

TRƯỜNG ĐẠI HỌC THỦY LỢI
KHOA ĐIỆN – ĐIỆN TỬ

====o0o====



ĐỒ ÁN HỌC PHẦN

ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG
ROBOT

ĐỀ TÀI

ROBOT DRONE VẬN TẢI - THIẾT KẾ HỆ THỐNG ĐIỀU
KHIỂN TĐĐ KHỚP VỚI ĐỘNG CƠ MỘT CHIỀU KHÔNG
CHỐI THAN

Giáo viên hướng dẫn : PGS.TS. Nguyễn Tiến Ban

Nhóm sinh viên thực hiện:

- | | |
|--------------------|--------------------|
| 1. Ngô Mạnh Hà | Mã SV : 2251283518 |
| 2. Tô Anh Đức | Mã SV : 2251283511 |
| 3. Nguyễn Văn Tài | Mã SV : 2251283550 |
| 4. Phạm Nhật Thanh | Mã SV : 2251283553 |

HÀ NỘI – 2026

MỤC LỤC

LỜI NÓI ĐẦU	3
CHƯƠNG 1: GIỚI THIỆU VỀ ROBOT.....	5
1.1 Giới thiệu chung	5
1.2 Các vấn đề đặt ra.....	7
1.3 Phương pháp nghiên cứu.....	7
1.4 Tổng quan về robot drone	7
1.5 Định nghĩa và khái niệm.....	8
1.6 Lịch sử phát triển	9
1.7 Mục tiêu robot drone vận tải.....	11
1.8 Ứng dụng của robot drone vận tải.....	11
1.9 Nguyên lý hoạt động.....	13
1.10 Cấu trúc cơ bản và phân loại Robot drone vận tải.....	14
1.10.1 Cấu trúc cơ bản của Robot drone vận tải.....	14
1.10.2 Phân loại drone vận tải.....	16
1.11 Các thông số cơ bản	18
1.12 Ưu và nhược điểm.....	18
CHƯƠNG 2: THIẾT KẾ HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN	19
2.1 Giới thiệu về BLDC.....	19
2.2.1 Stator	19
2.2.2 Rotor.....	21
2.2.3 Cảm biến vị trí Hall Sensor	23
2.3 Nguyên lý hoạt động của BLDC	24
2.4 Mô hình toán học và phương pháp điều khiển động cơ BLDC	24
2.4.1 Giới thiệu.....	24
2.4.2 Mô hình toán học.....	25
2.4.2 Momen điện từ.....	27
2.4.3 Phương trình động học của động cơ BLDC	28
2.4.4 Phương trình đặc tính cơ của động cơ một chiều không chổi than	29
2.6 Giới thiệu về FOC	31
2.7 Điều khiển hướng trường (FOC) của động cơ BLDC là gì?	31
2.8 Phương pháp nghiên cứu.....	31
2.8.1 Thuật toán điều khiển hướng trường (FOC)	32
2.8.2 Bộ điều khiển tỉ lệ tích phân (PI).....	34
2.8.3 Điều chế vector không gian (SVPMM).	35
2.9 Khảo sát động học cho Drone	36
2.10. Mô hình khối lượng và tải trọng của drone vận tải.....	40

2.10.1 Ảnh hưởng của tải trọng đến trọng lượng.....	40
2.0.2. Ảnh hưởng của tải trọng đến lực đẩy yêu cầu.....	41
2.10.3. Ảnh hưởng đến động lực học tịnh tiến.....	41
2.10.4. Ảnh hưởng đến mô-men quán tính	42
2.10.5. Dịch chuyển tâm khối lượng khi mang tải.....	42
2.10.6. Ảnh hưởng đến tiêu thụ năng lượng	43
2.10.7. Mô hình tải trọng biến thiên trong quá trình giao hàng...	44
2.10.8.Kết luận	44
Chương 3 : MÔ PHỎNG HỆ THỐNG BẰNG MATLAB SIMULINK	44
3.1 Thiết kế 3D chi tiết	49
3.2.Mô phỏng matlab	49
3.2.1.Mathlab.....	46
3.2.2.Mô phỏng.....	47
3.3.Cấu trúc.....	50
3.4.Khối động cơ.....	55

LỜI NÓI ĐẦU

Hiện nay, khoa học kỹ thuật về robot nói chung và công nghệ máy bay không người lái (Drone) nói riêng đang phát triển vô cùng mạnh mẽ. Đặc biệt, trong xu thế công nghiệp hóa, các loại Drone vận tải đã và đang khẳng định vai trò quan trọng trong việc vận chuyển hàng hóa, cứu hộ và logistics, mang lại hiệu quả kinh tế cũng như giá trị thực tiễn cao. Việc nghiên cứu thiết kế và tối ưu hóa hệ thống truyền động cho các dòng robot này là một nhu cầu cấp thiết của kỹ thuật hiện đại.

Nhận thấy tầm quan trọng đó, tại các trường đại học kỹ thuật, tiêu biểu là Trường Đại học Thủy lợi, học phần “Đồ án điều khiển chuyển động robot” đã trở thành một phần bắt buộc và quan trọng trong chương trình đào tạo kỹ sư Điện - Điện tử. Học phần này không chỉ giúp sinh viên bước đầu làm quen với việc thiết kế hệ thống điều khiển cho các cơ cấu chuyển động cơ bản, mà còn tạo điều kiện để ứng dụng các công cụ phần mềm chuyên dụng như MATLAB - Simulink, SimMechanics... vào việc tính toán, xây dựng mô hình và mô phỏng nguyên lý hoạt động của robot. Đây là nền tảng vững chắc để sinh viên nắm vững kiến thức chuyên môn và chuẩn bị cho các nhiệm vụ của một kỹ sư robot trong tương lai.

Được sự hướng dẫn và giúp đỡ nhiệt tình của PGS.TS. Nguyễn Tiến Ban, nhóm chúng em đã hoàn thành đề tài được giao: “Robot Drone vận tải – Thiết kế hệ thống điều khiển truyền động điện cho một khớp với động cơ một chiều không chổi than.”

Dù đã dành nhiều tâm huyết và nỗ lực, nhưng do thời gian và kiến thức còn hạn chế, bài làm chắc chắn không tránh khỏi những thiếu sót. Nhóm chúng em rất mong nhận được sự chỉ bảo và những ý kiến đóng góp quý báu của thầy để đề tài được hoàn thiện hơn.

Em xin chân thành cảm ơn sự hướng dẫn tận tâm của PGS.TS. Nguyễn Tiến Ban đã giúp nhóm chúng em hoàn thành tốt đề tài này.

CHƯƠNG 1: GIỚI THIỆU VỀ ROBOT

1.1 Giới thiệu chung

Thuật ngữ “Robot” chính thức được thế giới biết đến vào năm 1921 thông qua tác phẩm kịch viễn tưởng "Rossum's Universal Robots" của văn sĩ người Séc – Karel Capek. Trong nguyên tác, từ này bắt nguồn từ chữ "Rabota" trong tiếng Slavơ, mang ý nghĩa là sự lao động khổ sai hoặc người làm công. Qua ngòi bút của Capek, Robot được hình tượng hóa là những thiết bị cơ khí do con người chế tạo nhằm mục đích thay thế sức lao động của chính mình.

Đến những năm 1940, nền tảng lý thuyết và đạo đức cho robot học bắt đầu được hình thành rõ nét hơn nhờ nhà văn viễn tưởng người Nga, Isaac Asimov. Ông không chỉ mô tả robot như một thực thể tự động sở hữu diện mạo con người và được vận hành bởi hệ thống điều khiển phức hợp (bộ não Positron), mà còn là người đầu tiên đặt tên cho ngành khoa học nghiên cứu về vấn đề này là Robotics. Đặc biệt, Asimov đã đề ra "Ba định luật cơ bản của Robot" nhằm đảm bảo sự an toàn và kiểm soát của con người đối với máy móc:

1. Định luật thứ nhất: Robot không được gây tổn hại cho con người, hoặc thông qua việc không hành động mà để con người bị nguy hiểm.

2. Định luật thứ hai: Robot phải tuân thủ mọi mệnh lệnh của con người, ngoại trừ trường hợp các mệnh lệnh đó xung đột với định luật thứ nhất.

3. Định luật thứ ba: Robot có quyền bảo vệ sự tồn tại của chính mình, miễn là quá trình này không vi phạm định luật thứ nhất và định luật thứ hai.

Các nguyên lý này đã trở thành kim chỉ nam cho giới khoa học trong việc thiết kế và chế tạo các thế hệ robot sau này. Theo quan điểm kỹ thuật hiện đại, robot được xem là những hệ thống máy móc đặc thù, mô phỏng cấu trúc và hành vi của con người để thực thi các tác vụ cụ thể. Để hoàn thành nhiệm vụ, một hệ thống robot tiêu chuẩn cần có khả năng thu nhận các tín hiệu từ môi trường, xử lý thông tin và thực hiện các thao tác phản hồi một cách tự động.

Về mặt cấu trúc, năng lực vận hành của robot được củng cố bởi hai hệ thống nền tảng:

- Hệ thống cơ khí: Bao gồm các cơ cấu truyền động và cơ cấu chấp hành giúp robot có thể di chuyển và tương tác vật lý với các đối tượng xung quanh. Việc tối ưu hóa hệ thống này đòi hỏi sự kết hợp chặt chẽ giữa khoa học về động học, vật liệu và kỹ thuật cơ khí chính xác.

- Hệ thống cảm biến và điều khiển: Đóng vai trò là "giác quan" của robot, thực hiện nhiệm vụ thu thập dữ liệu về trạng thái nội tại cũng như biến động của môi trường ngoại vi. Toàn bộ thông tin sau đó sẽ được truyền về bộ xử lý trung tâm để đưa ra các quyết định điều khiển chính xác nhất.



Hình 1.1 Một số hình ảnh về robot drone

Robot drone sử dụng trong vận tải hay trong logistics và phân phối hàng hóa đòi hỏi tính linh hoạt cao, khả năng vận hành tự động và định vị chính xác. Với ưu thế về tốc độ và khả năng di chuyển không phụ thuộc vào hạ tầng giao thông đường bộ, Drone có thể thay thế con người thực hiện giao hàng tại các khu vực địa hình hiểm trở, vùng sâu vùng xa hoặc trong các môi trường đô thị đông đúc.

Hệ thống drone vận tải thường được trang bị các cảm biến thông minh và thuật toán điều khiển hiện đại, đảm bảo tính ứng dụng cao trong các chuỗi cung ứng thông minh, góp phần tối ưu hóa thời gian và chi phí vận hành trong nền công nghiệp vận tải hiện đại.

1.2 Các vấn đề đặt ra

Với đề tài “Nghiên cứu, thiết kế điều khiển Robot ” yêu cầu:

- Thiết kế và chế tạo hệ thống cơ khí chính xác, đảm bảo hệ thống hoạt động chắc chắn, chạy êm, cơ cấu di chuyển tới vị trí mong muốn.
- Giải quyết bài toán động học và động lực học làm cơ sở để điều khiển robot.
- Sử dụng phần mềm matlab để tính toán, mô phỏng robot
- Thiết kế hệ thống điều khiển cho robot: mạch điều khiển, mạch công suất.

1.3 Phương pháp nghiên cứu

Để hoàn thành đề tài thiết kế và điều khiển hệ thống Drone vận tải, nhóm đã kết hợp các nền tảng kiến thức từ kỹ thuật điện - điện tử, hệ thống điều khiển tự động đến công nghệ truyền thông không dây. Các phương pháp bao gồm:

- Phân tích và tổng hợp lý thuyết: Khảo sát các mô hình Drone vận tải hiện nay; nghiên cứu chuyên sâu về cấu hình động học (Multi-rotor, VTOL) và các chuẩn giao tiếp dữ liệu nhằm lựa chọn phương án thiết kế tối ưu nhất.

- Mô hình hóa và mô phỏng số: Sử dụng phần mềm kỹ thuật để xây dựng mô hình 3D và mô phỏng động lực học trên máy tính. Giai đoạn này giúp kiểm chứng thuật toán điều khiển, đánh giá khả năng cân bằng và tải trọng của thiết bị.

1.4 Tổng quan về robot drone

Robot drone, hay thiết bị bay không người lái (UAV), là hệ thống tự động linh hoạt có khả năng thay thế con người thực hiện các nhiệm vụ vận chuyển hàng hóa trong nhiều môi trường khác nhau. Đây là thiết bị có khả năng di chuyển tự do trong không gian ba chiều, được điều khiển thông qua các chương trình lập

trình sẵn hoặc hệ thống điều khiển từ xa thông minh. Robot drone vận tải có thể thực hiện các lộ trình giao hàng với độ chính xác cao và thời gian tối ưu.

Ngày nay, với sự phát triển của công nghệ, drone đã trở thành một phần không thể thiếu trong nhiều lĩnh vực, đặc biệt là hỗ trợ các hệ thống giám sát và vận tải hiện đại. Việc ứng dụng drone trong vận tải giúp nâng cao năng suất vận chuyển, giảm chi phí nhân công và tăng khả năng tiếp cận các khu vực có địa hình khó khăn. Drone có ưu thế vượt trội nhờ khả năng vận hành không phụ thuộc vào hạ tầng giao thông đường bộ, có thể chịu được các điều kiện môi trường phức tạp và làm việc liên tục không mệt mỏi. Cảm nhận được môi trường xung quanh nhờ hệ thống cảm biến siêu âm, GPS và camera định vị, drone có thể thay thế con người thực hiện các công việc giao hàng lặp đi lặp lại hoặc các nhiệm vụ khẩn cấp như vận chuyển y tế, cứu hộ. Tuy nhiên, trong quá trình vận hành, hệ thống drone vẫn cần sự giám sát chặt chẽ để đảm bảo an toàn hàng không và xử lý các tình huống bất ngờ.

1.5 Định nghĩa và khái niệm

Robot drone vận tải là một loại robot dịch vụ chuyên dụng, thường có cấu trúc đa cánh quạt hoặc cánh cố định với khả năng tải trọng đa dạng từ vài kilogram đến hàng trăm kilogram. Được phát triển bởi các tập đoàn công nghệ hàng đầu (như DJI, Amazon Prime Air hay các hãng UAV chuyên dụng), drone vận tải được biết đến với sự linh hoạt, tốc độ vận hành nhanh và khả năng hoạt động trong các môi trường địa hình phức tạp, không gian mở. Robot drone vận tải đã trở thành một trong những lựa chọn hàng đầu cho các ứng dụng tự động hóa trong nhiều lĩnh vực, từ logistics, thương mại điện tử đến y tế và cứu hộ.



Hình 1.2: Robot Drone trong vận tải

Robot drone vận tải thường được sử dụng để thực hiện các nhiệm vụ như vận chuyển hàng hóa, giao vật tư y tế khẩn cấp, cứu trợ thiên tai hoặc kiểm tra hạ tầng từ trên cao. Chúng có thể được lập trình để hoạt động hoàn toàn tự động dựa trên lộ trình GPS có sẵn, hoặc làm việc dưới sự giám sát từ xa của con người trong các hệ thống quản lý bay thông minh.

Khái niệm của robot drone vận tải bao gồm một hệ thống cơ bản bao gồm các bộ phận như: khung thân (airframe), hệ thống động lực (motor và cánh quạt), hệ thống điều khiển bay (flight controller) và phần mềm điều hướng tự động. Các robot này thường được trang bị các cảm biến hiện đại như GPS, cảm biến siêu âm, LiDAR và camera AI để giúp chúng phát hiện vật cản, lập bản đồ thời gian thực và phản ứng linh hoạt với môi trường xung quanh, đảm bảo an toàn và hiệu suất tối đa trong quá trình vận chuyển.

1.6 Lịch sử phát triển

1783 – Phương tiện bay không người lái đầu tiên.

Khi nghĩ về UAV, khinh khí cầu thường được coi là không liên quan. Tuy nhiên, từ quan điểm kỹ thuật, những chiếc máy bay thủ công này là chiếc máy bay đầu tiên không yêu cầu phi công là con người. Joseph-Michel và Jacques-Étienne Montgolfier đã tổ chức buổi trình diễn công khai đầu tiên của một phương tiện bay không người lái - khinh khí cầu ở Annonay, Pháp.

1849 - Việc sử dụng UAV trong quân sự lần đầu tiên

Trung úy pháo binh Áo Franz von Uchatius phát minh ra bom khinh khí cầu. Field Marshall von Radetsky đã sử dụng phương tiện bay không người lái - khinh khí cầu để tấn công Venice, nhưng chúng hầu như không hiệu quả.



Hình 1.3. Thủ tướng Anh Winston Churchill xem buổi ra mắt máy bay De Havilland Queen Bee năm 1941 (nguồn: Internet)

– Parrot điều khiển máy bay không người lái bằng điện thoại thông minh
Tại CES, nhà sản xuất máy bay không người lái của Pháp Parrot đã công bố AR Drone của mình. Đó là một chiếc quadcopter nhỏ phù hợp với mục đích sử dụng của người tiêu dùng. Một ứng dụng trên điện thoại thông minh là tất cả những gì người ta cần để vận hành máy bay không người lái một cách an toàn.

- DJI sản xuất Phantom Drone đầu tiên

Trong khi công ty DJI được thành lập vào năm 2006, dòng Phantom phải đến năm 2013 mới được phát hành. Chiếc máy bay không người lái này đã bắt đầu cơn sốt máy bay không người lái được trang bị máy ảnh hiện đại. Chỉ trong vòng vài năm, DJI sẽ giữ vị trí dẫn đầu trong thị trường máy bay không người lái tiêu dùng, với gần 80% máy bay không người lái dân dụng đang hoạt động do DJI hoặc một trong các công ty con của họ sản xuất.

- Các công ty lớn muốn bắt đầu giao hàng bằng máy bay không người lái

FedEx, UPS, Amazon, Google, Uber và vô số công ty giao hàng khác công nhận máy bay không người lái như một nền tảng giao hàng. Việc thử nghiệm các loại UAV khác nhau và làm việc với các cơ quan quản lý trên toàn thế giới bắt đầu.

- Giảm nhẹ Đại dịch Covid-19

Máy bay không người lái đã chứng minh vai trò quan trọng trong đại dịch từ thực thi kiểm dịch, giãn cách xã hội cho đến khử trùng hàng loạt và hỗ trợ cung cấp dịch vụ y tế,... Không thể dự đoán tác động lâu dài của những phát triển này, nhưng có một điều chắc chắn: đại dịch đã giúp các quốc gia trên thế giới nhận thấy tiềm năng mà máy bay không người lái mang lại cho xã hội.

1.7 Mục tiêu robot drone vận tải

Mục tiêu chính của robot drone vận tải là tối ưu hóa tốc độ và giảm chi phí trong quy trình logistics, đặc biệt là giao hàng "chặng cuối". Robot hướng tới việc thay thế con người vận chuyển hàng hóa tại các địa hình khó tiếp cận, vùng sâu vùng xa hoặc các khu vực đô thị hay ùn tắc. Việc ứng dụng drone còn nhằm mục đích tự động hóa hoàn toàn quy trình giao nhận, giảm thiểu khí thải môi trường và đảm bảo cung ứng vật tư y tế khẩn cấp một cách nhanh nhất, chính xác nhất.

1.8 Ứng dụng của robot drone vận tải

Ứng dụng robot drone trong vận tải nhằm góp phần nâng cao hiệu quả của chuỗi cung ứng, giảm thiểu tắc nghẽn giao thông và rút ngắn thời gian giao hàng. Điều này xuất phát từ những ưu điểm vượt trội của drone đã được ghi nhận trong thực tế những năm gần đây. Một số ưu điểm và ứng dụng cơ bản bao gồm:

- Drone có khả năng thực hiện quy trình vận chuyển hàng hóa một cách tự động và ổn định trong suốt thời gian vận hành. Việc sử dụng drone giúp giảm thiểu sai sót do yếu tố con người, đảm bảo tính chính xác về thời gian giao nhận và nâng cao chất lượng dịch vụ logistics. Ngoài ra, drone có thể nhanh chóng thay đổi lộ trình hoặc phương thức bay để thích ứng với sự thay đổi của nhu cầu thị trường

- Khả năng tối ưu hóa chi phí vận hành là một trong những ưu điểm lớn nhất. Việc ứng dụng drone giúp giảm đáng kể chi phí nhân công và nhiên liệu so với các phương thức vận tải truyền thống bằng đường bộ. Đặc biệt tại các khu vực có mật độ giao thông cao hoặc địa hình chia cắt, drone giúp tiết kiệm thời gian di chuyển, từ đó mang lại hiệu quả kinh tế vượt trội cho các doanh nghiệp chuyên phát

- Việc áp dụng drone giúp tăng cường năng suất và hiệu quả của chuỗi cung ứng hiện đại. Với khả năng cất hạ cánh thẳng đứng và di chuyển theo đường chim bay, drone có thể đạt được tốc độ giao hàng nhanh gấp nhiều lần so với xe tải trong các chặng giao hàng cuối. Theo các báo cáo thực tế, việc sử dụng drone có thể giúp tốc độ luân chuyển hàng hóa trong các khu công nghiệp hoặc đô thị thông minh tăng lên đáng kể

- Ứng dụng drone góp phần cải thiện điều kiện và an toàn lao động. Trong thực tế, việc vận chuyển hàng hóa đến các khu vực độc hại, vùng chịu ảnh hưởng của thiên tai hoặc địa hình núi cao hiểm trở luôn tiềm ẩn rủi ro cho tài xế. Drone thay thế con người thực hiện các nhiệm vụ này, giúp loại trừ các mối nguy hiểm trực tiếp đến sức khỏe và tính mạng của người lao động trong những môi trường khắc nghiệt.

- Các công nghệ mới nổi đang chuẩn bị đẩy mạnh khả năng của máy bay không người lái, nâng cao tính tự động, độ bền và trí thông minh. Những tiến bộ trong trí tuệ nhân tạo và học máy cho phép máy bay không người lái diễn giải các môi trường phức tạp, đưa ra quyết định thời gian thực và thực hiện các nhiệm vụ phức tạp mà không cần sự can thiệp của con người. Các nguồn năng lượng như pin nhiên liệu hydro và năng lượng mặt trời hứa hẹn thời gian bay kéo dài, thoát khỏi các hạn chế hiện tại do pin lithium-ion áp đặt.

Tích hợp với mạng 5G là một bước đột phá khác, tạo điều kiện cho giao tiếp với độ trễ cực thấp và truyền dữ liệu liên mạch giữa máy bay không người lái và trung tâm điều khiển. Kết nối này hỗ trợ các ứng dụng phức tạp như lập bản đồ 3D trực tiếp, hoạt động máy bay không người lái hợp tác và lớp phủ thực tế tăng

cường cho phi công và nhà phân tích. Hơn nữa, thiết kế máy bay không người lái mô-đun cho phép thích ứng nhanh chóng với nhu cầu nhiệm vụ cụ thể bằng cách hoán đổi cảm biến, tải trọng hoặc hệ thống đẩy, làm cho máy bay không người lái ngày càng linh hoạt.

1.9 Nguyên lý hoạt động

1. Thu thập dữ liệu từ hệ thống cảm biến:

- Robot sử dụng các cảm biến định vị và môi trường để nhận biết không gian xung quanh, thu thập các thông số cần thiết như tọa độ GPS, độ cao (cảm biến áp suất), và vận tốc góc (cảm biến con quay hồi chuyển IMU).

- Các cảm biến khoảng cách (LiDAR, siêu âm) thu thập dữ liệu về vật cản trên lộ trình bay để đảm bảo an toàn.

2. Xử lý dữ liệu:

- Bộ điều khiển bay (Flight Controller): Tiếp nhận và phân tích dữ liệu không lờ từ các cảm biến gửi về theo thời gian thực.

- Lập trình sẵn hoặc các thuật toán trí tuệ nhân tạo (AI) sẽ tính toán quỹ đạo bay tối ưu và đưa ra các chỉ lệnh điều phối tốc độ cho từng động cơ dựa trên dữ liệu thu được.

3. Thực thi chuyển động:

- Dựa trên lệnh từ bộ điều khiển, các bộ điều tốc (ESC) sẽ điều chỉnh cường độ dòng điện đến các động cơ, làm thay đổi vận tốc quay của các cánh quạt.

- Quá trình này tạo ra sự chênh lệch lực nâng và mô-men xoắn, giúp drone thực hiện các thao tác di chuyển phức tạp như nâng hạ độ cao, tiến/lùi, nghiêng hoặc xoay hướng.

4. Phản hồi và tối ưu hóa:

- Robot liên tục nhận phản hồi từ hệ thống GPS và cảm biến cân bằng trong suốt quá trình bay để tự động điều chỉnh sai lệch do tác động của ngoại cảnh (như gió hoặc trọng lượng hàng hóa).

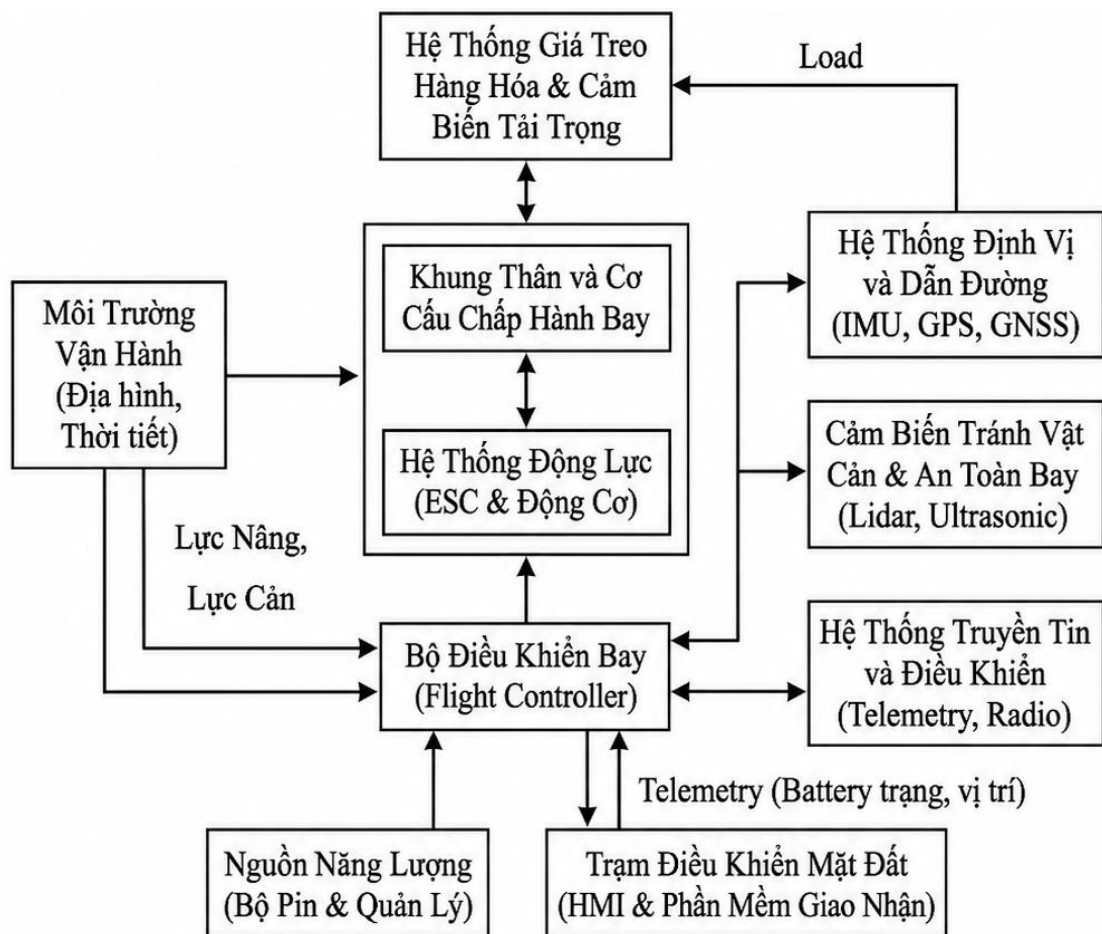
- Điều chỉnh này đảm bảo drone luôn đi đúng lộ trình dự kiến và hạ cánh chính xác tại điểm giao hàng.

1.10 Cấu trúc cơ bản và phân loại Robot drone vận tải

1.10.1 Cấu trúc cơ bản của Robot drone vận tải

- Tùy thuộc vào số lượng động cơ và mục đích vận tải hàng hóa mà cấu trúc của drone có sự thay đổi linh hoạt để tối ưu hóa khả năng bay. Các cấu hình drone vận tải thường gặp bao gồm kiểu Quadcopter (4 động cơ), Hexacopter (6 động cơ) hoặc các dòng lai giữa máy bay cánh cố định và cánh quạt (VTOL).

- Khung thân của Drone vận tải được ví như phần khung xương chắc chắn giúp nâng đỡ toàn bộ hệ thống. Khả năng chịu tải trọng nặng hay không, độ bền vững khi bay trong điều kiện gió lớn hay không phụ thuộc phần lớn vào kết cấu vật liệu và thiết kế khí động học của khung thân drone.



Hình 1.4 Cấu trúc chung của robot drone vận tải

- Hệ thống điều khiển bay (Flight Controller): Là trung tâm xử lý dữ liệu, nhận tín hiệu từ các cảm biến và trạm mặt đất để thực hiện các thuật toán điều khiển, giữ thăng bằng và điều hướng cho drone.

- Khung thân và cơ cấu chấp hành bay: Đóng vai trò là bộ khung chịu lực, kết nối các thành phần linh kiện và tạo hình dáng khí động học giúp drone vận hành ổn định trong môi trường thực tế.

- Hệ thống động lực (ESC & Động cơ): Bao gồm bộ điều tốc ESC và động cơ không chổi than giúp biến đổi năng lượng điện thành lực nâng thông qua cánh quạt, cho phép drone cất hạ cánh và di chuyển.

- Hệ thống định vị và dẫn đường (IMU, GPS, GNSS): Cung cấp thông số về tọa độ, tốc độ và hướng bay theo thời gian thực, đảm bảo drone di chuyển đúng lộ trình vận chuyển đã lập trình sẵn.

- Cảm biến tránh vật cản và an toàn bay: Sử dụng công nghệ Lidar hoặc siêu âm để phát hiện các chướng ngại vật trên đường bay, từ đó đưa ra các phản xạ né tránh tự động để bảo vệ hàng hóa.

- Hệ thống giá treo hàng hóa và cảm biến tải trọng: Là bộ phận chuyên dụng để kết nối với load hàng, tích hợp cảm biến để giám sát khối lượng và đảm bảo sự cân bằng của drone khi mang tải.

- Hệ thống truyền tin và điều khiển (Telemetry, Radio): Thiết lập kênh giao tiếp không dây giữa drone và người điều khiển, cho phép truyền nhận các thông số vận hành và hình ảnh trực tiếp.

- Nguồn năng lượng (Bộ pin và Quản lý): Cung cấp dòng điện cho toàn bộ hệ thống, tích hợp mạch quản lý pin (BMS) để giám sát dung lượng và đảm bảo an toàn cháy nổ trong suốt quá trình bay.

- Trạm điều khiển mặt đất (HMI & Phần mềm giao nhận): Giao diện tương tác giữa người dùng và drone, cho phép lập kế hoạch bay, theo dõi vị trí hàng hóa và can thiệp điều khiển khi cần thiết.

Tùy thuộc vào số lượng động cơ và sự tổ hợp các chuyển động quay của cánh quạt mà drone vận tải có các kết cấu và vùng làm việc khác nhau. Các kết cấu thường gặp của drone vận tải là kiểu đa cánh quạt (Multi-rotor), kiểu cánh cố định (Fixed-wing) hoặc kiểu kết hợp (VTOL), hoạt động dựa trên hệ tọa độ Đề-các trong không gian ba chiều không giới hạn...

1.10.2 Phân loại drone vận tải

a) Phân loại hình dạng hình học và không gian hoạt động

- Drone kiểu đa cánh quạt (Multi-rotor):

Đây là loại drone phổ biến nhất, sử dụng nhiều cánh quạt (thường là 4, 6 hoặc 8) để tạo lực nâng và điều hướng.

- Đặc điểm: Có khả năng cất cánh và hạ cánh thẳng đứng (VTOL), bay đứng (hovering) linh hoạt trong không gian hẹp.

- Không gian hoạt động: Hoạt động tối ưu trong phạm vi ngắn, môi trường đô thị hoặc những nơi cần độ chính xác cao khi giao hàng.

- Drone kiểu cánh cố định (Fixed-wing):

Có cấu tạo tương tự như máy bay truyền thống với sải cánh dài.

- Đặc điểm: Sử dụng lực nâng khí động học từ cánh để duy trì độ cao, giúp tiết kiệm năng lượng và bay được quãng đường rất xa với tốc độ cao. Tuy nhiên, loại này cần đường băng hoặc thiết bị phóng để cất cánh.

- Không gian hoạt động: Phù hợp cho vận tải đường dài giữa các kho bãi hoặc cứu trợ ở vùng sâu vùng xa.

- Drone kiểu kết hợp (VTOL Hybrid):

Sự kết hợp giữa ưu điểm của đa cánh quạt và cánh cố định.

- Đặc điểm: Cất cánh thẳng đứng như robot kiểu tọa độ Đề-các trong không gian hẹp, sau đó chuyển trạng thái sang bay bằng cánh cố định để đạt hiệu suất cao.

- Không gian hoạt động: Hoạt động linh hoạt trong mọi địa hình, từ kho bãi chật hẹp đến các lộ trình vận chuyển liên tỉnh.

b) Phân loại theo hệ thống truyền động

- Hệ thống động cơ điện: Sử dụng các động cơ điện không chổi than (BLDC) kết hợp với bộ điều tốc (ESC). Đây là hệ thống phổ biến nhất cho drone vận tải nhờ kết cấu gọn nhẹ, khả năng điều khiển chính xác, phản hồi nhanh và thân thiện với môi trường.
- Hệ thống động cơ đốt trong: Sử dụng nhiên liệu hóa thạch (xăng hoặc hỗn hợp xăng dầu). Hệ thống này cung cấp công suất rất lớn và thời gian bay kéo dài, đáp ứng các nhu cầu vận chuyển hàng hóa nặng hoặc đường dài. Tuy nhiên, nó có cấu tạo phức tạp, gây tiếng ồn lớn và khó bảo trì hơn so với động cơ điện.
- Hệ thống truyền động Hybrid (Lai): Là sự kết hợp giữa động cơ đốt trong (đóng vai trò máy phát điện) và động cơ điện (đóng vai trò truyền động trực tiếp cho cánh quạt). Hệ thống này tối ưu hóa được cả ưu điểm về tải trọng lớn của động cơ đốt trong và sự chính xác, linh hoạt của hệ thống điện.

c) Phân loại theo ứng dụng

Drone vận tải được phân loại tùy theo mục đích sử dụng trong các lĩnh vực khác nhau. Một số loại phổ biến là:

- Drone giao hàng thương mại điện tử: Thiết kế tối ưu để vận chuyển các kiện hàng nhỏ từ kho trung chuyển đến tận tay người tiêu dùng trong đô thị.
- Drone vận tải y tế: Chuyên dụng để vận chuyển các vật tư khẩn cấp như máu, vắc-xin hoặc thuốc men giữa các bệnh viện, đòi hỏi độ ổn định và an toàn cao.

- Drone cứu trợ và cứu nạn: Được trang bị để vận chuyển thực phẩm, nước sạch hoặc thiết bị sơ cứu đến các khu vực bị chia cắt bởi thiên tai, địa hình hiểm trở.
- Drone vận tải nông nghiệp/công nghiệp: Chuyên chở các thiết bị, vật tư đặc thù trong các khu vực sản xuất lớn, kho bãi hoặc trang trại quy mô.

1.11 Các thông số cơ bản

- Tải trọng: xấp xỉ 30kg - 50kg (tùy dòng máy).
- Thời gian bay: khoảng 25 - 40 phút.
- Bán kính hoạt động: khoảng 15km - 30km.
- Trần bay tối đa: thường dưới 3000m để đảm bảo an toàn hàng không.
- Độ chính xác định vị: thông số này thường xấp xỉ 0,1m nhờ hệ thống RTK.
- Bộ điều khiển: sử dụng trạm điều khiển mặt đất tích hợp phần mềm bay tự động.

1.12 Ưu và nhược điểm

Ưu điểm:

- Tải trọng lớn: so với các dòng drone dân dụng thông thường.
- Tốc độ giao hàng nhanh: không bị ảnh hưởng bởi ùn tắc giao thông.
- Khả năng tiếp cận cao: hoạt động tốt tại hải đảo hoặc nơi địa hình chia cắt.
- Tiết kiệm nhân lực: quy trình vận hành hoàn toàn tự động.
- Thân thiện môi trường: sử dụng năng lượng điện, giảm phát thải.

Nhược điểm:

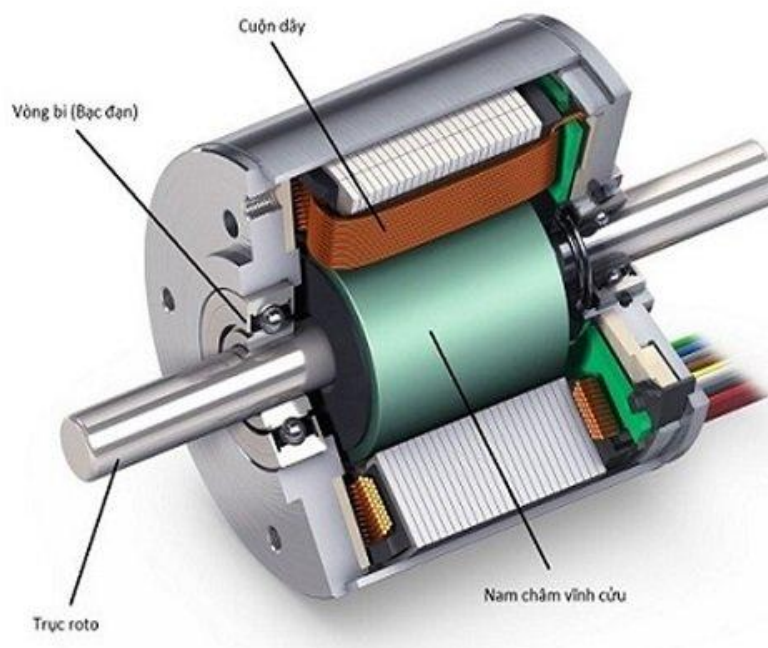
- Phụ thuộc thời tiết: khó vận hành khi có gió mạnh hoặc mưa bão.

- Thời lượng pin hạn chế: cần hệ thống trạm sạc hoặc thay pin liên tục.
- Rào cản pháp lý: quy định về an toàn bay tại các khu dân cư còn khắt khe.

CHƯƠNG 2: THIẾT KẾ HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN

2.1 Giới thiệu về BLDC

- Động cơ DC không chổi than (Brushless DC motor) là một động cơ điện chuyển đổi năng lượng điện DC thành công cơ học.
- Động cơ được kích từ bằng nam châm điện dòng DC để di chuyển rotor xung quanh stator.



Hình 2.1 Giới thiệu về BLDC

2.2 Cấu tạo BLDC

2.2.1 Stator

Khác với động cơ một chiều thông thường, stator của động cơ một chiều không chổi than chứa dây quấn phân ứng. Dây quấn phân ứng có thể là hai pha, ba pha hay nhiều pha nhưng thường là dây quấn ba pha. Dây quấn ba pha có hai sơ đồ nối dây, đó là nối theo hình sao Y hoặc hình tam giác Δ .

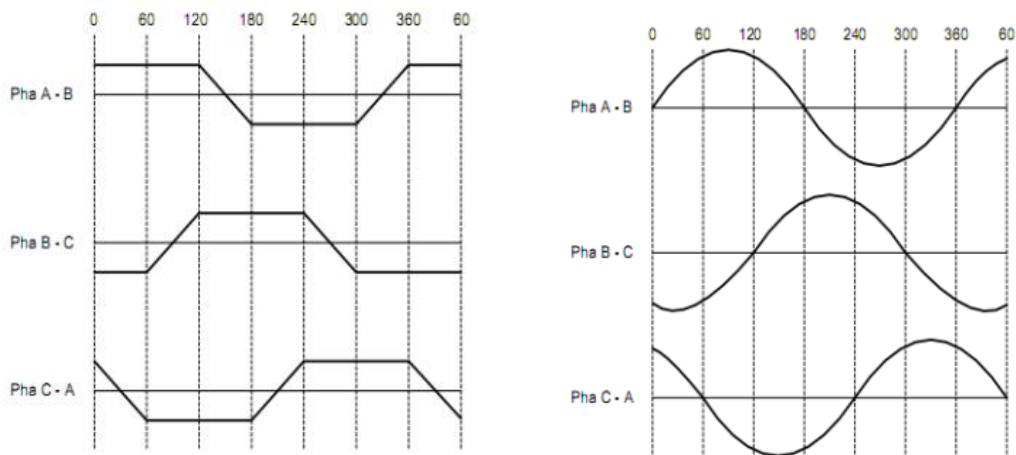


Hình 2.2: Stator của động cơ BLDC

Stator của động cơ BLDC được cấu tạo từ các lá thép kỹ thuật điện với các cuộn dây được đặt trong các khe cắt xung quanh chu vi phía trong của stator. Theo truyền thống cấu tạo stator của động cơ BLDC cũng giống nhau cấu tạo của các động cơ cảm ứng khác. Tuy nhiên, các bó dây được phân bố theo cách khác. Hầu hết tất cả các động cơ một chiều không chổi than có 3 cuộn dây đấu với nhau theo hình sao hoặc hình tam giác. Mỗi một cuộn dây được cấu tạo bởi một số lượng các bó dây nối liền với nhau. Các bó dây này được đặt trong các khe và chúng được nối liền nhau để tạo nên một cuộn dây. Mỗi một trong các cuộn dây được phân bố trên chu vi của stator theo trình tự thích hợp để tạo nên một số chẵn các cực. Cách bố trí và số rãnh của stator của động cơ khác nhau thì cho chúng ta số cực của động cơ khác nhau.

Sự khác nhau trong cách nối liền các bó dây trong cuộn dây stator tạo nên sự khác nhau của hình dáng sức phản điện động. Động cơ BLDC có 2 dạng sức phản điện động là dạng hình sin và dạng hình thang. Cũng chính vì sự khác nhau này mà tên gọi của động cơ cũng khác nhau, đó là động cơ BLDC hình sin và động

cơ BLDC hình thang. Dòng điện pha của động cơ tương ứng cũng có dạng hình sin và hình thang. Điều này làm cho momen của động cơ hình sin phẳng hơn nhưng đắt hơn vì phải có thêm các bộ dây mắc liên tục. Còn động cơ hình thang thì rẻ hơn nhưng đặc tính momen lại nhấp nhô do sự thay đổi điện áp của sức phản điện động là lớn hơn.



a) Sức điện động hình thang

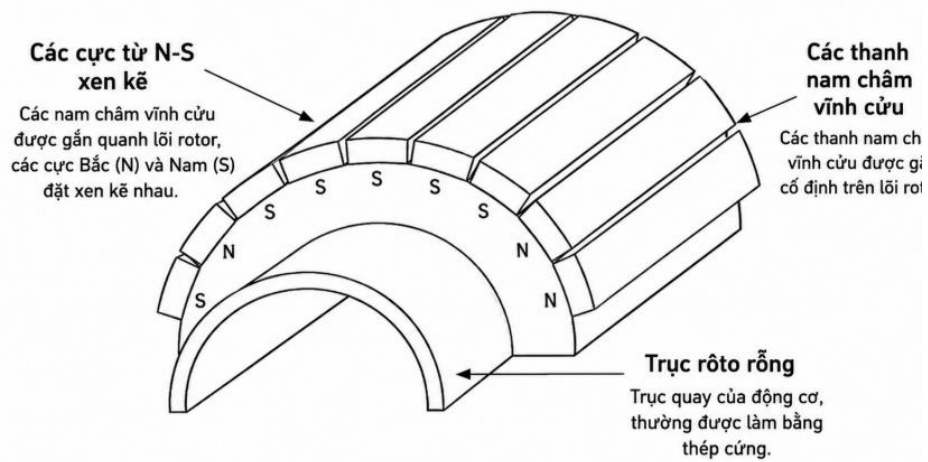
*b) Sức điện động nam châm
vĩnh cửu*

Hình 2.3: Các dạng sức điện động của động cơ BLDC

Động cơ một chiều không chổi than thường có các cấu hình 1 pha, 2 pha và 3 pha. Tương ứng với các loại đó thì stator có số cuộn dây là 1, 2 và 3. Phụ thuộc vào khả năng cấp công suất điều khiển, có thể chọn động cơ theo tỷ lệ điện áp. Động cơ nhỏ hơn hoặc bằng 48V được dùng trong máy tự động, robot, các chuyển động nhỏ. Các động cơ trên 100V được dùng trong các thiết bị công nghiệp, tự động hóa và các ứng dụng công nghiệp.

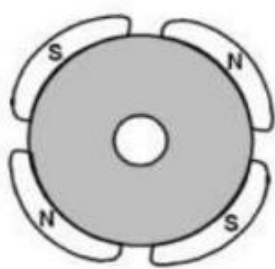
2.2.2 Rotor

Được gắn vào trục động cơ và trên bề mặt rotor có dán các thanh nam châm vĩnh cửu. Ở các động cơ yêu cầu quán tính của rotor nhỏ, người ta thường chế tạo trục của động cơ có dạng hình trụ rỗng. Rotor được cấu tạo từ các nam châm vĩnh cửu. Số lượng đôi cực dao động từ 2 đến 8 với các cực Nam (S) và Bắc (N) xếp xen kẽ nhau.



Hình 2.4: Roto của động cơ BLDC

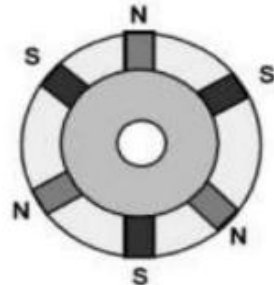
Dựa vào yêu cầu về mật độ từ trường trong rotor, chất liệu nam châm thích hợp được chọn tương ứng. Nam châm Ferrite thường được sử dụng. Khi công nghệ phát triển, nam châm làm từ hợp kim ngày càng phổ biến. Nam châm Ferrite rẻ hơn nhưng mật độ thông lượng trên đơn vị thể tích lại thấp. Trong khi đó, vật liệu hợp kim có mật độ từ trên đơn vị thể tích cao và cho phép thu nhỏ kích thước của rotor nhưng vẫn đạt được momen tương tự. Do đó, với cùng thể tích, momen của rotor có nam châm hợp kim luôn lớn hơn rotor nam châm Ferrite.



Rotor lõi tròn với nam châm đặt trên chu vi



Rotor lõi tròn với nam châm hình chữ nhật được đặt trong rotor



Rotor lõi tròn, nam châm hình chữ nhật chèn vào trong lõi rotor

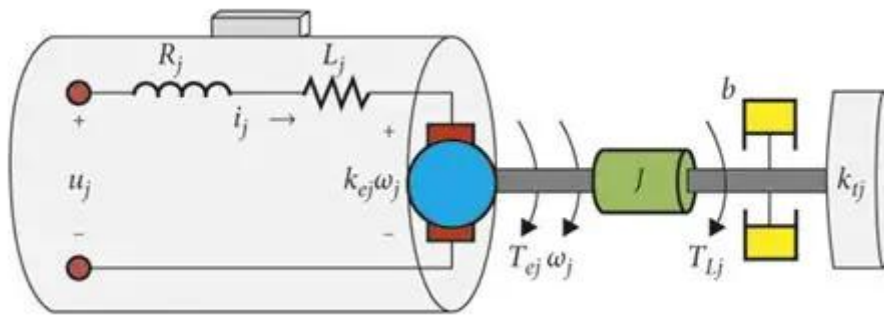
Hình 2.5: Các dạng Rotor của động cơ một chiều không chổi than

2.2.3 Cảm biến vị trí Hall Sensor

Không giống như động cơ một chiều dùng chổi than, chổi của động cơ một chiều không chổi than được điều khiển bằng điện tử. Tức là các cuộn dây của stator sẽ được cấp điện nhờ sự chuyển mạch của các van bán dẫn công suất. Để động cơ làm việc, cuộn dây của stator được cấp điện theo thứ tự. Tức là tại một thời điểm thì không ngẫu nhiên cấp điện cho cuộn dây nào cả mà phụ thuộc vào vị trí của rotor động cơ ở đâu để cấp điện cho đúng. Vì vậy điều quan trọng là cần phải biết vị trí của rotor để tiến tới biết được cuộn dây stator tiếp theo nào sẽ được cấp điện theo thứ tự cấp điện. Vị trí của rotor được đo bằng các cảm biến sử dụng hiệu ứng Hall được đặt ẩn trong stator.

Hầu hết tất cả các động cơ một chiều không chổi than đều có cảm biến Hall đặt ẩn bên trong stator ở phần đuôi trục (trục phụ) của động cơ.

Mỗi khi các cực nam châm của rotor đi qua khu vực gần các cảm biến Hall, các cảm biến sẽ gửi ra tín hiệu cao hoặc thấp ứng với khi cực Bắc hoặc cực Nam đi qua cảm biến. Dựa vào tổ hợp của các tín hiệu từ 3 cảm biến Hall, thứ tự chuyển mạch chính xác được xác định. Tín hiệu mà các cảm biến Hall nhận được sẽ dựa trên hiệu ứng Hall. Đó là khi có một dòng điện chạy trong một vật dẫn đặt trong một từ trường, từ trường sẽ tạo ra một lực nằm ngang lên các điện tích di chuyển trong vật dẫn theo hướng đẩy chúng về một phía của vật dẫn. Số lượng các điện tích bị đẩy về một phía sẽ cân bằng với mức độ ảnh hưởng của từ trường. Điều này dẫn đến xuất hiện một hiệu điện thế giữa 2 mặt của vật dẫn. Sự xuất hiện của hiệu điện thế có khả năng đo được này được gọi là hiệu ứng Hall, lấy tên người tìm ra nó vào năm 1879.



Hình 2.6: Hiệu ứng Hall

2.3 Nguyên lý hoạt động của BLDC

Để động cơ BLDC hoạt động thì cần biết được vị trí chính xác của rotor để điều khiển quá trình đóng ngắt các khóa bán dẫn, cấp nguồn cho các cuộn dây stator theo trình tự hợp lí. Mỗi trạng thái chuyển mạch có một trong các cuộn dây (như pha A) được cấp điện dương (dòng đi vào trong cuộn dây pha A), cuộn dây thứ 2 (pha B) được cấp điện âm (dòng từ cuộn dây đi ra pha B) và cuộn thứ 3 (pha C) không cấp điện. Momen được sinh ra do tương tác giữa từ trường tạo ra bởi những cuộn dây của stator với nam châm vĩnh cửu. Một cách lí tưởng, momen lớn nhất xảy ra khi 2 từ trường lệch nhau 90 độ và giảm xuống khi chúng di chuyển. Để giữ động cơ quay, từ trường tạo ra bởi những cuộn dây stator phải quay “đồng bộ” với từ trường của rotor một góc α .

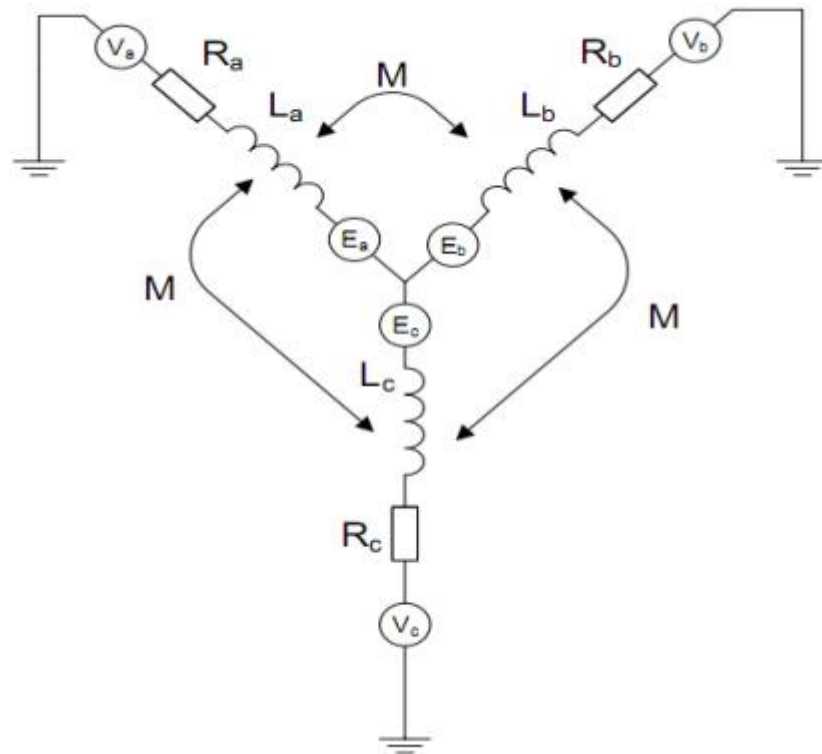
2.4 Mô hình toán học và phương pháp điều khiển động cơ BLDC

2.4.1 Giới thiệu

Mô hình toán học của đối tượng là các mối quan hệ toán học nhằm mục đích mô tả lại đối tượng thực tế đó nhưng dưới dạng các biểu thức toán học để thuận lợi cho quá trình phân tích, khảo sát thiết kế. Đối với động cơ, mô tả toán học đóng vai trò quan trọng vì mọi khảo sát và toán bằng lý thuyết đều dựa trên mô hình toán học. Vì vậy mô hình toán học là chìa khoá để mở ra mọi vấn đề trong quá trình tính toán thiết kế cho động cơ.

2.4.2 Mô hình toán học

Để thực hiện xây dựng mô hình toán học thì phải ước lượng động cơ về các phần tử điện cơ bản. Hình 2.6 trình bày mô hình mạch điện trong động cơ bao gồm 3 cuộn dây stato được ước lượng bởi điện trở R_a và điện cảm L_a , do 3 cuộn dây của stator được đặt cạnh nhau nên xảy ra hiện tượng hồ cảm giữa các cuộn dây với nhau, sự hồ cảm giữa các cuộn dây được thể hiện qua đại lượng M . Mặt khác do rotor của động cơ là nam châm vĩnh cửu nên khi rotor quay sẽ quét qua cuộn dây stator nên có sự tương tác giữa hai từ trường. Vì vậy các đại lượng e_a , e_b , e_c , thể hiện sự tương tác giữa hai từ trường, biên độ của các sức phản điện động này là bằng nhau và bằng E . Do các nam châm đều được làm từ vật liệu có suất điện trở cao nên có thể bỏ qua dòng cảm ứng rotor.



Hình 2.7: Mô hình mạch điện của động cơ BLDC

Từ mô hình mạch điện của động cơ thì phương trình điện áp của một pha:

$$v_a = R_a + L_a \cdot \frac{d_i}{d_t} + e_a$$

$$v_b = R_b + L_b \cdot \frac{d i_b}{d t} + e_b \quad (2.1)$$

$$v_c = R_c + L_c \cdot \frac{d i_c}{d t} + e_c$$

Đặt s là toán tử laplace khi đó $\frac{d i}{d t} = i \cdot s$

Phương trình điện áp của ba pha:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & L_{ba} & L_{ca} \\ L_{ab} & L_b & L_{cb} \\ L_{ac} & L_{bc} & L_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Trong đó L_a, L_b, L_c là điện cảm của các cuộn dây động cơ. L_{ab}, L_{bc}, L_{ca} là hồ cảm giữa các cuộn dây tương ứng. R_a, R_b, R_c là điện trở của cuộn dây stator động cơ. Do các pha là đối xứng nên các giá trị điện trở, điện cảm, hồ của ba cuộn dây là bằng nhau. Khi đó:

$$R_a = R_b = R_c = R$$

$$L_a = L_b = L_c = L_s$$

$$L_{ba} = L_{ab} = L_{ca} = L_{ac} = L_{bc} = L_{cb} = M$$

Do đó:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + S \cdot \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Trên hình 2.6 các cuộn dây của stator đấu sao nên:

$$I_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.4)$$

$$\rightarrow M \cdot i_a + M \cdot i_b = -M \cdot i_c \quad (2.5)$$

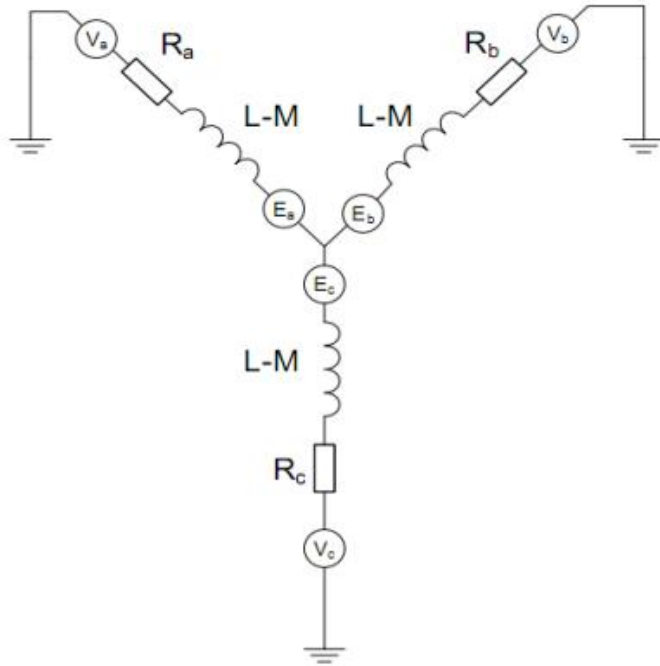
Kết hợp (2.3) và (2.5), suy ra:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + S \cdot \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Chuyển vế (2.6) để đưa dòng điện về một vế ta được:

$$S \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L-M} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L-M} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L-M} \end{bmatrix} \cdot \left[\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \right] \quad (2.7)$$

Từ biểu thức (2.7) xây dựng được mô hình thu gọn của động cơ BLDC.



Hình 2.8: Mô hình thu gọn của động cơ BLDC

Đặt $L-M = L_s$ là điện cảm tương đương của mỗi pha

Thay vào biểu thức (2.7):

$$S \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_s} \end{bmatrix} \cdot \left[\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \right] \quad (2.8)$$

2.4.2 Momen điện từ

Momen điện từ của động cơ được tính thông qua các công suất cơ và công suất điện. Do trong động cơ ma sát sinh ra chủ yếu giữa trục động cơ và ổ đỡ

nên lực ma sát này nhỏ. Thêm vào đó vật liệu chế tạo động cơ cũng là loại có điện trở suất cao nên có thể giả thiết bỏ qua các tổn hao sắt, tổn hao đồng. Vì vậy, công suất điện cấp cho động cơ cũng chính bằng công suất cơ trên đầu trục.

Với ω là tốc độ của động cơ, công suất cơ được tính theo biểu thức:

$$P_c = M \cdot \omega \quad (2.9)$$

Công suất điện được tính theo công thức:

$$P_d = e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c \quad (2.10)$$

Cân bằng công suất ở hai biểu thức trên:

$$M \cdot \omega = e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c \quad (2.11)$$

$$\rightarrow M = \frac{e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c}{\omega} \quad (2.12)$$

2.4.3 Phương trình động học của động cơ BLDC

Momen quán tính: J_m

Momen ma sát: M_f

Ma sát thường tỷ lệ với tốc độ và được biểu hiện thông qua hệ số nhớt D theo biểu thức:

$$M_f = D \cdot \omega_m$$

Momen tải của động cơ: M_c

Momen quán tính của tải: J_c

Như vậy, phương trình động học tổng quát của động cơ có dạng như sau:

$$M = (J_m + J_c) \cdot \frac{d\omega}{dt} + D \cdot \omega + M_c \quad (2.13)$$

Đặt $J = J_m + J_c$ biến đổi phương trình (2.12) sẽ được:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M - D \cdot \omega - M_c}{J} \quad (2.14)$$

Viết dưới dạng toán tử Laplace:

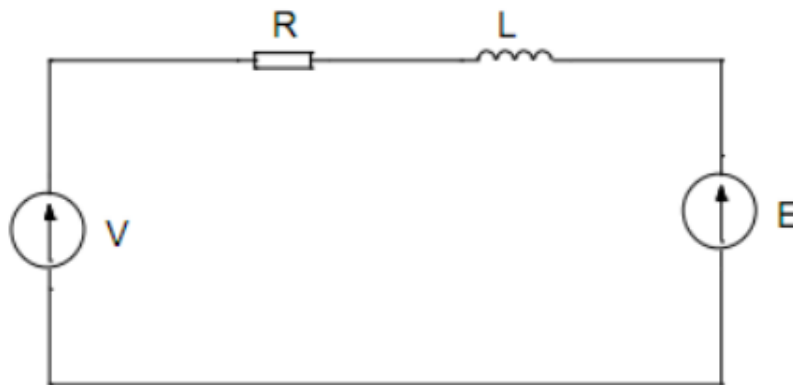
$$s \cdot \omega = \frac{M - D \cdot \omega - M_c}{J} \quad (2.15)$$

2.4.4 Phương trình đặc tính cơ của động cơ một chiều không chổi than

Đặc tính cơ của động cơ là mối quan hệ giữa tốc độ và momen của động cơ. Công suất cơ của động cơ là tích số giữa momen và tốc độ. Tuy vậy, ở cùng một giá trị công suất, mỗi loại động cơ khác nhau thì mối quan hệ giữa hai đại lượng này là khác nhau.

Xét sơ đồ một pha tương đương của động cơ trong hình 2.3 gồm nguồn cấp một chiều có độ lớn V , sức phản điện động là E , điện trở cuộn dây là R và dòng điện mỗi pha ở chế độ xác lập là I . Do tại một thời điểm trong động cơ luôn có 2 pha cùng dẫn nên phương trình cân bằng điện áp của động cơ ở thời điểm xác lập như sau:

$$V = 2 \cdot E + 2 \cdot R \cdot I \quad (2.16)$$



Hình 2.9: Sơ đồ 1 pha tương đương của động cơ BLDC

Ta có biểu thức công suất điện:

$$P_d = e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c = 2 \cdot E \cdot I \quad (2.17)$$

Biểu thức về công suất cơ:

$$P_c = M \cdot \omega \quad (2.18)$$

Biểu thức về suất điện động:

$$E = K_e \cdot \omega \quad (2.19)$$

Nếu bỏ qua các tổn hao về momen như tổn hao do ma sát, tổn hao sắt từ, khe hở ... thì có thể coi công suất cơ xấp xỉ bằng công suất điện. Trong biểu thức về sức phản điện động trên, E là giá trị đo theo đỉnh - đỉnh. Vì vậy, biên độ của sức điện động phải là E/2. Cân bằng phương trình (2.17) và (2.18) kết hợp với biểu thức sức phản điện động, ta được:

$$M \cdot \omega = 2 \cdot E \cdot I = 2 \cdot \frac{K_e \cdot \omega}{2} \cdot I = K_e \cdot I \rightarrow I = \frac{M}{K_e} \quad (2.20)$$

Nếu thay biểu thức sức điện động vào (2.15), ta sẽ có biểu thức của tốc độ như sau :

$$\omega = \frac{V - 2 \cdot R \cdot I}{K_e} \quad (2.21)$$

Từ hai biểu thức (2.20) và (2.21), ta sẽ có phương trình đặc tính cơ của động cơ BLDC:

$$\omega = \frac{V}{K_e} - \frac{2 \cdot R}{K_e^2} \cdot M \quad (2.22)$$

Giao điểm của đặc tính cơ với trục tốc độ chính là biểu thị của tốc độ không tải lý tưởng. Lúc đó, dòng điện bằng 0.

$$\omega_0 = \frac{V}{K_e} \quad (2.23)$$

Giao điểm của đường đặc tính cơ với trục momen là giá trị momen lớn nhất hay momen ngắn mạch (tương ứng với dòng điện ngắn mạch).

$$M_{mm} = \frac{V \cdot K_e}{2 \cdot R} \quad (2.24)$$

Có thể thấy, dạng của phương trình đặc tính cơ của động cơ một chiều thông thường với động cơ BLDC là giống nhau.

2.6 Giới thiệu về FOC

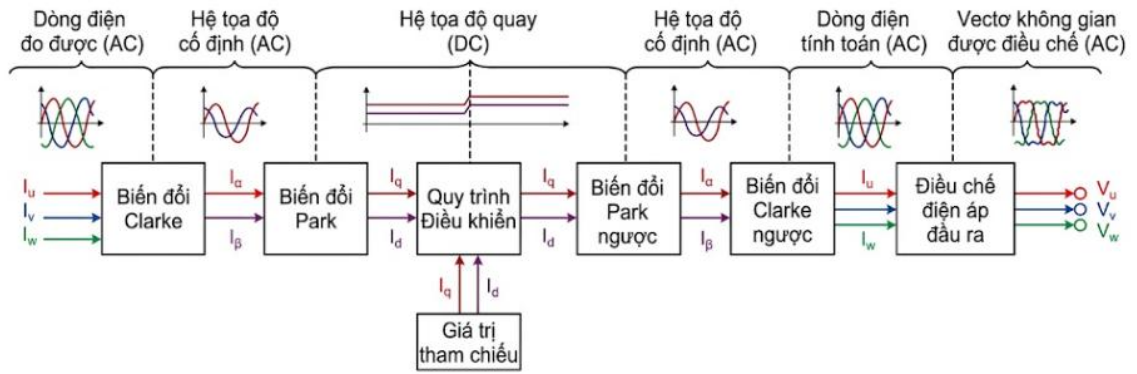
Điều khiển hướng từ trường của động cơ BLDC là phương pháp điều khiển tiên tiến điều chỉnh từ trường và dòng điện của động cơ BLDC để đạt được hoạt động trơn tru, chính xác và hiệu quả. Nó giúp động cơ BLDC duy trì hiệu suất cao trên nhiều tốc độ, khiến nó trở nên không thể thiếu trong các ứng dụng động.

2.7 Điều khiển hướng trường (FOC) của động cơ BLDC là gì?

Điều khiển hướng trường của Động cơ BLDC là phương pháp điều khiển tiên tiến giúp điều chỉnh từ trường và dòng điện của động cơ để đạt được hoạt động trơn tru, chính xác và hiệu quả. Không giống như các phương pháp điều khiển truyền thống, phương pháp điều khiển hướng trường (FOC) căn chỉnh dòng điện stato với từ trường của rôto để tối ưu hóa tốc độ và điều khiển mô-men xoắn để có hiệu suất vượt trội. Nó cũng cho phép điều khiển chính xác các động cơ BLDC, mang lại hiệu suất trơn tru hơn và hoạt động tốt hơn ở nhiều tốc độ.

2.8 Phương pháp nghiên cứu.

Thuật toán FOC được xây dựng dựa trên phép biến đổi Park-Clarke. Hình 2.12 cho thấy để điều khiển động cơ BLDC ba pha, chúng ta phải cung cấp điện áp thích hợp cho động cơ bằng cách đọc dòng điện các pha (i_a, i_b, i_c). Thuật toán FOC đơn giản hóa việc điều khiển các hệ tọa độ dòng điện hình sin ba pha bằng cách phân tách chúng thành các hệ tọa độ tham chiếu mô-men xoắn và từ thông. Hai thành phần này có thể được điều khiển hoàn toàn độc lập.



Hình 2.10: Quá trình biến đổi tín hiệu của Phương pháp Điều khiển định hướng trường (FOC).

2.8.1 Thuật toán điều khiển hướng trường (FOC)

Dòng điện ba pha của động cơ BLDC được chuyển đổi bằng phép biến đổi Clarke thành hai dòng điện vuông góc (i_α, i_β). Phép biến đổi Clarke được thể hiện qua phương trình:

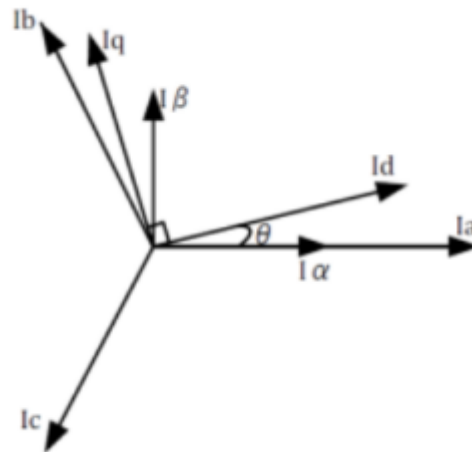
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Trong đó, i_α, i_β là các dòng điện trong hệ tọa độ vuông góc cố định và i_a, i_b, i_c là dòng điện của hệ thống ba pha. Các dòng điện vừa được chuyển đổi này hiện lần lượt đại diện cho dòng điện tạo mô-men xoắn và dòng điện tạo từ thông. Mặc dù dòng điện pha đã được chuyển đổi thành các thành phần từ thông và mô-men xoắn, các thành phần này vẫn có dạng hình sin, khiến việc điều khiển gặp khó khăn do chúng liên tục thay đổi. Với phép biến đổi Park, hai dòng điện xoay chiều (AC) (i_α, i_β) sẽ được chuyển thành dòng điện một chiều (DC) (i_d, i_q).

Phép biến đổi Park chuyển hệ tọa độ tham chiếu cố định từ góc nhìn của stato sang hệ tọa độ tham chiếu quay theo góc nhìn của rô-to, thông qua phương trình:

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

Trong đó θ là vị trí góc của rô-to và i_d, i_q là các dòng điện vuông góc trong hệ tọa độ quay. Hình 2.13 cho thấy i_q là biến dùng để tạo ra mô-men xoắn vì nó vuông góc (hoặc lệch pha một góc vuông) với trục sta-to, tạo ra từ trường lớn nhất để truyền động cho động cơ BLDC. Biến i_d là biến tạo ra từ thông vì nó trùng hướng với trục sta-to.



Hình 2.11: Biểu diễn vector kết hợp.

Động cơ BLDC nhận một đầu vào tốc độ tham chiếu để điều khiển bởi bộ điều khiển PI. Đầu ra của mạch vòng điều khiển tốc độ tạo ra một giá trị và giá trị này sẽ được đưa vào làm giá trị tham chiếu cho dòng điện mô-men xoắn (i_q). Để đạt được mô-men xoắn cực đại, giá trị dòng điện từ thông tham chiếu (i_d) phải được đặt bằng không. Sau đó, các giá trị i_q và i_d sẽ đi vào từng bộ điều khiển PI tương ứng. Đầu ra của hai khối PI này là điện áp v_q và v_d . Các đầu ra v_q và v_d được chuyển đổi thành các giá trị v_α và v_β nhờ phép biến đổi Park ngược. Khối biến đổi Park ngược chuyển hệ tọa độ tham chiếu quay thành hệ tọa độ tham chiếu cố định. Phương trình biến đổi Park ngược được thể hiện trong công thức:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix}$$

Trong đó v_q , v_d và v_α , v_β là các điện áp trong hệ tọa độ quay vuông góc và hệ tọa độ cố định vuông góc. Các đầu ra tiếp tục được chuyển đổi thành các giá trị v_a , v_b , v_c bằng phép biến đổi Clarke ngược. Khối biến đổi Clarke ngược chuyển

đổi điện áp hệ tọa độ vuông góc cố định thành điện áp hệ thống ba pha. Phương trình biến đổi Clarke ngược được thể hiện trong công thức (4). Sau đó, các giá trị v_a, v_b, v_c được xử lý bởi khối SVPWM để điều chế đưa vào bộ nghịch lưu 3 pha.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}$$

Trong đó v_a, v_b, v_c là điện áp của hệ thống ba pha.

2.8.2 Bộ điều khiển tỉ lệ tích phân (PID).

Bộ điều khiển PI tích hợp bộ khử bão hòa lượng tích phân (anti-windup) được áp dụng trong thuật toán FOC. Phương trình thời gian rời rạc được sử dụng trong việc triển khai được thể hiện qua phương trình:

$$x_{out(k+1)} = K_p \cdot x_{in(k)} + K_i \cdot T_s \cdot x_{in(k)} + x_{out(k)}$$

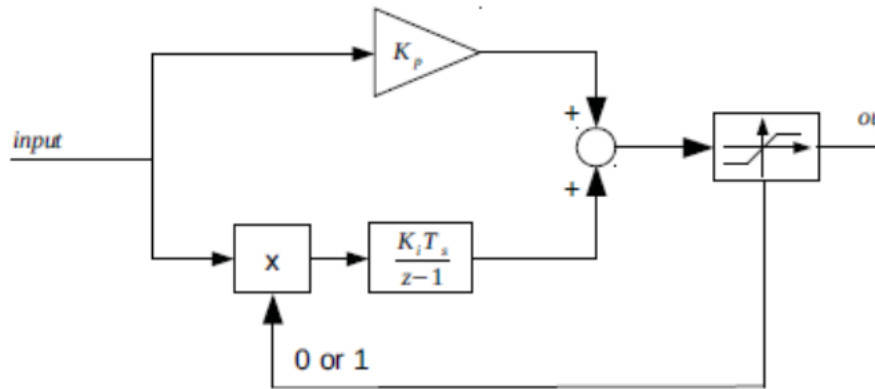
Trong đó $x_{out(k+1)}$ là dữ liệu đầu ra của bộ điều khiển PI, $x_{in(k)}$ là dữ liệu đầu vào của bộ điều khiển PI, K_p là hệ số khuếch đại tỉ lệ, K_i là hệ số khuếch đại tích phân, và T_s là thời gian lấy mẫu. Bộ điều khiển PI được bổ sung tính năng anti-windup được dùng trong thuật toán FOC để kiểm soát ba tham số (Tốc độ, mô-men xoắn và từ thông). Khối anti-windup được sử dụng để giới hạn thành phần tích phân sao cho chúng không vượt quá giới hạn cho phép trong quá trình thực hiện tích phân. Các phương trình thời gian rời rạc được sử dụng trong thực tế được đưa ra ở công thức:

$$x_{out(k+1)} = K_p \cdot x_{in(k)} + w_{up} \cdot K_i \cdot T_s \cdot x_{in(k)} + x_{out(k)}$$

$$w_{up} = \begin{cases} 1 & \text{nếu } -x_{lim} < x_{in(k)} < x_{lim} \\ 0 & \text{trường hợp khác} \end{cases}$$

Trong đó w_{up} và x_{lim} là giới hạn của thành phần tích phân. Để ngăn chặn hiện tượng vọt lố quá mức của tín hiệu đầu ra, các bộ bão hòa giới hạn đối xứng với các giới hạn bằng x_{lim} được sử dụng. Nhằm "đóng băng" đầu ra của bộ điều khiển

PI dưới điều kiện bị giới hạn, thao tác anti-windup là bắt buộc. Sơ đồ khối của bộ điều khiển PI được thể hiện trong



Hình 2.12: Sơ đồ khối của bộ điều khiển PID.

2.8.3 Điều chế vector không gian (SVPWM).

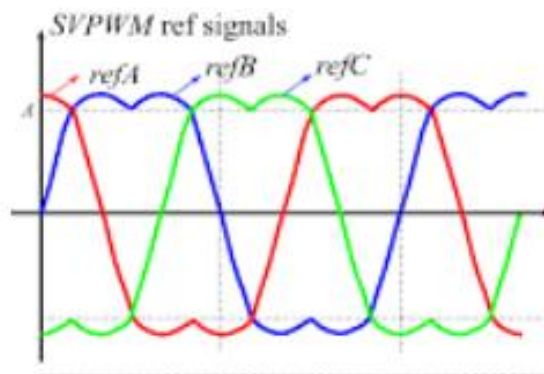
Một phương trình đơn giản hóa (7, 8) tính toán trực tiếp chu kỳ nhiệm vụ (duty cycle) áp dụng cho bộ nghịch lưu 3 pha đã được sử dụng cho khối SVPWM.

$$d_i = 0.5 V_{dc} + v_{ref_i} + U^* \quad (7)$$

Trong đó:

$$U^* = -0.5 [\max(\sum_i v_{ref_i}) + \min(\sum_i v_{ref_i})]$$

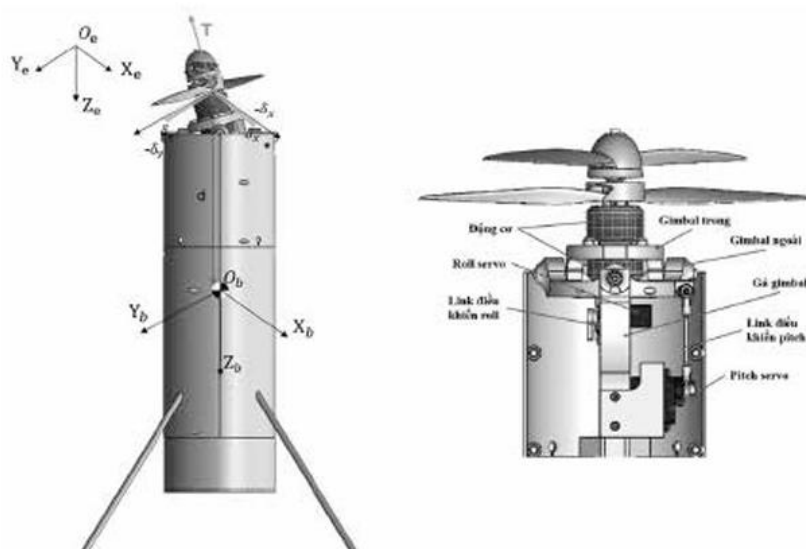
Hình 3 hiển thị các tín hiệu SVPWM, điện áp các pha (v_{ref_i}) thu được bằng phương trình (9). Trong đó $i = a, b, c$. Bởi vì các bộ đếm PWM được sử dụng để tạo ra tín hiệu PWM có độ phân giải 12-bit, người ta giả định rằng giá trị trong ứng dụng cụ thể này bằng 4096. Hình 2.9 thể hiện Tín hiệu SVPWM.



Hình 2.13: Tín hiệu điều chế vector không gian.

2.9 Khảo sát động học cho Drone

Để xây dựng hệ phương trình động lực học, thiết bị bay được xét như một vật rắn chịu một lực tại tâm và 3 mô-men quay theo các góc roll, pitch, yaw. Quỹ đạo của thiết bị bay được mô tả trong hai hệ tọa độ $O_b X_b Y_b Z_b$ là hệ tọa độ gắn với vật và $O_e X_e Y_e Z_e$ là hệ tọa độ quy chiếu quán tính. Vector $r = [x \ y \ z]^T$ biểu thị vị trí và $\Psi = [\Phi \ \theta \ \Psi]^T$ biểu thị góc Euler tư thế của máy bay trong hệ tọa độ quy chiếu quán tính. $v = [v_x \ v_y \ v_z]^T$ là vận tốc trong hệ quy chiếu quán tính và $\eta = [p \ q \ r]^T$ là vận tốc góc trong tọa độ gắn với vật. Vận tốc và tốc độ góc trong hai hệ tọa độ có thể được chuyển đổi bằng ma trận như sau:



Hình 2.14. Hệ quy chiếu và mô hình thiết bị bay

Ma trận xoay R mô tả sự thay đổi góc quay giữa hai hệ tọa độ có dạng sau ta có thể kiểm tra bằng cách nhân từng bước.

Trước hết:

$$R_z(\psi)R_y(\theta) = \begin{bmatrix} C\psi C\theta & -S\psi & C\psi S\theta \\ S\psi C\theta & C\psi & S\psi S\theta \\ -S\theta & 0 & C\theta \end{bmatrix}$$

Sau đó nhân với $R_x(\phi)$:

$$R = \begin{bmatrix} C\psi C\theta & -S\psi & C\psi S\theta \\ S\psi C\theta & C\psi & S\psi S\theta \\ -S\theta & 0 & C\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\phi & -S\phi \\ 0 & S\phi & C\phi \end{bmatrix}$$

Kết quả:

$$R = \begin{bmatrix} C\psi C\theta & C\psi S\theta S\phi - S\psi C\phi & C\psi S\theta C\phi + S\psi S\phi \\ S\psi C\theta & S\psi S\theta S\phi + C\psi C\phi & S\psi S\theta C\phi - C\psi S\phi \\ -S\theta & C\theta S\phi & C\theta C\phi \end{bmatrix}$$

hay viết đầy đủ theo sin và cos :

R

$$= \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi & \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix}$$

Do đó ma trận kết quả mà bạn đưa ra là **chính xác** đối với thứ tự xoay $R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\phi)$ (yaw–pitch–roll theo quy ước ngoại tại tương đương với roll–pitch–yaw nội tại).

Quan hệ giữa vận tốc góc và góc Euler

Mối quan hệ giữa vận tốc góc của thiết bị bay trong hệ tọa độ gắn với thân (body frame) và tốc độ biến thiên của các góc Euler được biểu diễn như sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi)\tan(\theta) & \cos(\phi)\tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \frac{\sin(\phi)}{\cos(\theta)} & \frac{\cos(\phi)}{\cos(\theta)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

Trong đó, p , q và r lần lượt là các thành phần vận tốc góc quanh các trục x , y và z của hệ tọa độ thân; ϕ , θ và ψ tương ứng là các góc lăn (roll), góc chúi/ngóc (pitch) và góc hướng (yaw). Ký hiệu $\sin(\cdot)$, $\cos(\cdot)$ và $\tan(\cdot)$ lần lượt là các hàm lượng giác sine, cosine và tangent.

Mô hình động lực học tịnh tiến

Thiết bị bay được giả thiết là một vật rắn tuyệt đối. Trong quá trình chuyển động, động lực học của thiết bị bao gồm hai thành phần chính: động lực học tịnh tiến và động lực học quay.

Theo định luật II Newton, phương trình động lực học tịnh tiến được mô tả bởi:

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} - m \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} - k \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}$$

Trong đó:

- m là khối lượng thiết bị bay;
- R là ma trận quay từ hệ tọa độ thân sang hệ tọa độ quán tính;
- g là gia tốc trọng trường;
- k là hệ số cản khí động;
- v_x, v_y, v_z là các thành phần vận tốc tuyến tính;
- F_x, F_y, F_z là các thành phần lực đẩy tác dụng lên thiết bị bay.

Thành phần lực đẩy

Vector lực đẩy \mathbf{F} được sinh ra bởi hai động cơ cánh quạt và được phân tích theo các trục tọa độ như sau:

$$F_x = (F_1 + F_2) \sin(\delta_y) \cos(\delta_x)$$

$$F_y = (F_1 + F_2) \sin(\delta_y) \sin(\delta_x)$$

$$F_z = (F_1 + F_2) \cos(\delta_y)$$

Trong đó:

- $F_1 = k_T \omega_1^2$ và $F_2 = k_T \omega_2^2$ là lực đẩy sinh ra bởi động cơ 1 và động cơ 2;
- k_T là hệ số lực đẩy;
- ω_1 và ω_2 là tốc độ góc của các động cơ;
- δ_x và δ_y là các góc nghiêng của vector lực đẩy theo các phương tương ứng.

Mô hình động lực học quay

Chuyển động quay của thiết bị bay được mô tả bởi phương trình Euler:

$$\boldsymbol{\tau} = I\dot{\boldsymbol{\eta}} + \boldsymbol{\eta} \times (I\boldsymbol{\eta})$$

Trong đó:

- τ là vectơ mô-men tác dụng lên thiết bị bay;
- $\eta = [p \ q \ r]^T$ là vectơ vận tốc góc trong hệ tọa độ thân;
- I là ma trận mô-men quán tính của thiết bị bay.

Do thiết bị bay có cấu trúc đối xứng và các góc lệch δ_x, δ_y nhỏ, ma trận quán tính được xem là ma trận đường chéo:

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix}$$

Khi đó, phương trình Euler có thể được khai triển thành:

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_x \\ I_{xx} \\ \tau_y \\ I_{yy} \\ \tau_z \\ I_{zz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} qr \\ \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} pr \\ \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} pq \end{bmatrix}$$

Mô-men điều khiển

Các mô-men điều khiển quanh các trục của thiết bị bay được xác định bởi:

$$\tau_x = U_2 d$$

$$\tau_y = U_3 d$$

$$\tau_z = U_4$$

Trong đó:

- U_2, U_3, U_4 là các tín hiệu điều khiển tương ứng cho các chuyển động roll, pitch và yaw;
- d là khoảng cách từ tâm khối lượng của thiết bị đến vị trí sinh lực đẩy

ε - Hệ số mô-men xoắn khí động của motor,

$$U_1 = F_z, U_2 = F_x, U_3 = F_y, U_4 = \varepsilon.(F_1 - F_2).$$

2.10. Mô hình khối lượng và tải trọng của drone vận tải

Đối với drone vận tải, tải trọng (payload) là một trong những yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng mang hàng, độ ổn định, thời gian bay và mức tiêu thụ năng lượng. Trong quá trình hoạt động, khối lượng của hệ thống không chỉ bao gồm khối lượng bản thân thiết bị bay mà còn bao gồm khối lượng hàng hóa được vận chuyển.

Tổng khối lượng của drone được xác định bởi:

$$m = m_d + m_p$$

Trong đó:

- m là tổng khối lượng của hệ thống (kg);
- m_d là khối lượng bản thân drone không tải (kg);
- m_p là khối lượng tải trọng (kg).

Ví dụ, nếu drone có khối lượng bản thân là 8 kg và mang theo kiện hàng có khối lượng 4 kg, tổng khối lượng của hệ thống là:

$$m = 8 + 4 = 12 \text{ kg}$$

Khối lượng tổng này được sử dụng trong tất cả các phương trình động lực học của thiết bị bay.

2.10.1 Ảnh hưởng của tải trọng đến trọng lượng

Dưới tác dụng của trọng trường, hệ thống chịu một lực trọng lượng:

$$W = mg$$

Trong đó:

- W là trọng lượng của hệ thống (N);
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ là gia tốc trọng trường.

Khi tải trọng tăng, trọng lượng của drone tăng tuyến tính. Do đó hệ thống động cơ phải sinh ra lực đẩy lớn hơn để duy trì trạng thái bay.

Ví dụ:

$$m = 12 \text{ kg}$$

suy ra:

$$W = 12 \times 9.81$$

$$W = 117.72 \text{ N}$$

Điều này có nghĩa là tổng lực đẩy của các động cơ phải ít nhất bằng 117.72 N để

2.0.2. Ảnh hưởng của tải trọng đến lực đẩy yêu cầu

Lực đẩy sinh ra bởi các động cơ được xác định theo biểu thức:

$$T = \sum_{i=1}^n F_i$$

với: $F_i = k_T \omega_i^2$ (19)

Trong đó:

- T là tổng lực đẩy (N);
- F_i là lực đẩy của động cơ thứ i ;
- k_T là hệ số lực đẩy;
- ω_i là tốc độ quay của động cơ.

Để drone duy trì trạng thái treo (hover), điều kiện cân bằng lực theo phương thẳng đứng là:

$$T = mg$$

Khi tải trọng tăng, giá trị mg tăng dẫn đến yêu cầu tăng tổng lực đẩy T . Điều này đồng nghĩa với việc tốc độ quay của các động cơ phải tăng lên để tạo đủ lực nâng.

Trong thực tế, các nhà thiết kế thường yêu cầu:

$$T_{max} \geq 2mg$$

nhằm bảo đảm khả năng điều khiển và dự phòng trong các điều kiện bay phức tạp.

2.10.3. Ảnh hưởng đến động lực học tịnh tiến

Phương trình động lực học tịnh tiến của drone được viết dưới dạng:

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} - k \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}$$

Trong phương trình trên, khối lượng m xuất hiện trực tiếp ở vế trái. Khi tải trọng tăng, gia tốc thu được từ cùng một lực tác dụng sẽ giảm theo định luật Newton:

$$a = \frac{F}{m}$$

Do đó:

- Drone phản ứng chậm hơn với lệnh điều khiển.
- Quãng đường tăng tốc dài hơn.
- Thời gian đạt vận tốc mong muốn lớn hơn.
- Khả năng cơ động giảm.

Đây là đặc điểm đặc biệt quan trọng đối với các drone vận tải có tải trọng lớn.

2.10.4. Ảnh hưởng đến mô-men quán tính

Ngoài việc làm tăng khối lượng tổng, tải trọng còn ảnh hưởng đến mô-men quán tính của thiết bị bay.

Theo định lý trục song song:

$$I = I_d + m_p r^2$$

Trong đó:

- I_d là mô-men quán tính của drone không tải;
- m_p là khối lượng tải trọng;
- r là khoảng cách từ tải trọng đến tâm khối lượng của drone.

Từ công thức (24) có thể thấy rằng khi tải trọng được đặt xa tâm khối lượng, mô-men quán tính tăng đáng kể.

Điều này dẫn đến:

- Drone khó thực hiện các thao tác quay nhanh.
- Thời gian đáp ứng góc roll và pitch tăng.
- Bộ điều khiển cần mô-men lớn hơn để thay đổi tư thế.

2.10.5. Dịch chuyển tâm khối lượng khi mang tải

Trong thực tế, tải trọng thường không được đặt chính xác tại tâm hình học của drone. Khi đó tâm khối lượng của hệ thống sẽ thay đổi.

Vị trí tâm khối lượng mới được xác định bởi:

$$\mathbf{r}_{cg} = \frac{m_d \mathbf{r}_d + m_p \mathbf{r}_p}{m_d + m_p}$$

Trong đó:

- \mathbf{r}_{cg} là vị trí tâm khối lượng mới;
- \mathbf{r}_d là vị trí tâm khối lượng của drone;
- \mathbf{r}_p là vị trí của tải trọng.

Nếu tâm khối lượng bị lệch khỏi tâm thiết kế:

- Drone sẽ bị mất cân bằng.
- Xuất hiện mô-men quay ngoài ý muốn.
- Hệ điều khiển phải liên tục bù để duy trì trạng thái ổn định.

Do đó trong thiết kế drone vận tải, hàng hóa thường được bố trí gần tâm khối lượng nhất có thể.

2.10.6. Ảnh hưởng đến tiêu thụ năng lượng

Công suất cần thiết để duy trì trạng thái bay phụ thuộc trực tiếp vào lực đẩy tạo ra.

Đối với drone đa rotor:

$$P \propto T^{3/2}$$

Mà:

$$T \approx mg$$

suy ra:

$$P \propto m^{3/2}$$

Do đó khi tải trọng tăng, công suất tiêu thụ tăng nhanh hơn tốc độ tăng khối lượng.

Ví dụ:

Tải trọng	Công suất
0 kg	100%
2 kg	125%
4 kg	155%
6 kg	190%

Kết quả là thời gian bay giảm đáng kể khi drone mang tải nặng.

2.10.7. Mô hình tải trọng biến thiên trong quá trình giao hàng

Trong các bài toán vận chuyển hàng hóa, tải trọng có thể thay đổi trong quá trình bay do drone thực hiện nhiệm vụ giao hàng.

Khi đó tải trọng được mô tả như một hàm theo thời gian:

$$m_p(t) = \begin{cases} m_{load}, & t < t_{drop} \\ 0, & t \geq t_{drop} \end{cases} \quad (28)$$

với:

- m_{load} là khối lượng kiện hàng;
- t_{drop} là thời điểm thả hàng.

Khối lượng tổng của drone trở thành:

$$m(t) = m_d + m_p(t) \quad (29)$$

Mô hình này cho phép mô phỏng chính xác sự thay đổi động lực học trước và sau khi giao hàng.

2.10.8. Kết luận

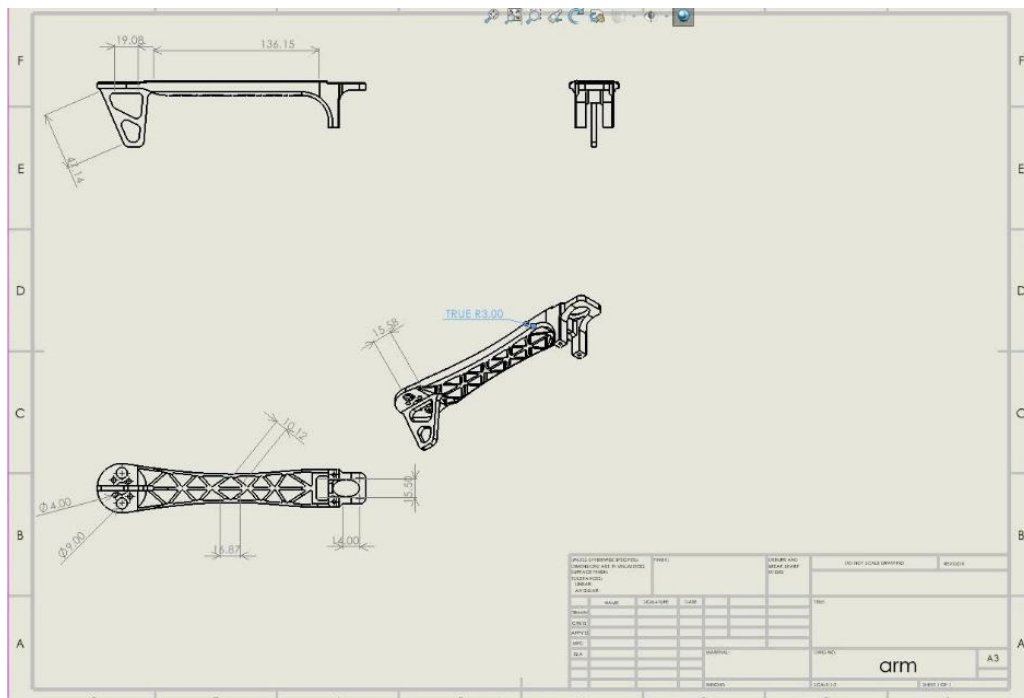
Tải trọng là một tham số quan trọng trong mô hình drone vận tải. Sự thay đổi của tải trọng không chỉ làm tăng khối lượng và trọng lượng của hệ thống mà còn ảnh hưởng đến lực đẩy yêu cầu, gia tốc chuyển động, mô-men quán tính, vị trí tâm khối lượng, mức tiêu thụ năng lượng và thời gian bay. Vì vậy, việc xây dựng mô hình tải trọng chính xác là điều kiện cần thiết để đánh giá hiệu năng và thiết kế bộ điều khiển cho drone vận tải.

Chương 3 : MÔ PHỎNG THIẾT KẾ HỆ THỐNG

3.1. Thiết kế mô hình 3D chi tiết

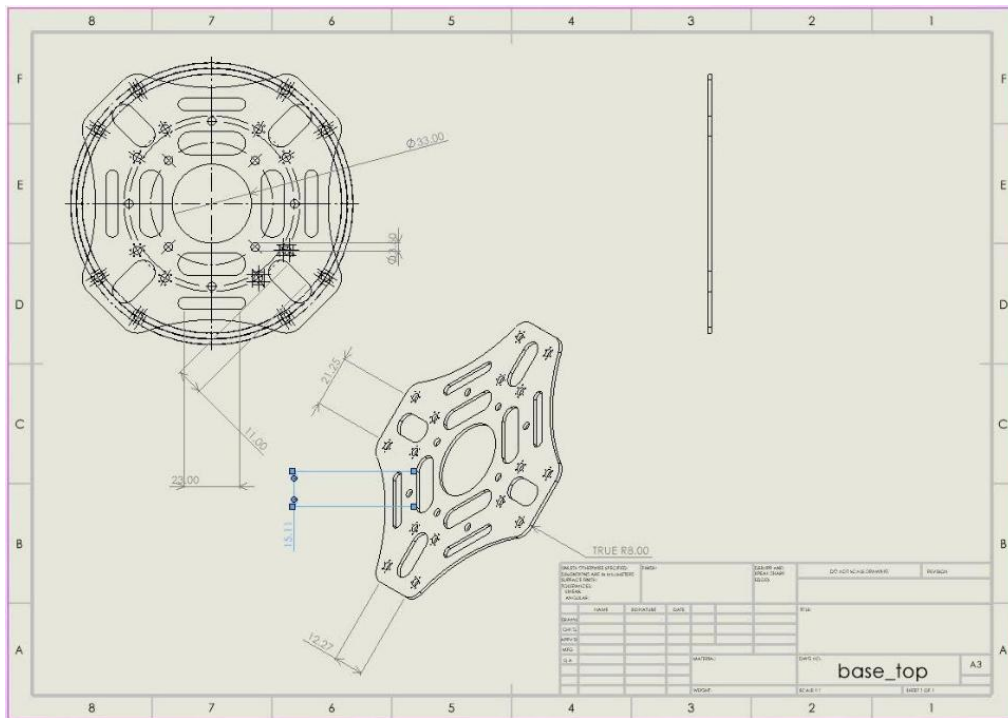
SOLIDWORKS nổi bật trong số các giải pháp phần mềm thiết kế 3D CAD bởi tính trực quan, phương pháp xây dựng mô hình 3D tham số, nhanh chóng, dễ dàng và tiện lợi cho người sử dụng. Khả năng tái sử dụng dữ liệu 2D cho phép dễ dàng chuyển đổi từ các bản vẽ, phác thảo 2D thành mô hình hình học 3D. SOLIDWORKS có khả năng dựng mô hình 3D từ ảnh chụp, điều này vô cùng tiện lợi cho các hoạt động sáng tạo, đổi mới, phát triển sản phẩm.

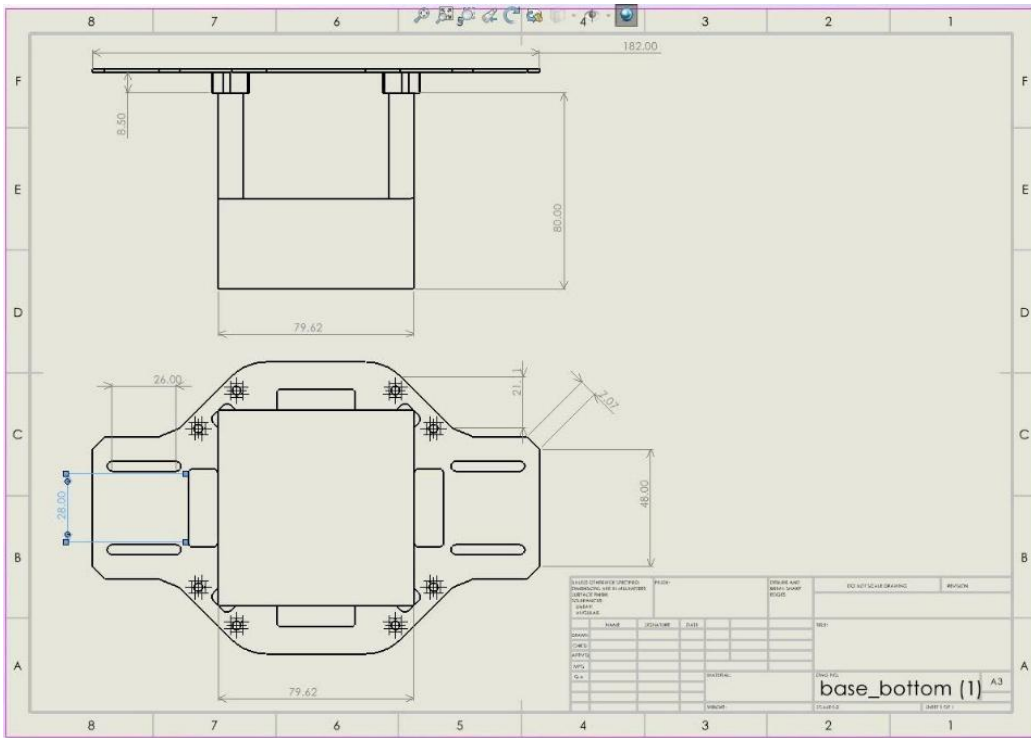
Tổng quan bản thiết kế các chi tiết :



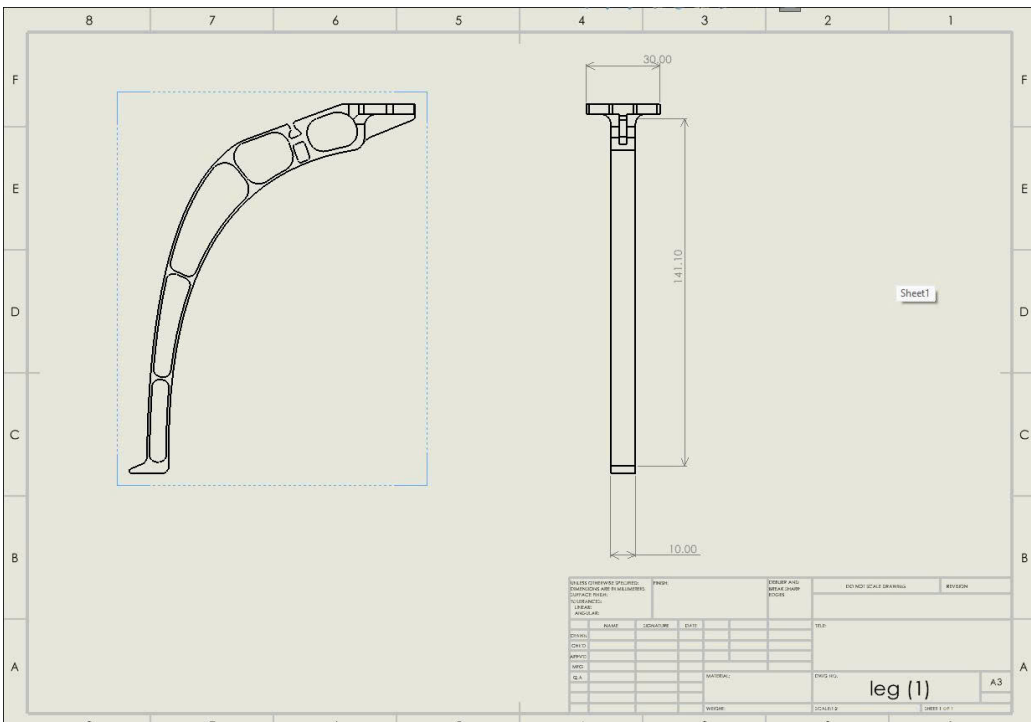
Hình 3.1 cánh tay

Hình 3.2 đế mặt trên

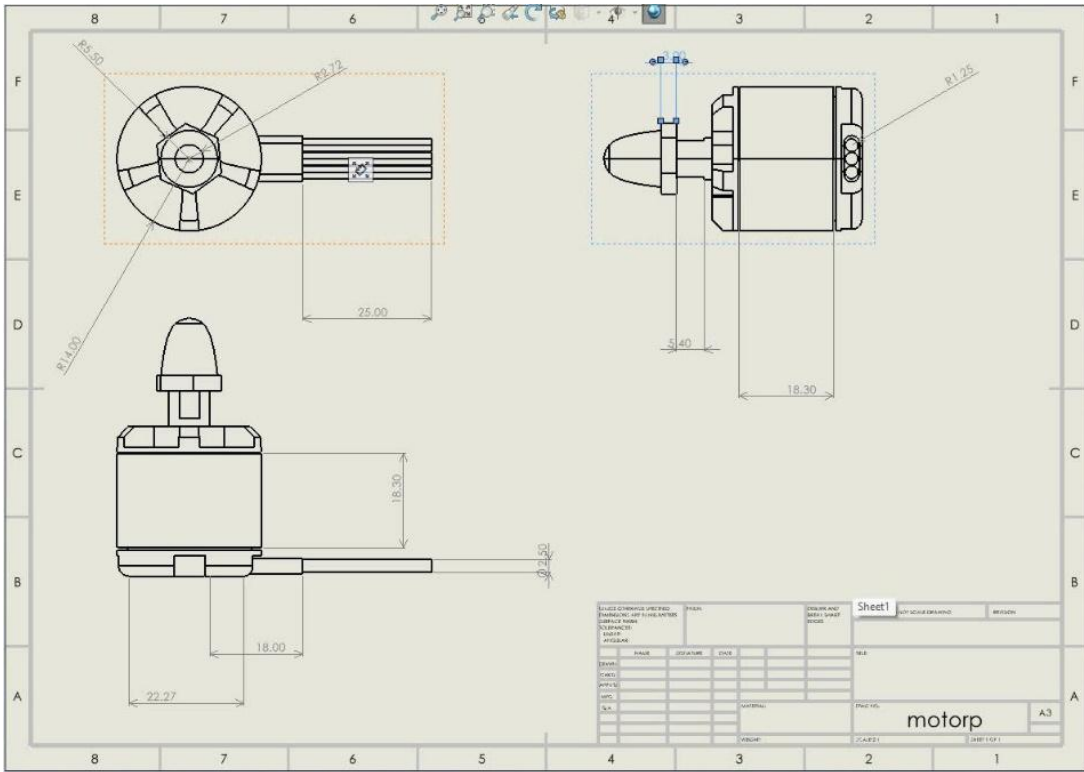




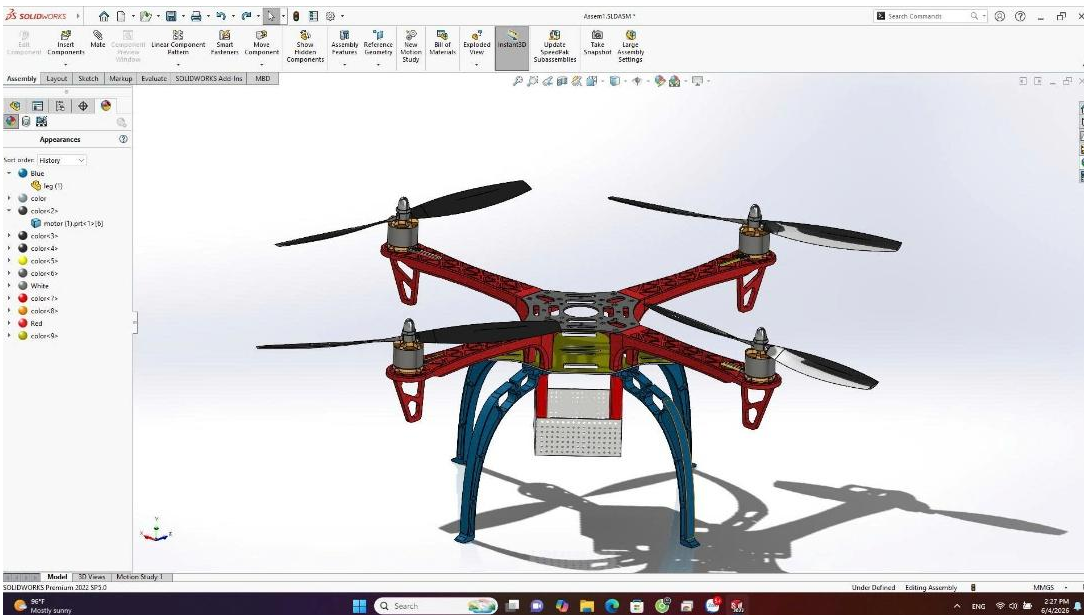
Hình 3.3 đế mặt dưới



Hình 3.4 càng đáp



Hình 3.5 Động cơ



Hình 3.6 Hoàn thiện

3.2 mô phỏng matlab

3.2.1. Matlab

MATLAB là một phần mềm tính toán số và mô phỏng kỹ thuật được phát triển bởi MathWorks. MATLAB được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như điều khiển tự động, điện – điện tử, cơ điện tử, robot, xử lý tín hiệu, trí tuệ nhân tạo và mô phỏng hệ thống động lực học...v.v

MATLAB cung cấp môi trường lập trình mạnh dựa trên ma trận cùng với khả năng tính toán số học chính xác, trực quan hóa dữ liệu và xây dựng các mô hình mô phỏng phức tạp. Một trong những ưu điểm nổi bật của MATLAB là khả năng tích hợp với Simulink model– công cụ mô phỏng các mô hình toán học bằng sơ đồ khối giúp người dùng dễ dàng xây dựng và phân tích các hệ thống điều khiển và hệ thống điện.

3.2.2. Mô phỏng

Chuyển động của Quadcopter được mô tả thông qua hai hệ tọa độ chuẩn trong không gian:

Hệ tọa độ quán tính cố định mặt đất (Inertial Frame - I): Ký hiệu là $O_I X_I Y_I Z_I$, có gốc O_I đặt tại một điểm cố định trên mặt đất. Trục Z_I hướng thẳng đứng lên trời vuông góc với mặt đất, trục X_I và Y_I tạo thành mặt phẳng ngang chuẩn. Hệ tọa độ này dùng để xác định vị trí tịnh tiến (x, y, z) và gia tốc trọng trường g .

Hệ tọa độ gắn liền thân máy bay (Body Frame - B): Ký hiệu là $O_B X_B Y_B Z_B$, có gốc O_B trùng với trọng tâm của Quadcopter. Đối với cấu hình chữ X, các trục tọa độ vật thể không đi qua các cánh tay đòn mà phân hướng đối xứng: trục X_B chỉ hướng tiến phía trước (nằm giữa motor 1 và 2), trục Y_B hướng sang bên trái, và trục Z_B hướng thẳng đứng lên trên, vuông góc với thân máy bay.

Mối quan hệ về hướng giữa Body Frame và Inertial Frame được định nghĩa qua chuỗi ba góc xoay tự do (Các góc Euler):

Mối quan hệ về hướng giữa **Body Frame** ($O_b X_b Y_b Z_b$) – hệ tọa độ gắn liền thân drone – và **Inertial Frame** ($O_e X_e Y_e Z_e$) – hệ tọa độ quán tính cố định trên mặt đất – được định nghĩa thông qua ba góc xoay tự do, hay còn gọi là **góc Euler**: ϕ (Roll), θ (Pitch) và ψ (Yaw).

Để biến đổi vector từ hệ tọa độ quán tính về hệ tọa độ thân drone, ta thực hiện chuỗi xoay **Z-Y-X** (Yaw-Pitch-Roll) theo ba bước:

Xoay quanh trục Z_e một góc ψ (Yaw – Góc hướng):

- Hệ tọa độ mặt đất được xoay quanh trục Z_e để tạo hệ tọa độ trung gian thứ nhất ($O X_1 Y_1 Z_1$).
- Trục Z_1 trùng với Z_e .
- Ma trận xoay:

$$R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Xoay quanh trục Y_1 một góc θ (Pitch – Góc gật):

- Hệ tọa độ trung gian thứ nhất xoay quanh trục Y_1 để tạo hệ trung gian thứ hai ($O X_2 Y_2 Z_2$).
- Trục Y_2 trùng với Y_1 .
- Ma trận xoay:

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

Xoay quanh trục X_2 một góc ϕ (Roll – Góc lắc ngang):

- Hệ tọa độ trung gian thứ hai xoay quanh trục X_2 để trùng với Body Frame ($O_b X_b Y_b Z_b$).
- Trục X_b trùng với X_2 .
- Ma trận xoay:

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

Ma trận chuyển đổi tổng quát:

Nhân tích chuỗi ba ma trận xoay theo thứ tự:

$$R_{E \rightarrow B} = R_x(\phi)R_y(\theta)R_z(\psi)$$

Ta thu được **ma trận cosin hướng (Direction Cosine Matrix – DCM)** tổng quát để chuyển vector từ hệ Inertial Frame sang Body Frame:

$$R_{E \rightarrow B} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix}$$

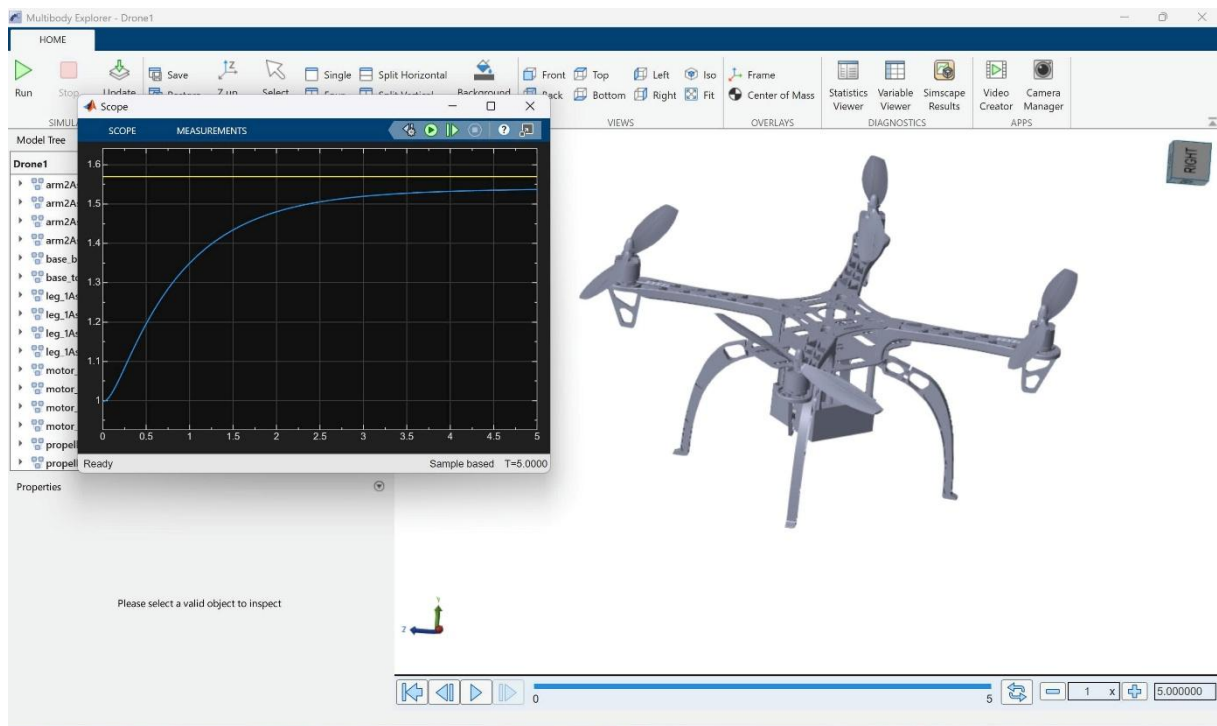
Ngược lại, để chuyển từ **Body Frame** về **Inertial Frame**, ta lấy ma trận chuyển vị:

$$R_{B \rightarrow E} = R_{E \rightarrow B}^T$$

Ứng dụng trong điều khiển drone

Chuỗi xoay Euler này là nền tảng để bộ điều khiển xác định **trạng thái lật, nghiêng của drone** thông qua các cảm biến IMU. Trạng thái này được sử dụng để tính toán **lực nâng và mô-men bù trừ** chính xác cho từng rotor, giúp drone duy trì ổn định bay và theo dõi quỹ đạo mong muốn.

Chuyển đổi sang simulink mô phỏng



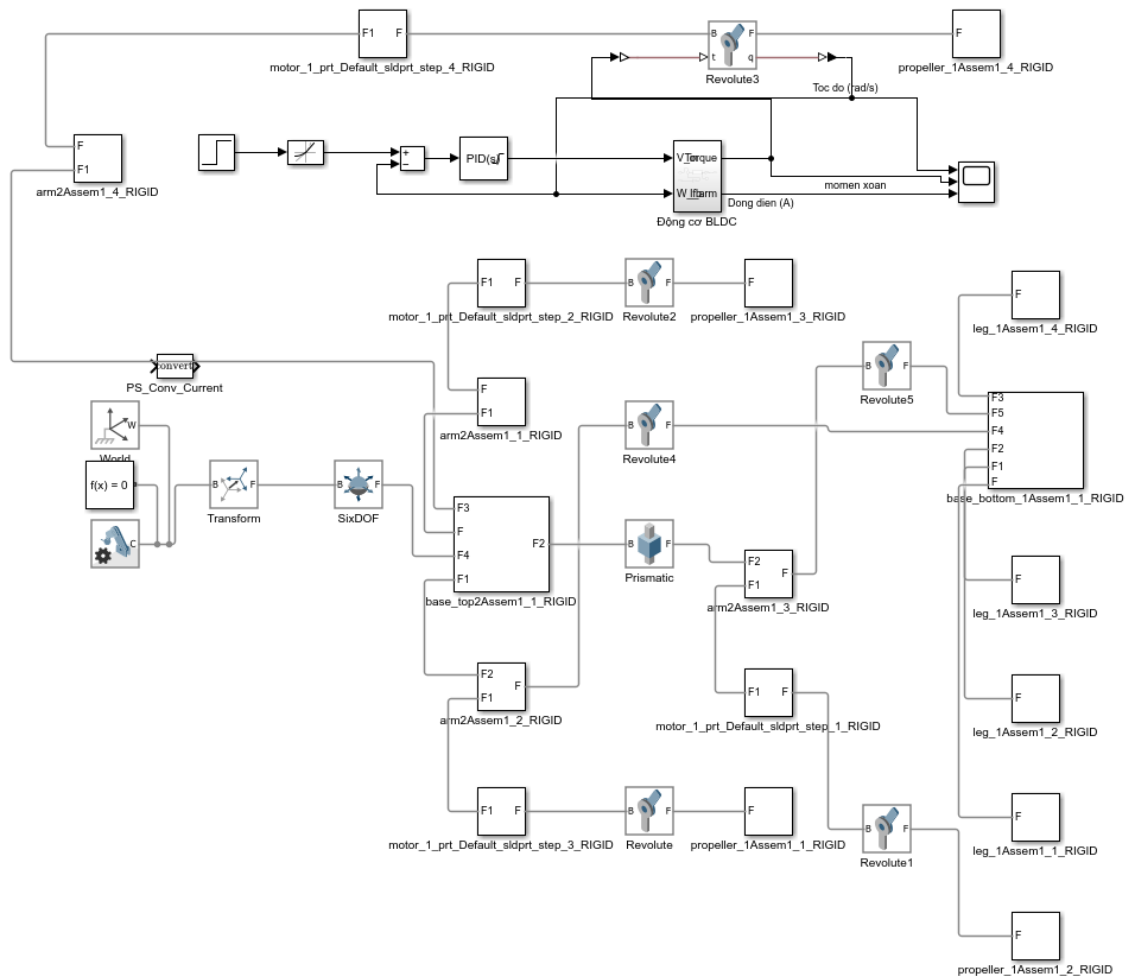
Hình 3.7 *Giao diện chính*

Nhận xét :

Scope – Biểu đồ kết quả mô phỏng

- Biểu đồ Scope hiển thị dữ liệu biến theo thời gian (T=0 đến 5s).
- Trục y từ ~1.0 đến 1.6, có thể là:
 - Chiều cao (m) của drone
 - Hoặc vận tốc, góc quay, tùy vào biến mà bạn đo.
- Đường màu xanh cho thấy một biến tăng dần và tiệm cận đến khoảng 1.54.
- Đường vàng nằm ngang ở ~1.56 có thể là giá trị mục tiêu/reference.
→ Drone đang tiệm cận giá trị mục tiêu, chứng tỏ hệ thống điều khiển đang hoạt động ổn định.
- Drone có khả năng tăng tốc từ trạng thái tĩnh lên trạng thái bay ổn định.
- Đường cong tăng dần kiểu bù trễ (rise + settling), phổ biến trong điều khiển PID.
- Chưa thấy dấu hiệu dao động lớn hay mất ổn định.

3.3 cấu trúc



Hình 3.8 Cấu trúc tổng thể drone

Đây là mô hình một quadcopter (drone 4 cánh quạt) gồm:

Phần cơ khí (Simscape Multibody)

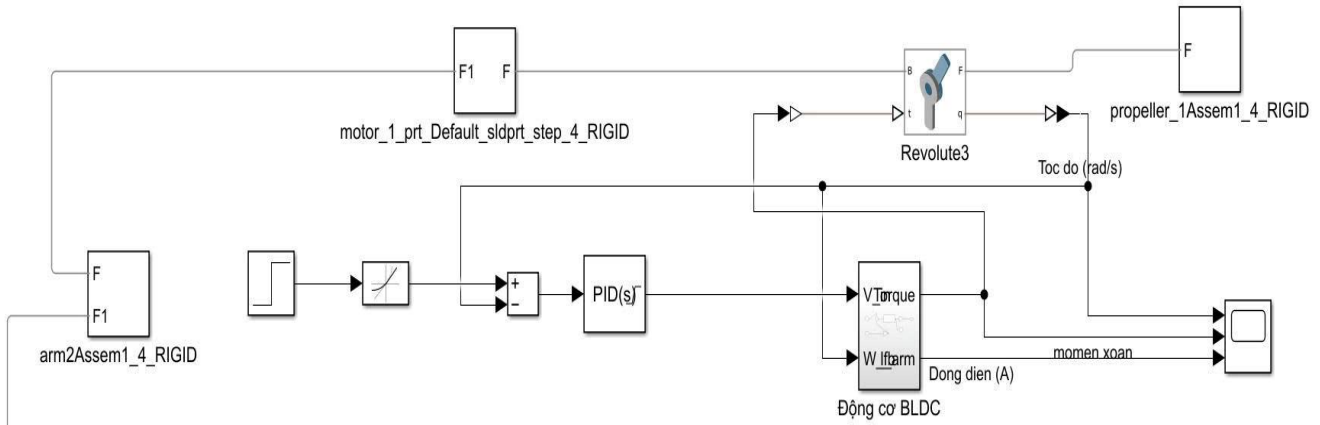
- **base_topAssembly**: thân trên của drone.
- **base_bottom_1Assembly**: thân dưới.
- **arm2Assembly_1** → **arm2Assembly_4**: 4 tay đòn.
- **motor_1_prt...**: các động cơ BLDC.
- **propeller_1Assembly...**: các cánh quạt.
- **leg_1Assembly...**: chân đáp.

Các khối màu xanh được tô đỏ là các khớp:

- Revolute
- Revolute1
- Revolute2
- Revolute3
- Revolute4

- Revolute5
- Prismatic
- Transform

3.4 Khối động cơ



Hình 3.9 khối động cơ

Nguyên lý toán học bên trong khối Subsystem

Khối Subsystem mô phỏng đặc tính điện – cơ của động cơ BLDC thông qua hai ngõ vào chính:

1. **Ngõ vào điện áp điều khiển:** giá trị này được bộ PID tính từ sai số giữa tốc độ đặt và tốc độ thực tế, tạo ra điện áp $V_{control}$. Điện áp này quyết định dòng điện trong cuộn dây Stator theo phương trình:

$$V = I \cdot R + L \frac{dI}{dt} + E_b$$

Trong đó:

- I là dòng điện trong cuộn dây,
- R và L là điện trở và điện cảm của cuộn dây,
- $E_b = k_e \cdot \omega$ là suất điện động phản hồi (Back-EMF), phụ thuộc vào tốc độ quay ω .

2. **Ngõ vào phản hồi vận tốc:** tốc độ thực tế của Rotor, lấy từ khớp Revolute trong mô hình, được dùng để tính Back-EMF. Khi Rotor quay nhanh hơn, Back-EMF lớn hơn, làm giảm dòng điện thực tế và giúp động cơ tự cân bằng.

3. Ngõ ra của khối BLDC

- **Momen xoắn T_e :** được tính theo dòng điện I với $T_e = k_t \cdot I$. Đây là lực cơ học được đưa vào khớp Revolute để làm quay cánh quạt.
- **Dòng điện I :** có thể giám sát để kiểm tra tình trạng khởi động và quá tải của động cơ.

Giai đoạn khởi động

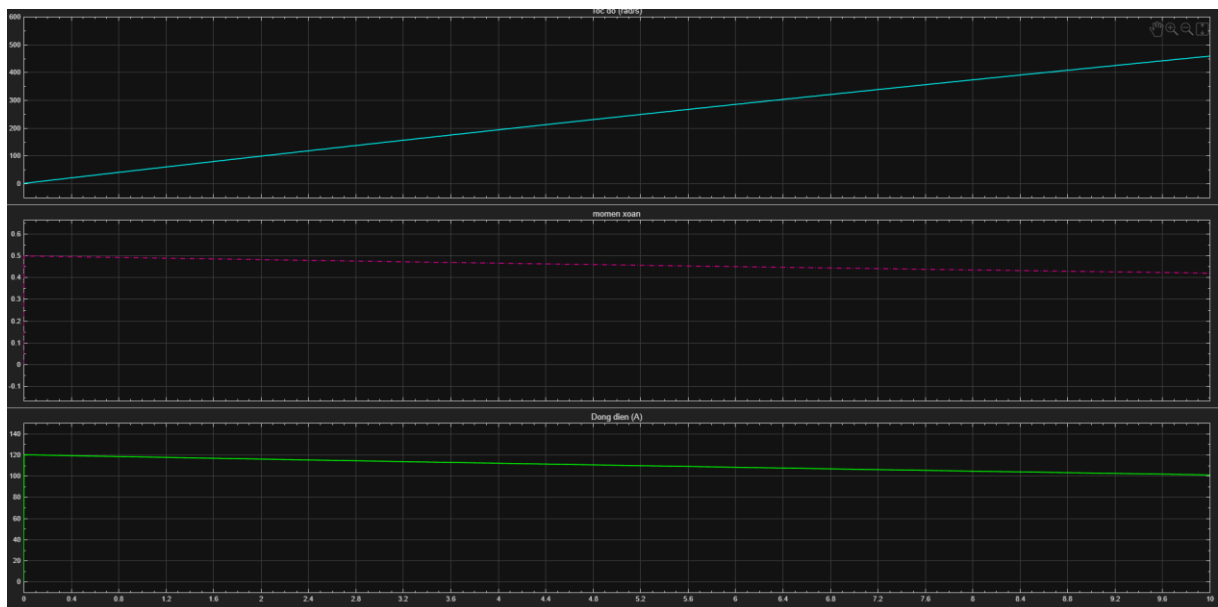
- Khi tốc độ còn thấp, Back-EMF gần bằng 0, dòng điện đạt giá trị lớn nhất.

Khi đạt tốc độ ổn định

- Back-EMF tăng theo tốc độ, làm dòng điện giảm, momen xoắn giảm và đạt trạng thái cân bằng.

4. Vòng điều khiển tốc độ

Bộ PID nhận sai số giữa tốc độ đặt và tốc độ thực tế, tính ra điện áp điều khiển để cấp cho động cơ. Hệ thống có đáp ứng ổn định, không dao động và sai số xác lập nhỏ. Sai số này có thể giảm gần về 0 nếu bổ sung thành phần tích phân vào bộ điều khiển PID.



Hình 4.0 Scoped sơ đồ tín hiệu

Đánh giá kết quả mô phỏng hệ thống truyền động

Dựa trên các đồ thị kết quả thu được từ quá trình mô phỏng MATLAB/Simulink (Hình 4.0), chúng ta có thể đánh giá hiệu năng của hệ thống truyền động BLDC như sau:

- **Đồ thị Tốc độ (rad/s):** Tốc độ động cơ tăng trưởng theo một đường thẳng gần như lý tưởng theo thời gian. Điều này cho thấy hệ thống điều khiển đang duy trì được gia tốc ổn định trong quá trình khởi động, đảm bảo drone có thể đạt đến tốc độ vận hành mong muốn một cách mượt mà mà không gặp hiện tượng vọt lố (overshoot) hay dao động bất thường.
- **Đồ thị Mô-men xoắn (N.m):** Trong giai đoạn khởi động, mô-men xoắn đạt giá trị cực đại để thắng được mô-men quán tính ban đầu của cánh quạt và khung thân. Sau đó, mô-men xoắn giảm dần một cách ổn định khi tốc độ tăng lên. Sự sụt giảm này là hoàn toàn phù hợp với đặc tính cơ của động cơ BLDC, khi sức phản điện động (Back-EMF) tăng tỷ lệ thuận với tốc độ quay, làm giảm dòng điện và mô-men xoắn tương ứng, giúp hệ thống tự cân bằng tại trạng thái xác lập.
- **Đồ thị Dòng điện (A):** Dòng điện khởi động đạt giá trị cao nhất tại thời điểm $t=0$ để tạo momen xoắn cần thiết. Khi tốc độ quay tăng dần, giá trị dòng điện giảm dần theo chiều hướng tuyến tính. Đây là minh chứng cho sự phối hợp nhịp nhàng giữa bộ điều khiển PID và hệ thống truyền động, giúp động cơ hoạt động an toàn, tránh tình trạng quá tải hoặc quá dòng trong quá trình tăng tốc.

Kết luận chung về kết quả mô phỏng: Tổng quan, hệ thống truyền động đã mô phỏng thành công quá trình tăng tốc của drone. Các thông số điện (dòng điện) và cơ (tốc độ, mô-men) có sự liên kết chặt chẽ và nhất quán theo đúng phương trình toán học đã xây dựng ở Chương 2. Kết quả này khẳng định phương án thiết kế hệ thống điều khiển và mô hình hóa của nhóm là chính xác, hoàn toàn đủ điều kiện để tiến tới các bước thực nghiệm thực tế.

3.5. Kết Luận

1. Đánh giá công việc đã thực hiện trong đề án

Trong thời gian thực hiện đề án, nhóm chúng em đã nỗ lực nghiên cứu và cơ bản hoàn thành các mục tiêu, nhiệm vụ đã đặt ra. Cụ thể, đề án đã đạt được những kết quả sau:

- Tổng hợp và trình bày được tổng quan về robot drone vận tải, bao gồm lịch sử phát triển, cấu trúc, nguyên lý hoạt động và các ứng dụng thực tiễn.

- Nghiên cứu chuyên sâu về cấu tạo, nguyên lý hoạt động và xây dựng thành công mô hình toán học của động cơ một chiều không chổi than (BLDC).
- Phân tích và áp dụng phương pháp điều khiển định hướng trường (FOC) kết hợp với bộ điều khiển tỉ lệ tích phân (PI/PID) và kỹ thuật điều chế vector không gian (SVPWM) nhằm điều khiển động cơ BLDC một cách chính xác.
- Xây dựng phương trình động lực học tịnh tiến và quay cho drone, đồng thời khảo sát chi tiết ảnh hưởng của tải trọng đến các đặc tính bay (lực đẩy, mô-men quán tính, tiêu thụ năng lượng).
- Ứng dụng phần mềm SOLIDWORKS để thiết kế mô hình 3D hoàn chỉnh và chi tiết cho cấu trúc cơ khí của quadcopter.
- Xây dựng sơ đồ khối và tiến hành mô phỏng thành công hệ thống trên MATLAB/Simulink (sử dụng Simscape Multibody), thu được đáp ứng tốc độ và mô-men xoắn ổn định, hệ thống tiệm cận tốt giá trị mục tiêu.

2. Những ưu điểm và tồn tại

- **Ưu điểm:**
 - Đồ án có sự gắn kết chặt chẽ giữa cơ sở lý thuyết toán học và ứng dụng phần mềm kỹ thuật hiện đại (SOLIDWORKS, MATLAB).
 - Phân tích rất sát với thực tế ứng dụng của drone vận tải khi đưa yếu tố tải trọng biến thiên vào mô hình động lực học.
 - Cấu trúc điều khiển FOC và PID được xây dựng bài bản, kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống không bị dao động lớn, quỹ đạo đáp ứng trơn tru và thời gian xác lập tốt.
- **Tồn tại:**
 - Các kết quả đạt được hiện tại mới chỉ dừng lại ở nền tảng lý thuyết và mô phỏng trên máy tính, chưa có điều kiện chế tạo nguyên mẫu phần cứng và thử nghiệm bay trong thực tế.
 - Việc sử dụng bộ điều khiển PID kinh điển tuy ổn định trong mô phỏng lý tưởng nhưng có thể gặp khó khăn, chưa đáp ứng được độ

vững chắc khi drone bay trong môi trường thực tế chịu nhiều nhiễu động phi tuyến (gió giật, thay đổi tải trọng đột ngột).

3. Hướng mở của đề tài

Từ những kết quả đạt được và các hạn chế còn tồn tại, nhóm chúng em đề xuất một số hướng phát triển tiếp theo cho đề tài:

- **Chế tạo và thử nghiệm thực tế:** Tiến hành gia công các chi tiết cơ khí từ bản vẽ 3D, tích hợp vi điều khiển (như STM32, Pixhawk), cảm biến IMU, ESC và động cơ thực tế để đánh giá trực tiếp hiệu năng của thuật toán điều khiển FOC.
- **Cải tiến thuật toán điều khiển:** Nghiên cứu áp dụng các bộ điều khiển phi tuyến và hiện đại hơn như Điều khiển mờ (Fuzzy Logic), Điều khiển trượt (SMC), hoặc Điều khiển dự báo mô hình (MPC) để nâng cao khả năng thích nghi và chống nhiễu của drone.
- **Tối ưu hóa vật liệu và cơ khí:** Nghiên cứu sử dụng các vật liệu siêu nhẹ (như sợi Carbon) để tối ưu hóa khối lượng khung vỏ, từ đó tăng thời gian bay và tải trọng hữu ích cho thiết bị.
- **Tích hợp hệ thống thông minh:** Tích hợp thêm cảm biến xử lý ảnh (Camera AI), Lidar để phát triển các tính năng tự động tự hành cấp cao như: nhận diện bãi đáp, tránh vật cản động và quy hoạch quỹ đạo bay tối ưu cho lộ trình giao hàng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] I. Lopez Sanchez and J. Moreno-Valenzuela, “PID control of quadrotor UAVs: A survey,” *Annual Reviews in Control*, vol. 56, 2023. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2023.100900. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578823000640>
- [2] B. Kiss, Á. Ballagi, and M. Kuczmann, “Investigation of System Stability and the Design of a Controller based on the Transfer Function of a Quadcopter’s BLDC Motor,” *Chemical Engineering Transactions*, vol. 114, pp. 751–756, 2024. [Online]. Available: <https://www.cetjournal.it/index.php/cet/article/view/CET24114126>
- [3] F. Goodarzi, D. Lee, and T. Lee, “Geometric Nonlinear PID Control of a Quadrotor UAV on SE(3),” *arXiv preprint arXiv:1304.6765*, 2013. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1304.6765>
- [4] Y. Hua, “A Review on the Application of PD and PID Controllers in UAV Attitude and Altitude Control,” *Academic Journal of Science and Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 119–125, 2025. [Online]. Available: <https://drpress.org/ojs/index.php/ajst/article/view/34133>
- [5] “Drone Motor Control using Fractional-Order PID Controller,” *IEEE Xplore*. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10171276>
- [6] “The fuzzy-PID control of brushless DC motor,” *IEEE Xplore*. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7558775/>