

**ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI**  
**TRƯỜNG ĐIỆN – ĐIỆN TỬ**  
**KHOA TỰ ĐỘNG HÓA**



**ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP**

**THIẾT KẾ ĐIỀU KHIỂN VECTOR CHO ĐỘNG  
CƠ BƯỚC 2 PHA**

**NGUYỄN ĐỨC TRƯỜNG**  
truong.nd181803@sis.hust.edu.vn

**Giảng viên hướng dẫn:**

TS. Nguyễn Mạnh Linh

\_\_\_\_\_  
Chữ ký của GVHD

**Khoa:**

Tự động hóa

**Trường:**

Điện – Điện tử

**HÀ NỘI, 3/2023**

**NHIỆM VỤ**  
**ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP**

Họ và tên sinh viên: Nguyễn Đức Trường

Khóa: K63

Trường: Điện- Điện tử

Ngành: KT ĐK & TĐH

1. *Tên đề tài:*

*Thiết kế điều khiển Vector cho động cơ bước 2 pha*

2. *Nội dung đề tài:*

Trong đồ án này nhóm chúng em thiết kế điều khiển véc tơ động cơ bước hai pha, điều khiển véc tơ dòng điện/mô-men xoắn cực đại sau khi phân tích và mô hình toán học động cơ bước lai hai pha, điều khiển dòng điện của cuộn dây stato. Đồng thời nhóm cũng điều chế độ rộng xung vector điện áp không gian. Cuối cùng, thực hiện mô phỏng hệ thống điều khiển vòng kín kép của động cơ và đưa ra kết quả mô phỏng.

3. *Thời gian giao đề tài:* 2/11/2022

4. *Thời gian hoàn thành:* 20/2/2023

Ngày..... tháng ..... năm 2023

**CÁN BỘ HƯỚNG DẪN**

## Lời cảm ơn

Sau một thời gian học tập và nghiên cứu, em đã cố gắng để hoàn thành đồ án tốt nghiệp của mình. Để có thể hoàn thành đồ án này, trước tiên em xin chân thành cảm ơn thầy giáo TS. Nguyễn Mạnh Linh, các thầy cô trong bộ môn và toàn bộ thành viên trong Lab WSR đã nhiệt tình giúp đỡ em trong toàn bộ quá trình em thực hiện đồ án, tuy nhiên vì kiến thức chuyên môn còn hạn chế và bản thân còn thiếu nhiều kinh nghiệm thực tiễn nên nội dung của đồ án không tránh khỏi những thiếu sót, em rất mong nhận sự góp ý, chỉ bảo thêm của quý thầy/cô giúp cho đề tài được hoàn thiện hơn.

Em xin chân thành cảm ơn!

## Tóm tắt nội dung đồ án

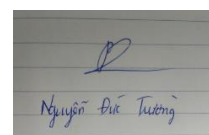
Động cơ bước hỗn hợp là động cơ bước phổ biến nhất cho ứng dụng công nghiệp, lần đầu tiên nó được thiết kế dưới dạng động cơ đồng bộ PM tốc độ thấp và nó dựa trên nguyên tắc nam châm vĩnh cửu và từ trở thay đổi, vì vậy hiệu suất tổng thể của nó tốt hơn nhiều so với các động cơ bước khác. Khi độ chính xác gia công ngày càng yêu cầu cao hơn, điều khiển vòng hở truyền thống đang hạn chế thiết bị của động cơ bước hỗn hợp hai pha, vì vậy nghiên cứu về vòng kín là cần thiết. Về cơ bản điều khiển véc tơ động cơ đồng bộ PM và động cơ xoay chiều, nhóm chúng em đưa ra điều khiển véc tơ trên động cơ bước lai. Sau khi phân tích và mô hình toán học của động cơ bước lai hai pha trên hệ tọa độ tĩnh và hệ tọa độ quay, đồ án thiết kế điều khiển vector mô-men xoắn/dòng điện cực đại để thực hiện điều khiển vector của động cơ bước lai hai pha [1]. Điều này có thể tận dụng tốt hơn dòng điện cuộn dây stato và giảm công suất của biến tần, đồng thời tăng hệ số sử dụng công suất nên rất có ứng dụng thực tiễn.

Chính vì lý do đó, em đã thực hiện đề tài: “ *Thiết kế điều khiển Vector cho động cơ bước 2 pha*”. Đồ án tốt nghiệp dưới sự hướng dẫn của thầy giáo TS. Nguyễn Mạnh Linh. Nội dung đồ án được chia làm 5 chương, bao gồm:

- Chương 1: Giới thiệu chung về động cơ bước
- Chương 2: Điều khiển vòng hở động cơ bước
- Chương 3: Điều khiển vector cho động cơ bước
- Chương 4: Các kết quả mô phỏng và đánh giá
- Chương 5: Kết luận và hướng phát triển

Sinh viên thực hiện

Ký và ghi rõ họ tên



Nguyễn Đức Tường

# MỤC LỤC

<b>CHƯƠNG 1. GIỚI THIỆU CHUNG VỀ ĐỘNG CƠ BƯỚC.....</b>	<b>1</b>
1.1 Cấu tạo và nguyên lý hoạt động .....	1
1.1.1 Cấu tạo động cơ bước.....	1
1.1.2 Nguyên lý hoạt động của động cơ bước.....	3
1.2 Phân loại động cơ bước.....	5
1.2.1 Động cơ bước nam châm vĩnh cửu .....	5
1.2.2 Động cơ bước biến từ trở.....	7
1.2.3 Động cơ bước hỗn hợp .....	8
1.2.4 Động cơ bước 2 pha .....	9
1.3 Đặc tính cơ của động cơ bước.....	9
1.4 Các bộ biến đổi điều khiển động cơ bước.....	11
1.4.1 Các loại bộ điều khiển (lái) động cơ bước .....	12
1.4.2 Động cơ đơn cực/lưỡng cực .....	13
<b>CHƯƠNG 2. ĐIỀU KHIỂN VÒNG HỞ ĐỘNG CƠ BƯỚC.....</b>	<b>16</b>
2.1 Điều khiển bước đủ (Full-step) .....	16
2.2 Điều khiển nửa bước (Half-step).....	17
2.3 Điều khiển vi bước (Microstep) .....	19
<b>CHƯƠNG 3. ĐIỀU KHIỂN VECTOR CHO ĐỘNG CƠ BƯỚC .....</b>	<b>22</b>
3.1 Mô hình hóa động cơ trên hệ tọa độ tĩnh .....	22
3.2 Mô hình hóa trên trục tọa độ quay.....	24
3.3 Kỹ thuật điều chế vector không gian cho động cơ bước .....	25
3.4 Cấu trúc điều khiển tựa từ thông rotor (FOC).....	29
3.5 Thiết kế các mạch vòng điều khiển .....	30
3.5.1 Cấu trúc bộ điều khiển PI.....	30
3.5.2 Tính toán thông số bộ điều khiển PI .....	33
<b>CHƯƠNG 4. CÁC KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ.....</b>	<b>35</b>
4.1 Mô phỏng động cơ.....	35

4.2	Mô phỏng khâu điều chế vector không gian cho động cơ bước .....	35
4.3	Kết quả mô phỏng SVPWM .....	38
4.4	Mô phỏng điều khiển tốc độ cho động cơ bước .....	39
4.4.1	<i>Kịch bản Mô men tải thay đổi</i> .....	43
4.4.2	<i>Kịch bản tốc độ thay đổi</i> .....	45
4.4.3	<i>Kịch bản mạch vòng điều khiển vị trí:</i> .....	47
<b>CHƯƠNG 5. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN .....</b>		<b>51</b>
5.1	Kết luận .....	51
5.2	Hướng phát triển trong tương lai .....	51
<b>TÀI LIỆU THAM KHẢO .....</b>		<b>52</b>

## DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1 Hình ảnh động cơ bước trong thực tế .....	1
Hình 1.2 Cấu tạo động cơ bước .....	2
Hình 1.3 Động cơ bước làm việc nhờ vào hoạt động của các bộ chuyển mạch điện tử.....	3
Hình 1.4 Ứng dụng động cơ bước trong ngành tự động hóa.....	4
Hình 1.5 Cấu tạo động cơ bước nam châm vĩnh cửu.....	5
Hình 1.6 Nguyên lý hoạt động của động cơ bước nam châm vĩnh cửu.....	6
Hình 1.7 Nguyên lý hoạt động của động cơ bước biến từ trở.....	7
Hình 1.8 Cấu tạo động cơ bước hỗn hợp.....	8
Hình 1.9 Động cơ bước hai pha lưỡng cực và đơn cực.....	9
Hình 1.10 Đặc tính momen xoắn – tốc độ.....	10
Hình 1.11 Đặc tính cơ của động cơ bước .....	11
Hình 1.12 Sơ đồ điều khiển động cơ bước .....	12
Hình 1.13 Hướng của từ trường do chính cuộn dây tạo ra.....	13
Hình 1.14 Mạch lái động cơ bước đơn cực .....	14
Hình 1.15 Mạch điều khiển động cơ bước lưỡng cực.....	15
Hình 2.1 Các bước khác nhau của điều khiển bước đủ.....	16
Hình 2.2 Đường cong momen xoắn tĩnh cho động cơ bước biến từ trở 30/bước .....	17
Hình 2.3 Chế độ nửa bước.....	17
Hình 2.4 Đường cong momen xoắn tĩnh (đường dày) tương ứng với kích thích hai pha .....	19
Hình 2.5 Điều khiển vi bước.....	20
Hình 3.1 Động cơ và các thông số của động cơ .....	23
Hình 3.2 Hệ tọa độ quay d,q .....	24
Hình 3.3 Mô hình hóa động cơ bước trong hệ tọa độ quay.[4] .....	25
Hình 3.4 Cấu trúc mạch cầu H đôi.....	26
Hình 3.5 Sơ đồ vector điện áp.....	26
Hình 3.6 Dạng sóng thuật toán SVPWM trong từng sector .....	28
Hình 3.7 Cấu trúc điều khiển FOC.....	30
Hình 3.8 Cấu trúc điều khiển PI cho mạch vòng dòng điện.....	32
Hình 4.1 Khâu xác định sector.....	36
Hình 4.2 Khâu tính toán $T_1, T_2, T_0$ và $T_5$ .....	36
Hình 4.3 Khâu tính toán thời gian mở van của từng nhánh .....	37
Hình 4.4 Điều chế tín hiệu mở van cho từng nhánh .....	37

Hình 4.5 Cấu trúc mạch lực .....	38
Hình 4.6 Mô phỏng SVPWM .....	38
Hình 4.7 Thời gian hoạt động của các trạng thái và sector theo thời gian.....	39
Hình 4.8 Điện áp và dòng điện pha stato thu được .....	39
Hình 4.9 Mô phỏng điều khiển tốc độ cho động cơ bước lai .....	41
Hình 4.10 Dòng điện và điện áp pha stato sau điều khiển .....	42
Hình 4.11 Mạch vòng điều khiển tốc độ .....	42
Hình 4.12 Mạch vòng điều khiển dòng $I_q$ .....	42
Hình 4.13 Mạch vòng điều khiển dòng $I_d$ .....	43
Hình 4.14 Mô men tải thay đổi theo thời gian.....	43
Hình 4.15 Tốc độ của roto .....	44
Hình 4.16 Dòng $I_q$ .....	44
Hình 4.17 Dòng $I_d$ .....	45
Hình 4.18 Tốc độ thay đổi theo thời gian.....	45
Hình 4.19 Tốc độ thu được sau điều khiển.....	46
Hình 4.20 Dòng $I_q$ .....	46
Hình 4.21 Dòng $I_d$ .....	47
Hình 4.22 Mô men xoắn động cơ.....	47
Hình 4.23 Mô phỏng điều khiển vị trí.....	48
Hình 4.24 Kết quả đáp ứng điều khiển vị trí .....	49
Hình 4.25 Kết quả đáp ứng mạch vòng tốc độ .....	49
Hình 4.26 Kết quả đáp ứng mạch vòng tốc độ .....	50
Hình 4.27 Kết quả điện áp và dòng pha stato .....	50

## DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1 Các thông số cơ bản của động cơ.....	2
Bảng 1.2 Thông số kỹ thuật của động cơ bước đồng bộ lai .....	10
Bảng 3.1 Giá trị thời gian hoạt động của từng sector .....	27
Bảng 3.2 Thời gian mở van của các nhánh. Với $m_a, m_b, m_c, m_d$ lần lượt là thời gian mở của van A, van B, van C, van D .....	28
Bảng 4.1 Giá trị các thông số của động cơ.....	35
Bảng 4.2 Giá trị các thông số mô phỏng SVPWM .....	38



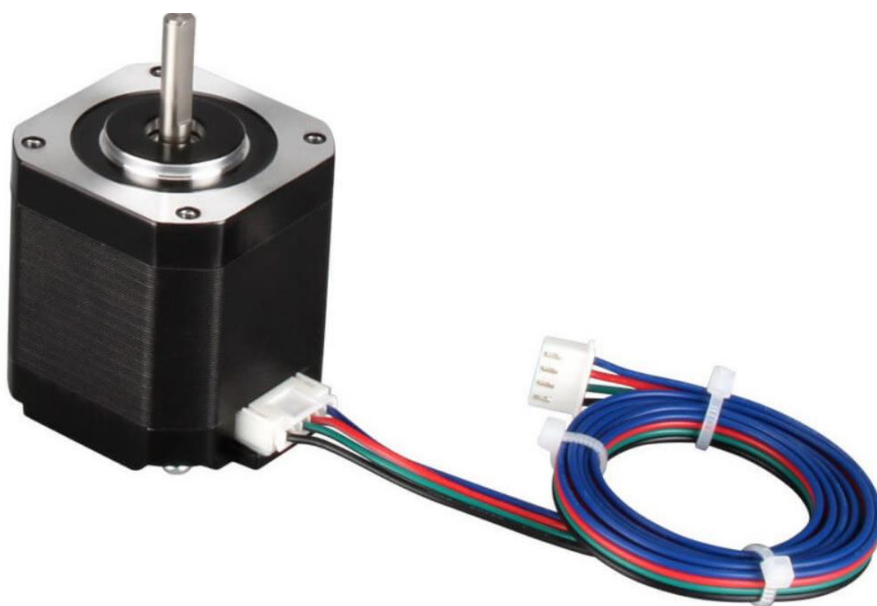
## CHƯƠNG 1. GIỚI THIỆU CHUNG VỀ ĐỘNG CƠ BƯỚC

### 1.1 Cấu tạo và nguyên lý hoạt động

#### 1.1.1 Cấu tạo động cơ bước

Động cơ bước là một loại động cơ sử dụng điện nhưng có nguyên lý và ứng dụng vô cùng khác biệt so với các loại động cơ điện thông thường.

Thực chất, đây là một loại động cơ đồng bộ, có khả năng biến đổi các tín hiệu điều khiển của máy móc dưới dạng các xung điện rời rạc được phát ra kế tiếp nhau, tạo thành các chuyển động góc quay. Đôi khi chính là các chuyển động của rôto, giúp cho người dùng cố định roto của máy vào trong các vị trí cần thiết.



Hình 1.1 Hình ảnh động cơ bước trong thực tế

Nói chung, động cơ bước (*motor bước*) là một loại động cơ mà ta có thể quy định được tần số góc quay của nó. Nếu góc bước của nó càng nhỏ thì số bước trên mỗi vòng quay của động cơ càng lớn và độ chính xác của vị trí chúng ta thu được càng lớn [2].

Các góc bước của động cơ có thể đạt cực đại là 90 độ và cực tiểu đến 0,72 độ. Tuy nhiên, các góc bước của động cơ thường được sử dụng phổ biến nhất là góc 1,8 độ, góc 2,5 độ, góc 7,5 độ và góc 15 độ [2].

Ví dụ: Một động cơ bước có góc 1,8 độ/ bước nếu quay hết 1 vòng khoảng 360 độ thì mất 200 bước (thuật ngữ chuyên ngành gọi là Full Step). Các chế độ quay càng nhiều xung thì động cơ quay của máy sẽ càng êm hơn. Ở Việt Nam, người ta hay dùng phổ biến nhất là động cơ 200 step.

Về cấu tạo động cơ bước gồm có các bộ phận là stato, roto là nam châm vĩnh cửu hoặc trong trường hợp của động cơ biến từ trở là những khối răng làm bằng vật liệu nhẹ có từ tính. Động cơ bước được điều khiển bởi bộ điều khiển bên ngoài. Động cơ bước và bộ điều khiển được thiết kế sao cho động cơ có thể giữ nguyên bất kỳ vị trí cố định nào cũng như quay đến một vị trí bất kỳ nào.

Động cơ bước có thể sử dụng trong hệ thống điều khiển vòng hở đơn giản, hoặc vòng kín, tuy nhiên khi sử dụng động cơ bước trong hệ điều khiển vòng hở khi quá tải, tất cả các giá trị của động cơ đều bị mất và hệ thống cần nhận diện lại.

**Phần rotor** được cấu tạo từ nam châm với 2 điện cực bắc và nam và có hình dạng như các bánh răng. Nếu khó hình dung thì ta hãy tưởng tượng với hai bàn tay của mình, tay trái là cực bắc và tay phải là cực nam. Khi đặt hai bàn tay chồng lên nhau và xen kẽ các ngón tay với nhau ta được phần rotor của động cơ bước.

**Phần stator** của động cơ bước được cấu tạo từ các cuộn dây điện, trong ví dụ này sẽ là 4 cuộn dây điện hoạt động theo cặp và có thể đồng thời bật tắt tạo ra từ trường trái dấu theo cặp. Và chúng hoạt động cùng nhau để tạo ra chiều quay cho động cơ bước. Góc quay còn phụ thuộc vào số bánh răng trên rotor và số cuộn nam châm điện ở phần stator [3].



Hình 1.2 Cấu tạo động cơ bước

Thông thường, mỗi *motor step* có một bộ phận quan trọng nhất, nếu bạn hỏi *mua động cơ bước* thì chắc chắn phải hỏi đầu tiên. Đó là, động cơ bước thường có bao nhiêu step. Theo như thông tin từ nhà sản xuất, động cơ bước trên thị trường Việt Nam hiện nay đang được giới DIY tin dùng có số step là 200.

Bảng 1.1 Các thông số cơ bản của động cơ

Rate Current/phase (dòng tiêu thụ tối đa của mỗi pha)	2.0 A
Phase Resistance (điện trở của từng pha)	1.4 $\Omega$

Trong đó, tham số Rated Current/ phase sẽ thể hiện cho ta biết dòng điện tối đa mà mỗi pha của động cơ có thể nhận được. Nếu driver điều khiển nào có dòng điện mỗi pha cao hơn thông số nêu trên thì sẽ hỏng. Do đó, ta nên lựa loại driver cho dòng điện chạy ra xấp xỉ 80 – 90% thông số trên đây [1].

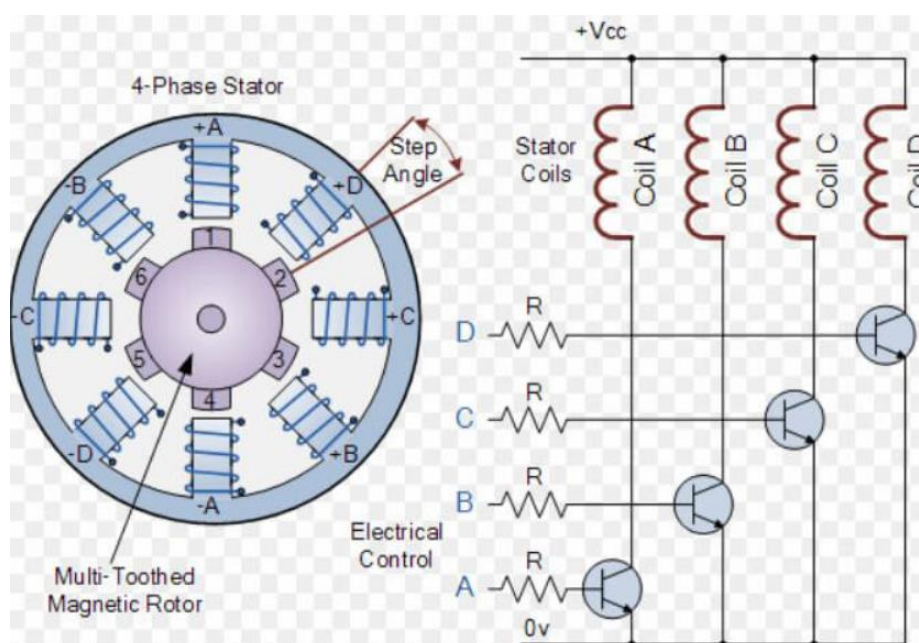
Điện trở mỗi pha được xem là hằng số (ta có thể xem trong datasheet của động cơ bước mà mình đã mua). Còn con số voltage được xem là hiệu điện thế tối ưu để làm cho các stepper có thể hoạt động ổn định ( $2.0 * 1.4 = 2.8V$ )

### 1.1.2 Nguyên lý hoạt động của động cơ bước

*Nguyên lý hoạt động động cơ bước* không quay theo các cơ chế thông thường, bởi vì Step motor quay theo từng bước một, cho nên nó có một độ chính xác cao, đặc biệt là về mặt điều khiển học.

Động cơ motor bước làm việc nhờ vào hoạt động của các bộ chuyển mạch điện tử. Các mạch điện tử này sẽ đưa các tín hiệu của lệnh điều khiển chạy vào stato theo số thứ tự lần lượt và một tần số nhất định.

Tổng số góc quay của từng con rotor tương ứng với số lần mà động cơ được chuyển mạch. Đồng thời, chiều quay và tốc độ quay của con rotor còn phụ thuộc vào số thứ tự chuyển đổi cũng như tần số chuyển đổi của nó.



Hình 1.3 Động cơ bước làm việc nhờ vào hoạt động của các bộ chuyển mạch điện tử

Động cơ bước hiện nay đã và đang được ứng dụng rất nhiều và ngày càng phổ biến, chủ yếu là trong điều khiển chuyển động kỹ thuật số của các động cơ. Nó được thực hiện bởi các lệnh đã được mã hoá tự động dưới dạng số.

*Ứng dụng động cơ bước* trong ngành công nghiệp tự động hoá, đặc biệt là đối với các thiết bị máy móc cần phải có sự chính xác. Chẳng hạn như các loại máy móc công nghiệp hiện đại, giúp phục vụ cho quá trình gia công cơ khí như: Máy cắt công nghệ plasma CNC, máy cắt công nghệ CNC laser,...



*Hình 1.4 Ứng dụng động cơ bước trong ngành tự động hóa*

Ngoài ra, trong lĩnh vực công nghệ máy tính, động cơ bước Step cũng được sử dụng trong các loại ổ đĩa cứng hoặc ổ đĩa mềm, thậm chí là cả máy in,...

Trong lĩnh vực an ninh bảo mật, động cơ bước chính là một sản phẩm giám sát mới, đem lại tiến bộ vượt trội cho ngành an ninh.

Trong lĩnh vực y tế, động cơ bước được sử dụng để sản xuất máy quét y tế, máy lấy mẫu, thậm chí còn có bên trong máy chụp ảnh nha khoa kỹ thuật số, những chiếc bơm chất lỏng, mặt nạ phòng độc và các loại máy móc phân tích mẫu máu.

Trong lĩnh vực điện tử tiêu dùng, động cơ bước được dùng trong quá trình chế tạo máy ảnh, đem lại chức năng lấy nét chính xác và sắc sảo cho máy ảnh, đồng thời có chức năng thu phóng các loại camera kỹ thuật số tự động hay các loại máy in 3D.

Nắm được những ưu – nhược điểm của động cơ bước sẽ giúp cho chúng ta ứng dụng loại động cơ này vào trong sản xuất một cách tốt nhất, đem lại giá trị kinh tế cao. Vậy, ưu – nhược điểm của động cơ bước hiện nay:

Ưu điểm của động cơ bước đó là:

- Step Motor có ưu điểm đầu tiên là khả năng cung cấp mô men xoắn cực lớn, đặc biệt là ở dải vận tốc thấp và vận tốc trung bình.
- Một “điểm cộng” nữa của động cơ bước trên thị trường hiện nay đó là nó khá bền, giá thành sản phẩm cũng tương đối thấp, do đó việc mua bán, trao đổi cũng khá thuận tiện, không gặp bất kỳ một trở ngại nào.

Không chỉ có vậy, việc thay thế động cơ bước trong quá trình sản xuất cũng tương đối dễ dàng.

Nhược điểm của động cơ bước:

- *Motor Step* hay xảy ra các hiện tượng khó chịu, chẳng hạn như bị trượt bước. Lý do được biết đến đó là vì lực từ yếu hay đôi khi còn do nguồn điện cấp vào động cơ không đủ.
- Một “điểm trừ” nữa đó là trong quá trình hoạt động, động cơ Step Motor thường gây ra tiếng ồn ào khó chịu và có hiện tượng động cơ bị nóng dần lên. Với những động cơ Step Motor thế hệ mới thì độ ồn và hiện tượng nóng của động cơ đã được giảm đi đáng kể.
- Không nên sử dụng động cơ Step Motor cho các thiết bị máy móc đòi hỏi tốc độ cao.

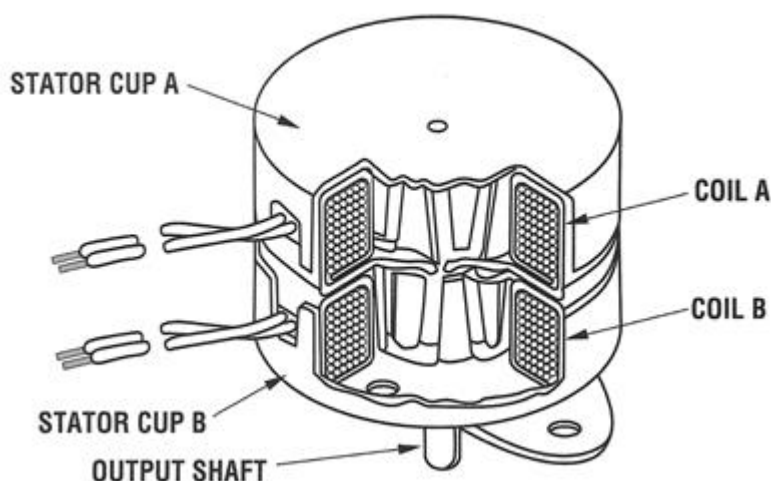
## 1.2 Phân loại động cơ bước

Động cơ bước được chia thành 3 loại chính là:

- Động cơ bước biến từ trở.
- Động cơ bước nam châm vĩnh cửu
- Động cơ bước hỗn hợp/lai.

### 1.2.1 Động cơ bước nam châm vĩnh cửu

Động cơ bước nam châm vĩnh cửu có roto là nam châm vĩnh cửu, stato có nhiều răng trên mỗi răng có quấn các vòng dây. Các cuộn dây pha có cực tính khác nhau.

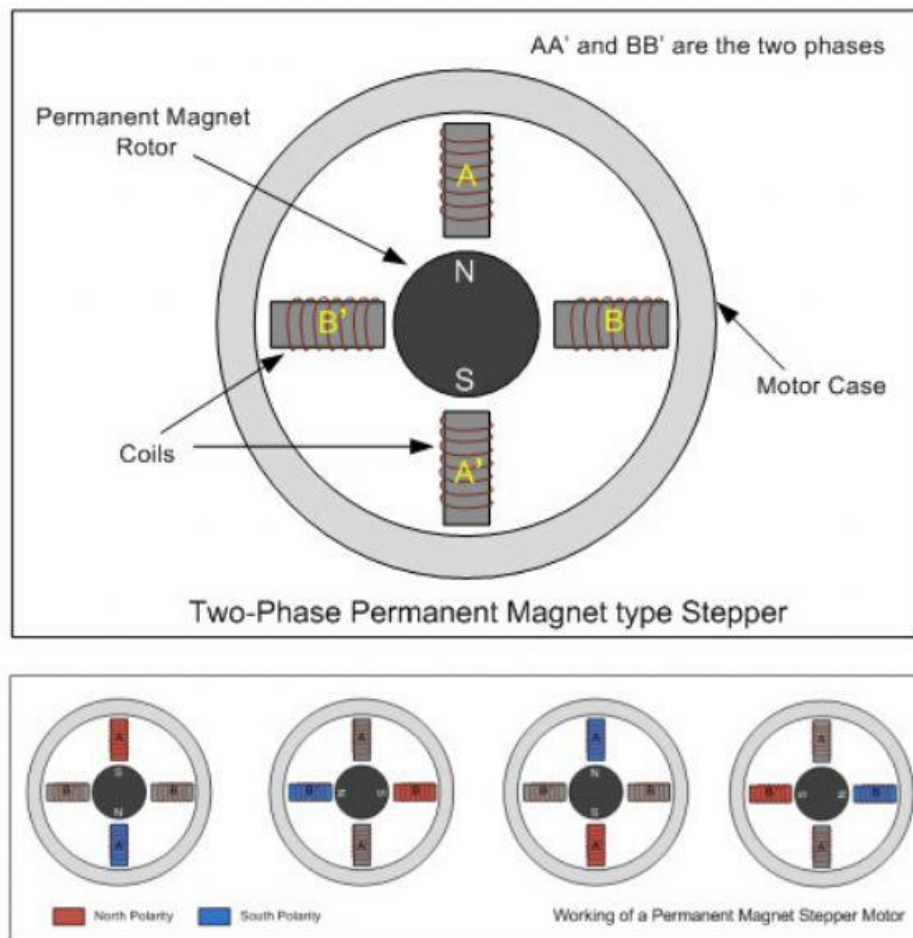


Hình 1.5 Cấu tạo động cơ bước nam châm vĩnh cửu

Nguyên lý hoạt động của động cơ bước nam châm vĩnh cửu có 2 cặp cuộn dây được trình bày ở hình: Ban đầu vị trí của stato và roto đang ở phase A. Khi cấp điện cho 2 cuộn dây pha B và D trong 2 cuộn sẽ xuất hiện cực tính. Do cực tính của cuộn dây pha và roto ngược nhau dẫn đến roto chuyển động đến vị trí như hình phase B on. Khi cuộn dây pha B và D ngắt điện cuộn dây A và B được cấp điện thì roto lại chuyển động đến vị trí như hình phase C on [4].



Nếu pha A được cấp nguồn với dòng điện âm đối với A', thì sự hình thành các cực của stato làm cho rôto di chuyển qua 90 độ khác theo chiều kim đồng hồ. Theo cách tương tự, nếu pha B bị kích với dòng âm bằng cách đóng công tắc pha A, rôto quay qua 90 độ khác theo cùng một hướng. Tiếp theo, nếu pha A được kích thích với dòng điện dương, rôto đến vị trí ban đầu, do đó tạo ra một vòng quay hoàn chỉnh 360 độ. Điều này cho thấy, bất cứ khi nào stato bị kích thích, rôto có xu hướng xoay qua 90 độ theo chiều kim đồng hồ



Hình 1.6 Nguyên lý hoạt động của động cơ bước nam châm vĩnh cửu

Gọi số răng trên stato là  $Z_s$ , góc bước của động cơ là  $S_{đc}$ , góc bước của động cơ này được tính theo công thức sau:

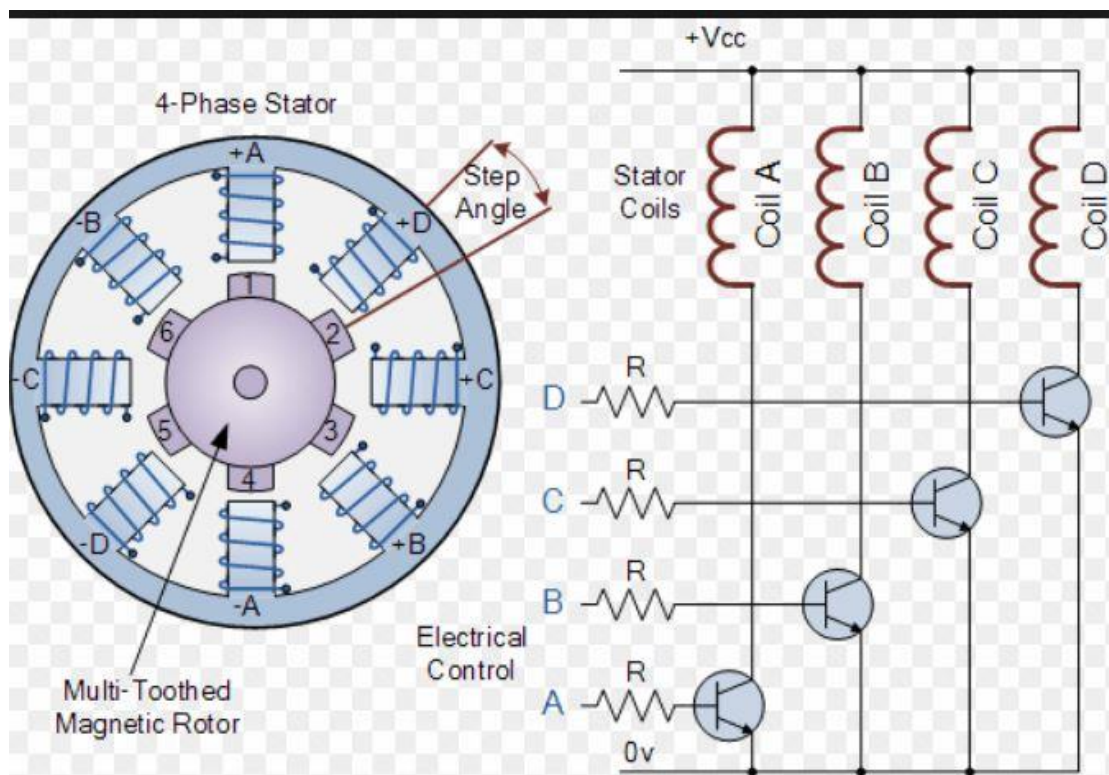
$$S_{dc} = \frac{360}{Z_s} \quad (1.1)$$

### 1.2.2 Động cơ bước biến từ trở

Động cơ bước biến từ trở có cấu tạo giống với động cơ bước nam châm vĩnh cửu. Cấu tạo của stato cũng có các cuộn pha đối xứng nhau, nhưng các cuộn pha đối xứng có cùng cực tính khác với động cơ bước nam châm vĩnh cửu. Góc bước của stato là  $S_s$ .

Roto của động cơ bước biến từ trở được cấu tạo từ thép non có khả năng dẫn từ cao, do đó khi động cơ mất điện roto vẫn tiếp tục quay tự do rồi mới dừng hẳn.

Nguyên lý hoạt động của động cơ bước biến từ được thể hiện như hình:



Hình 1.7 Nguyên lý hoạt động của động cơ bước biến từ trở

Khi cấp điện cho pha A (hình a), từng cặp cuộn dây A bố trí đối xứng nhau có cùng cực tính là nam (S) và bắc (N). Lúc này các cuộn dây hình thành các vòng từ đối xứng.

Khi cấp điện cho pha B (hình b). Lúc này từ trở trong động cơ lớn, momen từ tác động lên trục roto làm cho roto quay theo chiều giảm từ trở. Roto quay cho tới khi từ trở nhỏ nhất và khi momen bằng không thì trục động cơ dừng, roto đạt đến vị trí cân bằng mới [5].

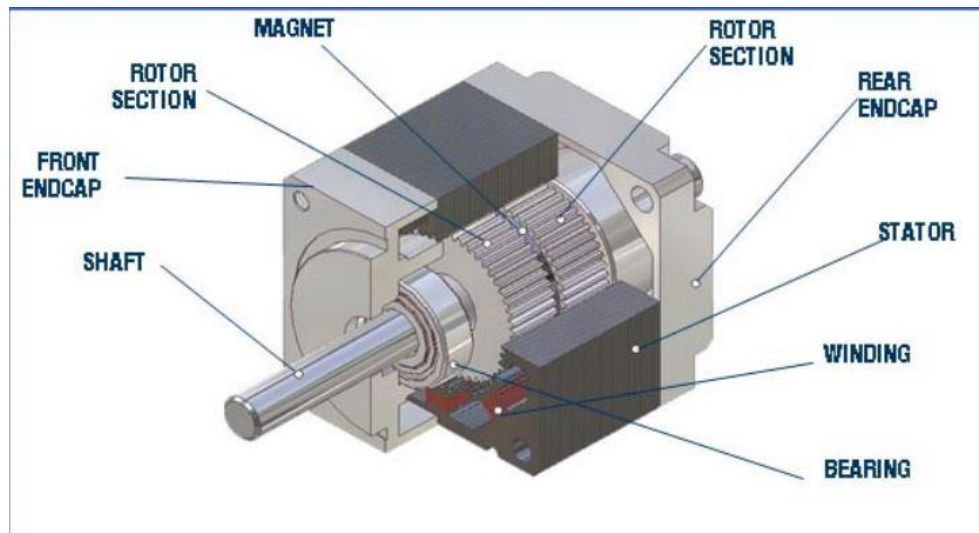
Tương tự như vật khi cấp điện cho pha C, động cơ hoạt động theo nguyên tắc trên và roto ở vị trí như hình c. Quá trình trên lặp lại và động cơ quay liên tục theo thứ tự pha A, B, C. Để động cơ quay ngược chiều chỉ cần cấp điện cho các pha theo thứ tự ngược lại.

Gọi số pha của động cơ là  $N_p$ , ở răng trên roto là  $Z_r$ , góc bước của động cơ bước biến từ trở là  $S$  ta tính được công thức sau:

$$S = \frac{360}{N_p \cdot Z_r} \quad (1.2)$$

### 1.2.3 Động cơ bước hỗn hợp

Động cơ bước hỗn hợp (còn gọi là động cơ bước lai) có đặc trưng cấu trúc của động cơ bước nam châm vĩnh cửu và động cơ bước biến từ trở nhưng số răng của stato và roto không bằng nhau. Roto của động cơ bước thường có 2 phần: phần trong là nam châm vĩnh cửu được gắn chặt lên trục động cơ, phần ngoài là 2 đoạn roto được chế tạo từ lá thép non và răng của 2 đoạn roto được đặt lệch nhau.



Hình 1.8 Cấu tạo động cơ bước hỗn hợp

Góc bước của động cơ bước hỗn hợp được tính theo công thức:

$$S = \frac{S_r}{Z_s} \quad (1.3)$$

Trong đó:

- $S$  là góc bước của động cơ
- $S_r$  là góc giữa 2 răng kề nhau
- $Z_s$  là số cặp cực trên stato.

Động cơ bước hỗn hợp được sử dụng rộng rãi vì kết hợp các ưu điểm của 2 loại động cơ trên là động cơ bước nam châm vĩnh cửu và động cơ bước biến từ trở.

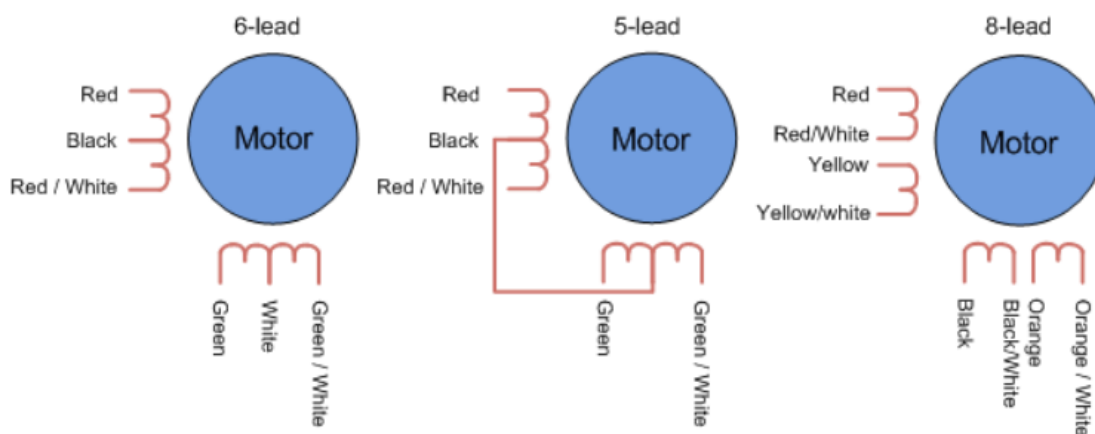


### 1.2.4 Động cơ bước 2 pha

Các động cơ bước được thảo luận ở trên có thể là đơn cực hoặc lưỡng cực dựa trên sự sắp xếp cuộn dây. Một động cơ bước đơn cực được sử dụng với hai cuộn dây mỗi pha và do đó hướng của dòng chảy qua các cuộn dây này làm thay đổi vòng quay của động cơ. Trong cấu tạo này, dòng điện đi qua một hướng trong một cuộn dây và ngược chiều trong một cuộn dây khác.

Động cơ bước đơn cực: cuộn dây pha có ba dây đầu ra. Điểm trung tâm của cuộn dây được đấu ra ngoài. Khi cấp điện, dây trung tâm được nối với đầu dương của nguồn điện, hai đầu dây còn lại được nối với đầu âm [2].

Động cơ bước lưỡng cực: cuộn dây pha của loại động cơ này chỉ có 2 đầu ra. Một đầu dây được nối với nguồn dương và đầu còn lại được nối với đầu âm của nguồn điện. Động cơ bước lưỡng cực có kết cấu đơn giản nhưng điều khiển phức tạp hơn động cơ bước đơn cực.



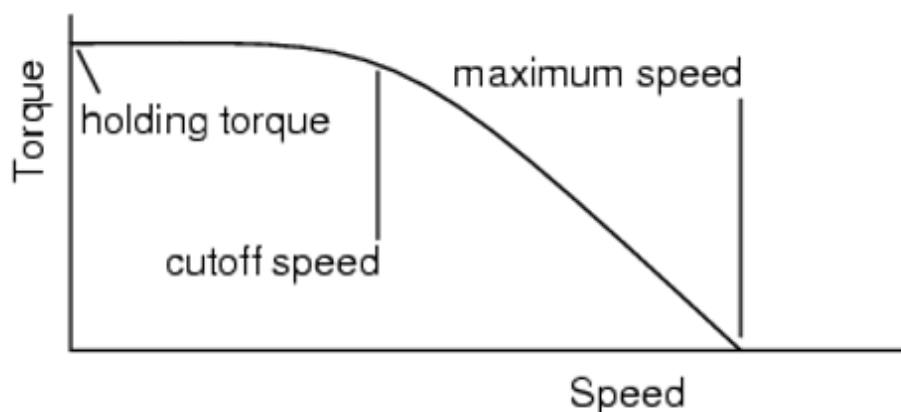
Hình 1.9 Động cơ bước hai pha lưỡng cực và đơn cực

### 1.3 Đặc tính cơ của động cơ bước

Đặc tính tốc độ – momen được xác định bởi động cơ và bộ điều khiển. Đặc tính này bị ảnh hưởng rất nhiều bởi loại điều khiển được sử dụng. Trong đó, momen giữ lớn nhất là momen xoắn cần thiết để động cơ chuyển động hết một bước khi các cuộn dây được cấp điện trong điều kiện động cơ không quay.

Vì động cơ bước không nhất thiết phải quay liên tục nên không có định mức công suất. Chúng là những thiết bị nhỏ có công suất thấp so với các động cơ khác. Xếp hạng mô-men xoắn có thể đạt tới hàng chục Nm. Hầu hết các bước có đường kính vài cm với mô-men xoắn 1 Nm [1].

Đặc tính này cho biết tần số khởi động cho phép sẽ giảm khi tải quán tính tăng. Các giá trị này thay đổi theo tốc độ xung, nhưng động cơ không thể tuân theo tốc độ xung vượt quá một điểm nhất định, vì nếu điều đó xảy ra sẽ dẫn đến hiện tượng sai bước. Tần số bắt đầu lớn nhất là tốc độ xung lớn nhất mà tại đó, động cơ có thể quay hoặc dừng lập tức khi ma sát và tải quán tính của động cơ bằng không. Tần số này sẽ giảm khi tải quán tính được thêm vào động cơ.



Hình 1.10 Đặc tính momen xoắn – tốc độ

Mô-men xoắn khả dụng là một chức năng của tốc độ động cơ như được minh họa trên đường cong tốc độ so với mô-men xoắn. Một bước giữ, được cung cấp năng lượng có định mức mô-men xoắn giữ tương đối cao. Có ít mô-men xoắn hơn cho động cơ đang chạy, giảm dần về 0 ở một số tốc độ cao. Mô-men xoắn giữ được xác định bởi giới hạn nhiệt của cuộn dây stato. Tốc độ cắt và tốc độ tối đa được xác định bởi thiết kế điện từ của động cơ [5].

Bảng 1.2 Thông số kỹ thuật của động cơ bước đồng bộ lai

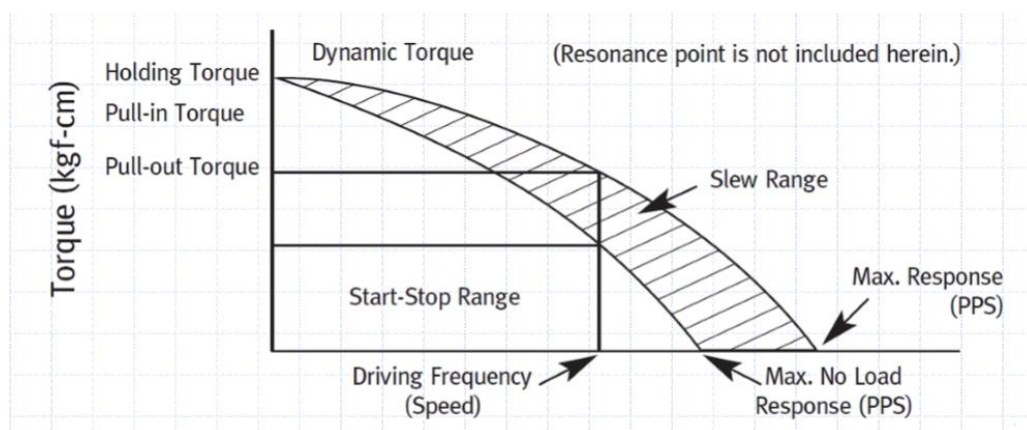
COMMON RATING		SPECIFICATIONS	
Step angle	$1.8^{\circ} \pm 5\%$	Voltage	12 V
Phases	2	Current	0.33 A
Insulation resistance	100 M $\Omega$	Inductance	$34 \pm 20\%$ Mh
Class of insulation	B	Resistance	$34 \pm 10\%$
Weight	0.20 kg	Holding Torque	0.23 N.m

Động cơ này sẽ hoạt động với điện áp DC 12V. Dòng định mức là 0,33A, bị giới hạn bởi điện áp định mức và điện trở cuộn dây. Không cần kiểm soát thêm dòng điện. Điện áp điều khiển cao hơn sẽ gây ra quá dòng, có thể gây hư hỏng nhiệt cho động cơ. Động cơ có 2 giai đoạn. Mỗi xung dẫn đến một góc bước  $1,8^{\circ}$ . Mô-men xoắn giữ là 0,23Nm [2].

Tác động của đặc tính độ rung tới động cơ bước là gì? Hiện tượng động cơ bước quay thực tế là thực hiện một loạt các bước có phản hồi. Mức độ rung động càng thấp thì động cơ quay càng mượt. Mỗi bước bao gồm các giai đoạn:

- + Khi có một xung đầu vào, động cơ sẽ quay đến vị trí tiếp theo.
- + Động cơ được tăng tốc quay qua vị trí dừng, vượt quá một góc nhất định và sẽ bị kéo ngược lại.

+ Động cơ dừng lại ở vị trí dừng đã định sau một dao động tắt dần.



Hình 1.11 Đặc tính cơ của động cơ bước

Tần số quay tối đa: tốc độ tối đa mà động cơ bước sẽ chạy và duy trì đồng bộ.

Đặc tính này thể hiện mối quan hệ giữa độ dịch chuyển góc của roto và momen lực tác dụng lên trục động cơ khi động cơ được kích thích ở dòng điện định mức.

Trong điều kiện không tải, động cơ có độ chính xác góc trong khoảng  $0,05^\circ$ . Độ chính xác góc của động cơ bước được biểu thị bằng độ chính xác vị trí dừng – sự khác biệt giữa vị trí dừng mong muốn và vị trí thực tế. Trong điều kiện thực tế, động cơ luôn có ma sát. Độ chính xác góc trong những trường hợp như vậy được tạo ra bởi sự dịch chuyển góc gây ra bởi đặc tính góc – moment, dựa trên tải trọng ma sát. Nếu tải trọng ma sát không đổi, góc dịch chuyển sẽ không đổi đối với hoạt động một chiều. Tuy nhiên, trong hoạt động hai chiều, sai số góc có thể tăng gấp đôi. Khi yêu cầu dừng cao, luôn luôn định vị theo cùng hướng [4].

Range slewing: đây là khu vực giữa các đường cong mô-men xoắn kéo vào và kéo ra, nơi động cơ bước có thể chạy mà không bị mất bước khi tốc độ tăng hoặc giảm dần dần. Động cơ phải được đưa đến phạm vi quay bằng kỹ thuật tăng tốc và giảm tốc được gọi là tăng tốc.

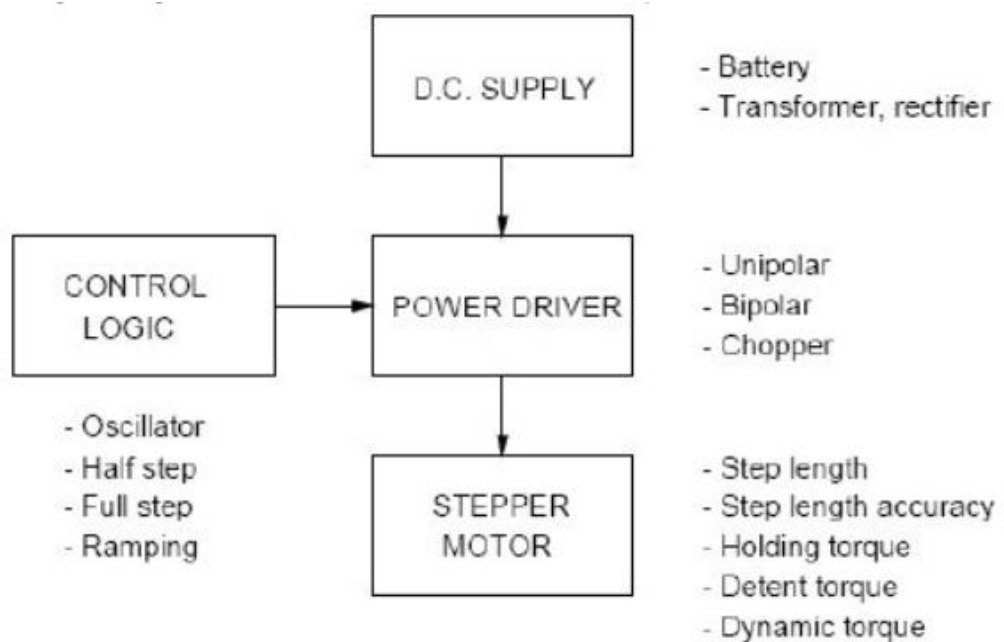
Range start-stop: đây là phạm vi mà động cơ bước có thể khởi động, dừng và đảo chiều quay mà không bị mất bước.

Độ chính xác: Điều này được định nghĩa là sự khác biệt giữa vị trí rô-to lý thuyết và thực tế được biểu thị bằng phần trăm của góc bước. Tiêu chuẩn là  $\pm 5\%$ . Độ chính xác  $\pm 3\%$  có sẵn theo yêu cầu đặc biệt. Lỗi định vị này là không tích lũy.

#### 1.4 Các bộ biến đổi điều khiển động cơ bước

Chúng ta đã biết các cuộn dây của động cơ bước cần được cấp điện theo một trình tự cụ thể nhằm tạo ra từ trường thẳng hàng với từ trường của rotor. Một số thiết bị được sử dụng để cung cấp điện áp cần thiết cho các cuộn dây, và do đó

cho phép động cơ hoạt động bình thường. Bắt đầu từ các thiết bị gần động cơ hơn, chúng ta có:



Hình 1.12 Sơ đồ điều khiển động cơ bước

**D.C.SUPPLY:** Có nhiệm vụ cung cấp nguồn một chiều cho hệ thống. Nguồn một chiều này có thể lấy từ pin nếu động cơ có công suất nhỏ. Với các động cơ có công suất lớn có thể dùng nguồn điện được chỉnh lưu từ nguồn xoay chiều.

**CONTROL LOGIC:** Đây là khối điều khiển logic. Có nhiệm vụ tạo ra tín hiệu điều khiển động cơ. Khối logic này có thể là một nguồn xung, hoặc có thể là một hệ thống mạch điện tử. Nó tạo ra các xung điều khiển. Động cơ bước có thể điều khiển theo cả bước hoặc theo nửa bước.

**POWER DRIVER:** Có nhiệm vụ cấp nguồn điện đã được điều chỉnh để đưa vào động cơ. Nó lấy điện từ nguồn cung cấp và xung điều khiển từ khối điều khiển để tạo ra dòng điện cấp cho động cơ hoạt động.

**STEPPER MOTOR:** Động cơ bước. Các thông số của động cơ gồm có: Bước góc, sai số bước góc, mômen kéo, mômen hãm, mômen làm việc. Đối với hệ điều khiển động cơ bước, ta thấy đó là một hệ thống khá đơn giản vì không hề có phản tử phản hồi. Điều này có được vì động cơ bước trong quá trình hoạt động không gây ra sai số tích lũy, sai số của động cơ do sai số trong khi chế tạo. Việc sử dụng động cơ bước tuy đem lại độ chính xác chưa cao nhưng ngày càng được sử dụng phổ biến. Vì công suất và độ chính xác của bước góc đang ngày càng được cải thiện.

#### 1.4.1 Các loại bộ điều khiển (lái) động cơ bước

Hiện nay trên thị trường có các bộ điều khiển động cơ bước khác nhau, với các tính năng khác nhau cho các ứng dụng cụ thể. Các đặc điểm quan trọng nhất bao gồm giao diện đầu vào. Các tùy chọn phổ biến nhất là:

- Bước / Hướng – Bằng cách gửi một xung vào chân Step (bước), bộ điều khiển thay đổi đầu ra của nó để động cơ sẽ thực hiện một bước, hướng của bước này được xác định bởi mức logic trên chân Direction (hướng).
- Pha / Cho phép (enable) – Đối với mỗi pha cuộn dây stato, pha xác định hướng dòng điện và kích hoạt cho phép (enable) nếu pha được cấp điện.
- PWM – Trực tiếp điều khiển các tín hiệu cực cổng của FET bằng xung vuông.
- Một tính năng quan trọng khác của bộ điều khiển động cơ bước là nó chỉ có thể điều khiển điện áp trên cuộn dây hoặc dòng điện chạy qua cuộn dây:
- Với điều khiển điện áp, bộ điều khiển chỉ điều chỉnh điện áp trên cuộn dây. Mô-men xoắn được phát triển và tốc độ thực hiện các bước chỉ phụ thuộc vào đặc tính của động cơ và tải.
- Bộ điều khiển điều khiển dòng điện tiên tiến hơn, vì chúng điều chỉnh dòng điện chạy qua cuộn dây hoạt động để kiểm soát tốt hơn mô-men xoắn được tạo ra, và do đó hành vi động của toàn bộ hệ thống.

#### 1.4.2 Động cơ đơn cực/lưỡng cực

Một đặc điểm khác của động cơ cũng ảnh hưởng đến điều khiển là sự sắp xếp của các cuộn dây stato xác định chiều dòng điện được thay đổi như thế nào. Để rotor quay được, không chỉ cần cung cấp năng lượng cho các cuộn dây, mà còn phải điều khiển chiều của dòng điện, xác định hướng của từ trường do chính cuộn dây tạo ra [4].

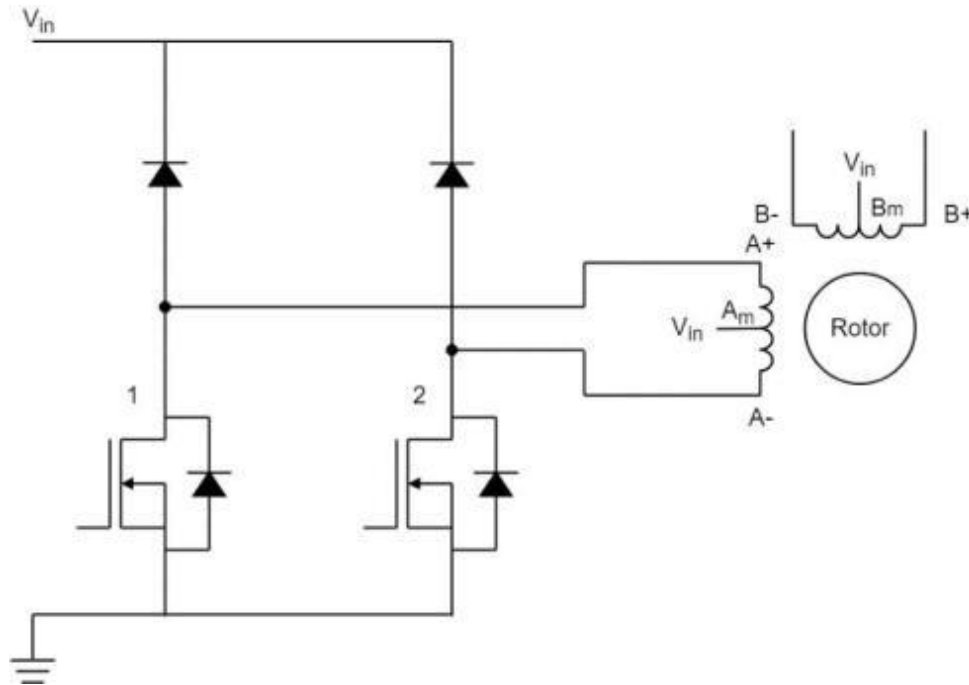
Trong động cơ bước, để điều khiển chiều dòng điện được thực hiện bằng hai cách tiếp cận khác nhau.



Hình 1.13 Hướng của từ trường do chính cuộn dây tạo ra

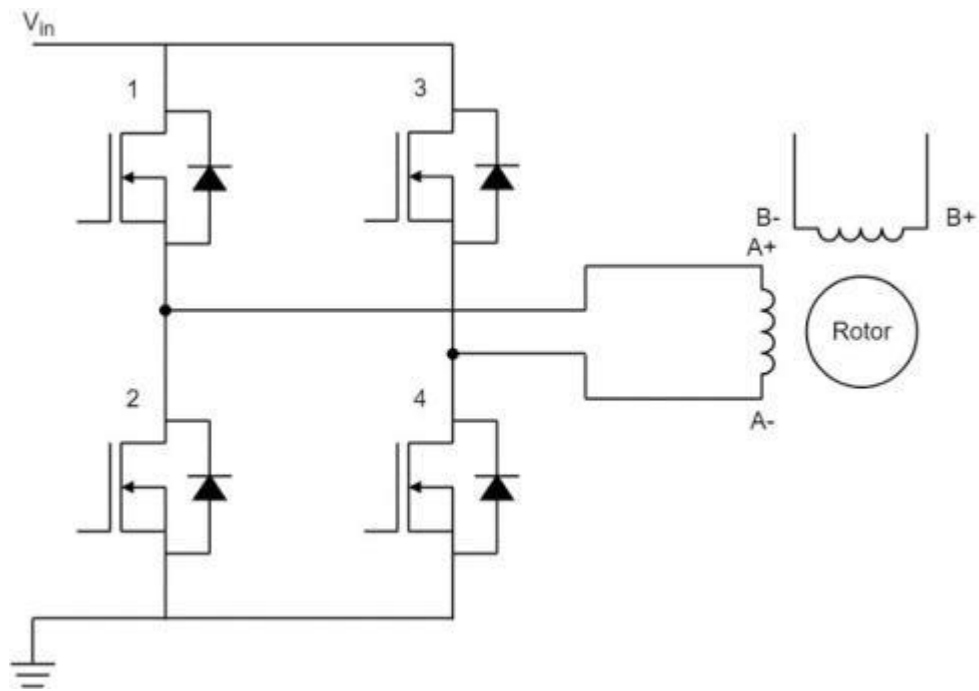
Trong động cơ bước đơn cực, một trong các đầu dây được nối với điểm chính giữa của cuộn dây. Điều này cho phép điều khiển chiều của dòng điện bằng cách sử dụng mạch và linh kiện tương đối đơn giản. Điểm chính giữa ( $A_m$ ) được kết nối với điện áp đầu vào  $V_{in}$ . Nếu MOSFET 1 được kích dẫn, dòng điện chạy từ  $A_m$  đến  $A+$ . Nếu MOSFET 2 được kích dẫn, dòng điện chạy từ  $A_m$  sang  $A-$ , tạo ra từ trường theo hướng ngược lại. Như đã chỉ ra ở trên, cách tiếp cận này làm cho

mạch điều khiển đơn giản hơn (chỉ cần hai transistor), nhưng hạn chế là tại một thời điểm chỉ sử dụng một nửa cuộn dây, điều này có nghĩa là đối với cùng một dòng điện chạy trong cuộn dây, từ trường có cường độ bằng một nửa so với nếu dùng cả cuộn dây. Ngoài ra, những động cơ này khó chế tạo hơn vì phải có nhiều đầu dây hơn làm đầu vào động cơ.



Hình 1.14 Mạch lái động cơ bước đơn cực

Trong động cơ bước lưỡng cực, mỗi cuộn dây có sẵn 2 đầu dây, và để điều khiển chiều dòng điện cần sử dụng cầu H. Như trong hình 1.15, nếu MOSFET 1 và 4 dẫn điện, dòng điện chạy từ A+ sang A-, ngược lại nếu MOSFET 2 và 3 dẫn điện, dòng điện chạy từ A- sang A+, tạo ra từ trường theo hướng ngược lại. Giải pháp này yêu cầu mạch điều khiển phức tạp hơn, nhưng cho phép động cơ đạt được mô-men xoắn cực đại cho lượng cuộn dây được sử dụng.



*Hình 1.15 Mạch điều khiển động cơ bước lưỡng cực*

Với sự tiến bộ của công nghệ, các ưu điểm của động cơ đơn cực ngày càng trở nên ít sử dụng hơn, và các động cơ bước lưỡng cực hiện đang được ưa chuộng nhất.

## CHƯƠNG 2. ĐIỀU KHIỂN VÒNG HỞ ĐỘNG CƠ BƯỚC

### 2.1 Điều khiển bước đủ (Full-step)

Trong chế độ này, hai pha stato được cấp năng lượng đồng thời tại bất kỳ thời điểm nào. Khi hai pha được cấp năng lượng cùng nhau; rôto sẽ trải qua mô-men xoắn từ cả hai pha và đến vị trí cân bằng, sẽ được xen kẽ giữa hai vị trí bước sóng liền kề hoặc kích 1 pha. Vì vậy, chế độ này cung cấp mô-men giữ tốt hơn bước dạng sóng. Bảng bên dưới hiển thị ổ đĩa đầy đủ cho động cơ bước 4 pha. [2].

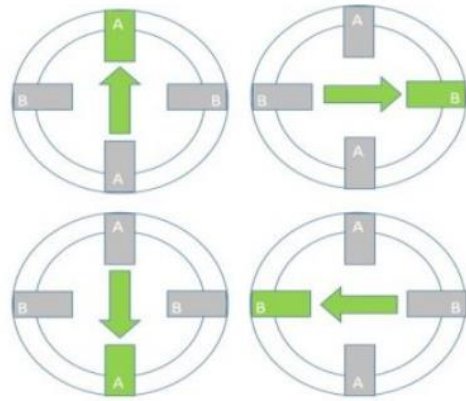


Fig 1 – One phase on – full step

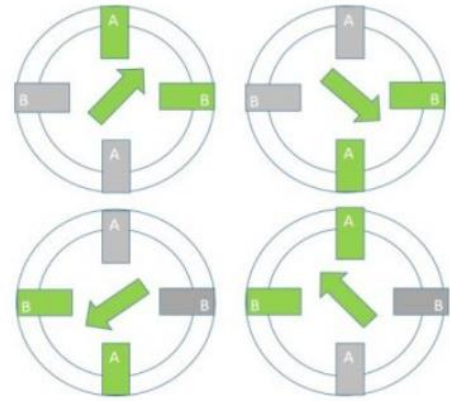


Fig2 – Two phase on – full step

Hình 2.1 Các bước khác nhau của điều khiển bước đủ

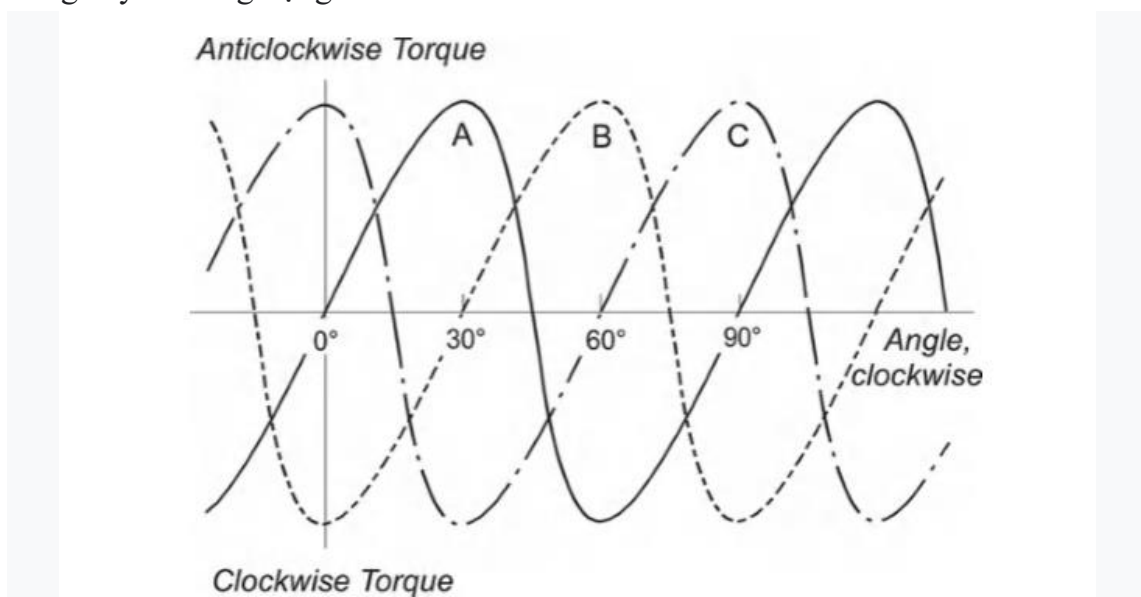
Nếu ta giả sử rằng pha A được cấp điện, và rôto đứng yên ở vị trí  $q^{1/40}$ , ta muốn quay theo chiều kim đồng hồ, thì các pha phải được cấp điện theo trình tự ABCA, v.v., vì vậy ta có thể tưởng tượng rằng pha A bị tắt, và pha B được cấp điện. Ta cũng sẽ giả sử rằng sự phân rã của dòng điện trong pha A và pha tích tụ B diễn ra rất nhanh, trước khi rôto chuyển động đáng kể.

Rô-to sẽ tự tìm thấy ở  $q^{1/40}$ , nhưng lúc này nó sẽ chịu mô-men xoắn theo chiều kim đồng hồ do pha B tạo ra. Do đó, rô-to sẽ tăng tốc theo chiều kim đồng hồ và sẽ tiếp tục chịu mô-men xoắn theo chiều kim đồng hồ, cho đến khi nó quay hết 30. Rô-to sẽ luôn tăng tốc và do đó, nó sẽ vượt quá vị trí 30, tất nhiên đó là vị trí mục tiêu (bước) của nó cho pha B. Tuy nhiên, ngay sau khi nó vượt quá, mô-men xoắn sẽ đảo ngược và rô-to chịu một mô-men xoắn phanh, khiến nó dừng lại trước khi tăng tốc trở lại vị trí 30. Nếu không có ma sát hoặc nguyên nhân giảm xóc khác, rôto sẽ tiếp tục dao động; nhưng trong thực tế, nó trở thành trạng thái của vị trí mới khá nhanh theo cách tương tự như một hệ thống bậc hai tắt dần. Bước 30 tiếp theo đạt được theo cách tương tự, bằng cách tắt dòng điện ở pha B và chuyển sang pha C.

Trong các trường hợp nêu trên, ta đã nhận ra rằng rôto được tác động tuần tự theo từng đường cong trong số ba đường cong mô-men xoắn riêng biệt được minh họa trong Hình 2.2. Ngoài ra, vì ba đường cong có hình dạng giống nhau, nên ta có thể nghĩ rằng rôto bị ảnh hưởng bởi một đường cong mô-men xoắn duy nhất 'nhảy' một bước (trong trường hợp này là 30) mỗi khi dòng điện được chuyển



từ pha này sang pha tiếp theo. Đây thường là cách dễ nhất để hình dung những gì đang xảy ra trong động cơ.



Hình 2.2 Đường cong momen xoắn tĩnh cho động cơ bước biến trở 30/bước

## 2.2 Điều khiển nửa bước (Half-step)

Đây là sự kết hợp của cả chế độ bước sóng và bước toàn phần. Trong đó, các kích dòng một pha và hai pha được thực hiện xen kẽ; tức là, một pha ON, hai pha ON, ... Góc bước trong chế độ này trở thành một nửa của góc bước toàn phần. Chế độ điều khiển này có mô-men xoắn cao nhất và ổn định so với tất cả các chế độ khác. [4].

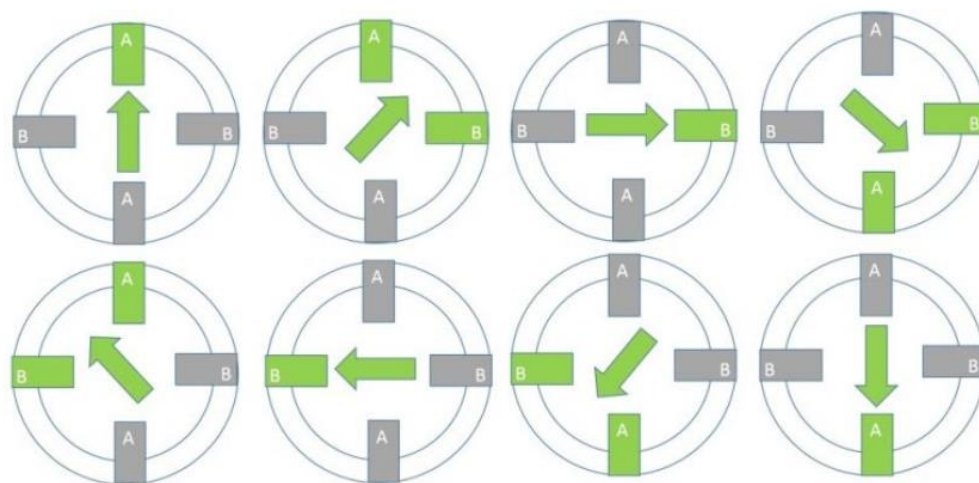


Fig3 - One-two phase on - half step

Hình 2.3 Chế độ nửa bước

Ta đã thấy cách tăng bước động cơ theo 30 bước bằng cách cấp điện cho từng pha một theo trình tự ABCA, v.v. Mặc dù chế độ '1 pha' này là chế độ đơn giản nhất và được sử dụng rộng rãi nhất, nhưng có hai chế độ khác cũng thường xuyên được áp dụng. Chúng được gọi là chế độ 'bật 2 pha' và chế độ 'nửa bước'. Chế độ bật 2 pha có thể cung cấp mô-men xoắn giữ lớn hơn và phản ứng một bước

được giảm chấn tốt hơn nhiều so với chế độ bật 1 pha; và chế độ nửa bước cho phép giảm một nửa góc bước hiệu quả – do đó tăng gấp đôi độ phân giải – và tạo ra trục quay mượt mà hơn [2].

Ở chế độ bật 2 pha, hai pha được kích thích đồng thời. Ví dụ, khi các pha A và pha B được cung cấp năng lượng, thì rôto trải qua các mômen xoắn từ cả hai pha và dừng tại một điểm ở giữa hai vị trí bước đầy đủ liền kề. Nếu các pha được chuyển đổi theo thứ tự AB, BC, CA, AB, v.v., động cơ sẽ thực hiện đầy đủ (30) bước, giống như ở chế độ bật 1 pha, nhưng các vị trí cân bằng của nó sẽ được xen kẽ giữa các pha. -bước vị trí.

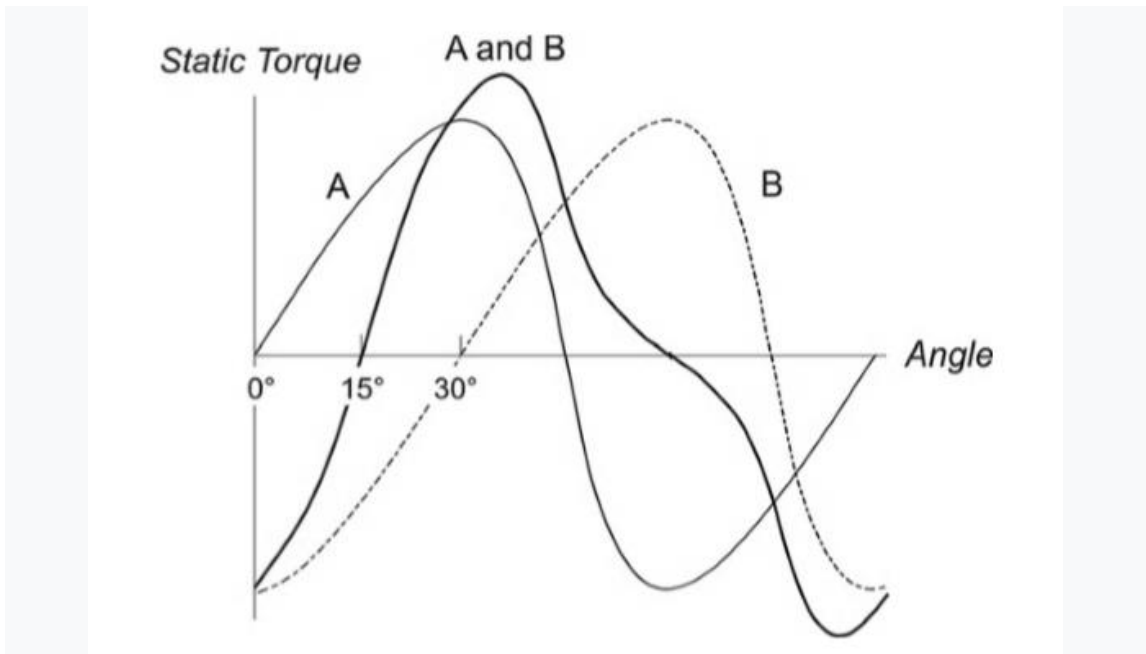
Để có được 'nửa bước', các pha được kích thích theo trình tự A, AB, B, BC, v.v., tức là lần lượt ở chế độ bật 1 pha và bật 2 pha. Điều này đôi khi được gọi là kích thích 'sóng', và nó là nguyên nhân khiến người dùng tiến lên theo từng bước 15, hoặc một nửa góc toàn bước. Như có thể mong đợi, liên tục nửa bước thường tạo ra chuyển động quay của trục trơn tru hơn so với bước đầy đủ và nó cũng tăng gấp đôi độ phân giải [5].

Chúng ta có thể thấy đường cong mô-men xoắn tĩnh trông như thế nào khi hai pha được kích thích bởi sự chồng chất của các đường cong pha riêng lẻ. Một ví dụ được hiển thị trong Hình 2.4, từ đó có thể thấy rằng đối với máy này, mômen giữ (tức là mômen xoắn tĩnh cực đại) cao hơn với hai pha được kích thích hơn là chỉ có một pha được kích thích. Vị trí cân bằng ổn định (nửa cung) là 15, như mong đợi. Giá để được Trả giá cho mô-men xoắn giữ tăng lên là công suất tiêu tán trong cuộn dây tăng lên, tăng gấp đôi so với chế độ bật 1 pha. Mô-men xoắn giữ tăng theo hệ số nhỏ hơn hai, do đó mô-men xoắn trên mỗi watt (là một giá trị hữu ích) bị giảm. Sẽ cần phải chú ý đến việc bổ sung hai đường cong mô-men xoắn 1 pha riêng biệt để có được đường cong 2 pha. Nói đúng ra, quy trình như vậy chỉ đúng khi hai pha độc lập về mặt từ tính hoặc các phần chung của mạch từ không bão hòa. Đây không phải là trường hợp của hầu hết các động cơ, trong đó các pha có chung một mạch từ hoạt động trong điều kiện bão hòa cao.

Cần có một lời cảnh báo liên quan đến việc bổ sung hai đường cong mô-men xoắn 1 pha riêng biệt để có được đường cong 2 pha. Nói đúng ra, quy trình như vậy chỉ hợp lệ khi hai pha độc lập về mặt từ tính hoặc các phần chung của mạch từ không bão hòa. Đây không phải là trường hợp của hầu hết các động cơ, trong đó các pha có chung một mạch từ hoạt động trong điều kiện bão hòa cao. Do đó, việc bổ sung trực tiếp các đường cong bật 1 pha không thể được mong đợi sẽ mang lại kết quả chính xác cho đường cong bật 2 pha, nhưng rất dễ thực hiện và cung cấp một ước tính hợp lý. Ngoài mô-men xoắn giữ cao hơn ở chế độ bật 2 pha, còn có một điểm khác biệt quan trọng khác giúp phân biệt hành vi tĩnh với hoạt động của chế độ bật 1 pha. Ở chế độ bật 1 pha, vị trí cân bằng hoặc bậc thang chỉ được xác định bởi hình dạng của rôto và stato: chúng là những vị trí mà rôto và stato thẳng hàng. Tuy nhiên, ở chế độ bật 2 pha, rôto được thiết kế để

dừng tại các điểm mà các cực của rôto được xếp thẳng hàng ở giữa các cực của stato.

Vị trí này không được xác định rõ ràng bởi 'các cạnh' của các cực đối diện, như trong trường hợp bất 1 pha; và vị trí nghỉ sẽ chỉ chính xác ở giữa chừng nếu (a) có sự đối xứng hình học chính xác và quan trọng hơn, (b) hai dòng điện giống hệt nhau. Nếu một trong các dòng điện pha lớn hơn dòng điện kia, thì rôto sẽ dừng lại gần pha có dòng điện cao hơn, thay vì ở giữa hai dòng điện. Sự cần thiết phải cân bằng các dòng điện để đạt được bước nhảy nửa cung chính xác rõ ràng là một trở ngại đối với sơ đồ này. Tuy nhiên, nghịch lý thay, các đặc tính của máy có dòng điện các pha không đều nhau đôi khi có thể trở thành hiệu quả tốt, như chúng ta thấy trong hình sau:



Hình 2.4 Đường cong momen xoắn tĩnh (đường dày) tương ứng với kích thích hai pha

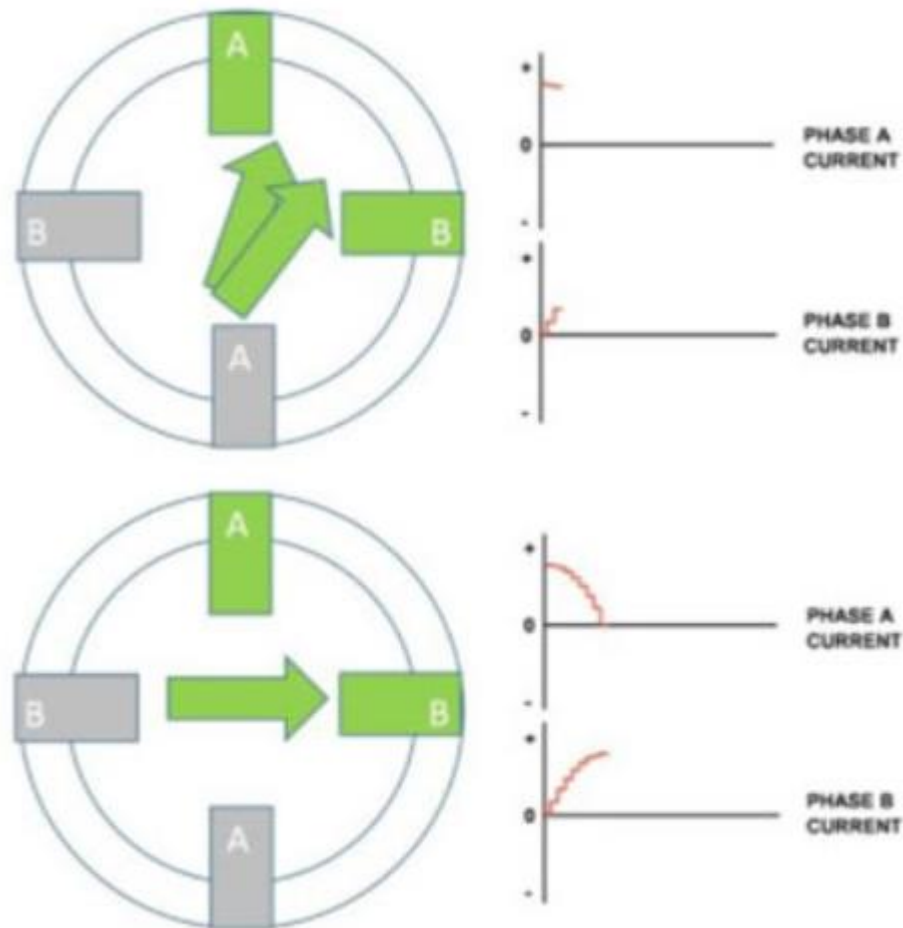
### 2.3 Điều khiển vi bước (Microstep)

**Động cơ vi bước** có thể chia các bước cơ bản của động cơ lên đến 256 lần, điều đó cho phép động cơ hoạt động với góc bước nhỏ cùng với độ chính xác cao. Khi ta kiểm soát hướng, biên độ của dòng điện trong mỗi cuộn dây và các đặc tính của động cơ được cải thiện thì động cơ hoạt động sẽ ít rung hơn nhiều.

Đối với xung cấp có dạng **sóng sin**, hoạt động có sự chuyển đổi nhịp nhàng từ cuộn dây này sang cuộn dây khác. Cụ thể, khi dòng điện tăng lên ở vị trí này thì nó sẽ giảm ở vị trí kia vì vậy mà đầu ra mô-men xoắn luôn được duy trì trạng thái ổn định [5].

Điều này cung cấp khả năng giảm một nửa kích thước của bước so với chế độ nửa bước; nhưng có thể tiến xa hơn nữa. Sử dụng vi bước giúp đạt độ phân giải

vị trí rất cao, nhưng lợi thế này đi kèm với chi phí của một thiết bị phức tạp hơn để điều khiển động cơ và mô-men xoắn nhỏ hơn được tạo ra với mỗi bước. Thật vậy, mô-men quay tỉ lệ với góc sin giữa từ trường stato và từ trường rotor; do đó khi bước càng nhỏ thì mô-men quay càng nhỏ. Điều này có thể dẫn đến việc bỏ lỡ một số bước, có nghĩa là vị trí rôto không thay đổi ngay cả khi dòng điện trong cuộn dây stato có.



Hình 2.5 Điều khiển vi bước

Có một số ứng dụng yêu cầu độ phân giải rất tốt và động cơ có góc bước rất nhỏ – có lẽ chỉ một phần nhỏ của độ – là bắt buộc. Ta thấy rằng chỉ có thể làm nhỏ góc bước bằng cách tăng số răng của rôto và/hoặc số pha, nhưng trong thực tế, sẽ rất bất tiện nếu có nhiều hơn bốn hoặc năm pha và khó sản xuất rôto với hơn 50–100 răng. Điều này có nghĩa là hiếm khi động cơ có góc bước dưới khoảng 1°. Khi cần một góc bước nhỏ hơn, một kỹ thuật được gọi là bước nhỏ (hoặc chia bước) được sử dụng.

Bước nhỏ là kỹ thuật dựa trên hoạt động 2 pha, cung cấp khả năng chia nhỏ từng bước động cơ đầy đủ thành một số 'bước con' có kích thước bằng nhau. Ngược lại với bán bước, trong đó hai dòng điện phải được giữ bằng nhau, các dòng điện được cố ý làm cho không bằng nhau. Bằng cách chọn và kiểm soát chính xác biên độ tương đối của dòng điện, vị trí cân bằng điện trở có thể được thực hiện ở bất kỳ vị trí nào giữa các vị trí bước cho mỗi trong hai pha riêng biệt.

Điều khiển dòng điện vòng kín là cần thiết để ngăn dòng điện thay đổi do thay đổi nhiệt độ trong cuộn dây hoặc thay đổi điện áp nguồn; và nếu cần đảm bảo rằng mô-men xoắn giữ không đổi đối với mỗi bước nhỏ thì cả hai dòng điện phải được thay đổi theo thuật toán đã quy định. Bất chấp những khó khăn đã đề cập ở trên, bước nhỏ được sử dụng rộng rãi, đặc biệt là trong các ứng dụng chụp ảnh và in ấn cần độ phân giải cao. Có rất nhiều sơ đồ liên quan đến từ 3 đến 10 bước nhỏ đối với động cơ bước 1,8 và có những trường hợp đạt được tới 100 bước nhỏ (20.000 bước nhỏ/vòng quay) [4].

Hình dạng của đường cong mô-men xoắn tĩnh, mô-men xoắn giữ và độ dốc của đường cong mô-men xoắn về vị trí bước đều được chứng minh là những chỉ dẫn quan trọng về cách thức hoạt động của động cơ. Tuy nhiên, tất cả các đặc điểm này phụ thuộc vào (các) dòng điện trong cuộn dây và thời điểm động cơ chạy dòng điện tức thời sẽ phụ thuộc vào loại mạch truyền động được sử dụng.

### CHƯƠNG 3. ĐIỀU KHIỂN VECTOR CHO ĐỘNG CƠ BƯỚC

Để điều khiển động cơ bước, ta có các phương pháp điều khiển truyền thống như kích điện áp đơn, kích điện áp cao và thấp, kích điện áp chopper dòng điện không đổi,... Tuy nhiên, những phương pháp này thường gặp vấn đề về dao động tần số thấp, mô-men xoắn tần số cao và đáp ứng chậm.

Để giải quyết những vấn đề này, điều khiển vector đã được áp dụng trong điều khiển động cơ AC và trở thành một chủ đề nóng trong nghiên cứu động cơ bước lai hai pha. Thực tế cho thấy, điều khiển vector mang lại hiệu suất ổn định và động tốt cho động cơ bước.

Bên cạnh đó, kỹ thuật mới SVPWM (điều chế vector không gian) được sử dụng để điều khiển động cơ AC. Nó giúp giảm nội dung sóng giao thoa của dòng ra biến tần, cải thiện sử dụng điện áp DC của biến tần và giảm nhiều mô-men xoắn. Đồng thời, SVPWM dễ dàng triển khai trên các vi điều khiển nhúng như vi điều khiển. [5]

#### 3.1 Mô hình hóa động cơ trên hệ tọa độ tĩnh

Động cơ bước lai sử dụng 2 cuộn dây A, B cấp điện áp vào cho stato, điện áp trong 2 cuộn lệch pha nhau 90 độ. Từ pha của dòng điện trong 2 cuộn dây A, B ta có hệ tọa độ tĩnh với trục trục hoành là pha của dòng A và trục tung là pha của dòng B. [2]

Động cơ bước lai là động cơ phi tuyến tính có độ phức tạp cao, vì vậy để thuận tiện cho việc điều khiển, một số giả định được đưa ra như sau:[1]

- + Động cơ tuyến tính và bỏ qua ảnh hưởng của bão hòa.
- + Liên kết từ thông của nam châm vĩnh cửu trong cuộn dây pha thay đổi theo hình sin như vị trí thay đổi của roto mà không có bất kỳ ảnh hưởng nào từ dòng điện trong cuộn dây stato.
- + Bỏ qua tác dụng của dòng điện xoáy và độ trễ của từ trường, giả sử dây quấn pha hình sin phân bố dọc theo chu vi của stato.
- + Độ tự cảm lẫn nhau giữa A và B bằng không.

Từ các giả định trên, ta có:

Sức phản điện động trong cuộn dây A là:

$$e_a = \omega * p * \psi_m * \sin(p\theta) \quad (3.1)$$

Trong đó:

$\omega$  – Tốc độ cơ của roto, [rad/s].

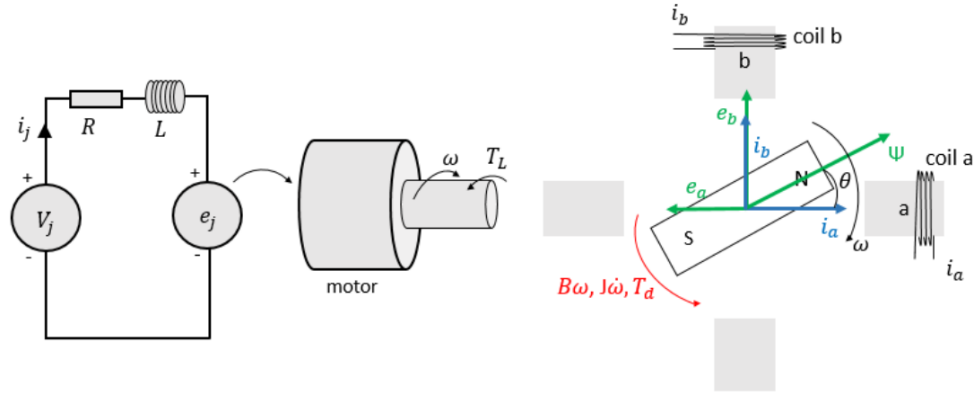
$p$  – Số đôi cực của roto.

$\psi_m$  – Liên kết từ thông tối đa, [Vs].

$\theta$  – Vị trí góc của roto, [rad].

Tương tự, ta có suất phản điện động trong cuộn dây B là:

$$e_b = \omega * p * \psi_m * \sin(p\theta - \frac{\pi}{2}) \quad (3.2)$$



Hình 3.1 Động cơ và các thông số của động cơ

Bên trái dùng để mô tả phương trình điện áp với  $R, L, V, e$  lần lượt là điện trở, cuộn cảm, điện áp và suất phản điện động phía stato. Bên phải là mô tả hệ tọa độ tĩnh.

Từ đây, ta có phương trình dòng điện trong 2 pha A, B là:

$$L \frac{di_a(t)}{dt} = V_a(t) - R \cdot i_a(t) + \omega(t) \cdot p \cdot \psi_m \cdot \sin(p\theta) \quad (3.3)$$

$$L \frac{di_b(t)}{dt} = V_b(t) - R \cdot i_b(t) + \omega(t) \cdot p \cdot \psi_m \cdot \cos(p\theta) \quad (3.4)$$

Trong đó:

$V_a, V_b$  – Điện áp pha, [V].

$i_a, i_b$  – Dòng điện pha, [A].

$R$  – Điện trở của cuộn dây pha stato, [Ohm].

$L$  – Độ tự cảm pha stato, [H].

Bên cạnh đó, ta có phương trình mô men điện từ của động cơ là :[3]

$$T_e = -i_a \cdot p \cdot \psi_m \cdot \sin(p\theta) + i_b \cdot p \cdot \psi_m \cdot \cos(p\theta) \quad (3.5)$$

Và phương trình mô tả quan hệ điện - cơ là:[3]

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = T_e(t) - T_L - B \cdot \omega(t) \quad (3.6)$$

Trong đó:

$J$  – Quán tính roto, [ $\text{kg } m^2$ ].

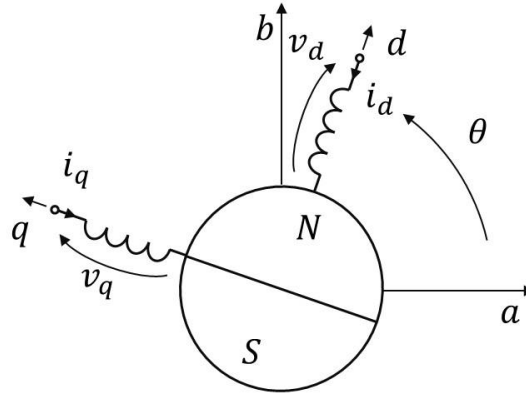


$T_L$  – Mô men xoắn của tải, [Nm].

$B$  – Hệ số ma sát, [Nms].

### 3.2 Mô hình hóa trên trục tọa độ quay

Chìa khóa của điều khiển động cơ là phép biến đổi Park chuyển từ hệ tọa độ tĩnh a,b sang hệ tọa độ quay d,q. Với trục d trùng với vị trí góc roto và trục q vuông góc với trục d, sau trục d 1 góc 90 độ. Từ đây ta có thể thiết lập mối quan hệ giữa mô men và dòng điện theo hướng đơn giản hơn [6].



Hình 3.2 Hệ tọa độ quay d,q

Từ hình vẽ, ta có thể thiết lập công thức chuyển hệ tọa độ:

$$i_d = i_a \cdot \cos\theta + i_b \cdot \sin\theta \quad (3.7)$$

$$i_q = -i_a \cdot \sin\theta + i_b \cdot \cos\theta \quad (3.8)$$

Thay (3.7), (3.8) vào các phương trình (3.3),(3.4),(3.55), ta có:

Phương trình điện:

$$L \frac{di_d(t)}{dt} = V_d(t) - R \cdot i_d(t) + L \cdot p \cdot \omega(t) \cdot i_q(t) \quad (3.9)$$

$$L \frac{di_q(t)}{dt} = V_q(t) - R i_q(t) - L \cdot p \cdot \omega(t) \cdot i_d(t) - p \cdot \omega(t) \cdot \psi_m \quad (3.10)$$

Phương trình mô-men điện từ:

$$T_e(t) = p \cdot \psi_m \cdot i_q(t) \quad (3.11)$$

Theo lý thuyết, chúng ta biết được rằng mô men điện từ gồm 2 thành phần: mô men từ trở gây ra bởi hiệu ứng kháng từ và mô men xoắn kích thích gây ra bởi sự tương tác của dòng điện stato và từ trường của nam châm vĩnh cửu. Bản chất, việc thực hiện điều khiển vector là thông qua pha và biên độ dòng điện stato trong động cơ  $i_s$ . Sau khi thực hiện phép chuyển tọa độ, các thông số này hoàn toàn có



thể điều khiển được thông qua điều chỉnh dòng  $i_d, i_q$  [7]. Trong đồ án này, chúng ta sử dụng phương pháp điều khiển tựa từ thông roto, điều này đòi hỏi dòng  $i_d = 0$ . Bên cạnh đó, do **khe hở không khí của động cơ bước nhỏ, năng lượng đầu ra sẽ bị ảnh hưởng đáng kể bởi hiệu ứng kháng từ, vì vậy để tránh lãng phí năng lượng thì ta có thể cho dòng  $i_d = 0$** . Khi đó, dòng điện tại stato và mô men điện từ của động cơ sẽ được điều khiển hoàn toàn thông qua  $i_q$  như ta thấy trong phương trình (3.11) và  $i_s = i_q$ . [1]

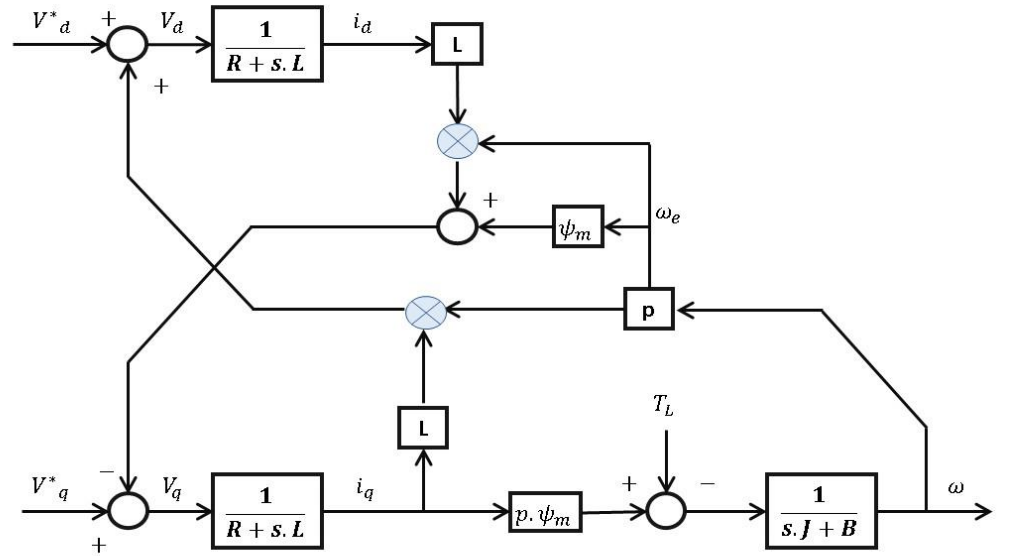
Từ đây, ta tiến hành mô hình hóa động cơ, Laplace 2 về của các phương trình (3.9), (3.10), (3.11), (3.6) ta thu được kết quả như sau:

$$I_q(s) = \frac{V_q(s) - p \cdot L \cdot \omega(s) \cdot I_d(s) - p \cdot \psi_m \cdot \omega(s)}{L \cdot s + R} \quad (3.12)$$

$$I_d(s) = \frac{V_d(s) + p \cdot L \cdot \omega(s) \cdot I_q(s)}{L \cdot s + R} \quad (3.13)$$

$$\omega(s) = \frac{p \cdot \psi_m \cdot I_q(s) - T_L}{J \cdot s + B} \quad (3.14)$$

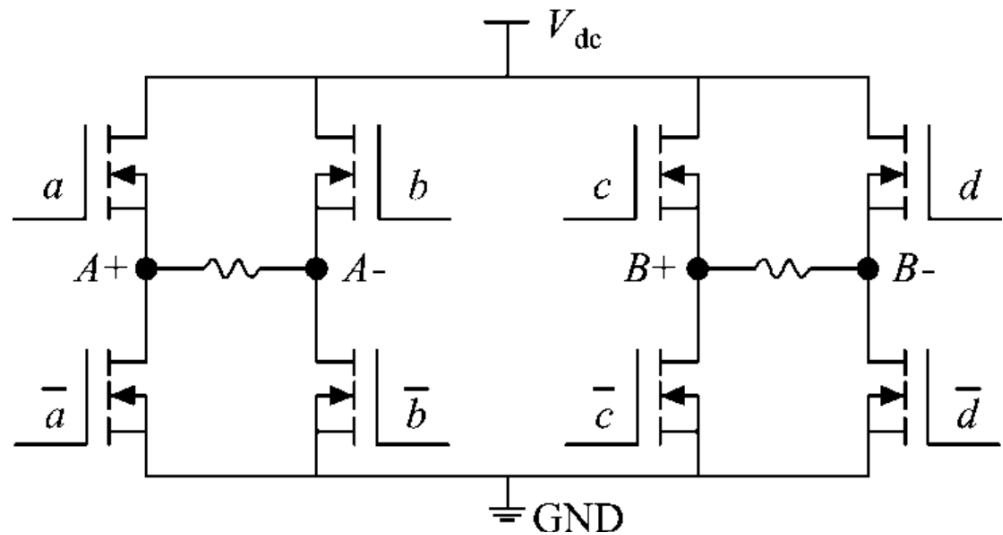
Từ (3.12), (3.13), (3.14), ta có mô hình động cơ trong hệ tọa độ quay như sau:



Hình 3.3 Mô hình hóa động cơ bước trong hệ tọa độ quay.[4]

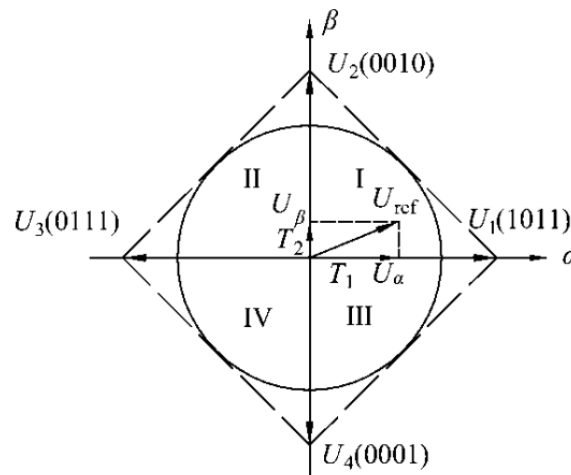
### 3.3 Kỹ thuật điều chế vector không gian cho động cơ bước

Đối tượng của bài báo này là điều khiển động cơ bước hai pha, vì vậy cấu trúc double H-bridge được sử dụng, được thể hiện trong hình 3.3.1 Tuy nhiên, thuật toán SVPWM truyền thống được thiết kế cho điều khiển biến tần ba pha, do đó cần phải thiết kế lại thuật toán SVPWM [8].



Hình 3.4 Cấu trúc mạch cầu H đôi

Theo nguyên tắc điều khiển biến tần, không thể bật đồng thời các nhánh trên và dưới của mỗi nửa cầu, do đó, giả sử rằng trạng thái là "1" khi bật nhánh trên và bật nhánh dưới tắt, nếu không trạng thái là "0". Theo cấu trúc mạch cầu, chúng ta có 4 nhánh van tương ứng với  $2^4 = 16$  trường hợp hoạt động của cầu H. Để giảm thiểu độ rung mô-men xoắn của động cơ và cải thiện hiệu suất động của động cơ, thuật toán SVPWM bảy giai đoạn được thiết kế trong đồ án này. Trong đó, 4 vector trạng thái  $U_1(1011)$ ,  $U_2(0010)$ ,  $U_3(0111)$ ,  $U_4(0001)$  và hai vector không  $U_0(0000)$ ,  $U_5(1111)$  được chọn làm các vector cơ bản. Do đó, vòng vector điện áp được chia thành 4 khu vực và biểu đồ vector điện áp cơ bản được hình thành, như được hiển thị trong Hình 3.5 [4] [9].



Hình 3.5 Sơ đồ vector điện áp

Trong đó :

$T_1, T_2$  – Thời gian hoạt động của  $U_1, U_2$ . , [s].

$T_s$  – Chu kỳ của PWM, [s].

$V_{dc}$  – Điện áp DC nguồn cấp cho inverter, [V].

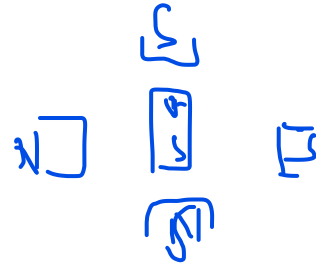
$V_a$  – là hình chiếu của  $V_{ref}$  xuống trục A.

$V_b$  – là hình chiếu của  $V_{ref}$  xuống trục B.

Giả sử  $V_{ref}$  thuộc sector I ta có:

$$T_1 = \frac{T_s}{V_{dc}} \cdot V_a$$

$$T_2 = \frac{T_s}{V_{dc}} \cdot V_b$$



Đặt:

$$X = \frac{T_s}{V_{dc}} \cdot V_a \quad (3.15)$$

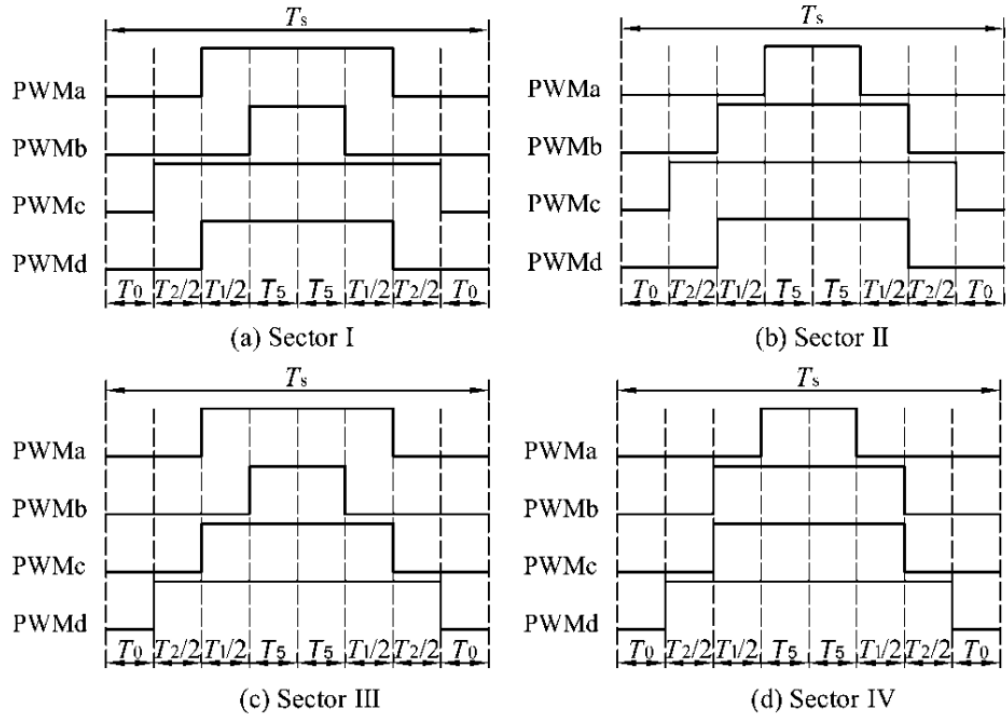
$$Y = \frac{T_s}{V_{dc}} \cdot V_b \quad (3.16)$$

Tương tự, ta có bảng giá trị thời gian hoạt động trong từng sector như sau:

*Bảng 3.1 Giá trị thời gian hoạt động của từng sector*

Sector	I	II	III	IV
$T_1$	X	-X	-X	X
$T_2$	Y	Y	-Y	-Y
$T_0 = T_5$	$T_0 = T_5 = (T_s - T_1 - T_2)/4$			

Để tiếp tục giảm gọn mô-men xoắn của động cơ và giảm tổn thất chuyển mạch, cần phải chỉ định thứ tự của các hàm vector cơ bản. Nguyên tắc phân phối được chọn như sau: khi thay đổi trạng thái chuyển mạch, số lượng pha thay đổi trạng thái chuyển mạch phải được giảm thiểu và vector 0 phải được phân bố đồng đều theo thời gian để PWM được tạo ra đối xứng, có thể hiệu quả giảm tần số chuyển mạch, tổn thất chuyển mạch và các thành phần sóng hài của PWM. Đồng thời, cũng dễ dàng đạt được các thuật toán phần mềm. Như vậy, các trạng thái sẽ có thứ tự lần lượt từ  $T_0, T_2, T_1, T_5$ . Trình tự chuyển đổi thuật toán SVPWM bảy giai đoạn được hiển thị trong hình sau:



Hình 3.6 Dạng sóng thuật toán SVPWM trong từng sector

Từ đây, ta có thời gian mở van theo từng nhánh trong các sector khác nhau là:

Bảng 3.2 Thời gian mở van của các nhánh. Với  $m_a, m_b, m_c, m_d$  lần lượt là thời gian mở của van A, van B, van C, van D

Sector	Thời gian mở van
I	$m_a = T_1 + 2.T_5$ $m_b = 2.T_5$ $m_c = T_1 + T_2 + 2.T_5$ $m_d = T_1 + 2.T_5$
II	$m_a = 2.T_5$ $m_b = T_1 + 2.T_5$ $m_c = T_1 + T_2 + 2.T_5$ $m_d = T_1 + 2.T_5$
III	$m_a = T_1 + 2.T_5$ $m_b = 2.T_5$ $m_c = T_1 + 2.T_5$ $m_d = T_1 + T_2 + 2.T_5$
IV	$m_a = 2.T_5$ $m_b = T_1 + 2.T_5$ $m_c = T_1 + 2.T_5$

	$m_d = T_1 + T_2 + 2.T_5$
--	---------------------------

### 3.4 Cấu trúc điều khiển tựa từ thông rotor (FOC)

Phương pháp điều khiển FOC (Field Oriented Control) là một phương pháp điều khiển động cơ điện AC với độ chính xác cao. Đây là một phương pháp phổ biến được sử dụng trong các ứng dụng công nghiệp và thương mại, đặc biệt là trong các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác cao như robot, máy móc tự động và các ứng dụng trong ngành công nghiệp sản xuất.

Phương pháp điều khiển FOC dựa trên việc đưa hệ thống điều khiển vào không gian vector (vector space) trong đó hai trục tương ứng với dòng điện và điện áp của động cơ được đặt trên một mặt phẳng. Trong không gian vector này, động cơ được xem như là một vector quay, với hướng vector quay là hướng của trục quay của động cơ.

Phương pháp FOC cho phép điều khiển dòng điện và điện áp động cơ một cách độc lập, giúp tối ưu hóa hiệu suất và giảm thiểu mất công suất. Nó cũng cung cấp khả năng điều khiển chính xác vị trí và tốc độ của động cơ.

Với những ưu điểm vượt trội của mình, phương pháp điều khiển FOC đang trở thành một trong những phương pháp điều khiển động cơ phổ biến nhất hiện nay, và đang được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng điện tử công nghiệp, xe điện, máy móc tự động và robot.

Đối với bài toán điều khiển động cơ bước của chúng ta, FOC được vận hành như sau:

1. Đo lường: Từ động cơ bước lai mô phỏng, chúng ta sẽ thu được thông tin điện áp, dòng điện pha của stator, mô men điện từ của động cơ, vị trí góc của roto và tốc độ quay của roto.

2. Chuyển hệ tọa độ từ tĩnh sang hệ tọa độ quay: qua phép biến đổi Park được mô tả trong công thức (7) và (8) ta thu được dòng  $i_d, i_q$  thực tế.

3. Mạch vòng điều khiển tốc độ: Với tốc độ phản hồi từ động cơ và tốc độ đặt ta tính toán ra sai số, sai số này được đưa vào 1 bộ điều khiển PI và tính ra dòng điện đặt vào stato  $i_s^*$ .

4. Mạch vòng điều khiển dòng: Với dòng  $i_s^*$ , ta tính ra  $i_q^* = i_s^*$  và  $i_d^* = 0$  theo lý thuyết được trình bày ở mục 3.2. Sau đó ta lại lấy phản hồi  $i_d, i_q$  thực tế so sánh với dòng đặt và đưa vào bộ điều khiển PI, bộ điều khiển PI này sẽ tính ra điện áp đặt  $V_q^*, V_d^*$ .

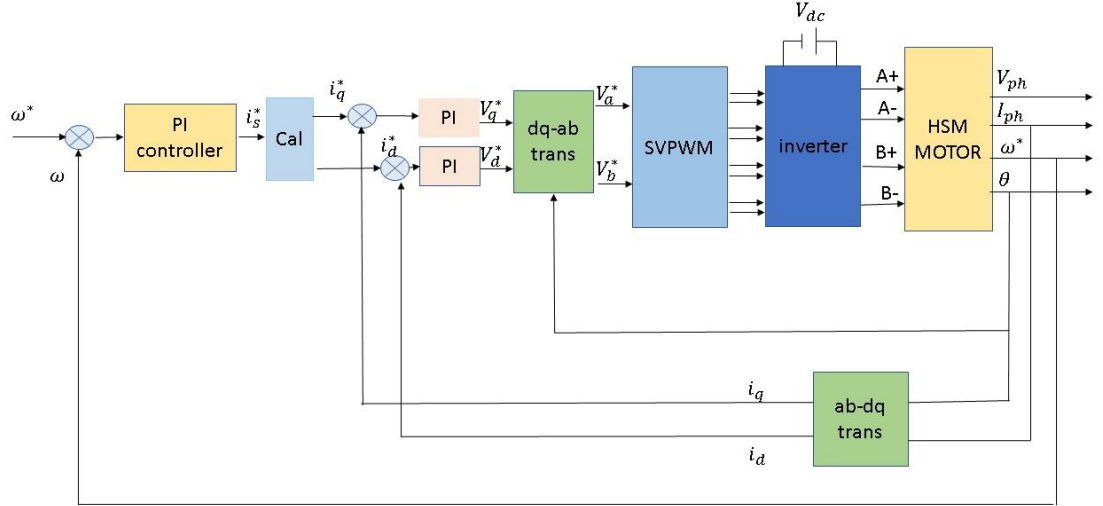
5. Chuyển ngược hệ tọa độ từ quay về tĩnh: Từ  $V_q^*, V_d^*$  ta tính được ra được điện áp đặt vào 2 cuộn dây  $V_a^*, V_b^*$  thông qua phép chuyển đổi Park ngược.

6. Điều chế vector không gian: Với  $V_a^*, V_b^*$  ta tính toán ra thời gian đóng mở các van trong cấu trúc mạch cầu H đôi bằng phương pháp SVPWM như đã trình

bày ở mục 3.3, từ đây ta thu được điện áp mong muốn để cấp cho động cơ bước lai hoạt động.

7. Khi động cơ hoạt động, ta tiếp tục đo các thông số có được từ động cơ và phản hồi lại các mạch vòng điều khiển, quá trình này diễn ra liên tục tới khi nào hết thời gian mô phỏng và ta nhận được kết quả như ý.

Cấu trúc điều khiển FOC được mô tả bằng hình ảnh dưới đây:



Hình 3.7 Cấu trúc điều khiển FOC

### 3.5 Thiết kế các mạch vòng điều khiển

Bộ điều khiển PI là một trong những bộ điều khiển phổ biến nhất được sử dụng trong hệ thống điều khiển tự động. PI là viết tắt của Proportional-Integral, đại diện cho hai thành phần chính trong bộ điều khiển này. Thành phần Proportional có chức năng điều chỉnh đầu ra của bộ điều khiển dựa trên sự khác biệt giữa giá trị đầu vào và giá trị đặt trước. Thành phần Integral tích lũy sai số giữa giá trị đầu vào và giá trị đặt trước trong một khoảng thời gian nhất định, và sau đó sử dụng giá trị tích lũy này để điều chỉnh đầu ra của bộ điều khiển.

Bộ điều khiển PI được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác cao như điều khiển nhiệt độ, áp suất, vận tốc, v.v. Bằng cách sử dụng các thông số thích hợp, bộ điều khiển PI có thể cải thiện đáng kể độ ổn định và độ chính xác của hệ thống điều khiển tự động. Ngoài ra, bộ điều khiển PI cũng có thể được sử dụng để giảm thiểu sự dao động của hệ thống và đảm bảo tối ưu hoá các thông số điều khiển.[6]

#### 3.5.1 Cấu trúc bộ điều khiển PI

Từ mục 3.2, ta có phương trình:

Phương trình điện:

$$L \frac{di_d}{dt} = V_d - R \cdot i_d + L \cdot p \cdot \omega \cdot i_q \quad (3.9)$$

$$L \frac{di_q}{dt} = V_q - Ri_q - L.p.\omega.i_d - p.\omega.\psi_m \quad (3.10)$$

Tốc độ thay đổi của dòng điện theo thời gian chính bằng sai số giữa dòng đặt và dòng phản hồi trên mỗi thời gian lấy mẫu, vậy lên:

$$\frac{di_d}{dt} = e_d = i_d^* - i_d \quad (3.17)$$

$$\frac{di_q}{dt} = e_q = i_q^* - i_q \quad (3.18)$$

Suy ra:

$$i_d = \int e_d dt \quad (3.19)$$

$$i_q = \int e_q dt \quad (3.20)$$

Thay (3.17), (3.18), (3.19), (3.20) vào 2 phương trình (3.9), (3.10), ta có:

$$V_d = L.e_d + R.\int e_d dt - L.p.\omega.i_q \quad (3.21)$$

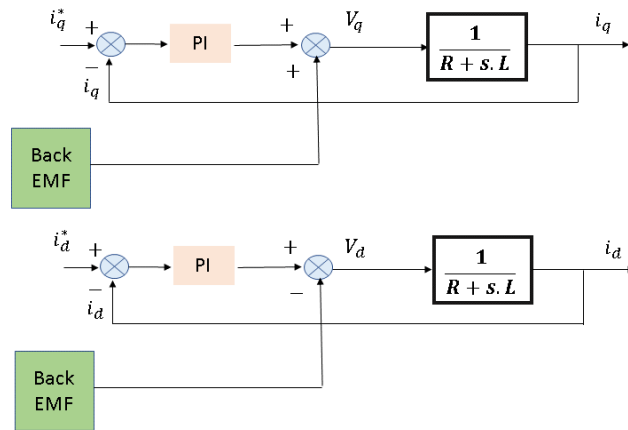
$$V_q = L.e_q + R.\int e_q dt + L.p.\omega.i_d + p.\omega.\psi_m \quad (3.22)$$

Đặt:  $T_i = \frac{K_p}{K_i} = \frac{L}{R}$ , ta có  $K_p \sim L$  và  $K_i \sim R$ , thay vào (3.21), (3.22), ta thu được:

$$V_d = K_p.e_d + K_i.\int e_d dt - L.p.\omega.i_q \quad (3.23)$$

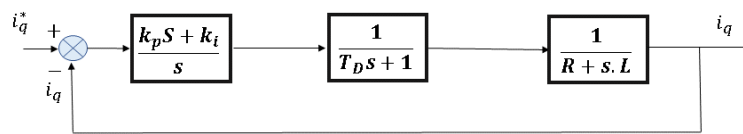
$$V_q = K_p.e_q + K_i.\int e_q dt + L.p.\omega.i_d + p.\omega.\psi_m \quad (3.24)$$

Từ phương trình (3.23), (3.24), ta có cấu trúc bộ điều khiển PI như sau:



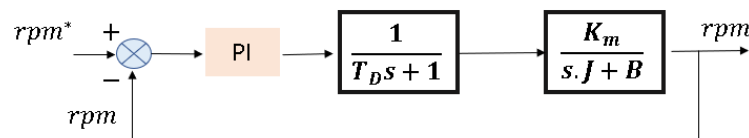
Hình 3.8 Cấu trúc điều khiển PI cho mạch vòng dòng điện

Dễ dàng nhận thấy, dòng điều khiển  $i_q$  không độc lập do ảnh hưởng của suất phản điện động. Để dòng trở lên độc lập, ta tách rời ảnh hưởng của suất phản điện động, coi đây như tín hiệu nhiễu do giá trị ảnh hưởng là không quá lớn. Bên cạnh đó, trong thực tế để thu được kết quả điều khiển cho mạch vòng dòng điện, tốc độ, hệ thống cần thực hiện nhiều phép tính toán, cũng như quy đổi từ tín hiệu tương tự sang tín hiệu số, chính vì vậy, ta cần bổ sung thêm khâu quán tính bậc nhất  $T_D$ . Đối với mạch vòng dòng điện, giá trị của  $T_D$  cần nhỏ hơn giá trị của tần số chuyển mạch, đối với mạch vòng tốc độ, do các giá trị tốc độ là cơ học, trong khi giá trị của dòng điện là các giá trị điện vốn có giới hạn phản hồi nhỏ hơn cơ học rất nhiều, vậy nên giá trị  $T_{D\_s}$  cần nhỏ hơn  $T_D$  từ 5 đến 10 lần. Khi này ta sẽ có cấu trúc điều khiển PI cho mạch vòng dòng điện như sau:



Hình 3.9. Cấu trúc điều khiển dòng sau khi loại bỏ suất phản điện động và thêm thời gian trễ.

Tương tự, ta có cấu trúc điều khiển của mạch vòng tốc độ, chỉ khác là mạch vòng này đơn giản hơn rất nhiều:



Hình 3.10 Cấu trúc điều khiển PI cho mạch vòng tốc độ. Với  $K_m = p \cdot \psi_m$ .



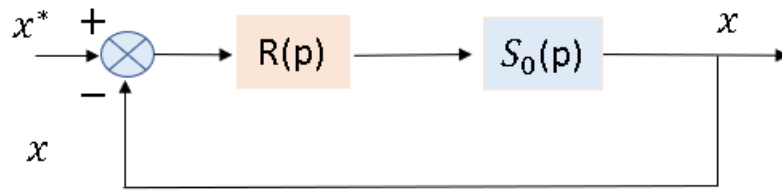
### 3.5.2 Tính toán thông số bộ điều khiển PI

Có nhiều phương pháp có thể sử dụng để tính toán thông số PI như phương pháp Ziegler-Nichols, Cohen-Coon,... Trong đồ án này ta sử dụng phương pháp chuẩn tối ưu module, phương pháp này giúp hiệu chỉnh lại đặc tính tần số chỉ ở vùng tần số thấp và trung bình rất tốt. [9]

Hàm chuẩn module tối ưu là hàm có dạng:

$$F_{MC}(p) = \frac{1}{1 + 2 \cdot \tau_0 \cdot p + 2 \cdot \tau_0 \cdot p^2} \quad (3.25)$$

Khí đó, giả sử ta có hệ thống như sau:



Hình 3.11. Hệ thống theo chuẩn tối ưu module.

Với  $S_0(p) = \frac{K}{(1+T_1 \cdot p) \cdot (1+T_2 \cdot p)}$  thì hệ số của bộ điều khiển R(p) là :

$$K_p = \frac{T_2}{2 \cdot K \cdot T_1} \quad (3.26)$$

$$K_i = \frac{T_2}{2 \cdot K \cdot T_1} \quad (3.27)$$

Xét với mạch vòng dòng điện trong hình 3.9 ta có :

$$S_{0\_current}(S) = \frac{\frac{1}{R}}{(1 + T_D \cdot S) \cdot \left(1 + \frac{L}{R} \cdot S\right)} \quad (3.28)$$

Khi này  $K = \frac{1}{R}$ ,  $T_1 = T_D$ ,  $T_2 = \frac{L}{S}$ , ta có :

$$K_{p\_i} = \frac{T_2}{2 \cdot K \cdot T_1} = \frac{\frac{L}{S}}{2 \cdot \frac{1}{R} \cdot T_D} = \frac{L}{2 \cdot T_D}$$

$$K_{i\_i} = \frac{1}{2 \cdot K \cdot T_1} = \frac{1}{2 \cdot \frac{1}{R} \cdot T_D} = \frac{R}{2 \cdot T_D}$$

Vậy :

$$K_{P\_i} = \frac{L}{2 \cdot T_D} \quad (3.29)$$

$$K_{i_i} = \frac{R}{2 \cdot T_D} \quad (3.30)$$

Xét với mạch vòng tốc độ trong hình 3.10 ta có :

$$S_{0\_speed}(S) = \frac{\frac{K_m}{B}}{(1 + T_{D\_s} \cdot S) \cdot (1 + \frac{J}{B} \cdot S)} \quad (3.31)$$

Khi này  $K = \frac{K_m}{B}$ ,  $T_1 = T_{D\_s}$ ,  $T_2 = \frac{J}{B}$ , ta có :

$$K_{p\_speed} = \frac{T_2}{2 \cdot K \cdot T_1} = \frac{\frac{J}{B}}{2 \cdot \frac{K_m}{B} \cdot T_{D\_s}} = \frac{J}{2 \cdot K_m \cdot T_{D\_s}}$$

$$K_{i\_speed} = \frac{1}{2 \cdot K \cdot T_1} = \frac{1}{2 \cdot \frac{K_m}{B} \cdot T_{D\_s}} = \frac{B}{2 \cdot K_m \cdot T_{D\_s}}$$

Vậy :

$$K_{P\_speed} = \frac{J}{2 \cdot K_m \cdot T_{D\_s}} \quad (3.32)$$

$$K_{i\_speed} = \frac{B}{2 \cdot K_m \cdot T_{D\_s}} \quad (3.33)$$

Trong đó:

$T_D = 10^{-5}$  - thời gian trễ của mạch vòng dòng điện, [ms].

$T_{D\_s} = 10^{-6}$  - thời gian trễ của mạch vòng tốc độ, [ms].

## CHƯƠNG 4. CÁC KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ

### 4.1 Mô phỏng động cơ

Trong đồ án này, chúng em sử dụng khối Stepper Motor trong Simulink SimPowerSystems để mô phỏng động cơ bước lại.

Thông qua mô phỏng, ta có các thông số của động cơ như sau:

Bảng 4.1 Giá trị các thông số của động cơ

STT	Tên	Giá trị
1	$J$ – Quán tính roto, $[\text{kg } m^2]$ .	$1.2e-7$
2	$B$ – Hệ số ma sát, $[\text{Nms}]$ .	$0.0013$
3	$p$ – Số đôi cực của roto.	$50$
4	$\psi_m$ – Liên kết từ thông tối đa, $[\text{Vs}]$ .	$0.00425$
5	$R$ – Điện trở của cuộn dây pha stato, $[\text{Ohm}]$ .	$2.1$
6	$L$ – Độ tự cảm pha stato, $[\text{H}]$ .	$4.2e-3$
7	$T_n$ – Mô men xoắn định mức, $[\text{Nm}]$	$0.02$
8	$V_{dc}$ – Điện áp DC nguồn cấp cho inverter, $[\text{V}]$ .	$24\sqrt{2}$
9	$u_{max}$ - điện áp cực đại của động cơ, $[\text{V}]$ .	$\frac{V_{dc}}{\sqrt{2}}$
10	$i_{max}$ - dòng cực đại của động cơ, $[\text{A}]$ .	$5$
11	$rpm_{max}$ - tốc độ cực đại của động cơ, $[\text{vòng/phút}]$ .	$500$

### 4.2 Mô phỏng khâu điều chế vector không gian cho động cơ bước

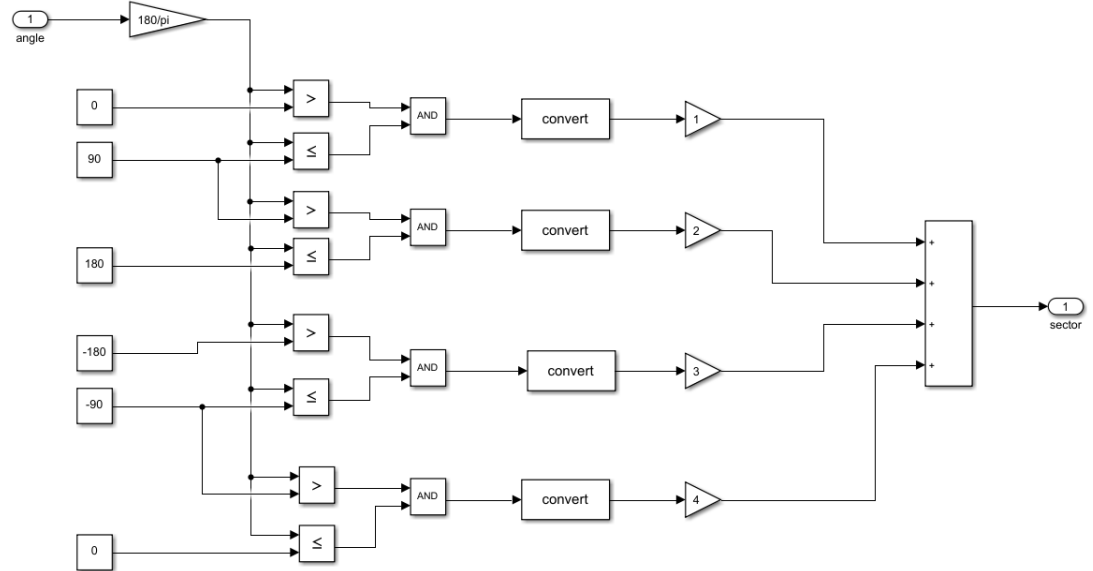
Để mô phỏng khâu điều chế vector không gian cho động cơ bước, ta thực hiện lần lượt các bước sau:

1. Xác định sector mà  $V_{ref}$  đang ở: sử dụng giá trị của  $V_{a\_ref}$ ,  $V_{b\_ref}$  để xác định độ lệch giữa vector điện áp cần điều chế và trục A, ta có:

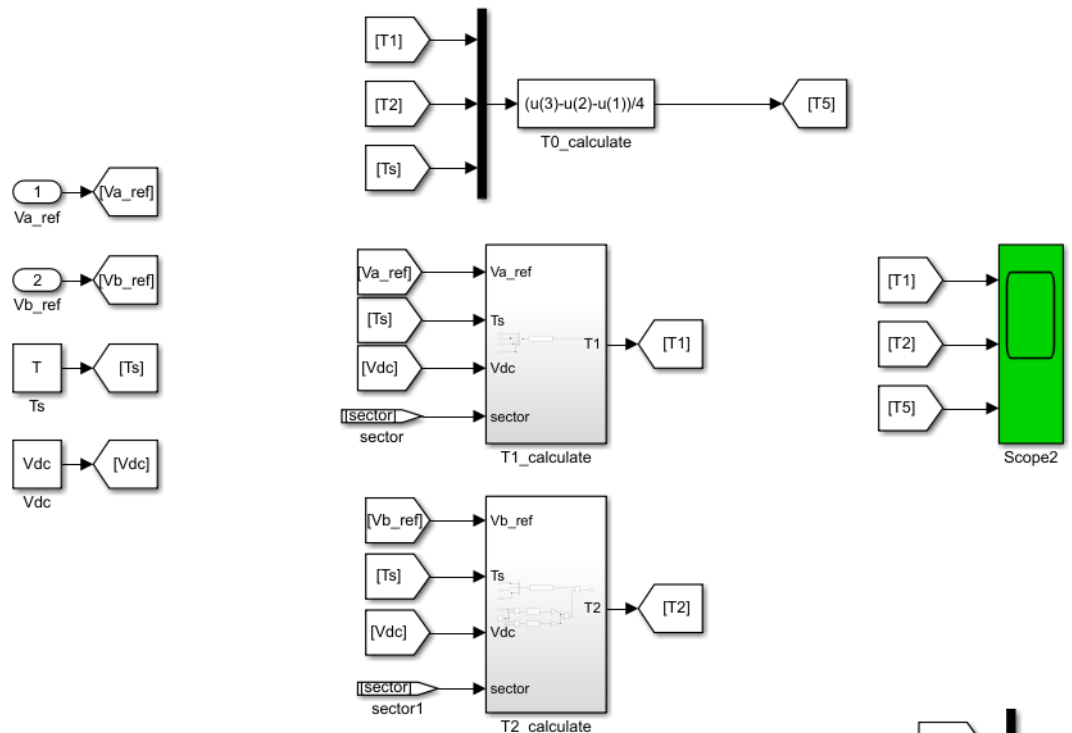
$$angle = \arctan\left(\frac{V_{b\_ref}}{V_{a\_ref}}\right). \quad (4.1)$$

2. Tính toán giá trị  $T_1, T_2, T_5, T_0$  thông qua công thức (3.15), (3.16) và bảng 3.1.
3. Tính toán thời gian mở van của từng nhánh van thông qua bảng 3.2, ta thu được xung mở van của từng nhánh.
4. So sánh xung mở van từng nhánh với sóng mang tam giác ta thu được tín hiệu mở van cung cấp cho mạch lực.

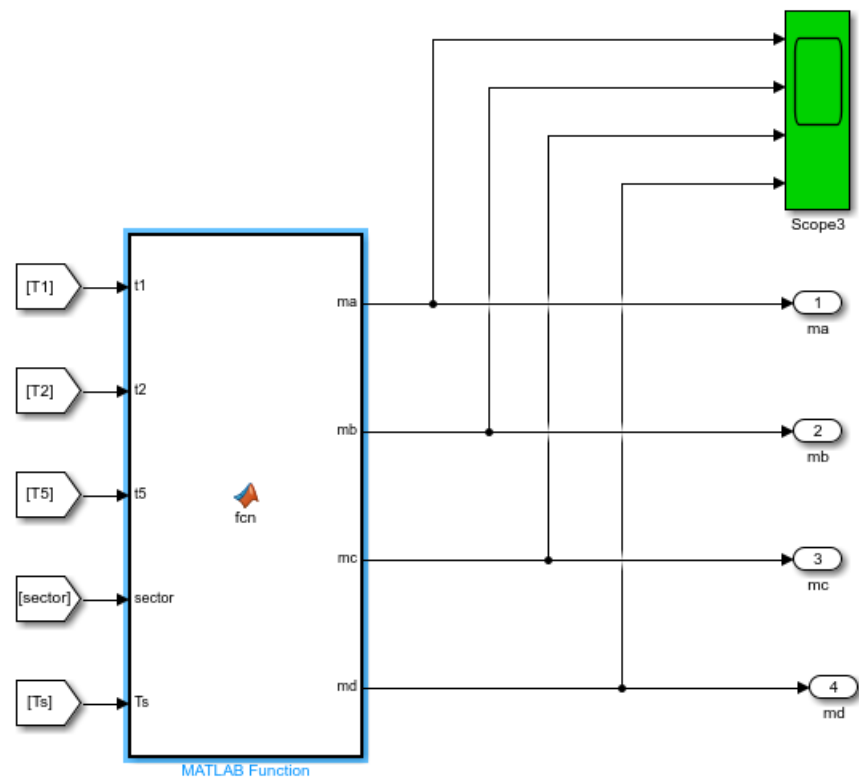
Ta tiến hành mô phỏng:



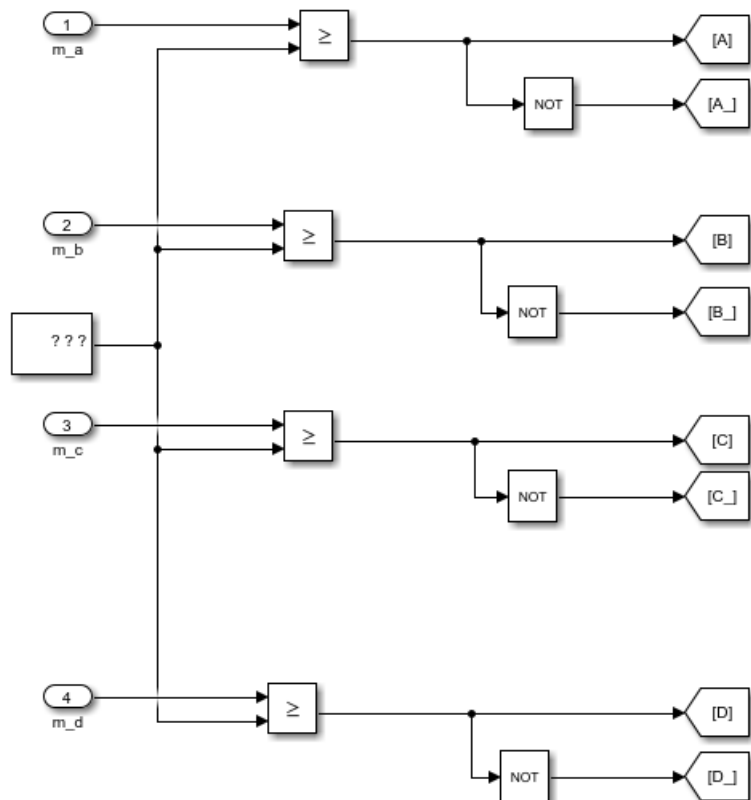
Hình 4.1 Khâu xác định sector



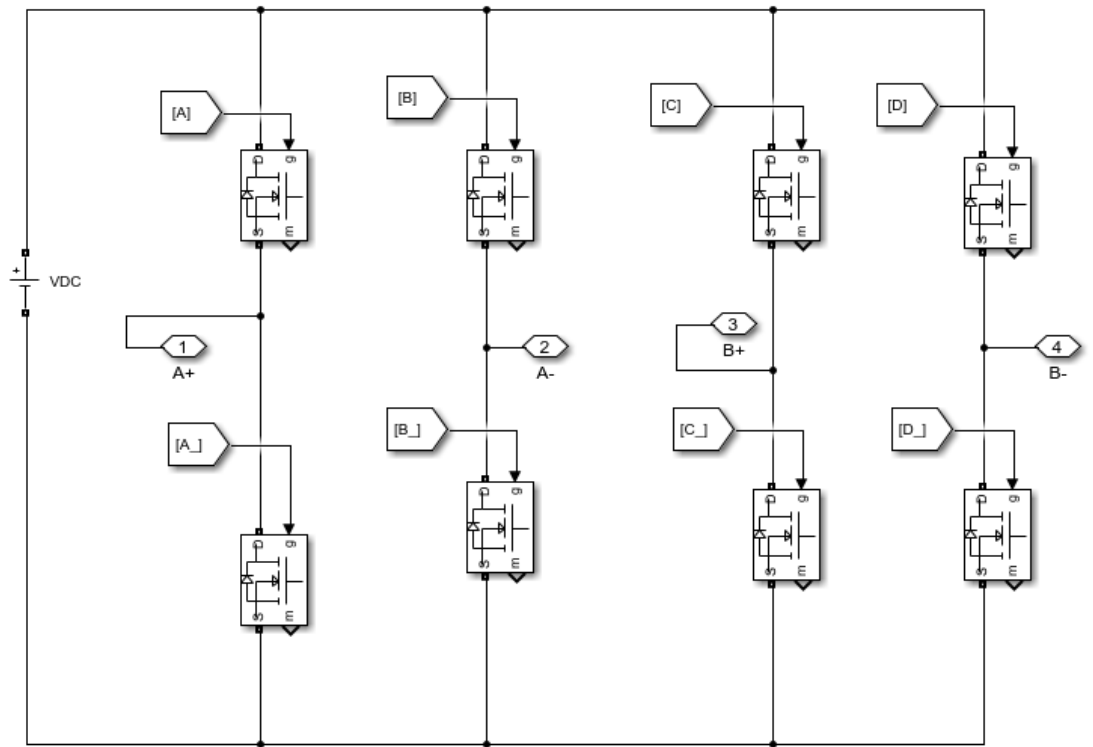
Hình 4.2 Khâu tính toán  $T_1, T_2, T_0$  và  $T_5$



Hình 4.3 Khâu tính toán thời gian mở van của từng nhánh



Hình 4.4 Điều chế tín hiệu mở van cho từng nhánh

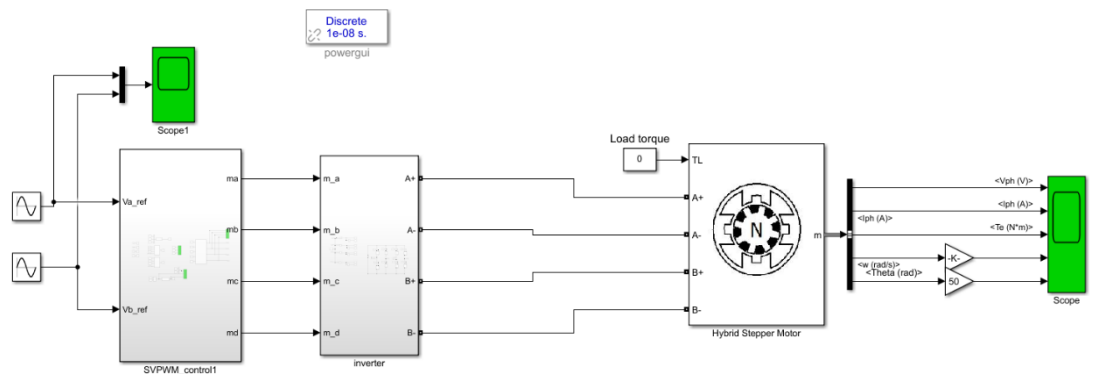


Hình 4.5 Cấu trúc mạch lực

Kịch bản mô phỏng: Giả sử ta cung cấp  $V_{a\_ref}$ ,  $V_{b\_ref}$  là 2 sóng hình sin với biên độ 14 A và tần số  $400\pi$  và điện áp pha A trước pha B 90 độ. Chọn các thông số phía dưới và tiến hành mô phỏng.

Bảng 4.2 Giá trị các thông số mô phỏng SVPWM

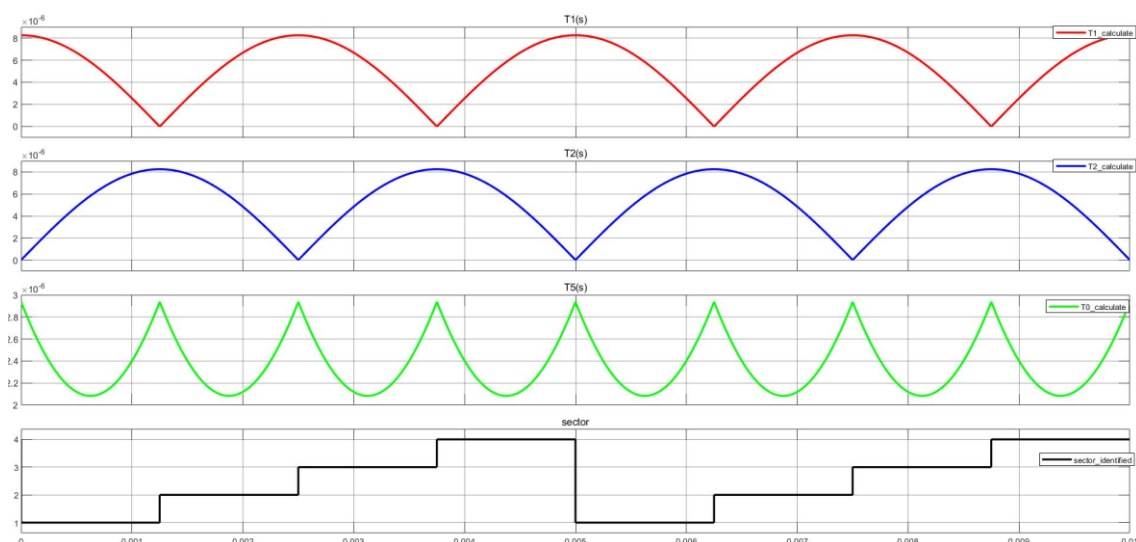
STT	Tên	Giá trị
1	$f_{sw}$ – Tần số sóng mang (Hz)	50
2	$T_s$ – Chu kỳ điều khiển	0.00425



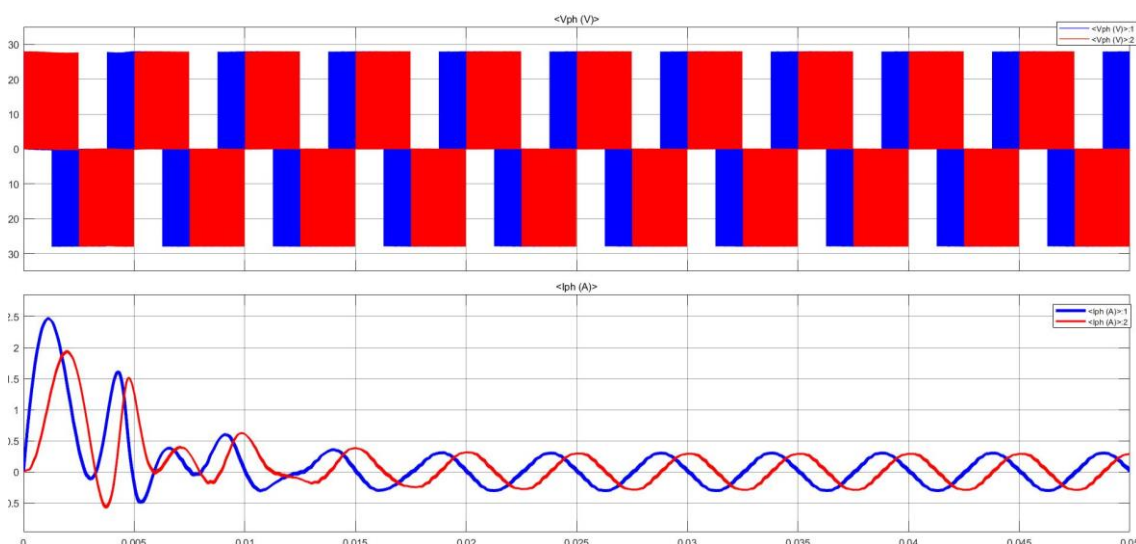
Hình 4.6 Mô phỏng SVPWM

### 4.3 Kết quả mô phỏng SVPWM

Từ đây ta thu được kết quả như sau:



Hình 4.7 Thời gian hoạt động của các trạng thái và sector theo thời gian



Hình 4.8 Điện áp và dòng điện pha stato thu được

Từ hình 4.7, ta có thể thấy  $T_1$  đạt cực đại khi chuyển từ sector 4 về 1 và sector 2 sang 3, và đạt cực tiểu khi chuyển từ sector 1 sang 2 và sector 3 sang 4. Điều này là hoàn toàn đúng với lý thuyết do  $T_1$  ứng với thời gian hoạt động của trạng thái  $U_1$  và  $U_3$  nằm trên trục hoành.

Xét hình 4.8, ta có thể thấy dòng điện và điện áp tại pha A và pha B lệch pha nhau 1 góc 90 độ. Như vậy có thể thấy kết quả mô phỏng đạt được đã đúng với lý thuyết và khâu mô phỏng điều chế vector không gian trạng thái cho động cơ bước lại đã thành công.

#### 4.4 Mô phỏng điều khiển tốc độ cho động cơ bước

Sau khi hoàn thiện khâu điều chế vector không gian, ta tiến hành mô phỏng điều khiển tốc độ động cơ bước lại như sau:

1. Thực hiện các phép biến đổi chuyển trục tọa độ từ tĩnh sang quay và

ngược lại từ quay sang tĩnh thông qua phép biến đổi Park được đề cập trong công thức (3.7), (3.8).

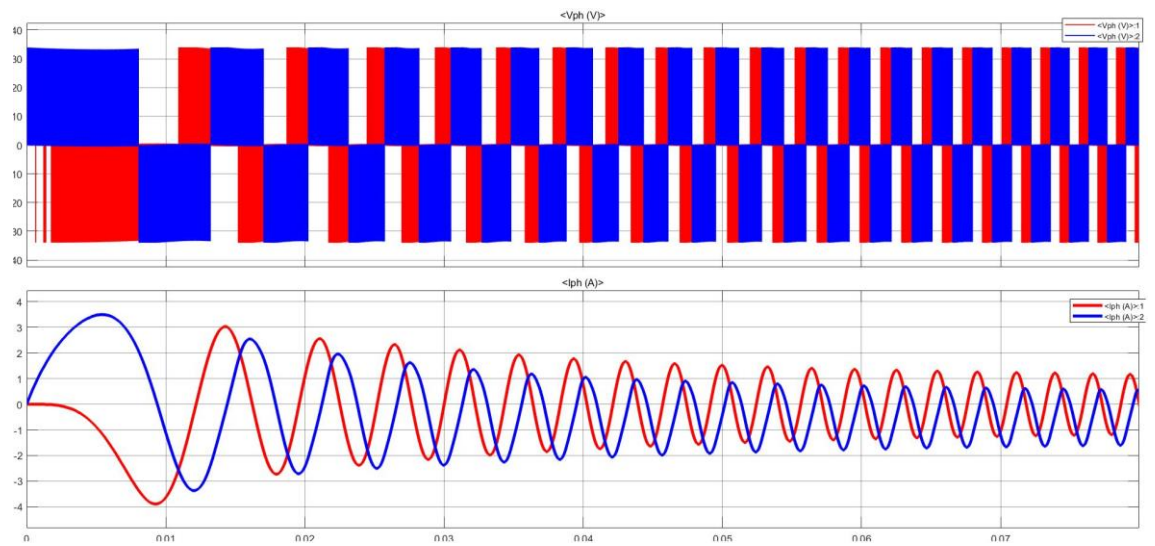
2. Thiết kế mạch vòng điều khiển dòng và điều khiển tốc giống như cấu trúc đã xây dựng trong mục 3.5. Thiết kế mạch vòng điều khiển.

3. Tiến hành mô phỏng và theo dõi kết quả, hiệu chỉnh thông số bộ điều khiển PI nếu cần.

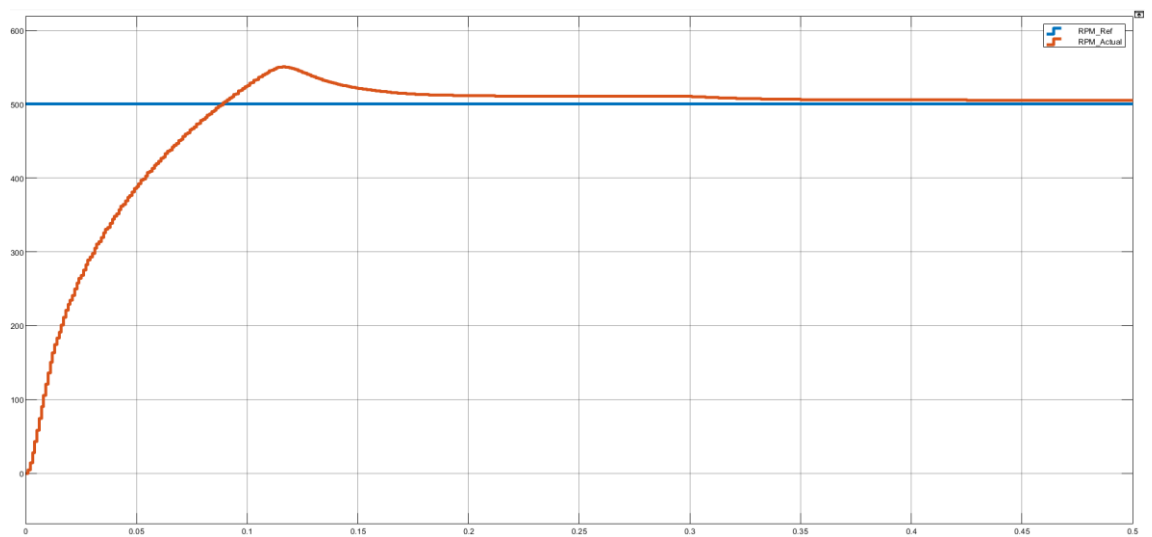
Để thực hiện mô phỏng ta chọn  $T_L$  – Mô men xoắn của tải, [Nm] có giá trị là  $T_L = T_n = 0.02$  và tốc độ đặt  $rpm_{ref} = 500$  vòng/phút. Ta tiến hành mô phỏng trên Matlab,



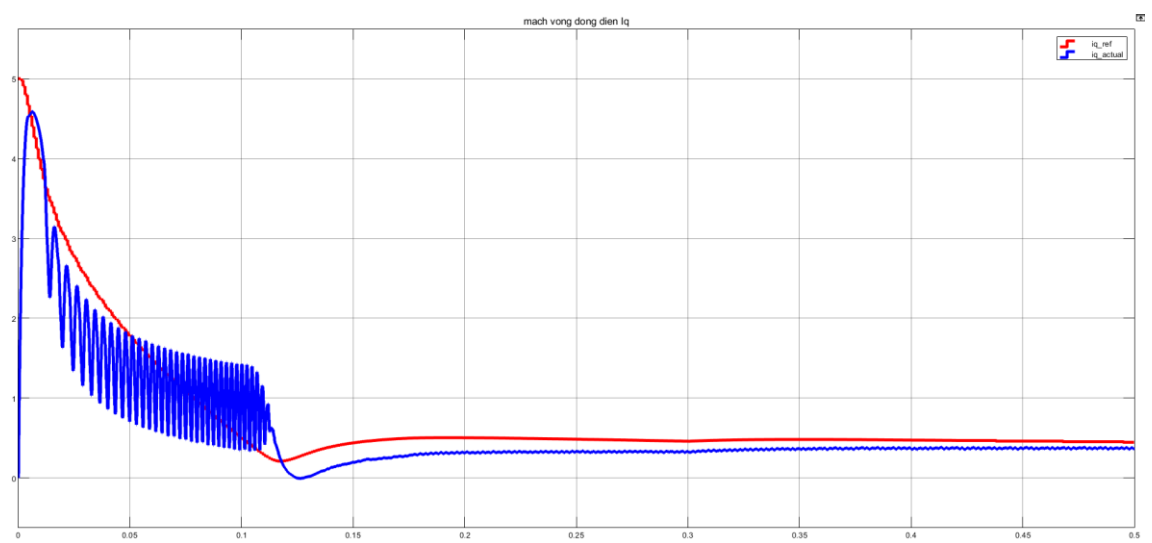




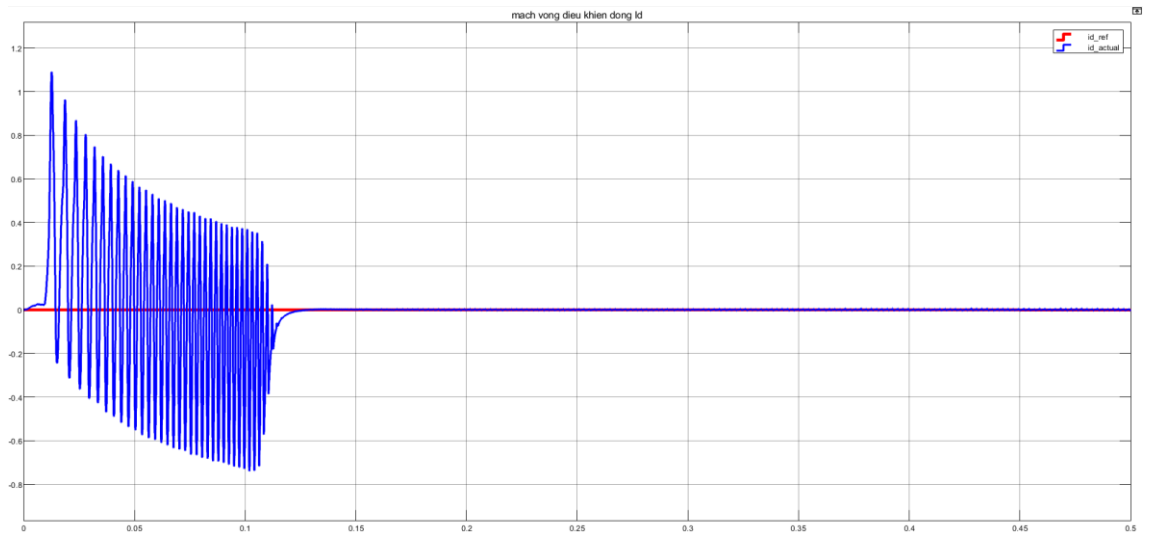
Hình 4.10 Dòng điện và điện áp pha stato sau điều khiển



Hình 4.11 Mạch vòng điều khiển tốc độ



Hình 4.12 Mạch vòng điều khiển dòng  $I_q$



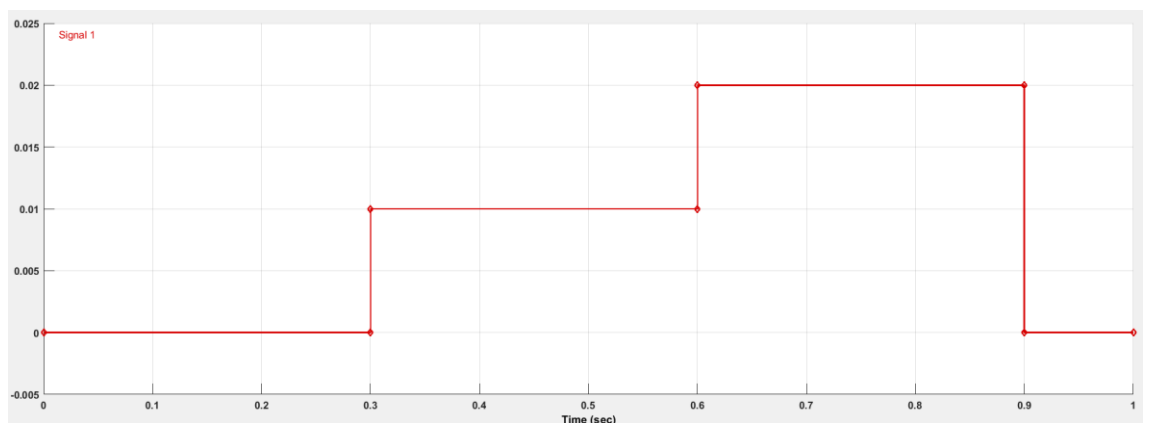
Hình 4.13 Mạch vòng điều khiển dòng  $I_d$

Từ kết quả cho thấy, các mạch vòng điều khiển đã hoạt động tương đối thành công khi cho ra dòng  $I_d$ ,  $I_q$  và tốc độ  $rpm$  tương đối sát với tín hiệu đặt. Tuy nhiên thời gian đáp ứng còn chưa đủ nhanh và xuất hiện nhiều sóng hài. Điều này đòi hỏi phải cải thiện thêm bộ điều khiển PI để thu được kết quả tốt hơn. Bên cạnh đó chúng ta cũng thu được dòng pha và điện áp pha lệch nhau 1 góc 90 độ, đúng với lý thuyết. Dòng điện khởi động cũng không cao quá dòng điện max của động cơ, điều này cho thấy việc mô phỏng điều khiển tốc độ cho động cơ lai bước đã được thực hiện thành công.

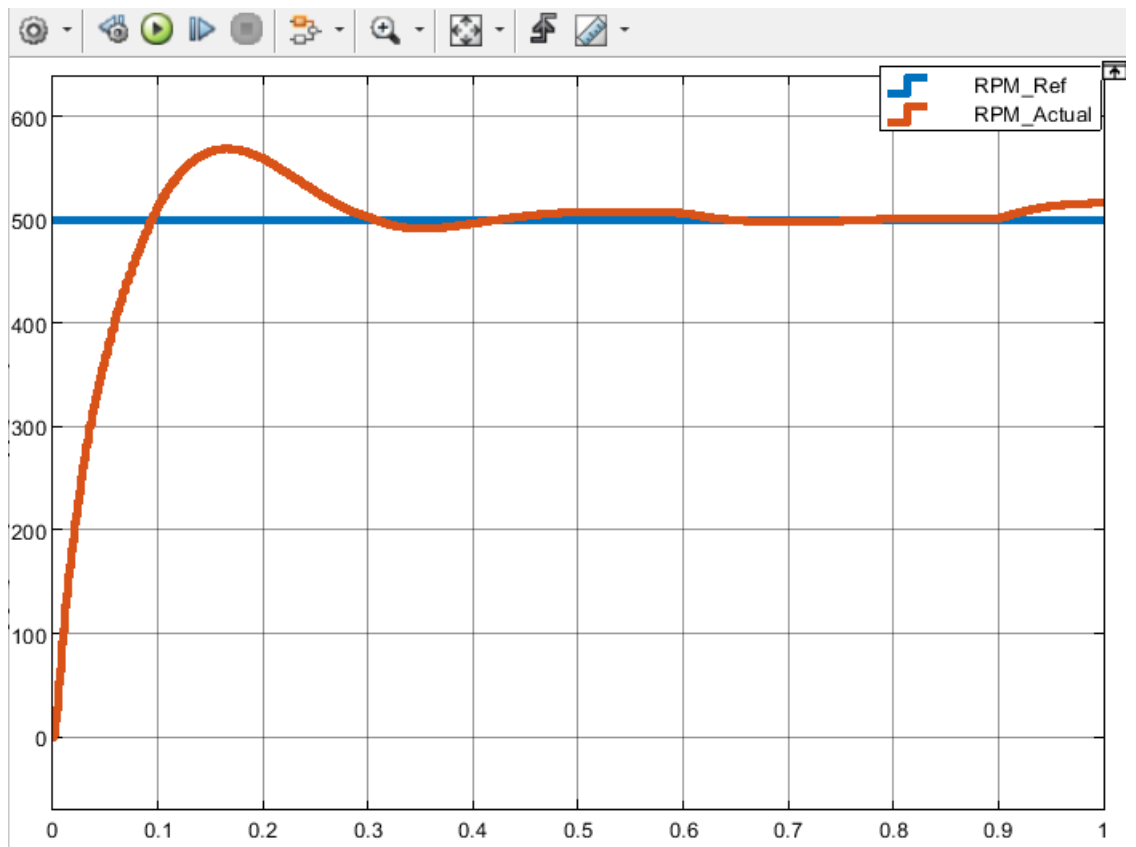
#### 4.4.1 Kịch bản Mô men tải thay đổi

Ta chọn kịch bản tải thay đổi như sau: động cơ khởi động không tải, 0.3s sau khởi động đóng tải bằng 50% tải định mức và sau 0.6s sau khởi động đóng tải bằng tải định mức. Cuối cùng sau 0.9s sau khởi động ngắt tải.

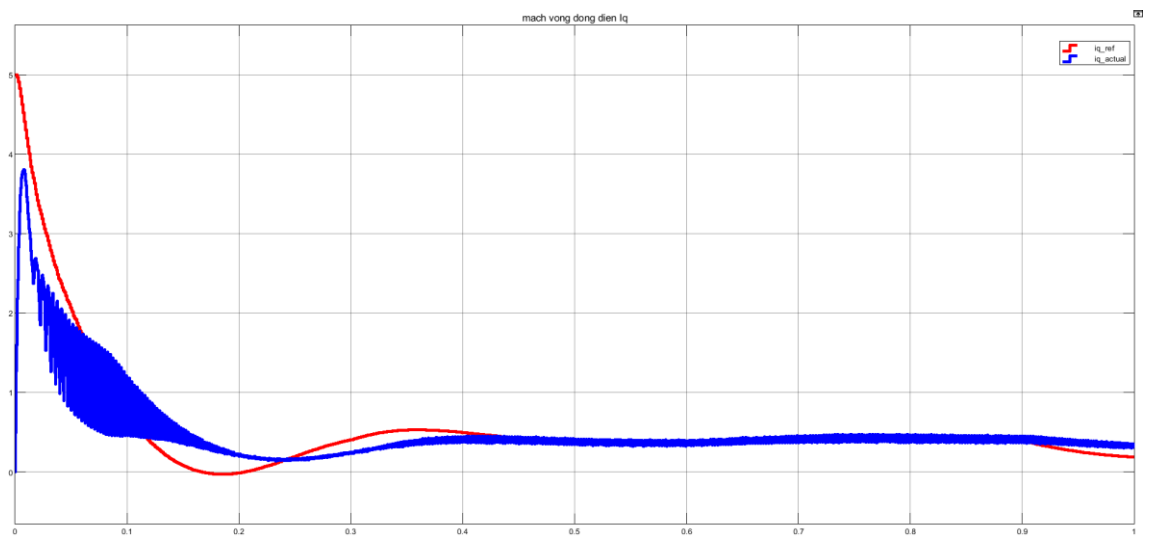
Ta thu được kết quả sau:



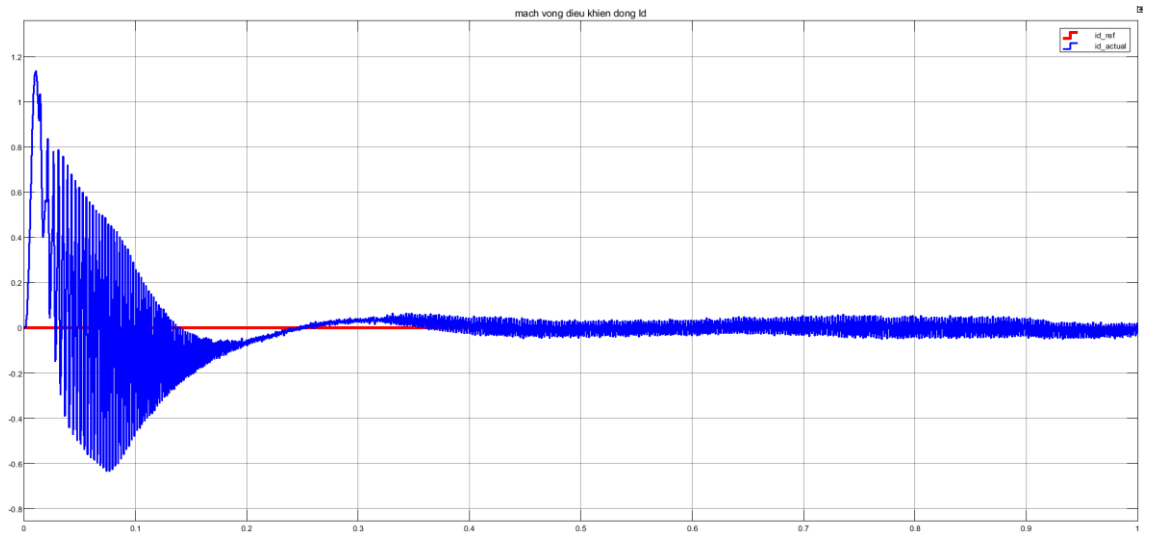
Hình 4.14 Mô men tải thay đổi theo thời gian



Hình 4.15 Tốc độ của roto



Hình 4.16 Dòng Iq



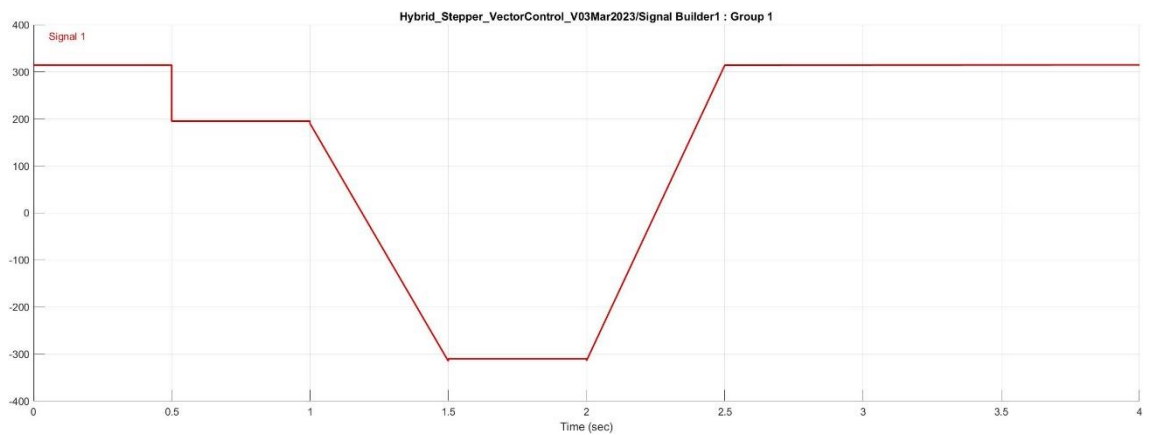
Hình 4.17 Dòng  $i_d$

Dựa vào kết quả, ta thấy tốc độ của động cơ giảm xuống mỗi khi đóng tải và tăng lên khi ta ngắt tải, sau quá trình tốc độ thay đổi đột ngột do ảnh hưởng của mô men tải, tốc độ nhanh chóng được điều chỉnh ổn định lại và bám theo tốc độ đặt. Tương tự là dòng điện  $i_d$ ,  $i_q$  cũng bám sát theo lượng đặt, kết quả mô phỏng tốt.

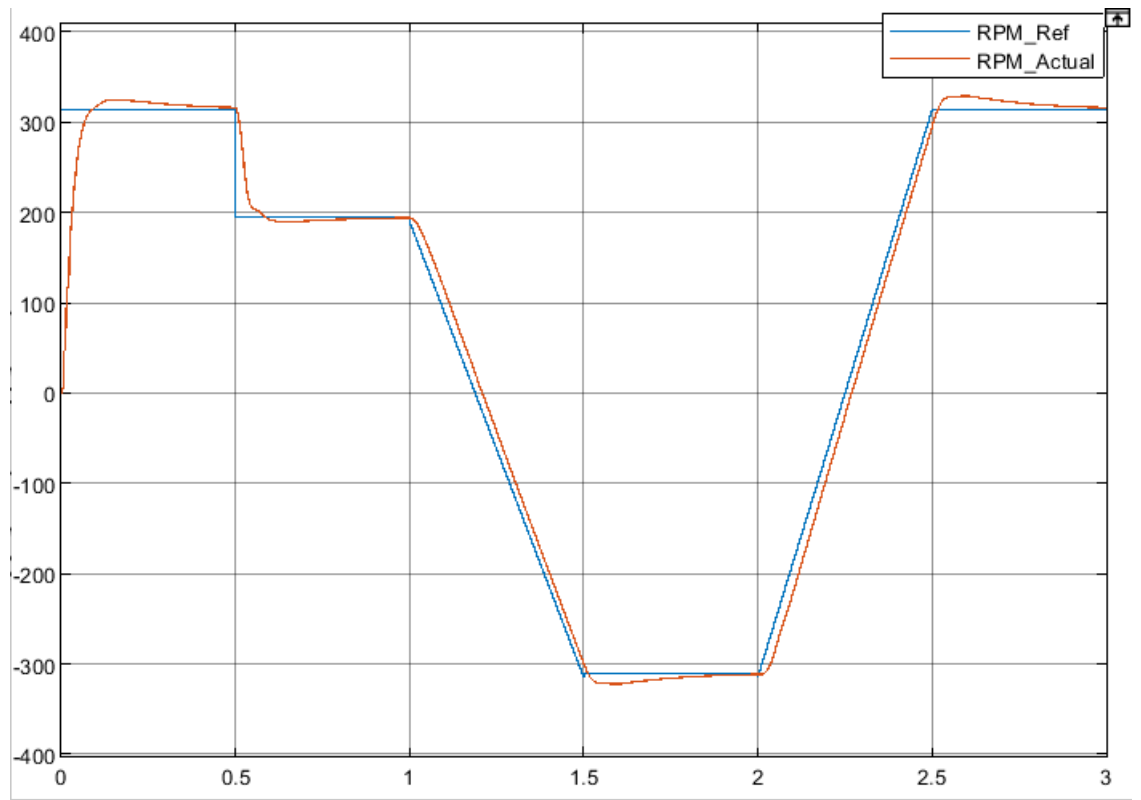
#### 4.4.2 Kịch bản tốc độ thay đổi

Ta chọn kịch bản tốc độ thay đổi: khởi động với tải định mức, tốc độ đặt bằng 60% tốc độ tối đa, sau 0.5s giảm tốc độ đi 33%, sau 1s giảm dần lượng đặt và đảo chiều, sau 2s tăng dần tốc độ và đảo chiều về tốc độ ban đầu.

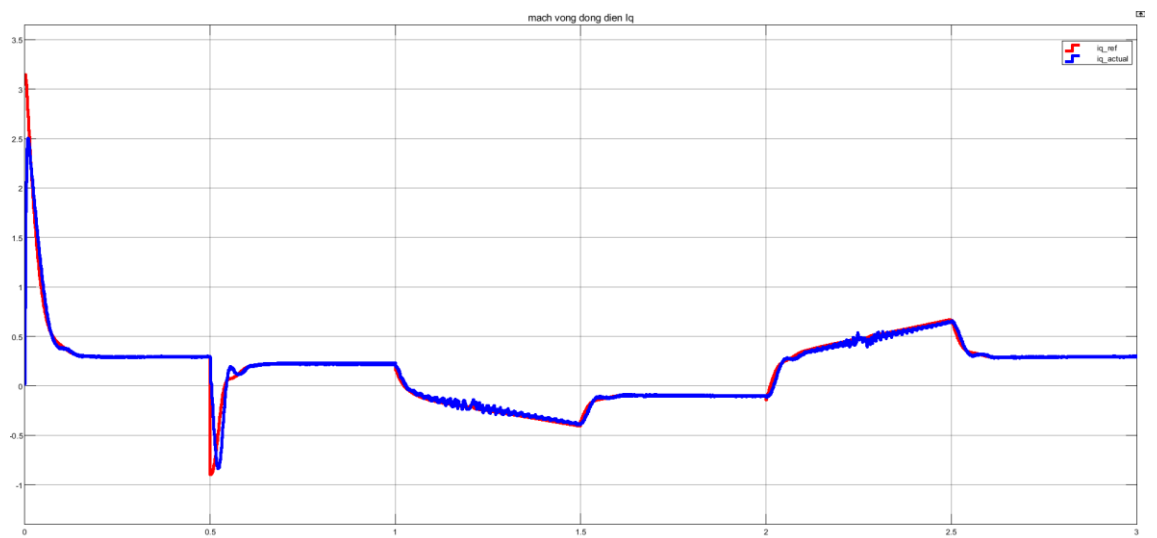
Ta thu được kết quả sau:



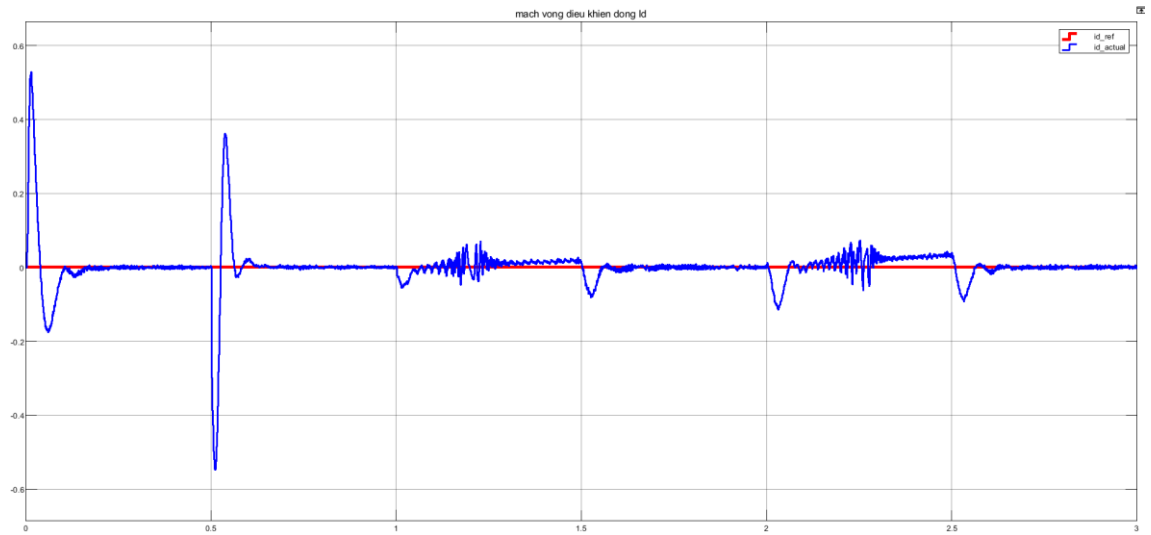
Hình 4.18 Tốc độ thay đổi theo thời gian



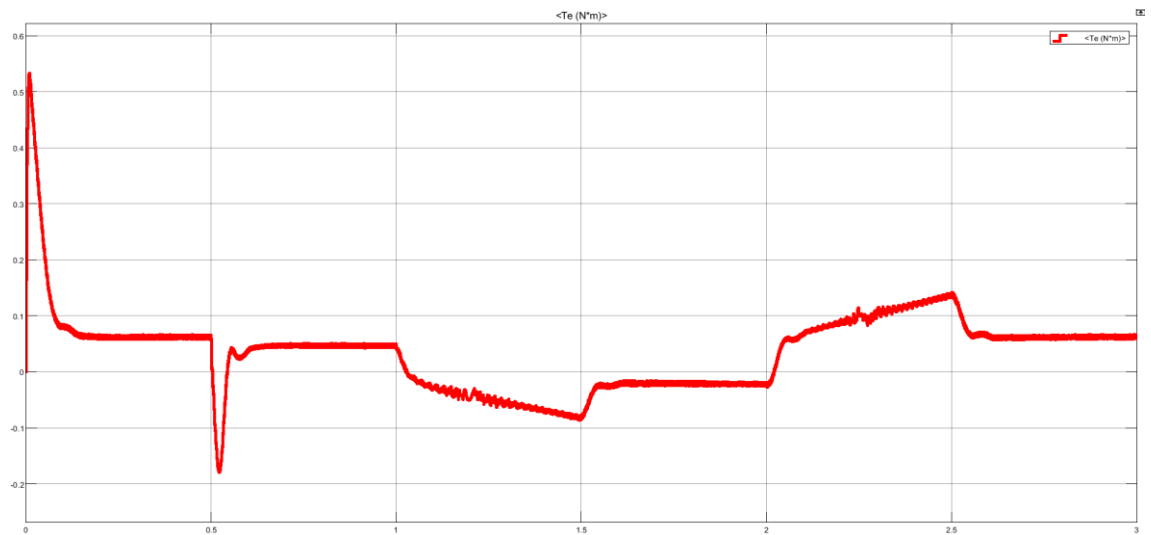
Hình 4.19 Tốc độ thu được sau điều khiển



Hình 4.20 Dòng  $I_d$



Hình 4.21 Dòng  $I_d$



Hình 4.22 Mô men xoắn động cơ

Dựa vào các kết quả ta có thể thấy tốc độ thu được bám sát tốc độ đặt với độ sai lệch tương đối nhỏ. Mỗi khi ta thay đổi tốc độ tải thì mô men động cơ luôn bị thay đổi theo, tuy nhiên sau đó mô men động cơ nhanh chóng hoạt động ổn định trở lại. Dòng khởi động và mô men khởi động không quá lớn so với dòng hoạt động, và kết quả cũng cho thấy các bộ điều khiển PI cho dòng  $i_d$ ,  $i_q$  hoạt động tốt.

#### 4.4.3 Kịch bản mạch vòng điều khiển vị trí:

Thiết kế thêm mạch vòng điều khiển vị trí cho toàn bộ hệ thống, ta có phương trình giữa vị trí góc  $\theta$  và tốc độ quay  $\omega$  của roto như sau:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (4.2)$$

Ta có thể coi sự thay đổi của góc  $\theta$  trong thời gian  $\Delta t$  chính là sai số của góc  $\theta$  trong thời gian  $\Delta t$  hay:

$$e_{\theta} = \theta^* - \theta = \frac{d\theta}{dt} \quad (4.3)$$

Thay (4.3) vào (4.2) ta có:

$$K_{p\_posision} \cdot e_{\theta} = rpm \quad (4.4)$$

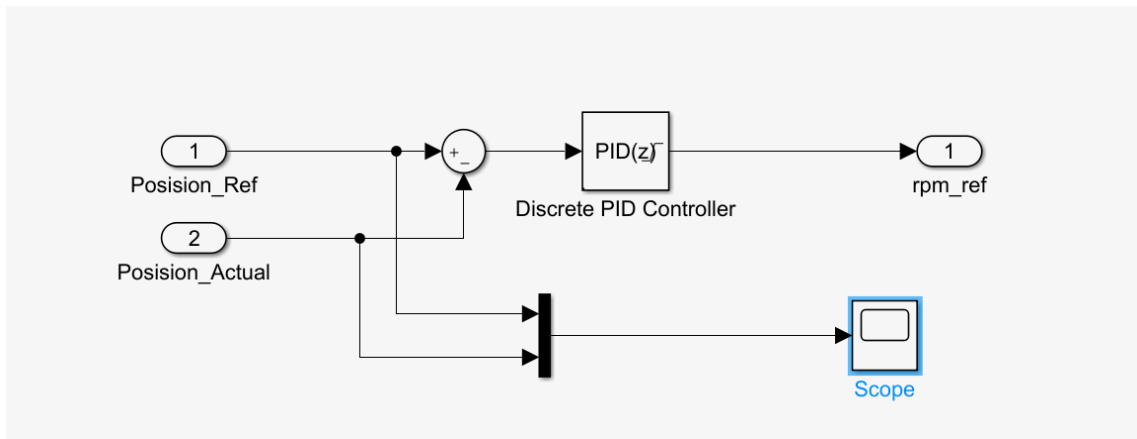
Với  $rpm$  là tốc độ quay của roto đổi về vòng trên phút. Từ đây ta có thể tính ra:

$$K_{p\_posision} = \frac{\omega}{e_{\theta}} = \frac{rpm_{max}}{e_{\theta_{max}}} = \frac{rpm_{max}}{\theta_{max}} = \frac{500}{2 \cdot \pi}$$

Vậy:

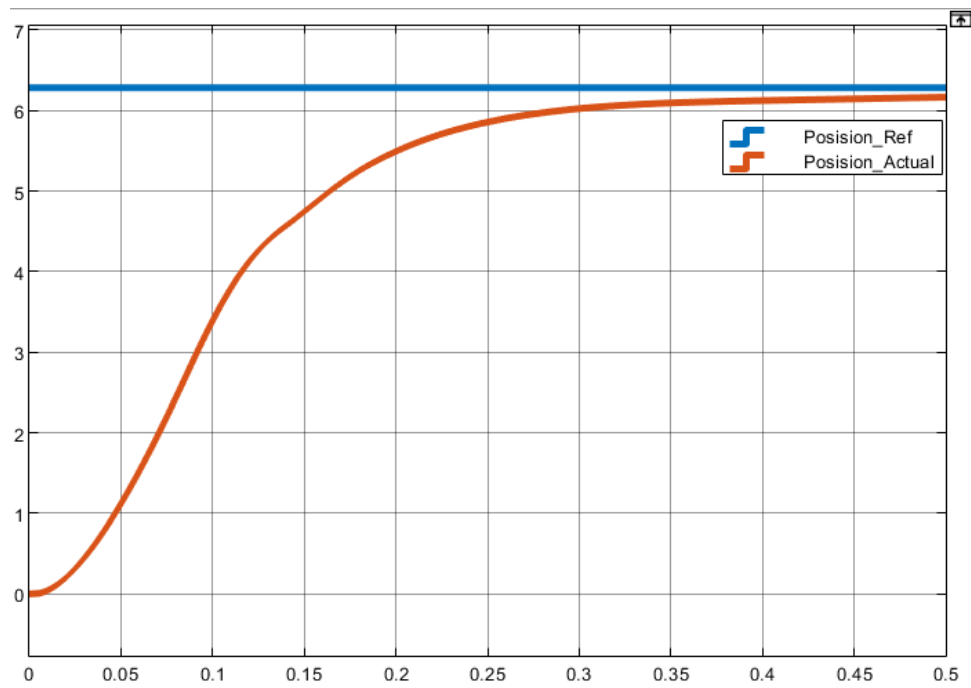
$$K_{p\_posision} = \frac{500}{2 \cdot \pi} \quad (4.5)$$

Ta tiến hành mô phỏng:

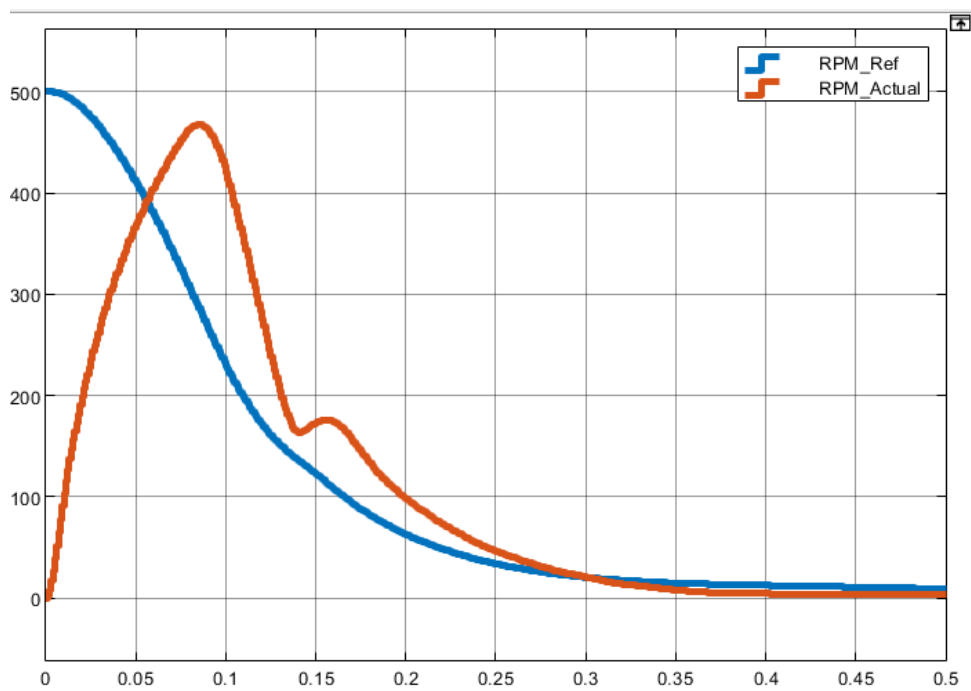


Hình 4.23 Mô phỏng điều khiển vị trí

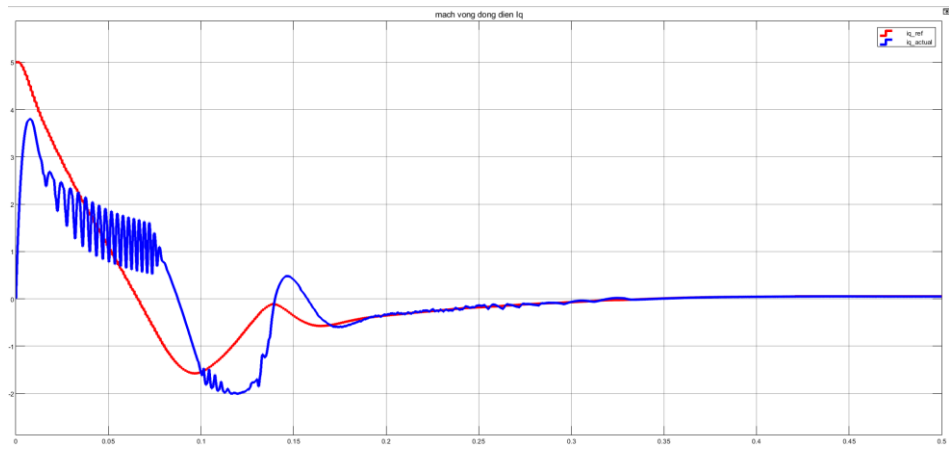




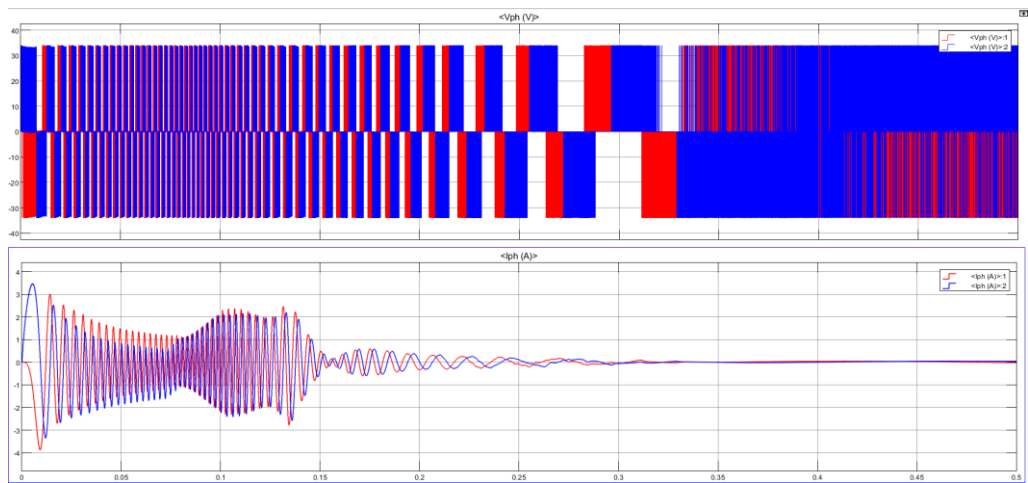
Hình 4.24 Kết quả đáp ứng điều khiển vị trí



Hình 4.25 Kết quả đáp ứng mạch vòng tốc độ



Hình 4.26 Kết quả đáp ứng mạch vòng tốc độ



Hình 4.27 Kết quả điện áp và dòng pha stato

Từ những kết quả thu được ta thấy ở thời gian 0.1s đầu tiên, kết quả thu được còn chưa ổn định, đập mạnh lớn, tuy nhiên độ quá độ không quá lớn. Sau 0.1s đầu, hệ thống dần ổn định và cho ra kết quả tương đối sát với lượng đặt. Kết quả này cho thấy bộ điều khiển vị trí, tốc độ và dòng điện đã hoạt động tốt.

Như vậy, ta có thể kết luận mô phỏng đã diễn ra thành công và cho ra kết quả đúng với lý thuyết trong tất cả các kịch bản mô phỏng,

## CHƯƠNG 5. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

### 5.1 Kết luận

Động cơ bước có ứng dụng rộng trong ngành công nghiệp tự động hoá, đặc biệt là đối với các thiết bị máy móc cần phải có sự chính xác. Chẳng hạn như các loại máy móc công nghiệp hiện đại, giúp phục vụ cho quá trình gia công cơ khí như: Máy cắt công nghệ plasma CNC, máy cắt công nghệ CNC laser,... Vì thế việc nghiên cứu và điều khiển là nhiệm vụ thiết yếu. Đồ án đã thiết kế điều khiển Vector của động cơ bước 2 pha. Điều này có thể tận dụng tốt hơn dòng điện cuộn dây stato và giảm công suất của biến tần, đồng thời tăng hệ số sử dụng công suất nên rất có ứng dụng thực tiễn.

Như vậy qua thời gian làm việc cùng với sự hướng dẫn của TS.Nguyễn Mạnh Linh, em đã hoàn thành được các nhiệm vụ của đồ án:

- + Hiểu được cấu tạo và nguyên lý hoạt động của động cơ bước 2 pha. Xác định được các tham số quan trọng, cần quan tâm của động cơ khi sử dụng cũng như khi mô phỏng.
- + Tìm hiểu và thiết kế được chương trình mô phỏng điều khiển trên Matlab.
- + Mô hình hóa động cơ bước trên hệ tọa độ tĩnh và tọa độ quay từ đó thiết kế điều khiển vector cho động cơ này.
- + Hiệu quả của các bộ điều khiển đã được thể hiện bằng kết quả mô phỏng cho thấy được hiệu quả của các bộ điều khiển khi đạt được yêu cầu với sai lệch nhỏ, đáp ứng tốt ngay cả khi tăng tần số của tín hiệu đặt.

Mặc dù đã hoàn thành đồ án, nhưng do hiểu biết còn nhiều hạn chế nên không tránh khỏi những thiếu sót. Vì thế em mong được sự góp ý của các thầy cô để đồ án của em được hoàn thiện hơn và sớm được đưa vào thực tế.

### 5.2 Hướng phát triển trong tương lai

+ Để tăng tính hữu dụng trong thực tế chúng ta có thể thiết kế thêm mạch vòng điều khiển vị trí góc Rotor, điều khiển momen động cơ hoặc bộ lọc Kalman cho ứng dụng không cảm biến hoặc cải thiện hệ suất bộ điều khiển cho kết quả mô phỏng tốt hơn.

+ Động cơ bước 2 pha có ứng dụng quan trọng và rộng lớn trong các lĩnh vực hiện nay. Bên cạnh đó trong các phòng Lab nghiên cứu khoa học ở trường các thiết bị phân cứng là khá đa dạng. Nên sinh viên có thể thực nghiệm bằng cách lắp thay các bộ driver trên xe tự hành, ballbot, tay máy,... vì động cơ 2 pha dùng cho toàn bộ hệ truyền động của chúng. Sau khi điều khiển được vector của động cơ 2 pha ta có thể tận dụng tốt hơn dòng điện cuộn dây stato và giảm công suất của biến tần, đồng thời tăng hệ số sử dụng công suất, từ đó có thể thử nghiệm và ứng dụng vào các công việc phức tạp hơn.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K. J. H. D. J. L. J. Q. Quanwu WANG, Research on Closed-loop Drive System of Two-phase Hybrid Step Motor Based on SVPWM, Southampton, United Kingdom, 2018.
- [2] M. Jin and H. Li, "Vector Control and SVPWM Strategy of Two-phase Hybrid Stepping Motor," 24 October 2011.
- [3] R. Crowder, Electric Drives and Electromechanical Systems Applications and Control, Southampton, United Kingdom, 2019.
- [4] R. P. R. I. e. A. y. E. I. p. l. U. P. d. Madrid, Modelling and Control of Stepper Motors for High Accuracy Positioning Systems Used in Radioactive Environments, Napoli Federico , 2014.
- [5] R. A. U. F. Q. D. S. C. W. Institute for Power Electronics and Electrical Drives, HIGH-PERFORMANCE FULL-DIGITAL DRIVE SYSTEM FOR HYBRID STEPPER MOTORS, Munich/Germany, 12.03.2019 .
- [6] Y. S. H. P. N. A. S. Saleh Ziaieinejad, Direct Torque Control of Two-Phase Induction and Synchronous Motors, IEEE Transactions on Power Electronics, 29 November 2012.
- [7] R. P. Ruilope, Modelling and Control of Stepper Motors for High Accuracy Positioning Systems Used in Radioactive Environments, Napoli Federico , 2014.
- [8] a. Y. Z. a. Y. L. Xiaolin Hu1, Research on Vector Control and Subdivision Drive Technology of Two-phase Hybrid Stepper Motor Based on SVPWM, Chengdu, China, 2018.
- [9] S. V. E. a. C. U. O. Kenneth C. Odo1, A Model-based PI Controller Tuning and Design for Field Oriented Current Control of Permanent Magnet Synchronous Motor, Nsukka Nigeria, August 2019.