

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

**ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP
CAPSTONE PROJECT**

NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN VÀ TỰ ĐỘNG HÓA

ĐỀ TÀI:

**NGHIÊN CỨU VÀ PHÁT TRIỂN BỘ ĐIỀU
KHIỂN CHO ĐỘNG CƠ BLDC SỬ DỤNG
PHƯƠNG PHÁP FOC**

Giảng viên hướng dẫn: **TS. NGUYỄN KHÁNH QUANG**

Cán bộ hướng dẫn: **TS. NGUYỄN ĐĂNG KHOA**

Sinh viên thực hiện:

1. HÀ DUY PHƯƠNG - MSSV: 105200464 - LỚP: 20TDHCLC3

2. ĐINH LÊ TRUNG NGUYÊN - MSSV: 105200461 - LỚP: 20TDHCLC3

Đà Nẵng, 6/2025

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA ĐIỆN

ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP
CAPSTONE PROJECT

NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN VÀ TỰ ĐỘNG HÓA

ĐỀ TÀI:

**NGHIÊN CỨU VÀ PHÁT TRIỂN BỘ ĐIỀU
KHIỂN CHO ĐỘNG CƠ BLDC SỬ DỤNG
PHƯƠNG PHÁP FOC**

Giảng viên hướng dẫn: **TS. NGUYỄN KHÁNH QUANG**

Cán bộ hướng dẫn: **TS. NGUYỄN ĐĂNG KHOA**

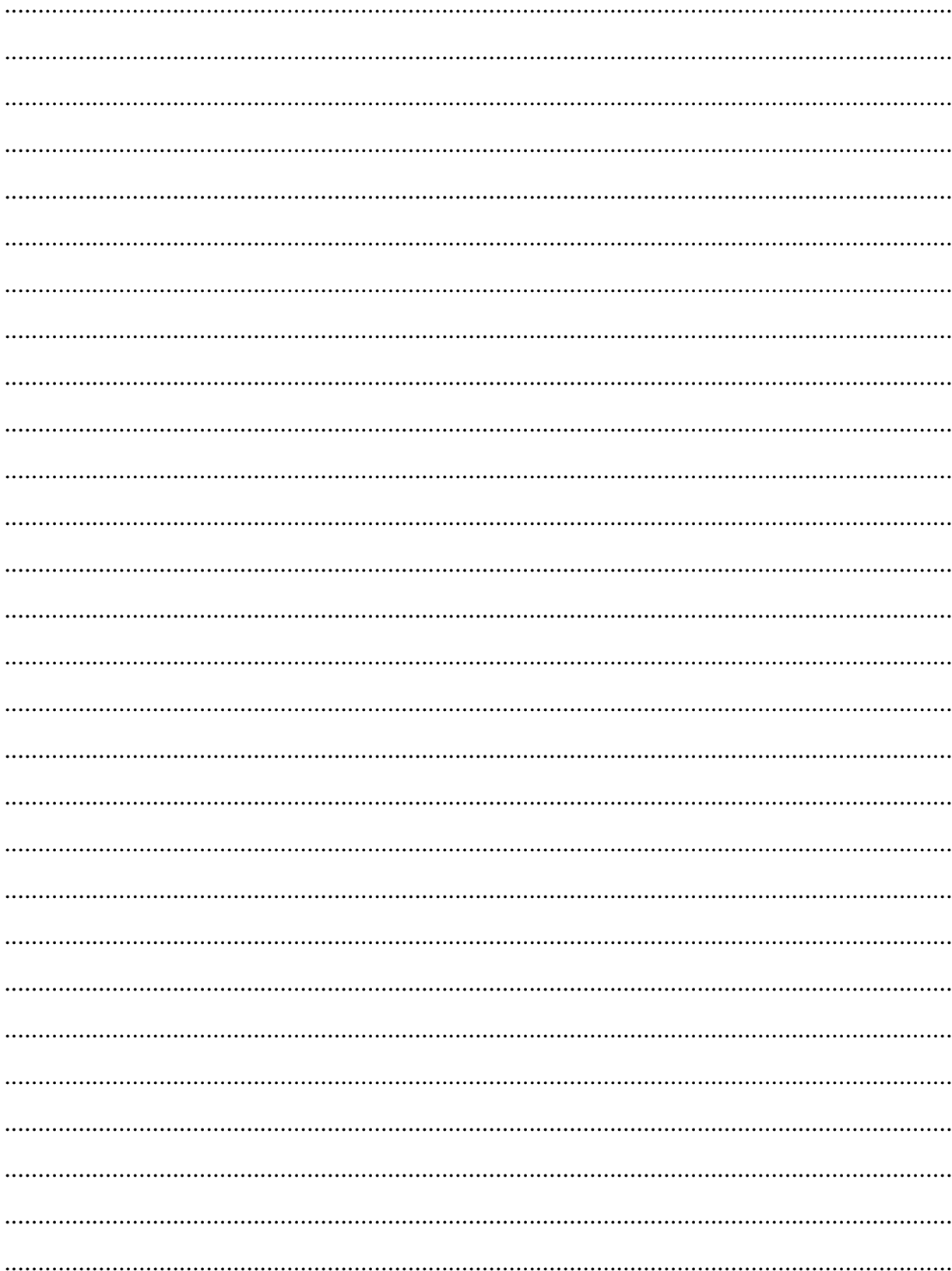
Sinh viên thực hiện:

1. HÀ DUY PHƯƠNG - MSSV: 105200464 - LỚP: 20TDHCLC3

2. ĐINH LÊ TRUNG NGUYỄN - MSSV: 105200461 - LỚP: 20TDHCLC3

Đà Nẵng, 6/2025

[illegible]



TÓM TẮT

Tên đề tài: Nghiên cứu và phát triển bộ điều khiển cho động cơ BLDC sử dụng phương pháp FOC.

Sinh viên thực hiện: Đinh Lê Trung Nguyên.....

Số thẻ SV: 105200461..... Lớp: 20TDHCLC3.....

Sinh viên thực hiện: Hà Duy Phương.....

Số thẻ SV: 105200464..... Lớp: 20TDHCLC3.....

Trong bối cảnh các hệ thống điều khiển hiện đại yêu cầu độ chính xác cao, khả năng phản hồi nhanh và tiết kiệm năng lượng, phương pháp điều khiển định hướng từ thông (Field-Oriented Control – FOC) ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong điều khiển động cơ không chổi than (BLDC). Đề tài tập trung nghiên cứu và triển khai phương pháp FOC trên nền tảng vi điều khiển STM32 nhằm điều khiển vị trí và tốc độ động cơ BLDC. Hệ thống bao gồm các vòng điều khiển lồng nhau: vị trí – tốc độ – dòng điện, sử dụng bộ PID ba lớp, cùng với cảm biến từ AS5147U để phản hồi vị trí rotor chính xác.

Qua quá trình thực nghiệm, hệ thống điều khiển cho thấy khả năng bám góc nhanh và chính xác, với sai số nhỏ và thời gian quá độ ngắn. Góc thực tế bám sát góc đặt, vận tốc được điều chỉnh ổn định thông qua vòng tốc độ, và dòng điện điều khiển trực tiếp mô-men động cơ được điều tiết nhờ bộ biến đổi dq. Tuy nhiên, hệ thống còn xuất hiện hiện tượng vọt lố khi sai số vị trí lớn do tốc độ phản ứng cao, đòi hỏi cần cải tiến thuật toán giới hạn tốc độ và lên kế hoạch chuyển động.

Kết quả đề tài không chỉ góp phần hiểu rõ cơ chế điều khiển FOC mà còn là cơ sở cho việc phát triển các bộ điều khiển nhúng thông minh hơn, có khả năng ứng dụng trong robot, máy CNC, camera gimbal, và các hệ thống tự động hoá yêu cầu hiệu suất cao.

NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

TT	Họ tên sinh viên	Số thẻ SV	Lớp	Ngành
1	Hà Duy Phương	105200464	20TDHCLC3	Kỹ thuật điều khiển và tự động hoá
2	Đinh Lê Trung Nguyên	105200461	20TDHCLC3	Kỹ thuật điều khiển và tự động hoá

1. Tên đề tài đồ án:

Nghiên cứu và phát triển bộ điều khiển cho động cơ BLDC sử dụng phương pháp FOC

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

3. Các số liệu và dữ liệu ban đầu:

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

a. Phần chung:

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung
1	Hà Duy Phương	- Tìm hiểu lý thuyết động cơ BLDC và phương pháp điều khiển FOC. - Phân tích hệ thống phần cứng: Vi điều khiển, encoder, động cơ, driver.
2	Đinh Lê Trung Nguyên	- Thực hiện lắp đặt thiết bị cho hệ thống. - Thiết kế và cài đặt thuật toán FOC và PID (vòng dòng, tốc độ, vị trí). - Triển khai thực nghiệm và đánh giá kết quả.

b. Phần riêng:

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung
1	Hà Duy Phương	- Thiết kế mạch tích hợp điều khiển FOC (Schematic, PCB layout). - Cấu hình ADC đo dòng điện 3 pha và đo điện áp nguồn. - Thiết kế và in 3D đế gá động cơ.

2	Đinh Lê Trung Nguyễn	- Cấu hình Timer1 phát PWM 3 pha và giao tiếp với driver L6234. - Cấu hình và lập trình giao tiếp SPI với encoder AS5147U.
---	-------------------------	---

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

a. Phần chung:

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung

b. Phần riêng:

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung

6. Họ tên người hướng dẫn:	Phân/ Nội dung:
T.s Nguyễn Khánh Quang	- Giám sát tiến độ thực hiện. - Kiểm tra, đóng góp ý kiến.
T.s Nguyễn Đăng Khoa	- Cung cấp tài liệu tham khảo. - Kiểm tra, đóng góp ý kiến.

7. Ngày giao nhiệm vụ đồ án: 6/3/2025

8. Ngày hoàn thành đồ án: 24/6/2025

Trưởng Bộ môn Tự động hóa

Đà Nẵng, ngày tháng năm 2025

Người hướng dẫn

TS. Giáp Quang Huy

PHIẾU KIỂM SOÁT TIẾN ĐỘ LÀM ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

(Phiếu dành cho người hướng dẫn/sinh viên)

Họ tên sinh viên: Hà Duy Phương

Số thẻ SV : 105200464

Đinh Lê Trung Nguyên

105200461

Tên đề tài ĐATN: Nghiên cứu và phát triển bộ điều khiển cho động cơ BLDC sử dụng phương pháp FOC.

Họ tên người HD: Ts. Nguyễn Khánh Quang

Đơn vị: Trường Đại học Bách Khoa – Đại học Đà Nẵng

Tuần	Ngày	Khối lượng		GVHD ký tên
		đã thực hiện (%)	tiếp tục thực hiện (%)	
1	06/03- 12/03	5%	95%	
2	13/03 – 19/03	10%	90%	
3	20/03 – 26/03	20%	80%	
4	27/03 – 02/04	30%	70%	
		Duyệt lần 1: Đánh giá khối lượng hoàn thành _____ % : Được tiếp tục làm ĐATN <input type="checkbox"/> Không tiếp tục thực hiện ĐATN <input type="checkbox"/>		
5	03/04 – 09/04	40%	60%	
6	10/04 – 16/04	50%	50%	
7	17/04 – 23/04	60%	40%	
8	24/04 – 30/04	70%	30%	
		Duyệt lần 2: Đánh giá khối lượng hoàn thành _____ % : Được tiếp tục làm ĐATN <input type="checkbox"/> Không tiếp tục thực hiện ĐATN <input type="checkbox"/>		
9	01/05 – 07/05	75%	25%	

10	08/05 – 14/05	80%	20%	
11	15/05 – 21/05	85%	15%	
12	22/05 – 28/05	90%	10%	
		Duyệt lần 3: Đánh giá khối lượng hoàn thành _____% : Được tiếp tục làm ĐATN Ý Không tiếp tục thực hiện ĐATN Ý		
13	29/05 – 04/06	93%	7%	
14	05/06 – 11/06	96%	4%	
15	12/06 – 26/06	100%	0%	

LỜI NÓI ĐẦU VÀ CẢM ƠN

Trong suốt quá trình học tập tại Trường Đại học Bách Khoa – Đại học Đà Nẵng, chúng em luôn nhận được sự quan tâm giảng dạy tận tâm, sự hướng dẫn nhiệt tình cùng sự hỗ trợ chu đáo từ các thầy cô Khoa Điện cũng như toàn thể đội ngũ cán bộ, giảng viên của nhà trường. Chúng em xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến tất cả quý thầy cô đã truyền đạt cho chúng em không chỉ kiến thức chuyên môn mà còn những kinh nghiệm thực tiễn quý giá, là hành trang vững chắc để chúng em tự tin bước vào chặng đường phía trước.

Đặc biệt, chúng em xin gửi lời tri ân chân thành đến Thầy Nguyễn Khánh Quang, Tiến sĩ – Giảng viên Khoa Điện và Thầy Nguyễn Đăng Khoa, Tiến sĩ – Giám đốc Công ty Sybotix Solution. Trong suốt quá trình thực hiện đồ án tốt nghiệp, các thầy đã tận tình hướng dẫn, giải đáp mọi thắc mắc, đồng hành và tạo điều kiện thuận lợi để chúng em hoàn thành đề tài đúng tiến độ.

Chúng em cũng không quên gửi lời cảm ơn sâu sắc đến gia đình và bạn bè, những người luôn ở bên, động viên tinh thần và hỗ trợ cả về vật chất lẫn tinh thần trong suốt quá trình học tập và thực hiện đồ án.

Dù đã nỗ lực hoàn thiện đồ án với tinh thần trách nhiệm cao nhất, nhưng chắc chắn vẫn còn những thiếu sót không tránh khỏi. Chúng em mong nhận được sự thông cảm từ quý thầy cô và rất hy vọng sẽ nhận được những góp ý quý báu để có thể hoàn thiện hơn nữa.

Xin trân trọng cảm ơn!

LỜI CAM ĐOAN LIÊM CHÍNH HỌC THUẬT

Chúng tôi xin cam đoan rằng đồ án tốt nghiệp với đề tài “*Nghiên cứu và phát triển bộ điều khiển cho động cơ BLDC sử dụng phương pháp FOC*” là kết quả làm việc trung thực và nghiêm túc của hai sinh viên. Toàn bộ nội dung trong đồ án này được xây dựng dựa trên quá trình nghiên cứu, tìm hiểu tài liệu, thiết kế và thực nghiệm thực tế do chính chúng tôi thực hiện dưới sự hướng dẫn của giảng viên hướng dẫn.

Chúng tôi cam kết không sao chép, không sử dụng trái phép nội dung của bất kỳ cá nhân hay tổ chức nào. Nếu phát hiện có sự gian lận hay vi phạm quy định về liêm chính học thuật, chúng tôi xin hoàn toàn chịu trách nhiệm trước nhà trường và pháp luật.

Mọi tài liệu tham khảo đều được trích dẫn rõ ràng, đúng quy định. Chúng tôi hiểu rằng việc tuân thủ các nguyên tắc về liêm chính học thuật là yêu cầu bắt buộc và thể hiện đạo đức nghề nghiệp của người làm khoa học.

Sinh viên thực hiện

{Chữ ký, họ và tên sinh viên}

MỤC LỤC

TÓM TẮT	i
NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP	ii
PHIẾU KIỂM SOÁT TIẾN ĐỘ LÀM ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP	iv
LỜI NÓI ĐẦU VÀ CẢM ƠN	vi
LỜI CAM ĐOAN LIÊM CHÍNH HỌC THUẬT.....	vii
MỤC LỤC	viii
MỤC LỤC HÌNH ẢNH.....	xii
MỤC LỤC BẢNG.....	xiv
MỞ ĐẦU.....	1
1. Tổng quan	1
2. Mục đích thực hiện đề tài.....	1
3. Phạm vi, đối tượng nghiên cứu	2
4. Phương pháp nghiên cứu	2
CHƯƠNG 1: CƠ SỞ LÝ THUYẾT.....	3
1.1 Động cơ BLDC	3
1.1.1 Giới thiệu chung	3
1.1.2 Cấu tạo của động cơ BLDC.....	4
1.1.3 Nguyên lý hoạt động	7
1.1.4 Đặc điểm nổi bật của động cơ BLDC	8
1.2 Mô hình toán học của động cơ BLDC	8
1.3 Điều khiển động cơ BLDC	10
1.4 Phương pháp Field Oriend Control (FOC)	11
1.4.1 Cơ sở lý thuyết	11
1.4.2 So sánh giữa FOC và DTC.....	13

1.4.3	Ưu và nhược điểm của từng phương pháp:	14
1.5	Thuật toán điều khiển PID (điều khiển động cơ BLDC)	15
1.5.1	Khâu tỉ lệ	15
1.5.2	Khâu tích phân.....	16
1.5.3	Khâu vi phân	16
1.5.4	Bảng điều chỉnh độc lập các thông số PID.....	17
1.6	Căn chỉnh động cơ - cảm biến	17
CHƯƠNG 2: PHÂN TÍCH HỆ THỐNG PHẦN CỨNG.....		19
2.1	Vi điều khiển Nucleo-64.....	19
2.1.1	Giới thiệu	19
2.1.2	Đặc điểm chính.....	19
2.1.3	Ứng dụng	20
2.2	Driver MKS SimpleFOC Shield V2.0.4	20
2.2.1	Giới thiệu	20
2.2.2	Đặc điểm.....	20
2.2.3	Kết nối phần cứng	21
2.2.4	Kết nối chân cắm.....	21
2.2.5	Ứng dụng	21
2.3	Thiết kế mạch điều khiển FOC tích hợp.....	22
2.3.1	Mục tiêu thiết kế.....	22
2.3.2	Sơ đồ nguyên lý (Schematic)	22
2.3.3	PCB Layout 2D và 3D.....	25
2.3.4	Hình ảnh thực tế	26
2.4	Cảm biến vị trí AS5147U	27
2.4.1	Giới thiệu	27
2.4.2	Khung truyền nhận spi 16 bit	28

2.4.3	Nguyên lý đo góc	29
2.4.4	Nguyên lý đo tốc độ	29
2.4.5	Sơ đồ kết nối.....	30
2.5	Động cơ gimbal BLDC (loại sử dụng trong đề tài)	30
2.5.1	Nguyên lý hoạt động	32
2.5.2	Ưu điểm của động cơ gimbal BLDC.....	32
2.6	Sơ đồ khối hệ thống phần cứng	32
CHƯƠNG 3: PHÂN TÍCH HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN.....		34
3.1	Giới thiệu tổng thể vòng điều khiển	34
3.2	Điều khiển dòng điện (I_d , I_q).....	34
3.3	Biến đổi Clark và Park	35
3.3.1	Phép biến đổi Clark	35
3.3.2	Phép biến đổi park.....	36
3.4	Điều khiển tốc độ (vòng ngoài)	36
3.5	Điều khiển vị trí (vòng ngoài cùng).....	37
3.6	Điều chế sin PWM (Sine PWM).....	37
CHƯƠNG 4: TRIỂN KHAI PHẦN MỀM TRÊN STM32.....		39
4.1	Cấu hình Timer 1 (TIM1) – Phát xung PWM 3 pha.....	39
4.1.1	Chức năng.....	39
4.1.2	Cấu hình các kênh TIM1 (CH1, CH2, CH3).....	40
4.1.3	Giao tiếp điều khiển công suất thông qua L6234.....	41
4.1.4	Kích hoạt Update Event	41
4.2	Cấu hình SPI – Giao tiếp với Encoder AS5147U	42
4.2.1	Chức năng.....	42
4.2.2	Cấu hình SPI.....	42
4.2.3	Khung truyền SPI và quá trình đọc góc	42

4.3	Cấu hình ADC1 – Đo dòng điện 3 pha.....	43
4.3.1	Bộ khuếch đại INA240.....	43
4.3.2	Nguyên lý đo dòng điện	43
4.3.3	Sử dụng ADC injected mode.....	44
4.3.4	Trình tự hoạt động	44
4.4	Cấu hình ADC2 – Đo điện áp nguồn.....	45
4.4.1	Mạch chia phân áp.....	45
4.4.2	Cấu hình ADC2	46
CHƯƠNG 5: KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM - KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN		48
5.1	Sơ đồ hệ thống điều khiển.....	48
5.2	Lưu đồ thuật toán	48
5.3	Kết quả thực nghiệm	49
5.3.1	Biểu đồ góc đặt, góc thực, và đáp ứng vận tốc	49
5.3.2	Phân tích, nhận xét	50
5.4	Kết luận và hướng phát triển.....	51
5.4.1	Kết luận	51
5.4.2	Hướng phát triển.....	52
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....		53

MỤC LỤC HÌNH ẢNH

Hình 1.1 Động cơ BLDC.....	3
Hình 1.2 Cấu trúc chính của động cơ BLDC	5
Hình 1.3 Rotor có nam châm gắn trên bề mặt.....	6
Hình 1.4 Rotor có nam châm ẩn bên trong lõi	6
Hình 1.5 Stator động cơ BLDC	7
Hình 1.6 Sơ đồ nguyên lý mạch động lực	7
Hình 1.7 Mô hình mạch điện của động cơ BLDC.....	8
Hình 1.8 Sơ đồ nguyên lý mạch động lực	11
Hình 1.9 Đặc tính moment- tốc độ của động cơ BLDC.....	11
Hình 1.10 Biến đổi tín hiệu của phương pháp FOC.....	12
Hình 1.11 Sơ đồ khối hệ thống điều khiển PID	15
Hình 1.12 Cấp nguồn cho pha a	18
Hình 1.13 Tìm vị trí ổn định.....	18
Hình 1.14 Hiệu chỉnh đảm bảo vị trí hiện tại là góc 0 điện	18
Hình 2.1 Nucleo F446RE	19
Hình 2.2 MKS SimpleFOC Shield V2.0.4	20
Hình 2.3 Sơ đồ mạch nạp	22
Hình 2.4 Sơ đồ kết nối cảm biến AS5147U	22
Hình 2.5 Sơ đồ mạch nguồn vi điều khiển	23
Hình 2.6 Sơ đồ giao tiếp CAN và UART.....	23
Hình 2.7 Sơ đồ mạch ổn áp 3.3V	23
Hình 2.8 Sơ đồ nguyên lý mạch đo dòng pha sử dụng INA240A2	24
Hình 2.9 Sơ đồ nguyên lý mạch điều khiển công suất 3 pha	24
Hình 2.10 Sơ đồ cầu chia áp và ổn áp đầu vào	24
Hình 2.11 Sơ đồ bố trí linh kiện và đường đi tín hiệu trên board PCB 2 lớp	25
Hình 2.12 Mô phỏng 3D PCB	26

Hình 2.13 Hình ảnh thực tế mạch điều khiển FOC tích hợp.....	26
Hình 2.14 Magnetic Encoder Development Board	27
Hình 2.15 Khung truyền nhận 16 bit.....	28
Hình 2.16 Mô tả thanh ghi bộ nhớ khả biến (volatile):.....	28
Hình 2.17 Sơ đồ kết nối AS5147U.....	30
Hình 2.18 Động cơ gimbal không chổi than 3 pha	31
Hình 2.19 Sơ đồ kết nối phần cứng	33
Hình 3.1 Phép biến đổi Clarke	35
Hình 3.2 Phép biến đổi Park.....	36
Hình 4.1 Timer1 Channel 1,2,3	39
Hình 4.2 PWM Center aligned mode 1 và trigger cho ADC injected.....	40
Hình 4.3 Cấu hình PWM Mode 2.....	40
Hình 4.4 Sơ đồ khối nội bộ IC L6234	41
Hình 4.5 Cấu hình SPI1	42
Hình 4.6 Sơ đồ kết nối INA240.....	43
Hình 4.7 Cấu hình ADC injected mode	44
Hình 4.8 Cấu trúc cầu phân áp	46
Hình 4.8 Cấu hình ADC2_IN1	47
Hình 4.9 Cấu hình DMA cho ADC2.....	47
Hình 5.1 Sơ đồ khối điều khiển vị trí.....	48
Hình 5.2 Lưu đồ thuật toán.....	48
Hình 5.3 Đồ thị với vị trí đặt $\pm 2\pi$	49
Hình 5.4 Đồ thị với vị trí đặt $+\frac{\pi}{3}$	49
Hình 5.5 Đồ thị với vị trí đặt $\pm 6\pi$	50

MỤC LỤC BẢNG

Bảng 1.1 So sánh động cơ BLDC và ĐCMC	4
Bảng 1.2 So sánh FOC và DTC	13
Bảng 1.3 Bảng điều chỉnh độc lập các thông số PID	17
Bảng 2.1 Thông số kỹ thuật động cơ BLDC	31
Bảng 2.2 Thông số đặc tính cơ điện động cơ BLDC	31

MỞ ĐẦU

1. Tổng quan

Trong những năm gần đây, sự phát triển mạnh mẽ của khoa học kỹ thuật, đặc biệt là trong lĩnh vực điều khiển và tự động hóa, đã đặt ra những yêu cầu ngày càng cao đối với các hệ thống điện. Các ràng buộc kinh tế cùng với các tiêu chuẩn kỹ thuật mới được ban hành bởi chính phủ và các tổ chức quốc tế yêu cầu các hệ thống cần có hiệu suất cao, độ tin cậy lớn, khả năng điều khiển chính xác và đặc biệt là mức tiêu thụ năng lượng thấp. Ngoài ra, hệ thống cần có tính linh hoạt cao để dễ dàng thích ứng với nhiều ứng dụng khác nhau, rút ngắn thời gian phát triển sản phẩm và giảm thiểu chi phí sản xuất.

Trong bối cảnh đó, động cơ không chổi than (Brushless DC – BLDC) nổi lên như một giải pháp ưu việt thay thế cho động cơ chổi than truyền thống. BLDC có nhiều ưu điểm nổi bật như:

- Hiệu suất cao và tổn hao thấp.
- Không cần bảo trì do không có chổi than.
- Kích thước nhỏ gọn, trọng lượng nhẹ.
- Độ tin cậy và tuổi thọ cao.
- Phù hợp với điều khiển chính xác ở tốc độ thấp và cao.

Nhờ những đặc điểm trên, BLDC được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như robot, drone, camera gimbal, ổ cứng, xe điện và tự động hóa công nghiệp. Tuy nhiên, để khai thác hết tiềm năng của loại động cơ này, cần có một hệ thống điều khiển tiên tiến, trong đó nổi bật là phương pháp điều khiển theo định hướng từ thông (Field-Oriented Control – FOC) kết hợp với điều khiển phản hồi (PID) nhằm tối ưu mô-men, tốc độ và vị trí vận hành.

2. Mục đích thực hiện đề tài

Mục tiêu chính của đề tài là nghiên cứu, thiết kế và xây dựng hệ thống điều khiển động cơ BLDC sử dụng phương pháp điều khiển Field-Oriented Control (FOC) kết hợp với thuật toán điều khiển PID để điều khiển chính xác tốc độ và vị trí động cơ. Thông qua đề tài, người thực hiện sẽ:

- Tìm hiểu cấu tạo, nguyên lý hoạt động và đặc tính điều khiển của động cơ BLDC.

- Nắm bắt nguyên lý và quy trình điều khiển theo phương pháp FOC.
- Thiết kế và lập trình hệ thống điều khiển động cơ dựa trên vi điều khiển STM32.
- Ứng dụng cảm biến từ tính AS5147U để đo chính xác vị trí rotor.
- Xây dựng mô hình vòng điều khiển khép kín (tốc độ, vị trí) sử dụng PID và thực hiện điều chế tín hiệu PWM điều khiển mạch công suất.

3. Phạm vi, đối tượng nghiên cứu

Phạm vi nghiên cứu tập trung vào các vấn đề: thiết kế thuật toán điều khiển FOC (bao gồm biến đổi Clarke, Park, bộ điều khiển PID), đọc dữ liệu từ cảm biến từ tính AS5147U, tạo xung PWM điều khiển mạch công suất, và tích hợp các khối chức năng trong vi điều khiển STM32.

Đối tượng nghiên cứu chính là động cơ BLDC loại gimbal nhỏ công suất thấp và mạch điều khiển SimpleFOC Shield.

4. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu bao gồm: thu thập lý thuyết về điều khiển FOC, lập trình vi điều khiển trên STM32CubeIDE, thực hiện mô phỏng và kiểm thử thực nghiệm trên phần cứng.

CHƯƠNG 1: CƠ SỞ LÝ THUYẾT

1.1 Động cơ BLDC

1.1.1 Giới thiệu chung



Hình 1.1 Động cơ BLDC

Động cơ BLDC là một loại động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu. Động cơ này có stator 3 pha được nối theo kiểu tam giác (delta) hoặc hình sao (star), và rotor được gắn các nam châm vĩnh cửu.

Động cơ một chiều thông thường nổi bật với hiệu suất cao và đặc tính phù hợp cho các ứng dụng truyền động servo. Tuy nhiên, điểm hạn chế lớn nhất của loại động cơ này là cấu tạo phải sử dụng cổ góp và chổi than, các bộ phận dễ hao mòn và cần được bảo trì, bảo dưỡng thường xuyên. Để giải quyết vấn đề này, người ta đã phát triển loại động cơ không cần bảo dưỡng bằng cách thay thế chức năng của cổ góp và chổi than bằng hệ thống chuyển mạch sử dụng thiết bị bán dẫn. Những động cơ này được gọi là động cơ đồng bộ kích thích bằng nam châm vĩnh cửu, hay còn được biết đến với tên động cơ một chiều không chổi than (BLDC). Việc loại bỏ cổ góp và chổi than giúp BLDC khắc phục hầu hết những nhược điểm của động cơ một chiều truyền thống.

So sánh giữa động cơ BLDC và động cơ một chiều thông thường: Mặc dù về mặt lý thuyết, đặc tính tĩnh của BLDC và động cơ một chiều truyền thống được cho là tương đồng, nhưng thực tế chúng có nhiều điểm khác biệt đáng kể. Khi đánh giá hai loại động cơ

này dựa trên công nghệ hiện đại, sự khác biệt thường được nhấn mạnh hơn là sự tương đồng.

Một yếu tố quan trọng khi nói đến chức năng của động cơ điện là vai trò của dây quấn và quá trình đổi chiều. Đổi chiều là quá trình chuyển đổi dòng điện một chiều đầu vào thành dòng điện xoay chiều, sau đó phân phối chính xác dòng điện này đến từng dây quấn trong phần ứng của động cơ. Ở động cơ một chiều truyền thống, việc đổi chiều được thực hiện thông qua cổ góp và chổi than. Ngược lại, ở động cơ BLDC, quá trình này được đảm nhận bởi các thiết bị bán dẫn hiện đại như transistor, MOSFET, GTO, hoặc IGBT.

Bảng 1.1 So sánh động cơ BLDC và ĐCMC

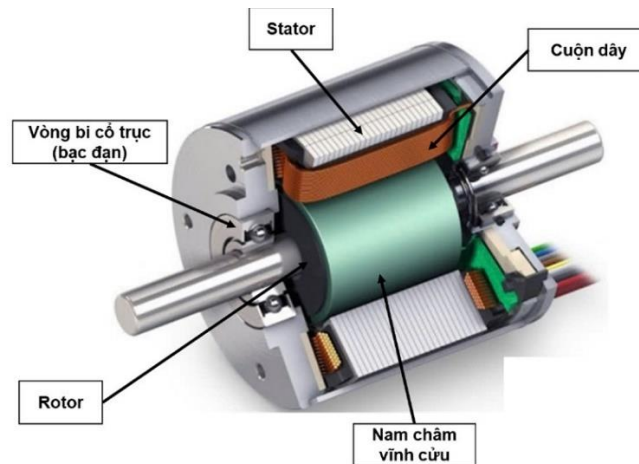
So sánh động cơ BLDC và ĐCMC		
Nội dung	ĐCMC thông thường	BLDC
Cấu trúc cơ khí	Mạch kích từ nằm trên stator	Mạch kích từ nằm trên rotor
Tính năng đặc trưng	Đáp ứng nhanh và dễ điều khiển	Đáp ứng chậm hơn(để bảo dưỡng hoặc không yêu cầu bảo dưỡng)
Sơ đồ nối dây	Nối vòng tròn, đơn giản nhất là nối Δ	Cao cấp: 3 pha nối Δ hoặc Y. Bình thường: dây quấn 3 pha nối Y và có điểm trung tính nối đất nối 4 pha. Đơn giản nhất: nối 2 pha.
Phương pháp đổi chiều	Tiếp xúc cơ khí giữa chổi than và cổ góp	Chuyển mạch điện tử dùng IGBT, Transistor, GTO, MOSFET,...
Phương pháp xác định vị trí rotor	Tự xác định bằng chổi than	Sử dụng cảm biến vị trí: Hall, cảm biến quang học,..
Phương pháp đảo chiều	Đảo chiều điện áp nguồn(cấp cho phần ứng hoặc mạch kích từ)	Sắp xếp thứ tự các tín hiệu logic

1.1.2 Cấu tạo của động cơ BLDC

Khác với động cơ 1 chiều truyền thống, động cơ BLDC sử dụng chuyển mạch điện tử thay cho kết cấu chổi than và cổ góp để chuyển mạch dòng điện cấp cho các cuộn dây phần ứng. Có thể gọi là cơ cấu chuyển mạch tĩnh. Để làm được điều đó, phần ứng cũng

phải tĩnh. Như vậy, về mặt kết cấu có thể thấy động cơ BLDC và động cơ một chiều truyền thống có sự hoán đổi vị trí phần cảm và phần ứng: phần cảm trên rotor và phần ứng trên Stato.

Như đã giới thiệu, động cơ BLDC có các cuộn dây phần ứng đặt trên Stato (gọi là các cuộn dây stator) còn nam châm vĩnh cửu được đặt trên rotor theo nhiều kết cấu khác nhau.



Hình 1.2 Cấu trúc chính của động cơ BLDC

Tuỳ thuộc vào số cuộn dây stato ta có các loại động cơ BLDC một pha, hai pha, ba pha tương ứng có một cuộn dây, hai cuộn dây, ba cuộn dây trên stator. Trong đó loại động cơ ba pha được sử dụng phổ biến nhất.

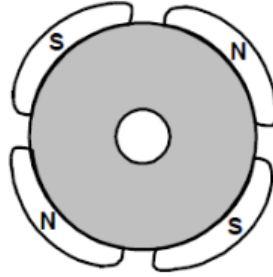
Động cơ BLDC không có cơ cấu chổi than – cổ góp nên phải có các phần tử và phương pháp để xác định vị trí rotor nhằm đưa các tín hiệu điều khiển trình tự cấp điện cho các cuộn dây pha phù hợp.

1.1.2.1 Kết cấu rotor của động cơ BLDC

Rotor của động cơ BLDC gồm phần lõi bằng thép và các nam châm vĩnh cửu gắn trên đó. Về cơ bản có hai phương pháp gắn nam châm vĩnh cửu trên lõi rotor:

- a. Rotor có nam châm gắn trên bề mặt lõi

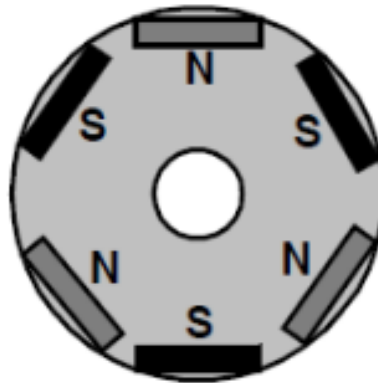
Các nam châm vĩnh cửu được gắn trên bề mặt lõi rotor. Kết cấu này đơn giản trong chế tạo nhưng không chắc chắn nên được sử dụng trong phạm vi tốc độ trung bình và thấp.



Hình 1.3 Rotor có nam châm gắn trên bề mặt

b. Rotor có nam châm ẩn bên trong lõi

Trong lõi rotor có các khe dọc trục và các thanh nam châm vĩnh cửu được chèn vào các khe này. Kết cấu này khó khăn trong chế tạo và lắp ráp, đặc biệt là khi công suất lớn, nhưng chắc chắn và được sử dụng trong các ứng dụng tốc độ cao.



Hình 1.4 Rotor có nam châm ẩn bên trong lõi

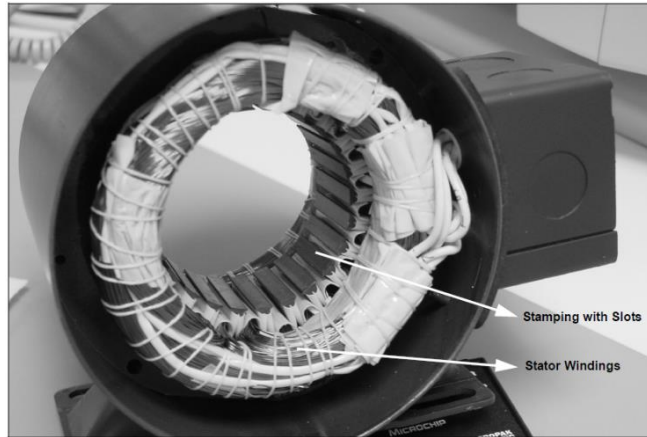
Trong động cơ BLDC, các nam châm vĩnh cửu trên rotor tạo ra từ trường hướng tâm và phân bố đều dọc theo khe hở không khí giữa stator và rotor.

1.1.2.2 Kết cấu stator của động cơ BLDC

Stator của động cơ BLDC bao gồm các lớp thép mỏng xếp chồng lên nhau với các cuộn dây được đặt trong các rãnh được cắt dọc theo chu vi bên trong. Hình dạng của stator giống với stator của động cơ không đồng bộ; tuy nhiên, các cuộn dây được phân bố theo cách khác biệt. Hầu hết các động cơ BLDC có ba cuộn dây stator được nối theo kiểu hình sao (star) hoặc tam giác (delta). Mỗi cuộn dây này được cấu tạo từ nhiều cuộn nhỏ (coil) liên kết với nhau để tạo thành một cuộn dây hoàn chỉnh.

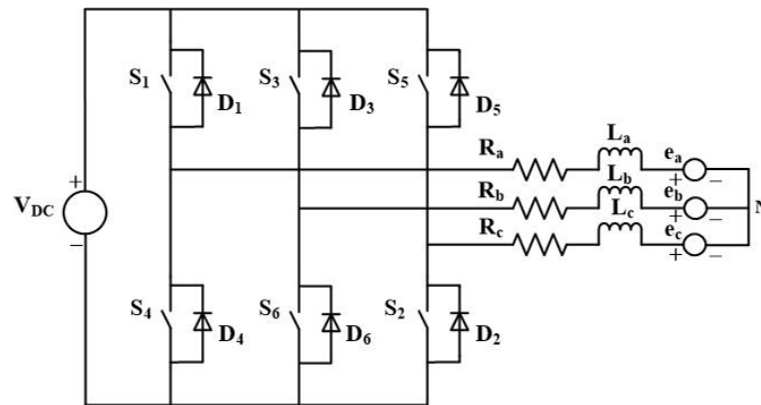
Một hoặc nhiều coil được đặt vào các rãnh và liên kết với nhau thành một cuộn dây. Mỗi cuộn dây này được phân bố quanh chu vi stator để tạo thành số cực chẵn.

Có hai loại biến thể của cuộn dây stator: động cơ dạng hình thang (trapezoidal) và động cơ dạng hình sin (sinusoidal). Sự phân loại này dựa trên cách liên kết các cuộn dây trong stator để tạo ra các dạng sóng sức điện động ngược (back EMF) khác nhau. Động cơ dạng hình thang tạo ra back EMF có dạng hình thang, trong khi động cơ dạng hình sin tạo ra back EMF có dạng hình sin.



Hình 1.5 Stator động cơ BLDC

1.1.3 Nguyên lý hoạt động



Hình 1.6 Sơ đồ nguyên lý mạch động lực

Điều khiển động cơ BLDC bằng cách chuyển mạch dòng điện giữa các cuộn dây pha theo một thứ tự và vào những thời điểm nhất định.

Mô men quay được tạo ra do sự tương tác giữa hai từ trường: từ trường do nam châm rotor tạo ra và từ trường tổng do dòng điện trong các cuộn dây pha tạo ra. Xu hướng của rotor là quay đến vị trí sao cho hai vector từ trường trùng nhau. Mô men quay đạt giá trị lớn nhất là khi hai từ trường vuông góc với nhau và giảm xuống khi chúng di chuyển.

Để duy trì quá trình quay, hệ thống điều khiển cần biết vị trí của rotor (thông qua cảm biến hoặc ước lượng) để cập nhật trình tự cấp dòng sao cho từ trường stator luôn dẫn trước rotor một góc phù hợp.

Nhờ cơ chế này, động cơ BLDC có khả năng tạo moment mượt, hiệu suất cao và không cần sử dụng chổi than, giúp tăng độ bền và giảm tổn hao cơ khí.

1.1.4 Đặc điểm nổi bật của động cơ BLDC

Hiệu suất cao: Không có tổn hao do ma sát cơ học từ cổ góp và chổi than.

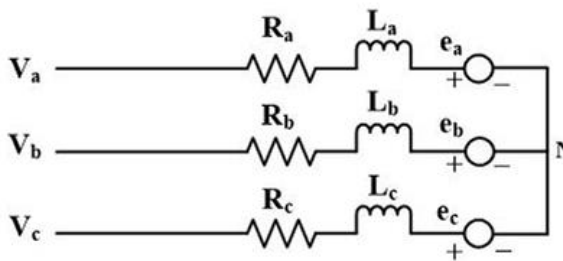
Độ bền cao: Không cần bảo trì thường xuyên nhờ loại bỏ chổi than.

Vận hành êm ái: Ít rung động và tiếng ồn, đặc biệt phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu độ chính xác cao.

Khả năng điều khiển tốt: Dễ dàng điều chỉnh tốc độ và mô-men xoắn thông qua bộ điều khiển điện tử.

1.2 Mô hình toán học của động cơ BLDC

Để thực hiện xây dựng mô hình toán học thì phải ước lượng các thành phần cơ bản. Hình 3.7 trình bày mô hình mạch điện trong động cơ bao gồm ba cuộn dây stator được ước lượng bởi điện trở R_a và điện cảm L_a , do ba cuộn dây đặt cạnh nhau nên xảy ra hiện tượng hổ cảm giữa các cuộn dây với nhau, được thể hiện qua đại lượng M . Mặc khác do rotor của động cơ là nam châm vĩnh cửu nên khi rotor quay sẽ quét qua cuộn dây stator gây ra sự tương tác giữa hai từ trường. Vì vậy, các đại lượng e_a, e_b, e_c thể hiện sự tương tác giữa hai từ trường, biên độ của sức phản điện động là bằng nhau và bằng E .



Hình 1.7 Mô hình mạch điện của động cơ BLDC

Từ mô hình mạch điện của động cơ, ta có phương trình điện áp một pha:

$$\begin{aligned}V_a &= R_a i_a + (L_a - M) \frac{di_a}{dt} + e_a \\V_b &= R_b i_b + (L_b - M) \frac{di_b}{dt} + e_b \\V_c &= R_c i_c + (L_c - M) \frac{di_c}{dt} + e_c\end{aligned}\tag{1.1}$$

Trong đó:

- L_a, L_b, L_c là điện cảm của các cuộn dây động cơ
- R_a, R_b, R_c là điện trở của cuộn dây stator động cơ
- e_a, e_b, e_c là sức điện động phản kháng

Do các pha là đối xứng nên các giá trị điện trở, điện cảm, hễ cảm của ba cuộn dây bằng nhau.

Biên độ của sức điện động ngược (back-EMF) phụ thuộc vào tốc độ, và dạng sóng của nó phụ thuộc vào vị trí của rotor. Ngoài ra, các dạng sóng back-EMF giữa các pha có độ lệch pha 120 độ điện. Do đó, back-EMF có thể được biểu diễn dưới dạng toán học như sau:

$$\begin{aligned}e_a &= k_b(\theta_e)\omega_r \\e_b &= k_b(\theta_e - \frac{2\pi}{3})\omega_r \\e_c &= k_b(\theta_e + \frac{2\pi}{3})\omega_r\end{aligned}\tag{1.2}$$

Trong đó:

- ω_r : tốc độ cơ học của rotor, đơn vị rad/s
- θ_e : vị trí điện của rotor, đơn vị rad
- k_b : hằng số sức điện động ngược (back EMF), phụ thuộc vào vị trí rotor và có đơn vị là V/rad/s

Thời điểm chuyển mạch dòng điện từ pha này sang pha khác được xác định sao cho mô men đạt giá trị lớn. Ta có mô men được xác định bằng biểu thức:

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \times \frac{1}{\omega_r}\tag{1.3}$$

Trong đó:

- e_a, e_b, e_c : Sức điện động cảm ứng của pha A, B, C (V)

- i_a, i_b, i_c : Dòng điện các pha A, B, C (A)

- ω_r : Vận tốc góc của trục Rotor (rad/s)

❖ Phương trình chuyển động là:

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega_r + T_L \quad (1.4)$$

Trong đó:

- J ($Kg.m^2$): Momen quán tính

- T_L (Nm): Momen tải

- B (Nm.s/rad): Hệ số ma sát

- T_e (Nm): Momen điện từ

1.3 Điều khiển động cơ BLDC

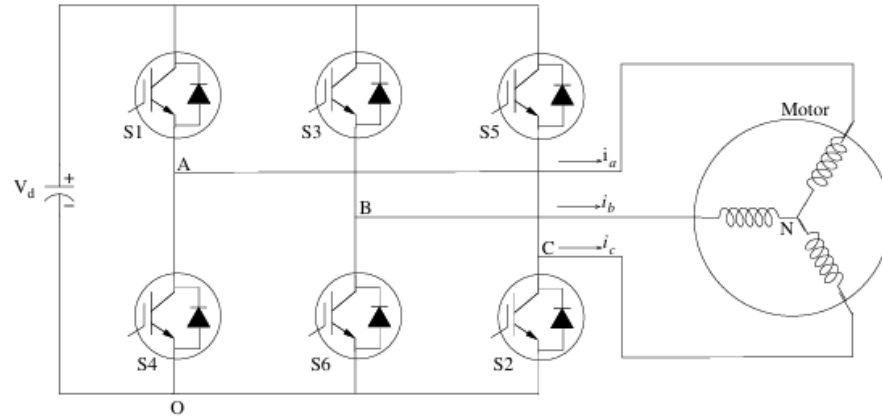
Phương pháp điều khiển truyền thống động cơ BLDC là đóng ngắt các khoá mạch lực (IGBT hoặc MOSFET) để cấp dòng điện vào cuộn dây stator dựa theo tín hiệu cảm biến đưa về.

Trong dự án này, động cơ BLDC được điều khiển theo phương pháp điều khiển định hướng từ thông (FOC – Field-Oriented Control). Đây là phương pháp điều khiển hiện đại, cho phép điều khiển chính xác mô-men xoắn và tốc độ động cơ, mang lại hiệu suất cao, độ êm ái và khả năng đáp ứng tốt hơn so với phương pháp điều khiển sáu bước truyền thống.

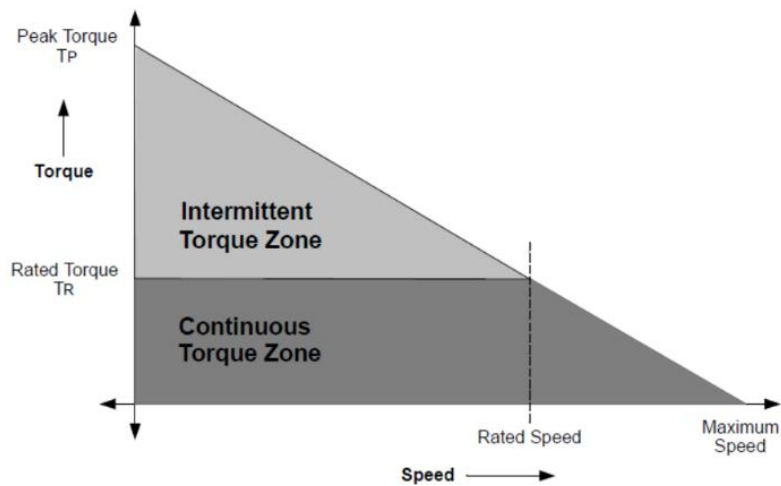
Thay vì sử dụng cảm biến Hall để xác định vị trí rotor, hệ thống sử dụng cảm biến từ tính (magnetic sensor) với độ phân giải cao để đo chính xác vị trí góc rotor theo thời gian thực. Tín hiệu vị trí này được sử dụng để thực hiện các biến đổi tọa độ (Clark và Park), từ đó tính toán dòng điện theo trục d-q và áp dụng các thuật toán điều khiển PID hoặc PI cho từng thành phần.

Dòng điện điều khiển sau đó được biến đổi ngược trở lại hệ tọa độ ba pha (biến đổi Park ngược) và được sử dụng để điều chế xung PWM ba pha thông qua thuật toán SVPWM (Space Vector PWM) hoặc sin-PWM, nhằm tạo ra dạng sóng điện áp mượt mà cung cấp cho cuộn dây stator.

Nhờ phương pháp FOC kết hợp cảm biến từ tính, động cơ BLDC trong dự án có thể hoạt động ổn định, ít rung giật, đồng thời đảm bảo điều khiển chính xác theo cả mô-men xoắn và vị trí.



Hình 1.8 Sơ đồ nguyên lý mạch động lực

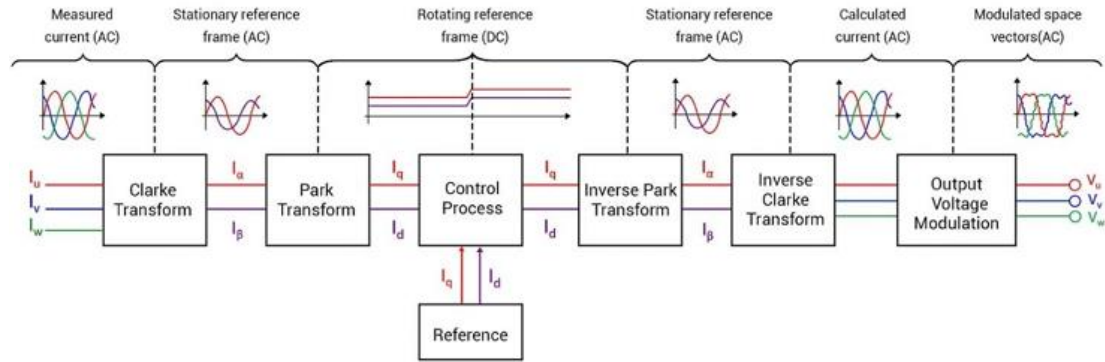


Hình 1.9 Đặc tính moment- tốc độ của động cơ BLDC

1.4 Phương pháp Field Oriend Control (FOC)

1.4.1 Cơ sở lý thuyết

Thuật toán FOC dựa trên phép biến đổi Park-Clarke. Hình 1.10 cho thấy để điều khiển động cơ BLDC ba pha, chúng ta phải cung cấp điện áp thích hợp cho động cơ bằng cách đọc dòng điện pha (i_a, i_b, i_c). Thuật toán FOC đơn giản hóa việc điều khiển các khung tham chiếu dòng điện hình sin ba pha bằng cách phân tích chúng thành các khung tham chiếu mô-men xoắn và từ thông. Hai thành phần này có thể được điều khiển riêng biệt.



Hình 1.10 Biến đổi tín hiệu của phương pháp FOC

Trong phương pháp FOC, dòng và điện áp motor được điều khiển trong hệ quy chiếu d-q của rotor. Điều này có nghĩa dòng điện phải được tính toán chuyển đổi từ hệ quy chiếu 3 pha của cuộn dây stator sang hệ trục quay d-q trước khi xử lý bằng bộ điều khiển. Tương tự điện áp cấp cho các motor được tính toán chuyển từ hệ quy chiếu d-q qua rotor sang hệ quy chiếu 3 pha của stator trước khi sử dụng cho ngõ ra PWM.

Một khi dòng điện motor được chuyển sang hệ quy chiếu d-q, điều khiển trở nên đơn giản. Hai bộ điều khiển PI được sử dụng: Một cho thành phần dòng điện trực tiếp (i_d) và một cho dòng điện vuông góc (i_q). Ở bộ điều khiển dòng điện trực tiếp (tương ứng với từ thông của động cơ), mục tiêu duy trì dòng $i_d = 0$ để tối ưu hoá hiệu quả moment trong hệ thống. Bộ điều khiển PI thứ hai hoạt động trên dòng điện vuông góc và giữ momen yêu cầu như ngõ vào.

Phương pháp điều khiển định hướng từ thông (FOC - Field Oriented Control) mang lại khả năng điều khiển động cơ BLDC một cách mượt mà ở cả dải tốc độ thấp lẫn tốc độ cao. So với các phương pháp điều khiển khác, như điều khiển hình sin hoặc hình thang, FOC thể hiện ưu thế rõ rệt: điều khiển hình sin hoạt động tốt ở tốc độ thấp nhưng hiệu suất giảm ở tốc độ cao; trong khi điều khiển hình thang phù hợp với tốc độ cao nhưng tạo ra gợn mô men ở tốc độ thấp. Nhờ khả năng kiểm soát mô men chính xác và hiệu quả năng lượng cao, phương pháp FOC là lựa chọn tối ưu cho các ứng dụng yêu cầu chất lượng điều khiển cao.

1.4.2 So sánh giữa FOC và DTC

Bảng 1.2 So sánh FOC và DTC

Tiêu chí	FOC	DTC
Nguyên lý hoạt động	Điều khiển dòng điện stator bằng cách chuyển đổi sang hệ tọa độ dq	Điều khiển trực tiếp từ thông và mô-men xoắn mà không cần biến đổi tọa độ
Điều khiển	<ul style="list-style-type: none"> - Cần mô hình động cơ để tính toán vectơ điều khiển - Điều khiển dòng điện (I_d, I_q) để đạt được từ thông và mô-men mong muốn. 	<ul style="list-style-type: none"> - Không yêu cầu mô hình chính xác của động cơ. - Dựa vào so sánh từ thông và mô-men đo được với giá trị đặt
Biến đổi tọa độ	Yêu cầu biến đổi tọa độ từ abc sang dq	Không yêu cầu
Đáp ứng động	Nhanh nhưng chậm hơn DTC trong các trường hợp thay đổi đột ngột	Cực kỳ nhanh khi thay đổi tải nhờ vòng điều khiển trực tiếp
Dao động mô-men xoắn	Dao động thấp, mô-men xoắn mượt mà hơn	Dao động lớn hơn, đặc biệt khi tải thay đổi nhanh.
Cần cảm biến từ thông	Không yêu cầu cảm biến từ thông	Có thể cần cảm biến từ thông hoặc tính toán trực tiếp từ stator
Phức tạp trong tính toán	Yêu cầu tính toán phức tạp hơn (PID, biến đổi tọa độ)	Ít phức tạp hơn về thuật toán, chỉ cần so sánh đơn giản
Khả năng mở rộng	Linh hoạt, dễ tích hợp với hệ thống điều khiển hiện đại	Khó điều chỉnh khi yêu cầu hiệu suất cao hơn
Ứng dụng phổ biến	<ul style="list-style-type: none"> - Động cơ đồng bộ (PMSM, BLDC) - Hệ thống yêu cầu hiệu suất cao, chính xác, dao động thấp. 	<ul style="list-style-type: none"> - Động cơ không đồng bộ (ACIM) - Hệ thống yêu cầu phản hồi nhanh, đơn giản, không cần độ chính xác cao.

1.4.3 Ưu và nhược điểm của từng phương pháp:

❖ Field-Oriented Control (FOC):

- Ưu điểm:
 - + Mô-men xoắn mượt mà hơn, dao động nhỏ.
 - + Hiệu quả tốt ở dải tốc độ thấp và cao.
 - + Dễ mở rộng và tích hợp với các hệ thống điều khiển hiện đại.
- Nhược điểm:
 - + Thuật toán phức tạp hơn, yêu cầu công suất tính toán cao.
 - + Cần biết chính xác thông số động cơ (từ thông rotor, hằng số thời gian, v.v.).

❖ Direct Torque Control (DTC):

- Ưu điểm:
 - + Phản hồi nhanh, đặc biệt trong điều kiện tải thay đổi đột ngột.
 - + Không yêu cầu mô hình động cơ chính xác.
 - + Thuật toán đơn giản, không cần biến đổi tọa độ.
- Nhược điểm:
 - + Dao động mô-men xoắn lớn hơn.
 - + Hiệu suất kém ở tần số thấp.
 - + Khó kiểm soát dòng điện chính xác.

➔ Chọn FOC khi:

- Cần độ chính xác cao trong điều khiển mô-men xoắn và tốc độ.
- Hệ thống yêu cầu mô-men mượt mà và độ nhiễu thấp (ví dụ: xe điện, robot công nghiệp).
- Sử dụng động cơ đồng bộ (BLDC, PMSM).

➔ Chọn DTC khi:

- Ưu tiên phản hồi nhanh và tính đơn giản (ví dụ: máy nén khí, quạt công nghiệp).
- Điều khiển động cơ không đồng bộ (ACIM) với yêu cầu về tốc độ thay đổi nhanh.
- Yêu cầu không quá cao về độ mượt của mô-men xoắn.

Tóm tắt:

- FOC: Phức tạp hơn nhưng chính xác và hiệu suất cao hơn. Thích hợp cho các ứng dụng cần độ mượt và ổn định.
- DTC: Đơn giản hơn, phản hồi nhanh, nhưng dao động mô-men lớn hơn. Thích hợp cho các ứng dụng yêu cầu phản hồi nhanh.

1.5 Thuật toán điều khiển PID (điều khiển động cơ BLDC)

Thuật toán PID (Proportional – Integral – Derivative) là một trong những phương pháp điều khiển phản hồi phổ biến và hiệu quả nhất trong lĩnh vực tự động hóa. Trong điều khiển động cơ không chổi than (BLDC), PID được sử dụng rộng rãi để điều chỉnh các đại lượng như dòng điện, tốc độ quay và vị trí rotor nhằm đạt được hiệu suất điều khiển cao, đáp ứng nhanh và ổn định.

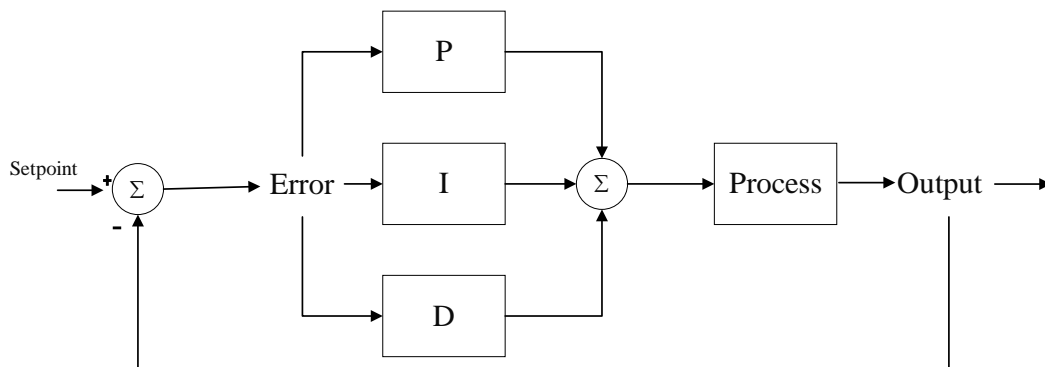
Bộ điều khiển PID hoạt động dựa trên sai số giữa giá trị đặt (setpoint) và giá trị đo được (feedback), từ đó tính toán tín hiệu điều khiển dựa trên ba thành phần:

Thành phần tỷ lệ (P): phản ứng nhanh với sai số hiện tại.

Thành phần tích phân (I): loại bỏ sai số tĩnh bằng cách tích lũy sai số theo thời gian.

Thành phần vi phân (D): cải thiện đáp ứng quá độ bằng cách dự đoán xu hướng của sai số.

Khi áp dụng vào điều khiển động cơ BLDC, thuật toán PID có thể được sử dụng trong từng vòng điều khiển: vòng dòng điện, vòng tốc độ, và vòng vị trí, đặc biệt hiệu quả khi kết hợp với phương pháp điều khiển định hướng từ thông (FOC).



Hình 1.11 Sơ đồ khối hệ thống điều khiển PID

1.5.1 Khâu tỉ lệ

Khâu tỉ lệ (đôi khi còn được gọi là độ lợi) làm thay đổi giá trị đầu ra, tỉ lệ với giá trị sai số hiện tại. Đáp ứng tỉ lệ có thể được điều chỉnh bằng cách nhân sai số đó với một hằng số K_p , được gọi là độ lợi tỉ lệ.

Khâu tỉ lệ được cho bởi:

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (1.5)$$

Trong đó

- P_{out} : Thừa số tỉ lệ đầu ra
- K_p : Độ lợi tỉ lệ, thông số điều chỉnh
- e : Sai số = SP - PV
- t : Thời gian hay thời gian tức thời (hiện tại)

1.5.2 Khâu tích phân

Phân phối của khâu tích phân (đôi khi còn gọi là reset) tỉ lệ thuận với cả biên độ sai số lẫn quãng thời gian xảy ra sai số. Tổng sai số tức thời theo thời gian (tích phân sai số) cho ta tích lũy bù đã được hiệu chỉnh trước đó. Tích lũy sai số sau đó được nhân với độ lợi tích phân và cộng với tín hiệu đầu ra của bộ điều khiển. Biên độ phân phối của khâu tích phân trên tất cả tác động điều chỉnh được xác định bởi độ lợi tích phân, K_i

Thừa số tích phân được cho bởi:

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (1.6)$$

Trong đó

- I_{out} : Thừa số tích phân đầu ra
- K_i : Độ lợi tích phân, 1 thông số điều chỉnh
- e : sai số = SP – PV
- t : Thời gian hoặc thời gian tức thời (hiện tại)
- τ : Một biến tích phân trung gian

1.5.3 Khâu vi phân

Tốc độ thay đổi của sai số quá trình được tính toán bằng cách xác định độ dốc của sai số theo thời gian (tức là đạo hàm bậc một theo thời gian) và nhân tốc độ này với độ lợi tỉ lệ K_d . Biên độ của phân phối khâu vi phân (đôi khi được gọi là tốc độ) trên tất cả các hành vi điều khiển được giới hạn bởi độ lợi vi phân, K_d .

Thừa số vi phân được cho bởi:

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (1.7)$$

Trong đó

- D_{out} : Thừa số vi phân của đầu ra
- K_d : Độ lợi của vi phân, một thông số điều chỉnh
- e : Sai số = SP – PV
- t : Thời gian hoặc thời gian tức thời

1.5.4 Bảng điều chỉnh độc lập các thông số PID

Bảng 1.3 Bảng điều chỉnh độc lập các thông số PID

Thông số	Thời gian khởi động	Quá độ	Thời gian xác lập	Sai số ổn định	Độ ổn định
K_p	Giảm	Tăng	Thay đổi nhỏ	Giảm	Giảm cấp
K_i	Giảm	Tăng	Tăng	Giảm đáng kể	Giảm cấp
K_d	Giảm ít	Giảm ít	Không tác động	Cải thiện nếu K_d nhỏ	

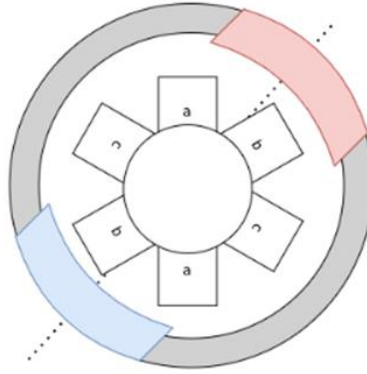
1.6 Căn chỉnh động cơ - cảm biến

Khi khởi tạo hệ thống điều khiển động cơ BLDC sử dụng phương pháp điều khiển định hướng từ thông (FOC), một bước quan trọng là xác định mối quan hệ giữa vị trí cảm biến và góc điện từ. Để thực hiện điều này, một kỹ thuật phổ biến là cấp nguồn cho một pha cụ thể, chẳng hạn như pha a, trong khi các pha còn lại để hở (không có dòng). Việc này tạo ra một vectơ từ trường cố định trong stator.

Hướng từ trường do pha a tạo ra sẽ hút rotor (với nam châm vĩnh cửu) đến một vị trí ổn định, nơi vectơ từ trường stator và vectơ từ thông rotor cân bằng. Vị trí này thường được gán làm góc điện từ 0. Từ đó, ta có thể hiệu chỉnh lại cảm biến góc để đảm bảo rằng giá trị đo được tại vị trí này tương ứng với 0 điện.

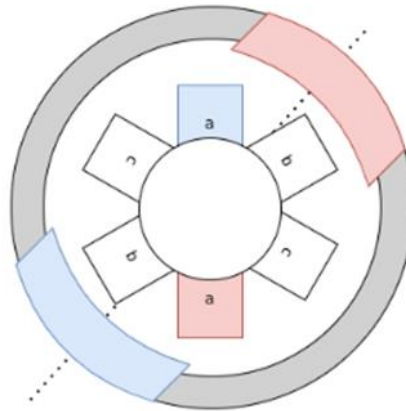
Quá trình này được thực hiện với ba bước:

1. Cấp nguồn cho pha a → vectơ từ trường tạo ra theo một hướng cố định.



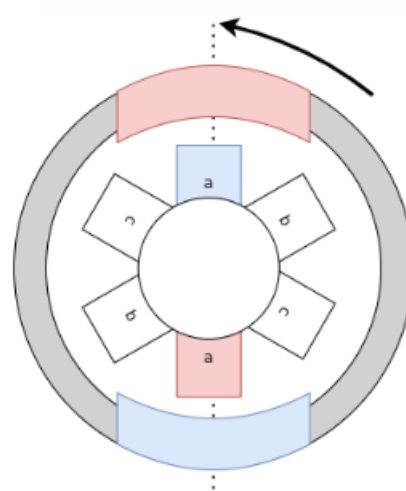
Hình 1.12 Cấp nguồn cho pha a

2. Rotor quay để tìm vị trí ổn định tương ứng với vector từ trường.



Hình 1.13 Tìm vị trí ổn định

3. Cảm biến được hiệu chỉnh để đảm bảo vị trí hiện tại là góc 0 điện



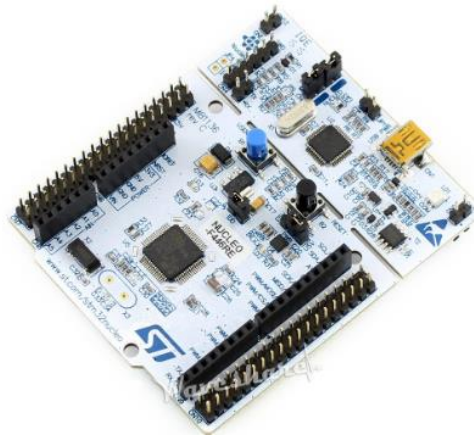
Hình 1.14 Hiệu chỉnh đảm bảo vị trí hiện tại là góc 0 điện

CHƯƠNG 2: PHÂN TÍCH HỆ THỐNG PHẦN CỨNG

2.1 Vi điều khiển Nucleo-64

2.1.1 Giới thiệu

STM32 Nucleo-64 là một dòng bo phát triển vi điều khiển từ STMicroelectronics, được thiết kế để hỗ trợ các ứng dụng nhúng và IoT. Bo mạch này thuộc dòng Nucleo, nổi bật với thiết kế nhỏ gọn, tính năng mạnh mẽ và khả năng tương thích cao với các công cụ phát triển phần mềm.



Hình 2.1 Nucleo F446RE

2.1.2 Đặc điểm chính

Vi điều khiển: Trang bị vi điều khiển STM32 dòng ARM Cortex-M (ví dụ: STM32F103, STM32F401, STM32L476, tùy phiên bản).

2.1.2.1 Khả năng kết nối

Giao diện tiêu chuẩn như UART, I2C, SPI, CAN, ADC, và DAC.

Tích hợp cổng USB (tùy thuộc vào model).

2.1.2.2 Tính năng tiện ích

ST-LINK/V2-1: Trình gỡ lỗi và lập trình tích hợp trên bo mạch.

Khe cắm Arduino Uno R3: Tương thích với các shield Arduino, giúp mở rộng chức năng dễ dàng.

Khe cắm ST morpho: Cho phép truy cập trực tiếp đến tất cả các chân GPIO.

2.1.2.3 Hỗ trợ phần mềm

Công cụ STM32CubeIDE và STM32CubeMX cho cấu hình và lập trình.

Hỗ trợ nhiều IDE như Keil, IAR, hoặc các IDE mã nguồn mở như PlatformIO.

2.1.3 Ứng dụng

STM32 Nucleo-64 phù hợp cho nhiều lĩnh vực như IoT, điều khiển động cơ, xử lý tín hiệu, robot, và các ứng dụng nhúng khác nhờ tính linh hoạt, hiệu suất cao và khả năng mở rộng.

2.2 Driver MKS SimpleFOC Shield V2.0.4

2.2.1 Giới thiệu

SimpleFOC Shield là một bo mạch mở rộng được thiết kế để điều khiển động cơ BLDC (Brushless DC) hoặc gimbal bằng phương pháp Field-Oriented Control (FOC). Bo mạch này được phát triển với mục tiêu đơn giản hóa việc điều khiển động cơ một cách hiệu quả, linh hoạt và dễ sử dụng.



Hình 2.2 MKS SimpleFOC Shield V2.0.4

2.2.2 Đặc điểm

Khả năng điều khiển động cơ:

- Điều khiển động cơ BLDC hoặc động cơ gimbal.
- Hỗ trợ điều khiển với cảm biến (encoder, hall sensor) hoặc không cảm biến.

Tương thích phần cứng:

- Hoạt động với nhiều loại vi điều khiển (STM32, Arduino, ESP32, Raspberry Pi).
- Tương thích với chuẩn chân Arduino Uno R3.

Điện áp và dòng tải:

- Điện áp đầu vào từ 12V đến 24V (có thể hơn tùy phiên bản).
- Dòng điện đầu ra tối đa ~10A (tùy thuộc vào tản nhiệt và động cơ).

Tích hợp linh kiện:

- Driver cầu H (L6234).
- Khe cắm cho cảm biến Hall, encoder.

2.2.3 Kết nối phần cứng

2.2.3.1 Với vi điều khiển:

Shield sử dụng chuẩn chân Arduino Uno R3, có thể cắm trực tiếp lên các bo vi điều khiển STM32 Nucleo-64.

Tương thích với hầu hết các chân giao tiếp như PWM, SPI, UART.

2.2.3.2 Với động cơ BLDC

Shield cung cấp ba cổng kết nối đầu ra (U, V, W) để cấp dòng điện điều khiển cho các pha của động cơ BLDC.

2.2.3.3 Với cảm biến

Hỗ trợ các cảm biến như encoder quay, cảm biến Hall hoặc cảm biến từ để đo lường vị trí và tốc độ của rotor.

Cổng giao tiếp của cảm biến thường dùng giao thức SPI hoặc I2C.

2.2.3.4 Nguồn cấp

Shield yêu cầu một nguồn cấp riêng từ 12V đến 24V để cung cấp điện áp cho động cơ và driver.

2.2.4 Kết nối chân cắm

Các chân quan trọng trên SimpleFOC Shield bao gồm:

- PWM1, PWM2, PWM3: Tín hiệu PWM để điều khiển các pha U, V, W của động cơ.
- SEN1, SEN2, SEN3: Chân cảm biến dòng để đo dòng điện qua các pha.
- SPI/I2C/UART: Giao tiếp với vi điều khiển hoặc cảm biến vị trí.
- GND và VIN: Nguồn cấp cho driver và động cơ.

2.2.5 Ứng dụng

Robot di động: Điều khiển bánh xe hoặc cánh tay robot.

Gimbal ổn định: Ứng dụng trong ổn định hình ảnh của máy ảnh hoặc camera.

Tự động hóa: Hệ thống truyền động trong băng tải, máy in 3D, hoặc cánh tay công nghiệp.

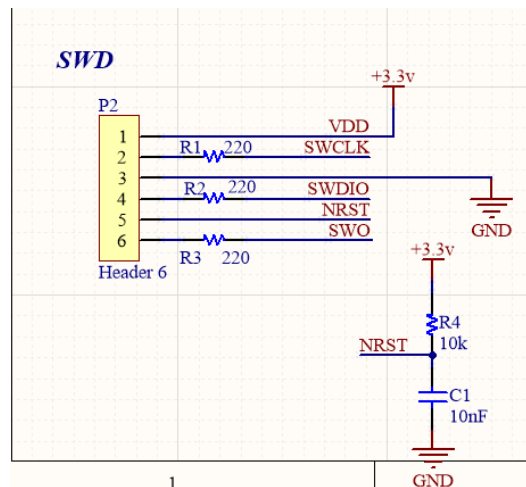
2.3 Thiết kế mạch điều khiển FOC tích hợp

2.3.1 Mục tiêu thiết kế

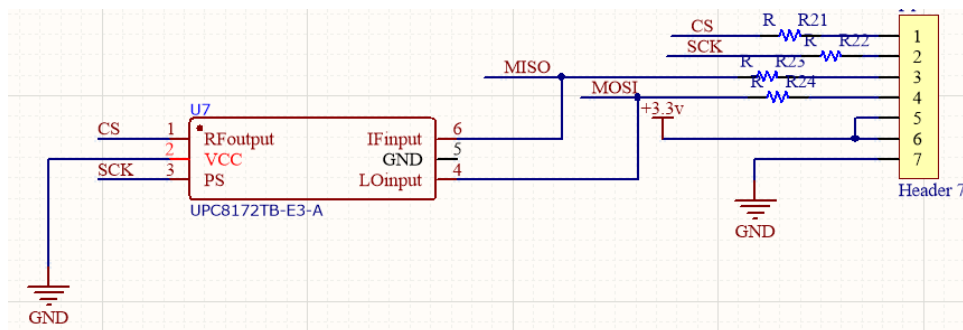
Board mạch được thiết kế nhằm thay thế giải pháp kết hợp giữa Nucleo-F446RE và MKS SimpleFOC Shield V2.0.4. Việc tích hợp tất cả chức năng vào một board riêng giúp:

- Tích hợp vi điều khiển STM32 và mạch công suất điều khiển động cơ BLDC trên cùng một board.
- Tối ưu kích thước, giảm nhiễu, nâng cao độ tin cậy.
- Hỗ trợ điều khiển theo phương pháp FOC với cảm biến vị trí từ tính.
- Cung cấp đầy đủ cổng giao tiếp UART, SPI, SWD, đầu nối động cơ và nguồn.

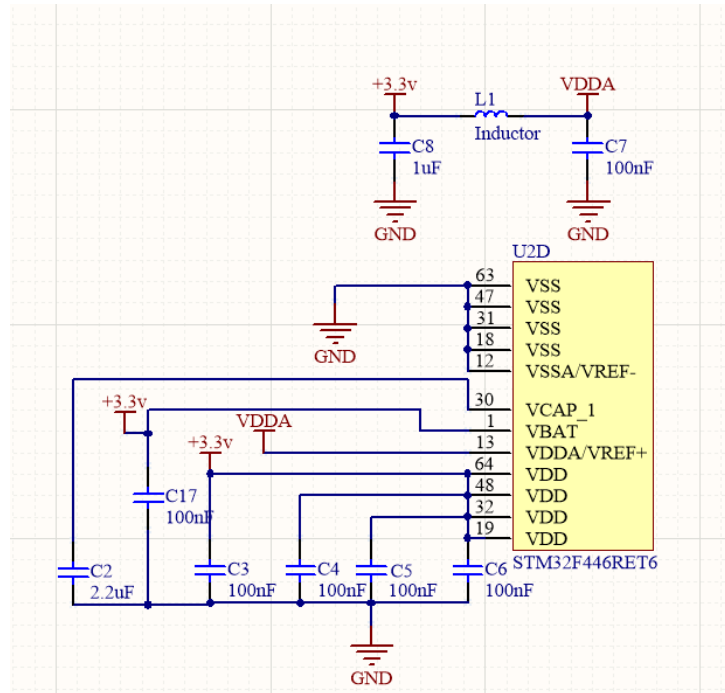
2.3.2 Sơ đồ nguyên lý (Schematic)



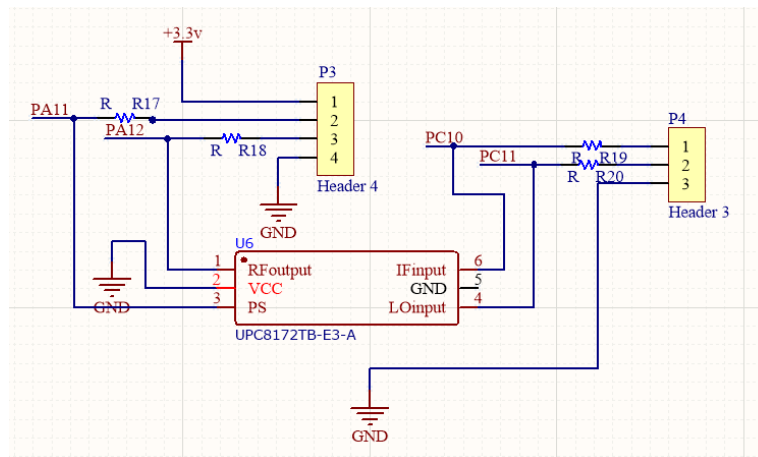
Hình 2.3 Sơ đồ mạch nạp



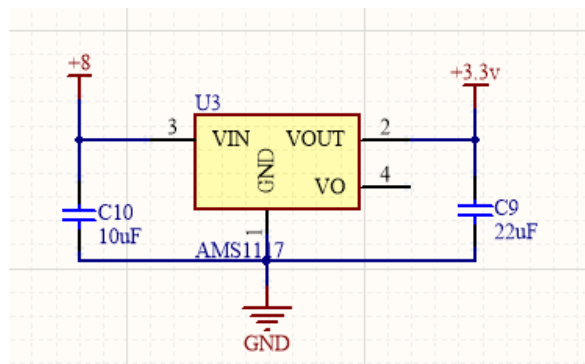
Hình 2.4 Sơ đồ kết nối cảm biến AS5147U



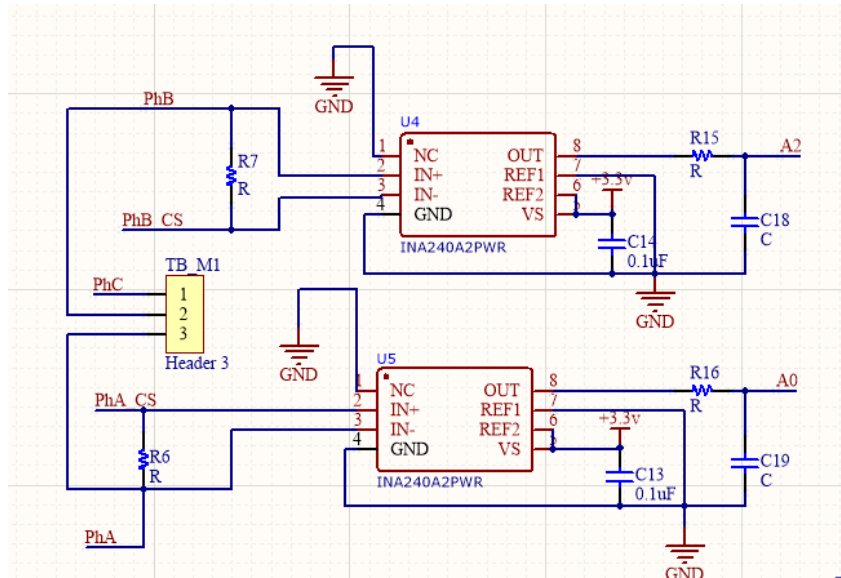
Hình 2.5 Sơ đồ mạch nguồn vi điều khiển



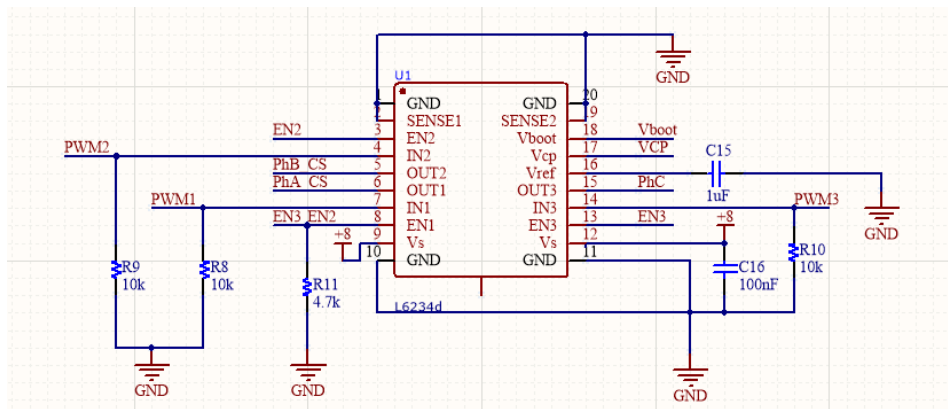
Hình 2.6 Sơ đồ giao tiếp CAN và UART



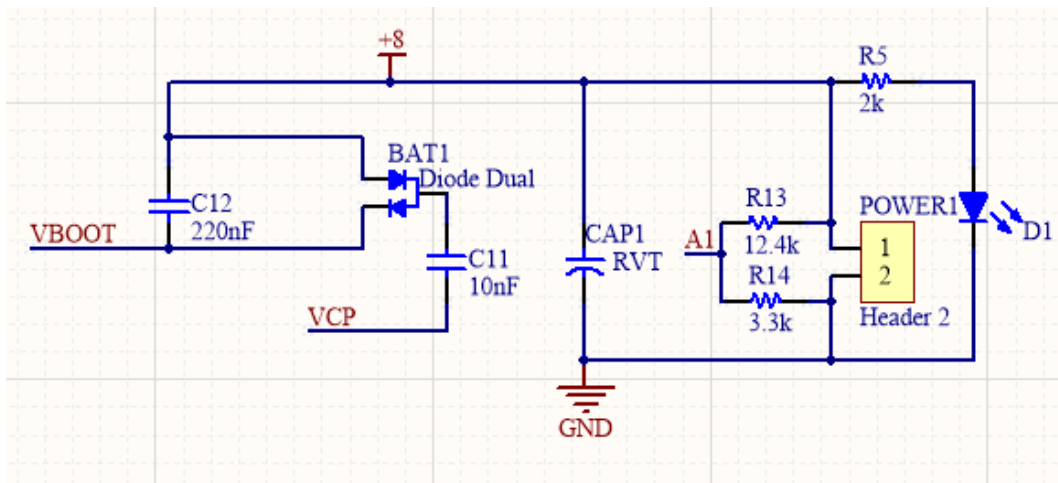
Hình 2.7 Sơ đồ mạch ổn áp 3.3V



Hình 2.8 Sơ đồ nguyên lý mạch đo dòng pha sử dụng INA240A2



Hình 2.9 Sơ đồ nguyên lý mạch điều khiển công suất 3 pha



Hình 2.10 Sơ đồ cầu chia áp và ổn áp đầu vào

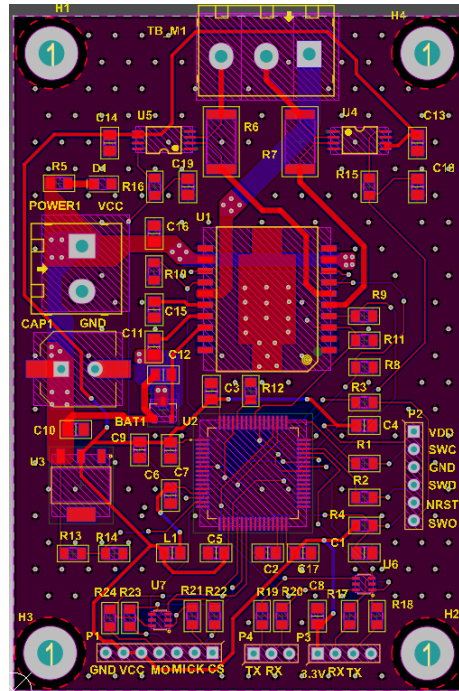
2.3.3 PCB Layout 2D và 3D

Chú thích một số thành phần chính:

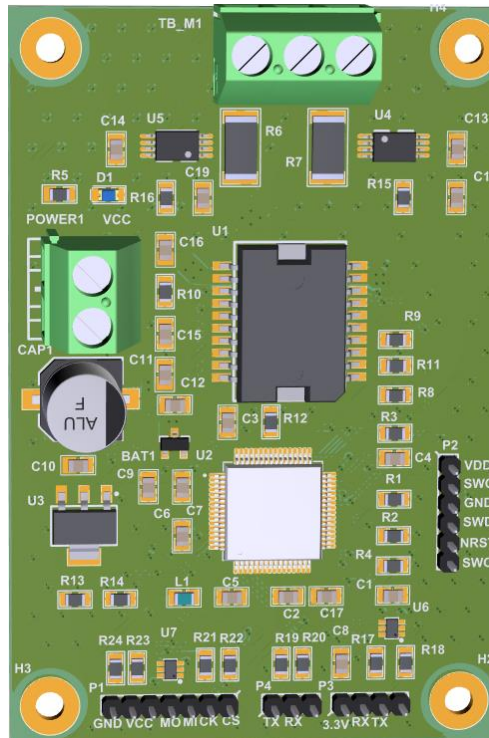
- U2: Vi điều khiển STM32 (ví dụ STM32F446 hoặc tương đương).
- U1: Driver công suất 3 pha (có thể là L6234, DRV8313 hoặc tương đương).
- TB_M1: Cổng nối động cơ 3 pha (Pha A, B, C).
- P2: Header lập trình/debug (SWD).
- P3, P4: Cổng UART giao tiếp hoặc debug.
- P1: Header kết nối encoder SPI.
- BAT1, POWER1: Các nguồn cấp cho mạch và MCU.
- C, R, L: Hệ tụ, điện trở, cuộn cảm lọc nhiễu và bảo vệ.

Đặc điểm thiết kế:

- Kích thước: khoảng XX mm x YY mm (bạn tự điền kích thước nếu có).
- Số lớp PCB: 2 lớp.
- Dòng điện tối đa: khoảng Z A (tùy theo MOSFET và layout).
- Tín hiệu cách ly, lọc nhiễu kỹ càng, đường tín hiệu SPI/UART ngắn và tách biệt khỏi đường công suất.
- Các điểm test pad và jumper giúp dễ dàng debug trong quá trình phát triển.

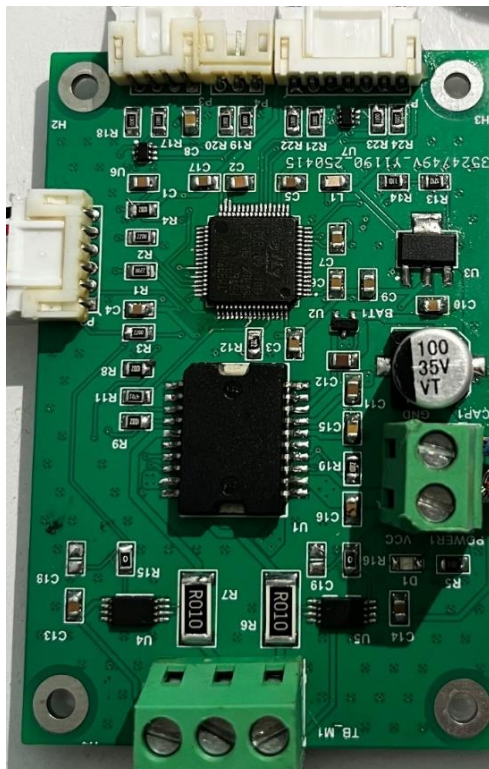


Hình 2.11 Sơ đồ bố trí linh kiện và đường đi tín hiệu trên board PCB 2 lớp



Hình 2.12 Mô phỏng 3D PCB

2.3.4 Hình ảnh thực tế



Hình 2.13 Hình ảnh thực tế mạch điều khiển FOC tích hợp

2.4 Cảm biến vị trí AS5147U

2.4.1 Giới thiệu

AS5047U là một cảm biến từ Hall sử dụng công nghệ CMOS. Các cảm biến Hall này chuyển đổi thành phần từ trường vuông góc với bề mặt chip thành tín hiệu điện áp.

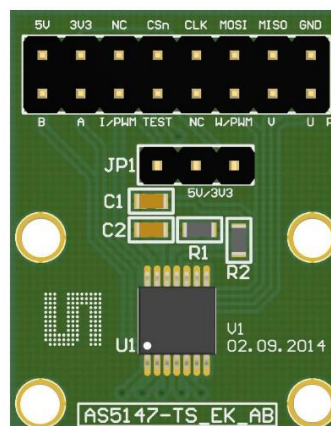
Tín hiệu từ các cảm biến Hall được khuếch đại và lọc bởi khối xử lý tín hiệu tương tự phía trước (AFE – Analog Front-End), trước khi được chuyển đổi bởi bộ chuyển đổi tương tự-số (ADC).

Dữ liệu đầu ra của ADC được xử lý bởi khối CORDIC (Coordinate Rotation Digital Computer) phần cứng để tính toán góc và biên độ vector từ. Biên độ từ trường này được sử dụng bởi khối điều khiển tự động hệ số khuếch đại (AGC) để điều chỉnh mức độ khuếch đại, nhằm bù lại các biến đổi do nhiệt độ và biến thiên từ trường.

AS5047U liên tục tạo ra thông tin góc, thông tin này có thể được truy xuất thông qua các giao diện khác nhau của thiết bị. Độ phân giải nội bộ 14-bit có thể đọc được thông qua thanh ghi qua giao tiếp SPI. Ngoài ra, độ phân giải tại đầu ra ABI có thể được lập trình từ 10 đến 14 bit.

Khối Bù sai số góc động (Dynamic Angle Error Compensation) sẽ hiệu chỉnh góc được tính toán để bù lại độ trễ bằng thuật toán dự đoán tuyến tính. Ở tốc độ quay không đổi, thời gian trễ sẽ được AS5047U bù trừ nội bộ, giúp giảm sai số góc động trên các đầu ra SPI, ABI và UVW.

Một bộ lọc thích ứng (adaptive filter) được tích hợp sau khối bù trễ để giảm nhiễu chuyển tiếp tại tốc độ quay thấp. Thông tin ổn định sau lọc sẽ có sẵn tại các đầu ra SPI, ABI và UVW.



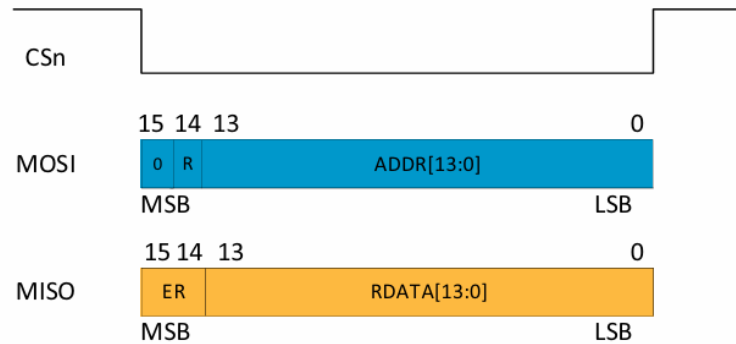
Hình 2.14 Magnetic Encoder Development Board

AS5047U cho phép lựa chọn giữa đầu ra UVW hoặc giao diện mã hóa xung PWM tại chân W.

Các thiết lập không thay đổi sau khi cấp nguồn (non-volatile settings) có thể được lập trình qua giao tiếp SPI, không cần bộ lập trình chuyên dụng.

AS5047U hỗ trợ các ứng dụng tốc độ cao lên tới 28.000 vòng/phút (28krpm).

2.4.2 Khung truyền nhận spi 16 bit



Hình 2.15 Khung truyền nhận 16 bit

2.4.2.1 Khung lệnh 16-bit (16-Bit Command Frame)

Address	Name	Default	Description
0x0000	NOP	0x0000	No operation
0x0001	ERRFL	0x0000	Error register
0x0003	PROG	0x0000	Programming register
0x3FF5	DIA	0xX3C2 or 0xXBC2 for 3.3V mode 0xX3C3 or 0xXBC3 for 5V mode	DIAGNOSTIC
0x3FF9	AGC	0x0000	AGC Value
0x3FFA	Sin-data	0x0000	Raw digital sine channel data
0x3FFB	Cos-data	0x0000	Raw digital cosine channel data
0x3FFC	VEL	0x0000	Velocity
0x3FFD	MAG	0x0000	CORDIC magnitude
0x3FFE	ANGLEUNC	0x0000	Measured angle without dynamic angle error compensation
0x3FFF	ANGLECOM	0x0000	Measured angle with dynamic angle error compensation
0x00D1	ECC_Checksum	0x0000	ECC checksum calculated based on actual register setting

Hình 2.16 Mô tả thanh ghi bộ nhớ khả biến (volatile):

Một khung dữ liệu gồm 16 bit được gửi đến AS5047U qua giao tiếp SPI để thực hiện các thao tác như đọc hoặc ghi thanh ghi. Cấu trúc của khung lệnh này thường bao gồm:

- 1 bit R/W: Xác định thao tác là đọc (1) hay ghi (0).
- 14 bit địa chỉ thanh ghi: Xác định thanh ghi muốn truy cập.
- 1 bit kiểm tra lỗi (Parity): Dùng để kiểm tra tính toàn vẹn dữ liệu.

2.4.2.2 Khung dữ liệu 16-bit (16-Bit Data Frame)

Khung dữ liệu gồm 16 bit được AS5047U gửi trả lại qua giao tiếp SPI sau khi nhận được một khung lệnh hợp lệ. Cấu trúc của khung dữ liệu này thường bao gồm:

- 14 bit dữ liệu: Chứa thông tin cần truyền, ví dụ như giá trị gốc.
- 1 bit lỗi (Error flag): Cho biết nếu có lỗi xảy ra trong quá trình truyền hoặc xử lý.
- 1 bit kiểm tra chẵn lẻ (Parity bit): Được sử dụng để phát hiện lỗi trong dữ liệu.

2.4.3 Nguyên lý đo góc

AS5147U sử dụng hiệu ứng Hall từ tính theo trục dọc (Vertical Hall Effect) để đo từ trường phát ra từ một nam châm vĩnh cửu hình trụ được gắn thẳng hàng với trục quay. Cảm biến chứa mảng các phần tử Hall đặt theo 2 trục X-Y, cho phép cảm nhận thành phần từ trường dọc phát sinh từ nam châm quay.

Góc quay (θ): Tính bằng công thức

$$\theta = \frac{n}{PPR} \times 360^\circ \quad (2.1)$$

Trong đó:

- n: Số lượng xung
- PPR (Pulses Per Revolution) là số lượng xung phát ra cho mỗi vòng quay của trục.

2.4.4 Nguyên lý đo tốc độ

Cảm biến AS5147U không trực tiếp đo tốc độ góc (angular velocity) mà chỉ cung cấp giá trị góc tuyệt đối tại mỗi thời điểm. Để tính tốc độ quay, hệ thống phải tính toán vi sai góc giữa hai lần đọc gần nhau và chia cho khoảng thời gian đo:

Tốc độ góc (ω): Được tính bằng công thức:

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \times 360^\circ \quad (2.2)$$

hoặc tính theo radian nếu cần thiết:

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \times 2\pi \quad (2.3)$$

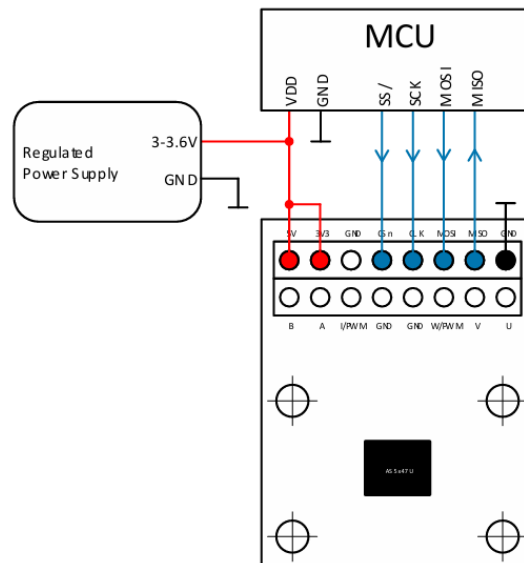
- $\Delta\theta$: hiệu số góc giữa hai lần đo liên tiếp
- Δt : Thời gian đo

Số lượng xung nhận được là tổng số xung trong một khoảng thời gian đo.

Thời gian đo có thể là một giây hoặc một khoảng thời gian ngắn hơn tùy vào yêu cầu đo tốc độ.

Tốc độ góc tính được từ encoder sẽ cho phép xác định được tốc độ quay của động cơ hoặc hệ thống cơ khí mà encoder đang giám sát.

2.4.5 Sơ đồ kết nối



Hình 2.17 Sơ đồ kết nối AS5147U

2.5 Động cơ gimbal BLDC (loại sử dụng trong đề tài)

Động cơ sử dụng trong đề tài là loại động cơ không chổi than ba pha (BLDC) chuyên dụng cho hệ thống ổn định gimbal, có tên gọi THREE PHASE BRUSHLESS GIMBAL STA BLDC Motor, với các đặc điểm nổi bật phù hợp cho điều khiển chính xác theo phương pháp FOC.



Hình 2.18 Động cơ gimbal không chổi than 3 pha

Bảng 2.1 Thông số kỹ thuật động cơ BLDC

Thông số	Giá trị
Điện áp định mức	7.4 V
Tốc độ không tải	2500 rpm
Dòng không tải	120 mA
Tốc độ định mức	1934 rpm
Mô-men xoắn định mức	7.47 mN·m
Dòng định mức	0.410 A
Công suất định mức	1.51 W
Mô-men xoắn khi đứng yên	33.0 mN·m
Dòng khi đứng yên	1.4 A
Công suất đầu ra tối đa (lý thuyết)	2.2 W
Hiệu suất tối đa	49.9 %

Bảng 2.2 Thông số đặc tính cơ điện động cơ BLDC

Thông số	Giá trị
Điện trở pha-pha	5.29 Ω
Cảm kháng pha-pha	1.69 mH
Hằng số mô-men xoắn	25.78 mN·m/A
Hằng số vận tốc	370 rpm/V
Độ dốc tốc độ/mô-men	75.9 rpm/mN·m
Hằng số thời gian cơ học	26.24 ms
Quán tính rotor	33.0 g·cm ²

2.5.1 Nguyên lý hoạt động

Động cơ BLDC gimbal là loại động cơ điện điều khiển theo tín hiệu xoay chiều ba pha, không sử dụng chổi than mà dùng cảm biến từ tính (trong đề tài sử dụng AS5147U) để xác định vị trí rotor. Trong quá trình vận hành:

- Rotor gắn nam châm vĩnh cửu quay quanh trục.
- Stator chứa các cuộn dây ba pha được điều khiển bằng sóng điện áp sin (hoặc trapezoid).
- Việc thay đổi pha dòng điện được điều chỉnh theo vị trí rotor (dò từ encoder) nhằm tạo lực điện từ quay liên tục.

2.5.2 Ưu điểm của động cơ gimbal BLDC

Độ mượt và chính xác cao: nhờ vào mô-men quay nhỏ, độ rung thấp – phù hợp với các ứng dụng như gimbal camera, tay máy robot, v.v.

Hiệu suất cao: do không có ma sát chổi than.

Thích hợp với điều khiển FOC: khả năng phản ứng nhanh với thuật toán điều khiển véc-tơ.

Kích thước nhỏ gọn, dễ tích hợp trong các hệ thống nhúng và cơ điện tử.

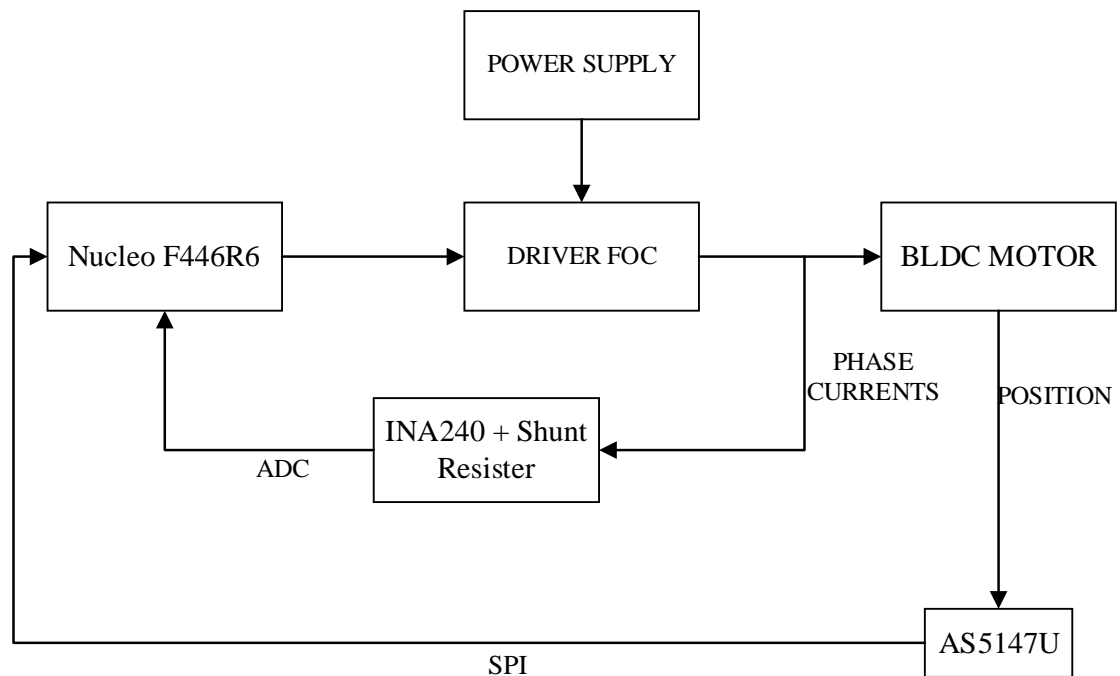
2.6 Sơ đồ khối hệ thống phần cứng

Sơ đồ khối hệ thống phần cứng được xây dựng nhằm hiển thị rõ các thành phần chính và cách chúng liên kết với nhau trong hệ thống điều khiển động cơ BLDC.

Sơ đồ khối hệ thống bao gồm các thành phần:

- Nucleo F446RE: Đóng vai trò là vi điều khiển trung tâm, điều khiển toàn bộ quá trình FOC (Field Oriented Control), giao tiếp cảm biến và xử lý tín hiệu điều khiển.
- MKS SimpleFOC Shield V2.0.4: Là driver công suất điều khiển 3 pha, tích hợp mạch cầu H L6234. Nhận tín hiệu PWM từ TIM1 (kênh 1, 2, 3) để điều khiển dòng vào các pha của động cơ.
- Động cơ BLDC 3 pha: Được điều khiển thông qua tín hiệu 3 pha PWM từ driver, phản hồi vị trí được đo bởi cảm biến AS5147U.
- Cảm biến từ tính AS5147U (SPI): Cảm biến đo vị trí rotor, giao tiếp với STM32 qua giao thức SPI. Cung cấp giá trị góc quay chính xác dùng cho biến đổi Clarke-Park trong FOC.

- Mạch đo dòng (INA240 + điện trở shunt): Kết nối vào ba pha động cơ. Tín hiệu dòng điện được khuếch đại và đưa vào các kênh ADC injected của STM32 để tính toán dòng I_d , I_q .
- UART Serial (Monitoring & Tuning): Dùng để giao tiếp với máy tính hoặc GUI giám sát điều khiển. Cho phép hiển thị tốc độ, dòng, vị trí và tinh chỉnh thông số PID.
- Nguồn cấp 7.4V–12VDC: Cấp nguồn cho driver và động cơ thông qua chân VIN của SimpleFOC Shield.



Hình 2.19 Sơ đồ kết nối phần cứng

CHƯƠNG 3: PHÂN TÍCH HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN

3.1 Giới thiệu tổng thể vòng điều khiển

Hệ thống điều khiển động cơ BLDC trong đề tài này được thiết kế theo phương pháp Field-Oriented Control (FOC), bao gồm các vòng điều khiển lồng nhau: vòng vị trí, vòng tốc độ và vòng dòng điện. Mục tiêu của cấu trúc này là đạt được khả năng điều khiển mượt, chính xác, và ổn định mô-men quay của động cơ, đáp ứng tốt với các ứng dụng cần độ chính xác cao như camera gimbal, robot định vị, hoặc thiết bị quang học chính xác.

Hệ thống điều khiển được phân thành 3 tầng phản hồi:

1. Vòng vị trí (Outer loop):

- Mục tiêu: Đưa trục rotor đến đúng vị trí đặt trước.
- Đầu vào: Góc vị trí đặt (θ_{ref})
- Đầu ra: Tốc độ tham chiếu (ω_{ref})
- Bộ điều khiển: PID vị trí

2. Vòng tốc độ (Middle loop):

- Mục tiêu: Đảm bảo trục quay đúng tốc độ mong muốn.
- Đầu vào: Tốc độ tham chiếu (ω_{ref})
- Đầu ra: Dòng mô-men I_q tham chiếu
- Bộ điều khiển: PID tốc độ

3. Vòng dòng điện (Inner loop):

- Mục tiêu: Điều khiển mô-men động cơ thông qua dòng I_q và khử từ dư bằng dòng I_d
- Đầu vào: Dòng tham chiếu I_q, I_d .
- Đầu ra: Điện áp $U_q, U_d \rightarrow$ chuyển thành tín hiệu PWM
- Bộ điều khiển: PID dòng điện

3.2 Điều khiển dòng điện (I_d, I_q)

Điều khiển dòng điện là bước nền tảng trong FOC, với mục tiêu điều khiển chính xác mô-men động cơ. Dòng điện stator được tách thành hai thành phần:

- I-d (d-axis): điều khiển từ thông (thường đặt bằng 0 với BLDC không cần kích thích từ trường phụ).
- Iq (q-axis): điều khiển mô-men.

Quy trình điều khiển dòng gồm các bước:

1. Đo dòng pha:
 - Hai trong ba dòng pha (Ia và Ib) được đo trực tiếp qua điện trở shunt.
 - Pha còn lại được suy ra: $I_c = -(I_a + I_b)$
2. Biến đổi Clarke: Chuyển dòng từ hệ 3 pha sang hệ tọa độ α - β (tĩnh).
3. Biến đổi Park: Dùng góc rotor θ để chuyển từ hệ α - β sang d-q (gắn theo rotor).
4. Bộ điều khiển PID dòng: Tính sai số giữa dòng đặt và dòng đo. Từ đó tính U_d , U_q làm đầu ra điều khiển.

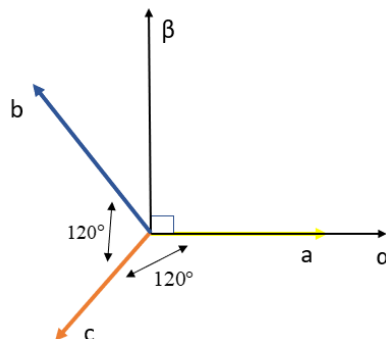
$$\begin{aligned}e_d &= I_{d,ref} - I_d \\e_q &= I_{q,ref} - I_q\end{aligned}\tag{3.1}$$

5. Biến đổi Park ngược + điều chế PWM:
 - Chuyển U_d , U_q trở lại U_α , U_β , rồi U_{abc} (ba pha).
 - Áp dụng kỹ thuật điều chế PWM để tạo xung điều khiển cho ba pha động cơ.
6. Điều chế sin PWM (Sine PWM)

3.3 Biến đổi Clark và Park

3.3.1 Phép biến đổi Clark

Dòng điện ba pha của động cơ BLDC được chuyển đổi thông qua phép biến đổi Clarke thành hai dòng điện trực giao (i_α , i_β). Phép biến đổi Clarke có thể được biểu diễn qua phương trình ().



Hình 3.1 Phép biến đổi Clarke

Phương trình chuyển đổi Clarke:

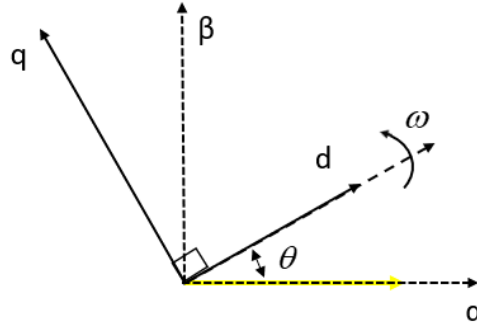
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Trong đó, i_α và i_β là các dòng điện trong hệ tọa độ tĩnh trục giao, còn i_a , i_b , i_c là các dòng điện của hệ ba pha. Các dòng điện vừa được chuyển đổi này được biểu diễn như dòng điện tạo mô-men xoắn và dòng điện sinh từ thông tương ứng. Mặc dù dòng điện pha đã được chuyển đổi thành các thành phần của từ thông và mô-men xoắn, nhưng các thành phần này vẫn có dạng hình sin, khiến việc điều khiển trở nên khó khăn do chúng thay đổi liên tục.

3.3.2 Phép biến đổi park

Với phép biến đổi Park, hai dòng điện xoay chiều (i_α , i_β) sẽ được chuyển thành dòng điện một chiều (i_q , i_d).

Phép biến đổi Park thay đổi hệ quy chiếu tĩnh từ góc nhìn của stato sang hệ quy chiếu quay từ góc nhìn của rotor, thông qua phương trình (3.6).



Hình 3.2 Phép biến đổi Park

Phương trình chuyển đổi Park:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

3.4 Điều khiển tốc độ (vòng ngoài)

Nhận đầu vào là tốc độ đặt ω_{ref} .

Tốc độ thực tế ω được tính từ chênh lệch góc qua cảm biến AS5147U:

$$\omega = \frac{\theta_{now} - \theta_{prev}}{\Delta t} \quad (3.4)$$

Sử dụng PID để tính dòng I_{q_ref} :

$$I_{q,ref} = PID(\omega_{ref} - \omega) \quad (3.5)$$

I_{q_ref} được đưa vào vòng điều khiển dòng điện.

Lưu ý: I_{d_ref} vẫn có thể đặt bằng 0 để tối ưu mô-men.

3.5 Điều khiển vị trí (vòng ngoài cùng)

Đầu vào là góc vị trí đặt θ_{ref} .

Cảm biến AS5147U cung cấp θ thực tế.

Sai số vị trí:

$$e_{\theta} = \theta_{ref} - \theta \quad (3.6)$$

Sử dụng PID để tính tốc độ tham chiếu:

$$\omega_{ref} = PID(e_{\theta}) \quad (3.7)$$

Tốc độ ω_{ref} sau đó đưa vào vòng điều khiển tốc độ.

3.6 Điều chế sin PWM (Sine PWM)

Điều chế sin PWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation – Sine PWM) là một kỹ thuật điều chế tín hiệu được sử dụng để tạo ra các tín hiệu điện áp ba pha có dạng sóng hình sin từ tín hiệu điện áp một chiều (DC). Kỹ thuật này giúp động cơ hoạt động êm ái, giảm nhiễu điện từ và tổn thất năng lượng, đặc biệt phù hợp với các động cơ BLDC sử dụng trong hệ thống gimbal cần độ chính xác và mượt mà cao.

Trong Sine PWM, các tín hiệu PWM điều khiển từng pha được tạo ra bằng cách so sánh sóng hình sin (dạng điện áp tham chiếu theo I_d , I_q) với sóng tam giác (sóng mang). Kết quả là độ rộng xung của tín hiệu PWM thay đổi theo biên độ của sóng sin, từ đó tạo ra điện áp tương ứng trên từng pha.

Sau khi có điện áp U_d , U_q :

1. Park ngược:

$$\begin{aligned} U_{\alpha} &= U_d \cos(\theta) - U_q \sin(\theta) \\ U_{\beta} &= U_d \sin(\theta) + U_q \cos(\theta) \end{aligned} \quad (3.8)$$

2. Chuyển về ba pha:

$$\begin{aligned}U_a &= U_\alpha \\U_b &= -0.5U_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta \\U_c &= -0.5U_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta\end{aligned}\tag{3.9}$$

3. Chuẩn hóa điện áp pha: Các giá trị điện áp U_a , U_b , U_c được chuẩn hóa về dải 0-1 (hoặc -1 đến 1) tùy theo mức điện áp DC của hệ thống.
4. Tạo sóng sin PWM: Giá trị điện áp pha sau chuẩn hóa được ánh xạ sang độ rộng xung PWM sử dụng chức năng PWM mode 2 của timer (TIM1) ở chế độ Center-Aligned Mode 1.
5. Tạo xung PWM ba pha: Các xung PWM tương ứng với từng pha (U, V, W) sẽ được xuất ra các chân điều khiển cổng MOSFET của mạch cầu ba pha, từ đó tạo ra dòng điện ba pha tương ứng cho động cơ.

CHƯƠNG 4: TRIỂN KHAI PHẦN MỀM TRÊN STM32

Trong dự án điều khiển động cơ BLDC theo phương pháp Field-Oriented Control (FOC), các ngoại vi tích hợp trên vi điều khiển STM32 được cấu hình để đảm nhiệm các chức năng như điều chế PWM 3 pha, đo dòng điện pha, giao tiếp với encoder từ tính AS5147U qua giao thức SPI, và phục vụ xử lý tín hiệu trong thời gian thực. Các thiết lập ngoại vi được trình bày chi tiết như sau:

4.1 Cấu hình Timer 1 (TIM1) – Phát xung PWM 3 pha

4.1.1 Chức năng

TIM1 là bộ định thời tiên tiến (Advanced Timer) được sử dụng để phát xung PWM 3 pha ở chế độ center-aligned mode 1. Các kênh CH1, CH2 và CH3 của TIM1 lần lượt tạo ra xung PWM điều khiển ba pha của động cơ thông qua driver L6234.

TIM1 Mode and Configuration

Mode	
Slave Mode	Disable
Trigger Source	Disable
Clock Source	Internal Clock
Channel1	PWM Generation CH1
Channel2	PWM Generation CH2
Channel3	PWM Generation CH3
Channel4	Disable
Combined Channels	Disable

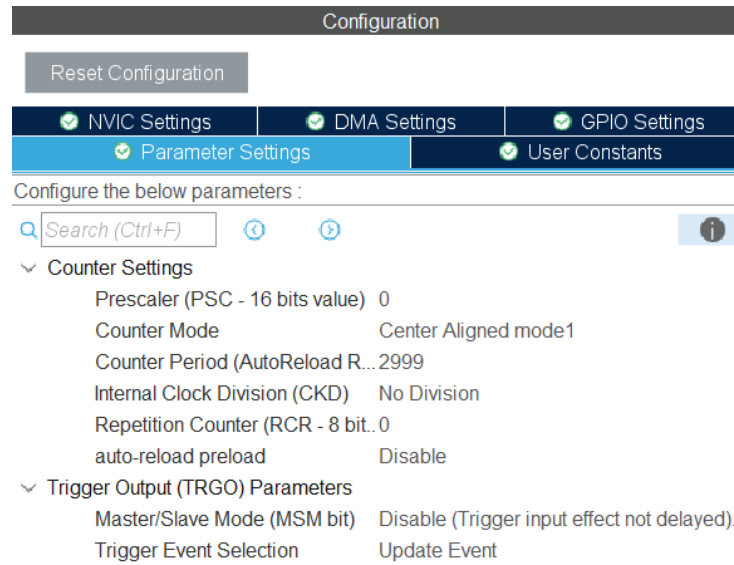
Hình 4.1 Timer1 Channel 1,2,3

Center-aligned mode giúp xung PWM cân đối và đồng đều về hai phía thời gian, giảm nhiễu xung dòng và tối ưu cho việc lấy mẫu dòng đúng tại điểm trung tâm của xung PWM (nơi điện áp tuyến tính nhất, ít gợn).

Ưu điểm của center-aligned mode trong điều khiển BLDC/FOC:

- Tạo ra sóng PWM dạng tam giác cân.
- Điểm kích ADC (trigger) tại đỉnh giữa xung PWM cho phép đo dòng chính xác hơn.

- Giảm EMI (nhiều điện từ) so với Edge-aligned mode.



Hình 4.2 PWM Center aligned mode 1 và trigger cho ADC injected

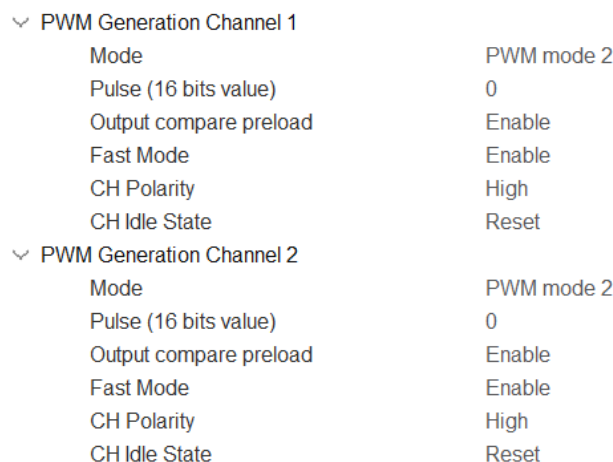
4.1.2 Cấu hình các kênh TIM1 (CH1, CH2, CH3)

Chế độ PWM: PWM Mode 2 (OCxM = 0b111)

Trong PWM mode 2, đầu ra ở mức HIGH khi $CNT > CCRx$, và ở mức LOW khi $CNT < CCRx$. Phù hợp với driver như L6234 vì cho phép tạo ra xung nghịch với độ rộng điều chế được kiểm soát.

PWM mode 2 – center-aligned mode (symmetric PWM): giúp tín hiệu PWM đối xứng, giảm nhiễu, hỗ trợ chính xác thời điểm đo dòng ở giữa chu kỳ PWM.

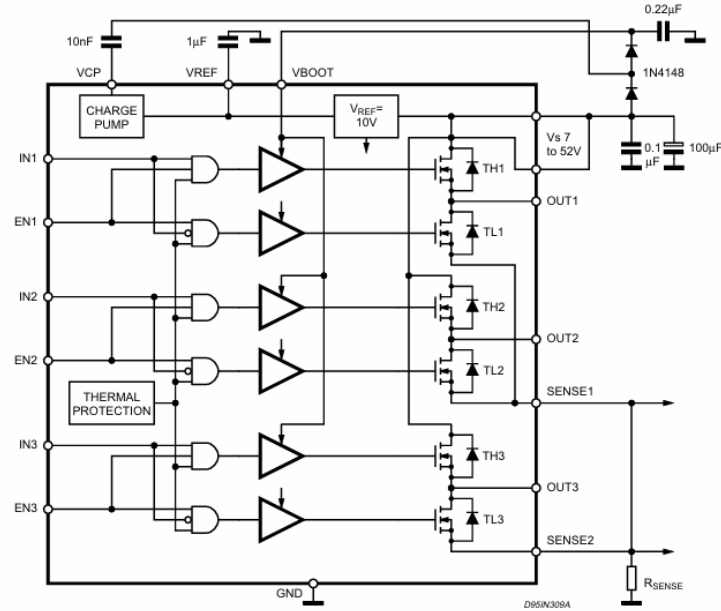
Kích hoạt preload cho CCRx: Đảm bảo việc cập nhật giá trị CCRx không gây nhiễu tức thời, chỉ cập nhật tại điểm Update Event.



Hình 4.3 Cấu hình PWM Mode 2

4.1.3 Giao tiếp điều khiển công suất thông qua L6234

Trong hệ thống, mạch công suất sử dụng driver L6234 để điều khiển dòng điện đi qua ba pha của động cơ BLDC. Hình dưới đây thể hiện sơ đồ khối nội bộ của IC L6234:



Hình 4.4 Sơ đồ khối nội bộ IC L6234

L6234 là một mạch tích hợp 3 cầu H bán phần (3 half-bridge), dùng để điều khiển các cuộn dây ba pha của động cơ BLDC. Mỗi pha điều khiển bao gồm hai MOSFET: một transistor high-side (THx) và một transistor low-side (TLx), với các tín hiệu điều khiển đầu vào là INx và ENx. Với tín hiệu đầu ra đưa tới các chân IN1, IN2, IN3 của L6234. Tín hiệu enable (ENx) của từng pha được nối mức cao để cho phép hoạt động liên tục.

Ba kênh của TIM1 được sử dụng như sau:

- TIM1 Channel 1 (CH1) → điều khiển pha U (OUT1)
- TIM1 Channel 2 (CH2) → điều khiển pha V (OUT2)
- TIM1 Channel 3 (CH3) → điều khiển pha W (OUT3)

4.1.4 Kích hoạt Update Event

Để đo dòng điện tại thời điểm giữa xung PWM, TIM1 sẽ phát Trigger Output (TRGO) tại thời điểm Update để kích hoạt ADC1 ở chế độ Injected. Đây là thời điểm trung tâm của xung PWM và cũng là thời điểm tối ưu để đo dòng.

ADC injected channel được cấu hình để đo dòng 3 pha từ shunt (qua INA240) tương ứng với các phase A, B, C.

Đảm bảo lấy mẫu tại điểm chính giữa xung PWM, nơi dòng điện tuyến tính và chính xác nhất.

4.2 Cấu hình SPI – Giao tiếp với Encoder AS5147U

4.2.1 Chức năng

Đọc giá trị góc rotor từ encoder từ tính AS5147U qua giao tiếp SPI (giao tiếp ở chế độ SPI Slave, CPOL = 0, CPHA = 1 theo datasheet của AS5147U).

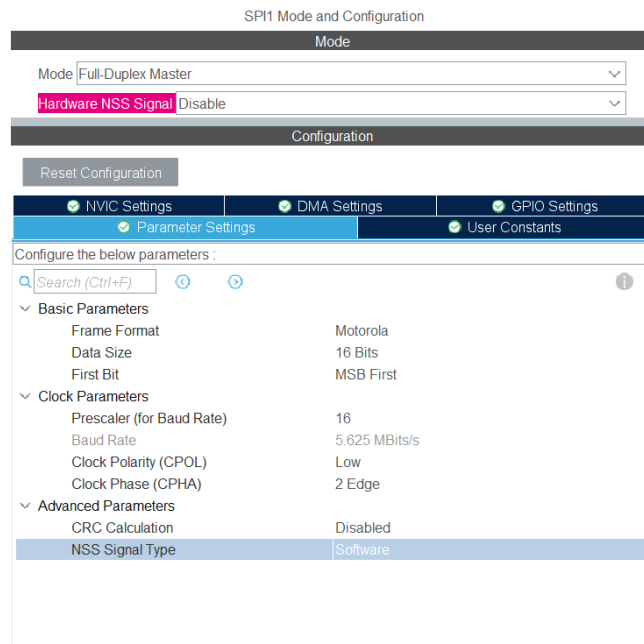
4.2.2 Cấu hình SPI

SPI Mode: Mode 1 (CPOL = 0, CPHA = 1)

Tốc độ baudrate: cấu hình để đảm bảo thời gian đọc vị trí nhanh hơn chu kỳ điều khiển (<10 MHz).

Chiều truyền: Full duplex

Data size: 16-bit (AS5147U trả về dữ liệu 14-bit góc, 2-bit CRC) và chân giao tiếp: SPIx_MOSI, MISO, SCK, và chân CS điều khiển riêng bằng GPIO.



Hình 4.5 Cấu hình SPI1

4.2.3 Khung truyền SPI và quá trình đọc góc

Mỗi lần đọc vị trí từ AS5147U được thực hiện bằng cách gửi một khung lệnh 16-bit đến encoder. Trong đó, 6 bit đầu là địa chỉ thanh ghi, 1 bit là R/W (1 để đọc), 1 bit parity. Sau khi gửi lệnh, dữ liệu góc sẽ được trả về trong lần truyền tiếp theo.

Quy trình đọc góc thực tế:

1. Kéo chân CS (chip select) xuống mức thấp.
2. Gửi lệnh đọc 16-bit đến địa chỉ 0x3FFF để yêu cầu đọc dữ liệu góc.
3. Kéo chân CS lên lại mức cao, kết thúc truyền.
4. Sau một chu kỳ delay ngắn, thực hiện một lần truyền SPI 16-bit thứ hai, để nhận lại dữ liệu góc.
5. Dữ liệu trả về được lọc parity, kiểm tra lỗi, và trích xuất 14-bit dữ liệu góc.

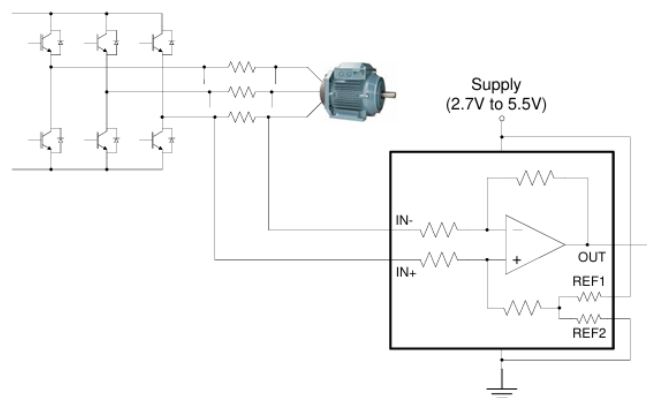
4.3 Cấu hình ADC1 – Đo dòng điện 3 pha

Để thực hiện điều khiển dòng điện trong phương pháp Field-Oriented Control (FOC), cần đo chính xác dòng điện chảy qua các pha của động cơ BLDC. Trong dự án này, dòng điện được đo gián tiếp thông qua điện trở shunt được khuếch đại bởi IC INA240, sau đó đưa vào ADC của STM32 để số hóa và xử lý.

4.3.1 Bộ khuếch đại INA240

INA240-Q1 là một bộ khuếch đại đo dòng điện đầu ra điện áp, đạt chuẩn ô tô (automotive-qualified), với khả năng khử nhiễu PWM được cải thiện, cho phép đo sụt áp trên điện trở shunt trong một dải điện áp chế độ chung rất rộng từ -4 V đến 80 V , độc lập với điện áp nguồn cấp.

Thiết bị hoạt động với nguồn đơn từ 2.7 V đến 5.5 V , tiêu thụ dòng điện tối đa chỉ 2.4 mA . INA240-Q1 có 4 tùy chọn hệ số khuếch đại cố định: 20 V/V , 50 V/V , 100 V/V và 200 V/V .



Hình 4.6 Sơ đồ kết nối INA240

4.3.2 Nguyên lý đo dòng điện

Mỗi pha động cơ BLDC được nối qua một điện trở shunt có giá trị nhỏ (ví dụ: $10\text{m}\Omega$).

Điện áp rơi trên điện trở shunt phản ánh dòng điện tức thời của pha.

Do điện áp rơi rất nhỏ, tín hiệu này được khuếch đại tuyến tính bởi INA240 với hệ số khuếch đại (gain) khoảng 50.

Tín hiệu khuếch đại được đưa vào chân ADC analog của STM32.

4.3.3 Sử dụng ADC injected mode

Trong dự án này, việc đo dòng điện được thực hiện tại điểm giữa của xung PWM (center of center-aligned PWM cycle) – thời điểm dòng điện ít bị nhiễu nhất. Để làm được điều này, ADC được cấu hình ở chế độ Injected Mode, và được kích hoạt bằng trigger từ TIM1.

Cấu hình cụ thể:

- ADC mode: Injected conversion
- Trigger source: TIM1_TRGO (Trigger Output)
- Trigger event: Update hoặc Capture Compare (tùy theo thiết kế)
- Sampling time: Càng ngắn càng tốt nhưng vẫn đủ độ chính xác (ví dụ: 15 cycles)
- Số kênh: 2 hoặc 3 kênh tùy số lượng pha được đo (2 kênh là đủ với giả định dòng 3 pha tổng bằng 0)

▼	ADC_Injected_ConversionMode	
	Number Of Conversions	2
	External Trigger Source	Timer 1 Trigger Out event
	External Trigger Edge	Trigger detection on the rising edge
	Injected Conversion Mode	Discontinuous Mode
▼	Injected Rank	1
	Channel	Channel 0
	Sampling Time	480 Cycles
	Injected Offset	0
▼	Injected Rank	2
	Channel	Channel 4
	Sampling Time	480 Cycles
	Injected Offset	0

Hình 4.7 Cấu hình ADC injected mode

4.3.4 Trình tự hoạt động

1. TIM1 hoạt động ở chế độ center-aligned, tạo ra xung PWM cho 3 pha điều khiển driver L6234.

2. Ở giữa chu kỳ PWM, TIM1 sẽ tạo ra tín hiệu trigger cho ADC injected.
3. ADC1 injected sẽ tự động bắt đầu chuyển đổi trên 2 hoặc 3 kênh đã cấu hình.
4. Khi ADC hoàn tất chuyển đổi, có thể sử dụng ngắt hoặc đọc trực tiếp kết quả từ thanh ghi JDRx.
5. Sau đó, dòng điện dạng số sẽ được xử lý (lọc, chuyển đổi sang Id/Iq...).

4.4 Cấu hình ADC2 – Đo điện áp nguồn

4.4.1 Mạch chia phân áp

Trong hệ thống điều khiển động cơ BLDC, việc giám sát điện áp nguồn là một yêu cầu quan trọng nhằm đảm bảo an toàn vận hành và điều chỉnh phù hợp thuật toán điều khiển trong các điều kiện điện áp thay đổi. Do điện áp nguồn trong hệ thống có thể dao động từ 5V đến 20V, vượt quá giới hạn đầu vào của bộ chuyển đổi tương tự – số (ADC) trên vi điều khiển Nucleo F446RE (tối đa 3.3V), cần phải sử dụng mạch chia điện áp để đưa điện áp về mức thích hợp cho ADC.

4.4.1.1 Nguyên lý hoạt động

Mạch chia điện áp sử dụng hai điện trở mắc nối tiếp để giảm điện áp đầu vào theo công thức:

$$V_{ADC} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.1)$$

Trong đó:

- V_{in} : điện áp nguồn cần đo (từ 5V đến 20V)
- V_{ADC} : điện áp đưa vào chân ADC (tối đa 3.3V)
- R_1, R_2 : hai điện trở phân áp

4.4.1.2 Lựa chọn điện trở

Để đo chính xác điện áp tối đa 20V, và đảm bảo $V_{ADC} \leq 3.3V$, chọn:

- $R_1 = 12.4k\Omega$
- $R_2 = 3.3k\Omega$

Khi đó:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{3.3}{12.4 + 3.3} = 0.21$$

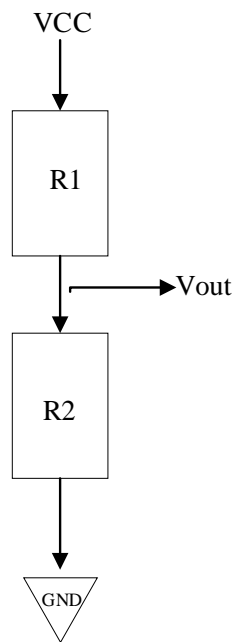
Với $V_{in} = 15.5V \rightarrow V_{ADC} = 15.5 \times 0.21 = 3.255V$

4.4.1.3 Sơ đồ kết nối

Đầu vào V_{in} : nối vào nguồn 5V–20V

Điểm giữa R1 và R2: nối vào chân ADC của vi điều khiển

Đầu còn lại của R2: nối với GND



Hình 4.8 Cấu trúc cầu phân áp

4.4.2 Cấu hình ADC2

Trong hệ thống, chân PA0 (ADC2_IN1) được sử dụng để đo điện áp sau khi qua mạch chia áp. Để tối ưu hiệu suất, DMA (Direct Memory Access) được sử dụng để tự động lưu trữ giá trị ADC vào bộ nhớ mà không chiếm tài nguyên CPU.

4.4.2.1 Cấu hình ADC2

Kênh ADC: IN1 (PA0)

Độ phân giải: 12-bit (0–4095)

Chế độ chuyển đổi: Continuous Conversion Mode

Data Alignment: Right alignment

▼ ADCs_Common_Settings	
Mode	Independent mode
▼ ADC_Settings	
Clock Prescaler	PCLK2 divided by 6
Resolution	12 bits (15 ADC Clock cycles)
Data Alignment	Right alignment
Scan Conversion Mode	Disabled
Continuous Conversion Mode	Disabled
Discontinuous Conversion Mode	Disabled
DMA Continuous Requests	Disabled
End Of Conversion Selection	EOC flag at the end of single channel conversion
▼ ADC_Regular_ConversionMode	
Number Of Conversion	1
External Trigger Conversion Source	Regular Conversion launched by software
External Trigger Conversion Edge	None
▼ Rank	
Channel	Channel 1
Sampling Time	15 Cycles

Hình 4.8 Cấu hình ADC2_IN1

4.4.2.2 Cấu hình DMA cho ADC2

DMA Request: ADC2

Stream: chọn theo mặc định CubeMX gán cho ADC2 (tùy vào MCU cụ thể)

Direction: Peripheral to Memory

Priority: Medium

Mode: Normal (có thể chọn Circular nếu đo liên tục)

Peripheral Increment: Disable

Memory Increment: Enable

Data Width: Half Word cho cả Peripheral và Memory (tương ứng 16-bit dữ liệu ADC)

Use FIFO: Không sử dụng

Reset Configuration

Parameter Settings
User Constants
NVIC Settings
DMA Settings
GPIO Settings

DMA Request	Stream	Direction	Priority
ADC2	ADC2	Peripheral To Memory	Medium

Add
Delete

DMA Request Settings

Mode
Normal

Increment Address
☐

Use Fifo
☐

Threshold

Data Width
Half Word

Burst Size

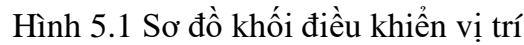
Peripheral

Memory
☒

Half Word

Hình 4.9 Cấu hình DMA cho ADC2

5.1 Sơ đồ hệ thống điều khiển



```

graph TD
    Start([Bắt đầu]) --> Init[Khởi tạo hệ thống]
    Init --> ReadVoltage[Đọc điện áp nguồn]
    ReadVoltage --> CheckVoltage{Kiểm tra sụt áp, quá áp}
    CheckVoltage -- S --> ReadCurrent[Đọc dòng điện 3 pha]
    CheckVoltage -- Đ --> ReadVoltage
    ReadCurrent --> CheckCurrent{Kiểm tra quá dòng}
    CheckCurrent -- S --> ReadPosition[Đọc vị trí cảm biến AS5147U]
    CheckCurrent -- Đ --> CheckCurrent
    ReadPosition --> PIDPos[PID vị trí]
    PIDPos --> PIDVel[PID tốc độ]
    PIDVel --> PIDCur[PID dòng điện]
    PIDCur --> PWM[PWM]
    PWM --> Control[Điều khiển mạch cầu H 3 pha]
    Control --> Motor[Động cơ]
    Motor --> ReadCurrent

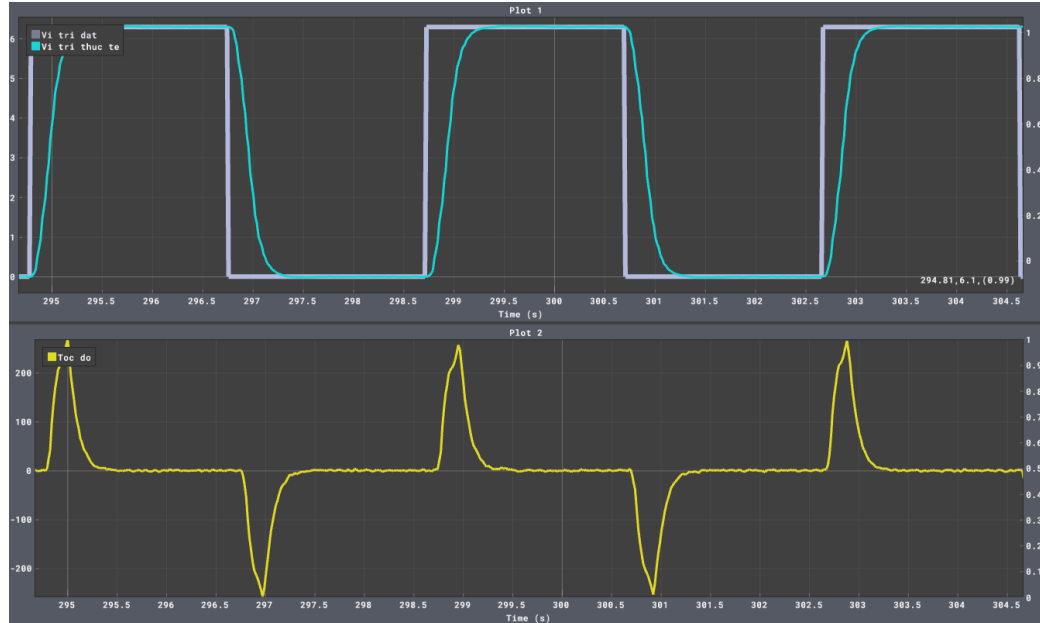
```

SVTH: Hà Duy Phương, Đinh Lê Trung Nguyên

5.3 Kết quả thực nghiệm

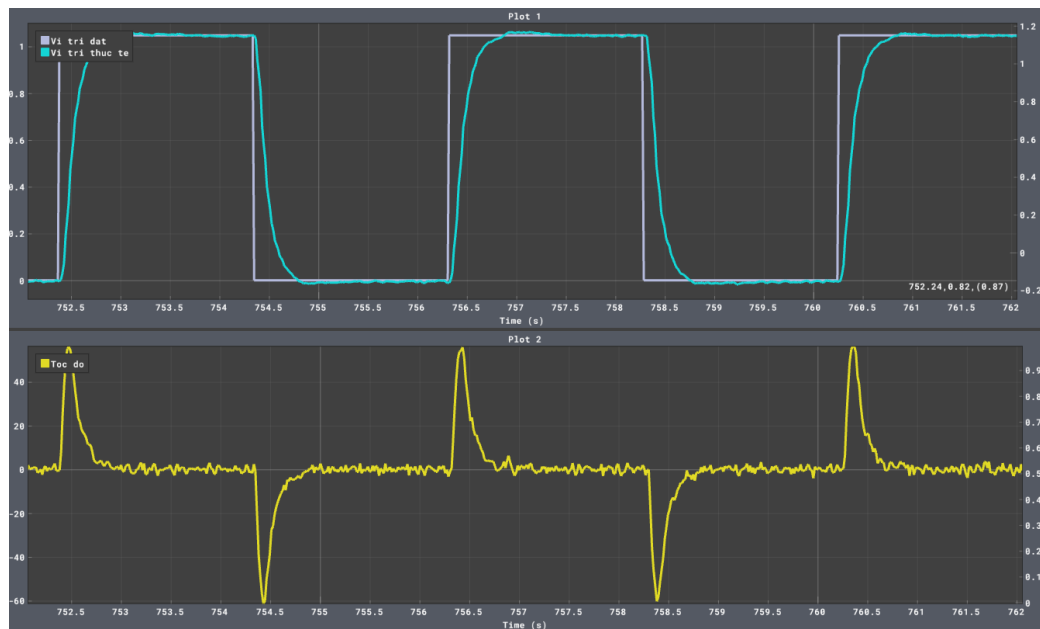
5.3.1 Biểu đồ góc đặt, góc thực, và đáp ứng vận tốc

❖ Với góc đặt = $\pm 2\pi$



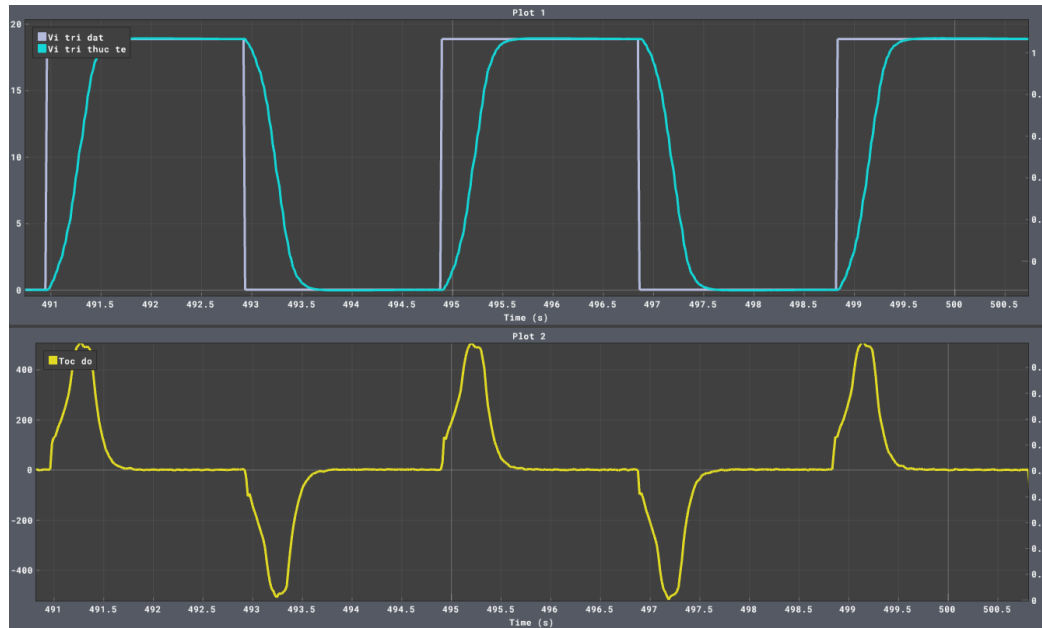
Hình 5.3 Đồ thị với vị trí đặt $\pm 2\pi$

❖ Với góc đặt = $\pm \frac{\pi}{3}$



Hình 5.4 Đồ thị với vị trí đặt $+\frac{\pi}{3}$

❖ Với góc đặt $= \pm 6\pi$



Hình 5.5 Đồ thị với vị trí đặt $\pm 6\pi$

5.3.2 Phân tích, nhận xét

5.3.2.1 Đáp ứng góc vị trí

Biểu đồ biểu diễn đồ thị góc vị trí đặt (màu tím nhạt) và góc vị trí thực tế (màu xanh dương) của động cơ khi thực hiện bài toán điều khiển vị trí với góc đặt. Dựa trên đồ thị có thể rút ra các nhận xét như sau:

- Khả năng bám góc tốt: Góc vị trí thực tế bám sát góc đặt. Đặc biệt, khi chuyển từ trạng thái ổn định này sang trạng thái ổn định khác, hệ thống điều khiển phản ứng nhanh chóng và đưa vị trí động cơ về giá trị mong muốn mà không bị trễ dài hoặc sai số lớn.
- Thời gian quá độ ngắn: Thời gian từ lúc bắt đầu thay đổi vị trí đến khi ổn định xấp xỉ từ 0.3 - 0.5 giây. Điều này chứng tỏ bộ điều khiển PID vị trí kết hợp PID tốc độ hoạt động hiệu quả trong việc xử lý yêu cầu thay đổi nhanh vị trí.
- Không có dao động (overshoot) lớn: Trong quá trình quá độ, góc thực không bị vượt quá đáng kể so với góc đặt, điều này cho thấy hệ thống điều khiển có khả năng hạn chế hiện tượng quá điều chỉnh và giữ cho hệ thống hoạt động ổn định.

- Đáp ứng lặp lại và đồng nhất: Trong cả ba chu kỳ điều khiển vị trí, đáp ứng thực tế của động cơ đều có hình dạng tương tự nhau, thể hiện tính lặp lại và ổn định của hệ thống điều khiển.

5.3.2.2 Đáp ứng tốc độ

Biểu đồ thể hiện tốc độ (màu vàng) của động cơ tương ứng với từng pha thay đổi góc vị trí. Các đặc điểm được quan sát:

- Biên độ tốc độ cao khi mới thay đổi vị trí: Mỗi lần thay đổi góc đặt, tốc độ động cơ xuất hiện xung tốc độ có giá trị lớn. Điều này phù hợp với kỳ vọng vì để đạt góc mục tiêu trong thời gian ngắn, bộ điều khiển PID tốc độ đã tạo ra momen lớn \rightarrow tốc độ tăng nhanh trong thời gian ngắn.
- Tốc độ ổn định tại trạng thái giữ vị trí: Sau giai đoạn quá độ, tốc độ động cơ gần như tiệm cận về 0 rad/s, phản ánh đúng mục tiêu của điều khiển vị trí: giữ động cơ đứng yên tại vị trí đặt.
- Đáp ứng tốc độ có hiện tượng vọt: Khi bắt đầu thay đổi hướng, tốc độ có sự thay đổi lớn ngắn hạn. Đây là đặc điểm bình thường do quán tính cơ học và khả năng đáp ứng tức thời của hệ thống.

5.4 Kết luận và hướng phát triển

5.4.1 Kết luận

Sau quá trình nghiên cứu, thiết kế và thực nghiệm, đề tài “Thiết kế bộ điều khiển động cơ không chổi than theo phương pháp FOC sử dụng Nucleo F446RE” đã đạt được các mục tiêu đặt ra ban đầu. Hệ thống điều khiển FOC kết hợp với các bộ điều khiển PID tốc độ và vị trí được xây dựng hoàn chỉnh và vận hành ổn định trên phần cứng thực tế, sử dụng động cơ BLDC và cảm biến từ tính AS5147U.

Từ các kết quả thực nghiệm, có thể rút ra một số kết luận chính như sau:

- Hệ thống có khả năng bám góc chính xác và ổn định: Góc vị trí thực tế của động cơ bám rất sát với góc đặt trong toàn bộ quá trình thử nghiệm, bao gồm cả chuyển đổi giữa các vị trí khác nhau.
- Thời gian quá độ ngắn và ổn định: Hệ thống đạt được vị trí mục tiêu trong khoảng thời gian từ 0.3 – 0.5 giây, cho thấy khả năng đáp ứng nhanh và điều chỉnh hiệu quả của bộ điều khiển.

- Không xuất hiện dao động lớn và không vượt ngưỡng: Trong giai đoạn chuyển tiếp, góc thực tế không có hiện tượng vọt quá (overshoot) đáng kể, chứng minh tính ổn định và tin cậy của giải thuật điều khiển.
- Tốc độ điều khiển phản ánh đúng yêu cầu điều khiển vị trí: Trong giai đoạn thay đổi vị trí, tốc độ động cơ tăng mạnh trong thời gian ngắn để đáp ứng yêu cầu đạt vị trí mới. Sau đó, tốc độ tiệm cận về 0 để giữ vị trí, thể hiện hiệu quả của vòng điều khiển tốc độ lồng trong vòng điều khiển vị trí.
- Tính lặp lại cao và hoạt động đồng nhất: Kết quả thử nghiệm qua nhiều chu kỳ cho thấy hệ thống có phản ứng lặp lại và không bị sai lệch, phù hợp với yêu cầu về độ tin cậy.

Tổng thể, đề tài đã chứng minh rằng việc áp dụng điều khiển FOC kết hợp với điều khiển PID tốc độ và vị trí là một giải pháp hiệu quả để điều khiển chính xác động cơ BLDC trong các ứng dụng yêu cầu độ chính xác cao.

5.4.2 Hướng phát triển

Mặc dù hệ thống đã đạt được các yêu cầu cơ bản, vẫn còn nhiều hướng mở để tiếp tục hoàn thiện và phát triển đề tài trong tương lai:

- Tối ưu bộ điều khiển PID tự động theo thời gian thực: Hiện tại các hệ số PID được điều chỉnh thủ công, việc áp dụng các giải thuật tự động như tự điều chỉnh tham số (auto-tuning) hoặc bộ điều khiển thích nghi có thể cải thiện hiệu suất và khả năng thích ứng.
- Phát triển thuật toán điều khiển nâng cao hơn: Có thể tích hợp các kỹ thuật điều khiển hiện đại như điều khiển mờ (fuzzy), điều khiển trượt (sliding mode), hoặc điều khiển dự báo (MPC) để nâng cao độ bám và chống nhiễu.
- Thực hiện giám sát và điều khiển từ xa: Tích hợp giao tiếp UART hoặc CAN để điều khiển từ xa, hoặc kết nối với hệ thống SCADA giúp mở rộng ứng dụng trong công nghiệp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. Aupetit, “Current sensing in BLDC motor application,” 2020.
- [2] “SimpleFOCDocs,” [Online]. Available: <https://docs.simplefoc.com/>. [Accessed 2025].
- [3] Trần Quang Thọ (Chủ Biên), Nguyễn Vinh Quang, Điều Khiển Thiết Bị Điện Công Nghiệp, Nhà Xuất Bản Đại Học Quốc Gia Thành Phố Hồ Chí Minh, 2022.
- [4] Zhang, F., Kong, X., Li, F., & Zhang, Y, “The Design of Controller for BLDC Based on STM32.,” *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* , p. 042047, 2020, February.
- [5] Skuric, A., Bank, H. S., Unger, R., Williams, O., & González-Reyes, D, “SimpleFOC: a field oriented control (FOC) library for controlling brushless direct current (BLDC) and stepper motors,” *Journal of Open Source Software*, 2022.
- [6] Prayogo, R. C., Triwiyatno, A., & Riyadi, M. A., “Field Oriented Control Implementation on BLDC Motor Controller with PI and SVPWM using STM32F103C8T6,” *In Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2622, no. 1, p. 012025, 2023, October.
- [7] Thân Ngọc Hoàn, Mai Xuân Minh, “Mô phỏng động cơ một chiều không chổi than,” Tạp chí khoa học và công nghệ Hàng Hải, 2008.
- [8] Harshavardhan, Marabathina, “Field Oriented Control Of A Brushless Dc Motor,” Doctoral Dissertation, Indian Institute Of Technology Madras, 2017.