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 ỨNG DỤNG CHUẨN TRUYỀN THÔNG CANOPEN CHO ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG CƠ

Người hướng dẫn: **T.S NGUYỄN KHÁNH QUANG**
Cán bộ hướng dẫn: **T.S NGUYỄN ĐĂNG KHOA**
Sinh viên thực hiện:
1. NGUYỄN LƯƠNG PHONG – 105200420 – 20TDHCLC2
2. HUỲNH ĐỨC TRUNG – 105200433 – 20TDHCLC2

Đà Nẵng, 6/2025

TÓM TẮT

Tên đề tài: ***Nghiên cứu và ứng dụng chuẩn truyền thông CANopen cho điều khiển động cơ***

Sinh viên thực hiện: Nguyễn Lương Phong Số thẻ SV: 105200420

Huỳnh Đức Trung 105200433

Lớp: 20TDHCLC2

Nội dung tóm tắt đề tài:

Đề tài tập trung nghiên cứu và ứng dụng giao thức truyền thông CANopen vào hệ thống điều khiển động cơ BLDC. Thông qua việc sử dụng vi điều khiển STM32 và thư viện CANopenNode, nhóm đã xây dựng hệ thống truyền nhận dữ liệu thời gian thực giữa các thiết bị, đảm bảo độ tin cậy và khả năng mở rộng. Đồng thời, đề tài cũng phát triển phần mềm giao diện giám sát điều khiển bằng Qt Creator giúp quản lý thông số dễ dàng.

Mục đích đề tài:

- Ứng dụng giao thức truyền thông CANopen để xây dựng hệ thống điều khiển động cơ BLDC có độ tin cậy và khả năng truyền thông thời gian thực.
- Nâng cao tính ổn định, hiệu quả trong điều khiển các thiết bị trong công nghiệp.
- Tìm hiểu và áp dụng thư viên mã nguồn mở CANopenNode trên nền tảng STM32.
- Tạo nền tảng cho việc tích hợp hệ thống điều khiển theo chuẩn công nghiệp trong các ứng dụng thực tế.

Kết quả đạt được:

- Xây dựng thành công hệ thống điều khiển động cơ BLDC sử dụng giao thức CANopen trên vi điều khiển STM32.
- Thiết kế và triển khai được giao diện giám sát – điều khiển động cơ trên máy tính bằng phần mềm QT Creator, giao tiếp qua CAN USB Adapter.
- Hệ thống truyền thông ổn định, dữ liệu được truyền nhận chính xác với độ trễ thấp và khả năng đồng bộ cao.

Phụ lục 01

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA ĐIỆN

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

NHIỆM VỤ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

TT	Họ tên sinh viên	Số thẻ SV	Lớp	Ngành
1	Nguyễn Lương Phong	105200420	20TDHCLC2	Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa
2	Huỳnh Đức Trung	105200433	20TDHCLC2	Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa

1. *Tên đề tài đồ án:*

Nghiên cứu và ứng dụng chuẩn truyền thông CANopen cho điều khiển động cơ

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:*
   - Datasheet vi điều khiển STM32F446RE
   - Tài liệu về giao thức CAN và chuẩn CANopen
   - Tài liệu kỹ thuật động cơ BLDC
   - Thư viện CANopenNode và CANopenNodeSTM32
4. *Nội dung các phần thuyết minh và tính toán:*

a. Phần chung:

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung
1	Nguyễn Lương Phong	Nghiên cứu chuẩn truyền thông CANopen, giao thức CAN và ứng dụng trong điều khiển động cơ. Phân tích hệ thống điều khiển tổng thể của hệ thống. Đề xuất giải pháp ứng dụng chuẩn CANopen trong điều khiển động cơ BLDC. Phân chia nhiệm vụ, phối hợp giữa hai thành viên để hoàn thiện hệ thống truyền thông – giám sát – điều khiển theo chuẩn công nghiệp.
2	Huỳnh Đức Trung	

b. Phần riêng:

TT	Họ tên sinh viên	Nội dung
1	Nguyễn Lương Phong	Thiết kế và viết chương trình giao diện giám sát điều khiển động cơ bằng phần mềm QTCreator. Tạo Object Dictionary và thực hiện lập trình thu – gửi dữ liệu giữa giao diện người dùng trên máy tính và STM32F446RE sử dụng thư viện CANopen và kết nối thông qua USB CAN Adapter.

		Tối ưu giao diện thân thiện người dùng, dễ vận hành và giám sát.
2	Huỳnh Đức Trung	Cấu hình và sử dụng thư viện CANopenNode cho STM32F446RE. Tổ chức truyền nhận dữ liệu STM32 và phần mềm giám sát trên máy tính thông qua USB CAN adapter. Viết chương trình truyền thông trên STM32 sử dụng HAL + CANopenNode để kết nối với giao diện điều khiển.

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

6. Họ tên người hướng dẫn:	*Phần/ Nội dung:*
T.S Nguyễn Khánh Quang	- Giám sát tiến độ thực hiên - Kiểm tra và cho ý kiến dựa trên phần công việc đã hoàn thành.
T.S Nguyễn Đăng Khoa	- Hướng dẫn kiến thức thực tế. - Cung cấp tài liệu tham khảo.

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

8. Ngày hoàn thành đồ án: 2/6/2025

Đà Nẵng, ngày 16 tháng 6 năm 2025

Trưởng Bộ môn Tự động hóa	**Người hướng dẫn**
TS. Giáp Quang Huy	T.S Nguyễn Khánh Quang

Phụ lục 02

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA ĐIỆN

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

PHIẾU KIỂM SOÁT TIẾN ĐỘ LÀM ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP

(Phiếu dành cho người hướng dẫn/sinh viên)

Họ tên sinh viên: Nguyễn Lương Phong Số thẻ SV : 105200420

Huỳnh Đức Trung 105200433

Tên đề tài ĐATN: Nghiên cứu và ứng dụng chuẩn truyền thông CANopen cho điều khiển động cơ

Họ tên người HD: T.S Nguyễn Khánh Quang Đơn vị: Trường Đại học Bách Khoa Đà Nẵng

Tuần	**Ngày**	**Khối lượng**		**GVHD ký tên**
		đã thực hiện (%)	**tiếp tục thực hiện (%)**	
1	17/2/2025	5%	95%	
2	23/2/2025	10%	90%	
3	3/3/2025	15%	85%	
4	10/3/2025	Duyệt lần 1: Đánh giá khối lượng hoàn thành _____ % : Được tiếp tục làm ĐATN □ Không tiếp tục thực hiện ĐATN □		
5	17/3/2025	25%	75%	
6	24/3/2025	35%	65%	
7	31/3/2025	50%	50%	
8	7/4/2025	Duyệt lần 2: Đánh giá khối lượng hoàn thành _____ % : Được tiếp tục làm ĐATN □ Không tiếp tục thực hiện ĐATN □		
9	14/4/2025	65%	35%	
10	21/4/2025	75%	25%	
11	28/4/2025	85%	15%	
12	5/5/2025	Duyệt lần 3: Đánh giá khối lượng hoàn thành _____ % : Được tiếp tục làm ĐATN □ Không tiếp tục thực hiện ĐATN □		
13	12/5/2025	90%	10%	

14	19/5/2025	95%	5%	
15	26/5/2025	98%	2%	
16	2/6/2025	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 đã nhận được sự giảng dạy tận tình, sự hướng dẫn chu đáo cùng sợ hỗ trợ nhiệt tình từ các giảng viên Khoa Điện cũng như toàn thể cán bộ giảng viên của nhà trường. Chúng em xin chân thành cảm ơn tất cả các thầy cô đã truyền đạt cho chúng em những kiến thức chuyên môn cùng những kinh nghiệm thực tiễn quý báu, giúp chúng em tự tin bước vào cuộc sống.

Đặc biệt, chúng em xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến Thầy Nguyễn Khánh Quang, Tiến sĩ – Giảng viên Khoa Điện – Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng và Thầy Nguyễn Đăng Khoa, Tiến sĩ – Giám đốc Công ty Sybotix Solution, đã tận tình hướng dẫn, giải đáp những thắc mắc, đóng góp ý kiến và tạo mọi điều kiện thuận lợi cho chúng em trong suốt quá trình thực hiện và hoàn thành đồ án tốt nghiệp. Nhờ sự hỗ trợ quý báu của thầy, chúng em đã hoàn thành đồ án đúng tiến độ đề ra.

Chúng em cũng xin gửi lời cảm ơn chân thành đến gia đình và bạn bè đã luôn động viên, khích lệ và hỗ trợ chúng em cả về vật chất lẫn tinh thần trong suốt quá trình học tập và thực hiện đồ án tốt nghiệp này.

Mặc dù đã cố gắng hoàn thành đồ án với tinh thần trách nhiệm cao nhất, song chắc chắn không tránh khỏi các thiết sót. Chúng em rất mong nhận được sự cảm thông từ quý Thầy Cô và huy vọng sẽ nhận được những ý kiến đóng góp quý báu để hoàn thiện hơn nữa đồ án của chúng em.

Chúng em chân thành cảm ơn!

LỜI CAM ĐOAN LIÊM CHÍNH HỌC THUẬT

Chúng em là Nguyễn Lương Phong và Huỳnh Đức Trung, xin cam đoan rằng:

1. Đồ án tốt nghiệp với đề tài "Nghiên cứu và ứng dụng chuẩn truyền thông CANopen cho điều khiển động cơ" là kết quả nghiên cứu và làm việc chính của chúng em dưới sự hướng dẫn trực tiếp của T.S Nguyễn Khánh Quang và T.S Nguyễn Đăng Khoa.
2. Toàn bộ nội dụng trong đồ án được thực hiện dựa trên kiến thức, công sức và sự hợp tác giữa hai thành viên trong nhóm. Tất cả tài liệu tham khảo, trích dẫn trong đồ án đều được ghi rõ tên tác giả, ngày xuất bản và nguồn tài liệu một cách đầy đủ và chính xác.
3. Nếu có bất kỳ hành vi sao chép, gian lận học thuật hoặc vi phạm quy chế đào tạo nào được phát hiện trong quá trình thực hiện và nộp đồ án, chúng em xin hoàn toàn chịu trách nhiệm trước nhà trường và pháp luật.

Sinh viên thực hiện

Nguyễn Lương Phong **Huỳnh Đức Trung**

MỤC LỤC

DANH SÁCH HÌNH ẢNH

DANH SÁCH BẢNG

DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT

STT	Ký hiệu	Chữ viết đầy đủ	Giải nghĩa
1	CAN	Controller Area Network	Mạng điều khiển vùng
2	ECU	Electronic Control Unit	Bộ điều khiển điện tử
3	MCU	Microcontroller Unit	Vi điều khiển
4	IDE	Identifier Extension	Bit mở rộng mã định danh khung CAN
5	RTR	Remote Transmission Request	Bit yêu cầu truyền
6	DLC	Data Length Code	Mã độ dài dữ liệu
7	CRC	Cyclic Redundancy Check	Mã kiểm tra lỗi
8	ACK	Acknowledgement	Bit xác nhận
9	EOF	End of Frame	Kết thúc khung dữ liệu
10	IFS	Interframe Space	Khoảng cách giữa hai khung
11	LLC	Logical Link Control	Điều khiển liên kết logic
12	MAC	Medium Access Control	Điều khiển truy cập môi trường
13	CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection	Đa truy cập cảm biến sóng mang với phát hiện va chạm
14	PDO	Process Data Objects	Đối tượng dữ liệu quá trình
15	SDO	Service Data Objects	Đối tượng dữ liệu dịch vụ
16	NMT	Network Management Services	Dịch vụ quản lý mạng
17	SOF	Start of Frame	Bit bắt đầu khung dữ liệu
18	SRR	Substitute Remote Request	Bit thay thế RTR trong khung mở rộng

MỞ ĐẦU

1. Mục đích thực hiện đề tài

Hiện nay, trong lĩnh vực điều khiển tự động, yêu cầu về việc trao đổi dữ liệu nhanh chóng, tin cậy giữa các thiết bị ngày càng trở nên cấp thiết. Chuẩn truyền thông CANopen, phát triển từ giao thức CAN, đã và đang được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống công nghiệp, đặc biệt là trong điều khiển động cơ, nhờ khả năng đáp ứng yêu cầu giao tiếp tốc độ cao và tính đồng bộ.

Trước thực tế đó, đề tài "Nghiên cứu và ứng dụng chuẩn truyền thông CANopen cho điều khiển động cơ" được thực hiện nhằm tìm hiểu sâu về nguyên lý hoạt động, đặc điểm của CANopen, đồng thời triển khai ứng dụng thực tế vào bài toán điều khiển động cơ, góp phần nâng cao tính linh hoạt hiệu quả trong các hệ thống điều khiển công nghiệp.

2. Mục tiêu của đề tài

- Nghiên cứu lý thuyết giao thức CAN và chuẩn truyền thông CANopen.
- Thiết kế và xây dựng mô hình điều khiển động cơ sử dụng giao thức CANopen.
- Đánh giá hiệu quả truyền thông, giảm sai số và nâng cao độ tin cậy hệ thống.

3. Phạm vi và đối tượng nghiên cứu

- Đề tài tập trung vào nghiên cứu, triển khai CANopen cho hệ thống điều khiển động cơ BLDC. Đối tượng nghiên cứu là các thiết bị nhúng, vi điều khiển và phần mềm hỗ trợ giao thức CANopen.

4. Phương pháp nghiên cứu

- Nghiên cứu tài liệu chuyên ngành, thiết kế phần cứng trên STM32, cấu hình Object Dictionary bằng phần mềm chuyên dụng. Thực hiện lập trình, mô phỏng và kiểm thử hệ thống truyền thông. Cuối cùng là phân tích kết quả thực nghiệm để đánh giá và rút ra kết luận.

5. Kết cấu của đồ án tốt nghiệp

Chương 1: Cơ sở lý thuyết

Chương 2: Thiết kế hệ thống truyền thông

Chương 3: Phân tích thiết kế hệ thống điều khiển FOC

Chương 4: Lưu đồ thuật toán

Chương 5: Triển khai phần mềm trên STM32

Chương 6: Xây dựng phần mềm điều khiển động cơ bằng QT

Chương 7: Kết quả thực nghiệm và hướng phát triển

CHƯƠNG 1: CƠ SỞ LÝ THUYẾT

1.1 Tổng quan về mạng CAN

1.1.1 Giới thiệu về mạng CAN

Controller Area Network (CAN) là giao thức giao tiếp nối tiếp hỗ trợ mạnh cho những hệ thống điều khiển thời gian thực phân bố với độ ổn định, bảo mật và đặc biệt chống nhiễu cực kỳ tốt.

Việc phát triển mạng CAN được bắt đầu từ năm 1983 bởi "Công ty Robert Bosch GmbH". Sau đó, giao thức được chính thức công bố vào năm 1986 tại đại hội Hiệp hội Kĩ sư ô tô "Society of Automotive Engineers, SAE" ở Detroit, Michigan, Mỹ. Những chip CAN controller đầu tiên được Intel sản xuất vào năm 1987, và sau đó là bởi Philips. Xe Mercedes-Benz W140 là xe đầu tiên được trang bị CAN.

Ngay từ khi mới ra đời, mạng CAN đã được chấp nhận và ứng dụng một cách rộng rãi trong các lĩnh vực công nghiệp, chế tạo ô tô, xe tải. Với thời gian, CAN càng trở nên thông dụng hơn vì tính hiệu quả, ổn định, đơn giản và đặc biệt là chi phí rẻ. Nó được sử dụng với với việc truyền dữ liệu lớn, đáp ứng thời gian thực và trong các môi trường khác nhau. Cuối cùng, truyền tốc độ cao rất ổn đỉnh. Đó là lý do tại sao chúng được sử dụng trong nhiều ngành công nghiệp khác ngoài xe hơi như các máy nông nghiệp, tàu ngầm, các dụng cụ y khoa, máy dệt.

Điểm nổi trội nhất ở chuẩn CAN là tính ổn định và an toàn. Nhờ cơ chế phát hiện và xử lý lỗi cực mạnh, lỗi CAN messages hầu như được phát hiện. Theo thống kê, xác suất để một message của CAN bị lỗi không được phát hiện là:

Probability of Non-detected
Faulty CAN Standard Frames:

$$\rho < 4.7 \times 10^{-11} \times \text{error rate}$$

Example: 1 bit error each 0.7s,
500kbit/s, 8h/day, 365days/year
Statistical average:
1 undetected error in 1000 years

Hình 1.1 Tính ổn định của CAN

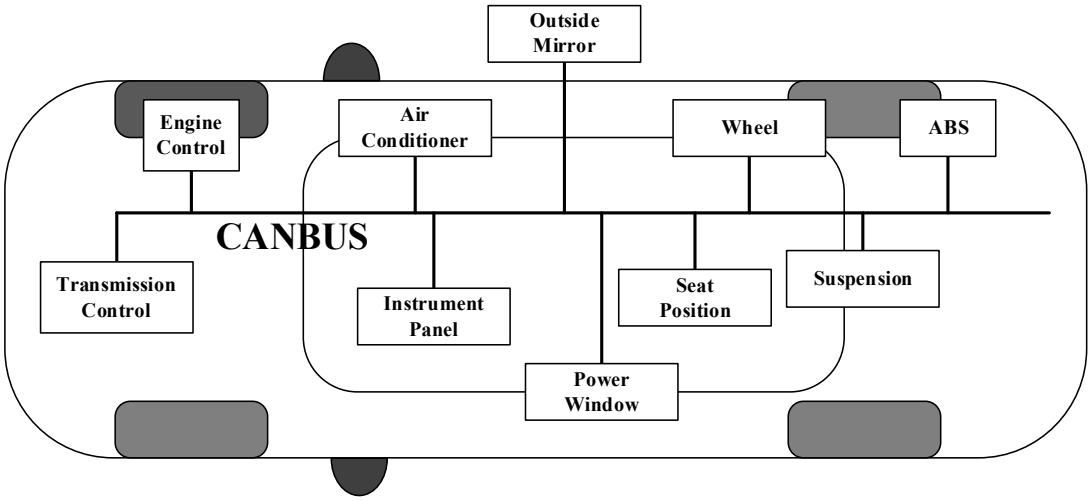
Ví dụ: Cho rằng nếu giả sử cứ 0.7s thì môi trường tác động lên đường truyền CAN làm lỗi 1 bit. Và giả sử tốc độ truyền là 500kbit/s. Hoạt động 8h/ngày và 356 ngày/năm. Thì trong vòng 1000 năm trung bình sẽ có một frame bị lỗi mà không phát hiện.

1.1.2 Miền ứng dụng của CAN

Mạng truyền thông CAN đã trở thành tiêu chuẩn quan trọng trong các hệ thống nhúng hiện đại, đặc biệt là trong ngành công nghiệp ô tô. Với khả năng truyền thông tin nhanh, tin cậy và giảm thiểu số lượng dây nối, CAN không chỉ được dùng trong xe hơi mà còn được ứng dụng rộng rãi trong tự động hóa công nghiệp, thiết bị y tế, điều khiển robot, và các hệ thống giám sát từ xa.

Trong các dòng xe hiện đại, thường tồn tại hai mạng CAN riêng biệt:

- CAN tốc độ cao (High-speed CAN): hoạt động ở tốc độ lên đến 1Mbps, phụ vục cho các chức năng quan trọng như thời gian thực như: điều khiển động cơ, hộp số, hệ thống phanh ABS,…
- CAN tốc độ thấp (Low-speed CAN): tốc độ thấp hơn (125kbps hoặc thấp hơn), sử dụng cho các hệ thống không yêu cầu thời gian thực như: gương chiếu hậu, cửa kính điện, điều chỉnh ghế, điều hòa không khí,…



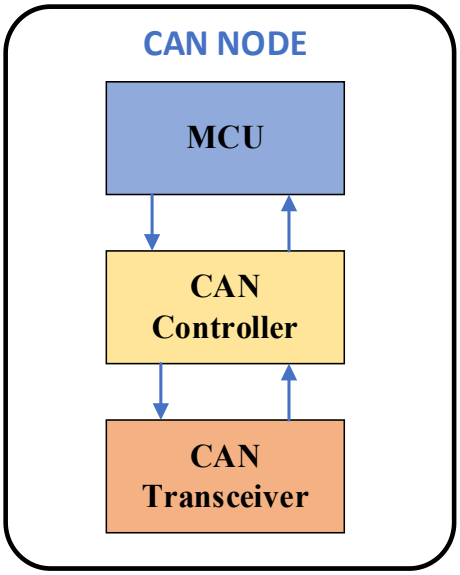
Hình 1.2 Ứng dụng mạng CAN trong điều khiển xe hơi

Như hình 1.2, CANbus kết nối các bộ điều khiển điện tử ECU với nhau, hình thành một hệ thống mạng linh hoạt và hiệu quả, nơi các ECU có thể giao tiếp với nhau mà không cần bộ điều khiển trung tâm. Điều này giúp tăng độ tin cậy, giảm chi phí dây dẫn và dễ dàng mở rộng hệ thống.

1.1.3 Cấu trúc mạng và kỹ thuật truyền dẫn trong mạng CAN

1.1.3.1 Cấu trúc mạng

Mỗi ECU trong mạng CAN gồm ba thành phần chính: Vi điều khiển (MCU), CAN Controller, và CAN Transceiver.



Hình 1.3 Cấu tạo phần cứng của một NodeCAN

Dưới đây là chi tiết chức năng và cách hoạt động của từng thành phần

a. Vi điều khiển (MCU): Vi điều khiển là "bộ não" của ECU, chịu trách nhiệm xử lý dữ liệu và điều khiển luồng thông tin. Nó nhận và phân tích dữ liệu từ CAN Controller sau khi thông tin được truyền qua BUS và chuẩn bị dữ liệu để gửi đến các ECU khác thông qua CAN Controller.

- Quy trình hoạt động của MCU:

  Khi nhận dữ liệu

  Dữ liệu từ bus CAN được CAN Controller giải mã và gửi đến vi điều khiển.

  MCU sẽ:

  + Giải mã nội dung tin nhắn (message).
  + Xử lý và ra quyết định dựa trên thông tin nhận được (ví dụ: điều khiển động cơ, bật đèn...).

  Khi truyền dữ liệu

  + Vi điều khiển tạo ra thông điệp (message) và gửi thông điệp đó đến CAN Controller để truyền đi trên BUS.

b. CAN Controller: CAN Controller là giao diện giữa Vi điều khiển và bus CAN. Nó đảm bảo việc truyền nhận dữ liệu tuân thủ theo giao thức truyền thông CAN.

- Quy trình hoạt động của CAN Controller:

  Khi truyền dữ liệu
  + Nhận dữ liệu từ vi điều khiển, định dạng lại thành một khung CAN (CAN frame), gồm các trường như ID, DLC, Data Field, CRC, EOF....
  + Theo dõi bus CAN (qua cơ chế Arbitration) để đảm bảo bus đang rảnh (không bị chiếm dụng).
  + Truyền dữ liệu nối tiếp trên bus thông qua CAN Transceiver.

  Khi nhận dữ liệu
  + Lắng nghe tín hiệu trên bus CAN.
  + Lưu trữ các bit nhận được và kiểm tra các trường hợp như lỗi CRC, lỗi khung.
  + Khi nhận đủ một khung CAN hoàn chỉnh (được đánh dấu bằng EOF - End of Frame), thông báo cho vi điều khiển rằng có dữ liệu mới cần xử lý.

c. CAN Transceiver: CAN Transceiver là bộ chuyển đổi tín hiệu giữa CAN Controller và bus CAN vật lý. Nó đảm bảo tín hiệu truyền trên bus phù hợp với đặc tính của giao thức CAN.

- Quy trình hoạt động của CAN Transceiver:

  Khi nhận dữ liệu từ bus
  + CAN bus sử dụng tín hiệu vi sai (differential signals) giữa hai dây CAN_H và CAN_L.
  + CAN Transceiver chuyển đổi tín hiệu vi sai này thành tín hiệu mức logic (nhị phân) mà CAN Controller có thể hiểu được (bit 0 hoặc 1).
  + Chuyển tín hiệu nhị phân đến CAN Controller để xử lý.

  Khi truyền dữ liệu từ bus
  + Nhận dữ liệu nhị phân từ CAN Controller.
  + Chuyển đổi dữ liệu nhị phân thành tín hiệu vi sai phù hợp với tiêu chuẩn điện áp trên bus CAN.
  + Truyền tín hiệu vi sai này lên bus CAN, đảm bảo tương thích với các ECU khác.

d. Tổng quan về truyền và nhận dữ liệu trên ECU

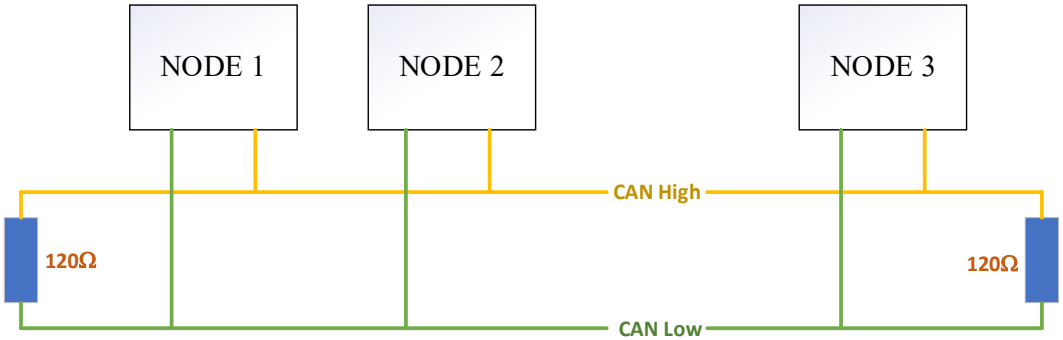
- Khi truyền dữ liệu
  + Vi điều khiển: Tạo ra thông điệp (data) và gửi đến CAN Controller.

+ CAN Controller: Định dạng thông điệp thành khung CAN và gửi dữ liệu nhị phân đến CAN Transceiver.
+ CAN Transceiver: Chuyển đổi dữ liệu nhị phân thành tín hiệu vi sai trên bus CAN để truyền đi.

- Khi nhận dữ liệu
  + CAN Transceiver: Chuyển tín hiệu vi sai trên bus CAN thành dữ liệu nhị phân.
  + CAN Controller: Lưu trữ các bit nhận được, kiểm tra lỗi, và thông báo khi nhận đủ một khung hoàn chỉnh.
  + Vi điều khiển: Nhận dữ liệu từ CAN Controller, xử lý, và thực hiện các hành động cần thiết.

1.1.4 Cơ chế truyền nhận trên dây

CAN sử dụng hai dây để giao tiếp. Các dây được gọi là CAN High và CAN Low. CAN kết nối với tất cả các thành phần trên mạng thông qua hai dây này. Trong CAN không hề phân biệt Master và Slave như một số giao thức khác.

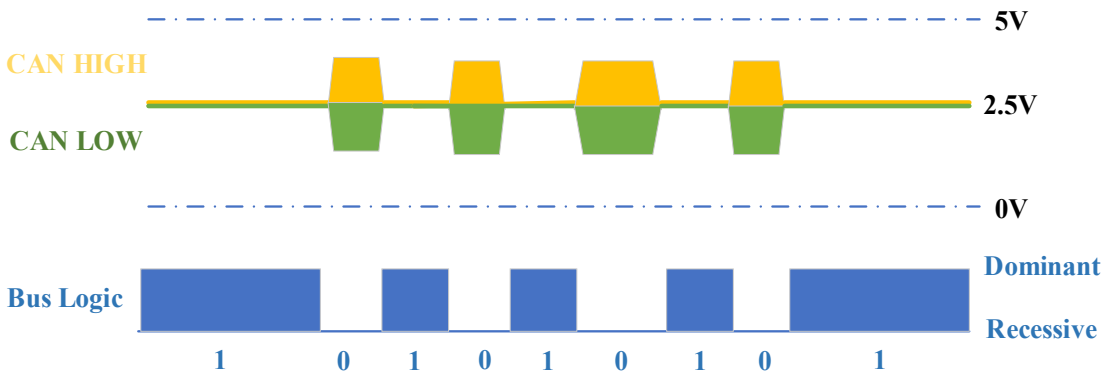


Hình 1.4 Các Node trên hệ thống CAN

Các điểm đầu và cuối của CAN thường được nối bằng bằng điện trở 120 Ohm, điện trở này được gọi là Terminator Resistor.

Không giống như một số giao thức khác trong việc sử dụng mức điện áp trên dây so với GND để quy đổi ra bit logic, CAN sử dụng mức chênh lệch điện áp giữa 2 dây để quy đổi. Những thay đổi về mức điện áp này sau đó được dịch sang mức logic.

Như vậy, việc kết nối giữa các node CAN yêu cầu phải đảm bảo đúng chuẩn về điện trở và chiều dài để tín hiệu truyền đi ổn định. Sau khi thiết lập kết nối vật lý, các tín hiệu logic trên đường truyền CAN sẽ thể hiện bằng sự chênh lệch điện áp giữa hai dây CAN_H và CAN_L. Để hiểu rõ hơn về cách mã hóa tín hiệu logic 0 và 1, ta xét hình minh họa sau:

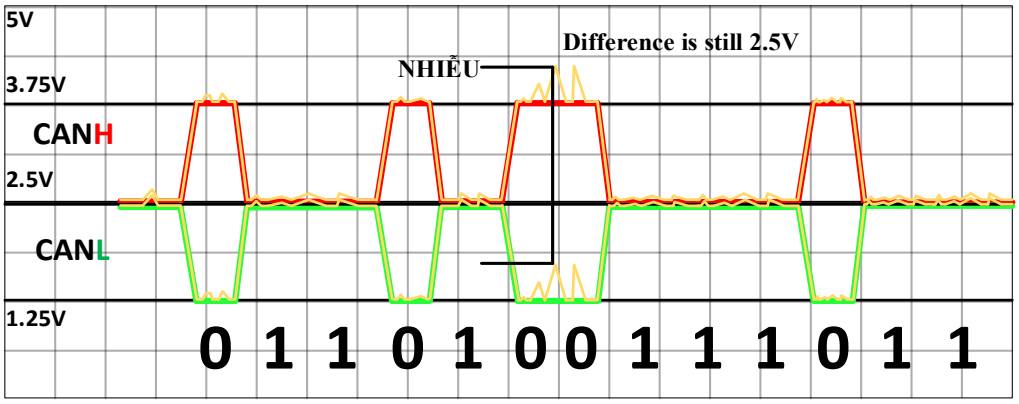


Hình 1.5 Logic 0 và Logic 1 trên CANBus

Thông thường, giá trị điện áp cao nhất ở dây CAN High là 3.5V, điện áp thấp nhất là 2.5V. Ở dây CAN low điện áp thấp nhất là 1.5V và cao nhất là 2.5V:

- Mức logic 0: Khi VCANH – VCANL = 2.5V. Hay mức chênh lệch điện áp 2 dây là 2.5V.
- Mức logic 1: Khi VCANH – VCANL = 0V. Hay khi cả hai dây đều có điện áp 2.5V.

  Đó chính là lí do tại sao CAN lại có khả năng kháng nhiễu rất tốt. Đơn giản, khi có nhiễu tác động lên CANbus điều khiển mức điện áp giữa hai dây cùng thay đổi, cùng tăng hoặc cùng giảm nhưng mức chênh lệch điện áp giữa 2 dây không thây đổi nhiều.



Hình 1.6 Khả năng kháng nhiễu của giao tiếp CAN

1.1.5 Cấu trúc bức điện

Trong mạng CAN dữ liệu giữa các thiết bị được trao đổi thông quan các gói tin được gọi là bức điện (CAN Frame). Mỗi bức điện bao gồm nhiều trường cụ thể nhằm đảm bảo việc giao tiếp được ổn định, đúng thứ tự và phát hiện lỗi một cách hiệu quả.

1.1.5.1 Các loại khung truyền

Trong giao thức CAN, dữ liệu được truyền giữa các thiết bị dưới dạng bức điện (Message Frame). Bức điện chứa các trường cụ thể để đảm bảo giao tiếp hiệu quả, đáng tin cậy và đúng thứ tự. Các loại bức điện (CAN Frames) bao gồm:

a. Data Frame

- Chức năng: Gửi dữ liệu thực tế giữa các thiết bị ECU.
- Đặc điểm:
  + Chứa trường dữ liệu chính: Data Field (0 đến 8 byte).
  + Có Identifier (ID) để xác định độ ưu tiên truyền thông.
- Ý nghĩa: Đây là Frame phổ biến nhất, dùng để truyền thông tin cảm biến, trạng thái, lệnh điều khiển giữa các thiết bị trong mạng CAN.

b. Remote Frame

- Chức năng: Một node yêu cầu một node khác gửi dữ liệu.
- Đặc điểm:
  + Không có trường Data Field.
  + Bit RTR được đặt thành 1.
- Ứng dụng: Ví dụ, thiết bị giám sát muốn yêu cầu dữ liệu từ cảm biến thì nó sẽ gửi một remote frame, thiết bị kia sẽ phản hồi bằng data frame.

c. Error Frame

- Chức năng: Báo hiệu có lỗi trên bus CAN.
- Đặc điểm:
  + Gửi bởi thiết bị phát hiện lỗi (bất kỳ thiết bị nào cũng có thể gửi).
  + Chứa các Error Flags để cảnh bảo lỗi.
- Cơ chế hoạt động: Mạng CAN có khả năng tự phát hiện và sửa lỗi, nếu một thiết bị nhận thấy lỗi CRC, lỗi định dạng,… nó sẽ phát một Error Frame để toàn bộ mạng được biết.

d. Overload Frame

- Chức năng: Tạm dừng giao tiếp khi thiết bị cần thêm thời gian xử lý.
- Đặc điểm:
  + Gửi bởi thiết bị đang bị quá tải xử lý.
  + Chứa Overload Flags (6-12 bit).
- Ứng dụng: Trong trường hợp thiết bị nhận chưa kịp xử lý dữ liệu, nó sẽ gửi Overload Frame để trì hoãn việc truyền tiếp theo, giúp hệ thống không bị nghẽn.

Bảng 1.1 Các loại Frame trong giao tiếp CAN

Loại bức điện (Frame)	Chức năng chính	Đặc điểm
Data Frame	Truyền dữ liệu thực tế giữa các ECU	- Chứa dữ liệu trong trường Data Field (0-8 byte). - ID xác định ưu tiên truyền thông.
Remote Frame	Yêu cầu dữ liệu từ một ECU khác trên bus	- Không có Data Field. - Bit RTR được đặt thành 1 (Remote).
Error Frame	Báo hiệu rằng một lỗi xảy ra trên bus CAN	- Được gửi bởi thiết bị phát hiện lỗi. - Bao gồm trường lỗi đặc biệt (Error Flags) để thông báo.
Overload Frame	Tạm dừng giao tiếp do thiết bị cần thêm thời gian để xử lý	- Được gửi khi thiết bị nhận cảm thấy quá tải. - Bao gồm Overload Flags (6-12 bit).

1.1.6 Cấu trúc chi tiết gói tin trong giao thức CAN

Gói truyền trên mạng CAN bao gồm nhiều trường khác nhau để đảm bảo truyền thông chính xác, phát hiện lỗi và quản lý quyền ưu tiên. Mỗi trường đóng vai trò riêng biệt:

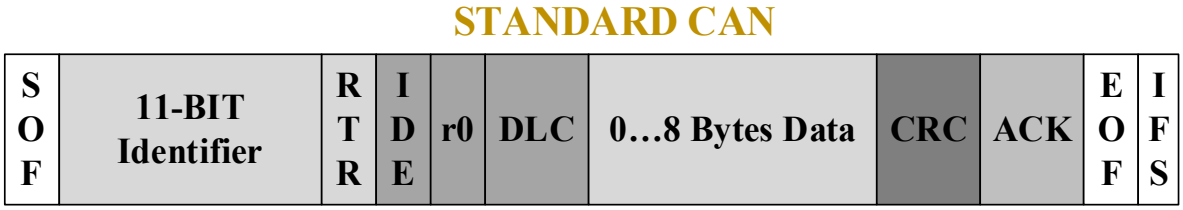
Bảng 1.2 Cấu trúc và ý nghĩa các trường trong Frame CAN

Thành phần	Số bit	Mô tả
SOF	1 bit	- Bit bắt đầu của khung truyền, luôn có giá trị **0**. - Thông báo rằng một ECU muốn truyền dữ liệu.
Arbitration Field	12 hoặc 30 bit	ID (Identifier): - Định danh của ECU gửi dữ liệu. - Quyết định mức độ ưu tiên (ID càng thấp, ưu tiên càng cao).
		RTR (Remote Transmission Request): - 1 bit xác định loại khung.

		- 0: Data Frame. - 1: Remote Frame.
Control Field	1 bit	IDE (Identifier Extension): - Kiểm tra định dạng gói tin 0: Standard Frame 1: Extended Frame.
Data Field	0-8 byte	Chứa dữ liệu thực tế được truyền (ví dụ: giá trị cảm biến, lệnh điều khiển).
CRC Field	15 bit	Mã kiểm tra lỗi để phát hiện dữ liệu hỏng trong quá trình truyền.
ACK Field	2 bit	- Bit xác nhận từ ECU nhận. - ACK Slot: ECU nhận dữ liệu đặt bit này về 0 để báo nhận thành công.
EOF	7 bit	Đánh dấu kết thúc khung truyền, chuẩn bị cho bus quay lại trạng thái nhàn rỗi.

1.1.6.1 Gói tin Standard CAN (chuẩn 11-bit ID)

Gói tin dạng chuẩn (Standard CAN) là định dạng cơ bản nhất của giao thức CAN, sử dụng mã định danh dài 11 bit. Đây là lựa chọn phổ biến trong các hệ thống có số lượng node vừa phải như mạng truyền thông nội bộ trong ô tô.



Hình 1.7 Cấu trúc gói tin Standard CAN

Bảng 1.3 Cấu trúc gói tin của Standard CAN

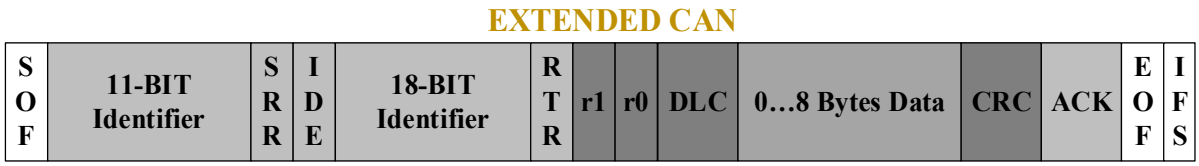
Thành phần	Số bit	Chức năng
Start of Frame	1	Báo hiệu bắt đầu một gói tin
Identifier	11	Mã định danh thông điệp, đồng thời là căn cứ để xác định mức ưu tiên khi tranh quyền
RTR	1	Bit yêu cầu dữ liệu: - 0 cho Data Frame - 1 cho Remote Frame
IDE	1	Xác định kiểu gói tin: "0" biểu thị khung chuẩn
r0	1	Bit dự phòng cho khả năng mở rộng sau này

DLC	4	Chỉ định số byte dữ liệu (0 đến 8).
Data Field	0-64	Dữ liệu thực tế (tối đa 8 byte)
CRC	15+1	Kiểm tra lỗi bằng mã CRC, gồm chuỗi CRC và bit phân cách
ACK	2	Phản hồi từ các node nhận: nếu nhận thành công sẽ ghì đè bit "0"
EOF	7	Đánh dấu kết thúc gói tin
IFS	≥3	Khoảng nghỉ trước gói tiếp theo

Đặc điểm nổi bật của Stardand CAN là có mã định danh 11 bit đáp ứng phần lớn ứng dụng công nghiệp thông thường có thể tạo 2048 ID khác nhau. Có tốc độ xử lí nhanh hơn vì khung dữ liệu ngắn và phù hợp với mạng truyền thông có quy mô nhỏ hoặc trung bình.

1.1.6.2 Gói tin Extended CAN (Mở rộng 29-bit ID)

Khi hệ thống cần phân biệt nhiều loại thông điệp hoặc có số lượng node lớn, gói tin mở rộng sẽ được sử dụng. Định dạng này cho phép sử dụng 29-bit để làm mã định danh, mở rộng không gian địa chỉ hóa lên đến hơn 500 triệu ID.



Hình 1.8 Cấu trúc gói tin Extended CAN

Bảng 1.4 Cấu trúc gói tin Extended CAN

Thành phần	Số bit	Chức năng
SOF	1	Bắt đầu khung dữ liệu
11-bit Base ID	11	Phần đầu của mã định danh
SRR	1	Bit thay thế cho RTR trong khung mở rộng luôn luôn là "1"
IDE	1	Đặt là "1" để báo hiệu đây là gói tin mở rộng
18-bit Extended ID	18	Phần mở rộng giúp hoàn chỉnh mã định danh 29 bit
RTR	1	- 0 là truyền dữ liệu - 1 là yêu cầu dữ liệu
r1, r0	2	Các bit dự phòng, gửi là 0
DLC	4	Mã hóa số lượng byte dữ liệu gửi đi
Data Field	0-64	Tối đa 8 byte dữ liệu.
CRC	15+1	Kiểm tra lỗi truyền thông
ACK	2	Phản hồi từ các node nhận dữ liệu thành công

EOF	7	Kết thúc gói tin
IFS	≥3	Khoảng nghĩ giữa hai gói

Đặc điểm nổi bật của Extended CAN là có tổng cộng 29-bit mã định danh nên có thể tạo được hơn 500 triệu mã ID khác nhau. Hữu ích trong các mạng lớn, hệ thống phân lớp thông điệp phức tạp. Vì mã định danh dài hơn nên thời gian truyền cũng lâu hơn so với khung chuẩn.

1.1.6.3 So sánh giữa Standard và Extended CAN.

Trong giao thức CAN, việc lựa chọn sử dụng định dạng khung chuẩn (Standand Frame) hay khung mở rộng (Extendend Frame) ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng định danh, tốc độ truyền và hiệu quả hệ thống. Cả hai loại đều tuân thủ quy tắc truyền dữ liệu CAN, nhưng có một số khác biệt quan trọng về cấu trúc và ứng dụng:

Bảng 1.5 Bảng so sánh giữa Standard CAN và Extended CAN

Tiêu chí	Standard CAN	Extended CAN
Độ dài ID	11 bit	29 bit
Số lượng ID khả dụng	2.048	Hơn 500 triệu
Trường bổ sung	Không	Có SRR, IDE, Extended ID
Thời gian tranh quyền	Ngắn hơn	Dài hơn
Tốc độ truyền	Nhanh hơn	Chậm hơn một chút
Phù hợp với	Mạng nhỏ hoặc phản ứng nhanh	Hệ thống lớn, cần phần loại ID
Khả năng mở rộng hệ thống	Giới hạn	Rất cao

1.1.7 Cơ chế tranh quyền truy cập bus (Arbitration) trong giao thức CAN

Trong hệ thống truyền thông CAN, tất cả các node đều có khả năng chủ động quyền truyền dữ liệu bất cứ lúc nào khi bus đang ở trạng thái rỗi. Tuy nghiên, để tránh va chạm khi nhiều node cùng cố gắng truyền đồng thời, CAN áp dụng một cơ chế tranh quyền thông minh gọi là arbitration. Mục tiêu của arbitration là xác định node nào sẽ giành quyền truyền dữ liệu trước, đảm bảo tính toàn vẹn tín hiệu và không làm mất thông điệp nào trong quá trình tranh quyền.

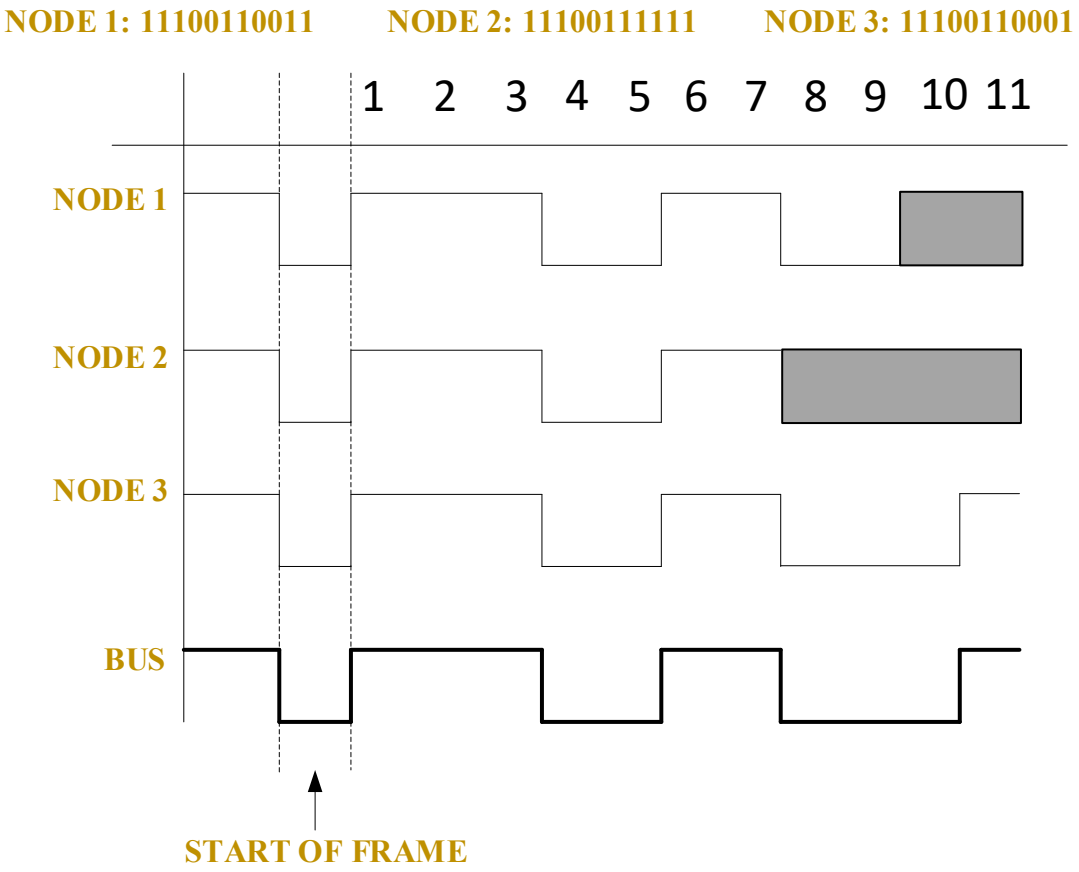
1.1.7.1 Cơ chế hoạt động

Mỗi khung dữ liệu trong CAN đều có một trường Identifier (ID) dài 11bit (chuẩn CAN 2.0A) hoặc 29bit (chuẩn CAN 2.0B mở rộng). Trường này không chỉ định danh thông điệp mà còn đại diện cho mức độ ưu tiên của thông điệp đó. Quy tắc ưu tiên được xác định như sau: ID càng nhỏ, mức độ ưu tiên càng cao.

Quá trình arbitration được thực hiện từng bit một, theo cơ chế so sánh bit mức điện áp:

- Bit logic "0" được gọi là dominant (ưu tiên hơn).
- Bit logic "1" được gọi là recessive (ít ưu tiên hơn).
- Khi hai node cùng gửi, nếu một node gửi "1" mà trên bus xuất hiện "0", node đó hiểu rằng mình đã thua và ngừng truyền ngay lập tức.

Mỗi node vừa truyền vừa lắng nghe bus (tự kiểm tra phản hồi). Nếu node phát hiện giá trị trên bus khác với bit mình gửi (ví dụ đang gửi "1" nhưng bus là "0"), node đó sẽ rút lui khỏi quá trình truyền để tránh xung đột.



Hình 1.9 Mô tả một tình huống tranh quyền truy cập bus giữa ba Node.

Hình ảnh dưới đây mô tả quá trình tranh quyền truy cập bus (arbitration) giữa ba node trong mạng CAN. Mỗi node đều có một khung dữ liệu frame cần gửi và bắt đầu truyền đồng thời sau khi bus trở về trạng thái lỗi. Cơ chế arbitration trong CAN đảm bảo rằng node có thông điệp quan trọng nhất (có mã định danh – ID – nhỏ nhất) sẽ được quyền truyền trước, còn các node khác sẽ tạm ngưng mà không gây va chạm trên bus.

Ba node có ID là 11bit có ID như sau:

- Node 1: 11100110011

- Node 2: 11100111111
- Node 3: 11100110001

Từ trái sang phải, các bit ID được truyền từ bit quan trọng nhất (bit 1) đến bit ít quan trọng nhất (bit 11). Tại mỗi thời điểm,các node vừa truyền vừa theo dõi tín hiệu trên bus. Bit "0" (dominant) sẽ ghi đè bit "1" (recessive) nếu có tranh chấp tại cùng thời điểm. Nếu một node gửi bit "1" nhưng phát hiện bus đang ở mức "0", nó sẽ lập tức dừng truyền – nghĩa là node đó đã thua trong quá trình arbitration.

1.1.7.2 Phân tích từng bước

Bit số	Node 1	Node 2	Node 3	Tín hiệu trên bus	Kết luận
1-6	111001	111001	111001	Theo dõi giống nhau tất cả tiếp tục	
7	1	1	0	0 (dominant)	Node 1 và 2 gửi 1 nhưng bus là 0 nên thua
8-11	-	-	0001	Node 3 tiếp tục	Node 3 thắng và truyền toàn bộ khung

Tại bit thứ 7, Node 3 gửi bit dominant (0) trong khi Node 1 và Node 2 gửi bit recessive (1). Do tín hiệu thực tế trên bus là 0, cả Node 1 và Node 2 đều phát hiện mâu thuẫn và phải rút khỏi quá trình truyền. Kể từ thời điểm đó, chỉ còn Node 3 tiếp tục truyền phần còn lại của khung dữ liệu.

1.1.7.3 Nhận xét

Qua quá trình arbitration, có thể rút ra các đặc điểm sau:

- Cơ chế tranh quyền diễn ra bit-by-bit, bắt đầu từ bit quan trọng nhất của ID.
- Node có ID nhỏ nhất (nhiều bit 0 hơn ở phía đầu) sẽ luôn có ưu tiên cao hơn.
- Arbitration trong CAN không làm mất dữ liệu, chỉ hoãn truyền đối với các node có ưu tiên thấp hơn.
- Quá trình này diễn ra hoàn toàn trong phần cứng, đảm bảo tốc độ và độ tin cậy cao trong hệ thống thời gian thực.

1.2 Tổng quan về chuẩn truyền thông CANopen

1.2.1 Giới thiệu về chuẩn truyền thông CANopen

CANopen là một giao thức truyền thông dựa trên mạng CAN (Controller Area Network), được phát triển đặc biệt cho các ứng dụng trong tự động hóa công nghiệp, ô tô, và các hệ thống điều khiển thiết bị. CANopen được thiết kế để sử dụng trong các môi trường yêu cầu tính ổn định cao, khả năng chịu tải lớn và độ tin cậy cao.

Giao thức này được xây dựng để điều khiển các thiết bị trong mạng CAN, cho phép các thiết bị trong hệ thống giao tiếp với nhau một cách hiệu quả và đồng bộ.

Hình 1.10 Ứng dụng CANopen trong điều khiển thiết bị công nghiệp

Trong lĩnh vực truyền thông công nghiệp, có nhiều giao thức khác nhau được sử dụng để đảm bảo việc trao đổi dữ liệu giữa các thiết bị một các nhanh chóng và tin cậy. Tuy nhiên, mỗi giao thức đều có ưu nhược điểm riêng tùy theo yêu cầu ứng dụng. Để lựa chọn giao thức phù hợp cho hệ thống điều khiển động cơ BLDC, cần tiến hành phân tích và so sánh CANopen với một số giao thức phổ biến khác như Modbus, Profibus và EtherCAT.

Bảng 1.6 Bảng so sánh các giao thức truyền thông công nghiệp

Tiêu chí	**CANopen**	**Modbus RTU**	**Profibus**	**EtherCAT**
Tầng vật lí	Bus CAN (2 dây, chống nhiễu cao)	RS-485 (2 dây, chống nhiều trung bình)	RS-485 cải tiến (cáp đặc biệt)	Ethernet (cáp đôi xoắn hoặc cáp quang)
Mô hình truyền thông	Multi-master, tranh quyền bus	Master-Slave	Master-Slave	Master-Slave tối ưu
Tính thời gian thực	Tốt (ms-level)	Trung bình (10-100ms)	Tốt (vài ms)	Rất tốt (us-level)
Độ tin cậy	Cao	Trung bình	Cao	Rất cao

Khả năng mở rộng mạng	127 node lí thuyết	32 thiết bị mỗi đoạn RS-485	Hàng trăm node	Hàng nghìn node
Ứng dụng	Điều khiển động cơ, robot di động, y tế	Đọc cảm biến, scada đơn giản	Dây chuyền sản xuất lớn	Máy CNC, robot, tự động hóa cao cấp

Từ kết quả phân tích và đối chiếu các giao thức truyền thông công nghiệp trong bảng trên, ta nhận thấy giao thức CAN kết hợp với chuẩn CANopen đựa lựa chọn cho đề tài nhằm đáp ứng tốt yêu cầu về hiệu năng, tính mở rộng và độ tin cậy với những ưu điểm sau:

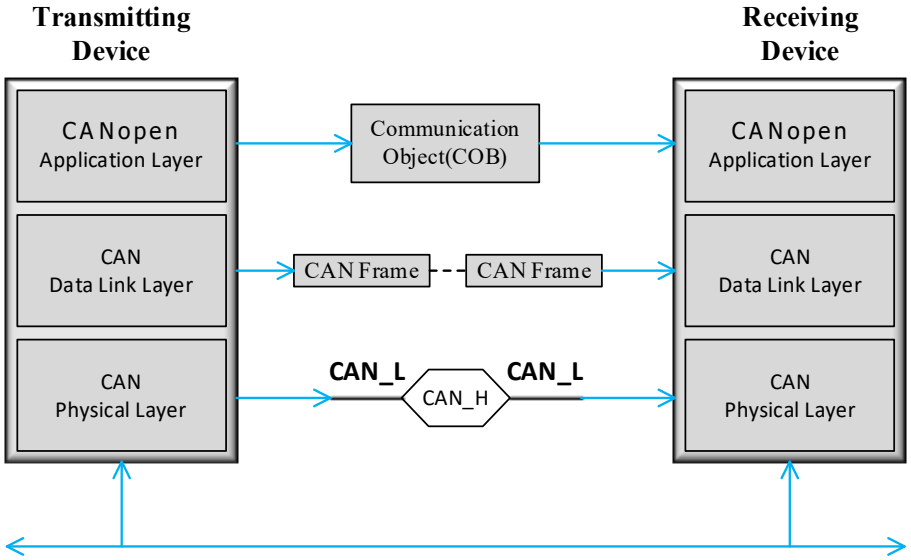
- Đáp ứng tốt yêu cầu thời gian thực trong điều khiển động cơ: CANopen hoạt động tốt ở mức thời gian thực trung bình đến cao (ms-level), phù hợp với các ứng dụng chuyển động như BLDC sử dụng thuật toán FOC.
- Độ tin cậy và tính ổn định cao: Với cơ chế kiểm tra lỗi CRC, xác nhận ACK, cùng với tính năng ưu tiên gói tin (theo ID), CANopen mang lại độ yêu cầu cao trong môi trường công nghiệp.
- Chi phí thấp và dễ triển khai: Hạ tầng vật lý chỉ cần hai dây CAN_H và CAN_L, không yêu cầu dặc biệt như EtherCAT hay cấu hình phức tạp như Profibus.
- Khả năng mở rộng tốt: CANopen hỗ trợ mở rộng lên đến 127 node lý thuyết và cho phép mở rộng mạng dễ dàng nhờ cấu trúc Object Dictionary và các dịch vụ quản lý mạng (NMT, PDO, SDO,…)
- Hỗ trợ chuẩn hóa và tương thích với thiết bị công nghiệp: CANopen là giao thức chuẩn hóa theo CiA, được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống robot, điều khiển động cơ, thiết bị y tế và xe tự hành.

Thích hợp với nền tảng vi điều khiển STM32: Nhiều dòng vi điều khiển STM32 đã tích hợp sẵn module CAN và được cộng động hỗ trợ triển khai CANopen thông qua thư viện mã nguồn mở như CANopenNode.

Từ những phân tích trên, việc sử dụng giao thức CAN cùng với chuẩn CANopen là lựa chọn hợp lý, giúp đảm bảo hiệu quả truyền thông, đáp ứng yêu cầu thời gian thực, mở rộng hệ thống linh hoạt và tối ưu chi phí cho bài toán điều khiển động cơ.

1.2.2 Cấu trúc của CANopen

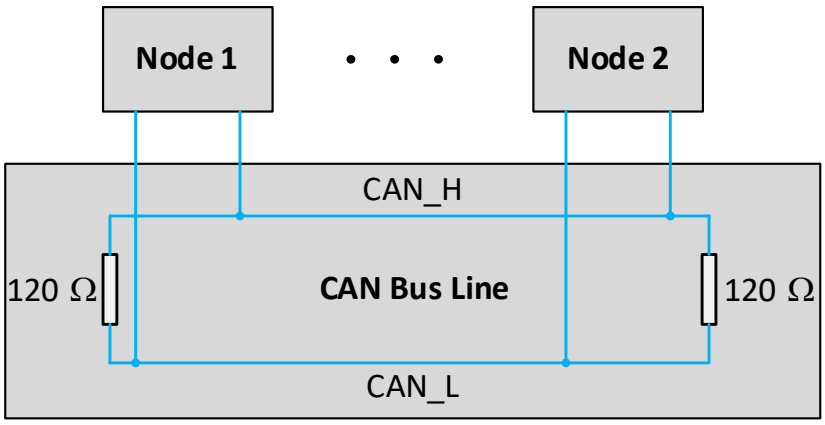
Giao thức CANopen được mô tả trong mô hình OSI, chủ yếu bao gồm lớp ứng dụng và lớp giao tiếp, trong khi các lớp liên kết dữ liệu và lớp vật lý được kế thừa từ giao thức CAN. Điều này giúp CANopen tập trung vào quy trình giao tiếp và ứng dụng, còn các lớp cơ sở đảm nhận việc truyền dẫn và đảm bảo tính ổn định mạng.



Hình 1.11 Các lớp giao thức truyền thông CANopen

1.2.2.1 Physical Layer

Lớp vật lý của CANopen dựa trên mạng CAN, kết nối các nút qua bus chung sử dụng cáp xoắn đôi vi sai với hai tín hiệu CANH và CANL. hoạt động theo nguyên lý điện áp vi sai giúp tăng khả năng chống nhiễu và đảm bảo truyền dữ liệu ổn định ngay cả trong môi trường công nghiệp nhiều nhiễu điện từ. Để đảm bảo tính toàn vẹn của tín hiệu, mỗi đầu của bus CAN phải được gắn một điện trở 120Ω, giúp triệt tiêu phản xạ tín hiệu và duy trì trở kháng phù hợp trên toàn bộ đường truyền.



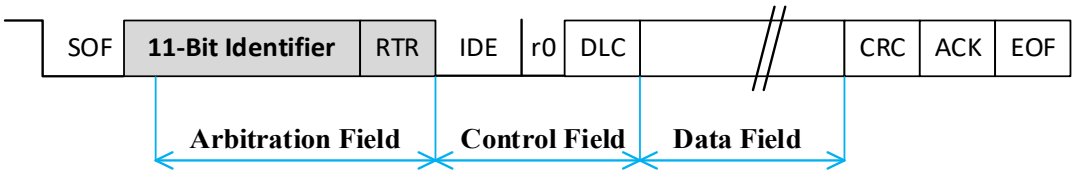
Hình 1.12 Lớp vật lý

1.2.2.2 Data Link Layer

Lớp liên kết dữ liệu (Data Link Layer) trong CANopen, được tiêu chuẩn hóa theo ISO 11898, chịu trách nhiệm điều phối việc truyền và nhận dữ liệu giữa các thiết bị trên mạng CAN, đảm bảo dữ liệu được truyền một cách tin cậy và không bị xung đột. Lớp này gồm hai thành phần chính:

- LLC (Logical Link Control): Đảm bảo truyền dữ liệu an toàn, kiểm tra và sửa lỗi trong quá trình truyền.
- MAC (Medium Access Control): Quản lý truy cập vào môi trường truyền thông, sử dụng quy tắc CSMA/CD để tránh xung đột khi gửi dữ liệu.

Nhờ sự kết hợp của LLC và MAC, lớp liên kết dữ liệu đảm bảo thông tin được truyền với độ chính xác cao, giảm thiểu tối đa lỗi và tăng tính tin cậy của toàn bộ hệ thống mạng CANopen, ngay cả trong môi trường nhiễu hoặc nhiều thiết bị hoạt động đồng thời.



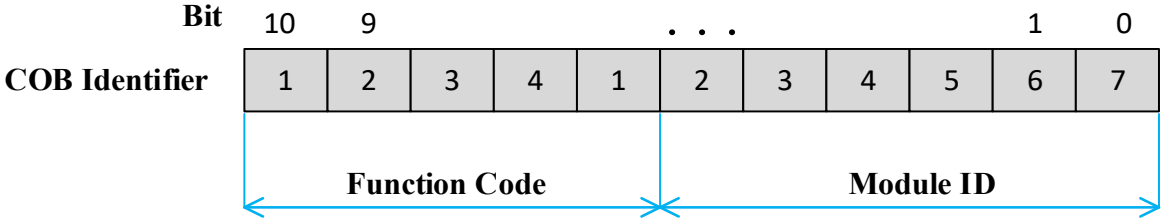
Hình 1.13 Định dạng khung chuẩn CAN

Sơ đồ phân bổ mã định danh

Hệ thống phân bổ ID trong CANopen bao gồm hai thành phần chính:

- Function code: xác định loại đối tượng giao tiếp, giúp phân loại các thông điệp dựa trên chức năng cụ thể.
- Module ID: dùng để nhận diện từng thiết bị slave trong mạng, và chi tiết cấu trúc của nó được mô tả trong Hình 1.14.

Hệ thống này cho phép master kết nối và trao đổi thông tin với tối đa 127 thiết bị slave, đảm bảo khả năng mở rộng và linh hoạt.



Hình 1.14 Sơ đồ phân bổ định danh mặc định

1.2.2.3 Quy tắc CSMA/CD

CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) là một kỹ thuật được sử dụng trong mạng CAN để kiểm soát xung đột trong quá trình truyền dữ liệu. Mặc dù CSMA/CD chủ yếu liên quan đến CAN bus, nó vẫn đóng vai trò quan trọng trong việc quản lý cách các nút trên mạng CAN và CANopen tương tác với nhau. Dưới đây là một mô tả chi tiết về cách CSMA/CD hoạt động trong mạng CANopen.

a. Cảm nhận tín hiệu

Trước khi một nút gửi dữ liệu, nó sẽ kiểm tra xem bus có đang có tín hiệu truyền từ nút khác hay không. Nếu bus đang rảnh rỗi, nút sẽ bắt đầu gửi dữ liệu. Nếu bus đang có tín hiệu, nút sẽ đợi cho đến khi bus trống rồi mới gửi.

b. Truy cập nhiều lần

Trong mạng CAN, nhiều nút có thể chia sẻ một bus. Khi có nhiều nút muốn gửi dữ liệu cùng lúc, mạng sẽ ưu tiên các nút có ID thấp hơn (ưu tiên cao hơn). Điều này giúp xác định nút nào có quyền gửi trước. Nếu hai nút cùng gửi dữ liệu đồng thời, nút có ID thấp hơn sẽ thắng và gửi dữ liệu trước.

c. Phát hiện xung đột

Nếu hai nút gửi dữ liệu cùng lúc, một xung đột sẽ xảy ra. Khi đó, các nút sẽ phát hiện sự không khớp giữa dữ liệu đã gửi và tín hiệu trên bus. Khi xung đột được phát hiện, tất cả các nút sẽ dừng lại ngay lập tức để tránh gửi dữ liệu sai.

d. Dừng và thử lại

Sau khi xung đột, các nút sẽ không gửi lại ngay mà sẽ chờ một khoảng thời gian ngẫu nhiên. Điều này giúp tránh việc các nút gửi dữ liệu cùng lúc lần nữa, giảm thiểu khả năng xung đột lặp lại.

e. Điều khiển lỗi

Khi xung đột xảy ra, hệ thống sẽ gửi một Error Frame để thông báo lỗi cho các nút khác. Các nút sẽ ngừng truyền, xử lý lỗi và tiếp tục hoạt động bình thường sau khi hết lỗi.

1.2.2.4 Application Layer

Lớp Application Layer là lớp giao tiếp cao nhất của giao thức CANopen, quản lý việc trao đổi dữ liệu và các chức năng ứng dụng giữa các thiết bị trên mạng CAN. Lớp này sử dụng các Communication Objects (COBs) và bao gồm các thành phần như Object Dictionary, PDO, SDO, NMT và EMCY. Các thành phần này giúp quản lý dữ liệu, tham số hệ thống, đồng bộ hóa thời gian, thông báo lỗi và quản lý trạng thái thiết bị.

1.2.2.4.1 Object Dictionary

Object Dictionary là kết nối chính của các đối tượng trong một thiết bị. Đây là nơi tất cả các đối tượng được cấu trúc theo dạng bảng rõ ràng. Việc nhóm các đối tượng được xác định bởi các đặc tả của giao thức.

Mỗi đối tượng trong Object Dictionary được định địa chỉ bằng một index 16-bit, được biểu thị dưới dạng số thập lục phân gồm bốn chữ số.

Bảng 1.7 Địa chỉ index của một số nhóm đối tượng

Index (hex)	Nhóm đối tượng
0000h	Dành riêng (không được sử dụng trong CANopen)
0001 h – 009F h	Các kiểu dữ liệu tĩnh và phức tạp
00A0 h – 0FFF h	Dành riêng (không được sử dụng trong CANopen)
1000 h – 1FFF h	Hồ sơ giao tiếp (Ví dụ: DS 301, DS 302)
2000 h – 5FFF h	Hồ sơ thiết bị dành cho nhà sản xuất
6000 h – 9FFF h	Hồ sơ thiết bị được tiêu chuẩn hoá
A000 h – FFFF h	Dành riêng (không được sử dụng trong CANopen)

1.2.2.4.2 Các đối tượng giao tiếp

Các đối tượng giao tiếp CANopen được định nghĩa thông qua các dịch vụ và giao thức, giúp quản lý và trao đổi dữ liệu giữa các thiết bị trong mạng. Các đối tượng này được phân loại cụ thể như bảng sau:

Bảng 1.8 Các đối tượng giao tiếp trong CANopen

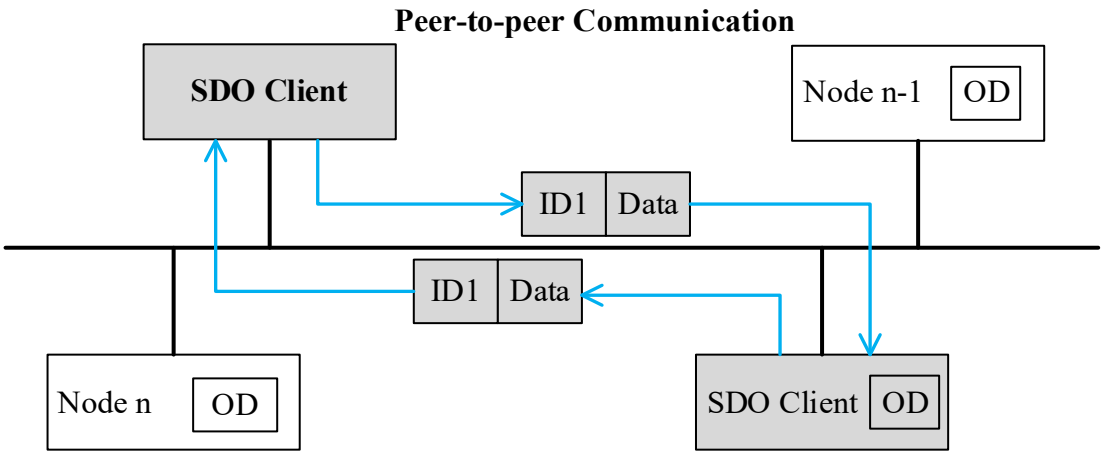
Các đối tượng giao tiếp	
Process Data Objects (PDO)	
Service Data Objects (SDO)	
Special Function Objects Synchronization Objects (SYNC)	Time Stamp Objects
	Emergency Objects (EMCY)
Network Management Objects	NMT Message
	Node Guarding Object

a. Đối tượng SDO

Service Data Objects (SDO) được sử dụng trong mạng CANopen để truyền dữ liệu không yêu cầu thời gian thực, chủ yếu phục vụ cho việc cấu hình, tham số hóa và truy cập dữ liệu hệ thống. SDO cho phép đọc và ghi các mục trong Object Dictionary

của thiết bị, từ đó người dùng có thể điều chỉnh các thông số vận hành, thiết lập cấu hình ban đầu hoặc thực hiện các thao tác bảo trì.SDO cho phép truy cập vào các mục trong Object Dictionary của thiết bị. Một SDO sử dụng hai khung dữ liệu CAN với các định danh khác nhau để đảm bảo giao tiếp được xác nhận.

SDO thiết lập một kênh giao tiếp peer-to-peer giữa hai thiết bị, trong đó thiết bị sở hữu Object Dictionary được truy cập đóng vai trò là server của SDO. Một thiết bị có thể hỗ trợ nhiều SDO, nhưng ít nhất một SDO là bắt buộc và được cấu hình mặc định.



Hình 1.15 Giao tiếp SDO

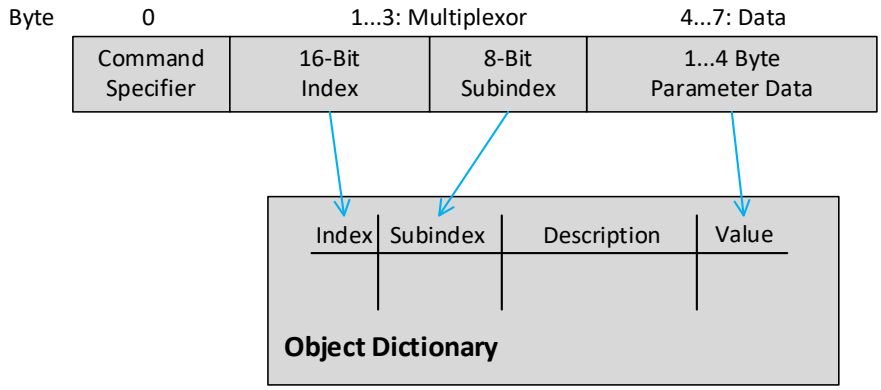
Đặc điểm dữ liệu của SDO:

- Tốc độ chậm hơn: Do yêu cầu xác nhận giữa thiết bị gửi và nhận (client/server).
- Có khả năng truyền dữ liệu lớn: Dữ liệu được chia thành các gói nhỏ, không giới hạn ở 8 byte như PDO.
- Truy vấn trực tiếp Object Dictionary: SDO cho phép đọc và ghi vào các mục trong Object Dictionary của CANopen.

Truy cập đọc và ghi vào Object Dictionary của CANopen được thực hiện thông qua SDOs. Bộ chỉ định lệnh Client/Server Command Specifier chứa các thông tin sau:

- Tải xuống/tải lên
- Yêu cầu/phản hồi
- Truyền phân đoạn/nhanh
- Số byte dữ liệu
- Chỉ báo kết thúc
- Bit chuyển đổi xen kẽ cho mỗi phân đoạn tiếp theo

Trong một mạng CANopen, có thể sử dụng tối đa 256 kênh SDO, mỗi kênh yêu cầu hai định danh CAN.



Hình 1.16 Truy cập vào Object Dictionary

Vai trò của SDO:

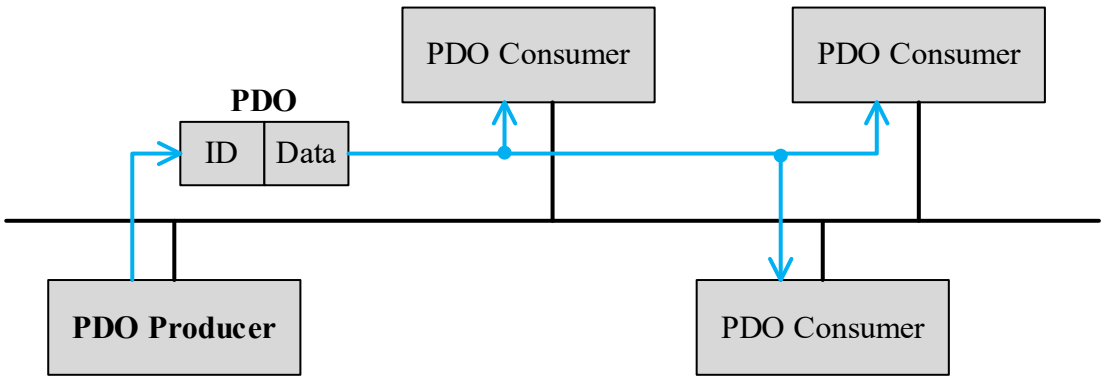
- Truy cập dữ liệu không thời gian thực: Cho phép đọc/ghi tham số cấu hình hoặc giá trị lớn hơn 8 byte.
- Thiết lập cấu hình thiết bị: Dùng để cài đặt hoặc hiệu chỉnh thiết bị qua Object Dictionary.
- Hỗ trợ client/server: Tương tác trực tiếp giữa hai thiết bị với xác nhận rõ ràng.

Ứng dụng:

- Đọc/ghi tham số cấu hình như ID thiết bị, điều chỉnh tốc độ truyền CAN, hoặc cập nhật các giá trị hệ thống trong quá trình khởi tạo hoặc bảo trì thiết bị.

b. Đối tượng PDO

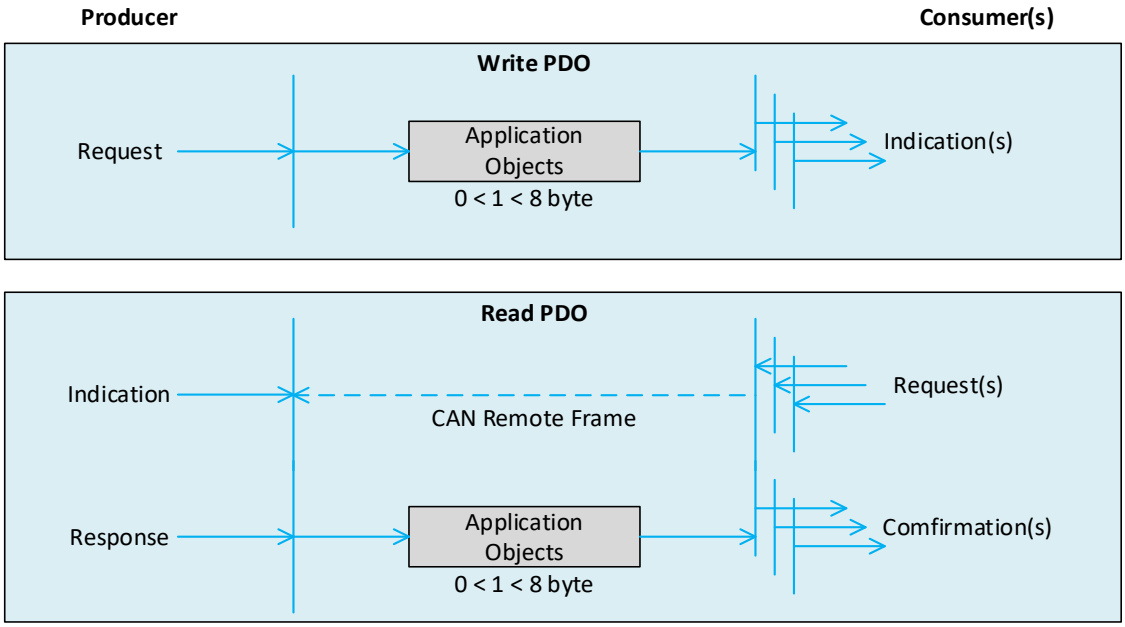
Process Data Object (PDO) truyền dữ liệu real-time giữa các thiết bị trong mạng CANopen, như trạng thái cảm biến hoặc tín hiệu điều khiển. PDO hoạt động theo mô hình producer/consumer, nơi dữ liệu được truyền từ một producer đến một hoặc nhiều consumer qua broadcast. PDO không yêu cầu xác nhận, với TxPDO của producer tương ứng với RxPDO của thiết bị nhận.



Hình 1.17 Giao tiếp PDO

Có hai loại PDO:

- Write PDO được ánh xạ vào một CAN Data frame duy nhất.
- Read PDO được ánh xạ vào một CAN Remote Frame, và sẽ nhận phản hồi qua CAN Data Frame tương ứng.



Hình 1.18 Write PDO và Read PDO

Đặc điểm dữ liệu của PDO:

- Payload nhỏ: Dữ liệu của một PDO có thể chứa tối đa 8 byte dữ liệu quá trình.
- Tốc độ nhanh: Không cần xác nhận, sử dụng giao tiếp broadcast.
- Không yêu cầu truy vấn: PDO được cấu hình trước và được truyền khi có sự kiện hoặc theo chu kỳ.

Cấu trúc ánh xạ PDO:

- Kiểu dữ liệu và ánh xạ của các đối tượng ứng dụng vào PDO được định nghĩa bởi cấu trúc ánh xạ PDO trong Object Dictionary, được mô tả tại:
  - "1600h": Dành cho R_PDO đầu tiên.
  - "1A00h": Dành cho T_PDO đầu tiên.
- Mạng CANopen có thể hỗ trợ tối đa 512 T_PDO và 512 R_PDO.

Hồ sơ giao tiếp CANopen phân biệt ba chế độ kích hoạt thông điệp:

- Kích hoạt theo sự kiện (Event-driven): Việc truyền thông điệp được kích hoạt bởi sự kiện cụ thể của đối tượng được xác định trong hồ sơ thiết bị.
- Thăm dò bằng khung yêu cầu từ xa (Polling by remote frames): PDO không đồng bộ được truyền khi nhận yêu cầu từ xa từ thiết bị khác.

- Đồng bộ hóa (Synchronized): Các PDO đồng bộ được kích hoạt khi hết khoảng thời gian truyền cụ thể, được đồng bộ hóa bằng việc nhận đối tượng SYNC.

Vai trò của PDO trong mạng CANopen:

- Truyền dữ liệu real-time: Đảm bảo việc trao đổi dữ liệu nhanh chóng giữa các thiết bị.
- Hỗ trợ đồng bộ hóa: Đồng bộ dữ liệu thông qua SYNC Object để đảm bảo tính nhất quán.
- Phát dữ liệu: Cho phép một producer truyền dữ liệu đến nhiều consumer khác.
- Liên kết Object Dictionary: Làm giao diện giữa dữ liệu quá trình và các mục trong Object Dictionary.

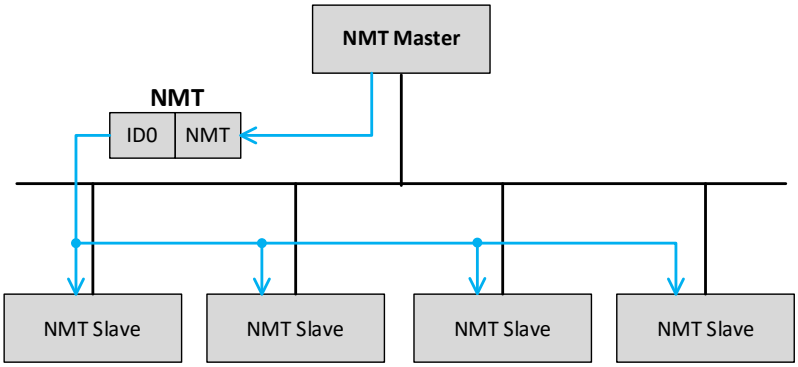
Ứng dụng:

- Điều khiển động cơ, đọc tín hiệu cảm biến, hoặc gửi tín hiệu báo lỗi nhanh chóng.

c. Đối tượng NMT

Network Management Services (NMT) trong CANopen được sử dụng để quản lý trạng thái của các thiết bị trong mạng. Các dịch vụ NMT cung cấp các cơ chế để kiểm soát và điều phối các thiết bị trong mạng CANopen, đảm bảo rằng hệ thống hoạt động trơn tru và đồng bộ.

CANopen sử dụng mô hình master/slave để quản lý mạng, với một thiết bị thực hiện chức năng NMT Master và các thiết bị còn lại là NMT Slaves.



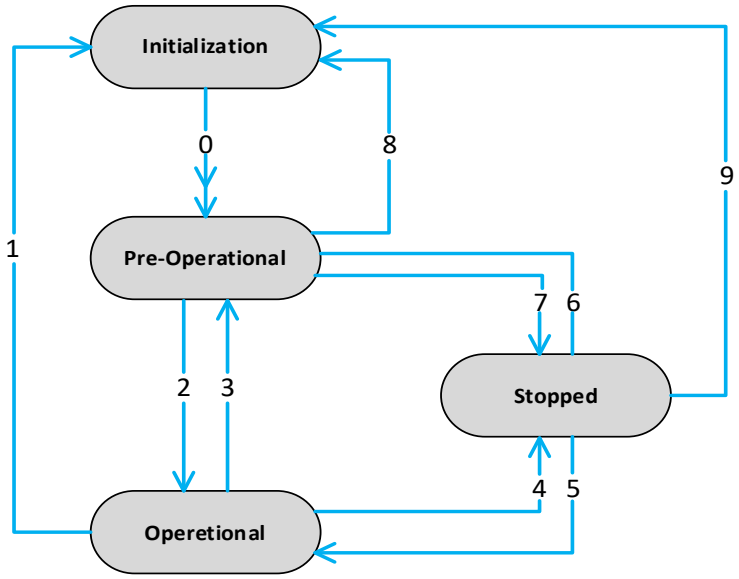
Hình 1.19 Cấu trúc mạng NMT

Quản lý mạng (NMT) trong CANopen gồm ba nhóm chức năng chính:

- Điều khiển mô đun: Khởi tạo các thiết bị NMT Slave tham gia mạng.
- Điều khiển lỗi: Giám sát trạng thái giao tiếp của các nút và mạng.
- Điều khiển cấu hình: Tải lên/ xuống dữ liệu cấu hình giữa thiết bị và mạng.

Mỗi NMT Slave là phần tử của một nút, được xác định duy nhất qua module ID, chịu trách nhiệm cho các chức năng NMT của chính nó.

Khi cấp nguồn, thiết bị NMT Slave vào trạng thái Pre-Operational, cho phép cấu hình qua SDO nhưng chưa truyền PDO. Từ đây, NMT Master có thể chuyển thiết bị sang trạng thái Operational để cho phép truyền PDO và thực hiện chức năng ứng dụng. Một số đối tượng trong Object Dictionary có thể bị giới hạn truy cập ở trạng thái này. Khi ở trạng thái Stopped, cả SDO và PDO đều bị ngắt, thiết bị không giao tiếp.



Hình 1.20 Trạng thái NMT Slave

Bảng 1.9 Các lệnh phổ biến trong NMT

Lệnh NMT	**Mã lệnh (Command)**	**Trạng thái sau khi thực thi**	**Mô tả**
Start Remote Node	0x01	Operational	Chuyển thiết bị sang trạng thái *Operational*, bắt đầu truyền PDO.
Stop Remote Node	0x02	Stopped	Dừng thiết bị, chỉ nhận lệnh NMT, không truyền PDO SDO.
Enter Pre-Operational	0x80	Pre-Operational	Đưa thiết bị vào trạng thái *Pre-Operational* để cấu hình hoặc chuẩn bị hoạt động.
Reset Communication	0x82	Initialization (Pre-Operational)	Reset giao tiếp của thiết bị, tính toán lại các định danh và gửi thông điệp khởi động.
Reset Node	0x81	Initialization (Pre-Operational)	Reset toàn bộ thiết bị, tương đương với khởi động lại.

CHƯƠNG 2: THIẾT KẾ HỆ THỐNG TRUYỀN THÔNG

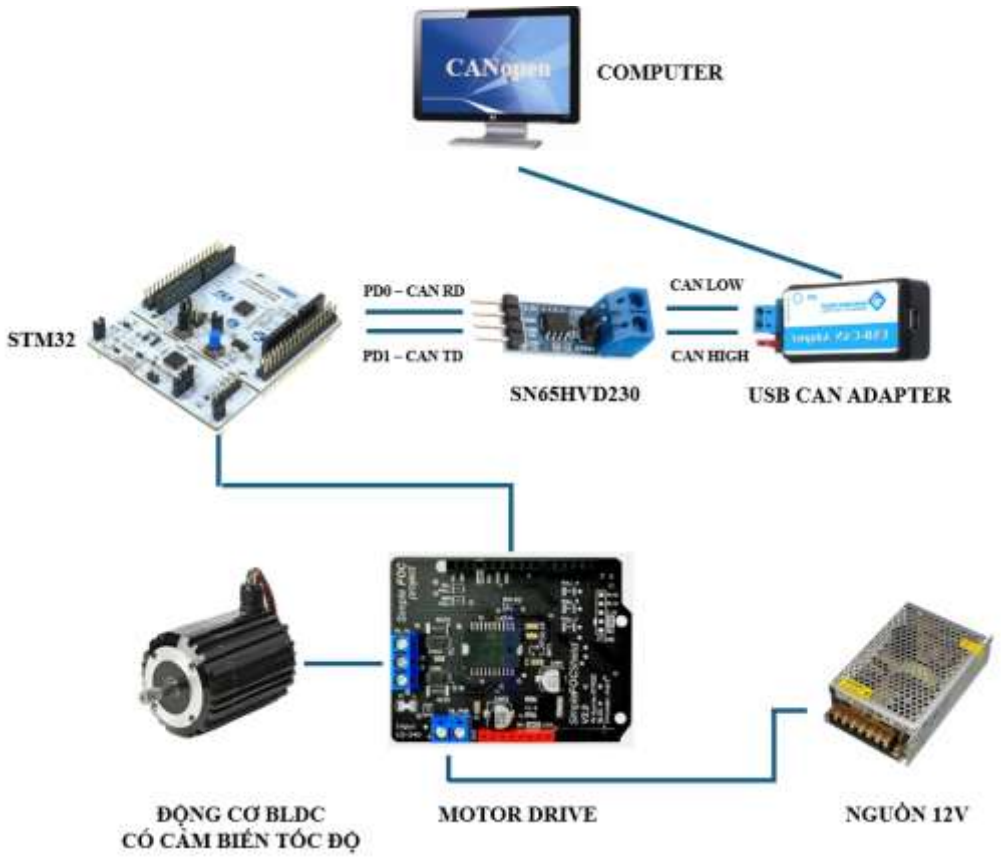
2.1 Sơ đồ kết nối phần cứng

2.1.1 Giới thiệu tổng quan

Hệ thống điều khiển động cơ BLDC sử dụng chuẩn truyền thông CANopen được thiết kế để đảm bảo khả năng truyền dữ liệu ổn định, thời gian thực, và khả năng giám sát, điều khiển từ xa. Hệ thống bao gồm nhiều thành phần phần cứng và phần mềm được tích hợp và hoạt động đồng bộ nhằm đảm bảo khả năng điều khiển chính xác và phản hồi thời gian thực, với mục tiêu chính là điều khiển tốc độ, dòng điện hoặc vị trí của động cơ một cách chính xác thông qua mạng CAN.

2.1.2 Sơ đồ kết nối phần cứng

Hệ thống điều khiển động cơ BLDC sử dụng giao thức truyền thông CANopen được mình họa trong Hình 2.1 dưới đây. Các thành phần chính bao gồm:



Hình 2.1 Sơ đồ hệ thống điều khiển động cơ BLDC sử dụng CANopen

Bảng 2.1 Danh sách các thành phần chính trong hệ thống

STT	Thành phần	Chức năng/ Vai trò
1	Máy tính	Phần mềm tự phát triển bằng QT. Gửi lệnh điều khiển hoặc truy vấn dữ liệu từ xa
2	USB-CAN Adapter	Chuyển đổi tín hiệu USB từ máy tính sang giao thức CAN vật lý để giao tiếp với vi điều khiển
3	SN65HVD230 (CAN Transceiver)	Bộ chuyển đổi mức điện áp giữa vi điều khiển và mạng CAN. Đảm bảo truyền thông ổn định trên bus CAN
4	STM32 Nucleo-F446RE	Đóng vai trò như một Slave Node trong hệ CANopen. Xử lý lệnh điều khiển, phản hồi dữ liệu tốc độ/động cơ, và điều khiển Motor Driver.
5	Motor Driver (SimpleFOC)	Nhận tín hiệu điều khiển từ STM32 và cấp dòng điện phù hợp cho các cuộn dây của động cơ BLDC để tạo mô-men quay.
6	Động cơ BLDC có cảm biến	Động cơ không chổi than có tính hợp cảm biến tốc độ (Hall Sensor) giúp phản hồi vị trí và tốc độ về STM32
7	Nguồn DC 12V	Cung cấp nguồn cho Motor Driver và động cơ BLDC.

2.1.3 Phân tích phần cứng của hệ thống

Trong hệ thống truyền thông CANopen phục vụ điều khiển động cơ BLDC, phần cứng đóng vai trò vô cùng quan trọng. Các thành phần phần cứng không chi đảm bảo khả năng kết nối và truyền dữ liệu một cách ổn định mà còn giúp hệ thống hoạt động chính xác, an toàn theo thời gian thực.

Ở mục này, chúng ta sẽ đi sâu vào từng thành phần phần cứng chính trong hệ thống. Việc lựa chọn và cấu hình đúng các phần từ phần cứng là tiền đề quan trọng để đảm bảo quá trình thiết lập và vận hành mạng CANopen diễn ra thuận lợi.

2.1.3.1 Vi điều khiển STM32F446RE

Vi điều khiển STM32F446RE là bộ xử lí trung tâm trong hệ thống. Đây là dòng vi điều khiển hiệu năng cao của STMMicrolectronics, sử dụng nhân ARM Cortex-M4 với bộ xử lý tín hiệu số DSP và đơn vị tính toán dấu chấm động FPU, rất phù hợp với các ứng dụng điều khiển động cơ.

Một trong những lý do lựa chọn STM32F446RE là vì nó tích hợp sẵn bộ điều khiển CAN, cho phép thiết lập giao tiếp truyền thông CAN dễ dàng mà không cần thêm chip điều khiển ngoài.

Hình 2.2 STM32F446RE

Bảng 2.2 Thông số kỹ thuật của STM32F446RE

Thông số kỹ thuật	**Giá trị**
Loại vi xử lí	ARM Cortex-M4 (tích hợp FPU và DSP)
Tốc độ xử lý	Tối đa 180 MHz
Bộ nhớ Flash	512KB
Bộ nhớ SRAM	128KB
Số chân GPIO	Khoảng 50 chân có thể lập trình
ADC	3 ADC 12-bit, tối đa 16 kênh
Timer	14 Timer
Giao tiếp	3xSPI, 3xI2C, 4xUART, 2x CAN, USB OTG FS
Điện áp hoạt động	3.3V (cấp qua USB hoặc VIN)
Lập trình và debug	Cổng MicroUSB tích hợp ST-link/V2-1
Tương thích	Hỗ trợ STM32CubeMX, Arduino
CAN tích hợp	Có sẵn 2 kênh bxCAN (CAN1 và CAN2)

2.1.3.2 USB CAN Adapter

USB CAN Adapter là một thiết bị ngoại vi được sử dụng để chuyển đổi giao tiếp giữa chuẩn USB (trên máy tính) và chuẩn truyền thông CAN, cho phép máy tính có thể gửi và nhận dữ liệu qua mạng CAN. Thiết bị này đóng vai trò rất quan trọng trong việc

giám sát, cấu hình hoặc kiểm thử giao tiếp CAN thông qua các phần mềm hỗ trợ như CANopenTool, PCAN View,…

Hình 2.3 USB CAN Adapter

Bảng 2.3 Thông số kỹ thuật của USB CAN Adapter

Thông số	**Giá trị/ Mô tả**
Chuẩn giao tiếp	USB 2.0
Giao thức CAN	CAN 2.0A và CAN 2.0B
Tốc độ truyền CAN	5Kbps đến 1Mbps
Kết nối CAN	CAN_H và CAN_L
Điện áp hoạt động	Lấy nguồn trực tiếp cổng USB
Ứng dụng	Giám sát mạng CAN, giao tiếp STM32 và cấu hình thiết bị CANopen

2.1.3.3 SN65HVD230

SN65HVD230 là một CAN transceiver (bộ chuyển đổi tín hiệu CAN) dùng để giao tiếp giữa vi điều khiển như STM32 và busCAN. Thiết bị này chuyển đổi mức tín hiệu logic TTL (thường là 3.3V hoặc 5V) sang tín hiệu vi sai phù hợp với chuẩn CAN, đồng thời cũng thực hiện việc thu nhận tín hiệu CAN và chuyển về mức logic cho vi điều khiển đọc. Transceiver này được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng giao tiếp CAN vì giá thành rẻ, dễ tích hợp và có hiệu suất ổn định.

Hình 2.4 SN65HVD230

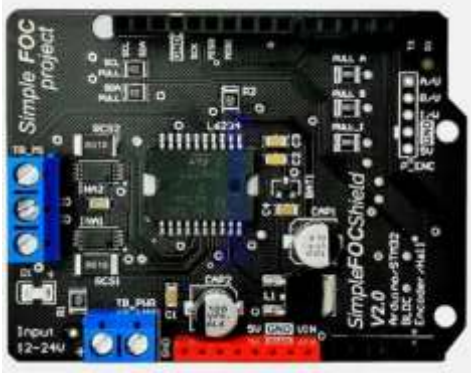
Bảng 2.4 Thông số kỹ thuật của SN65HVD230

Thông số	**Giá trị/ Mô tả**
Điện áp hoạt động	3.3V
Giao thức hỗ trợ	CAN 2.0A và CAN 2.0B

Tốc độ truyền dữ liệu	Tối đa là 1Mbps
Dòng tiêu thụ	<10 mA
Ứng dụng	Giao tiếp STM32 với CANbus

2.1.3.4 Driver MKS SimpleFOC Shield V2.0.4

SimpleFOC Shield là một bo mạch mở rộng được thiết kế 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 2.5 MKS SimpleFOC Shield V2.0.4

Bảng 2.5 Thông số kỹ thuật của Motor Driver FOC

Thông số	**Mô tả**
Điện áp đầu vào	12V – 35VDC
Dòng điện tối đa	5A
Công suất tối đa	120W
Chip điều khiển động cơ	L6234
Cảm biến dòng	INA240
Tương thích với bo mạch	Arduino UNO, STM32 Nucleo
Giao tiếp hỗ trợ	SPI, I2C, Analog

Kết nối phần cứng:

- **Kết nối phần cứng với STM32**
  - + 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.
- **Kết nối phần cứng với động cơ**
  - + 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.
- **Kết nối phần cứng 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.

- **Kết nối phần cứng với nguồn cấp**
  + Shield yêu cầu một nguồn cấp riêng 12V đến 24V để cung cấp điện áp cho động cơ và driver.

Kết nối chân cắm

+ 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.

2.1.3.5 Cảm biến vị trí AS5147U

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.

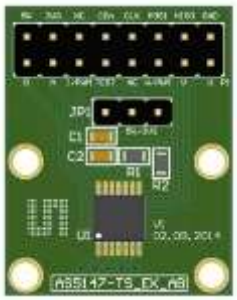
Khối Bù sai số góc động (Dynamic Angle Error Compensation) sẽ hiệu chỉnh góc được tính toán để bù lại độ trễ bằng thuật toán dự đoán tuyến tính. Ở tốc độ quay không đổi, thời gian trễ sẽ được AS5047U bù trừ nội bộ, giúp giảm sai số góc động trên các đầu ra SPI, ABI và UVW.

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.

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).



Hình 2.6 Magnetic Encoder Development Board

2.1.3.6 Động cơ gimbal BLDC

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 2.7 Động cơ BLDC

Bảng 2.7 Bảng thông số kĩ thuật của 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 2.8 Bảng đặc tính cơ điện của 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·cm²

2.1.3.6.a.1 Nguyên lí 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.
- Việc thay đổi pha dòng điện được điều chỉnh theo vị trí rotor (dò từ encoder) nhằm tạo lực điện từ quay liên tục.

2.1.3.6.a.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.

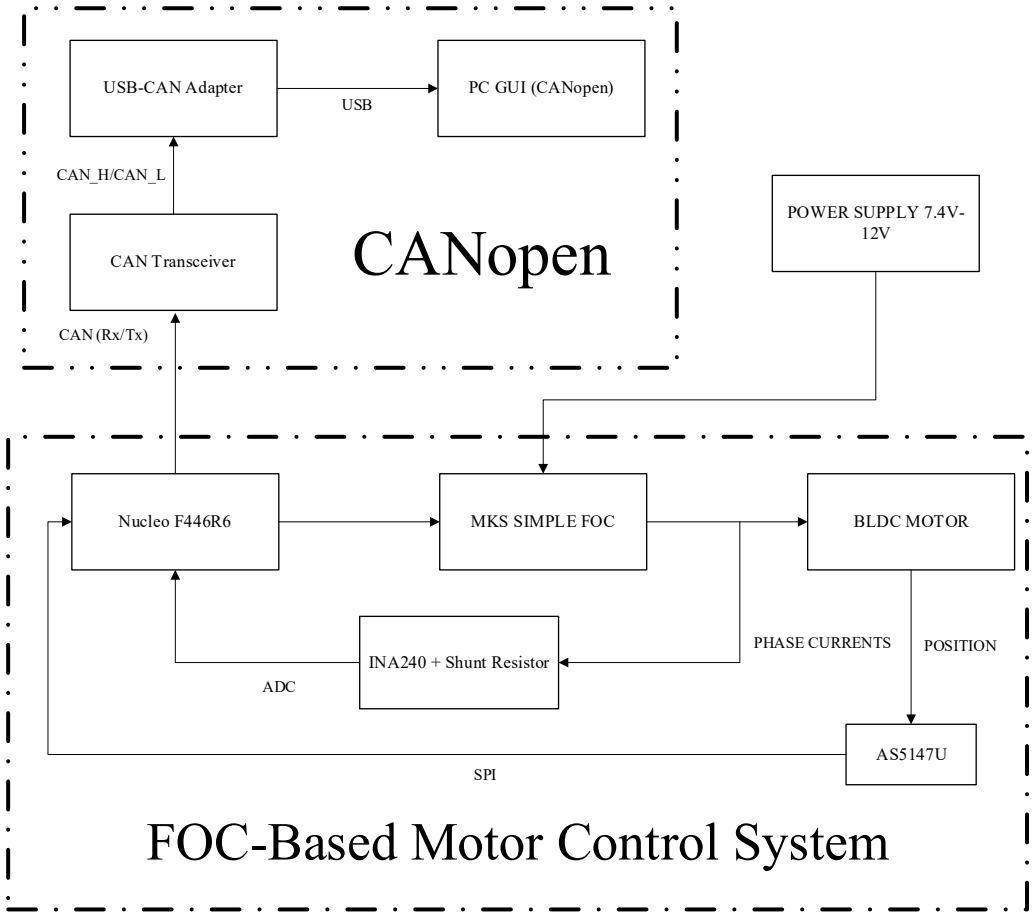
2.2 Sơ đồ khối nguyên lí hoạt động

2.2.1 Giới thiệu tổng quan

Hệ thống điều khiển động cơ BLDC sử dụng phương pháp điều khiển hướng từ thông FOC kết hợp truyền thông CANopen cho phép điều khiển và giám sát động cơ từ xa một các hiệu quả và chính xác. Hệ thống bao gồm các thành phần chính như vi điều khiển STM32, driver điều khiển động cơ, cảm biến dòng và cảm biến rotor, tất cả được đồng bộ thông qua thuật toán FOC. Ngoài ra, giao tiếp CANopen giúp kết nối hệ thống với máy tính trung tâm để gửi lệnh và nhận dữ liệu phản hồi theo thời gian thực.

2.2.2 Sơ đồ khối nguyên lí hoạt động

Nguyên lí hoạt động của hệ thống được mình họa trong Hình 2.8 dưới đây. Sơ đồ này thể hiện cách các khối chức năng chính phối hợp với nhau trong quá trình điều khiển và giám sát động cơ.



Hình 2.8 Sơ đồ khối nguyên lý hoạt động của hệ thống

2.2.3 Mô tả chi tiết nguyên lí hoạt động

Hệ thống bao gồm các khối chức năng chính như sau:

- PC GUI (CANopen): Đóng vai trò là trung tâm điều khiển từ xa, gửi lệnh và nhận dữ liệu phản hồi từ hệ thống động cơ qua mạng CANopen.
- USB-CAN Adapter và CAN Transceiver: Kết nối giao tiếp giữa máy tính và vi điều khiển STM32. Bộ chuyển đổi này giúp truyền tải dữ liệu qua lại giữa CAN_H và CAN_L và STM32.
- STM32 Nucleo F446RE: Là bộ vi điều khiển trung tâm chịu trách nhiệm nhận lệnh từ CANopen, xử lí thuật toán FOC và điều khiển động cơ BLDC. Ngoài ra, nó cũng xử lí dữ liệu phản hồi từ cảm biến dòng và cảm biến vị trí để hiệu chỉnh điều khiển theo thời gian thực.
- MKS SimpleFOC: Đảm nhận việc tạo tín hiệu điều khiển PWM để cấp cho động cơ BLDC dựa trên các thông số của STM32 và dữ liệu cảm biến.
- BLDC Motor: Động cơ không chổi than 3 pha nhận tín hiệu điều khiển từ MKS SimpleFOC và quay theo lệnh yêu cầu. Động cơ được tích hợp cảm biến vị trí (AS5147U) để đo góc rotor.
- AS5147U (Cảm biến vị trí): Cảm biến này cung cấp thông tin vị trí chính xác của rotor về STM32 qua giao tiếp SPI, giúp thuật toán FOC xác định được góc quay rotor theo thời gian thực.
- INA240 + Shunt Resistor (Cảm biến dòng): Đo dòng điện chạy qua các pha động cơ và gửi dữ liệu về STM32 để phục vụ quá trình điều khiển và bảo vệ hệ thống.
- Nguồn cấp (7.4V-12V): Cung cấp nguồn điện chính cho toàn bộ hệ thống, đảm bảo động cơ và các thành phần hoạt động ổn định.

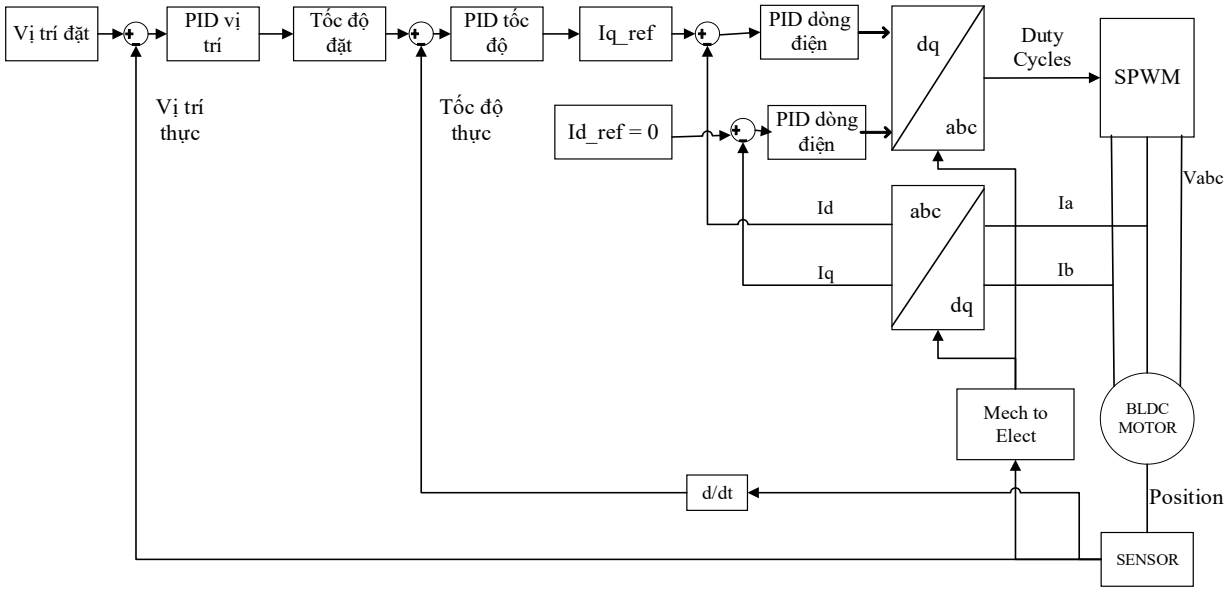
Nguồn tín hiệu hoạt động của hệ thống:

Khi người dùng gửi lệnh điều khiển động cơ từ máy tính, lệnh được truyền qua mạng CANopen tới STM32. Vi điều khiển xử lý lệnh và thực hiện điều khiển thông qua driver MKS Simple FOC để xuất tín hiệu PWM điều khiển động cơ BLDC. Trong quá trình vận hành, dữ liệu về dòng điện (từ INA240) và vị trí rotor (từ AS5147U) liên tục được gửi về STM32. Vi điều khiển sử dụng các dữ liệu này để tính toán và điều chỉnh thuật toán FOC nhằm đảm bảo động cơ vận hành chính xác và hiệu quả nhất. Thông tin trạng thái sẽ được phản hồi lại từ máy tính qua CANopen để người dùng giám sát.

CHƯƠNG 3: PHÂN TÍCH THIẾT KẾ HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN FOC

3.1 Giới thiệu tổng thể vòng điều khiển

Hệ thống điều khiển động cơ BLDC trong đề tài sử dụng phương pháp FOC với cấu trúc ba vòng lồng nhau: vị trí, tốc độ và dòng điện. Mục tiêu là điều khiển mượt, chính xác và ổn định mô-men động cơ, phù hợp với các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác cao như camera gimbal, robot định vị hoặc thiết bị quang học.



Hình 3.1 Sơ đồ mạch vòng điều khiển

- Vòng vị trí: Đưa rotor đến vị trí đặt trước θ_{ref}, đầu ra là tốc độ tham chiếu ω_{ref} dùng PID vị trí.
- Vòng tốc độ: Đảm bảo tốc độ rotor đạt yêu cầu ω_{ref}, đầu ra là dòng I_q tham chiếu, dùng PID tốc độ.
- Vòng dòng điện: Điều khiển mo-men qua dòng I_q và khử từ dư bằng dòng I_q, đầu ra là điện áp U_q, U_d (PWM), dùng PID dòng điện.

3.2 Điều khiển dòng điện

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 ra làm hai thành phần:

- I_d (d-axis): điều khiển từ thông (thường đặt bằng 0 với BLDC không cần kích thích từ trường phụ).

- I_q (q-axis): điều khiển mô-men.

Quy trình điều khiển dòng gồm các bước:

1. Đo dòng pha:

- Hai trong ba dòng pha (I_A và I_B) 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).

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 1 & \frac{}{2} & \frac{}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

3. Biến đổi Park: Dùng góc rotor θ để chuyển từ hệ α-β sang d-q (gắn theo rotor).

$$\begin{aligned} I_d &= I_\alpha \cos(\theta) + I_\beta \sin(\theta) \\ I_q &= -I_\alpha \sin(\theta) + I_\beta \cos(\theta) \end{aligned} \tag{3.2}$$

4. Bộ điều khiển PID dòng: Tính sai số giữa dòng đặt và dòng đo. Từ đó tính Ud, Uq làm đầu ra điều khiển.

$$\begin{aligned} e_d &= I_{d,ref} - I_d \\ e_q &= I_{q,ref} - I_q \end{aligned} \tag{3.3}$$

5. Biến đổi Park ngược + điều chế PWM:

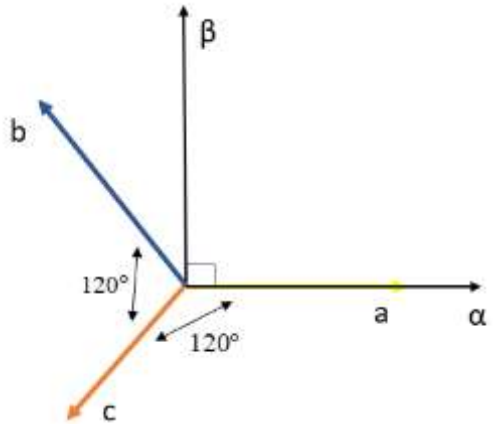
- Chuyển U_d, U_q trở lại Uα, Uβ, rồi U_{ABC} (ba pha).
- Áp dụng kỹ thuật điều chế PWM để tạo xung điều khiển cho ba pha động cơ.

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 (3.4).



Hình 3.2 Phép biến đổi Clarke

Phương trình chuyển đổi Clarke:

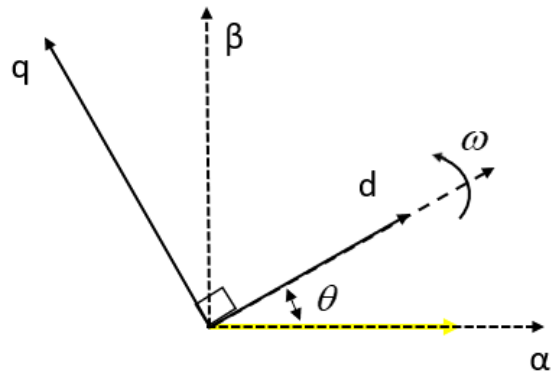
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Trong đó, $i\alpha$ và $i\beta$ 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.

3.3.2 Phép biến đổi Park

Với phép biến đổi Park, hai dòng điện xoay chiều ($i\alpha$, $i\beta$) 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



Hình 3.3 Phép biến đổi Park

Phương trình chuyển đổi Park:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

3.4 Điều khiển tốc độ

Nhận đầu vào là tốc độ đặt ω_{ref}.

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

$$\omega = \frac{\theta_{now} - \theta_{prev}}{\Delta t} \tag{3.6}$$

Sử dụng PID để tính dòng Iq_ref:

$$I_{q,ref} = PID(\omega_{ref} - \omega) \tag{3.7}$$

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

Đầu vào là góc vị trí đặt θ_{ref}.

Cảm biến AS5147U cung cấp θ thực tế.

Sai số vị trí:

$$e_\theta = \theta_{ref} - \theta \tag{3.8}$$

Sử dụng PID để tính tốc độ tham chiếu:

$$\omega_{ref} = PID(e_\theta) \tag{3.9}$$

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

3.6 Điều chế sin PWM

Điều chế sin PWM là một kỹ thuật điều chế tín hiệu được sử dụng để tạo 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 sin 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 Id, Iq) với sóng tam giác (sóng

mang). Kết quả là độ rộng xung của tín hiệu PWM thay đổi theo biên độ 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:

$$\begin{aligned} U_\alpha &= U_d \cos(\theta) - U_q \sin(\theta) \\ U_\beta &= U_d \sin(\theta) - U_q \cos(\theta) \end{aligned} \tag{3.10}$$

2. Chuyển về ba pha:

$$\begin{aligned} U_a &= U_\alpha \\ U_b &= -0.5U_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta \\ U_c &= -0.5U_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta \end{aligned} \tag{3.11}$$

3. Chuẩn hóa điện áp pha: Các giá trị điện áp Ua, Ub, Uc 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 khi chuẩn hóa được ánh xạ sang độ rộng xung PWM sử dụng chức năng PWM mode 2 của 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 trong driver (SimpleFOC Shield), từ đó tạo ra dòng điện ba pha tương ứng cho động cơ.

CHƯƠNG 4: LƯU ĐỒ THUẬT TOÁN

4.1 Giới thiệu

Chương này trình bày chi tiết quy trình điều khiển động cơ BDLC bằng thuật toán FOC thông qua giao thức truyền thông CANopen. Mỗi khối chức năng trong lưu đồ thể hiện một giai đoạn cụ thể từ khởi tạo hệ thống đến điều khiển vòng dòng, vòng tốc độ và vòng vị trí. Hệ thống gồm một thiết bị điều khiển chính (Master) giao tiếp với một nút điều khiển động cơ (Slave) thông qua CANopen để truyền giá trị đặt (Setpoint) và nhận phản hồi từ động cơ.

4.2 Lưu đồ thuật toán

Lưu đồ thuật toán mô tả quy trình truyền thông giữa thiết bị điều khiển trung tâm và bộ điều khiển động cơ, tập trung và các hoạt động liên quan đến:

Khởi tạo hệ thống CANopen

Thiết lập cấu hình PDO

Truyền nhận dữ liệu điều khiển và phản hồi động cơ

Mối quan hệ giữa truyền thông và thuật toán điều khiển

4.2.1 Lưu đồ tổng quan hệ thống điều khiển

Lưu đồ này mô tả quá trình khởi tạo hệ thống và vòng lặp chính xử lý giao tiếp CANopen và điều khiển động cơ. Lưu đồ được chia thành 3 nhánh chính, mô tả trình tự xử lý từ lúc khởi động hệ thống cho đến khi thực hiện các vòng điều khiển. Dưới đây là mô tả theo thứ tự luồng dữ liệu:

Nhánh trái – Khởi tạo hệ thống

START

- Bắt đầu chương trình.

Khởi tạo hệ thống

- Cấu hình các thành phần như:
- Giao tiếp CAN
- ADC để đọc dòng
- Timer để tạo ngắt định kỳ
- PWM để điều khiển động cơ

Khởi tạo stack CANopen:

- Gọi các hàm như CO_init (), cấu hình Object Dictionary và khởi tạo CANopenNode
- Đây là bước để thiết bị có thể tham gia vào mạng CANopen với vai trò Slave

Vòng lặp while

Xử lý CANopen

- Trong mỗi vòng lặp
- Nhận dữ liệu từ RPDO
- Gửi TPDO

Nhánh giữa – Xử lí khi đã vào trạng thái NMT Operational

Kiểm tra trạng thái NMT:

- Kiểm tra thiết bị đã được master đưa vào trạng thái Operational .
- Nếu chưa, bỏ qua phần điều khiển.

Nếu NMT = Operational, tiếp tục:

Đọc dữ liệu RPDO từ Master:

- Các dữ liệu như:
- rx_theta: vị trí tham chiếu
- rx_speed: tốc độ tham chiếu
- rx_mode: chế độ điều khiển (0: position, 1: speed)

Cập nhật giá trị tham chiếu:

- Gán rx_theta vào theta_ref
- Gán rx_speed vào velocity_ref

Cập nhật Object Dictionary với dữ liệu feedback:

- Lưu các giá trị thực tế như:
- I_d , I_q : dòng thực tế
- theta_now: vị trí hiện tại
- speed_now: tốc độ hiện tại

Gửi TPDO:

- Truyền dữ liệu phản hồi về Master (PC)

Nhánh phải – Xử lý vòng điều khiển

Kiểm tra Flag_current_loop == 1?

Nếu **YES**: Tiến hành điều khiển

Cập nhật hệ số PID

Gọi vòng điều khiển dòng (Current_Loop()):

- Tính toán và áp dụng thuật toán FOC để điều khiển dòng I_d và I_q.

Gọi vòng điều khiển tốc độ (Speed_Loop()):

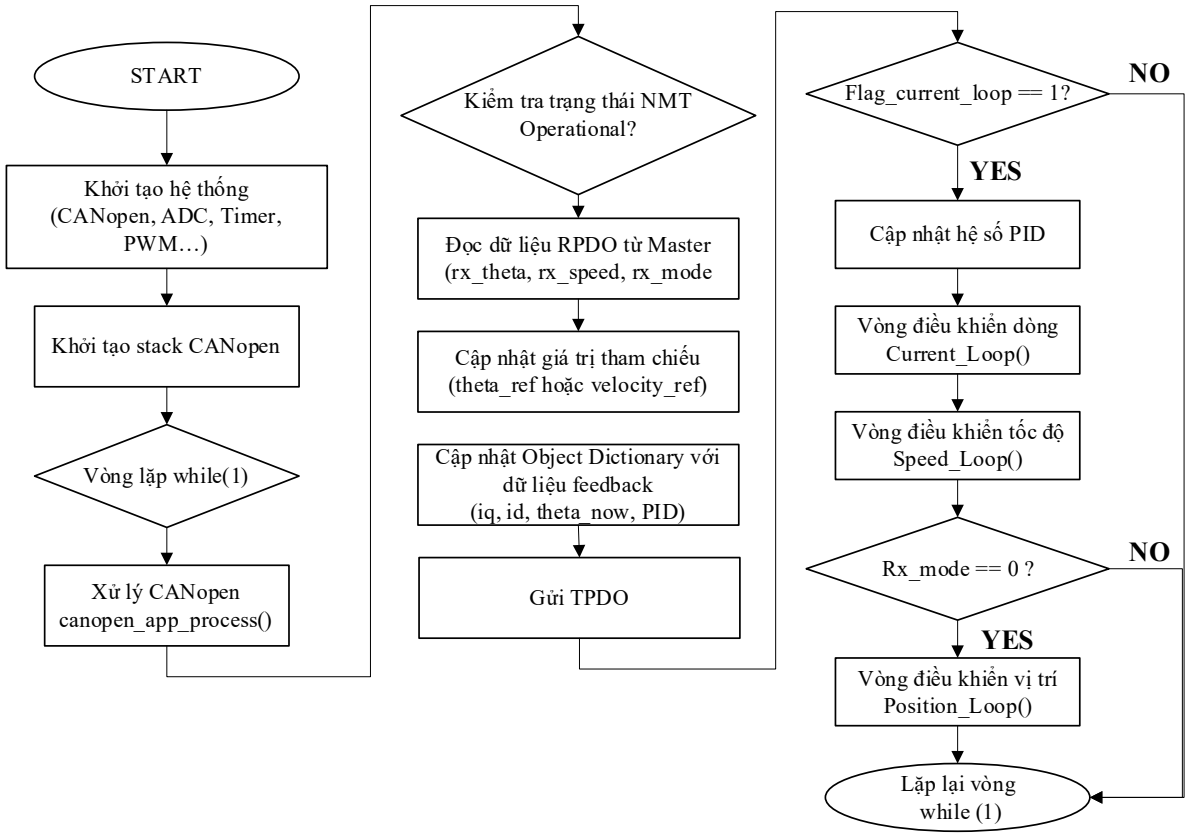
- Tính sai số giữa vận tốc thực và tham chiếu → tính I_d _ref.

Kiểm tra rx_mode == 0?:

- Nếu đang ở chế độ điều khiển vị trí:
- Gọi Position_Loop() để tính velocity_ref.

Lặp lại vòng while(1):

- Quay lại vòng chính để tiếp tục lặp.



Hình 4.1 Lưu đồ thuật toán điều khiển chính hệ thống

4.2.2 Vòng điều khiển dòng

Mục tiêu của vòng điều khiển dòng là điều khiển dòng I_d và I_q để đạt giá trị tham chiếu bằng điều khiển PWM.

Luồng xử lý từ trái sang phải:

START

Tính dt (Update_dt)

- Tính thời gian trôi qua giữa 2 lần ngắt, dùng để:
- Tính tốc độ thay đổi dòng
- Điều chỉnh đạo hàm trong bộ PID
- Đảm bảo điều khiển ổn định với các biến thiên thời gian.

Tính góc điện (electricalAngle)

- Dựa vào tín hiệu hall sensor
- Tính toán góc rotor theo đơn vị điện (số cực).

Biến đổi Clark (abc – αβ)

- Chuyển đổi dòng 3 pha ia, ib, ic sang hệ tọa độ αβ

Biến đổi Park (αβ – dq)

- Dựa trên góc điện, chuyển hệ tọa độ αβ về dq

Tính sai số dòng I_d và I_q

- So sánh giữa giá trị tham chiếu và đo thực tế
- Đây là đầu vào cho bộ điều khiển PID.

PID dòng tính V_d và V_q

- Dùng bộ điều khiển PID
- Điều khiển để giữ I_d ở 0 và I_q theo mo-men mong muốn.
- Đầu ra là điện áp V_c và V_q

Biến đổi Park ngược (dq – αβ)

- Biến đổi ngược để đưa điện áp về hệ αβ

Tính điện áp V_a V_b V_c

- Biến đổi ngược Clark (αβ – abc) để ra điện áp từng pha.
- Kết quả là 3 điện áp đầu vào cho inverter.

Cập nhật PWM (setPWM)

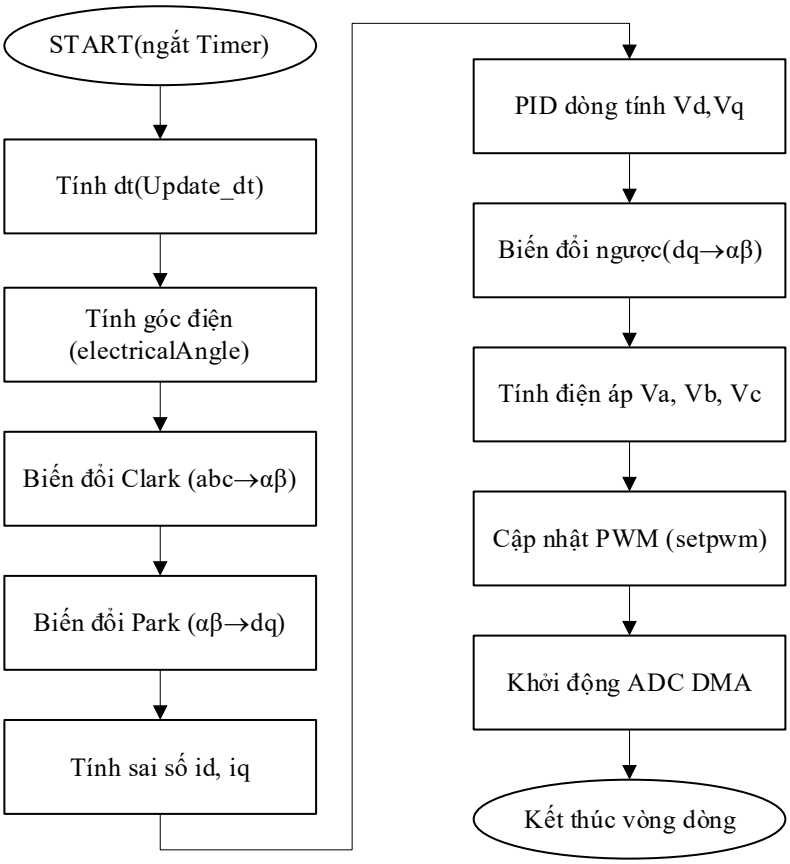
- Tính toán độ rộng xung cần thiết để tạo ra điện áp V_a V_b V_c
- Gửi lệnh cập nhật Duty Cycle cho PWM timer.

Khởi động ADC DMA.

- Kích hoạt lại DMA để dọc dòng cho chu kỳ tiếp theo.

Kết thúc vòng dòng

- Kết thúc hàm xử lý ngắt.



Hình 4.2 Lưu đồ thuật toán mạch vòng điều khiển dòng

4.2.3 Vòng điều khiển tốc độ

Mục tiêu của vòng điều khiển tốc độ là điều khiển momen của động cơ thông qua việc điều chỉnh thành phần dòng I_q liên quan trực tiếp đến lực quay.

Phân tích từng bước ở trong lưu đồ như sau:

Bước 1: START

- Khởi đầu vòng điều khiển tốc độ.

Bước 2: Đọc góc encoder

- Lấy giá trị hiện tại từ encoder
- Giá trị này được dùng để tính toán tốc độ quay của rotor.

Bước 3: Tính delta góc – tính vận tốc

- Delta góc = góc hiện tại – góc trước đó
- Dùng delta góc chia cho thời gian mẫu để tính vận tốc góc (vòng/phút):

$$\omega = \frac{\theta_{now} - \theta_{prev}}{\Delta t} \tag{4.1}$$

- Vận tốc này là tốc độ thực tế của động cơ.

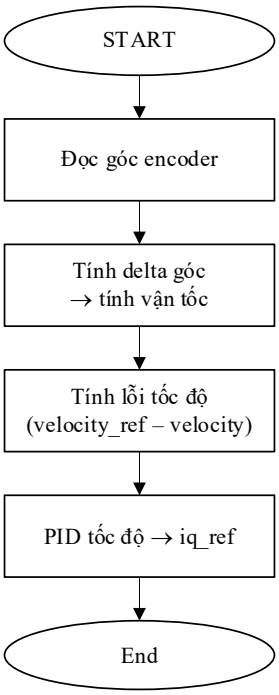
Bước 4: Tính lỗi tốc độ

- So sánh giữa tốc độ mong muốn đặt từ RPDO và tốc độ thực tế:
- Đây là đầu vào cho bộ điều khiển PID tốc độ.

Bước 5: PID tốc độ tính ra i_q^{ref}

- Dùng bộ điều khiển PID để tính ra dòng i_q^{ref}
- Đầu ra này sẽ được sử dụng làm đầu vào cho tham chiếu cho vòng điều khiển dòng.

Bước 6: END



Hình 4.3 Lưu đồ thuật toàn mạch vòng điều khiển tốc độ

4.2.4 Vòng điều khiển vị trí

Mục tiêu của vòng điều khiển vị trí là điều khiển vị trí góc quay rotor đến một vị trí mong muốn

$$\theta_{now} = \frac{raw\_angle}{now\_angle} \times 2\pi$$
$$velocity\_ref = PID(e_\theta)$$

(4.2)

Phân tích từng bước trong lưu đồ:

Bước 1: START

- Bắt đầu vòng điều khiển vị trí

Bước 2: Đọc góc encoder (raw_angle)

- Lấy dữ liệu từ encoder quay (cảm biến AS5047) dữ liệu ở dạng raw với độ phân giải 12 bit (0 – 4095)

Bước 3: Tính góc thực tế θ_{now}

- Chuyển đổi raw_angle sang đơn vị góc

$$\theta_{now} = \frac{raw\_angle}{now\_angle} \times 2\pi \tag{4.3}$$

- Kết quả là vị trí hiện tại của rotor tính theo radian.

Bước 4: Tính sai số vị trí

- Tính độ lệch giữa vị trí mong muốn và vị trí hiện tại:

$$e_\theta = \theta_{ref} - \theta_{now} \tag{4.4}$$

Bước 5: PID vị trí - velocity_ref

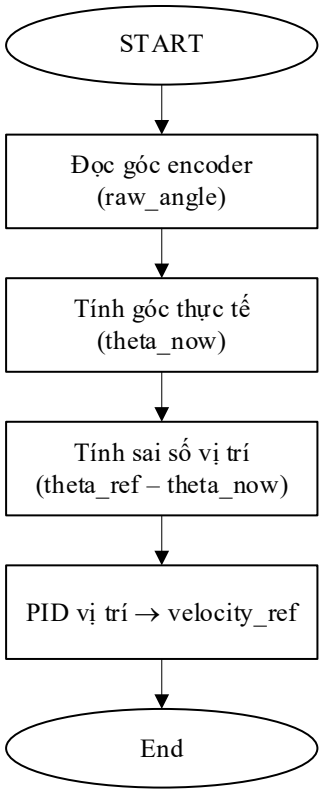
- Dùng bộ điều khiển PID vị trí để tính tốc độ mong muốn:

$$velocity\_ref = PID(e_\theta) \tag{4.5}$$

- Đầu ra là vận tốc tham chiếu được truyền cho vòng điều khiển tốc độ.

Bước 6: END

- Kết thúc vòng điều khiển vị trí.



Hình 4.4 Lưu đồ thuật toán mạch vòng điều khiển vị trí

CHƯƠNG 5: TRIỂN KHAI PHẦN MỀM TRÊN STM32

Trong dự án điều khiển động cơ BLDC theo phương pháp FOC vi điều khiển STM32 đóng vai trò trung tâm trong việc xử lý và điều khiển hệ thống. Các ngoại vi tích hợp trên STM32 được cấu hình để thực hiện các nhiệm vụ chính như phát xung PWM 3 pha, đo dòng điện pha, giao tiếp với encoder từ tính AS5147U qua giao thức SPI, và quản lý tín hiệu thời gian thực. Ngoài ra, để đảm bảo khả năng giao tiếp điều khiển từ xa trong hệ thống điều khiển phân tán, giao thức truyền thông CANopen cũng được triển khai trên STM32. CANopen giúp hệ thống dễ dàng trao đổi dữ liệu điều khiển và trạng thái vận hành với thiết bị chủ (master), đồng thời hỗ trợ phát hiện và xử lý lỗi một cách nhanh chóng.

Chương này trình bày chi tiết về cách cấu hình các module chính trên STM32, bao gồm:

Cấu hình TIM1 để phát xung PWM 3 pha.

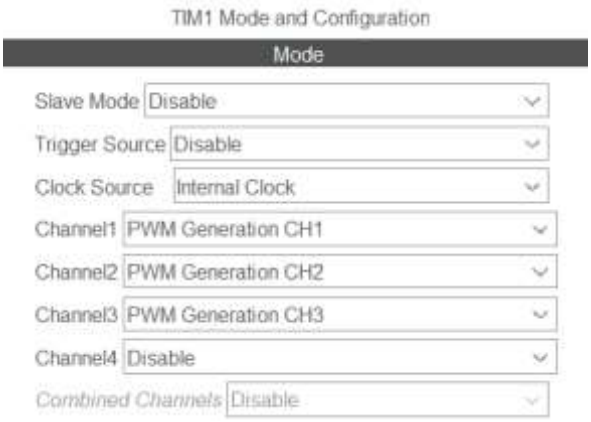
Cấu hình module CAN và giao thức CANopen để đảm bảo truyền thông ổn định và hiệu quả trên busCAN.

Các phần mềm hỗ trợ khác cần thiết cho quá trình điều khiển động cơ theo thời gian thực.

5.1 Cấu hình TIM1 – Phát xung PWM 3 pha.

5.1.1 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.

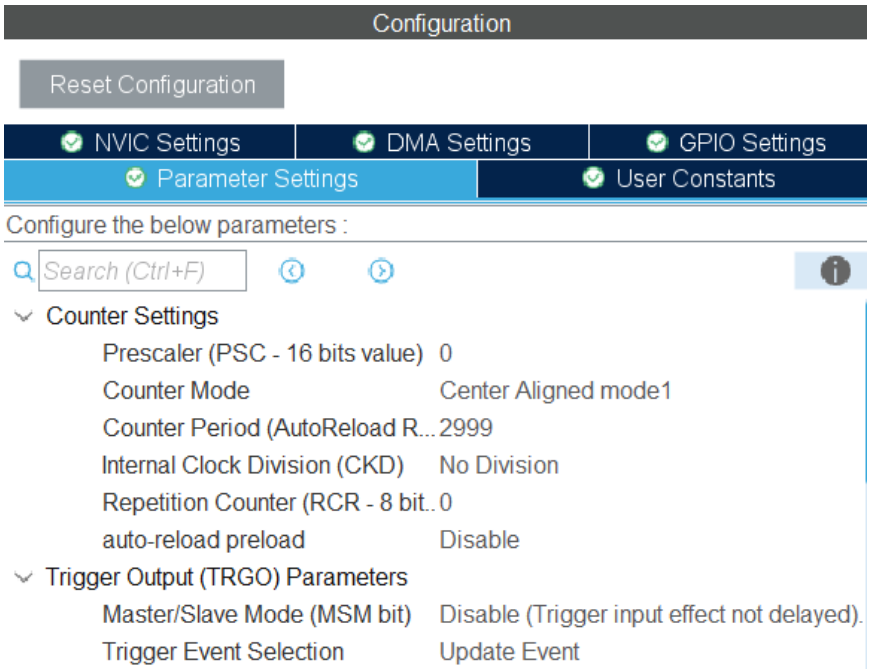


Hình 5.1 Timer 1 Channel 1,2,3

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 (nhiễu điện từ) so với Edge-aligned mode.



Hình 5.2 PWM Center Aligned Mode 1 và Trigger cho ADC Injected

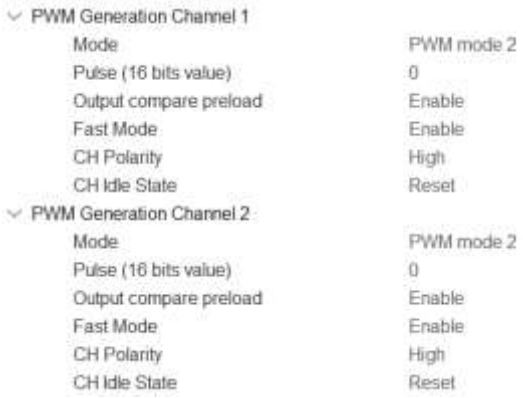
5.1.2 Cấu hình các kênh của TIM1

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 5.3 Cấu hình PWM Mode 2

5.2 Cấu hình SPI – Giao tiếp với Encoder AS5147U

5.2.1 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).

5.2.2 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 5.4 Cấu hình SPI1

5.2.3 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 (~350 ns), 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, trích xuất 14-bit dữ liệu góc.

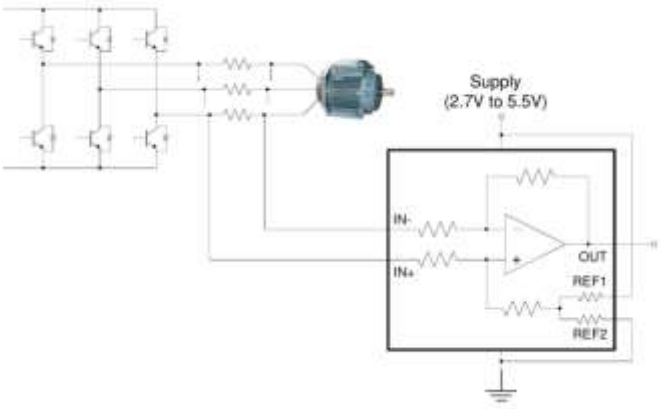
5.3 Cấu hình ADC1 – Đo dòng điện 3 pha

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.

5.3.1 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 5.5 Sơ đồ kết nối INA240

5.3.2 Nguyên lý đo dòng điện

Mỗi pha động cơ BLDC được nối qua một điện trở shunt có giá trị nhỏ (ví dụ: 10mΩ).

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.

5.3.3 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)

5.3.4 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…).

5.4 Cấu hình ADC2 – Đo điện áp nguồn.

5.4.1 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.

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:

$$V_{ADC} = V_{IN} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \tag{5.1}$$

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_2 : hai điện trở phân áp

Lựa chọn điện trở:

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

- $R_1 = 10\text{k}\Omega$
- $R_2 = 2\text{k}\Omega$

Khi đó:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2}{12} = 0.1667 \tag{5.2}$$

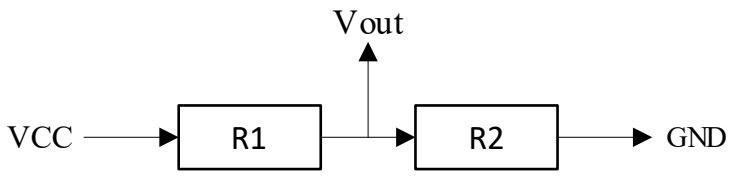
⇨ Với $V_{IN} = 20\text{V} \rightarrow V_{ADC} = 20 \times 0.1667 = 3.33\,\text{V}$

5.4.2 Sơ đồ kết nối

Đầu vào Vin: nối vào nguồn 5V–20V

Điểm giữa R_1 và R_2 : nối vào chân ADC của vi điều khiển

Đầu còn lại của R_2 : nối với GND



Hình 5.6 Cấu trúc cầu phân áp

5.4.3 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.

Kênh ADC: IN1 (PA0)

Độ phân giải: 12-bit (0–4095)

Chế độ chuyển đổi: Continuous Conversion Mode

Data Alignment: Right

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	1
Channel	Channel 1
Sampling Time	15 Cycles

Hình 5.7 Cấu hình AD2_IN1

5.4.3.1 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

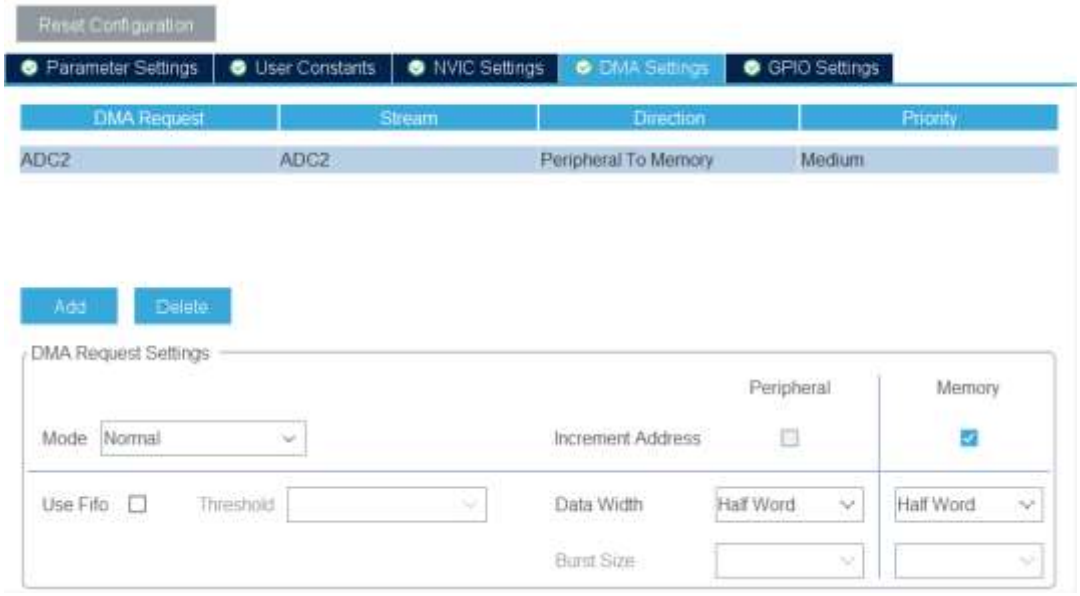
Mode: Normal (có thể chọn Circular nếu đo liên tục)

Peripheral Increment: Disable

Memory Increment: Enable

Data Width: Half Word cho cả Peripheral và Memory

Use FIFO: Không sử dụng

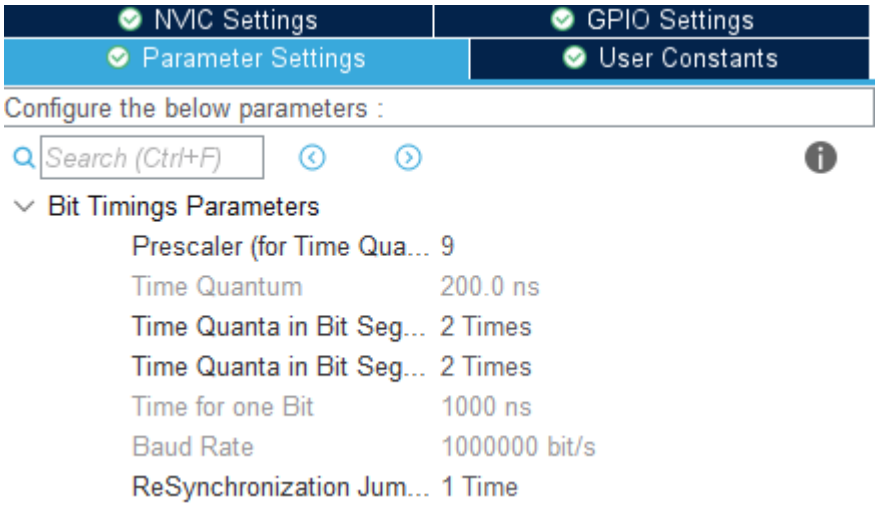


Hình 5.8 Cấu hình DMA cho ADC2

5.5 Giao tiếp CAN

5.5.1 Cấu hình CAN

Bộ điều khiển CAN trên STM32 được cấu hình để đảm bảo việc truyền thông ổn định và tuân thủ các yêu cầu kỹ thuật của mạng CANopen.



Hình 5.9 Cấu hình CAN trên STM32

Việc cấu hình bao gồm các tham số chính sau:

- Instance: CAN1 là module CAN tích hợp trên STM32 thực hiện chức năng truyền nhận dữ liệu qua busCAN vật lý.
- Prescaler: Giá trị hệ số chia tần số đặt là 9. Prescaler có vai trò điều chỉnh tốc độ bit của CAN. Khi kết hợp với các tham số thời gian khác, cấu hình này cho phép đạt baudrate 500 kbps.

- Chế độ hoạt động: CAN được đặt ở chế độ Normal Mode, đảm bảo truyền thông thực tế với các thiết bị khác trên mạng.

Tham số thời gian:

- SYNC Jump Width (SJW): 1TQ, cho phép đồng bộ lại khi có sai lệch nhỏ.
- Time Segment 1 (BS1): 2TQ, xác định thời gian lấy mẫu bit.
- Time Segment 2 (BS2): 2TQ, giúp kết thúc bit thời gian và hỗ trợ tái đồng bộ.
- Tốc độ truyền: Cấu hình đạt baudrate 1Mbps (1.000.000 bit/s), phù hợp với các ứng dụng cần tốc độ truyền nhanh và thời gian đáp ứng thấp.
- Thời gian cho 1 bit: 1000ns đảm bảo tính chính xác trong giao tiếp.

Cấu hình này đảm bảo hệ thống hoạt động ở tốc độ cao (1Mbps), đáp ứng yêu cầu truyền thông khắt khe của mang CANopen trong hệ thống điều khiển BLDC. Nhờ đó, các lệnh điều khiển và dữ liệu phản hồi được truyền đi nhanh chóng, giúp tối ưu hiệu quả điều khiển và tăng độ tin cậy cho toàn hệ thống.

5.6 Thiết kế và cấu hình Object Dictionary bằng CANopenEditor

CANopenEditor là công cụ mã nguồn mở do công đồng phát triển, được dùng để tạo và quản lý Object Dictionary (OD) cho các thiết bị CANopen. OD là một thành phần cốt lõi trong kiến thức CANopen, chứa tất cả các thông tin cấu hình, dữ liệu vận hành, thông số truyền nhận (PDO, SDO) và trạng thái thiết bị.

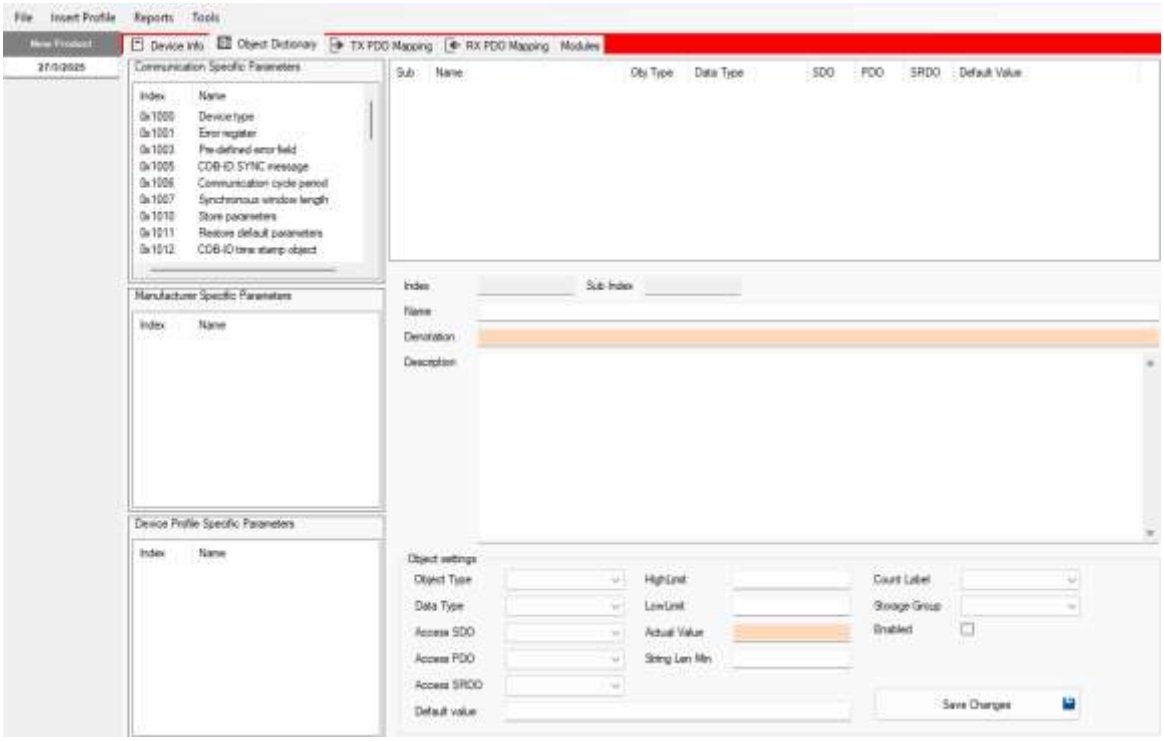
Phần mềm CANopenEditor cung cấp giao diện trực quan, cho phép người dùng dễ dàng:

- Tạo mới hoặc chỉnh sửa các mục trong OD(entry)
- Định nghĩa các chỉ số (Index), Sub-Index, kiểu dữ liệu và quyền truy cập
- Gán mối liên hệ với PDO, SDO
- Xuất file dữ liệu dưới dạng .c, .h, .eds phục vụ cho firmware và phần mềm giám sát.

Hình 5.10 Phần mềm CANopenEditor

5.6.1 Giao diện cấu trúc cơ bản

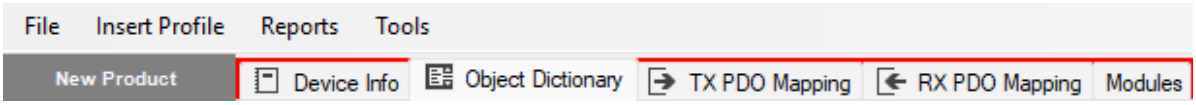
Sau khi mở phần mềm CANopenEditor, người dùng sẽ làm việc trên một giao diện đồ hoạ trực quan, giúp dễ dàng và chỉnh sửa Object Dictionary (OD) của thiết bị CANopen.



Hình 5.11 Giao diện phần mềm CANopenEditor

Giao diện được chia thành các khu vực chính sau:

- **Thanh công cụ chính**



Hình 5.12 Thanh công cụ chính của CANopenEditor

Gồm các tab chính:

- File, Insert Profile, Reports, Tools: chứa các chức năng về tạo, mở, lưu project, xuất file .c/.h .eds
- Tab làm việc
  - + **Device Info:** Nhập thông tin thiết bị như Vendor ID, Product Code,…
  - + **Object Dictionary:** Giao diện chính để xây dựng cấu trúc OD.
  - + **TX PDO Mapping:** Quản lý các object được ánh xạ vào TPDO
  - + **RX PDO Mapping:** Quản lý object ánh xạ vào RPDO

+ **Modules:** Dùng cho các cấu trúc mô-đun

- **Cây Object Dictionary**

  Hiển thị tất cả object đã tạo trong OD, phân chia theo từng vùng:

  - **Communication Specific Parameters (0x1000 – 0x1FFF):** Các object giao thức cơ bản như Device Type, Error Register, SYNC,…
  - **Manufacturer Specific Parameters (0x2000 – 0x5FFF):** Vùng do người dùng tự định nghĩa.
  - **Device Profile Specific Parameters (0x6000 – 0x9FFF):** Dùng cho chuẩn hóa từng loại thiết bị

- **Danh sách sub-index**

  Khi chọn một object kiểu RECORD hay ARRAY, danh sách sub-index sẽ hiển thị ở bảng bên phải: Ví dụ như object 0x2200 TPDO trong hình có các sub như:

Sub	Name	Obj Type	Data Type	SDO	PDO	SRDO	Default Value
	TPDO	RECORD					
0x00	Highest sub-index supported	VAR	UNSIGNED8	ro	no	no	0x06
0x01	i_d	VAR	REAL32	rw	t	no	0
0x02	i_q	VAR	REAL32	rw	t	no	0
0x03	velocity	VAR	REAL32	rw	t	no	0
0x04	total_angle	VAR	REAL32	rw	t	no	0
0x05	angle_elec_rad	VAR	REAL32	rw	t	no	0
0x06	current_sq	VAR	REAL32	rw	t	no	0

Hình 5.13 Danh sách sub-index

- **Khu vực chỉnh sửa Object**

  Khi chọn một Object, người dùng có thể sửa chi tiết:

  - **Index, Sub-Index**
  - **Name:** Đặt tên cho object
  - **Object Settings:**
    - Object Type: Variable, Record, Array
    - Data Type: UNSIGNED8, INTEGER16, REAL32, …
    - Default Value
    - Storage Group: chọn nhóm lưu trữ
    - Enabled: kích hoạt object trong xuất file

5.6.2 Ứng dụng tạo Object Dictionary cho hệ thống điều khiển động cơ BLDC

Sau khi tìm hiểu lý thuyết và giao diện phần mềm CANopenEditor, bước tiếp theo là tiến hành tạo Object Dictionary (OD) phù hợp với điều khiển và giám sát hệ thông BLDC sử dụng giao thức CANopen. OD là nói lưu trữ toàn bộ thông tin cấu hình, các tham số truyền nhận dữ liệu cũng như quyền truy cập và kiểu dữ liệu được hỗ trợ.

5.6.2.1 Xác định tham số cần thiết trong hệ thống điều khiển BLDC

Dựa trên thiết kế của hệ thống, các tham số chính cần truyền và nhận thông qua CANopen bao gồm:

Bảng 5.1 Các tham số truyền nhận trong hệ thống điều khiển động cơ BLDC

Tham số	Ý nghĩa
velocity_now	Vận tốc hiện tại của động cơ
velocity_ref	Vận tốc tham chiếu (điều khiển từ Master)
theta_ref	Góc quay tham chiếu (điều khiển từ Master)
theta_now	Góc quay hiện tại của động cơ
i_d	dòng điện d trong khung tọa độ dq
i_q	dòng điện q trong khung tọa độ dq
kp	Hệ số tỉ lệ
ki	Hệ số tích phân
kd	Hệ số vi phân
Mode	Chế độ điều khiển

Các biến này sẽ được sắp xếp trong OD như sau:

- **0x2000 RPDO:** Gói dữ liệu Slave (STM32) nhận được từ Master (PC). Dùng để truyền lệnh hoặc điều khiển tốc độ, góc, chế độ điều khiển.
- **0x2200 TPDO:** Gói dữ liệu truyền từ Slave (STM32) đến Master (PC). Dùng để truyền các trạng thái hiện tại của động cơ như tốc độ thực tế, vị trí góc, dòng điện.
- **0x2400 TPDO_PID:** Gói dữ liệu truyền từ Slave (STM32) đến Master (PC). STM32 gửi các thông số PID hiện tại (kp, ki, kd) lên PC để hiển thị.

5.6.2.2 Tạo mục TPDO và TPDO_PID trong OD

TPDO

Trong phần mềm CANopenEditor, thực hiện các bước sau:

- Bước 1: Chọn mục Manufacturer Specific Parameters
- Bước 2: Thêm một entry mới:
  - Index: 0x2200
  - Name: TPDO
  - Object Type: RECORD
  - Access SDO: RW
  - Access PDO: T
  - Storage Group: PERSIST_COMM

- Bước 3: Thêm các sub-index cho TPDO:

Bảng 5.2 Bảng Sub-Index của TPDO

Sub-index	Name	Data Type	Access	Ghi chú
0x00	Highest sub-index	UNSIGNED8	RO	Tổng số sub-index
0x01	i_d	REAL32	T	dòng điện i_d
0x02	i_q	REAL32	T	dòng điện i_q
0x03	theta_now	REAL32	T	Góc quay hiện tại
0x04	speed_now	REAL32	T	vận tốc hiện tại

TPDO_PID

- Bước 1: Chọn mục Manufacturer Specific Parameters
- Bước 2: Thêm một entry mới:
  - Index: 0x2400
  - Name: TPDO_PID
  - Object Type: RECORD
  - Access SDO: RW
  - Access PDO: T
  - Storage Group: PERSIST_COMM
- Bước 3: Thêm các sub-index cho TPDO_PID:

Bảng 5.3 Bảng Sub-Index của TPDO_PID

Sub-index	Name	Data Type	Access	Ghi chú
0x00	Highest sub-index	UNSIGNED8	RO	Tổng số sub-index
0x01	kp_speed	UNSIGNED16	T	Hệ số kp của vòng điều khiển tốc độ
0x02	ki_speed	UNSIGNED16	T	Hệ số ki của vòng điều khiển tốc độ
0x03	kd_speed	UNSIGNED16	T	Hệ số kd của vòng điều khiển tốc độ
0x04	kp_pos	UNSIGNED16	T	Hệ số kd của vòng điều khiển vị trí
0x05	ki_pos	UNSIGNED16	T	Hệ số ki của vòng điều khiển vị trí
0x06	kd_pos	UNSIGNED16	T	Hệ số kd của vòng điều khiển vị trí

5.6.2.3 Cấu hình TPDO Mapping

Trong hệ thống truyền thông CANopen, TXPDO là đối tượng dùng để gửi dữ liệu từ thiết bị Node lên mạng CAN.

Các Object được ánh xạ (Mapping) bao gồm:

Bảng 5.4 Cấu hình ánh xạ TXPDO cho các tham số truyền dữ liệu

	COB-ID (hex)	**Index/Sub-index**	**Nội dung dữ liệu truyền**
1	1A0h	0x2200/03	Góc quay hiện tại (theta_now)
		0x2200/04	Tốc độ hiện tại (speed_now)
2	2A0h	0x2200/01	Dòng điện d (i_d)
		0x2200/02	Dòng điện q (i_q)
3	3A0h	0x2400/01	Hệ số kp của vòng điều khiển tốc độ (kp_speed)
		0x2400/02	Hệ số ki của vòng điều khiển tốc độ (ki_speed)
		0x2400/03	Hệ số ki của vòng điều khiển tốc độ (ki_speed)
4	4A0h	0x2400/04	Hệ số kp của vòng điều khiển vị trí (kp_pos)
		0x2400/05	Hệ số ki của vòng điều khiển vị trí (ki_pos)
		0x2400/06	Hệ số kd của vòng điều khiển vị trí (kd_pos)

5.6.2.4 Tạo mục RPDO trong OD

Ta cần tạo các biến để nhận lệnh và dữ liệu điều khiển từ PC đên STM32.

- Index: 0x2000
- Name: RPDO
- Object Type: RECORD
- Data type: REAL32
- Access SDO: RW
- Access PDO: R (vì Master gửi, Slave nhận)

- Storage Group: PERSIST_COMM

Bảng 5.5 Bảng Sub-Index của RPDO

Sub-index	Name	Data Type	Access	Ghi chú
0x00	Highest sub-index	UNSIGNED8	RO	Tổng số sub-index
0x01	rx_theta	UNSIGNED32	R	dòng điện i_d
0x02	rx_speed	UNSIGNED32	R	dòng điện i_q
0x03	rx_mode	UNSIGNED32	R	Góc quay hiện tại

5.6.2.5 Cấu hình RPDO Mapping

Trong hệ thống truyền thông CANopen, RXPDO là đối tượng dùng để nhận dữ liệu từ mạng CAN.

Các Object được ánh xạ (Mapping) bao gồm:

Bảng 5.6 Cấu hình ánh xạ RXPDO cho các tham số truyền dữ liệu

	COB-ID (hex)	Index/Sub-index	Nội dung dữ liệu truyền
1	180h	0x2000/01	Góc quay tham chiếu (rx_theta)
2	183h	0x2000/03	Chế độ điều khiển (rx_mode)
3	184h	0x2000/02	Tốc độ tham chiếu (rx_speed)

CHƯƠNG 6: XÂY DỰNG PHẦN MỀM ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG CƠ

6.1 Mục tiêu của phần mềm ứng dụng

- Phát triển một ứng dụng giao tiếp với hệ thống động cơ thông qua giao thức CANopen.
- Thực hiện các chức năng cơ bản: gửi lệnh điều khiển động cơ, giám sát trạng thái động cơ và đọc các tham số vận hành.

6.2 Công cụ và công nghệ sử dụng

- Ngôn ngữ lập trình: C++
- Môi trường phát triển: QT Creator

6.2.1 Giới thiệu về phần mềm QT Creator

QT là một framework đa nền tảng. Một số ứng dụng phổ biến viết từ QT có thể kể đến như KDE, Opera, Google Earth, và Skype. QT lần đầu được giới thiệu vào tháng 5 năm 1995. QT có thể được dùng để phát triển ứng dụng mã nguồn mở lẫn các ứng dụng cho doanh nghiệp. Bộ công cụ phát triển QT rất mạnh mẽ vì nó được cả một cộng đồng mã nguồn mở hỗ trợ. Có đến hàng ngàn các nhà phát triển mã nguồn mở sử dụng QT trên toàn thế giới.

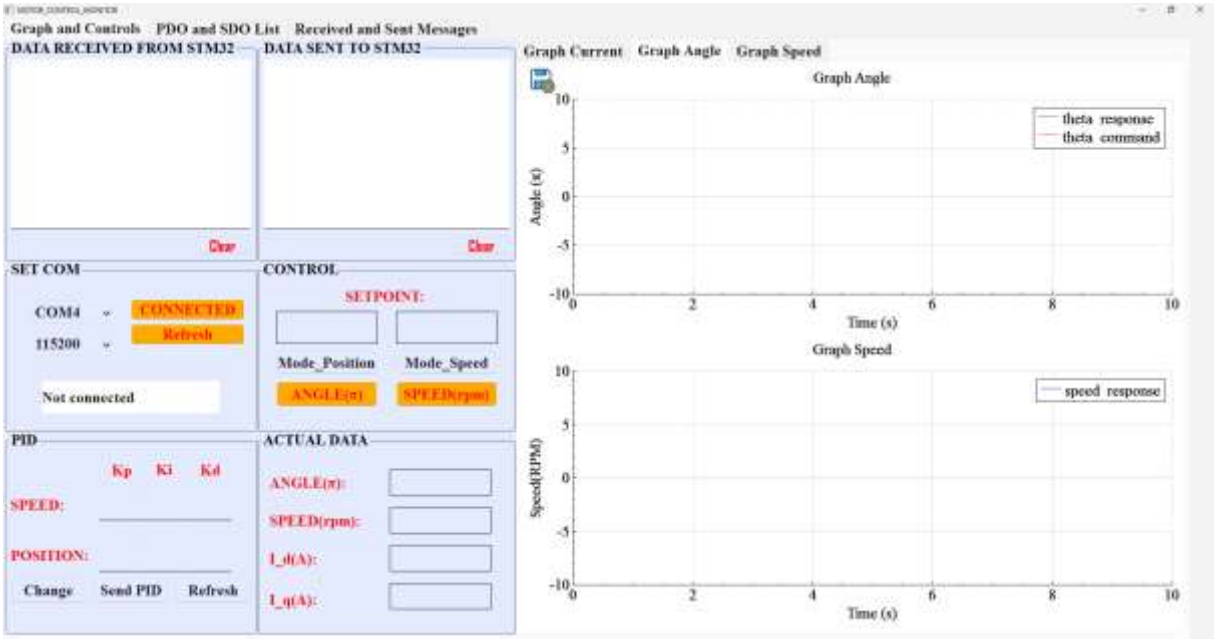
QT được viết bằng C++ và được thiết kế sử dụng trong C++. Tuy nhiên, hiện nay chúng ta đã có thể dùng thư viện với nhiều ngôn ngữ khác như Java hay Python,…

Trên thực tế, QT không phải một thư viện mà tập hợp các thư viện. Chúng rất rộng và thường thì người ta sử dụng thuật ngữ farmework, nghĩa là một khối kiến trúc tập hợp cung cấp nhiều công cụ để lập trình của chúng ta trở nên hữu hiện hơn.

Hình 6.1 Phần mềm QT Creator

6.2.2 Cấu trúc chương trình giao diện

Giao diện được xây dựng bằng phần mềm QT Creator, nhằm mục đích giám sát dữ liệu thực tế từ động cơ và gửi lệnh điều khiển thông qua giao tiếp CANopen. Giao diện chia thành nhiều khối chức năng riêng biệt, dễ sử dụng và thân thiện với người vận hành.



Hình 6.2 Giao diện chính của phần mềm điều khiển trên máy tính

Cấu trúc các khối chức năng bao gồm:

6.2.2.1 Khu vực kết nối cổng COM (SET COM)

Hiển thị danh sách các cổng COM đang có sẵn.

- Khi chưa có kết nối sẽ hiển thị trạng thái: NOT CONNECTED
- Nút CONNECTED thiết lập giao tiếp với bo STM32.
- Nút Refesh để cập nhật lại danh sách cổng COM.
- Khi kết nối thành công sẽ hiển thị trang thái "CONNECTED"

6.2.2.2 Data received from STM32

Hiển thị toàn bộ các khung tin CAN được nhận từ động cơ thông qua TPDO.

Dữ liệu được cập nhật liên tục nhờ hàm đọc CAN chạy theo chu kỳ.

Nút CLEAR: xóa nội dung hiển thị.

6.2.2.3 Data sent to STM32

Hiển thị dữ liệu mà người dùng gửi xuống STM32 qua giao thức CAN.

Nút CLEAR: Xóa nội dung vùng này.

6.2.2.4 Khối điều khiển

Nhập giá trị SET POINT mong muốn.

Có 2 lựa chọn điều khiển:

- ANGLE: gửi giá trị vị trí mong muốn.
- SPEED: gửi tốc độ tham chiếu.

Tùy vào nút được nhấn, dữ liệu sẽ được mã hóa và gửi xuống thiết bị thông qua RPDO hoặc SDO tương ứng.

6.2.2.5 Hiển thị hệ số điều khiển PID

Giao diện cung cấp vùng hiển thị hệ số điều khiển PID của động cơ giúp người dùng dễ dàng theo dõi cái thông số đã được cấu hình sẵn trong bộ điều khiển STM32.

Chúng được đọc thông qua PDO từ bộ điều khiển, tùy theo cấu hình CANopen của hệ thống.

6.2.2.6 Khối dữ liệu thực tế

Hiển thị thông số phản hồi thực từ động cơ:

- **ANGLE:** góc quay thực tế.
- **SPEED:** tốc độ thực tế.
- I_d , I_q **:** dòng điện thành phần theo trục dq.

Giá trị này được cập nhật từ TPDO của thiết bị.

6.2.3 Cơ chế truyền nhận dữ liệu

Gửi dữ liệu: Khi nhấn các nút SEND, ANGLE, SPEED, chương trình tạo khung CAN và gửi qua cổng kết nối với adapter CAN, sử dụng socket hoặc API tương ứng.

Nhận dữ liệu: Chương trình cài đặt QTimer để đọc dữ liệu CAN định kỳ và cập nhật nội dung khối "Dữ liệu nhận" và "Dữ liệu thực tế".

Dữ liệu truyền/nhận đều được ánh xạ đến các Object Dictionary của thiết bị điều khiển thông qua ID định sẵn.

6.2.4 Các tab đồ thị giám sát

Khu vực đồ thị nằm phía bên phải của giao diện phần mềm và được chia thành ba tab chính: Graph Voltage, Graph Current và Graph Angle. Mỗi tab có chức năng hiển thị trực quan các tín hiệu điện hoặc cơ từ hệ thống điều khiển động cơ, nhằm hỗ trợ người dùng giám sát thời gian thực và phân tích trạng thái hoạt động của hệ thống

6.2.4.1 Tab Graph Current

Tab Graph Current cho phép giám sát các dòng điện trong hệ FOC:

- I_d – dòng điện trục d (liên quan đến điều khiển từ thông).
- I_q – dòng điện trục q (liên quan đến điều khiển momen).

Dữ liệu dòng được lấy từ TPDO của STM32. Người dùng có thể dùng đồ thị:

- Phân tích cách hệ thống điều khiển dòng điện nhằm đáp ứng các thay đổi về momen hoặc tốc độ.

- Đảm bảo rằng dòng điện không vượt quá giới hạn cho phép.
- Theo dõi biến động dòng khi có nhiễu hoặc sự cố từ tải.

6.2.5 Các tab đồ thị giám sát

Khu vực đồ thị là một khu vực quan trọng trong giao diện, giúp người dùng giám sát các tín hiệu phản hồi từ hệ thống điều khiển động cơ theo thời gian thực. Các biểu đồ được tổ chức thành 3 tab riêng biệt: Graph Current, Graph Angle và Graph Speed.

Dữ liệu đầu vào cho đồ thị lấy từ các TPDO do STM32 truyền về bằng giao thức CANopen. Các biểu đồ này hỗ trợ trực quan hóa hoạt động của hệ thống, đồng thời phục vụ việc phân tích đáp ứng động, điều chỉnh PID, và đánh giá hiệu suất điều khiển.

6.2.5.1 Tab Graph Current

Tab Graph Current hiển thị đồ thị theo thời gian của hai thành phần dòng điện điều khiển trong hệ FOC: I_d và I_q. Ý nghĩa và chức năng của tab đồ thị này là cho phép theo dõi đáp ứng dòng điện trong quá trình khởi động, thay đổi tải hoặc thay đổi tốc độ.

6.2.5.2 Tab Graph Angle

Tab Graph Angle có chức năng hiển thị đồ thị góc quay của động cơ BLDC trong thời gian thực. Thông qua biểu đồ, người dùng có thể đánh giá:

- Độ chính xác của hệ thống điều khiển trong việc bám theo góc đặt.
- Thời gian đáp ứng của động cơ khi thay đổi góc đặt.
- Hiệu suất của thuật toán FOC cũng như độ trễ hệ thống khi giao tiếp.

Biểu đồ nãy đặc biệt hữu ích trong các tình huống cần theo dõi sự ổn định hoặc phát hiện các hiện tượng sai lệch, như trễ phản hồi, bám sai và dao động dư.

6.2.5.3 Tab Graph Speed

Tab Graph Speed hiển thị đồ thị đáp ứng tốc độ của động cơ BLDC theo thời gian, phục vụ giám sát vòng điều khiển tốc độ trong hệ thống FOC.

Dữ liệu hiển thị trên đồ thị:

- speed_ref (rpm): Giá trị tốc độ đặt do người dùng nhập và gửi xuống vi điều khiển thông qua RPDO của giao thức CANopen.
- speed_now (rpm): Giá trị tốc độ thực tế của động cơ, được phản hồi từ STM32 thông qua TPDO, lấy từ bộ mã hóa AS5147U và thuật toán ước lượng tốc độ.

Thông qua đồ thị người dùng có thể đánh giá khả năng bám tốc độ của hệ thống điều khiển.

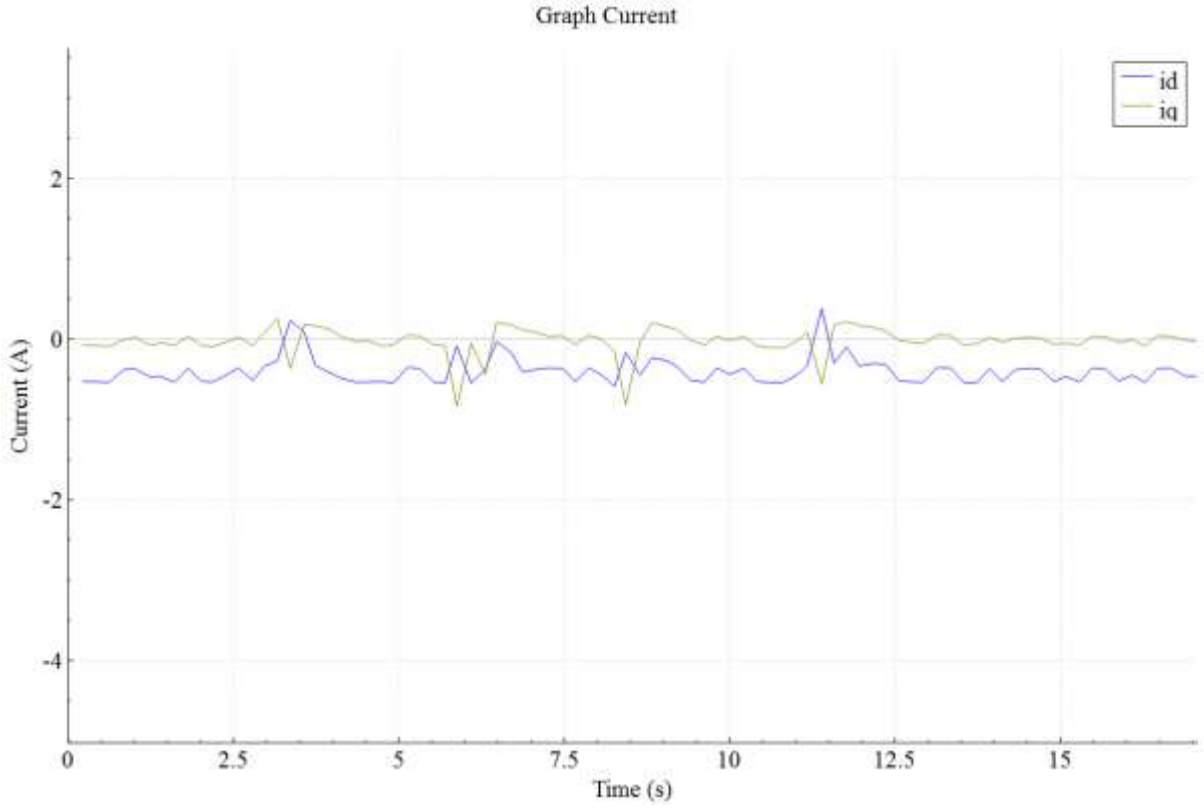
CHƯƠNG 7: KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

6.3 Kết quả thực nghiệm

6.3.1 Đáp ứng dòng điện I_d và I_q

Đồ thị dưới đây thể hiện sự thay đổi của dòng điện I_d và I_q trong quá trình điều khiển vị trí động cơ. Đây là hai thành phần dòng điện quan trọng điều khiển FOC, trong đó I_d thường được giữ ở mức 0 để không tạo ra từ thông dư, còn I_q là dòng tạo ra mo-men xoắn giúp động cơ quay đến vị trí đặt.

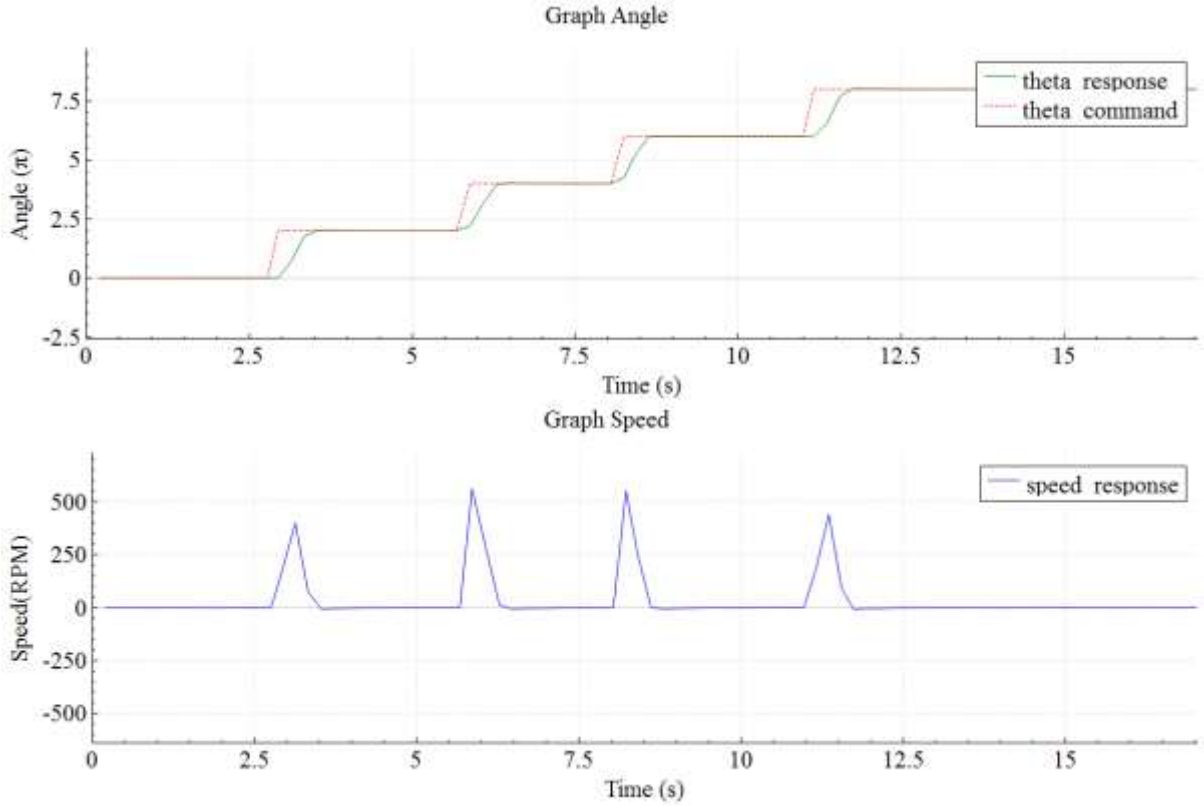
Khi vị trí chưa đạt, dòng I_q tăng nhẹ để tạo mo-men xoắn. Khi đạt vị trí, sai số vị trí giảm về 0 nên dòng I_q cũng giảm và dao động quanh 0. Điều này cho thấy hệ thống điều khiển vị trí đã hoạt động ổn định, và các dòng điều khiển được bám đúng theo nguyên lý của điều khiển FOC.



Hình 7.1 Đồ thị đáp ứng của dòng điện I_d và I_q theo thời gian

6.3.2 Đáp ứng góc quay của động cơ

Trong quá trình kiểm nghiệm đáp ứng vị trí của động cơ, giá trị góc quay (theta_command) được thay đổi theo các mức rời rạc nhằm đánh giá điều khiển chính xác và phản hồi của hệ thống điều khiển FOC. Dưới đây là đồ thị biểu diễn đáp ứng vị trí và tốc độ của động cơ khi thay đổi giá trị góc đặt tuần hoàn từ 0 lên 2π , 4π , 6π và 8π .



Hình 7.2 Đồ thị đáp ứng góc quay và tốc độ động cơ theo thời gian

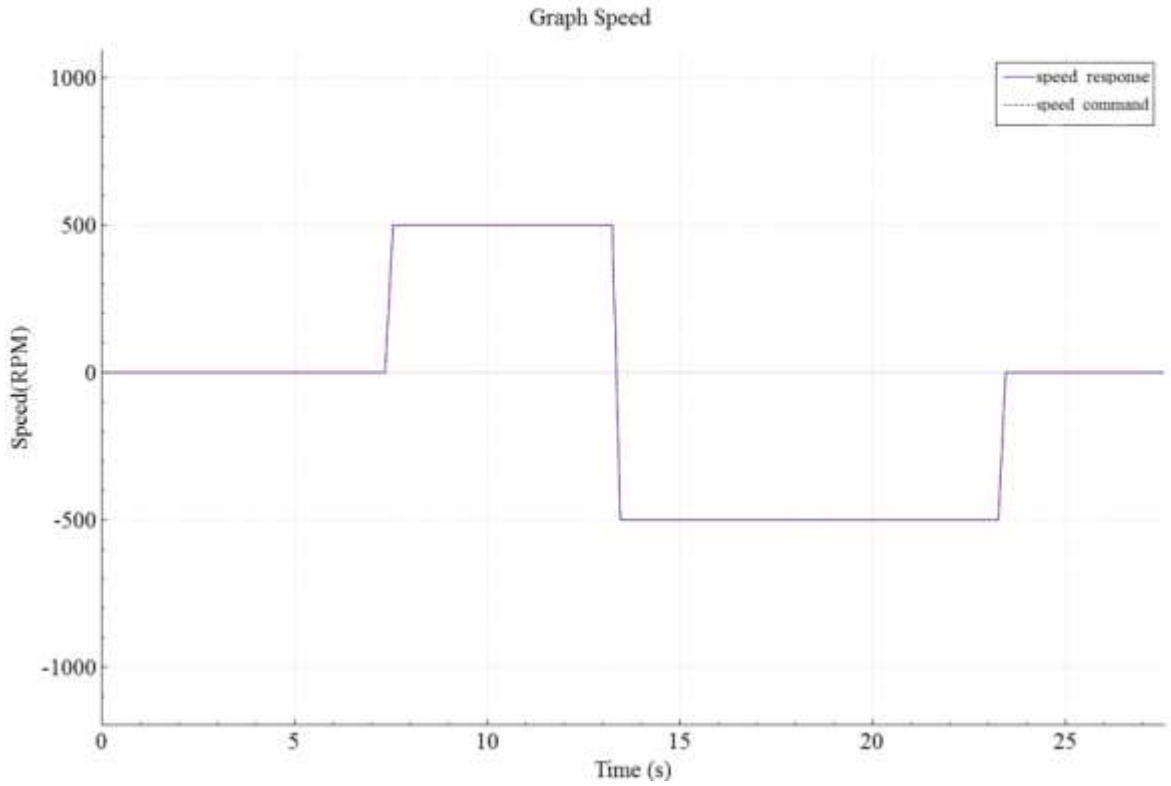
Nhận xét: Đồ thị thể hiện được sự thay đổi của góc quay thực tế (theta_response – đường màu xanh) so với góc đặt (theta_command – đường đứt màu đỏ) theo thời gian. Góc được tính theo đơn vị π (rad), trong đó mỗi bước nhảy của góc đặt tương ứng với một vị trí mong muốn mà động cơ cần đạt được. Nhìn vào đồ thị ta có thể thấy:

- Khả năng bám góc chính xác, góc quay thực tế bám sát theo góc đặt trong toàn bộ quá trình, cho thấy hệ thống điều khiển hoạt động hiệu quả và có độ chính xác cao. Sai số giữa góc đặt và góc thực tế rất nhỏ, gần như không đáng kể sao mỗi lần chuyển tiếp.
- Thời gian đáp ứng nhanh, tại các thời điểm thay đổi góc đặt, động cơ gần như đạt được giá trị mong muốn trong thời gian rất ngắn. Điều này chứng tỏ khả năng phản hồi tốt của thuật toán điều khiển FOC khi kết hợp truyền thông CANopen.

- Tốc độ phản ảnh quá trình dịch chuyển góc, trong đồ thị tốc độ phía dưới, tại mỗi thời điểm góc đặt thay đổi , xuất hiện một xung tốc độ ngắn, có biên độ lên đến khoảng 250-500RPM, phản ánh quá trình động cơ tăng tốc để nhanh chóng đạt đến vị trí mới. Sau khi góc đã đạt được, tốc độ giảm nhanh chóng về 0, cho thấy hệ thống đã hoàn tất việc di chuyển và giữ vị trí ổn định.

6.3.3 Đáp ứng tốc độ của động cơ

Đồ thị dưới đây thể hiện mối quan hệ giữa tốc độ đặt (speed_response) và tốc độ thực tế (speed_command) của động cơ BLDC trong quá trình điều khiển bằng thuật toán FOC, với dữ liệu truyền qua giao thức CANopen. Tốc độ được điều chỉnh theo các mức khác nhau bao gồm giá trị dương, âm và về 0 để đánh giá khả năng đáp ứng của hệ thống trong các điều kiện khác nhau.



Hình 7.3 Đồ thị đáp ứng tốc độ động cơ theo thời gian

Nhận xét: Quan sát đồ thị ta rút ra được một số điểm nổi bật sau đây:

- Độ bám tốc độ tốt, tốc độ thực tế (đường màu xanh) bám rất sát với tốc độ tham chiếu (đường đứt màu đỏ), chứng tỏ hệ thống điều khiển có độ chính xác cao. Sai số gần như không đáng kể trong toàn bộ quá trình điều khiển.
- Thời gian quá độ ngắn, ở các thời điểm thay đổi giá trị đặt, tốc độ thực tế gần như đạt được giá trị mong muốn ngay lập tức, cho thấy phản ứng nhanh và hiệu quả của bộ điều khiển FOC.

- Tính ổn định cao, tốc độ được giữ ổn định trong suốt các khoảng thời gian không có tín hiệu điều khiển. Không xuất hiện dao động hay nhiễu lớn trong quá trình duy trì tốc độ.
- Đáp ứng đảo chiều tốt, hệ thống xử lý tốt trong cả trường hợp tốc độ có giá trị âm và tốc độ thực tế vẫn bám chính xác theo yêu cầu.

6.4 Hướng phát triển của đề tài

Đề tài "Nghiên cứu và ứng dụng chuẩn truyền thông CANopen cho điều khiển động cơ" đã xây dựng được mô hình điều khiển và giám sát cơ bản. Trong tương lai, hệ thống có thể được phát triển theo các hướng sau:

- Tối ưu điều khiển FOC: Cải tiến thuật toán điều khiển để giảm sai số, rút ngắn thời gian đáp ứng và tăng độ ổn định hệ thống.
- Mở rộng Object Dictionary: Bổ sung thêm các đối tượng như nhiệt độ, lỗi hệ thống, giúp giám sát và điều khiển toàn diện hơn.
- Phát triển giao diện giám sát: Nâng cấp phần mềm giao diện trên máy tính với chức năng ghi log dữ liệu, cảnh bảo lỗi và điều khiển trực tiếp qua RPDO.
- Mô hình đa node: Xây dựng mạng CANopen với nhiều node động cơ hoạt động đồng bộ, ứng dụng trong robot hoặc xe điện.

  Những định hướng trên sẽ giúp hệ thống hoàn thiện hơn, sẵn sàng triển khai các ứng dụng công nghiệp và nghiên cứu chuyên sâu.

KẾT LUẬN CHUNG

Trong đồ án này, chúng em đã nghiên cứu và ứng dụng thành công chuẩn truyền thông CANopen vào hệ thống điều khiển động cơ BLDC sử dụng vi điều khiển STM32. Thông qua kết hợp giữa mã nguồn mở CANopenNode, phần cứng STM32F446RE, driver SimpleFOC và phần mềm giao diện điều khiển quan sát trên QT Creator, hệ thống điều khiển đã đạt được khả năng truyền nhận dữ liệu thời gian thực, độ tin cậy cao và khả năng mở rộng trong môi trường công nghiệp.

Các nội dung chính đã thực hiện bao gồm:

- Tìm hiểu cơ sở lý thuyết về giao thức CAN và chuẩn truyền thông CANopen.
- Thiết kế và triển khai hệ thống truyền thông giữa máy tính và vi điều khiển qua CAN USB Adapter.
- Xây dựng Object Dictionary với cấu trúc hợp lý, đáp ứng yêu cầu điều khiển động cơ bằng PDO.
- Tích hợp giao diện người dùng trên phần mềm QT Creator để giám sát và điều khiển động cơ một cách trực quan, hiệu quả.
- Kiểm tra thực nghiệm cho thấy hệ thống truyền thông hoạt động ổn định, dữ liệu truyền nhận có độ trễ thấp và đáp ứng tốt các thay đổi về dòng điện, tốc độ, vị trí động cơ.

Kết quả đạt được là tiền đề quan trọng cho việc ứng dụng CANopen trong các hệ thống điều khiển công nghiệp quy mô lớn. Qua đồ án, nhóm đã củng cố kiến thức chuyên ngành, nâng cao kỹ năng làm việc nhóm và giải quyết bài toán thực tế, đồng thời tích lũy kinh nghiệm triển khai các hệ thống nhúng sử dụng các giao thức truyền thông tiên tiến.

Tuy nhiên, do giới hạn về thời gian và điều khiển thực nghiệm, đề tài vẫn còn một số điểm có thể phát triển thêm như: hoàn thiện vòng điều khiển vị trí, tích hợp thêm tính năng đồng bộ hóa mạng (SYNC), mở rộng mô hình điều khiển đa trục. Đây cũng chính là hướng phát triển tiềm năng cho các nghiên cứu tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Siemens AG, "CANopen Tutorial," Siemens AG, 2019.

[2] Maxon Motor AG, EPOS4 Positioning Controller - Communication Guide, Sachseln: Maxon Motor AG, 2018.

[3] STMicroelectronics , "STM32F446xC/E Datasheet - Production Data," STMicroelectronics , Geneva , 2021.

[4] Robert Bosch GmbH , “CAN Specification, Version 2.0,” Robert Bosch GmbH, Germany, 1991.

[5] Farsi, Mohammad and Ratcliff, Karl, "An Introduction to CANopen and CANopen Communication Issues," *Technical Report,* 1995.