**ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG**

**TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA**

**KHOA ĐIỆN**

Ảnh có chứa văn bản, vòng tròn, biểu tượng, Phông chữ

Mô tả được tạo tự động

**BÁO CÁO THỰC TẬP TỐT NGHIỆP**

**KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN VÀ TỰ ĐỘNG HÓA**

**THỰC TẬP TẠI:**

**CÔNG TY CỔ PHẦN SYSBOTIX SOLUTION**

Thông tin sinh viên:  **ĐINH LÊ TRUNG NGUYÊN**

**HÀ DUY PHƯƠNG**

Lớp: **20TDHCLC3**

Thông tin Cán bộ hướng dẫn :

GVHD : **TS. NGUYỄN KHÁNH QUANG**

CBHD 1: **TS. NGUYỄN ĐĂNG KHOA**

***Đà Nẵng – 01/2025***

# LỜI CẢM ƠN

*Em xin gửi lời cảm ơn chân thành đến Ban Giám đốc cùng toàn thể cán bộ, nhân viên tại Công Ty Cổ Phần Sysbotix Solution, những người đã tạo điều kiện thuận lợi và hỗ trợ em trong suốt thời gian thực tập. Chính sự hỗ trợ tận tâm của quý công ty đã mang đến cho em cơ hội quý báu để tiếp cận môi trường làm việc thực tế và tích lũy những kinh nghiệm vô cùng giá trị.*

*Đặc biệt, em xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến thầy* ***Nguyễn Đăng Khoa****, người đã luôn tận tình hướng dẫn, định hướng và đồng hành cùng em trong quá trình thực tập cũng như trong việc thực hiện đề tài tốt nghiệp. Sự chỉ bảo tận tâm của thầy không chỉ giúp em hoàn thành tốt nhiệm vụ mà còn góp phần nâng cao kiến thức và kỹ năng chuyên môn của em.*

*Em cũng muốn gửi lời cảm ơn chân thành đến các anh chị tại công ty, những người đã nhiệt tình chia sẻ kiến thức và kinh nghiệm thực tiễn. Sự hỗ trợ và hướng dẫn của các anh chị đã giúp em hiểu sâu sắc hơn về môi trường làm việc thực tế, đồng thời trang bị cho em những kỹ năng cần thiết để phát triển trong sự nghiệp.*

*Những kiến thức và trải nghiệm mà em có được trong suốt quá trình thực tập sẽ là hành trang quý giá, giúp em tự tin bước vào chặng đường mới trên con đường sự nghiệp của mình.*

*Em xin chân thành cảm ơn!*

MỤC LỤC

[LỜI CẢM ƠN 2](#_Toc187828411)

[CHƯƠNG 1: GIỚI THIỆU VỀ CÔNG TY 6](#_Toc187828412)

[1.1 Giới thiệu về công ty tư vấn công nghệ và sản xuất PKH 6](#_Toc187828413)

[1.2 Lĩnh vực hoạt động 6](#_Toc187828414)

[1.2.1 Embedded System Programming 6](#_Toc187828415)

[1.2.2 Hardware Circuit Design 7](#_Toc187828416)

[1.2.3 SCADA System 7](#_Toc187828417)

[1.2.4 Software Design 8](#_Toc187828418)

[CHƯƠNG 2: Giới thiệu 9](#_Toc187828419)

[2.1 Tổng quan 9](#_Toc187828420)

[2.2 Mục đích của đề tài 9](#_Toc187828421)

[2.3 Nhiệm vụ của đề tài 9](#_Toc187828422)

[CHƯƠNG 3: Cơ sở lý thuyết 10](#_Toc187828423)

[3.1 Động cơ BLDC 10](#_Toc187828424)

[3.1.1 Giới thiệu chung 10](#_Toc187828425)

[3.1.2 Cấu tạo của động cơ BLDC 11](#_Toc187828426)

[3.1.3 Sức phản điện động 14](#_Toc187828427)

[3.1.4 Nguyên lý hoạt động 14](#_Toc187828428)

[3.1.5 Đặc điểm nổi bật của động cơ BLDC 15](#_Toc187828429)

[3.2 Mô hình toán học của động cơ BLDC 15](#_Toc187828430)

[3.3 Điều khiển động cơ BLDC 17](#_Toc187828431)

[3.4 Phương pháp Field Oriend Control (FOC) 18](#_Toc187828432)

[3.4.1 Cơ sở lý thuyết 18](#_Toc187828433)

[3.4.2 So sánh giữa FOC và DTC 20](#_Toc187828434)

[3.4.3 Ưu và nhược điểm của từng phương pháp: 21](#_Toc187828435)

[3.5 Thuật toán điều khiển PID 22](#_Toc187828436)

[3.5.1 Khâu tỉ lệ 22](#_Toc187828437)

[3.5.2 Khâu tích phân 23](#_Toc187828438)

[3.5.3 Khâu vi phân 23](#_Toc187828439)

[3.5.4 Bảng điều chỉnh độc lập các thông số PID 24](#_Toc187828440)

[CHƯƠNG 4: ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG CƠ BLDC SỬ DỤNG STM32 25](#_Toc187828441)

[4.1 Cấu trúc hệ thống 25](#_Toc187828442)

[4.1.1 Tổng quan về STM32 Nucleo-64 25](#_Toc187828443)

[4.1.2 Tổng quan về SimpleFOC Shield 26](#_Toc187828444)

[4.1.3 Encoder 27](#_Toc187828445)

[4.2 Cấu hình trên STM32cubeide 29](#_Toc187828446)

[4.2.1 Cấu hình cho Tim1 29](#_Toc187828447)

[4.2.2 Cấu hình ADC đo dòng bằng điện trở shunt 30](#_Toc187828448)

[4.3 Tổng quan và kết luận 31](#_Toc187828449)

[4.3.1 Mục tiêu của đồ án 31](#_Toc187828450)

[4.3.2 Các bước thực hiện 31](#_Toc187828451)

[4.3.3 Kết quả đạt được 32](#_Toc187828452)

[4.3.4 Hạn chế 32](#_Toc187828453)

[4.3.5 Hướng phát triển 32](#_Toc187828454)

MỤC LỤC HÌNH ẢNH

[Hình 1.1. Công ty tư vấn công nghệ và sản xuất PKH 7](#_Toc187829200)

[Hình 1.2. Lĩnh vực lập trình Hệ thống nhúng 8](#_Toc187829201)

[Hình 1.3. Lĩnh vực thiết kế mạch phần cứng 8](#_Toc187829202)

[Hình 1.4. Lĩnh vực hệ thống SCADA 9](#_Toc187829203)

[Hình 1.5. Lĩnh vực thiết kế phần mềm 9](#_Toc187829204)

[Hình 3.1. Động cơ BLDC 11](#_Toc187829205)

[Hình 3.2. Cấu trúc chính của động cơ BLDC 13](#_Toc187829206)

[Hình 3.4. Rotor có nam châm ẩn bên trong lõi 14](#_Toc187829207)

[Hình 3.5. Stator động cơ BLDC 14](#_Toc187829208)

[Hình 3.6. Sơ đồ nguyên lý mạch động lực 15](#_Toc187829209)

[Hình 3.7. Mô hình mạch điện của động cơ BLDC 17](#_Toc187829210)

[Hình 3.8. Sơ đồ nguyên lý mạch lực 18](#_Toc187829211)

[Hình 3.10. Biến đổi tín hiệu của phương pháp FOC 19](#_Toc187829212)

[Hình 3.11. Phép biến đổi Clarke 20](#_Toc187829213)

[Hình 3.12. Phép biến đổi park 20](#_Toc187829214)

[Hình 3.13. Khâu tỉ lệ 23](#_Toc187829215)

[Hình 3.14. Khâu tích phân 24](#_Toc187829216)

[Hình 3.15. Khâu vi phân 25](#_Toc187829217)

[Hình 4.1.MKS SimpleFOC Shield V2.0.4 27](#_Toc187829218)

[Hình 4.2. Magnetic Encoder Development Board 29](#_Toc187829219)

[Hình 4.3. Cấu hình Tim1 30](#_Toc187829220)

[Hình 4.4. Sơ đồ khối IC L6324 31](#_Toc187829221)

# GIỚI THIỆU VỀ CÔNG TY

## Giới thiệu về công ty tư vấn công nghệ và sản xuất PKH

Công ty Cổ phần tư vấn công nghệ và sản xuất PKH được thành lập vào năm 2017, hoạt động chủ yếu trong lĩnh vực thiết kế mạch điện tử, lập trình hệ thống nhúng, phát triển phần mềm điều khiển tự động trên thiết bị PLC trong công nghiệp và phát triển hệ thống SCADA. Khách hàng chính của công ty tập trung chủ yếu ở các thị trường Hàn Quốc, Mỹ và Singapore.

Bên cạnh triển khai các dự án theo yêu cầu của khách hàng, công ty cũng không ngừng phát triển các sản phẩm công nghệ chiến lược hướng tới sự phát triẻn bền vững và mở rộng trong tương lai.

Độ ngũ nòng cốt của công ty đều là những thành viên được đào tạo bài bản ở nước ngoài, có nhiều năm kinh nghiệm tham gia và triển khai các dự án tại Hàn Quốc, Nga, Đức và Úc trong lĩnh vực tự động hóa và công nghệ phần mềm. Cùng với đội ngũ kỹ sư trẻ, năng động, nhiệt huyết và đam mê, công ty luôn giữ niềm tin vào việc xây dựng một công ty công nghệ với văn hóa làm việc chuyên nghiệp, trách nhiệm, nhằm tạo ra các sản phẩm chất lượng cho khách hàng.

Với phương châm “Sáng tạo – Hiệu quả - Phát triển biền vững” PKH Technologies cam kết không ngừng đổi mới và ứng dụng các công nghệ tiên tiến nhất để đáp ứng mọi nhu cầu của khách hàng và đóng góp và sự phát triển của ngành công nghệ thông tin và tự động hóa.

Trụ sở chính của công ty đặt tại: Tầng 4, số 6 đường Lê Lợi, thành phố Huế.

A screenshot of a computer

Description automatically generated

Hình 1.1. Công ty tư vấn công nghệ và sản xuất PKH

## Lĩnh vực hoạt động

Công ty tư vấn công nghệ và sản xuất PKH hoạt động trong lĩnh vực công nghệ sau

### Embedded System Programming

* Thiết kế và phát triển các thiết bị IoT và hệ thống nhúng.
* Xây dựng nền tảng kết nối thiết bị thông minh, hỗ trợ giao tiếp mở giữa các sản phẩm khác nhau.
* Giúp doanh nghiệp kết nối thiết bị nhanh chóng và hiệu quả.

Ảnh có chứa văn bản, ảnh chụp màn hình, Phông chữ, thiết kế

Mô tả được tạo tự động

Hình 1.2. Lĩnh vực lập trình Hệ thống nhúng

### Hardware Circuit Design

* Thiết kế mạch điện tử và layout PCB theo yêu cầu.
* Lập trình vi điều khiển (MCU) như STM, ARM, CPU, AVR,…
* Ứng dụng trong cả lĩnh vực mạch tương tự và mạch số.

Ảnh có chứa văn bản, ảnh chụp màn hình, Phông chữ, nước

Mô tả được tạo tự độngHình 1.3. Lĩnh vực thiết kế mạch phần cứng

### SCADA System

* Lập trình PLC phục vụ tự động hóa trong công nghiệp.
* Giảm bớt công việc đơn giản, tiết kiểm chi phí dây điện, vật liệu và tạo ra hệ thống điều khiển linh hoạt, hiệu quả hơn so với phương pháp cơ khí.
* Tăng tính tự động hóa và tối ưu chí phí vận hành.

Ảnh có chứa văn bản, máy tính, ảnh chụp màn hình

Mô tả được tạo tự động

Hình 1.4. Lĩnh vực hệ thống SCADA

### Software Design

* Phát triển và thiết kế phần mềm, website theo yêu cầu của khách hàng.
* Tập trung vào trải nghiệm người dùng và đáp ứng yêu cầu kỹ thuật.
* Đã thực hiện nhiều dự án cho công ty lớn và cá nhân, khẳng định uy tín trong lĩnh vực công nghệ thông tin.

Ảnh có chứa văn bản, ảnh chụp màn hình, Phông chữ, thiết kế

Mô tả được tạo tự độngHình 1.5. Lĩnh vực thiết kế phần mềm

# Giới thiệu

## Tổng quan

Các ràng buộc kinh tế và các tiêu chuẩn mới được chính phủ ban hành đặt ra các yêu cầu ngày càng nghiêm ngặt đối với các hệ thống điện. Các thế hệ thiết bị mới phải có các thông số hiệu suất cao hơn như hiệu suất tốt hơn và giảm thiểu nhiễu điện từ. Sự linh hoạt của hệ thống phải cao để thuận tiện cho việc điều chỉnh thị trường và giảm thời gian phát triển. Tất cả những cải tiến này phải được thực hiện đồng thời với việc giảm chi phí hệ thống.

Công nghệ động cơ không chổi than giúp đạt được những thông số kỹ thuật này. Các động cơ này kết hợp độ tin cậy cao với hiệu suất cao, và có chi phí thấp hơn so với động cơ chổi than.

## Mục đích của đề tài

Mục tiêu của đề tài là nghiên cứu điều khiển động cơ BLDC bằng phương pháp FOC kết hợp với thuật toán PID. Nghiên cứu này nhằm đạt được:

* Cấu tạo, nguyên lý hoạt động của động cơ BLDC.
* Thiết kế bộ điều khiển động cơ dựa vào phương pháp FOC để điều khiển được tốc độ, vị trí động cơ BLDC.

## Nhiệm vụ của đề tài

* Tìm hiều về động cơ DC không chổi than.
* Tìm hiểu phương pháp FOC để điều khiển dành cho động cơ trên.

# Cơ sở lý thuyết

## Động cơ BLDC

### Giới thiệu chung

A green motor with orange wire

Description automatically generated

Hình 3.1. Động cơ BLDC

Động cơ một chiều thông thường nổi bật với hiệu suất cao và đặc tính phù hợp cho các ứng dụng điều khiển 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.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 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( dễ bảo dưỡng hoặc không yêu cầu bảo dưỡng ) |
| Sơ đồ nối dây | Nối vòng tròn, đơn giản nhất là nối | Cao cấp: 3 pha nối 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 băng chổi than | Sử dụng cảm biến vị trí: Hall, cảm biên 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 |

Bảng 3.1. So sánh động cơ BLDC và ĐCMC

### 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 cữu được đặt trên rotor theo nhiều kết cấu khác nhau.

A close-up of a motor

Description automatically generated

Hình 3.2. 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.

#### Kết cấu rotor của động cơ BLDC

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

##### 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.

A circular object with arrows

Description automatically generated

Hình 3.3. Rotor có nam châm gắn trên bề mặt

##### 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 khắn trong chế tạo và lắp ráp, đặc biệt là khí công suất lớn, nhưng chắc chắn và được sử dụng trong các ứng dụng tốc độ cao.

A circular object with black and white text

Description automatically generated

Hình 3.4. Rotor có nam châm ẩn bên trong lõi

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

#### Kết cấu stator của động cơ BLDC

Stator cảu động cơ BLDC gồm các lá thép mỏng được xếp chặt cùng với các cuộn dây quấn stator của động cơ BLDC đươc phân bố với mật độ đều nhau dọc theo mặt trong của stator.

A close-up of a machine

Description automatically generated

Hình 3.5. Stator động cơ BLDC

Với sự phân bố từ trường và cachs phân bố các cuôn dây stator như trên, động cơ BLDC có suất điện động hình thang và tạo ra momen lớn hơn, công nghệ ché tạo đơn giản, rẻ tiền hơn, như đập mạch momen lớn hơn động cơ có suất điện động hình sin.

### Sức phản điện động

Khi động cơ BLDC quay, mỗi cuộn dây tạo ra một cuộn dây tạo ra một điện áp gọi là sức phản điện động chống lại điện áp nguồn cấp cho cuộn dây đó. Chiều sức phản điện động này ngược chiều với điện áp cấp. Sức phản điện động phụ thuộc chủ yếu vào ba yếu tố: Vận tốc góc của rotor, từ trường sinh ra nam châm vĩnh cữu của rotor và số vòng trong mỗi cuộn dây stator.

 (3.1)

Trong đó:

* B: Mật độ từ trường do nam châm rotor tạo ra
* l: Chiều dài mỗi thanh dẫn
* v: Vận tốc dài của thanh khi cắt qua từ trường
* : Vận tốc góc của rotor
* r: Bán kính rotor
* N: số vòng dây trên mỗi pha

Trong động cơ BLDC từ trường rotor và số vòng dây stator là các thông số không đổi. Chỉ có một thông số ảnh hưởng đến sức phản điện động là vận tốc góc hay vận tốc của rotor và khi vận tốc tăng, sức phản điện động cũng tăng.

### Nguyên lý hoạt động

A diagram of a machine

Description automatically generated

Hình 3.6. 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 điềm 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.

Trong quá trình hoạt động, tại một thời điểm chỉ có hai cuộn dây pha được cấp điện, cuộn dây thứ ba không được cấp điện và việc chuyển mạch từ cuộn dây này sang cuộn dây khác sẽ tạo từ trường quay và làm cho rotor quay theo. Như vậy, thứ tự chuyển mạch dòng điện giữa các cuộn dây pha phải căn cứ vào chiều quay của rotor.

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:

 (3.2)

Trong đó:

* : Sức điện động cảm ứng của pha A, B, C (V)
* : Dòng điện các pha A, B, C (A)
* : Vận tốc góc của trục Rotor (rad/s)

### 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.

## 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 ( dưới) trình bày mô hình mạch điện trong động cơ bao gồm ba cuộn dây stator được ước lượng bởi điện trở và điện cảm , do ba cuộn dây đặt cạnh nhau nên xảy ra hiện tượng hỗ cảm giữa các cuộn dây với nhau, được thể hiện qua đại lượng M. Mặc khác do rotor của động cơ là nam châ 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 thể hiện sự tương tác giữa hai từ trường, biên độ của sức phản điện động là bằng nhau và băng E.

A diagram of a voltage diagram

Description automatically generated

Hình 3.7. Mô hình mạch điện của động cơ BLDC

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



 ( 3.3)



Trong đó:

* là điện cảm của các cuộn dây động cơ
* là điện trở của cuộn dây stator động cơ
*  là sức điện động phản kháng

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

* Phương trình momen điện từ ở dạng cơ học của động cơ như sau:

 (3.4)

Trong đó:

* J (): Momen quán tính
* (Nm): Momen tải
* B (Nm.s): Hệ số ma sát
* (Nm): Momen điện từ

## 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 Hall đưa về.

A diagram of a machine

Description automatically generated

Hình 3.8. Sơ đồ nguyên lý mạch lực

Chế độ điều khiển này gọi là chế độ điều khiển , đây là chế độ điều khiển cơ bản cho động cơ BLDC.

Ta thấy rằng, trong một thời điểm bất kỳ luôn có hai pha dẫn điện nên được gọi là chế độ điều khiển hai pha dẫn.

Dưới mỗi pha ta thấy dòng điện một chiều, do đó động cơ BLDC có đặc tính điều khiển giống như động cơ một chiều thông thường. Vì vậy, động cơ có tên gọi là động cơ một chiều không chổi than.

A diagram of speed and speed

Description automatically generated

Hình 3.9. Đặc tính moment- tốc độ của động cơ BLDC

## Phương pháp Field Oriend Control (FOC)

### Cơ sở lý thuyết

Thuật toán FOC dựa trên phép biến đổi Park-Clarke. Hình 1 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 (ia, ib,ic ). Thuật toán FOC đơn giản hóa việc điều khiển các khung tham chiếu dòng điện hình sin ba pha bằng cách phân tích chúng hành các khung tham chiếu mô-men xoắn và từ thông. Hai thành phần này có thể được điều khiển riêng biệt.

A diagram of a diagram

Description automatically generatedHình 3.10. 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 (id) và một cho dòng điện vuông góc (iq). Ở bộ điều khiển dòng điện trực tiếp (tương ứng với từ thông của động cơ), mục tiêu duy trì dòng id=0 để tối ưu hoá hiệu quả momen trong hệ thống. Bộ điều khiển PI thứ hai hoạt động trên dòng điện vuông góc và giữ momen yêu cầu như ngõ vào.

#### 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 (𝑖α, 𝑖β). Phép biến đổi Clarke có thể được biểu diễn qua phương trình ().

A diagram of a straight line

Description automatically generated

Hình 3.11. Phép biến đổi Clarke

Phương trình chuyển đổi Clarke:

 (3.5)

Trong đó, 𝑖𝛼 và 𝑖𝛽 là các dòng điện trong hệ tọa độ tĩnh trực giao, còn 𝑖𝑎, 𝑖𝑏, 𝑖𝑐 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.

#### Phép biến đổi park

Với phép biến đổi Park, hai dòng điện xoay chiều (𝑖𝛼, 𝑖𝛽) sẽ được chuyển thành dòng điện một chiều (𝑖𝑞, 𝑖𝑑).

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 ().

A diagram of a straight line

Description automatically generated

Hình 3.12. Phép biến đổi Park

Phương trình chuyển đổi Park

 (3.6)

### So sánh giữa FOC và DTC

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Tiêu chí | FOC | DTC |
| Nguyên lý hoạt động | Điều khiển dòng điện stator bằng cách chuyển đổi sang hệ toạ độ dq | Điều khiển trực tiếp từ thông và mô-men xoắn mà không cần biến đổi toạ độ |
| Điều khiển | - Cần mô hình động cơ để tính toán vectoc điều khiển  - Điều khiển dòng điện (Id, Iq) để đạt được từ thông và mô-men mong muốn. | - 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 toạ độ | Yêu cầu biến đổi toạ 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 toạ 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 | - Động cơ đồng bộ (PMSM, BLDC)  - Hệ thống yêu cầu hiệu suất cao, chính xác, dao động thấp. | - Động cơ không đồng bộ (ACIM)  - Hệ thống yêu cầu phản hồi nhanh, đơn giản, không cần độ chính xác cao. |

### 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.

## Thuật toán điều khiển PID

Trong hệ thống điều chỉnh tự động trong công nghiệp hiện nay thường sử dụng các quy luật điều chỉnh chuẩn là quy luật tỉ lệ, quy luật tích phân, quy luật tỉ lệ tích phân, quy luật ti lệ vi phân và quy luật ti lệ vi tích phân.

Về lý thuyết, một bộ điều khiển có thể được sử dụng để điều khiển bất kỳ một quá trình nào mà có một đầu ra đo được (PV), một giá trị lý tưởng biết trước cho đầu ra (SP) và một đầu vào chu trình (MV) sẽ tác động vào PV thích hợp. Các bộ điều khiền được sử dụng trong công nghiệp để điều chỉnh nhiệt độ, áp suất, tốc độ dòng chảy, tổng hợp tốc độ và các đại lượng khác có thể đo lường được. Xe hơi điều khiển hành trình là một ví dụ cho việc áp dụng điều khiển tự động trong thực tế.

### 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 Kp, được gọi là độ lợi tỉ lệ.

A graph of a diagram

Description automatically generated with medium confidence

Hình 3.13. Khâu tỉ lệ

Khâu tỉ lệ được cho bởi:

 (3.7)

Trong đó

* : Thừa số tỉ lệ đầu ra
* : Độ lợi tỉ lệ, thông số điều chỉnh
* : Sai số = SP - PV
* : Thời gian hay thời gian tức thời (hiện tại)

### 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, Ki

A graph of a function

Description automatically generated with medium confidence

Hình 3.14. Khâu tích phân

Thừa số tích phân được cho bởi:

 (3.8)

Trong đó

* : Thừa số tích phân đầu ra
* : Độ lời tích phân, 1 thông số điều chỉnh
* : sai số = SP – PV
* *t* : Thời gian hoặc thời gian tức thời (hiện tại)
* : Một biến tích phân trung gian

### Khâu vi phân

Tôc 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 Kd. 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, Kd.

A graph of a reference signal

Description automatically generated

Hình 3.15. Khâu vi phân

Thừa số vi phân được cho bởi:

 (3.9)

Trong đó

* : Thừa số vi phân của đầu ra
* : Độ lợi của vi phân, một thông số điều chỉnh
* : Sai số = SP – PV
* : Thời gian hoặc thời gian tức thời

### 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 |
|  | Giảm | Tăng | Thay đổi nhỏ | Giảm | Giảm cấp |
|  | Giảm | Tăng | Tăng | Giảm đáng kể | Giảm cấp |
|  | Giảm ít | Giảm ít | Không tác động | Cải thiện nếu  nhỏ |  |

# ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG CƠ BLDC SỬ DỤNG STM32

## Cấu trúc hệ thống

### Tổng quan về STM32 Nucleo-64

#### 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.

#### Đặc điểm chính

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

##### Khả năng kết nối

* Giao diện tiêu chuẩn như UART, I2C, SPI, CAN, ADC, và DAC.
* Tích hợp cổng USB (tùy thuộc vào model).

##### 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.

##### 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.

#### 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.

### Tổng quan về SimpleFOC Shield

#### 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.

A black circuit board with green and silver components

Description automatically generated

Hình 4.1.MKS SimpleFOC Shield V2.0.4

#### 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.

#### Kết nối phần cứng

##### 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.

##### 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.

##### 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.

##### Nguồn cấp:

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

#### 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.

#### Ứng dụng

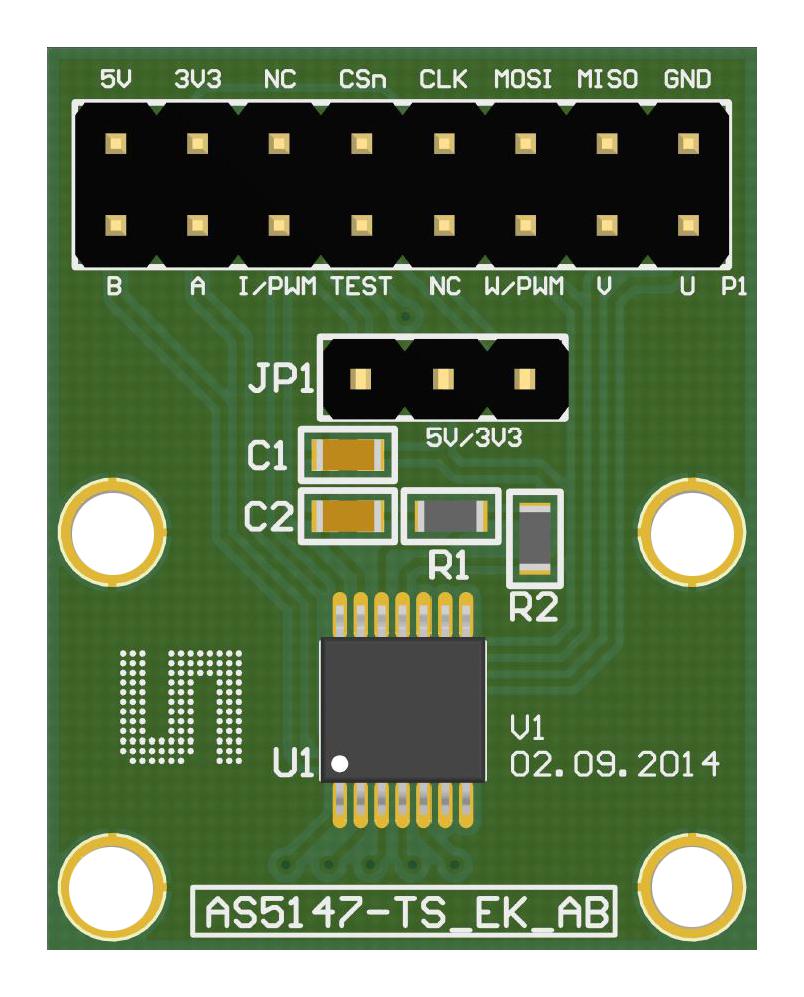
* Robot di động: Điều khiển bánh xe hoặc cánh tay robot.
* Gimbal ổn định: Ứng dụng trong ổn định hình ảnh của máy ảnh hoặc camera.
* Tự động hóa: Hệ thống truyền động trong băng tải, máy in 3D, hoặc cánh tay công nghiệp.

### Encoder

#### Giới thiệu

Encoder là một thiết bị điện tử dùng để chuyển đổi chuyển động cơ học (tốc độ và góc quay) thành tín hiệu điện, giúp đo lường và điều khiển các hệ thống cơ khí. Encoder được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng như điều khiển động cơ, robot, hệ thống tự động hóa, và các hệ thống đo lường vị trí hoặc tốc độ.

Có hai loại encoder phổ biến: Encoder quang học và Encoder từ tính. Mỗi loại có nguyên lý hoạt động và ứng dụng khác nhau, nhưng chức năng chính của chúng là đo đạc góc quay hoặc tốc độ của trục động cơ.



Hình 4.2. Magnetic Encoder Development Board

#### Nguyên lý đo góc

Encoder hoạt động dựa trên nguyên lý đo góc quay của trục động cơ bằng cách đếm số xung tín hiệu được sinh ra khi trục quay qua các vị trí xác định.

Encoder quang học: Gồm một đĩa quay với các vạch (hoặc mã vạch) được chiếu sáng bởi một nguồn sáng và nhận tín hiệu qua cảm biến quang học. Mỗi lần vạch đi qua cảm biến, một xung tín hiệu được tạo ra.

Encoder từ tính: Sử dụng cảm biến từ để phát hiện các thay đổi từ tính của các nam châm được gắn trên đĩa quay.

Số lượng xung tín hiệu sinh ra trong một vòng quay của trục sẽ tương ứng với một góc quay cụ thể. Đơn vị đo góc có thể là độ, radian, hoặc bước.

Góc quay (θ): Tính bằng công thức

 (4.1)

Trong đó:

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

#### Nguyên lý đo tốc độ

Encoder không chỉ đo góc mà còn có thể được sử dụng để đo tốc độ quay của trục thông qua tần số xung tín hiệu.

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

 (4.2)

hoặc tính theo **radian** nếu cần thiết:

 (4.3)

* n: Số lượng xung nhận được
* t: Thời gian đo
* PPR: Số xung phát sinh được từ encoder trong một vòng quay đầy đủ

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 tuỳ 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.

## Cấu hình trên STM32cubeide

### Cấu hình cho Tim1

A screenshot of a computer

Description automatically generated

Hình 4.3. Cấu hình Tim1

TIM1 được cấu hình để điều chế 3 kênh PWM với tín hiệu dạng sóng sin, được dịch pha nhau 120°. Các tín hiệu PWM này sẽ được cấp vào các chân điều khiển của IC L6234 để tạo điện áp xoay chiều 3 pha điều khiển động cơ BLDC. IC L6234 sử dụng tín hiệu từ CH1, CH2, CH3 (high-side) và CH1N, CH2N, CH3N (low-side) để chuyển mạch H-Bridge, tạo ra các pha điện áp sin chuẩn cho động cơ.

A diagram of a power supply system

Description automatically generated

Hình 4.4. Sơ đồ khối IC L6324

### Cấu hình ADC đo dòng bằng điện trở shunt

A screenshot of a computer program

Description automatically generated

Hình 4.6. Cấu hình ADC 12 bits

A screenshot of a computer program

Description automatically generated

Hình 4.7. Cấu hình chế độ ADC injected

Tính toán dòng điện bằng điện trở Shunt và giá trị ADC ( sử dụng độ phân giải 12 bits):

 (4.4)

Trong đó:

* : điện áp tham chiếu của ADC (3.3 V)
* : 0.01
* G = 50: Hệ số khuếch đại

## Tổng quan và kết luận

### Mục tiêu của đồ án

Đồ án này tập trung vào việc thiết kế và thực hiện hệ thống điều khiển động cơ BLDC bằng phương pháp điều khiển định hướng từ thông (FOC - Field Oriented Control).

Trong đó:

* SimpleFOC Shield: Được sử dụng làm bộ mạch điều khiển cầu H cho động cơ.
* STM32: Là vi điều khiển trung tâm để xử lý thuật toán FOC.
* Điện trở nối sao: Đóng vai trò mô phỏng tải và cung cấp tín hiệu dòng điện để thực hiện điều khiển vòng dòng điện.

### Các bước thực hiện

Phần 1: Mô phỏng tải thay cho động cơ

Do chưa có động cơ thực tế, sử dụng mạng điện trở nối sao để mô phỏng dòng điện ba pha. Điều này giúp kiểm tra các thuật toán điều khiển vòng dòng điện, bao gồm:

* Đo dòng điện từ các điện trở qua ADC.
* Tính toán dòng điện ​id và iq trong hệ dq sau khi thực hiện chuyển đổi Park/Clarke.

Phần 2: Triển khai thuật toán FOC

* Chuyển đổi Park và Clarke:
* Chuyển đổi dòng điện ba pha (​ia,ib,ic) sang hệ tọa độ αβ và dq để tách dòng từ thông (id) và dòng mô-men (iq).
* Kiểm tra và cân bằng id và iq thông qua vòng điều khiển PID.
* Điều chế SVPWM:
* Sử dụng các giá trị ​vd và vq sau vòng điều khiển để tạo ra vector không gian điện áp trong hệ αβ.
* Tính toán thời gian bật/tắt (Duty Cycle) cho các kênh PWM để điều khiển các transistor trong SimpleFOC Shield.

Phần 3: Kiểm tra vòng điều khiển dòng

* Với tải giả lập (mạng điện trở), kiểm tra hoạt động ổn định của vòng điều khiển dòng: id và iq
* Đảm bảo dòng id (từ thông) duy trì ở giá trị tham chiếu (id\_ref = 0)
* Dòng iq (mô-men) thay đổi theo giá trị đặt iq\_ref

### Kết quả đạt được

Hoàn thành thiết kế thuật toán FOC:

* Chuyển đổi hệ tọa độ Clarke và Park được triển khai chính xác trên STM32.
* Vòng điều khiển dòng (PID) hoạt động tốt, duy trì dòng điện theo giá trị tham chiếu.
* Điều chế SVPWM tạo tín hiệu PWM ổn định, tương ứng với vector không gian điện áp.

Mô phỏng hoạt động thực tế:

* Mạng điện trở nối sao đã thành công trong việc thay thế động cơ, cho phép kiểm tra tín hiệu dòng điện và điện áp trong hệ thống.
* Đảm bảo tính toán và điều khiển hệ thống trong điều kiện không có động cơ thực tế.

Nền tảng cho giai đoạn tiếp theo:

* Đồ án đã xây dựng được một framework điều khiển hoàn chỉnh, sẵn sàng mở rộng khi có động cơ BLDC và encoder thực tế.
* Thuật toán FOC và SVPWM đã được kiểm tra và có thể tích hợp dễ dàng với phần cứng động cơ.

### Hạn chế

Thiếu tải động thực tế:

* + Mạng điện trở không thể mô phỏng đầy đủ các yếu tố động lực học như mô-men quán tính và lực cản từ động cơ.

Giới hạn kiểm tra hiệu suất:

* + Không thể đánh giá được hiệu suất thực tế của thuật toán FOC khi điều khiển động cơ trong các chế độ tải khác nhau.

### Hướng phát triển

Mở rộng phần cứng:

* Kết nối động cơ BLDC thực tế và encoder để kiểm tra hệ thống trong môi trường thực.
* Đo dòng điện từ shunt resistor hoặc cảm biến dòng chuyên dụng thay vì mạng điện trở giả lập.
* Nâng cao thuật toán:
* Thêm các vòng điều khiển cao hơn như vòng tốc độ và vòng vị trí.
* Sử dụng các thuật toán điều khiển tiên tiến hơn như MPC (Model Predictive Control) hoặc Sliding Mode Control.
* Tối ưu hóa phần mềm:
* Tối ưu thuật toán trên STM32 để giảm thời gian tính toán, cải thiện hiệu suất.
* Tích hợp giao diện điều khiển và giám sát qua máy tính hoặc giao thức truyền thông như CAN hoặc UART.

***Tóm tắt:***

Đồ án đã thành công trong việc xây dựng một hệ thống điều khiển động cơ BLDC bằng phương pháp FOC trên nền tảng STM32 và SimpleFOC Shield. Dù chưa sử dụng động cơ thực tế, các thuật toán cơ bản đã được kiểm tra và sẵn sàng để triển khai trên phần cứng đầy đủ. Đây là bước đệm quan trọng để tiếp tục phát triển hệ thống điều khiển hoàn thiện hơn trong tương lai.