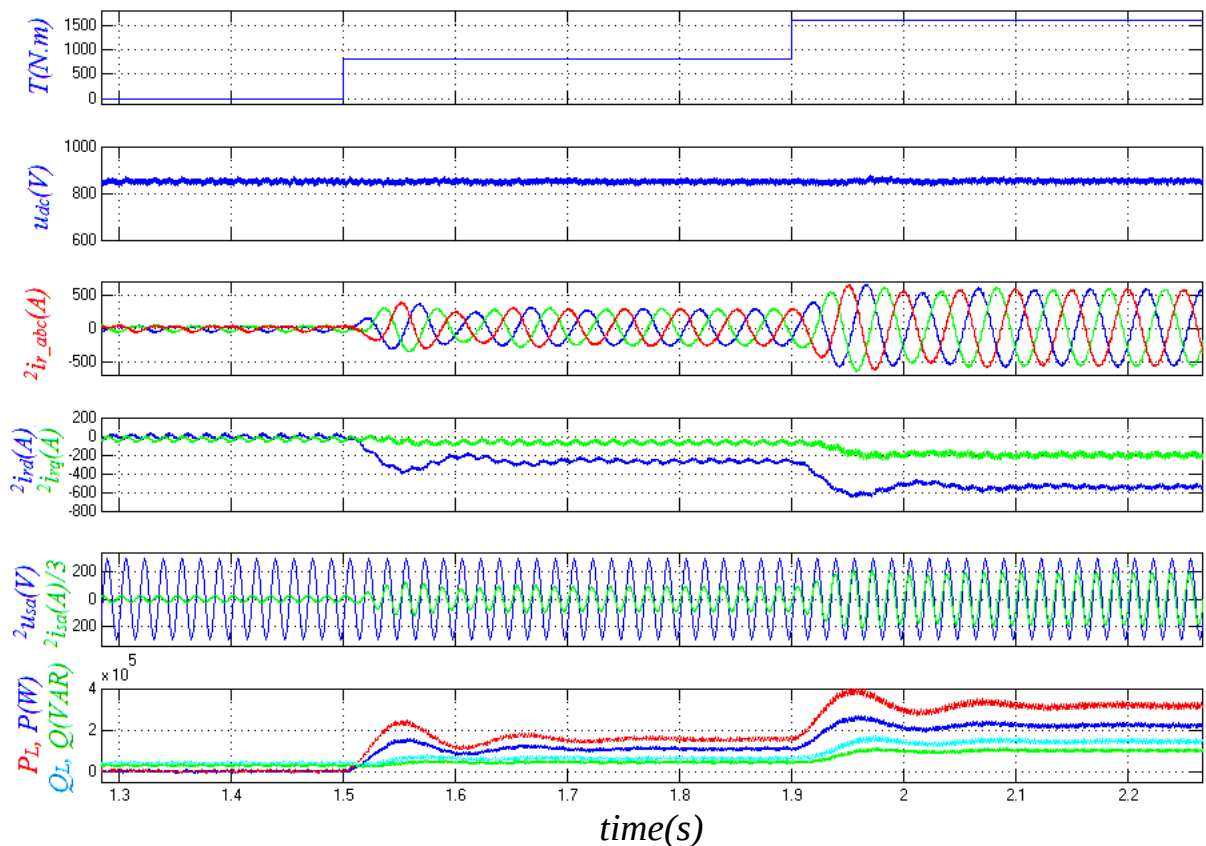


Hình 4.11: Kết quả mô phỏng phân chia công suất tải giữa máy phát đồng trục với lưới điện tàu thủy

Trên đây là kết quả mô phỏng quá trình phân chia tải của máy phát đồng trục với lưới điện trong trường hợp các phụ tải có công suất tác dụng và công suất phản kháng là cố định. Tuy nhiên thực tế trên tàu thủy, có rất nhiều phụ tải là động cơ điện, các thành phần công suất tác dụng và công suất phản kháng thường xuyên thay đổi phức tạp để đáp ứng các yêu cầu về truyền động điện.

Vì vậy, để có kết quả sát thực, tác giả chạy thử hệ thống với trường hợp khác như sau:

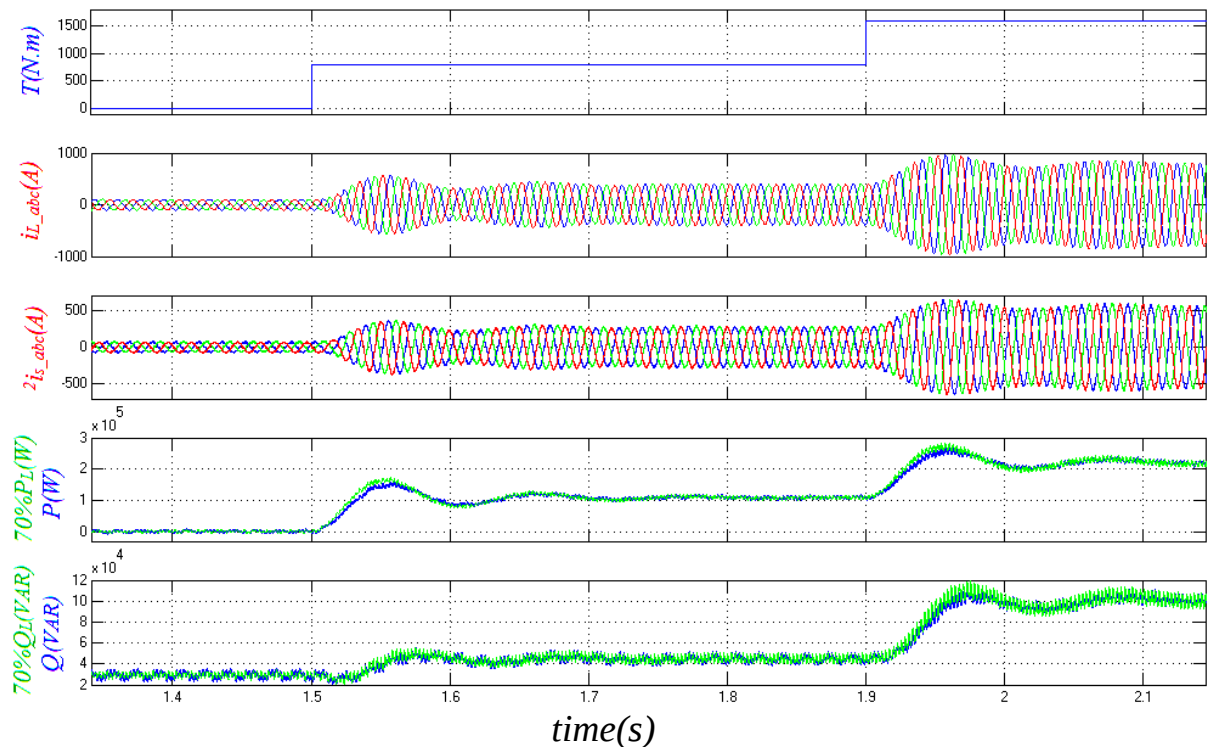
Phụ tải là động cơ điện không đồng bộ rotor lồng sóc (mã hiệu *215HP*, 320KW, 400V, 1487RPM). Ban đầu (trước thời điểm $t=1.5s$), đóng động cơ vào lưới điện, cho momen cản trên đầu trục động cơ bằng 0; tại thời điểm $t=1.5s$, cho momen cản trên đầu trục động cơ =800(N.m); tại thời điểm $t=1.9s$, cho momen cản trên đầu trục động cơ =1600(N.m). Ta được các kết quả mô phỏng như hình 4.12.



Hình 4.12: Kết quả mô phỏng khi phụ tải là động cơ xoay chiều 3 pha

Từ kết quả mô phỏng cho thấy, khi momen cản trên đầu trục của động cơ thay đổi, công suất tác dụng và công suất phản kháng của động cơ tiêu thụ từ lưới thay đổi phức tạp, dẫn đến các giá trị mong muốn (giá trị đặt) của công suất tác dụng và công suất phản kháng của máy phát đồng trục phát lên lưới thay đổi theo. Tuy nhiên, từ kết quả mô phỏng cho thấy, công suất tác dụng và công suất phản kháng của máy phát đồng trục lên lưới luôn bám theo các giá trị đặt.

Để thấy được rõ hơn về khả năng bám các giá trị đặt của hệ thống, tác giả thực hiện lấy kết quả mô phỏng chi tiết hơn gồm: các giá trị đặt (70% công suất phụ tải) và giá trị thực tế của công suất trên cùng một đồ thị, được thể hiện ở hình 4.13. Từ kết quả mô phỏng cho thấy, các đường giá trị công suất thực tế của máy phát (P , Q) gần như trùng khớp với các đường giá trị đặt của nó ($70\%P_L$; $70\%Q_L$). Ngoài ra, tại các thời điểm thay đổi momen cản trên đầu trục của phụ tải động cơ ($t=1.5s$; $t=1.9s$), các giá trị dòng điện tiêu thụ của động cơ (i_{L_abc}) bị thay đổi nhanh và đột ngột, nhưng dòng điện phát ra của máy phát đồng trục ($^2i_{s_abc}$) cũng thay đổi nhanh và đột ngột theo. Như vậy, các dòng điện phát ra của máy phát đồng trục đã thay đổi nhanh và kịp thời, đáp ứng tốt các yêu cầu tiêu thụ điện của phụ tải, góp phần đảm bảo tính ổn định lưới điện trên tàu thủy.



Hình 4.13: Kết quả mô phỏng khả năng điều khiển bám giá trị đặt của hệ thống khi phụ tải là động cơ xoay chiều 3 pha

Nhận xét và kết luận chương 4

Trong chương 4, tác giả đã phân tích và xác định được đối tượng điều khiển, xây dựng được các bộ điều khiển PID chỉnh định mờ để điều khiển đối

tượng. Kết quả đạt được là hệ thống phát điện đồng trục đã đáp ứng được rất tốt các yêu cầu cấp điện trên tàu thủy trong chế độ hòa với lưới như: Điện áp của máy phát luôn bám theo điện áp lưới; công suất tác dụng và công suất phản kháng của máy phát luôn đáp ứng theo các giá trị mong muốn trong thời gian quá độ rất nhỏ và không có độ quá điều chỉnh; các dòng điện của máy phát lên lưới thay đổi nhanh và kịp thời, đáp ứng tốt với các yêu cầu tiêu thụ điện của phụ tải trên tàu thủy.

Tóm lại, ưu điểm của phương pháp điều khiển DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor là phương pháp có cấu trúc điều khiển đơn giản nhưng chất lượng đạt được cao.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết luận

Luận án là công trình khoa học đầu tiên về đề xuất cấu trúc điều khiển máy điện dị bộ nguồn kép trong máy phát đồng trục trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu cảm ứng rotor.

Luận án đã nghiên cứu, đề xuất và xác được khoảng tốc độ rotor của DFIG để hiệu suất chuyển hóa từ cơ năng của máy chính sang điện năng phát ra ở DFIG trong máy phát đồng trục là cao nhất, làm cơ sở cho xác định tỷ lệ truyền của hộp số của máy phát đồng trục để giảm chi phí sản xuất điện năng trên tàu thủy.

Phương pháp điều khiển DFIG trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor đã đơn giản hóa được cấu trúc điều khiển DFIG trong máy phát điện đồng trục, phương pháp cũng đã cách ly được 2 kênh điều khiển công suất tác dụng và công suất phản kháng, 2 kênh này được điều khiển độc lập thông qua 2 hệ số trong 2 mạch khuếch đại tín hiệu lập trình được.

Phương pháp điều khiển DFIG trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor cũng đã nâng cao khả năng bám điện áp lưới “mềm” trên tàu thủy của máy phát đồng trục trong điều kiện tốc độ máy chính thay đổi, nâng cao được độ ổn định và tính an toàn của lưới điện tàu thủy.

Kiến nghị

Với những kết quả đạt được, luận án đã nâng cao được hiệu quả sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép trong máy phát điện đồng trục trên tàu thủy.

Tuy nhiên để hoàn thiện hơn nữa, tác giả xin đề xuất một vài hướng nghiên cứu tiếp theo như sau:

- Nghiên cứu điều khiển DFIG trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor khi hòa với lưới điện trong trường hợp bị lỗi lưới không đối xứng.
- Nghiên cứu điều khiển DFIG trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor ứng dụng trong trường hợp nuôi phụ tải độc lập.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. Nguyễn Trọng Thắng, Nguyễn Tiến Ban, "Phân tích các hệ máy phát đồng trục trên Tàu thủy và đề xuất cấu trúc sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép trên cơ sở tín hiệu đồng dạng", *Tạp chí Giao thông vận tải tháng 10/2012*, trang 40-43. ISSN 0868-7012.
2. Nguyễn Trọng Thắng, Thân Ngọc Hoàn, "Tìm tốc độ góc của rotor máy phát dị bộ nguồn kép để hiệu suất chuyển đổi năng lượng trong hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy đạt cực đại", *Tuyển tập công trình hội nghị cơ điện tử toàn quốc lần thứ 6-VCM2012*, trang 60-66. ISBN 978-604-62-0753-5.
3. Nguyễn Trọng Thắng, Nguyễn Tiến Ban, "Đề xuất phương pháp kích từ cho máy phát đồng trục sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép trong trạm phát điện tàu thủy", *Tuyển tập công trình hội nghị cơ điện tử toàn quốc lần thứ 6-VCM2012*, trang 67-74. ISBN 978-604-62-0753-5.
4. Nguyễn Trọng Thắng, Nguyễn Tiến Ban, "Xác định công suất mạch kích từ của máy phát dị bộ nguồn kép trong hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy", *Tạp chí Khoa học-Công nghệ Hàng hải, Số 33-01/2013*, trang 49-52. ISSN 1859-316X.
5. Thang Nguyen Trong, Ban Nguyen Tien, Hai Nguyen Thanh, "A novel method for excitation control of DFIG connected to the grid on the basis of similar signals from rotor", *International Journal Applied Mechanics and Materials, Volumes 336 - 338- Industrial Instrumentation and Control Systems II*, pp.1153-1160. (ISSN: 1662-7482, Indexed: SCOPUS, ISI (ISTP), EI, IEE).
6. Thang Nguyen Trong, Ban Nguyen Tien, Hai Nguyen Thanh, Hai Nguyen Hoang, "The controller of DFIG power fed into the grid basing on the rotor similar signal method", *International Journal Applied Mechanics and Materials, Volumes 415- Automatic Control and Mechatronic Engineering II*, pp.245-249. (ISSN: 1662-7482, Indexed: SCOPUS, ISI (ISTP), EI, IEE).

7. Thang Nguyen Trong, Ban Nguyen Tien, Hai Nguyen Thanh, “Excitation Control System of DFIG Connected to the Grid on the Basis of Similar Signals from Rotor”, *The 10th IEEE International Conference on Mechatronics and Automation-IEEE-ICMA, 4-7th August, 2013 in Takamatsu, Japan*, pp.738-742. (ISBN: 978-1-4673-5557-5, Indexed: SCOPUS, EI)
8. Nguyễn Trọng Thắng, Nguyễn Tiến Ban, Nguyễn Đức Minh, ”Máy phát dị bộ nguồn kép không chổi than”, *Tạp chí Khoa học và công nghệ Hàng hải số 36-11/2013*, trang 36-39. ISSN 1859-316X.

Giải thưởng:

Best Paper Award at the International Conference on Automatic Control and Mechatronic Engineering (ICACME 2013), 21-22nd June, 2013 in Bangkok, Thailand.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng việt

- [1] Nguyễn Hoàng Hải, Nguyễn Tiến Ban (2011), “Xây dựng mô hình DFIG làm máy phát đồng trục dựa trên nguyên lý phẳng”, *Tạp chí Khoa học và công nghệ Hàng hải* tháng số 26, 04/2011, tr. 51-55.
- [2] Nguyễn Hoàng Hải, Nguyễn Tiến Ban (2012), “ Điều khiển DFIG làm chức năng máy phát đồng trục trong trạm phát điện tàu thủy dựa trên nguyên lý hệ phẳng”, *Tạp chí Khoa học và công nghệ Hàng hải* tháng số 29, 01/2012, tr. 41-46.
- [3] Thân Ngọc Hoàn (1995), *Máy điện tàu thủy-tập 1*, Nhà xuất bản giao thông vận tải.
- [4] Thân Ngọc Hoàn (2002), *Mô phỏng hệ thống điện tử công suất và truyền động điện*, Nhà xuất bản xây dựng.
- [5] Thân Ngọc Hoàn, Nguyễn Tiến Ban (2008), *Trạm phát và lưới điện tàu thủy*, Nhà xuất bản Khoa học và kỹ thuật.
- [6] Đặng Danh Hoàng (2012), *Cải thiện chất lượng điều khiển máy phát không đồng bộ nguồn kép dùng trong hệ thống phát điện chạy sức gió bằng phương pháp điều khiển phi tuyến*, Luận án tiến sỹ kỹ thuật, Đại học Thái Nguyên.

- [7] Nguyễn Thị Mai Hương (2012), *Sách lược điều khiển nhằm nâng cao tính bền vững trụ lưới của hệ thống phát điện sức gió sử dụng máy điện không đồng bộ nguồn kép*, Luận án tiến sỹ kỹ thuật, Đại học Thái Nguyên.
- [8] Phan Xuân Minh, Nguyễn Doãn Phước (2001), *Lý thuyết điều khiển mờ*, Nhà xuất bản Khoa học và kỹ thuật.
- [9] Nguyễn Phùng Quang (1998), “Máy điện dị bộ nguồn kép dùng làm máy phát trong hệ thống phát điện chạy sức gió: Các thuật toán điều chỉnh đảm bảo phân ly giữa mô men và hệ số công suất” *tuyển tập VICA3*, tr. 413-437.
- [10] Nguyễn Phùng Quang, Ditttrich A (2002), *Truyền động điện thông minh*, NXB Khoa học và kỹ thuật Hà Nội.
- [11] Cao Xuân Tuyền (2008), *Tổng hợp các thuật toán phi tuyến trên cơ sở phương pháp Backstepping để điều khiển máy điện dị bộ nguồn kép trong hệ thống máy phát điện sức gió*, Luận án tiến sỹ kỹ thuật, Đại học Bách khoa Hà Nội.
- [12] Vũ Hà Việt (2010), *Trạm phát điện tàu thủy với máy phát đồng trục cung cấp năng lượng thông qua biến tần, Nghiên cứu các bộ điều khiển khi các máy phát làm việc song song*, Luận văn thạc sỹ kỹ thuật, Đại học Hàng Hải.

Tiếng anh

- [13] Abad G., Rodriguez M. A., Iwanski G., and Poza J. (2010), “Direct power control of doubly-fed-induction-generator-based wind turbines under unbalanced grid voltage” , *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 2, pp. 442–452.
- [14] Abad G., Rodriguez M. A., and Poza J. (2008), “Two-level VSC based predictive direct torque control of the doubly fed induction machine with reduced torque and flux ripples at low constant switching frequency”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.23, no.3, pp. 1050–1061.
- [15] Abad G., Rodriguez M. A., Poza J., and Canales J. M. (2010), “Direct torque control for doubly fed induction machine-based wind turbines under voltage dips and without crowbar protection”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol.25, no.2, pp. 586–588.
- [16] Abdullah M. A., Yatim A. H. M., Tan C. W., and Saidur R. (2012), “A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 3220-3227.
- [17] Abolhassani M., Niazi P., Tolivat H., and Enjeti P. (2003), “A sensorless Integrated Doubly-Fed Electric Alternator/Active filter (IDEA) for variable speed wind

energy system”, *Conf. Rec. 38th IEEE IAS Annu Meeting* , pp. 507–514.

- [18] Arbi J., Ghorbal M. J. B., Slama-Belkhodja I., and Charaabi L. (2009), “Direct virtual torque control for doubly fed induction generator grid connection”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 10, pp. 4163-4173.
- [19] Barati F., Oraee H., Abdi E., Shao S., and McMahon R. (2008), “The brushless doubly-fed machine vector model in the rotor flux oriented reference frame” , *Proc. 34th Annu. IEEE IECON*, pp. 1415–1420.
- [20] Bogalecka E. and Krzeminski Z. (2002), “Sensorless control of a double-fed machine for wind power generators”, *Proc. EPE-PMC, Dubrovnik and Cavtat, Croatia*, pp.1-8.
- [21] Boger M. and Wallace A. (1995), “Performance capability analysis of the brush-less doubly-fed machine as a wind generator”, *Proc. 7th Int. Conf. Elect. Mach.Drives. No. 412*, pp. 458–461.
- [22] Bonnet F., Vidal P. E., and Pietrzak David M. (2007), “Dual direct torque control of doubly fed induction machine”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.54, no.5, pp. 2482–2490.
- [23] Cadirci I. and Ermis M. (1992), “Double-output induction generator operating at subsynchronous and

supersynchronous speeds: Steady-state performance optimisation and wind-energy recovery”, *Proc. Inst. Elect.Eng.Elect. Power Appl.*, vol. 139, no. 5, pp. 429-442.

- [24] Cardenas R., Pena R., Asher G., Clare J., and Cartes J. (2004), “MRAS observer for doubly fed induction machines”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol.19, no.2, pp. 467-468.
- [25] Cardenas R., Pena R., Clare J., Asher G., and Proboste J. (2008), “MRAS observers for sensorless control of doubly-fed induction generators”, *IEEE Trans. Power Electron*, vol.23, no.3, pp.1075-1084.
- [26] Cardenas R., Pena R., Proboste J., Asher G., and Clare J. (2004), “Rotor current based MRAS observer for doubly-fed induction machines”, *Electron. Lett.*, vol.40, no.12, pp. 769-770.
- [27] Cardenas R., Pena R., Proboste J., Asher G., and Clare J. (2005), “MRAS observer for sensorless control of standalone doubly fed induction generators”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol.20, no 4, pp. 710–718.
- [28] Cardenas R., Pena R., Proboste J., Asher G., Clare J., and Wheeler P. (2008), “MRAS observers for sensorless control

of doubly-fed induction generators”, *Proc. 4th IET Conf. PEMD*, pp.568-572.

- [29] Cardenas R., Pena R., Tobar G., Clare J., Wheeler P., and Asher G. (2009), “Stability analysis of a wind energy conversion system based on a doubly fed induction generator fed by a matrix converter”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.56, no.10, pp.4194-4206.
- [30] Carmeli M. S., Iacchetti M., and Perini R. (2010), “A MRAS observer applied to sensorless doubly fed induction machine drives”, *Proc. IEEE ISIE*, vol.1, pp. 3077-3082.
- [31] Castelli-Dezza F., Foglia G., Iacchetti M. F., and Perini R. (2012), “An MRAS observer for sensorless DFIM drives with direct estimation of the torque and flux rotor current components”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 5, pp. 2576-2584.
- [32] Datta R. and Ranganathan V. T. (2001), “A simple position-sensorless algorithm for rotor-side field-oriented control of wound-rotor induction machine”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.48, no 4, pp.786-793.
- [33] Flores Mendes V., De Sousa C. V., Silva S. R., Rabelo J., and Hofmann W. (2011), “Modeling and ride-through control of doubly fed induction generators during symmetrical voltage

sags”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol.26, no.4, pp. 1161-1171.

- [34] Forchetti D. G., García G. O., Member S., and Valla M. I. (2009), “Adaptive observer for sensorless control of stand-alone doubly fed induction generator”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.56, no.10, pp. 4174-4180.
- [35] Jang, J. I., Kim, Y. S., & Lee, D. C. (2006), ”Active and reactive power control of DFIG for wind energy conversion under unbalanced grid voltage”, *Power Electronics and Motion Control Conference 2006-IPEMC2006. CES/IEEE 5th International*, Vol. 3, pp. 1-5.
- [36] Ghosn R., Asmar C., Pietrzak-David M., and De Fornel B. (2002), “A MRAS sensorless speed control of doubly fed induction machine”, *Proc. Int.Conf. Elect.*, pp.26–28.
- [37] Ghosn R., Asmar C., Pietrzak-David M., and De Fornel B. (2003), “A MRAS Luenberger sensorless speed control of doubly fed induction machine”, *Proc. Eur. Power Electron. Conf.*, pp.1-10.
- [38] Gowaid A., Ayman Abdel-Khalik S, Ahmed Massoud M., Shehab Ahmed (2013), “Ride-Through Capability of Grid-Connected Brushless Cascade DFIG Wind Turbines in Faulty

Grid Conditions- A Comparative Study”, *IEEE Transactions on sustainable energy*, Issue: 99, pp.1-14.

- [39] Griffo A., Drury D., Sawata T., and Mellor P. H. (2012), “Sensorless starting of a wound-field synchronous starter/generator for aerospace applications”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.59, no.9, pp. 3579–3587.
- [40] Guofeng Y., Yongdong L., Jianyun C., and Xinjian J. (2008), “A novel position sensor-less control scheme of Doubly Fed Induction Wind Generator based on MRAS method” , *Proc. IEEE PESC* , pp. 2723-2727.
- [41] Hopfensperger B., Atkinson D. J., and Lakin R. A. (2000), “Stator-flux-oriented control of a doubly-fed induction machine with and without position encoder,” *Proc. Inst. Elect. Eng. Elect. Power Appl.*, vol. 147, no. 4, pp. 241–250.
- [42] Hu, J., Nian, H., Hu, B., He, Y., & Zhu, Z. Q. (2010), ”Direct active and reactive power regulation of DFIG using sliding-mode control approach”, *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, Vol.25, No.4, pp.1028-1039.
- [43] Hwang, H. S., Choi, J. N., Lee, W. H., & Kim, J. K. (1999), ”A tuning algorithm for the PID controller utilizing fuzzy theory”, *Neural Networks 1999-IJCNN'99. International Joint Conference on*, Vol.4, pp.2210-2215.

- [44] Kramer C. (1908), “Neue methode zur regelung von asynchronen motoren”, *Elektrotech.Z.*, vol. 29, p.734.
- [45] Lan, Ph.Ng (2006), *Linear and nonlinear control approach of double-fed induction generator in wind power generation*, P.h.D thesis, TU-Dresden.
- [46] Lavi A. and Polge R. J. (1966), “Induction motor speed control with static inverter in the rotor”, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-85, no.1, pp.76-84.
- [47] Li S., Haskew T. A., Williams K. A., and R. P. Swatloski (2012), “Control of DFIG wind turbine with direct-current vector control configuration”, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 1, pp.1-11.
- [48] Liserre M., Cardenas R., Molinas M., and Rodriguez J. (2011), “Overview of multi MW wind turbines and wind parks”, *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 58, no. 4, pp. 1081–1095.
- [49] MAN B&W Diezel A/S (2004), *Shaft Generators for the MC and ME Engines*, Denmark.
- [50] Marques G. D., Pires V. F., Sousa S., and Sousa D. M. (2009), “Evaluation of a DFIG rotor position-sensorless detector based on a hysteresis controller”, *Proc. Int. Conf. POWERENG Energy Elect. Drives*, pp.113–116.

- [51] Marques G. D., Pires V. F., Sousa S., and Sousa D. M. (. 2011), “A DFIG sensorless rotor-position detector based on a hysteresis controller”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 26, no. 1, pp. 9–17.
- [52] Marques G. D., and Sousa D. M. (2010), “A DFIG sensorless method for direct estimation of slip position”, *Proc. IEEE Region 8 Int.Conf.Comput. Technol.Elect. Electron. Eng. (SIBIRCON)* , pp. 818-823.
- [53] Marques G. D., and Sousa D. M. (2011), “Air-gap-power-vector-based sensorless method for DFIG control without flux estimator”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.58, no.10, pp. 4717–4726.
- [54] McMahon R.A., Roberts P.C., Wang X., and Tavner P.J. (2006), “Performance of BDFM as generator and motor”, *IEEE Proc. Electr. Power Appl.*, Vol. 153, No. 2, pp.289-299.
- [55] Merzoug M., and Naceri F. (2008), "Comparison of field-oriented control and direct torque control for permanent magnet synchronous motor (pmsm)", *Proceedings of world academy of science, engineering and technology*, Vol. 35, pp.299-304.

- [56] Mishra, J. P., Hore, D., & Rahman, A., (2011), "Fuzzy logic based improved Active and Reactive Power control operation of DFIG for Wind Power Generation", *Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011 IEEE 8th International Conference on*, pp.654-661.
- [57] Morel L., Godfroid H., Mirzaian A., and Kauffmann J. M. (1998), "Double-fed induction machine: Converter optimisation and field oriented control without position sensor", *Proc. Inst. Elect. Eng. Elect. Power Appl.*, vol.145, no.4, pp. 360-368.
- [58] Muller S., Deicke M., and De Doncker R. W. (2002), "Doubly fed induction generator systems for wind turbines", *IEEE Ind. Appl. Mag*, vol.8, no.3, pp. 26-33.
- [59] Nicolas Patin, Eric Monmasson, Jean-Paul Louis (2009), "Modeling and Control of a Cascaded Doubly Fed Induction Generator Dedicated to Isolated Grids", *IEEE Transactions on industrial electronics*, Vol.46, No.10, pp.4207-4219.
- [60] Panda, Gayadhar (2013), "Novel schemes used for estimation of power system harmonics and their elimination in a three-phase distribution system", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, pp.842-856.

- [61] Pattnaik M. and Kastha D.(2011), “Comparison of MRAS based speed estimation methods for a stand-alone doubly fed induction generator”, *Proc. ICEAS*, pp.1-6.
- [62] Pena R, Clare J.C, Asher G.M (1996), “Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind–energy generation”, *IEE Proceedings-Electric Power Applications* 143.3, pp. 231-241.
- [63] Pena R., Cardenas R., Asher G. M., Clare J. C., Rodriguez J., and Cortes P. (2002), “Vector control of a diesel-driven doubly fed induction machine for a stand-alone variable speed energy system”, *Proc. 28th Annu. IEEE IECON*, vol.2, pp.985-990.
- [64] Pena R., Cardenas R., Clare J., and Asher G. (2002), “Control strategy of doubly fed induction generators for a wind diesel energy system”, *Proc. 28th Annu., IEEE IECON* , vol.4, pp. 3297–3302.
- [65] Pena R., Cardenas R., Proboste J., Asher G., and Clare J. (2005), “Sensorless control of a slip ring induction generator based on rotor current MRAS observer”, *Proc. 36th IEEE PESC* , pp. 2508-2513.

- [66] Pena R., Cardenas R., Proboste J., Asher G., and Clare J. (2008), "Sensorless control of doubly-fed induction generators using a rotor-current-based MRAS observer", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.55, no.1, pp. 330-339.
- [67] Pena R., Cardenas R., Reyes E., Clare J., and Wheeler P. (2009), "A topology for multiple generation system with doubly fed induction machines and indirect matrix converter", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.56, no.10, pp.4181-4193.
- [68] Pena R., Clare J. C., and Asher G. M. (1996), "A doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine", *Proc. Inst. Elect. Eng. Elect. Power Appl.*, vol.143, no.5, pp. 380–387.
- [69] Peng Ling Tsinghua, Li Yongdong, Chai Jianguo, Yuel Guoteny (2007), "Vector control of a doubly fed induction generator for stand-alone ship shaft generator systems", *Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on*, pp. 1033-1036.
- [70] Personal (2001), *Power management*, ASI Automation-Schiff-Industries.

- [71] Petersson (2005), *Analysis, Modeling and control of Doubly-Fed induction Generator for wind turbines*, P.h.D thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
- [72] Phan V.-T., Lee H.-H.(2012), "Performance enhancement of stand-alone DFIG systems with control of rotor and load side converters using resonant controllers," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.48, no.1, pp.199-210.
- [73] Pimple B. B., Vekhande V. Y., and Fernandes B. G. (2011), "A new direct torque control of doubly-fed induction generator under unbalanced grid voltage", *Proc. 6th Annu. IEEE APEC Expo.*, pp.1576–1581.
- [74] Qizhong L., Lan Y., and Guoxiang W.(2011), "Comparison of control strategy for Double-Fed Induction Generator (DFIG)", *Proc. 3rd ICMTMA* , vol.1, pp.741–744.
- [75] Quang Ng.Ph, Ditttrich A, Lan Ph.Ng(1997), "Doubly fed induction Machine as Generator: Control Algorithms with Decoupling of Torque and Power Factor", *Electrical Engineering/ Archiv fur Elektrotechnik*, pp.325-335.
- [76] Rahmatian, B., & Mirabbasi, S. (2007), "A low-power 75 dB digitally programmable variable-gain amplifier in 0.18 μm CMOS", *Electrical and Computer Engineering, Canadian Journal of*, Vol.32, No.4, pp.181-186.

- [77] Rashid, M. M., and Ahmad Wali. (2010), "Fuzzy-PID hybrid controller for point-to-point (PTP) positioning system", *American Journal of Scientific Research* , pp.72-80.
- [78] Ruviaro M., Runcos F., Sadowski N., and Borges I. M. (2012), "Analysis and test results of a brushless doubly fed induction machine with rotary transformer", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 6, pp.2670-2677.
- [79] Santos-Martin D., Rodriguez-Amenedo J. L., and Arnalte S. (2008), "Direct power control applied to doubly fed induction generator under unbalanced grid voltage conditions", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.23, no.5, pp.2328-2336.
- [80] Satish. R. V , Zafar. J. K, "Performance of tuned PID controller and a new hybrid fuzzy PD + I controller", *World Journal of Modelling and Simulation*, Vol. 6 No. 2, pp.141-149.
- [81] Sanz, A. T., Cehna, S., & Calvo, B. (2005), "High linear digitally programmable gain amplifier", *Circuits and Systems*, 2005. ISCAS 2005. *IEEE International Symposium on*, pp. 208-211.
- [82] Sanz, M. T., Celma, S., & Calvo, B. (2006), "Highly Linear MOS Current Division Techniques for Programmable Gain

Amplifiers”, *Devices, Circuits and Systems, Proceedings of the 6th International Caribbean Conference on*, pp. 95-100.

- [83] Schauder C. (1992), “Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.28, no.5, pp.1054-1061.
- [84] Sinthipsomboon, Kwanchai (2011), "A hybrid of fuzzy and fuzzy self-tuning PID controller for servo electro-hydraulic system", *Industrial Electronics and Applications (ICIEA) 6th IEEE Conference on*, pp.220-225.
- [85] Smith G. A., and Nigim K. A. (1981), “Wind-energy recovery by a static Scherbius induction generator”, *Proc. Inst. Elect. Eng. Gen., Transmiss. Distrib.*, vol. 128, no. 6, pp.317–324.
- [86] Sun, L., Mi, Z., Yu, Y., Wu, T., & Tian, H. (2009), ”Active power and reactive power regulation capacity study of DFIG wind turbine” *Sustainable Power Generation and Supply 2009-SUPERGEN'09, IEEE International Conference on*, pp.1-6.
- [87] Thang Nguyen Trong, Ban Nguyen Tien, Hai Nguyen Thanh (2013), “A novel method for excitation control of DFIG connected to the grid on the basis of similar signals from rotor”, *International Journal Applied Mechanics and*

Materials, Vol.336-338 Industrial Instrumentation and Control Systems II, pp.1153-1160.

- [88] Thang Nguyen Trong, Ban Nguyen Tien, Hai Nguyen Thanh (2013), “Excitation Control System of DFIG Connected to the Grid on the Basis of Similar Signals from Rotor”, *10th IEEE-ICMA, Japan*, pp.738-742.
- [89] Tohidi S., Oraee H., Zolghadri M. R., Shao S., and Tavner P. (2013), “Analysis and enhancement of low-voltage ride-through capability of brushless doubly fed induction generator”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.60, no.3, pp.1146-1155.
- [90] Tremblay E., Atayde S., and Chandra A. (2011), “Comparative study of control strategies for the doubly fed induction generator in wind energy conversion systems: A DSP-based implementation approach”, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol.2, no.3, pp. 288-299.
- [91] Uctug M. Y., Eskandarzadeh I., and Ince H. (1994), “Modelling and output power optimisation of a wind turbine driven double output induction generator”, *Proc. Inst. Elect. Eng. Elect. Power Appl.*, vol. 141, no. 2, pp.33-38

- [92] Web site, ABB, "ABB low voltage wind turbine converters ACS800-67, 0.6 to 2.2 MW", <http://www05.abb.com/global/scot>, Accessed on July 2012.
- [93] Website, Schneider, "Altivar-71", <http://www.schneider-electric.co.uk/sites/uk/en/products-services/automation-control>, Accessed on June 2012.
- [94] Wong K. C., Ho S. L., and Cheng K.W. E. 2009 (), "Direct control algorithm for doubly fed induction generators in weak grids," *IET Elect. Power Appl.*, vol. 3, no. 4, pp.371-380.
- [95] Xu, J., & Feng, X. (2004), "Design of adaptive fuzzy PID tuner using optimization method", *Intelligent Control and Automation, 2004-WCICA 2004. Fifth World Congress on*, Vol. 3, pp.2454-2458. .
- [96] Zhi D., and Xu L. (2007), "Direct power control of DFIG with constant switching frequency and improved transient performance", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 1, pp.110-118.
- [97] Zoheir Tir, Hammoud Rajeai, Rachid Abdessemed (2010), "Analysis and vector control of a cascaded doubly fed induction generator in wind energy applications", *Revue des Energies Renouvelables SMEE'10*, pp.347-358.

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI

NGUYỄN TRỌNG THẮNG

**NÂNG CAO HIỆU QUẢ SỬ DỤNG MÁY ĐIỆN DI BỘ NGUỒN KÉP
CHO HỆ THỐNG PHÁT ĐIỆN ĐỒNG TRỤC TRÊN TÀU THỦY**

Chuyên ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa
Mã số: 62.52.02.16

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI- 2014

Luận án được hoàn thành tại: **Trường Đại học Giao thông vận tải**

Người hướng dẫn khoa học: **PGS.TS. Nguyễn Tiến Ban**

PGS.TS. Nguyễn Thanh Hải

Phản biện 1: GS.TS Phan Xuân Minh

Phản biện 2: PGS.TS Trần Anh Dũng

Phản biện 3: TS. Nguyễn Quang Hải

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án tiến sĩ cấp Trường họp tại:

vào hồi giờ ngày tháng năm 2014.

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện trường Đại học Giao thông vận tải
- Thư viện Quốc gia

MỞ ĐẦU

Giới thiệu tóm tắt luận án

Luận án đi sâu nghiên cứu hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép, để đưa ra giải pháp nâng cao hiệu quả sản xuất điện năng, góp phần giảm tiêu thụ nhiên liệu và giảm chi phí vận hành trên tàu thủy. Nội dung của luận án được chia được chia làm 4 chương, 113 trang (kể cả tài liệu tham khảo), 97 tài liệu tham khảo, 54 hình vẽ và đồ thị.

Lý do chọn đề tài

Khi đi trên biển, trong môi trường ổn định về khí hậu và thời tiết, các động cơ chính lái chân vịt tàu thủy thường khai thác không hết công suất, để tận dụng sự dư thừa công suất này, các tàu trọng tải lớn thường được thiết kế có các máy phát điện đồng trục làm việc với các cụm diesel–máy phát.

Tuy nhiên, một trong những vấn đề kỹ thuật phức tạp nhất là việc ổn định tần số và ổn định điện áp của máy phát đồng trục khi tốc độ quay của máy chính thay đổi trong giới hạn rộng, một giải pháp kỹ thuật hiệu quả là sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép làm việc ở chế độ máy phát.

Máy điện dị bộ nguồn kép trong hệ thống máy phát đồng trục có ưu điểm rất nổi bật là stator được nối trực tiếp với lưới điện, còn rotor nối với lưới qua thiết bị điện tử công suất, nên công suất thiết bị điều khiển nhỏ hơn rất nhiều công suất máy phát và dòng năng lượng thu được chảy trực tiếp từ stator sang lưới.

Từ những lý do trên tác giả chọn đề tài: *“Nâng cao hiệu quả sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép cho hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy”* để thực hiện luận án của mình.

Mục đích nghiên cứu

Việc áp dụng máy điện dị bộ nguồn kép cho hệ phát điện đồng trục trên tàu thủy phải đảm bảo được 2 chế độ công tác: 1. Làm việc song song được với lưới “mềm” tàu thủy, 2. Làm việc độc lập khi cần thiết. Trong luận án tác giả đi sâu vào khả năng làm việc song song với lưới điện tàu thủy bằng đề xuất một cấu trúc mới với hệ điều khiển đơn giản, chất lượng cao, khả năng bám lưới “mềm” bền vững.

Cũng trong luận án, tác giả cũng nghiên cứu khảo sát mối liên hệ giữa các thành phần công suất, từ đó xác định được tỉ lệ truyền của hộp số của máy phát đồng trục để hiệu suất chuyển đổi từ cơ năng sang điện năng cao nhất.

Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của luận án gồm:

- Máy điện dị bộ nguồn kép.

- Cấu trúc điều khiển máy điện dị bộ nguồn kép trong máy phát đồng trục.

Phạm vi nghiên cứu của luận án là: Nghiên cứu máy phát đồng trục làm việc trong chế độ hòa với lưới điện “mềm” trên tàu thủy.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

- Ý nghĩa khoa học là đã đề xuất mô hình mới ứng dụng máy điện dị bộ nguồn kép làm chức năng máy phát điện đồng trục trên tàu thủy, nhằm nâng cao hiệu quả ứng dụng máy điện dị bộ nguồn kép trong máy phát đồng trục trên tàu thủy.

- Ý nghĩa thực tiễn của đề tài là: giảm thiểu chi phí sản xuất điện năng, góp phần tiết kiệm chi phí vận hành trên tàu thủy.

Những đóng góp của luận án

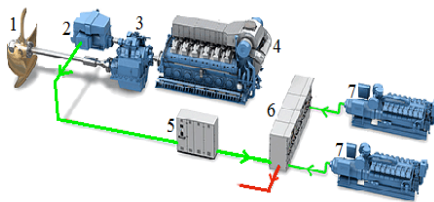
- Luận án đề xuất cấu trúc điều khiển máy điện dị bộ nguồn kép ở máy phát đồng trục trên tàu thủy trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor.

- Luận án đã đơn giản hóa được cấu trúc điều khiển máy điện dị bộ nguồn kép trong máy phát điện đồng trục.

- Nâng cao khả năng bám điện áp lưới “mềm” trên tàu thủy của máy phát đồng trục sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép trong điều kiện tốc độ máy chính bị thay đổi.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN HỆ THỐNG PHÁT ĐIỆN ĐỒNG TRỤC TRÊN TÀU THỦY SỬ DỤNG MÁY ĐIỆN DỊ BỘ NGUỒN KÉP VÀ CÁC CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU LIÊN QUAN

1.2 Khái quát hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy



Hình 1.1: Sơ đồ hệ thống phát điện trên tàu thủy có sử dụng máy phát điện đồng trục

Các ký hiệu trong hình 1.1 như sau: 1.Chân vịt; 2. Máy phát đồng trục; 3. Hộp số; 4. Máy chính; 5. Bộ điều khiển công suất máy phát đồng trục; 6.Tủ phân phối điện; 7.Tổ hợp máy phát điện diesel.

1.2 Các hệ thống phát điện đồng trục trong thực tế

1.2.1 Các cách bố trí máy phát đồng trục để lấy cơ năng từ máy chính

Các máy phát đồng trục được bố trí bằng nhiều cách khác nhau để lấy cơ năng từ máy chính. Mỗi cách bố trí đều có các ưu và nhược điểm của riêng của nó, cụ thể có các cách bố trí như sau [5][12]:

- Máy phát đồng trục là một phần của trục chân vịt.
- Máy phát đồng trục được đặt đối diện với chân vịt qua máy chính.
- Máy phát đồng trục được truyền động qua hộp số cùng phía chân.
- Máy phát đồng trục được truyền động qua hộp số phía đối diện với chân vịt.

- Máy phát đồng trục lắp đặt ngay trên diesel của máy chính.
- Máy phát đồng trục được truyền động qua hộp số ngược với chân vịt ngay cạnh máy chính.

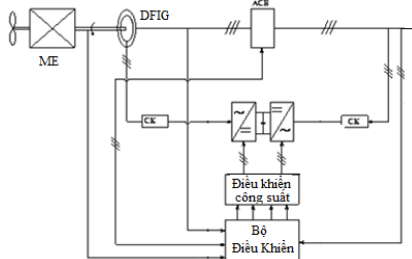
1.2.2 Các cấu trúc phần điện của máy phát đồng trục

Qua nhiều giai đoạn, cấu trúc phần điện của máy phát đồng trục rất đa dạng, cụ thể có các cấu trúc như sau:

- Máy phát đồng trục là hệ 3 máy điện gồm: máy phát một chiều, động cơ một chiều, máy phát đồng bộ 3 pha.
- Máy phát đồng trục là máy phát điện đồng bộ.
- Máy phát đồng trục với bộ ổn định tần số thông qua ổn định tốc độ động cơ một chiều.
- Hệ thống phát điện đồng trục với bộ ổn định tần số cho máy phát thông qua ổn định tốc độ động cơ xoay chiều.
- Máy phát đồng trục với bộ ổn định tần số.
- Hệ thống phát điện đồng trục sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép. Hệ thống này có ưu điểm nổi bật là công suất thiết bị điều khiển nhỏ hơn nhiều công suất máy phát, hệ thống có kích thước nhỏ gọn, phạm vi hoạt động rộng, tần số điện áp phát ra không đổi trong khi tốc độ rotor thay đổi...

1.3 Sơ đồ tổng quát hệ thống điều khiển máy phát điện đồng trục sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép

Bao gồm hai cụm: cụm nghịch lưu phía lưới và cụm nghịch lưu phía máy phát, hai cụm được nối với nhau thông qua mạch điện một chiều trung gian.



Hình 1.11: Cấu trúc điều khiển máy điện dị bộ nguồn kép

1.4 Tổng hợp các kết quả nghiên, ứng dụng DFIG trong hệ thống phát điện

Hiện tại, cấu trúc phát điện sử dụng DFIG chiếm gần 50% thị trường phát điện sức gió [48], với dải công suất từ 1.5MW đến 3MW, gồm 93 model của các hãng sản xuất khác nhau trên thế giới [71].

Có rất nhiều công trình trong nước và quốc tế nghiên cứu về điều khiển DFIG, sau đây là một số cấu trúc điều khiển DFIG điển hình.

1.4.1 Cấu trúc điều khiển tĩnh Scherbius

Hai hệ thống đầu tiên sử dụng cấu trúc Scherbius là: 1. Hệ thống tĩnh Kramer[23][46][85][91]; 2. Hệ thống với bộ biến tần trực tiếp được nối giữa rotor và stator.

1.4.2 Điều khiển vector không gian

Một số công trình trong nước và quốc tế nghiên cứu điều khiển DFIG trên cơ sở vector không gian cho máy phát điện tàu thủy là [1][2][6][27].

Ngoài ra, còn có rất nhiều các công trình liên quan hay có sự tương đồng là các công trình nghiên cứu ứng dụng máy điện dị bộ nguồn kép vào hệ thống phát điện sức gió.

1.4.3 Điều khiển trực tiếp momen (direct torque control-DTC)

Phương pháp này có ưu điểm nổi bật là hiệu suất chuyển đổi năng lượng cao [14][15][18][22][73][74][90]. Hãng ABB đã phát triển bộ biến đổi công suất điều khiển DFIG bằng phương pháp này [92].

1.4.4 Điều khiển trực tiếp công suất (direct power control-DPC)

Phương pháp điều khiển trực tiếp công suất có kết cấu phần cứng tương tự như phương pháp DTC, nó có điểm khác là nghiên cứu ảnh hưởng của từ thông stator và rotor tới công suất tác dụng và công suất phản kháng của stator DFIG phát lên lưới [13][79][85][90].

1.4.5 Cấu trúc điều khiển DFIG không cảm biến

Có một vài phương pháp điều khiển DFIG không cảm biến:

- Phương pháp điều khiển DFIG không cảm biến trên cơ sở quan sát thích nghi theo mô hình mẫu [16][25][28][30][34] [40][61][66] [83].
- Phương pháp điều khiển DFIG không cảm biến vòng hở [17] [20] [32][41][57].
- Các phương pháp điều khiển DFIG không cảm biến khác.

1.4.6 Cấu trúc điều khiển DFIG không chổi than (Brushless- Doubly-Fed Induction Generator- BDFIG)

Hạn chế của các hệ thống phát điện sử dụng DFIG là phải có chổi than và vành trượt. Một cấu trúc được đề xuất để khắc phục hạn chế này là tổ hợp máy phát điện dị bộ nguồn kép không chổi than, hệ thống này đã được ứng dụng khả thi trong thực tế [19][21][78][89][96].

1.5 Các vấn đề còn tồn tại và đề xuất giải pháp, mục tiêu của luận án

Hệ thống điều khiển DFIG trong máy phát đồng trục có cấu trúc điều khiển phức tạp, khả năng bám lưới và chất lượng điện của máy phát phụ thuộc nhiều phương pháp điều khiển. Để máy phát có chất lượng điện tốt và bám lưới bền vững thì cấu trúc hệ thống phải bao gồm nhiều khâu tính toán và điều khiển phức tạp.

Luận án đề xuất một phương án kỹ thuật mới là phương pháp điều khiển máy phát dị bộ nguồn kép trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor, với mục đích là làm đơn giản hóa hệ thống điều khiển máy phát đồng trục sử dụng DFIG, dẫn tới giảm giá thành hệ thống, nhưng vẫn đáp ứng được tốt các yêu cầu chất lượng cao.

Đồng thời, luận án nghiên cứu xác định tốc độ rotor của DFIG để hiệu suất chuyển đổi cơ năng sang điện năng là cao nhất, để cài đặt được tỷ lệ truyền giữa máy chính và rotor của DFIG để nhiên liệu cho sản xuất điện năng thấp nhất.

1.6 Nội dung và phương pháp nghiên cứu của luận án

Nội dung của luận án tập trung nghiên cứu hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy sử dụng DFIG. Trên cơ sở đó, đề xuất các giải pháp để nâng cao hiệu quả sử dụng DFIG trong hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy.

Phương pháp nghiên cứu của luận án là dựa trên các đặc điểm, tính chất và mô hình toán của DFIG, các đặc điểm của máy phát đồng trục trên tàu thủy để phân tích, chứng minh và đề xuất mô hình điều khiển DFIG mới hiệu quả cao. Đồng thời, kiểm chứng các kết quả thu được bằng mô phỏng trên phần mềm Matlab.

Nhận xét và kết luận chương 1

CHƯƠNG 2: ĐỀ XUẤT CẤU TRÚC PHÁT ĐIỆN ĐỒNG TRỤC SỬ DỤNG DFIG BẰNG KỸ THUẬT ĐỒNG DẠNG TÍN HIỆU ROTOR

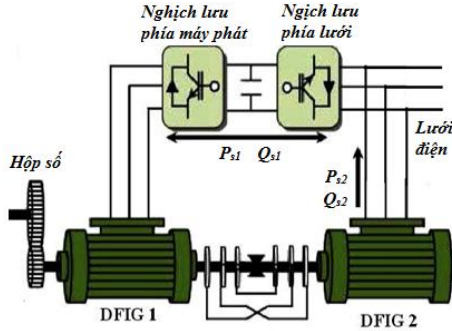
2.1 Các phương trình toán mô tả DFIG

2.2 Các cấu trúc ghép nối DFIG ứng dụng trong hệ thống phát điện

So với hệ thống phát điện sử dụng DFIG đơn lẻ, hệ thống phát điện sử dụng tổ hợp ghép nối 2 DFIG có những ưu điểm nổi bật như: chất lượng điện phát ra cao hơn, khả năng bám điện áp lưới tốt hơn, đối tượng điều khiển dễ hơn.

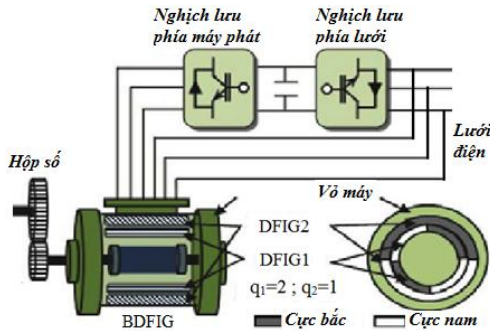
2.2.1 Cấu trúc phát điện sử dụng DFIG không chổi than

Cấu tạo và nguyên lý hoạt động:



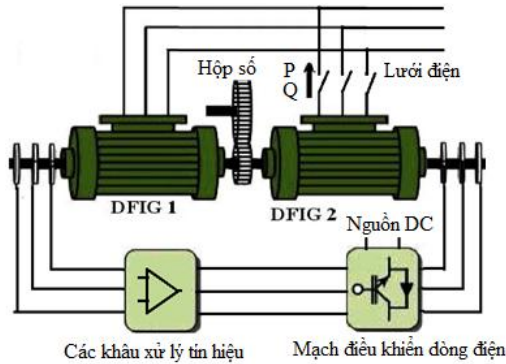
Hình 2.3: Cấu trúc ghép nối DFIG với bộ biến đổi công suất ở phía stator

Ngày nay, hệ thống này đã được một số cơ sở nghiên cứu và cơ sở sản xuất trên thế giới tích hợp 2 DFIG trên cùng một khung máy và không cần chổi than.



Hình 2.4: Máy điện dị bộ nguồn kép không chổi than-BDFIG [97]

2.2.2 Cấu trúc phát điện sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor



Hình 2.7: Cấu trúc phát điện DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor

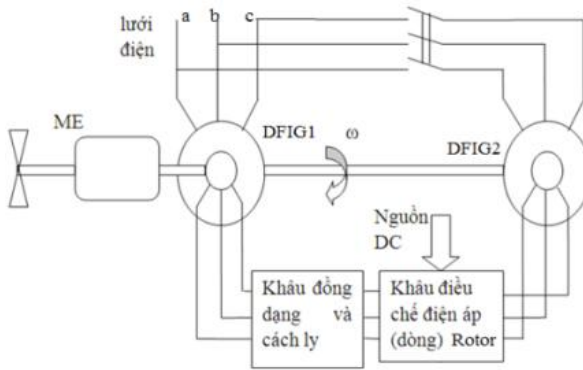
Hệ thống gồm: 2 máy điện dị bộ nguồn kép DFIG1 và DFIG2, các khâu xử lý tín hiệu và mạch điều khiển dòng điện.

DFIG1 không có chức năng phát công suất lên lưới mà chỉ có chức năng tạo các tín hiệu đồng dạng ở rotor. Vì vậy, lựa chọn DFIG1 là loại có kích thước và công suất nhỏ.

Các tín hiệu ở các khâu của cấu trúc này đều là các tín hiệu đồng dạng với tín hiệu điện áp cảm ứng ở rotor của DFIG1. Do vậy, phương pháp này còn gọi là phương pháp điều khiển trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor.

2.3 Mô hình toán hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng tín hiệu dạng rotor

2.3.1 Cấu trúc và nguyên lý hoạt động



Hình 2.8: Hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor

Hệ thống gồm:

- Máy chính ME có trục được nối với trục DFIG1 và DFIG2.
- DFIG1: là máy điện dị bộ nguồn kép công suất nhỏ có tác dụng tạo tín hiệu suất điện động cảm ứng đồng dạng ở rotor.
- Khâu đồng dạng và cách ly: là mạch khuếch đại tín hiệu sử dụng khuếch đại thuật toán với trở kháng đầu vào vô cùng lớn.
- Mạch điều khiển dòng điện, điện áp rotor cho DFIG2
- DFIG2: là máy phát dị bộ nguồn kép có tác dụng phát ra điện áp hòa với lưới điện tần thủy.

DFIG1 và DFIG2 có số cặp cực bằng nhau, được nối cứng trục với nhau sao cho tọa độ dây quấn ở rotor và stator của 2 máy trùng với nhau.

Vì trong hệ thống có 2 DFIG, nên các đại lượng và thông số của các DFIG được ký hiệu để phân biệt như sau: chỉ số 1 cho DFIG1, chỉ số 2 cho DFIG2, ví dụ: 1R là điện trở của DFIG1, 2L là điện cảm của DFIG2.

2.3.2 Mô hình toán DFIG1 và DFIG2

Phương trình mô tả máy điện dị bộ nguồn kép trên hệ tọa độ tựa theo điện áp lưới, ứng dụng cho DFIG1:

$$\begin{cases} {}^1\underline{u}_s = {}^1R_s \cdot {}^1\underline{i}_s^f + \frac{d({}^1\underline{\psi}_s^f)}{dt} + j.\omega_s \cdot {}^1\underline{\psi}_s^f \\ {}^1\underline{u}_r = {}^1R_r \cdot {}^1\underline{i}_r^f + \frac{d({}^1\underline{\psi}_r^f)}{dt} + j.\omega_r \cdot {}^1\underline{\psi}_r^f \\ {}^1\underline{\psi}_s^f = {}^1\underline{i}_s^f \cdot {}^1L_s + {}^1\underline{i}_r^f \cdot {}^1L_m \\ {}^1\underline{\psi}_r^f = {}^1\underline{i}_s^f \cdot {}^1L_m + {}^1\underline{i}_r^f \cdot {}^1L_r \end{cases} \quad (2.65.a, b, c, d)$$

Vì điện trở của khâu đồng dạng và cách ly lớn, nên rotor của DFIG1 gần như hở mạch, nên ${}^1\underline{i}_r^f = 0$, từ thông stator và rotor của DFIG1 như sau:

$$\begin{cases} {}^1\underline{\psi}_s^f = {}^1\underline{i}_s^f \cdot {}^1L_s \\ {}^1\underline{\psi}_r^f = {}^1\underline{i}_s^f \cdot {}^1L_m \end{cases} \quad (2.66.a, b)$$

Phương trình điện áp ở stator và rotor DFIG1 như sau:

$$\begin{cases} {}^1\underline{u}_s^f = {}^1R_s \cdot {}^1\underline{i}_s^f + {}^1L_s \cdot \frac{d({}^1\underline{i}_s^f)}{dt} + j.\omega_s \cdot {}^1L_s \cdot {}^1\underline{i}_s^f \\ {}^1\underline{u}_r^f = {}^1L_m \cdot \frac{d({}^1\underline{i}_s^f)}{dt} + j.\omega_r \cdot {}^1L_m \cdot {}^1\underline{i}_s^f \end{cases} \quad (2.67.a, b)$$

Tương tự tập hợp hệ phương trình mô tả máy điện dị bộ nguồn kép trên hệ tọa độ quay theo vector điện áp lưới, áp dụng cho DFIG2, ta có hệ phương trình cho DFIG2.

2.3.3 Mô hình hệ thống khi DFIG2 chưa hòa với lưới điện

DFIG2 chưa nối với lưới điện, ${}^2\underline{i}_s^f = 0$, từ thông stator và rotor như sau:

$$\begin{cases} {}^2\underline{\psi}_s^f = {}^2\underline{i}_{r0}^f \cdot {}^2L_m \\ {}^2\underline{\psi}_r^f = {}^2\underline{i}_{r0}^f \cdot {}^2L_r \end{cases} \quad (2.69.a, b)$$

Phương trình điện áp của stator và rotor của DFIG2 như sau:

$$\begin{cases} {}^2\underline{u}_s^f = {}^2L_m \cdot \frac{d({}^2\underline{i}_{r0}^f)}{dt} + j.\omega_s \cdot {}^2L_m \cdot {}^2\underline{i}_{r0}^f \\ {}^2\underline{u}_r^f = {}^2R_r \cdot {}^2\underline{i}_{r0}^f + {}^2L_r \cdot \frac{d({}^2\underline{i}_{r0}^f)}{dt} + j.\omega_r \cdot {}^2L_r \cdot {}^2\underline{i}_{r0}^f \end{cases} \quad (2.70.a, b)$$

Điện áp ra rotor của DFIG1 (ở phương trình 2.65b), qua khâu đồng dạng và cách ly, tạo điện áp là $\underline{u}_{ss}^f$ như sau:

$$\underline{u}_{ss}^f = G_{ss} \cdot {}^1\underline{u}_r^f = G_{ss} \cdot ({}^1L_m \cdot \frac{d({}^1\underline{i}_s^f)}{dt} + j.\omega_r \cdot {}^1L_m \cdot {}^1\underline{i}_s^f) \quad (2.71)$$

Ở khâu điều chế điện áp rotor DFIG2, bù thêm thành phần ${}^2R_r \cdot {}^2\dot{i}_{r0}^f$, vậy điện áp đưa vào rotor của DFIG2 là:

$${}^2\dot{u}_r^f = {}^1\dot{u}_{ss}^f + {}^2R_r \cdot {}^2\dot{i}_{r0}^f + G_{ss}({}^1L_m \frac{d({}^1\dot{i}_s^f)}{dt} + j\omega_r \cdot {}^1L_m \cdot {}^1\dot{i}_s^f) \quad (2.72)$$

So sánh với phương trình điện áp rotor DFIG2 ở phương trình (2.70b) có:

$$\begin{aligned} {}^2R_r \cdot {}^2\dot{i}_{r0}^f + G_{ss}({}^1L_m \cdot \frac{d({}^1\dot{i}_s^f)}{dt} + j\omega_r \cdot {}^1L_m \cdot {}^1\dot{i}_s^f) &= {}^2R_r \cdot {}^2\dot{i}_{r0}^f + {}^2L_r \cdot \frac{d({}^2\dot{i}_{r0}^f)}{dt} + j\omega_r \cdot {}^2L_r \cdot {}^2\dot{i}_{r0}^f \\ \Rightarrow {}^2\dot{i}_{r0}^f &= K_{12} \cdot {}^1\dot{i}_s^f \quad (\text{với } K_{12} = G_{ss} \cdot {}^1L_m / {}^2L_r) \end{aligned} \quad (2.73)$$

Thay ${}^2\dot{i}_{r0}^f = K_{12} \cdot {}^1\dot{i}_s^f$ vào phương (2.70a) nhận được:

$${}^2\dot{u}_s^f = K_{12}({}^2L_m \cdot \frac{d({}^1\dot{i}_s^f)}{dt} + j\omega_s \cdot {}^2L_m \cdot {}^1\dot{i}_s^f) \quad (2.74)$$

Nghiên cứu lại phương trình (2.65a) là phương trình điện áp stator của DFIG1: ${}^1\dot{u}_s^f = {}^1R_s \cdot {}^1\dot{i}_s^f + {}^1L_s \cdot \frac{d({}^1\dot{i}_s^f)}{dt} + j\omega_s \cdot {}^1L_s \cdot {}^1\dot{i}_s^f$ (2.65.a)

Ta có nhận xét như sau:

- ${}^1\dot{u}_s^f$ là điện áp của lưới điện.
- Độ lệch pha của thành phần điện áp ${}^1\dot{u}_{sl}^f = {}^1L_s \cdot \frac{d({}^1\dot{i}_s^f)}{dt} + j\omega_s \cdot {}^1L_s \cdot {}^1\dot{i}_s^f$ so với điện áp của lưới ${}^1\dot{u}_s^f = {}^1R_s \cdot {}^1\dot{i}_s^f + {}^1L_s \cdot \frac{d({}^1\dot{i}_s^f)}{dt} + j\omega_s \cdot {}^1L_s \cdot {}^1\dot{i}_s^f$ là không đổi.
- So sánh thành phần điện áp ${}^1\dot{u}_{sl}^f = {}^1L_s \cdot \frac{d({}^1\dot{i}_s^f)}{dt} + j\omega_s \cdot {}^1L_s \cdot {}^1\dot{i}_s^f$ với điện áp đầu ra của của DFIG2: ${}^2\dot{u}_s^f = K_{12}({}^2L_m \cdot \frac{d({}^1\dot{i}_s^f)}{dt} + j\omega_s \cdot {}^2L_m \cdot {}^1\dot{i}_s^f)$ ta thấy ${}^2\dot{u}_s^f / {}^1\dot{u}_{sl}^f = K_{12} \cdot {}^2L_m / {}^1L_s = \text{const}$, vậy ${}^2\dot{u}_s^f$ trùng pha với thành phần ${}^1\dot{u}_{sl}^f$.

Tới đây, có các kết quả của hệ thống khi chưa hòa với lưới như sau:

- Điện áp đầu ra của máy phát luôn lệch pha so với điện áp lưới một góc $\alpha = \text{const}$ rất nhỏ và hoàn toàn không phụ thuộc vào tốc độ lai của máy chính.
- Vì độ lệch pha với góc α là cố định, ta chỉ cần xoay lệch trục DFIG1 và DFIG2 để bù lại sự lệch pha, hoặc độ lệch pha này rất nhỏ (do thành phần $\begin{bmatrix} \dot{u}_s^f \\ \dot{u}_{sl}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s \dot{i}_s^f + L_s \frac{d\dot{i}_s^f}{dt} + j\omega_s L_s \dot{i}_s^f \\ L_s \frac{d\dot{i}_s^f}{dt} + j\omega_s L_s \dot{i}_s^f \end{bmatrix}$ rất nhỏ so với điện áp lưới), nên ta có thể bỏ qua không cần hiệu chỉnh.
- Biên độ điện áp đầu ra của máy phát có thể điều chỉnh thông qua điều chỉnh giá trị G_{ss} .

Các thành phần dòng điện rotor: Thành phần đơn vị của dòng điện rotor dọc trục DFIG2 (2.2) được tạo ra bằng cách cộng thêm pha của $\begin{bmatrix} \dot{u}_s^f \\ \dot{u}_{sl}^f \end{bmatrix}$ một góc

pha $\pi/2$. Thành phần đơn vị của dòng điện rotor ngang trục DFIG2 ${}^2i_{rq0}$ được tạo ra bằng cách đảo pha ${}^2i_{ro}^f$.

2.3.4 Mô hình hệ thống sau khi DFIG2 hòa với lưới điện

Giả sử yêu cầu của máy phát là phải phát ra lưới điện dòng điện tải là ${}^2i_s^f$, ta phải điều chỉnh dòng rotor có giá trị như sau: ${}^2i_r^f = {}^2i_{r0}^f + {}^2i_{rt}^f$,

Phương trình các thành phần dòng điện dọc trục và ngang trục:

$$\begin{cases} {}^2i_{sd} = -(^2L_m/^2L_s)^2i_{rd} \\ {}^2i_{sq} = -(^2L_m/^2L_m)^2i_{rq} \end{cases} \quad (2.85.a,b)$$

Vấn đề về công suất:

Công suất tác dụng và công suất phản kháng của máy phát DFIG2 là:

$$\begin{cases} P = (3/2) \cdot {}^2u_{sd} \cdot {}^2i_{sd} \\ Q = (3/2) \cdot {}^2u_{sd} \cdot {}^2i_{sq} \end{cases} \quad (2.89.a,b)$$

Thay ${}^2i_{sd}$ ở phương trình (2.85a) và ${}^2i_{sq}$ ở phương trình (2.85b) vào các phương trình (2.89.a,b) có:

$$\begin{cases} P = -(3/2) \cdot {}^2u_{sd} \cdot {}^2i_{rd} \cdot (^2L_m/^2L_s) \\ Q = -(3/2) \cdot {}^2u_{sd} \cdot {}^2i_{rq} \cdot (^2L_m/^2L_s) \end{cases} \quad (2.90.a,b)$$

Theo phần 2.3.3 ta có:

$$\begin{cases} {}^2i_{rd} = G_p \cdot {}^2i_{rd0} \\ {}^2i_{rq} = G_Q \cdot {}^2i_{rq0} \end{cases} \quad (2.91.a,b)$$

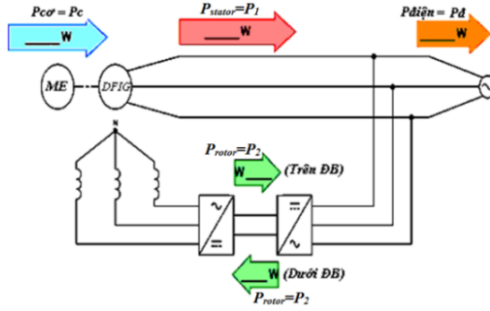
(Theo phần 2.3.3: tín hiệu đơn vị ${}^2i_{rq0}$ được tạo bằng cách đảo pha ${}^2i_{ro}^f$ và tín hiệu đơn vị ${}^2i_{rd0}$ được tạo bằng cách lấy ${}^2i_{r0}^f$ cộng thêm góc pha $\pi/2$).

Thay ${}^2i_{rd}$ và ${}^2i_{rq}$ để tính P và Q có:

$$\begin{cases} P = -(3/2) \cdot (G_p \cdot {}^2i_{rd0}) \cdot {}^2u_{sd} \cdot (^2L_m/^2L_s) = G_p \cdot X \\ Q = -(3/2) \cdot (G_Q \cdot {}^2i_{rq0}) \cdot {}^2u_{sd} \cdot (^2L_m/^2L_s) = G_Q \cdot Y \end{cases} \quad (2.92.a,b)$$

Với X, Y là các thành phần không đổi vì trong tọa độ quay theo điện áp lưới, các thành phần $\begin{bmatrix} {}^2i_{rd0} \\ {}^2i_{rq0} \end{bmatrix}$ đều không đổi.

Vậy để điều chỉnh công suất tác dụng P của máy phát bơm ra lưới điện ta chỉ cần điều chỉnh hệ số G_p , điều chỉnh công suất phản kháng Q của máy phát bơm ra lưới điện ta chỉ cần điều chỉnh hệ số G_Q .



Hình 2.16: Cấu trúc dòng năng lượng qua máy phát

2.4.3 Các thành phần công suất qua máy phát

2.4.3.1 Công suất cơ của máy chính

$$P_c = M_c \cdot \omega = \left(\frac{3}{2} \left(\frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} i_{rq} + M_0 \right) \omega \quad (2.100)$$

2.4.3.2 Công suất stator của DFIG

$$P_1 = \frac{3}{2} (-\omega_s M_{sr} i_{rq}) \left(-\frac{M_{sr}}{L_s} i_{rd} \right) = \frac{3}{2} \omega_s \left(\frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} i_{rq} \quad (2.102)$$

2.4.3.3 Công suất mạch rotor của DFIG

$$P_2 = -\omega_r P_1 / \omega_s + (3/2) R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) \quad (2.107)$$

Công thức (2.107) thể hiện rõ mối liên giữa công suất của thiết bị điều khiển P_2 với công suất phát lên lưới P_1 .

Tần số góc ω_{r0} của dòng điện rotor để $P_2=0$ là:

$$\omega_{r0} = \omega_s \frac{\frac{3}{2} R_r \left(\left(\frac{L_s}{M_{sr}} \right)^2 u_{sd}^2 + \left(\frac{u_{sd}}{X_{sr}} \right)^2 \right)}{P_1} \quad (\text{với } X_{sr} = \omega_s M_{sr}).$$

Khi đó, tốc độ góc của rotor là:

$$\omega_0 = \omega_s \left(1 - \frac{\frac{3}{2} R_r \left(\left(\frac{L_s}{M_{sr}} \right)^2 i_{sd}^2 + \left(\frac{u_{sd}}{X_{sr}} \right)^2 \right)}{P_1} \right) \quad (2.110)$$

2.4.4 Hiệu suất chuyển đổi cơ năng sang điện năng

2.4.4.1 Xét trường hợp (2.17)

Mạch rotor phát công suất, giả sử hiệu suất của bộ biến tần là H_{bt} (H_{bt} giảm khi tần số đóng cắt của IGBT tăng và ngược lại [93]).

Hiệu suất chuyển đổi từ cơ năng sang điện năng của hệ thống phát điện đồng trục là:

$$\begin{bmatrix} u_{sd} & u_{sq} & u_{s0} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} & i_{sq} & i_{s0} \end{bmatrix}^T + p \begin{bmatrix} \psi_{sd} & \psi_{sq} & \psi_{s0} \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} \psi_{sd} & \psi_{sq} & \psi_{s0} \end{bmatrix}^T p \gamma_t$$

Lấy đạo hàm hiệu suất H ta có:

$$H'_\omega = \frac{P_1(1 - H_{bt}) + (3/2)R_r(i_{rd}^2 + i_{rq}^2)H_{bt}}{-\left(\frac{P_1}{\omega_s} + M_0\right)\omega^2} \quad (2.113)$$

$H'_\omega < 0$, nên H_ω tăng khi ω giảm, vậy với trường hợp $\omega \geq \omega_0$ thì hiệu suất $H = \max$ khi tốc độ quay của rotor $\omega = \omega_0$.

2.4.4.2 Xét trường hợp $\omega \leq \omega_0$

Hiệu suất chuyển đổi từ cơ năng sang điện năng là:

$$H = \frac{P_1 + P_2 / H_{bt}}{P_c} = \frac{(3/2)\omega_s(M_{sr}^2 / L_s)i_{rd}i_{rq} - (3/2)(\omega_s - \omega)i_{rd}i_{rq}\left(\frac{M_{sr}^2}{L_s}\right) / H_{bt} + (3/2)R_r(i_{rd}^2 + i_{rq}^2) / H_{bt}}{\left(\frac{3}{2}\left(\frac{M_{sr}^2}{L_s}\right)i_{rd}i_{rq} + M_0\right)\omega} \quad (2.115)$$

Lấy đạo hàm hiệu suất H ta có:

$$H'_\omega = \frac{P_1(1 - 1/H_{bt}) + (3/2)R_r(i_{rd}^2 + i_{rq}^2) / H_{bt}}{-\left(\frac{P_1}{\omega_s} + M_0\right)\omega^2} \quad (2.116)$$

$H'_\omega > 0$, suy ra H tăng khi ω tăng, vậy với trường hợp $\omega \leq \omega_0$ thì hiệu suất $H = \max$ khi $\omega = \omega_0$.

Kết hợp 2 trường hợp ta có: để hiệu suất biến đổi từ cơ năng sang điện năng trong hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG đạt giá trị lớn nhất khi tốc độ góc rotor của DFIG là:

$$\omega_0 = \omega_s \left(1 - \frac{\frac{3}{2}R_r \left(\left(\frac{L_s}{M_{sr}} \right)^2 i_{sd}^2 + \left(\frac{u_{sd}}{X_{sr}} \right)^2 \right)}{P_1} \right) \quad (2.117)$$

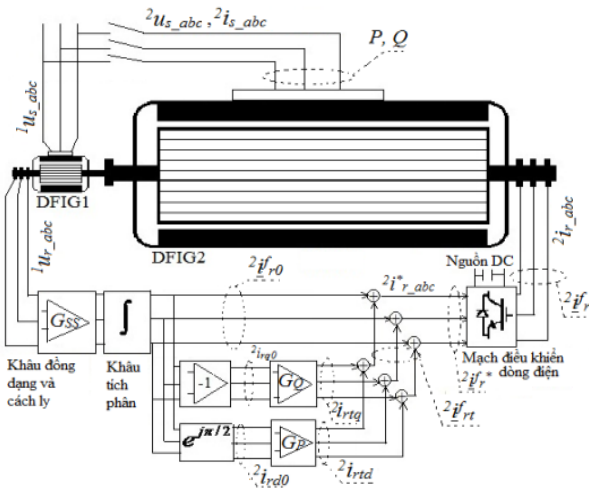
Trên cơ sở công thức (2.117), ta có lựa chọn tỉ số truyền của hộp số giữa máy chính và máy phát đồng trục để tốc độ góc rotor của DFIG nằm trong khoảng giá trị gần $\frac{1}{2}$ để nâng cao hiệu suất biến đổi cơ năng sang điện năng, tiết kiệm nhiên liệu sản xuất điện năng trên tàu thủy.

Nhận xét và kết luận chương 2

CHƯƠNG 3: KHẢO SÁT BẢNG MÔ PHỎNG KIỂM CHỨNG TÍNH ĐÚNG ĐẲN CỦA HỆ THỐNG ĐỀ XUẤT

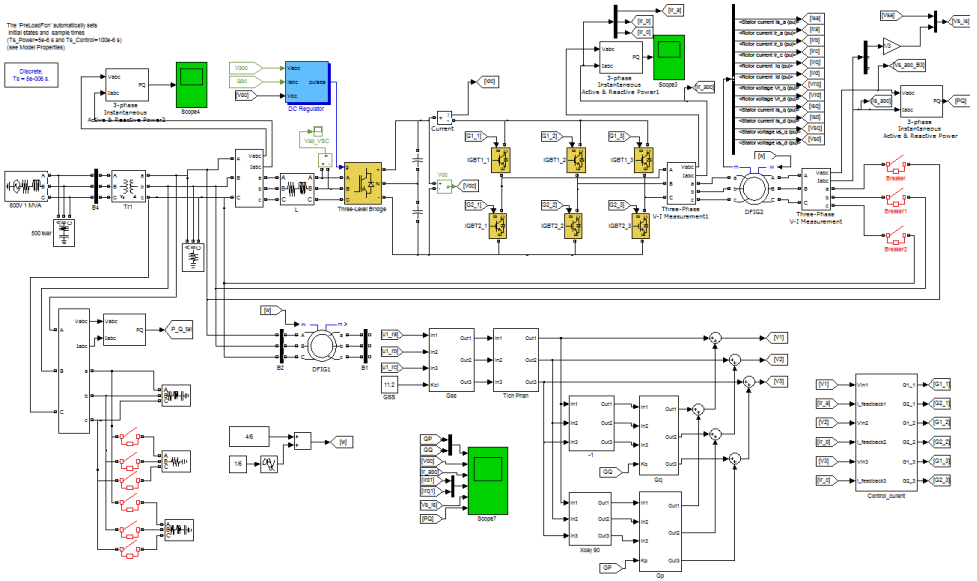
3.1 Mở đầu

3.2 Các khâu chức năng trong hệ thống



Hình 3.1: Sơ đồ khối hệ thống phát điện đồng trục sử dụng DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor

3.3 Xây dựng mô hình hệ thống



Hình 3.2: Mô hình mô phỏng hệ thống

3.4 Cách chỉnh định và vận hành hệ thống

3.4.1 Chỉnh định hệ thống khi stator của DFIG2 chưa nối với lưới

Cài đặt các hệ số khuếch đại G_P và G_Q bằng 0. Lúc này, pha và tần số của điện áp stator $DFIG2$ luôn trùng pha và tần số với điện áp lưới, còn biên độ của điện áp ở stator $DFIG2$ có thể điều chỉnh thông qua hệ số G_{SS} .

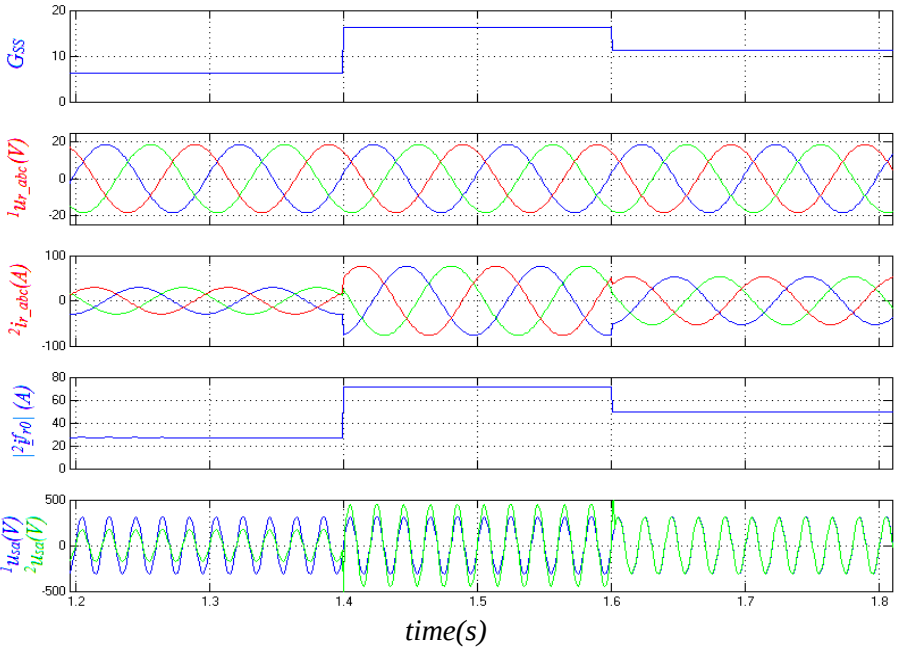
3.4.2 Vận hành hệ thống sau khi stator của DFIG2 nối với lưới

Công suất tác dụng (P) và công suất phản kháng (Q) của DFIG2 phát lên lưới có thể được điều khiển độc lập bằng cách điều chỉnh độ lớn hệ số G_P và G_Q ở các khâu khuếch đại.

3.5 Mô phỏng các đặc tính của các khâu trong hệ thống

3.5.1 Các kết quả mô phỏng khi hệ thống phát điện chưa hòa với lưới

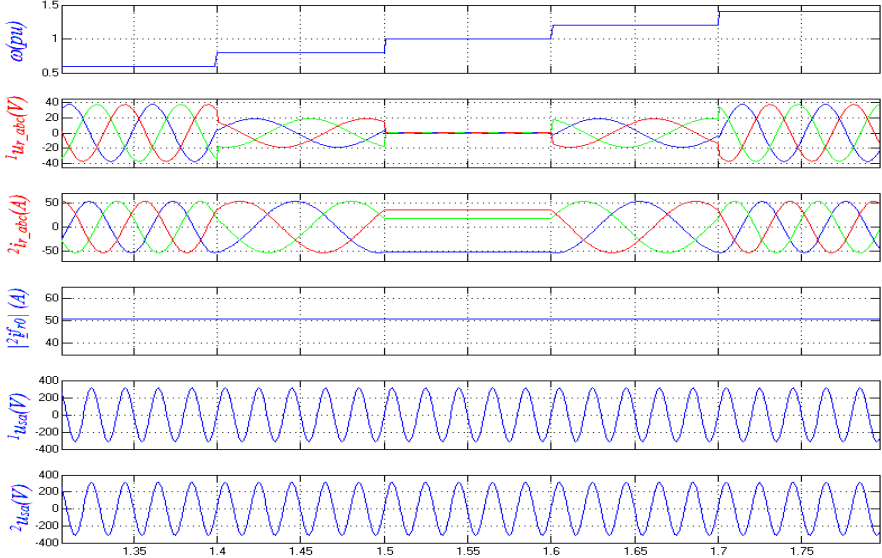
Quá trình chỉnh định G_{SS} : Tại thời điểm $t=1.6s$, ta chỉnh định $G_{SS}=11.2$, lúc đó điện áp $^2u_{sa}$ trùng biên độ, trùng pha, trùng tần số với điện áp lưới, đảm bảo đủ điều kiện sẵn sàng hòa hệ thống phát điện với lưới.



Hình 3.7: Kết quả mô phỏng quá trình chỉnh định G_{ss}

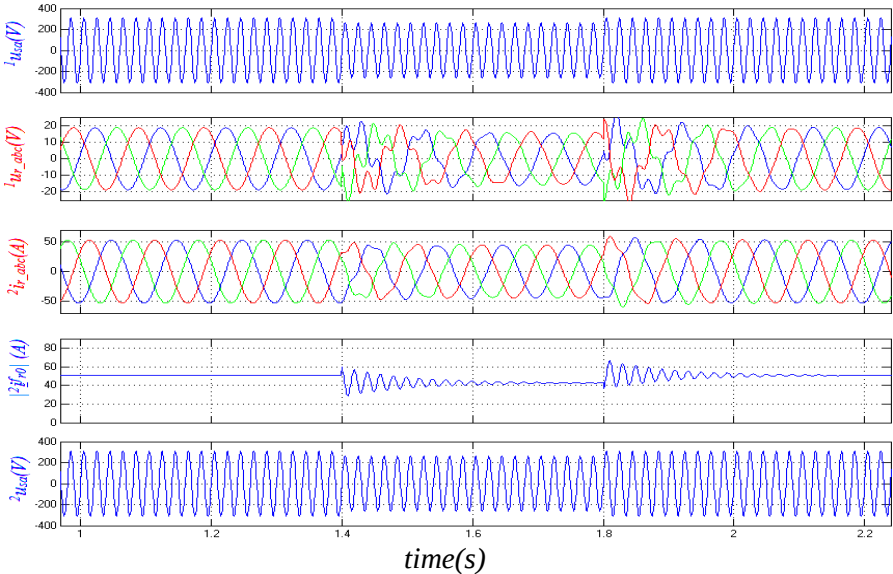
Đáp ứng của hệ thống khi tốc độ rotor ω thay đổi:

Kết quả thu được là điện áp pha A ở stator của máy phát $^2u_{sa}$ luôn trùng biên độ, tần số và pha với điện áp pha A của lưới $^1u_{sa}$. Vậy khả năng bám điện áp lưới của máy phát DFIG khi tốc độ rotor thay đổi là rất tốt.



Hình 3.8: Đáp ứng hệ thống phát điện chưa hòa lưới
khi tốc độ rotor ω thay đổi

Đáp ứng của hệ thống khi sụt điện áp lưới:



Hình 3.9: Đáp ứng của hệ thống phát điện chưa hòa lưới
khi sụt điện áp lưới

Kết quả thu được là điện áp pha A ở stator của máy phát $^2u_{sa}$ luôn bám theo điện áp pha A của lưới $^1u_{sa}$, vậy khả năng bám điện áp lưới của hệ thống phát điện khi điện áp lưới thay đổi hay có sự cố là rất tốt.

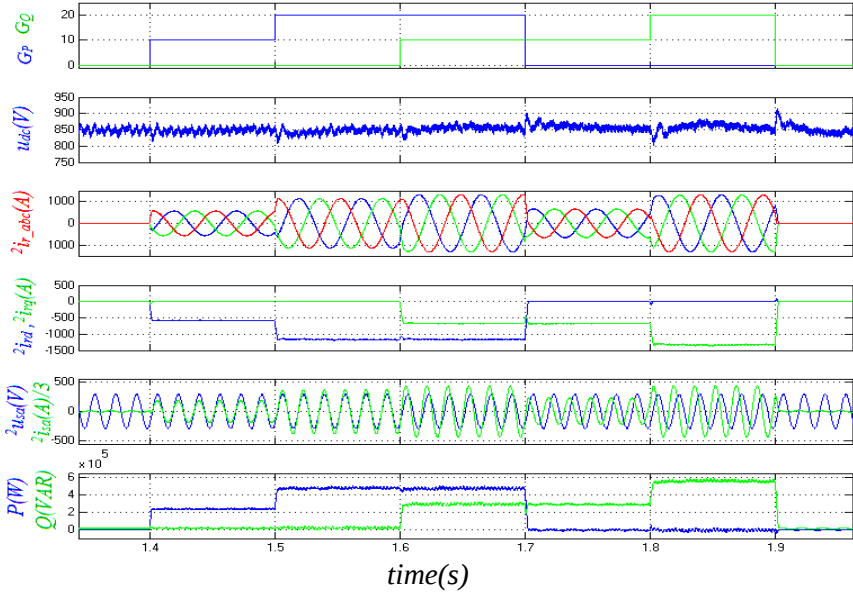
Vậy trong trường hợp stator DFIG2 chưa nối với lưới ta có các kết luận sau: sau khi chỉnh định G_{SS} xong, điện áp của máy phát luôn trùng pha, trùng tần số, trùng biên độ với điện áp lưới ngay cả khi tốc độ rotor thay đổi hay điện áp lưới thay đổi, đáp ứng rất tốt các điều kiện về hòa đồng bộ giữa hệ thống phát điện với lưới điện "mềm" trên tàu thủy.

3.5.2 Các kết quả mô phỏng khi hệ thống phát điện hòa với lưới

Điều chỉnh độc lập các thành phần công suất thông qua

G_P, G_Q :

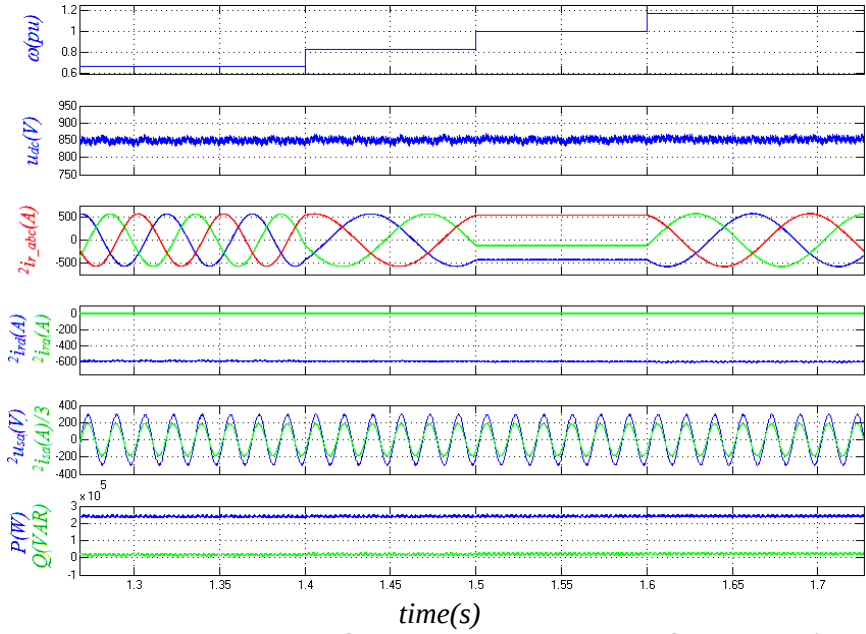
kết quả mô phỏng cho thấy có thể điều khiển độc lập công suất tác dụng P và công suất phản kháng Q của DFIG2 phát lên lưới thông qua điều chỉnh hệ số G_P và G_Q .



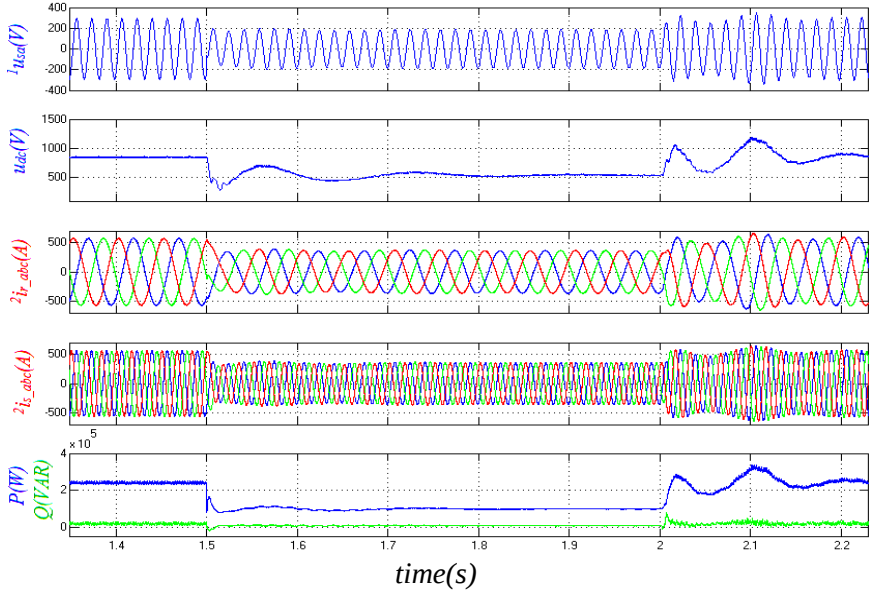
Hình 3.10: Đáp ứng hệ thống phát điện hòa lưới khi G_P và G_Q thay đổi

Đáp ứng hệ thống khi tốc độ rotor ω thay đổi: Ta cài đặt các hệ số khuếch đại G_P và G_Q cố định ($G_P=10$, $G_Q=0$), và chạy mô phỏng hệ thống khi cho tốc độ rotor của DFIG thay đổi.

Từ kết quả mô phỏng, có kết luận: hệ thống phát điện đồng trục vẫn ổn định khi tốc độ máy chính thay đổi.



Hình 3.11: Đáp ứng hệ thống phát điện hòa lưới khi tốc độ thay đổi
Đáp ứng của hệ thống khi sụt điện áp lưới:



Hình 3.12: Đáp ứng hệ thống phát điện hòa lưới khi sụt điện áp lưới

Các kết quả mô phỏng cho thấy: khi sụt điện áp lưới với hệ số K , dòng điện các pha stator DFIG2 phát lên lưới cũng giảm với hệ số K , kết quả là công suất DFIG2 phát lên lưới giảm với hệ số K^2 . Vậy với đặc điểm tự nhiên này, hệ thống sẽ có phản ứng thích hợp trong điều kiện sụt điện áp lưới là không có nguy cơ bị quá dòng của máy phát khi xảy ra hiện tượng sụt điện áp lưới.

Kết luận chương 3

Các kết quả mô phỏng ở hình 3.7, 3.8 và 3.9 phù hợp với kết luận trong mục 2.3.3 ở chương 2: khi máy phát chưa hòa với lưới, sau khi chỉnh định G_{ss} , điện áp của máy phát luôn trùng pha, trùng tần số, trùng biên độ với điện áp lưới, ngay cả trong các trường hợp tốc độ rotor thay đổi hoặc điện áp lưới thay đổi, đáp ứng rất tốt các điều kiện hòa đồng bộ giữa máy phát với lưới điện.

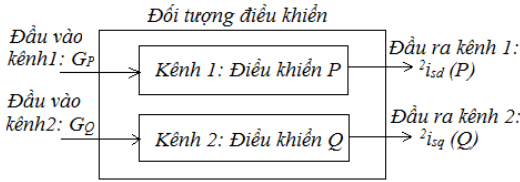
Các kết quả mô phỏng ở hình 3.10, 3.11, 3.12 phù hợp với kết luận mục 2.3.4 trong chương 2: khi hòa máy phát với lưới điện, có thể điều khiển độc lập công suất tác dụng và công suất phản kháng của DFIG2 phát lên lưới thông qua điều chỉnh hệ số G_p và G_Q . Và các kênh điều khiển công suất không bị ảnh hưởng khi tốc độ quay của rotor thay đổi.

Nhận xét và kết luận chương 3

**CHƯƠNG 4: THIẾT LẬP HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN MÁY PHÁT DỊ BỘ
NGUỒN KÉP LÀM VIỆC Ở TRẠM PHÁT ĐỒNG TRỤC TÀU THỦY**

4.1 Mở đầu

4.2 Xác định cấu trúc đối tượng điều khiển



Hình 4.2: Sơ đồ khối đối tượng điều khiển

Các kênh điều khiển không bị ảnh hưởng chéo nhau. Đặc điểm và tính chất của từng kênh của đối tượng điều khiển đã được khảo sát qua mô hình toán ở mục 2.3.4 trong chương 2, và qua kết quả mô phỏng ở hình 3.10 ở chương 3.

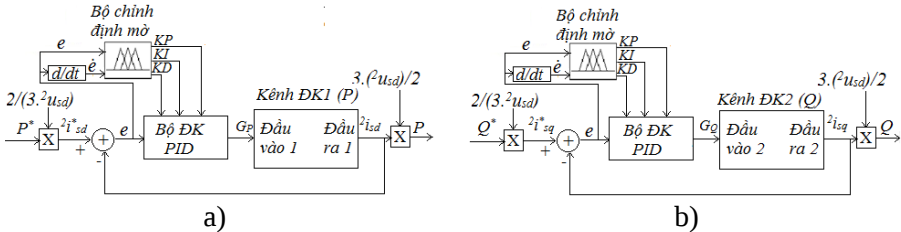
4.3 Thiết kế bộ điều khiển

Tác giả đề xuất sử dụng bộ điều khiển PID chỉnh định mờ để điều khiển đối tượng.

4.3.1 Khái quát về hệ thống điều khiển mờ

4.3.2 Thiết kế bộ điều khiển PID chỉnh định mờ để điều khiển đối tượng

Đối tượng điều khiển gồm 2 kênh điều khiển độc lập là kênh công suất tác dụng P và kênh công suất phản kháng Q , mỗi kênh được điều khiển bằng một bộ điều khiển PID với các tham số K_P , K_I , K_D được chỉnh định bởi các bộ chỉnh định mờ mô hình madani.



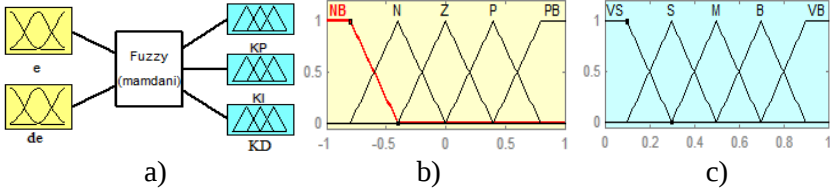
Hình 4.5: Hệ thống điều khiển các thành phần công suất

Xét kênh điều khiển công suất tác dụng P :

Chọn các hàm liên thuộc:

Chọn các hàm liên thuộc đầu vào e và $\dot{e}$ như hình 4.6b, mỗi giá trị đầu vào gồm 5 tập mờ: âm lớn (NB), âm (N), Không (Z), Dương (P), Dương lớn (PB), nằm trong dải giá trị $[-1 \ 1]$ pu, với hệ số chuyển đổi $X_e=1/2143$, $X_{\dot{e}}=1/2143$.

Chọn các hàm liên thuộc đầu ra K_P , K_I , K_D như hình 4.6c, mỗi giá trị đầu ra gồm 5 tập mờ: Rất nhỏ (VS), Nhỏ (S), Trung bình (M), Lớn (B), Rất lớn (VB), nằm trong dải giá trị $[0 \ 1]$ pu, với hệ số chuyển đổi $X_{K_P}=1/(6 \cdot 10^{-2})$, $X_{K_I}=1/(15 \cdot 10^{-2})$, $X_{K_D}=1/(3 \cdot 10^{-2})$.



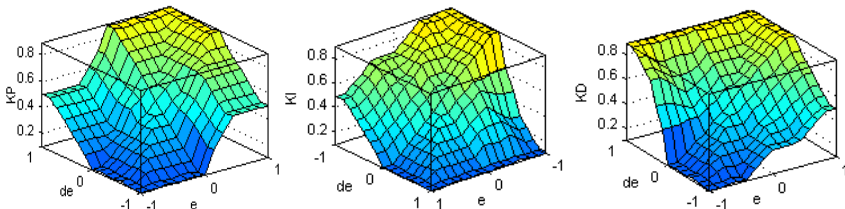
Hình 4.6: Bộ chỉnh định mờ và các hàm liên thuộc

Các luật suy diễn: được thực hiện dựa trên kinh nghiệm và đặc điểm của đối tượng điều khiển.

Bảng 4.2: Luật suy diễn bộ chỉnh định mờ

e \ de		NB	N	Z	P	PB
NB	KP	VS	VS	VS	S	M
	KI	VB	VB	VB	S	VS
	KD	VS	VS	VS	B	VB
N	KP	VS	S	S	S	M
	KI	VB	B	B	M	VS
	KD	VS	S	S	M	VB
Z	KP	VS	S	M	B	VB
	KI	B	B	M	S	VS
	KD	S	S	M	B	VB
P	KP	M	B	B	B	VB
	KI	B	M	S	S	VS
	KD	S	M	B	B	VB
PB	KP	M	B	VB	VB	VB
	KI	M	S	VS	VS	VS
	KD	M	B	VB	VB	VB

Chọn luật hợp thành dạng *MAX-MIN*, giải mờ theo phương pháp điểm trọng tâm. Kết quả mối quan hệ các biến vào ra của bộ chỉnh định mờ được thể hiện ở hình 4.7.

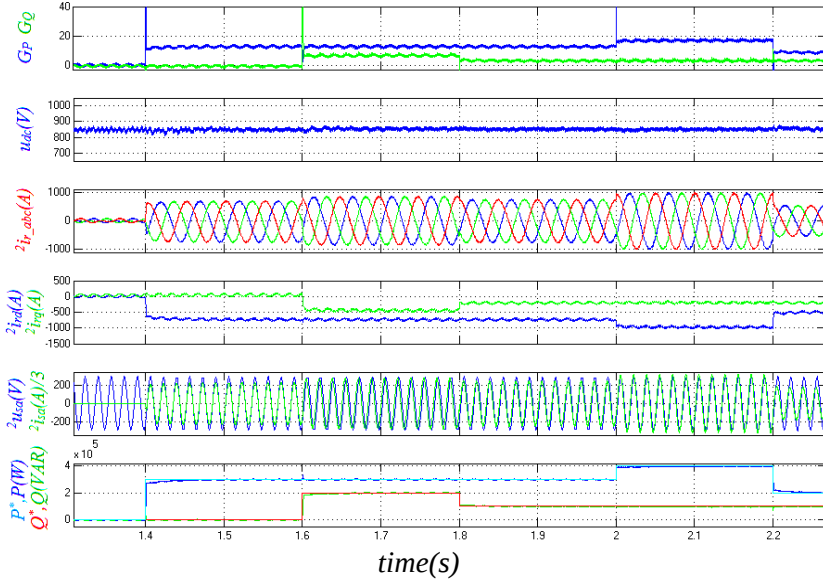


Hình 4.7: Đồ thị quan hệ các biến vào ra của bộ chỉnh định mờ

Tương tự, thiết kế bộ điều khiển cho kênh điều khiển công suất phản kháng Q giống hệt kênh điều khiển công suất tác dụng P .

Thực hiện chạy mô hình tổng thể hệ thống khi giá trị đặt (giá trị mong muốn P^* , Q^*) thay đổi: Kết quả mô phỏng cho thấy các giá trị công suất tác dụng P và công suất phản kháng Q của stator DF22 phát ra lên lưới luôn bám

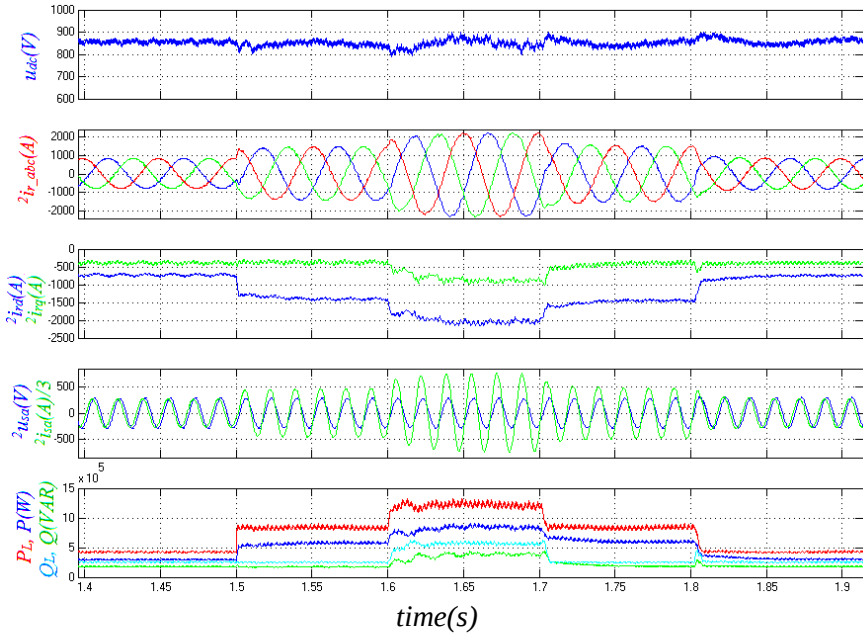
theo các giá trị mong muốn P^* , Q^* với thời gian quá độ rất nhỏ (khoảng $0.01s$) và không có độ quá điều chỉnh.



Hình 4.9: Kết quả mô phỏng hệ thống với bộ điều khiển PID chỉnh định mờ

4.4 Phân chia tải hệ thống phát điện đồng trục với lưới điện tàu thủy

Hệ thống phát điện đồng trục được hòa với lưới điện tàu thủy, tác giả chạy thử hệ thống khi cài đặt hệ số phân chia tải $R_p=R_q=70\%$.

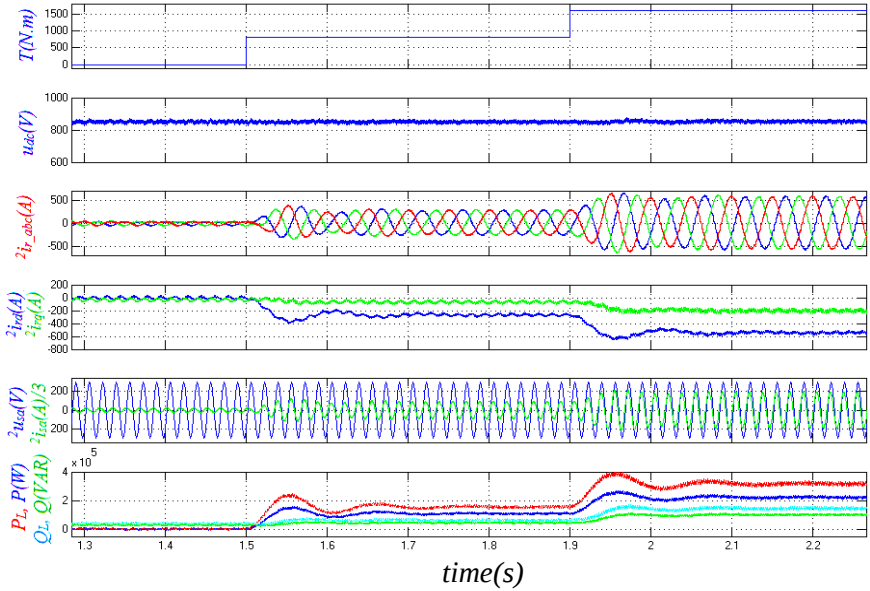


Hình 4.11: Kết quả mô phỏng phân chia công suất tải giữa máy phát đồng trục với lưới điện tần thủy

Từ kết quả mô phỏng cho thấy, đáp ứng công suất tác dụng P và công suất phản kháng Q của DFIG2 phát lên lưới luôn bám theo giá trị công suất mong muốn của nó (70% công suất của tải) với thời gian quá độ rất nhỏ.

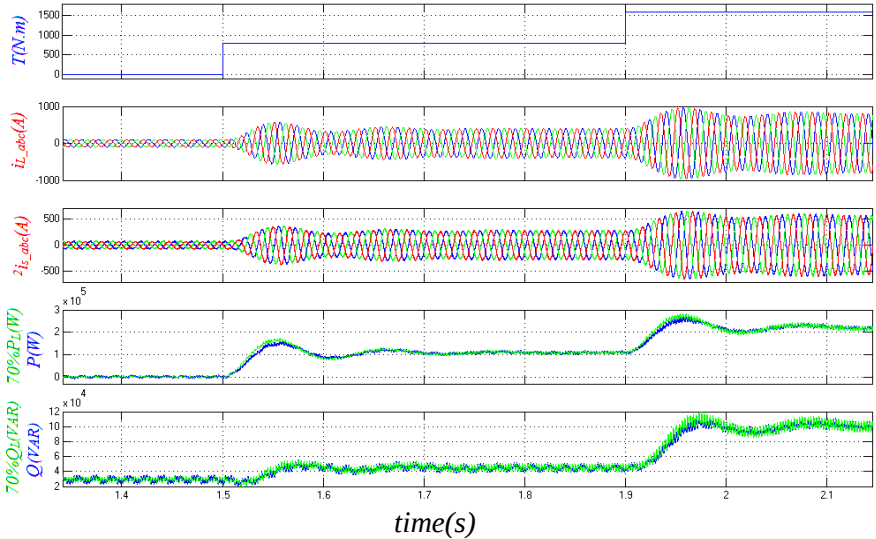
Để có kết quả sát thực, tác giả chạy thử hệ thống với trường hợp khác như sau: phụ tải là động cơ điện không đồng bộ rotor lồng sóc (mã hiệu 215HP, 320KW, 400V, 1487RPM), được các kết quả mô phỏng như hình 4.12.

Từ kết quả mô phỏng cho thấy, khi momen cản trên đầu trục của động cơ thay đổi, công suất tác dụng và công suất phản kháng của động cơ tiêu thụ từ lưới thay đổi phức tạp, dẫn đến các giá trị mong muốn (giá trị đặt) thay đổi theo. Tuy nhiên, công suất tác dụng và công suất phản kháng của máy phát đồng trục lên lưới luôn bám theo các giá trị đặt.



Hình 4.12: Kết quả mô phỏng khi phụ tải là động cơ xoay chiều 3 pha

Để thấy được rõ hơn về khả năng bám các giá trị đặt của hệ thống, tác giả thực hiện lấy kết quả mô phỏng chi tiết hơn gồm: các giá trị đặt (70% công suất phụ tải) và giá trị thực tế của công suất trên cùng một đồ thị, được thể hiện ở hình 4.13.



Hình 4.13: Kết quả mô phỏng khả năng điều khiển bám giá trị đặt của hệ thống khi phụ tải là động cơ xoay chiều 3 pha

Nhận xét và kết luận chương 4

Ưu điểm của phương pháp điều khiển DFIG bằng kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor là phương pháp có cấu trúc điều khiển đơn giản nhưng chất lượng đạt được cao.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết luận

Luận án là công trình khoa học đầu tiên về đề xuất cấu trúc điều khiển máy điện dị bộ nguồn kép trong máy phát đồng trục trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu cảm ứng rotor.

Luận án đã nghiên cứu, đề xuất và xác được khoảng tốc độ rotor của DFIG để hiệu suất chuyển hóa từ cơ năng của máy chính sang điện năng phát ra ở DFIG trong máy phát đồng trục là cao nhất, làm cơ sở cho xác định tỷ lệ truyền của hộp số của máy phát đồng trục để giảm chi phí sản xuất điện năng trên tàu thủy.

Phương pháp điều khiển DFIG trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor đã đơn giản hóa được cấu trúc điều khiển DFIG trong máy phát điện đồng trục, phương pháp cũng đã cách ly được 2 kênh điều khiển công suất tác dụng và công suất phản kháng, 2 kênh này được điều khiển độc lập thông qua 2 hệ số trong 2 mạch khuếch đại tín hiệu lập trình được.

Phương pháp điều khiển DFIG trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor cũng đã nâng cao khả năng bám điện áp lưới “mềm” trên tàu thủy của máy phát đồng trục trong điều kiện tốc độ máy chính thay đổi, nâng cao được độ ổn định và tính an toàn của lưới điện tàu thủy.

Kiến nghị

Với những kết quả đạt được, luận án đã nâng cao được hiệu quả sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép trong máy phát điện đồng trục trên tàu thủy.

Tuy nhiên để hoàn thiện hơn nữa, tác giả xin đề xuất một vài hướng nghiên cứu tiếp theo như sau:

- Nghiên cứu điều khiển DFIG trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor khi hòa với lưới điện trong trường hợp bị lỗi lưới không đối xứng.
- Nghiên cứu điều khiển DFIG trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor ứng dụng trong trường hợp nuôi phụ tải độc lập.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

9. Nguyễn Trọng Thắng, Nguyễn Tiến Ban, "Phân tích các hệ máy phát đồng trục trên Tàu thủy và đề xuất cấu trúc sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép trên cơ sở tín hiệu đồng dạng", *Tạp chí Giao thông vận tải* tháng 10/2012, trang 40-43. ISSN 0868-7012.
10. Nguyễn Trọng Thắng, Thân Ngọc Hoàn, "Tìm tốc độ góc của rotor máy phát dị bộ nguồn kép để hiệu suất chuyển đổi năng lượng trong hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy đạt cực đại", *Tuyển tập công trình hội nghị cơ điện tử toàn quốc lần thứ 6-VCM2012*, trang 60-66. ISBN 978-604-62-0753-5.
11. Nguyễn Trọng Thắng, Nguyễn Tiến Ban, "Đề xuất phương pháp kích từ cho máy phát đồng trục sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép trong trạm phát điện tàu thủy", *Tuyển tập công trình hội nghị cơ điện tử toàn quốc lần thứ 6-VCM2012*, trang 67-74. ISBN 978-604-62-0753-5.
12. Nguyễn Trọng Thắng, Nguyễn Tiến Ban, "Xác định công suất mạch kích từ của máy phát dị bộ nguồn kép trong hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy", *Tạp chí Khoa học-Công nghệ Hàng hải*, Số 33-01/2013, trang 49-52. ISSN 1859-316X.
13. Thang Nguyen Trong, Ban Nguyen Tien, Hai Nguyen Thanh, "A novel method for excitation control of DFIG connected to the grid on the basis of similar signals from rotor", *International Journal Applied Mechanics and Materials, Volumes 336 - 338- Industrial Instrumentation and Control Systems II*, pp.1153-1160. (ISSN: 1662-7482, Indexed: SCOPUS, ISI (ISTP), EI, IEE).
14. Thang Nguyen Trong, Ban Nguyen Tien, Hai Nguyen Thanh, Hai Nguyen Hoang, "The controller of DFIG power fed into the grid basing on the rotor similar signal method", *International Journal Applied Mechanics and Materials, Volumes 415- Automatic Control and Mechatronic Engineering II*, pp.245-249. (ISSN: 1662-7482, Indexed: SCOPUS, ISI (ISTP), EI, IEE).
15. Thang Nguyen Trong, Ban Nguyen Tien, Hai Nguyen Thanh, "Excitation Control System of DFIG Connected to the Grid on the Basis of Similar Signals from Rotor", *The 10th IEEE International Conference on Mechatronics and Automation-IEEE-ICMA, 4-7th August, 2013 in Takamatsu, Japan*, pp.738-742. (ISBN: 978-1-4673-5557-5, Indexed: SCOPUS, EI)
16. Nguyễn Trọng Thắng, Nguyễn Tiến Ban, Nguyễn Đức Minh, "Máy phát dị bộ nguồn kép không chổi than", *Tạp chí Khoa học và công nghệ Hàng hải* số 36-11/2013, trang 36-39. ISSN 1859-316X.

Giải thưởng:

Best Paper Award at the International Conference on Automatic Control and Mechatronic Engineering (ICACME 2013), 21-22nd June, 2013 in Bangkok, Thailand.

THÔNG TIN VỀ LUẬN ÁN

Tên đề tài: “*Nâng cao hiệu quả sử dụng máy điện dị bộ nguồn kép cho hệ thống phát điện đồng trục trên tàu thủy*”

Chuyên ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

Mã số chuyên ngành: 62.52.02.16

Họ và tên nghiên cứu sinh: Nguyễn Trọng Thắng

Họ và tên cán bộ hướng dẫn: 1. PGS.TS. Nguyễn Tiến Ban-Trường Đại học Hải Phòng

2. PGS.TS Nguyễn Thanh Hải-Trường Đại học GTVT

Cơ sở đào tạo: Trường Đại học Giao thông Vận Tải.

Tóm tắt những đóng góp mới của luận án:

- Luận án đề xuất cấu trúc điều khiển máy điện dị bộ nguồn kép trong máy phát đồng trục trên tàu thủy trên cơ sở kỹ thuật đồng dạng tín hiệu rotor. Đây là đề xuất hoàn toàn mới trong việc điều khiển hệ thống máy điện dị bộ nguồn kép. Với đề xuất này, hai kênh điều khiển công suất tác dụng và công suất phản kháng được cách li độc lập nhau, cấu trúc điều khiển máy điện dị bộ nguồn kép được đơn giản hóa. Đồng thời, chất lượng điện của máy phát điện đồng trục trên tàu thủy cũng được nâng cao. Cụ thể là: nâng cao khả năng bám điện áp lưới “mềm” trên tàu thủy của máy phát đồng trục trong điều kiện tốc độ máy chính thay đổi, nâng cao được tính ổn định và an toàn của lưới điện tàu thủy.
- Luận án đã nghiên cứu, đề xuất và xác định được khoảng tốc độ góc rotor của máy điện dị bộ nguồn kép để hiệu suất chuyển hóa từ cơ năng của máy chính sang điện năng phát ra ở máy điện dị bộ nguồn kép trong máy phát đồng trục là cao nhất, làm cơ sở cho xác định tỷ lệ truyền của hộp số của máy phát đồng trục nhằm giảm chi phí sản xuất điện năng trên tàu thủy.
- Kết quả của luận án đã đóng góp cho khoa học một phương pháp mới về điều khiển máy điện dị bộ nguồn kép trong máy phát đồng trục trên tàu thủy với cấu trúc điều khiển đơn giản nhưng hiệu quả.

Hà nội, ngày 09 tháng 04 năm 2014.

Đại diện tập thể cán bộ hướng dẫn

Nghiên cứu sinh

PGS.TS. Nguyễn Tiến Ban

Nguyễn Trọng Thắng

THE INFORMATION OF THESIS

Thesis title: *“Improving the efficiency in using doubly-fed induction machine in shaft generation system on shipboards”*

Major: Technology of Control and Automation

Code: 62.52.02.16

Doctoral student: Nguyen Trong Thang

Supervisors: 1. Ass.Prof. Dr Nguyen Tien Ban

2. Ass.Prof. Dr Nguyen Thanh Hai

Training Institution: Hanoi University of Transport and Communications

The new results of the thesis:

- The thesis proposes the control structure of the doubly-fed induction machine in shaft generator on shipboards basing on the rotor similar signal method. That is a new proposal of the control structure of the doubly-fed induction machine. Based on this method, the active power and the reactive power of doubly-fed induction machine supplied to the grid will be controlled separately; and also the control structure of the doubly-fed induction machine will be simplified. Moreover, applying this method will improve the quality of the shaft generator on shipboards such as: improving the ability to follow the soft grid voltage of the shaft generator on the shipboards when changing the speed of main engines; improving the stability and the safety of the grid on shipboard.
- The thesis researches, proposals and calculates the range of angular speed of the doubly-fed induction machine so that the conversion efficiency from mechanical energy into electrical energy in shaft generators on shipboards is maximal. Hence, the transmission system between the main engine and the rotor of the doubly-fed induction machine with the reasonable ratio of transmission is designed in order that the consumption of fuel for producing electrical power in shaft generators is minimal.

- The results of the thesis have contributed to the science a new method for controlling the doubly-fed induction machine in shaft generator on shipboards with the simple and effective control structure.

Hanoi, 9/04/2014

Principal Supervisor

Doctoral Student

Ass.Prof. Dr Nguyen Tien Ban

Nguyen Trong Thang