

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC DÂN LẬP HẢI PHÒNG



ISO 9001:2015

TÌM HIỂU HOẠT ĐỘNG CỦA HỆ THỐNG
TRUYỀN ĐỘNG ĐIỆN ĐỘNG CƠ BLDC KHÔNG
CÓ CẢM BIẾN VỊ TRÍ

ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP ĐẠI HỌC HỆ CHÍNH QUY
NGÀNH ĐIỆN TỰ ĐỘNG CÔNG NGHIỆP

HẢI PHÒNG - 2018

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC DÂN LẬP HẢI PHÒNG



ISO 9001:2015

TÌM HIỂU HOẠT ĐỘNG CỦA HỆ THỐNG
TRUYỀN ĐỘNG ĐIỆN ĐỘNG CƠ BLDC
KHÔNG CÓ CẢM BIẾN VỊ TRÍ

ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP ĐẠI HỌC HỆ CHÍNH QUY
NGÀNH ĐIỆN TỬ ĐỘNG CÔNG NGHIỆP

Sinh viên: Trương Quỳnh Lâm

Người hướng dẫn: GS. TSKH. Thân Ngọc Hoàn

HẢI PHÒNG - 2018

Cộng hoà xã hội chủ nghĩa Việt Nam

Độc lập – Tự Do – Hạnh Phúc

-----o0o-----

NHIỆM VỤ ĐỀ TÀI TỐT NGHIỆP

Sinh viên : Trương Quỳnh Lâm – MSV : 1412102058

Lớp : ĐC 1802- Ngành Điện Tự Động Công Nghiệp

Tên đề tài : Tìm hiểu hoạt động của hệ thống truyền động điện
động cơ bldc không có cảm biến vị trí

NHIỆM VỤ ĐỀ TÀI

1. Nội dung và các yêu cầu cần giải quyết trong nhiệm vụ đề tài tốt nghiệp (về lý luận, thực tiễn, các số liệu cần tính toán và các bản vẽ).

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. Các số liệu cần thiết để thiết kế, tính toán

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3. Địa điểm thực tập tốt nghiệp.....:

CÁC CÁN BỘ HƯỚNG DẪN ĐỀ TÀI TỐT NGHIỆP

Người hướng dẫn thứ nhất:

Họ và tên :

Học hàm, học vị :

Cơ quan công tác : Trường Đại học dân lập Hải Phòng

Nội dung hướng dẫn : Toàn bộ đề tài

Người hướng dẫn thứ hai:

Họ và tên :

Học hàm, học vị :

Cơ quan công tác :

Nội dung hướng dẫn :

Đề tài tốt nghiệp được giao ngày tháng năm 2018.

Yêu cầu phải hoàn thành xong trước ngày.....tháng.....năm 2018

Đã nhận nhiệm vụ Đ.T.T.N

Sinh viên

Đã giao nhiệm vụ Đ.T.T.N

Cán bộ hướng dẫn Đ.T.T.N

Trương Quỳnh Lâm

GS. TSKH. Thân Ngọc Hoàn

Hải Phòng, ngày.....tháng.....năm 2018

HIỆU TRƯỞNG

GS.TS.NGUYỄN TRẦN HỮU NGHỊ

PHẦN NHẬN XÉT TÓM TẮT CỦA CÁN BỘ HƯỚNG DẪN

1. Tinh thần thái độ của sinh viên trong quá trình làm đề tài tốt nghiệp.

.....

.....

.....

.....

.....

2. Đánh giá chất lượng của Đ.T.T.N (so với nội dung yêu cầu đã đề ra trong nhiệm vụ Đ.T.T.N, trên các mặt lý luận thực tiễn, tính toán giá trị sử dụng, chất lượng các bản vẽ..)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3. Cho điểm của cán bộ hướng dẫn

(Điểm ghi bằng số và chữ)

Ngày.....tháng.....năm 2018

Cán bộ hướng dẫn chính

(Ký và ghi rõ họ tên)

NHẬN XÉT ĐÁNH GIÁ CỦA NGƯỜI CHĂM PHẢN BIỆN
ĐỀ TÀI TỐT NGHIỆP

1. Đánh giá chất lượng đề tài tốt nghiệp về các mặt thu thập và phân tích số liệu ban đầu, cơ sở lý luận chọn phương án tối ưu, cách tính toán chất lượng thuyết minh và bản vẽ, giá trị lý luận và thực tiễn đề tài.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. Cho điểm của cán bộ chấm phản biện
(*Điểm ghi bằng số và chữ*)

Ngày.....tháng.....năm 2018

Người chấm phản biện

(*Ký và ghi rõ họ tên*)

Mục lục

Lời mở đầu	1
CHƯƠNG 1.	2
ĐỘNG CƠ ĐIỆN MỘT CHIỀU KHÔNG CHỖI THAN (BLDC)	
1.1. GIỚI THIỆU VỀ ĐỘNG CƠ BLDC	2
1.2. CẤU TẠO ĐỘNG CƠ BLDC	4
CHƯƠNG 2	23
MÔ HÌNH TOÁN HỌC VÀ PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG CƠ BLDC	
2.1. MÔ HÌNH TOÁN HỌC	23
2.2. CÁC PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG CƠ BLDC	31
CHƯƠNG 3	48
HOẠT ĐỘNG ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG CƠ BLDC KHÔNG CẢM BIẾN VỊ TRÍ	
3.1. GIỚI THIỆU	48
3.2. ĐẶC ĐIỂM VÀ YÊU CẦU CẢM BIẾN VỊ TRÍ CỦA CÁC ĐỘNG CƠ NAM CHÂM VĨNH CỬU KHÔNG CHỖI THAN	49
3.3. CẢM BIẾN VỊ TRÍ SỬ DỤNG “SĐĐ CẢM ỨNG”	52
3.4. CẢM BIẾN VỊ TRÍ SỬ DỤNG SỰ BIẾN ĐỔI CẢM ỨNG	61
3.5. CÀI ĐẶT VỊ TRÍ DỰA TRÊN TỪ THÔNG MÓC VÒNG	67
KẾT LUẬN	75
TÀI LIỆU THAM KHẢO	76

LỜI MỞ ĐẦU

Cho đến nay động cơ điện một chiều vẫn chiếm một vị trí quan trọng trong hệ điều chỉnh tự động truyền động điện, nó được sử dụng trong hệ thống đòi hỏi có độ chính xác cao, vùng điều chỉnh rộng và quy luật điều chỉnh phức tạp. Cùng với sự tiến bộ của văn minh nhân loại chúng ta có thể chứng kiến sự phát triển rầm rộ kể cả về quy mô lẫn trình độ của nền sản xuất hiện đại. Ở nước ta do nhu cầu công nghiệp hóa hiện đại hóa đất nước nên ngày càng xuất hiện nhiều những dây truyền sản xuất mới có mức độ tự động hóa cao với hệ truyền động hiện đại.

Việc xuất hiện các hệ truyền động hiện đại đã thúc đẩy sự phát triển, nghiên cứu, đào tạo ngành tự động hóa ở nước ta tiếp thu khoa học kỹ thuật hiện đại nhằm tạo ra những hệ truyền động mới và hoàn thiện những hệ truyền động cũ. Trong quá trình học tập tại trường Đại Học Dân Lập Hải Phòng. Với sự giúp đỡ của nhà trường và khoa Điện Dân Dụng và Công Nghiệp em đã được nhận đề tài tốt nghiệp: “Tìm hiểu hoạt động của hệ thống truyền động điện động cơ BLDC không có cảm biến vị trí” do GS.TSKH Thân Ngọc Hoàn hướng dẫn.

Đề án gồm các nội dung sau:

Chương 1: Động cơ một chiều không chổi than.

Chương 2: Mô hình toán học và phương pháp điều khiển động cơ.

Chương 3: Hoạt động điều khiển động cơ BLDC không cảm biến vị trí.

CHƯƠNG 1

ĐỘNG CƠ ĐIỆN MỘT CHIỀU KHÔNG CHỔI THAN (BLDC)

1.1. GIỚI THIỆU VỀ ĐỘNG CƠ BLDC [1]

Động cơ một chiều (ĐCMC) thông thường có hiệu suất cao và các đặc tính của chúng thích hợp với các truyền động servo. Tuy nhiên, hạn chế duy nhất là trong cấu tạo của chúng cần có cổ góp và chổi than, những thứ dễ bị mòn và yêu cầu bảo trì, bảo dưỡng thường xuyên. Để khắc phục nhược điểm này người ta chế tạo loại động cơ không cần bảo dưỡng bằng cách thay thế chức năng của cổ góp và chổi than bởi cách chuyển mạch sử dụng thiết bị bán dẫn (chẳng hạn như biến tần sử dụng transistor công suất chuyển mạch theo vị trí rotor). Những động cơ này được biết đến như là động cơ đồng bộ kích thích bằng nam châm vĩnh cửu hay còn gọi là động cơ một chiều không chổi than BLDC (Brushless DC Motor). Do không có cổ góp và chổi than nên động cơ này khắc phục được hầu hết các nhược điểm của động cơ một chiều có vành góp thông thường.

So sánh BLDC với động cơ một chiều thông thường:

Mặc dù người ta nói rằng đặc tính tĩnh của động cơ BLDC và ĐCMC thông thường hoàn toàn giống nhau, thực tế chúng có những khác biệt đáng kể ở một vài khía cạnh. Khi so sánh hai loại động cơ này về mặt công nghệ hiện tại, ta thường đề cập tới sự khác nhau hơn là sự giống nhau giữa chúng. Bảng 1.1 so sánh ưu nhược điểm của hai loại động cơ này. Khi nói về chức năng của động cơ điện, không được quên ý nghĩa của dây quấn và sự đổi chiều. Đổi chiều là quá trình biến đổi dòng điện một chiều ở đầu vào thành dòng xoay chiều và phân bố một cách chính xác dòng điện này tới mỗi dây quấn ở phân ứng động cơ. Ở động cơ một chiều thông thường, sự đổi chiều được thực hiện bởi cổ góp và chổi than.

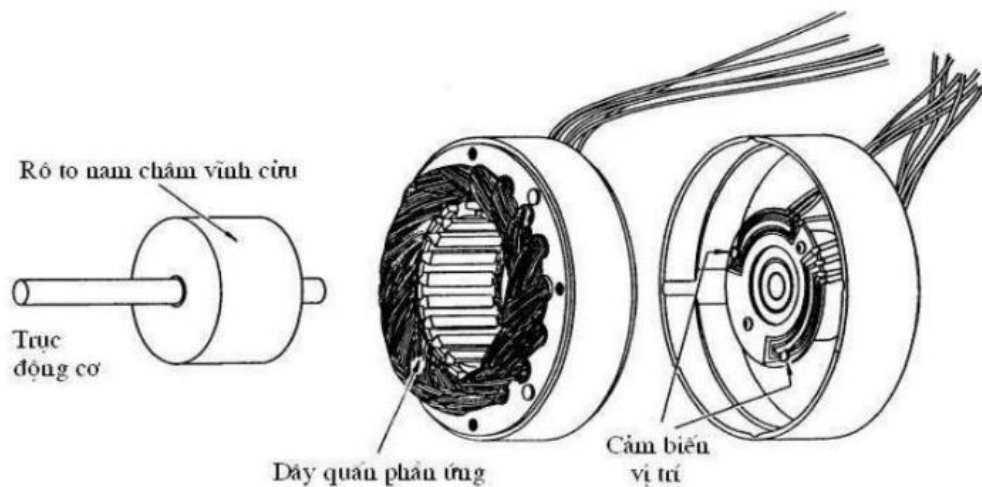
Ngược lại, ở động cơ một chiều không chổi than, đổi chiều được thực hiện bằng cách sử dụng các thiết bị bán dẫn như transistor, MOSFET, GTO, IGBT.

Bảng 1.1: So sánh động cơ BLDC với ĐCMC thông thường

Nội dung	ĐCMC thông thường	ĐCMC không chổi than
Cấu trúc cơ khí	Mạch kích từ nằm trên stato	Mạch kích từ nằm trên rotor
Tính năng đặc biệt	Đáp ứng nhanh và dễ điều khiển	Đáp ứng chậm hơn. Dễ bảo dưỡng (thường không yêu cầu bảo dưỡng)
Sơ đồ nối dây	Nối vòng tròn. Đơn giản nhất là nối Δ	Cao áp :Ba pha nối Y hoặc Δ Bình thường: Dây cuốn 3 pha nối Y có điểm trung tính nối đất hoặc 4 pha. Đơn giản nhất: nối 2 pha
Phương pháp đổi chiều	Tiếp xúc cơ khí giữa chổi than và cổ góp	Chuyển mạch điện tử sử dụng thiết bị bán dẫn như transistor, IGBT...
Phương pháp xác định vị trí rotor	Tự động xác định bằng chổi than	Sử dụng cảm biến vị trí :phần tử Hall, cảm biến quang học (optical encoder)
Phương pháp đảo chiều	Đảo chiều điện áp nguồn (cấp cho phản ứng hoặc mạch kích từ)	Sắp xếp lại thứ tự của các tín hiệu logic

1.2. CẤU TẠO ĐỘNG CƠ BLDC

Cấu tạo của động cơ một chiều không chổi than rất giống một loại động cơ xoay chiều đó là động cơ xoay chiều đồng bộ kích thích bằng nam châm vĩnh cửu. Hình 1.1 minh họa cấu tạo của động cơ một chiều không chổi than ba pha điển hình:

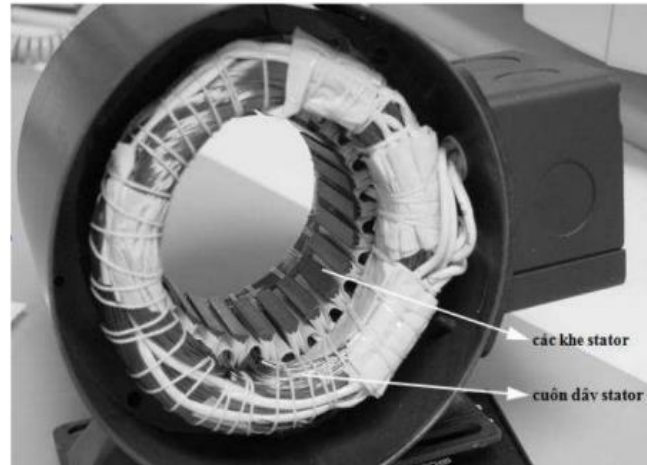


Hình 1.1: Các thành phần cơ bản của động cơ BLDC

Dây quấn stator tương tự như dây quấn stator của động cơ xoay chiều nhiều pha và rotor bao gồm một hay nhiều nam châm vĩnh cửu. Việc xác định vị trí rotor được thực hiện thông qua cảm biến vị trí, hầu hết các cảm biến vị trí rotor (cực từ) là phần tử Hall, tuy nhiên cũng có một số động cơ sử dụng cảm biến quang học. Mặc dù hầu hết các động cơ chính thống và có năng suất cao đều là động cơ ba pha, động cơ một chiều không chổi than hai pha cũng được sử dụng khá phổ biến vì cấu tạo và mạch truyền động đơn giản.

1.2.1. Stator

Khác với động cơ một chiều thông thường, stator của động cơ một chiều không chổi than chứa dây quấn phản ứng. Dây quấn phản ứng có thể là hai pha, ba pha hay nhiều pha nhưng thường là dây quấn ba pha (hình 1.2). Dây quấn ba pha có hai sơ đồ nối dây, đó là nối theo hình sao Y hoặc hình tam giác Δ .



Hình 1.2: Stator của động cơ BLDC

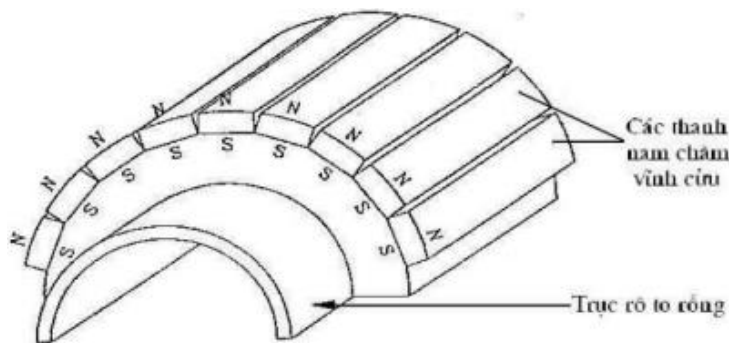
Stator của động cơ BLDC được cấu tạo từ các lá thép kỹ thuật điện với các cuộn dây được đặt trong các khe cắt xung quanh chu vi phía trong của stator. Theo truyền thống cấu tạo stator của động cơ BLDC cũng giống như cấu tạo của các động cơ cảm ứng khác. Tuy nhiên, các bố dây được phân bố theo cách khác. 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 bố dây nối liền với nhau. Các bố 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 bồi dây trong cuộn dây stator tạo nên sự khác nhau của hình dáng sức phản điện động.

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.

1.2.2. Rotor

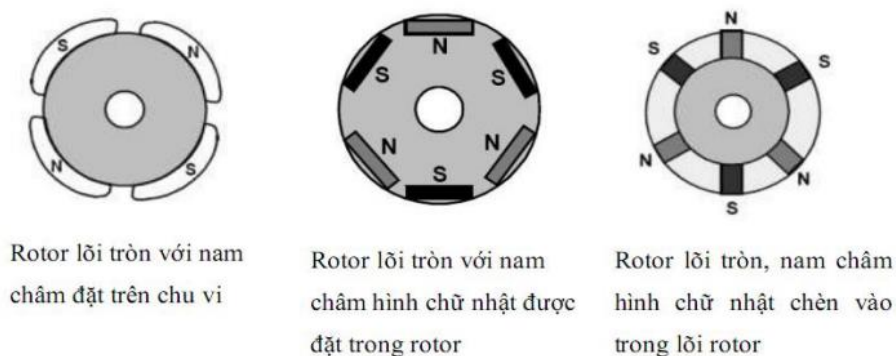
Được gắn vào trục động cơ và trên bề mặt rotor có dán các thanh nam châm vĩnh cửu. Ở các động cơ yêu cầu quán tính của rotor nhỏ, người ta thường chế tạo trục của động cơ có dạng hình trụ rỗng. Rotor được cấu tạo từ các nam châm vĩnh cửu. Số lượng đôi cực dao động từ 2 đến 8 với các cực Nam (S) và Bắc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



Hình 1.3: Rotor 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 từ thông 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.



Hình 1.4: Các dạng Rotor của động cơ một chiều không chổi than

1.2.3. Cảm biến vị trí rotor [2]

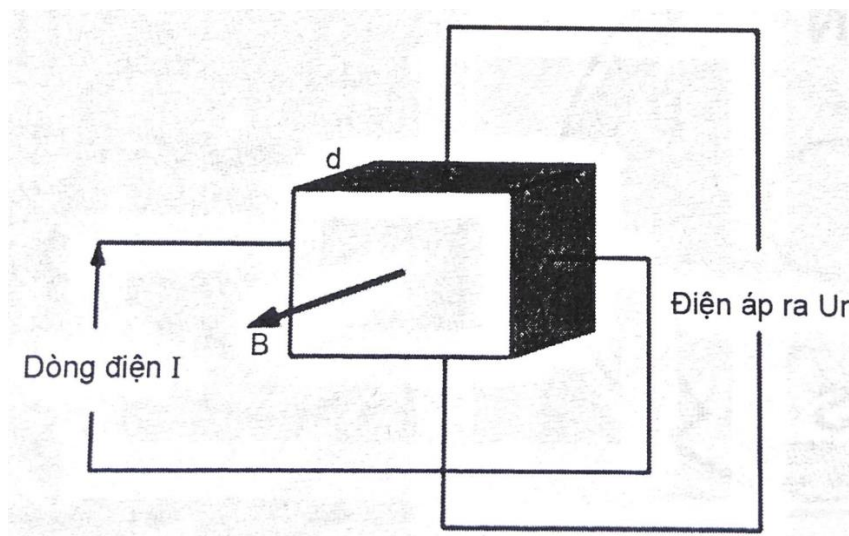
Như chúng ta đã thấy đổi chiều dòng điện căn cứ vào vị trí của từ thông rotor do đó vấn đề xác định vị trí từ thông rotor là rất quan trọng. Để xác định vị trí từ thông rotor ta dùng các thiết bị cảm biến. Có những thiết bị cảm biến sau:

- Cảm biến Hall;
- Cảm biến từ trở MR (magnetoresistor sensor);
- Đèn led hoặc transistor quang.

1.2.3.1. Cảm biến Hall

Trong động cơ BLDC sử dụng cảm biến vị trí hiệu ứng Hall (gọi tắt là cảm biến Hall). Hiệu ứng Hall được E.H.Hall tìm ra năm 1879 và được mô tả như sau: khi một dây dẫn điện đặt trong một từ trường, từ trường sẽ tác động một lực lên các điện tích đang chuyển động trong dây điện và có khuynh hướng đẩy chúng sang một bên của dây dẫn. Điều này rất dễ hình dung khi dây dẫn có dạng

tấm mỏng. Sự tích tụ các điện tích ở một bên dây dẫn làm xuất hiện điện áp giữa hai mặt của dây dẫn. Điện áp này có độ lớn tỉ lệ với cường độ từ trường và cường độ dòng điện qua dây dẫn.



Hình 1.5. Mô hình phần tử cảm biến Hall

$$U_r = (K_h IB) / d$$

Các cảm biến vị trí rotor có nhiệm vụ cung cấp thông tin về vị trí của rotor cho mạch điều khiển cấp điện cho các cuộn dây stato. Cần chú ý là Hall sensor được gắn trên stato của BLDC chứ không phải trên rotor.

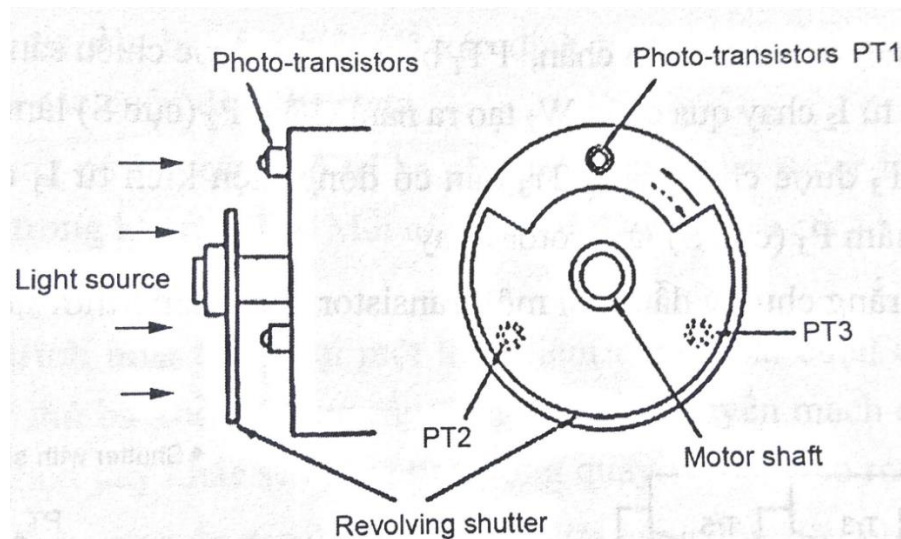
Việc gắn các cảm biến Hall trên stato là một quá trình phức tạp và yêu cầu độ chính xác cao. Việc lắp các cảm biến Hall trên stato không chính xác sẽ dẫn đến những sai số khi xác định vị trí rotor. Để khắc phục điều này, một số động cơ có thêm các nam châm phụ trên rotor để phục vụ cho việc xác định vị trí rotor. Các nam châm phụ này được gắn như các nam châm chính nhưng nhỏ hơn và thường được gắn trên phần trục rotor nằm ngoài các cuộn dây stato để tiện cho việc hiệu chỉnh. Kết cấu như vậy giống như cơ cấu chổi than- cổ góp trong động cơ một chiều truyền thống.

1.2.3.2. Bộ cảm biến từ trở (MR)

Từ thông làm thay đổi điện trở mạch, với phương pháp này có thể phát hiện chính xác từ thông.

1.2.3.3. Dùng đèn LED transistor quang và màn chắn (shutter)

Trên hình 1.6 biểu diễn hệ thống xác định vị trí từ thông dùng transistor quang hay màn chắn



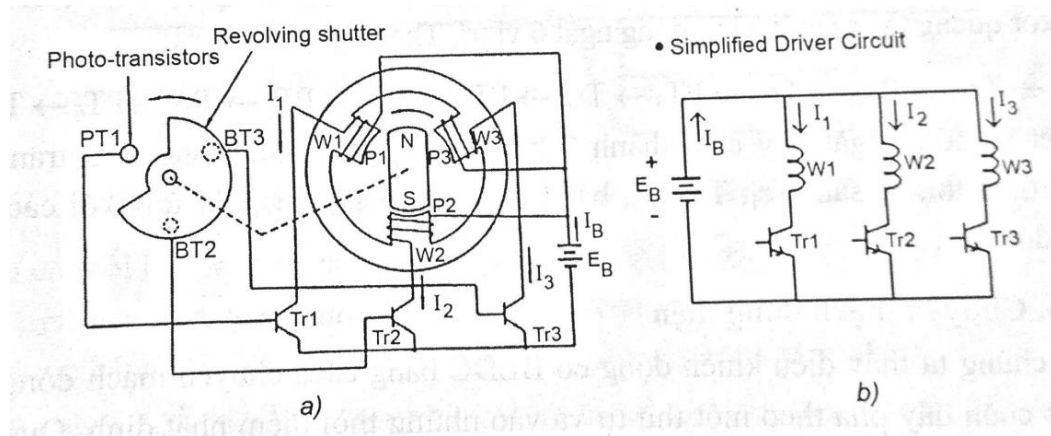
Hình 1.6. Thiết bị cảm biến vị trí rotor dùng quang

Hoạt động của nó như sau: Một transistor PT_1 ở trạng thái dẫn thì 2 transistor còn lại ở trạng thái tắc (PT_2 và PT_3).

Trên hình 1.7 trình bày hoạt động cụ thể của động cơ truyền động BLDC dùng transistor quang để phát hiện vị trí từ thông. Trong đó hình 1.7a là sơ đồ nguyên lý, còn hình 1.7b là sơ đồ tương đương.

Từ hình 1.7a ta thấy 3 cuộn dây stato một đầu được nối với nguồn DC, đầu còn lại nối với 1 transistor quang. Phần quang học (PY) của các transistor này được gắn trên một màn che trong đó diện tích che phủ của màn che chỉ là

240° như vậy tại một thời điểm luôn chỉ có một phần tử quang PT của một transistor được chiếu sáng, 2 transistor còn lại không được chiếu sáng. Transistor được chiếu sáng sẽ dẫn, 2 transistor còn lại không được chiếu sáng sẽ không dẫn.



Hình 1.7.a) Sơ đồ nguyên lý của động cơ truyền động BLDC

b) Sơ đồ tương đương của động cơ truyền động BLDC

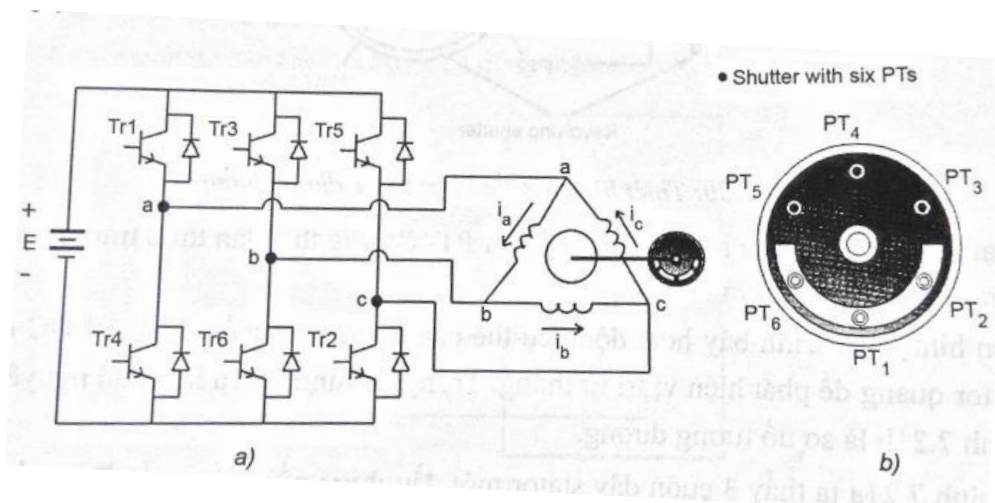
Hoạt động hệ thống sẽ như sau:

(1) PT₁ được chiếu sáng làm cho Tr₁ dẫn có dòng điện kích từ I₁ chạy qua cuộn W₁ tạo ra nam châm P₁ (cực S) làm rotor quay.

(2) Khi rotor quay kéo theo màn chắn, PT₁ bị che, PT₂ được chiếu sáng, Tr₂ dẫn điện có dòng điện kích từ I₂ chạy qua cuộn W₂ tạo ra nam châm P₂(cực S) làm rotor quay.

(3) Bây giờ PT₃ được chiếu sáng Tr₃ dẫn có dòng điện kích từ I₃ chạy qua cuộn W₃ tạo ra nam châm P₃ (cực S) làm rotor quay.

Chúng ta thấy rằng chu kỳ dẫn mỗi transistor cũng đồng thời là mỗi cuộn dây là 120°.



Hình 1.8.Sơ đồ nguyên lý của động cơ BLDC điều khiển bằng transistor quay

Trên hình 1.8a là sơ đồ nguyên lý của động cơ BLDC được điều khiển bằng transistor quang. Mạch điện tử công suất gồm 6 transistor mắc thành cầu đối xứng. Ba cuộn dây stator được nối tam giác. Trên rotor gắn mạch tạo tín hiệu điều khiển động cơ. Hình 1.8b cách tạo màn chắn và gắn các phần tử quang. Màn chắn có 6 lỗ, ở đó được gắn 6 phần tử quang như vậy mỗi phần tử quang cách nhau một góc 60° . Trạng thái 6 transistor quang tạo ra một bảng đóng ngắt 6 vị trí. Theo nguyên tắc sau:

$$PT_1 \rightarrow Tr_1, \rightarrow PT_2 \rightarrow Tr_2, \rightarrow PT_3 \rightarrow Tr_3, \rightarrow PT_4 \rightarrow Tr_4, \rightarrow PT_5 \rightarrow Tr_5, \rightarrow PT_6 \rightarrow Tr_6.$$

Thiết bị đóng ngắt này chia thành 2 bảng đóng ngắt, mỗi bảng là 3 transistor quang theo thứ tự sau: Tr_1, Tr_3, Tr_5 , bảng thứ 2 gồm Tr_2, Tr_4, Tr_6 ứng với cách nối của sơ đồ cầu.

1.2.4. Chuyển mạch dòng điện

Như chúng ta thấy điều khiển động cơ BLDC bằng cách chuyển mạch dòng điện giữa các cuộn dây pha theo một thứ tự và vào những thời điểm nhất định. Quá trình này gọi là quá trình chuyển mạch dòng điện.

Động cơ BLDC có ba cảm biến Hall được đặt trên stato. Khi các cực của nam châm trên rotor chuyển động đến vị trí cảm biến Hall thì đầu ra của cảm biến có mức logic cao hoặc thấp, tùy thuộc vào cực nam châm là N hay S. Dựa vào tổ hợp các tín hiệu logic của ba cảm biến để xác định trình tự và thời điểm chuyển mạch dòng điện giữa các cuộn dây pha stato.

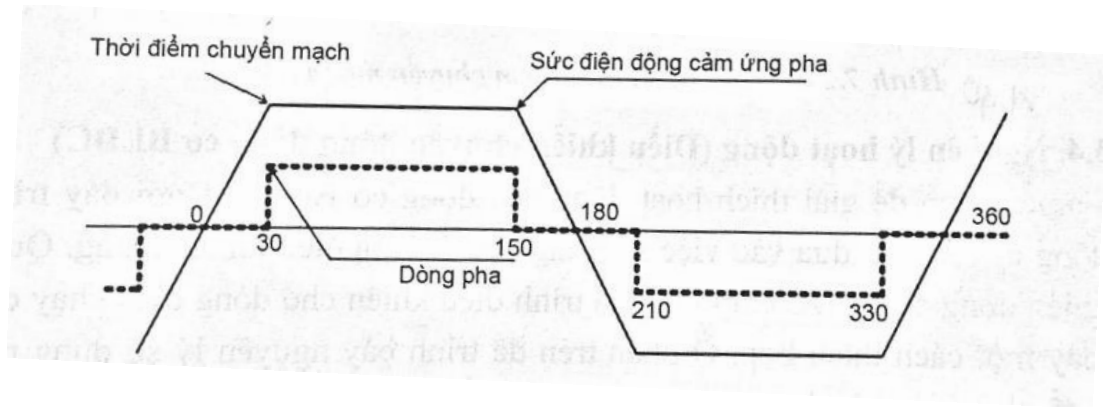
Thông thường có hai cách bố trí ba cảm biến Hall trên stator là bố trí lệch nhau 60° hoặc 120° trong không gian. Mỗi cách bố trí đó sẽ tạo ra các tổ hợp tín hiệu logic khác nhau trong khi rotor quay.

Trong quá trình hoạt động, tại một thời điểm chỉ có hai cuộn dây pha được cấp điện, cuộn dây thứ 3 không được cấp điện, và việc chuyển mạch dòng điện từ cuộn dây này sang cuộn dây khác sẽ tạo ra từ trường quay và làm cho rotor quay theo.

Như vậy, thứ tự chuyển mạch dòng điện giữa các cuộn dây pha phải căn cứ vào chiều quay của rotor.

Thời điểm chuyển mạch dòng điện từ pha này sang pha khác được xác định sao cho momen đạt giá trị lớn nhất và đập mạch momen do quá trình chuyển mạch dòng điện là nhỏ nhất.

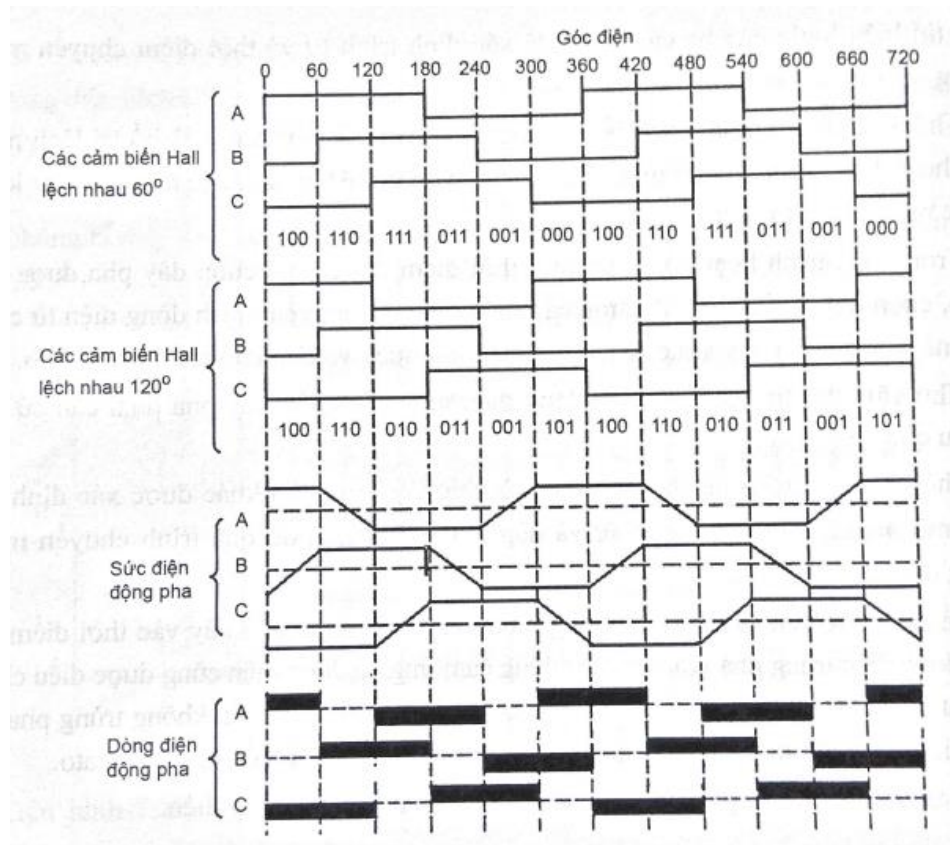
Để đạt được yêu cầu trên, ta mong muốn cấp điện cho cuộn dây vào thời điểm sao cho dòng điện trùng pha với SĐĐ cảm ứng và dòng điện cũng được điều chỉnh để đạt biên độ không đổi trong khoảng có độ rộng 120° điện. Nếu không trùng pha với SĐĐ thì dòng điện cũng sẽ có giá trị lớn và gây thêm tổn hao trên stator.



Hình 1.9. Sự trùng pha giữa SĐĐ cảm ứng và dòng điện

Do có mối liên hệ giữa SĐĐ cảm ứng pha và vị trí của rotor như mô tả ở phần trên nên việc xác định thời điểm cấp điện cho các cuộn dây còn có thể thực hiện được bằng việc xác định vị trí của rotor nhờ các cảm biến vị trí.

Trên hình 1.10 biểu diễn trình tự và thời điểm chuyển mạch dòng điện của động cơ BLDC. Quan sát hình trên ta thấy, thời điểm chuyển mạch dòng điện là thời điểm mà một trong ba tín hiệu cảm biến Hall thay đổi mức logic. Cũng từ hình trên thấy rằng trong một chu kỳ điện có sáu sự chuyển mức logic của ba cảm biến Hall. Do đó trình tự chuyển mạch này gọi là trình tự chuyển mạch sáu bước động cơ BLDC.



Hình 1.10. Trình tự và thời điểm chuyển mạch dòng điện

1.2.5. Nguyên lý hoạt động [2]

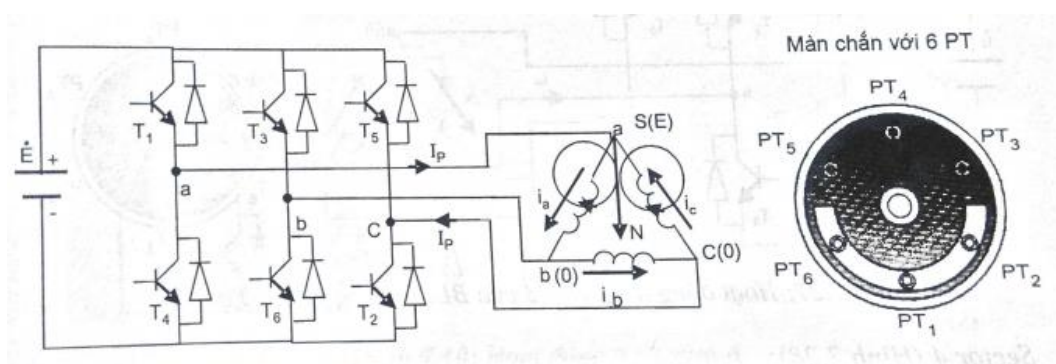
Có nhiều cách để giải thích hoạt động của động cơ BLDC. Dưới đây trình bày hoạt động của BLDC dựa vào việc sử dụng các thiết bị điều khiển quang. Quá trình điều khiển động cơ BLDC chính là quá trình điều khiển cho dòng điện chạy qua các cuộn dây một cách thích hợp. Ở phần trên đã trình bày nguyên lý sử dụng phần tử quang để phát hiện vị trí rotor, ở đây chúng ta bàn đến việc sử dụng loại cảm biến này để điều khiển hoạt động của động cơ.

Trên hình 1.11 là sơ đồ động cơ BLDC gồm 3 cuộn dây nối tam giác được nối với nguồn một chiều qua bộ chuyển mạch điện tử. Mạch điện tử gồm 6 transistor quang nối với 6 đèn led tương ứng đặt ở một màn che, trong đó điện

tích che phủ của màn là 180° , như vậy tại một thời điểm luôn chỉ có 3 phần tử quang được chiếu sáng, 3 transistor nối với nó không dẫn điện. Màn chắn được gắn vào rotor, khi rotor quay màn chắn quay theo làm thay đổi trạng thái sáng tối của đèn LED và do đó trạng thái thông. Hoạt động của bộ chuyển mạch gồm 6 sector.

1.2.5.1. Điều khiển quay thuận

Sector 1 (hình 1.11):

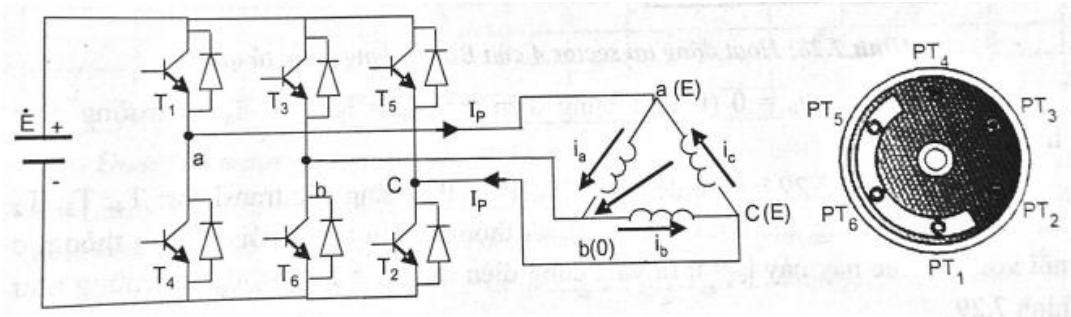


Hình 1.11. Hoạt động tại sector 1 của BLDC dùng phần tử quang

Ở vị trí này PT_6, PT_1 và PT_2 được chiếu sáng ứng với nó là các transistor T_6, T_1 và T_2 dẫn điện. Khi T_1 dẫn thì điểm a nối với $+E$, T_6 dẫn điểm b nối với $-E$ hay ta gọi là điểm 0, T_2 dẫn điểm c nối với điểm 0.

Từ hình vẽ thấy: $i_b = 0$ (vì điểm b và điểm c cùng điện thế), $i_a = i_p$ còn $i_c = -i_p$ (i_p là dòng trong dây dẫn, coi dòng chạy đến cuộn dây là dương, dòng từ cuộn dây chạy về nguồn là âm).

Sector 2 (hình 1.12): Ở vị trí này PT_1, PT_6 và PT_5 sáng ứng với nó là các transistor.

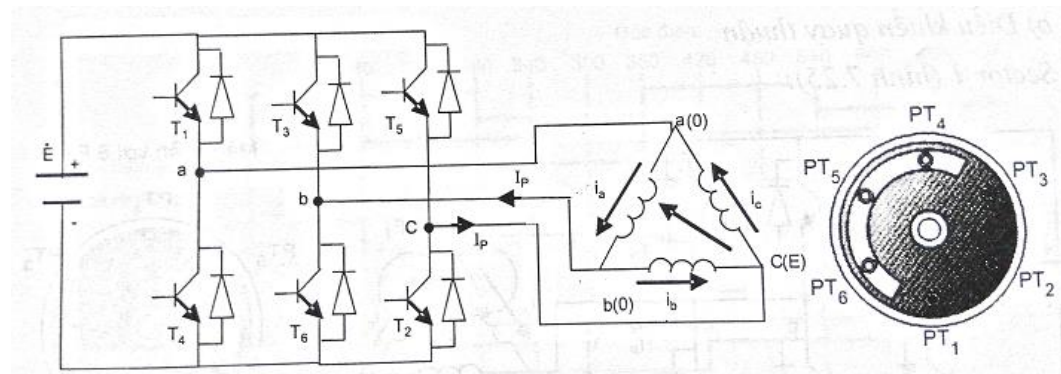


Hình 1.12. Hoạt động tại sector 2 của BLDC dùng phần tử quang

T_1 , T_6 và T_5 dẫn điện. T_1 dẫn điểm a nối với $+E$, T_6 dẫn điểm b nối với 0, T_2 dẫn điểm c nối với điểm 0.

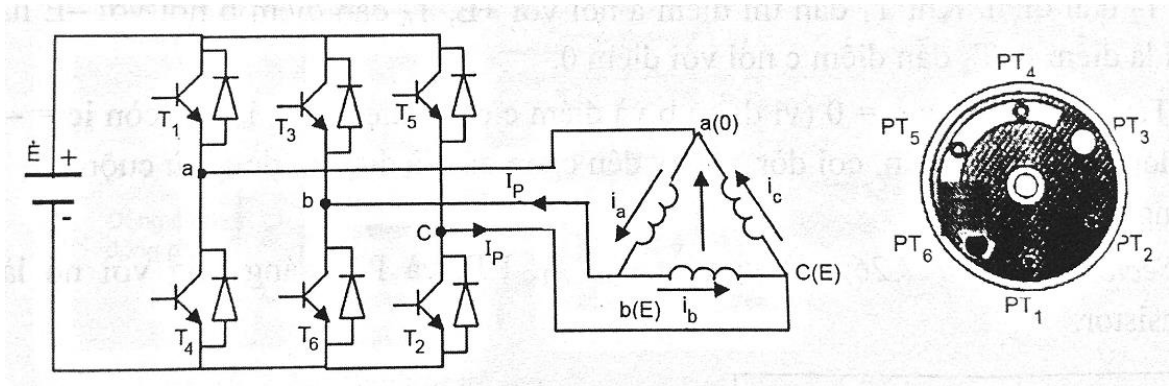
Lúc này $a(E)$, $c(E)$ còn $b(0)$ dòng $i_c=0$ vì a và c cùng điện thế, $i_a=i_p$, còn $i_b=-i_p$, từ trường có dạng như hình 1.12.

Sector 3 (hình 1.13): Ở vị trí này các đèn LED sau đây sáng: PT_6 , PT_5 , PT_4 , các transistor sau đây thông: T_6 , T_5 , T_4 , a nối với (0), b nối với (0) còn c nối với $+E$ lúc này $i_a=0$ (b và a cùng điện thế, $i_c=i_p$, $i_b=-i_p$, từ trường như hình 1.13.



Hình 1.13. Hoạt động tại sector 3 của BLDC dùng phần tử quang

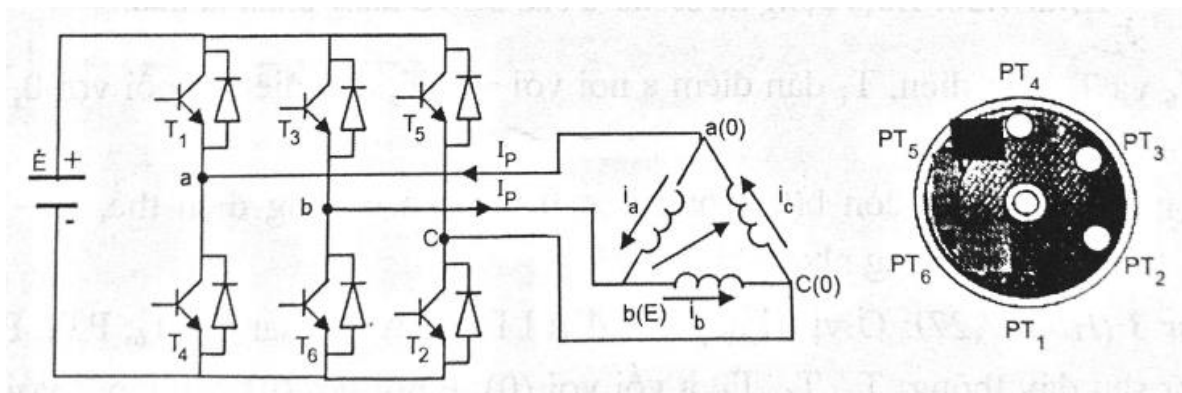
Sector 4 (hình 1.14): Ở vị trí này các đèn LED sau đây sáng: PT_5 , PT_4 , PT_3 , các transistor: T_5 , T_4 , T_3 thông do đó: a nối với (0), b nối với $+E$ còn c nối với $+E$.



Hình 1.14. Hoạt động tại sector 4 của BLDC dùng phần tử quang

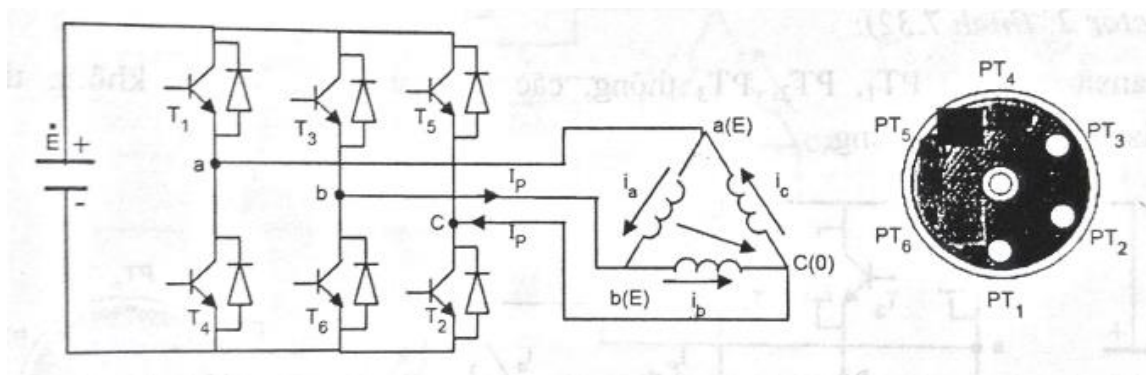
Do vậy: Lúc này $i_b=0$ (b và c cùng điện thế), $i_c=i_p$, $i_a=-i_p$, từ trường như hình 1.14.

Sector 5 (hình 1.15): Các đèn led PT_4 , PT_3 , PT_2 sáng, các transistor: T_4 , T_3 , T_2 thông. Khi T_4 thông, điểm a nối với (0), T_3 thông, điểm b nối với +E, T_2 thông, điểm c nối với (0). Lúc này $i_c=0$ (a và c cùng điện thế), $i_b=i_p$, $i_a=-i_p$, từ trường như hình 1.15.



Hình 1.15. Hoạt động tại sector 5 của BLDC dùng phần tử quang

Sector 6 (hình 1.16): Các đèn led PT_3 , PT_2 , PT_1 sáng, các transistor: T_3 , T_2 , T_1 thông dẫn điện.



Hình 1.16. Hoạt động tại sector 6

Khi T3 thông, điểm b nối với +E, T₂ thông, điểm c nối với 0, T₁ thông, điểm a nối với +E, vậy có: $i_a=0$ (a và b cùng điện thế), $i_b=i_p$, $i_c=-i_p$, từ trường như hình 1.16.

Ở bảng 1.1 là trạng thái đóng mở các transistor khi điều khiển quay thuận.

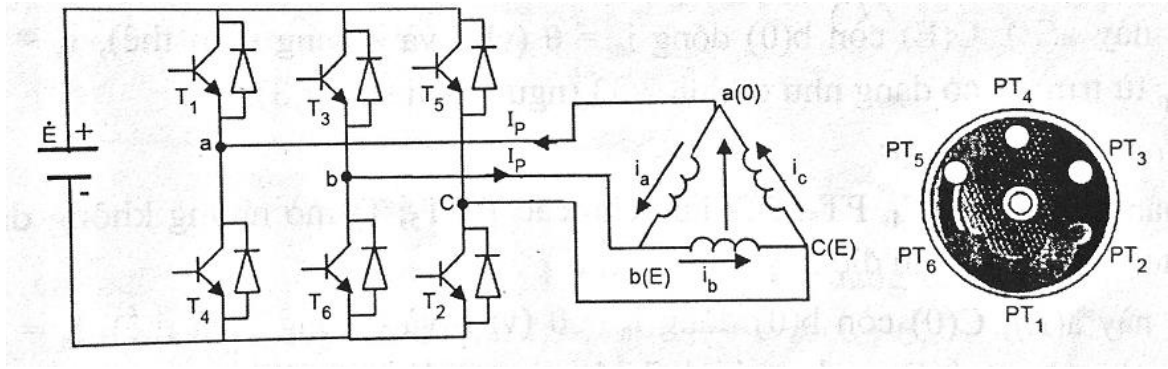
Bảng 1.1. Bảng đóng mở các transistor khi điều khiển chiều quay thuận

Van điện tử Sector	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
1	1	1	0	0	0	1
2	1	0	0	0	1	1
3	0	0	0	1	1	1
4	0	0	1	1	1	0
5	0	1	1	1	0	0
6	1	1	1	0	0	0

1.2.5.2. Điều khiển động cơ quay theo chiều ngược

- Lưu ý: Ở phần này khi phân tử transistor quang sáng thì transistor nối tương ứng lại không dẫn, các transistor nối với các phân tử không sáng lại dẫn.

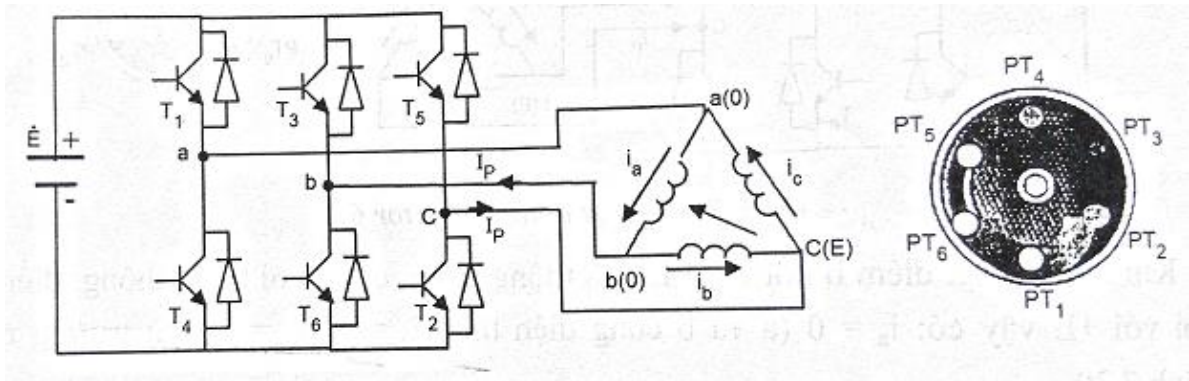
Sector 1' (hình 1.17): Các phân tử quang PT₁, PT₂, PT₆ thông, các transistor T₁, T₂, T₆ tắt, T₄, T₅, T₃ thông.



Hình 1.17. Hoạt động tại sector 1'

Lúc này $a(0)$, $c(0)$ còn $b(E)$ dòng $i_b=0$ vì a và c cùng điện thế, $i_a=-i_p$, còn $i_b=i_p$ từ trường có dạng như hình 1.17 (ngược với sector 1).

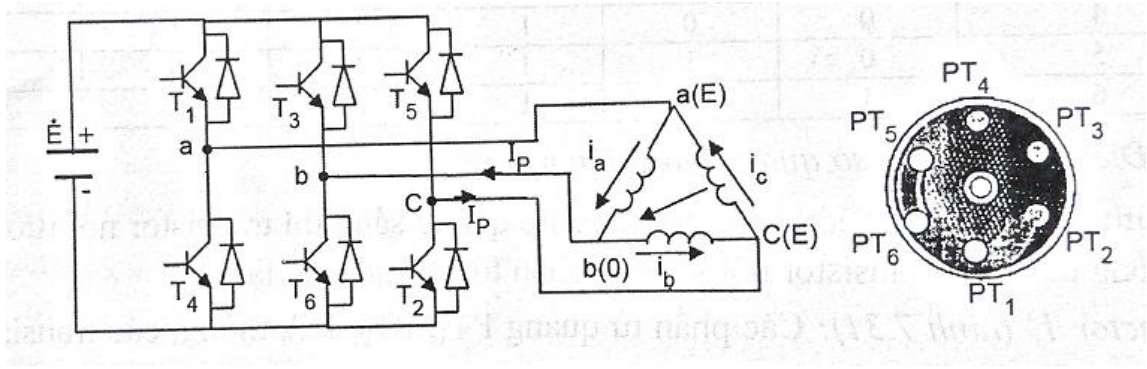
Sector 2' (hình 1.18): Phần tử quang PT₁, PT₂, PT₃ thông, các transistor T₁, T₂, T₃ không thông, transistor T₄, T₅, T₆ thông



Hình 1.18. Hoạt động tại sector 2'

Lúc này $a(0)$, $c(E)$ còn $b(0)$ dòng $i_a=0$ (vì a và b cùng điện thế), $i_b=-i_p$, còn $i_a=i_p$ từ trường có dạng như hình vẽ (ngược với sector 2).

Sector 3' (hình 1.19): Phần tử quang PT₄, PT₂, PT₃ mở nhưng không dẫn điện, các transistor T₁, T₅, T₆ dẫn điện

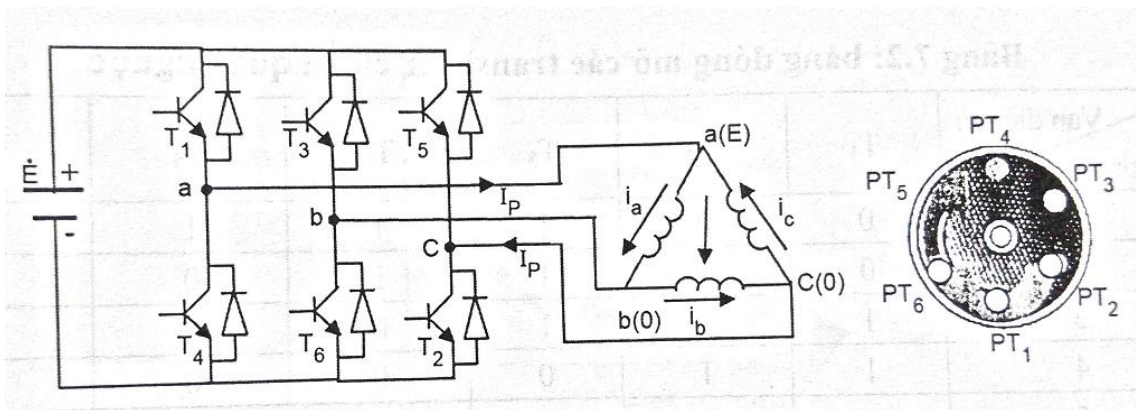


Hình 1.19. Hoạt động tại sector 3'

Lúc này $a(E)$, $c(E)$, còn $b(0)$ dòng $i_c=0$ (a và c cùng điện thế), $i_a=i_p$, còn $i_c=-i_p$ từ trường có dạng như hình 1.19 (ngược với sector 3).

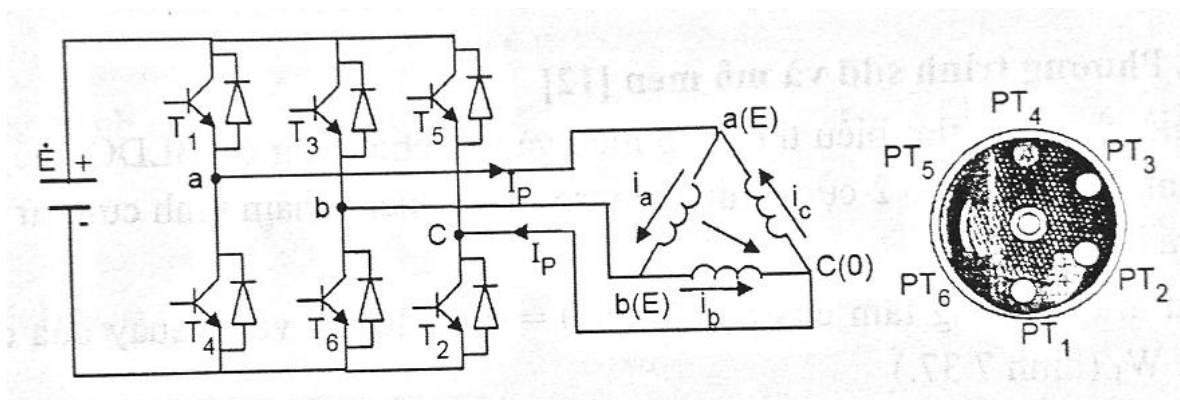
Sector 4' (hình 1.20): Phần tử quang PT₄, PT₅, PT₃ làm cho các T₄, T₅, T₃ mở nhưng không dẫn, các transistor T₁, T₂, T₆ dẫn điện.

Lúc này $a(E)$, $c(0)$ còn $b(0)$ dòng $i_b=0$ (b và c cùng điện thế), $i_a=i_p$, còn $i_c=-i_p$ từ trường có dạng như ở hình 1.20 (ngược với sector 4).



Hình 1.20. Hoạt động tại sector 4'

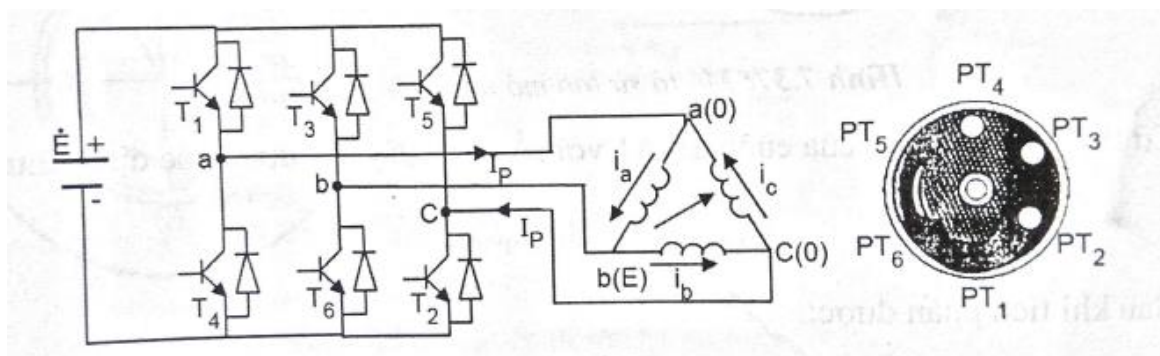
Sector 5' (hình 1.21): Phần tử quang PT₄, PT₅, PT₆ được chiếu sáng mở, transistor T₁, T₂, T₃ dẫn.



Hình 1.21. Hoạt động tại sector 5'

Lúc này $a(E)$, $c(0)$ còn $b(0)$ dòng $i_a = 0$ (a và c cùng điện thế), $i_b = i_p$, còn $i_c = -i_p$ từ trường có dạng như hình 1.21 (ngược với sector 5).

Sector 6' (hình 1.22): Các phân tử quang PT_1 , PT_5 , PT_6 mở nhưng các T_1 , T_5 , T_6 không dẫn điện, các transistor T_4 , T_2 , T_3 dẫn điện.



Hình 1.22. Hoạt động tại sector 6'

Lúc này $a(E)$, $c(0)$ còn $b(0)$ dòng $i_c = 0$ (a và c cùng điện thế), $i_b = i_p$, còn $i_a = -i_p$ từ trường có dạng như hình 1.22 (ngược với sector 6).

Ở bảng 1.2 là trạng thái đóng mở các transistor khi điều khiển chiều quay ngược.

Bảng 1.2. Bảng đóng mở các transistor chiều quay ngược

Van điện tử Sector	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
1	0	0	1	1	1	0
2	0	1	1	1	0	0
3	1	1	1	0	0	0
4	1	1	0	0	0	1
5	1	0	0	0	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Trong phần trình bày trên máy điện có số đôi cực là 1. Trong một chu kỳ làm việc có 6 sector ứng với 6 sector chuẩn.

CHƯƠNG 2

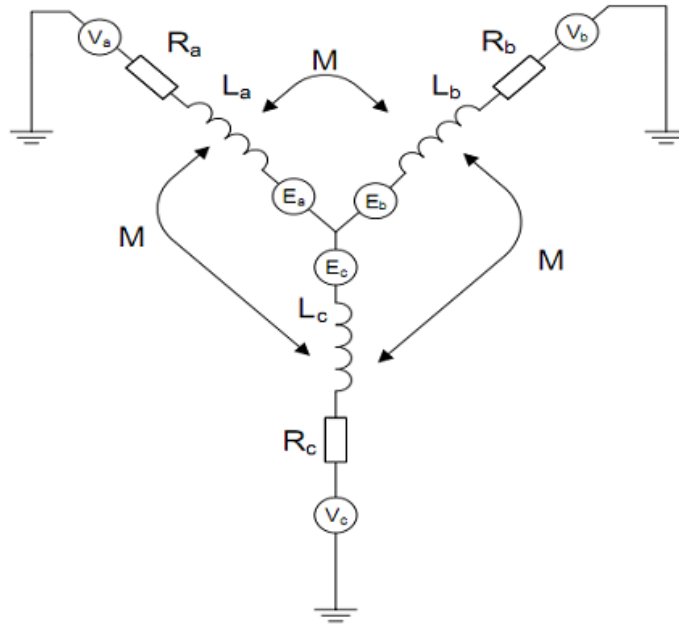
MÔ HÌNH TOÁN HỌC VÀ PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG CƠ BLDC [1]

2.1. MÔ HÌNH TOÁN HỌC

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.

2.1.1. 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 2.1 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 hổ cảm giữa các cuộn dây với nhau, sự hổ 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 2.1: Mô hình mạch điện của động cơ BLDC

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

$$\begin{aligned} V_a &= R_a + L_a \frac{di}{dt} + e_a \\ V_b &= R_b + L_b \frac{di}{dt} + e_b \\ V_c &= R_c + L_c \frac{di}{dt} + e_c \end{aligned} \quad (2-1)$$

Đặt s là toán tử laplace khi đó $di/dt = i \cdot s$

Phương trình điện áp của ba pha:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + s \cdot \begin{bmatrix} L_a & L_{ba} & L_{ca} \\ L_{ab} & L_b & L_{cb} \\ L_{ac} & L_{bc} & L_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

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, hốc của ba cuộn dây là bằng nhau. Khi đó:

$$R_a = R_b = R_c = R$$

$$L_a = L_b = L_c = L$$

$$L_{ab} = L_{ca} = L_{cb} = M$$

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 2.1 các cuộn dây của stator đấu sao nên:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2-4)$$

$$\text{Suy ra : } M \cdot i_a + M \cdot i_b = -M \cdot i_c \quad (2-5)$$

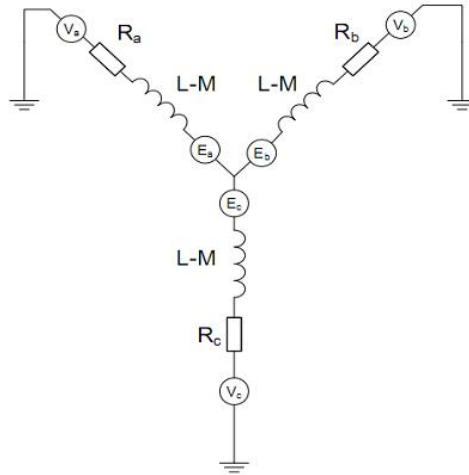
Kết hợp hai biểu thức (2.3) và (2.5), suy ra:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + S \cdot \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

Chuyển vế của biểu thức (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 2.2: 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) :

$$s. \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_s} \end{bmatrix} \cdot \left[\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \right] \quad (2-8)$$

2.1.2. 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 biểu thức:

$$P_d = e_a.i_a + e_b.i_b + e_c.i_c \quad (2-10)$$

Cân bằng công suất ở hai biểu thức trên:

$$M.\omega = e_a.i_a + e_b.i_b + e_c.i_c \quad (2-11)$$

$$\Rightarrow M = (e_a.i_a + e_b.i_b + e_c.i_c) / \omega \quad (2-12)$$

2.1.3. 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:

$$M_f = D.\omega_m$$

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:

$$M = (J_m + J_c) \frac{d\omega}{dt} + D.\omega + M_c \quad (2-13)$$

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

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M - D.\omega - M_c}{J} \quad (2-14)$$

Viết dưới dạng toán tử Laplace:

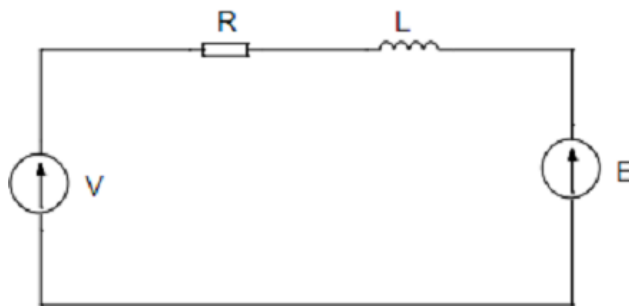
$$s.\omega = \frac{M - D.\omega - M_c}{J} \quad (2-15)$$

2.1.4. 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:

$$V = 2.E + 2.R.I \quad (2-16)$$



Hình 2.3: Sơ đồ 1 pha tương đương của động cơ BLDC

Ta có biểu thức công suất điện:

$$P_d = e_a.i_a + e_b.i_b + e_c.i_c = 2.E.I \quad (2-17)$$

Biểu thức về công suất cơ:

$$P_c = M. \omega \quad (2-18)$$

Biểu thức về sức phản điện động:

$$E = K_e \cdot \omega \quad (2-19)$$

Nếu bỏ qua các tổn hao về momen nhớt 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 SĐĐ phải là E/2. Cân bằng phương trình (2-17) và (2-18) kết hợp với biểu thức sức phản điện động, ta được:

$$M \cdot \omega = 2EI = 2 \cdot \frac{K_e \cdot \omega}{2} \cdot I = K_e \cdot I \Rightarrow I = \frac{M}{K_e} \quad (2-20)$$

Nếu thay biểu thức SĐĐ 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.

2.1.5. Sơ đồ cấu trúc của động cơ BLDC

Sơ đồ cấu trúc của động cơ BLDC mang tính tổng quát cho một động cơ 3 pha. Do trong động cơ BLDC hệ số nhớt là rất nhỏ nên có thể bỏ qua thành phần D trong các phương trình tính toán. Xuất phát từ biểu thức (2-7), các phương trình điện được viết lại như sau:

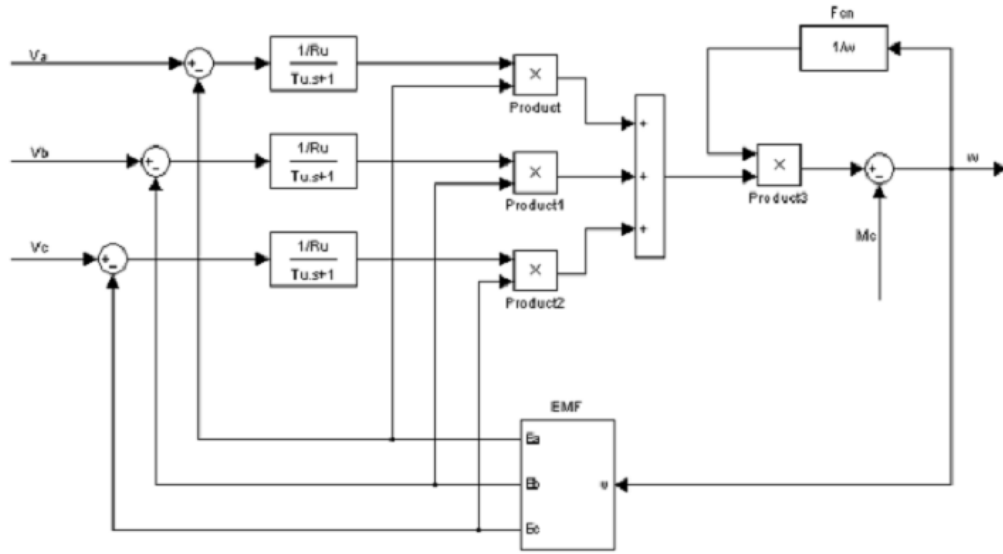
$$i_a = (V_a - e_a) \frac{1/R}{1 + T_\sigma}$$

$$i_b = (V_b - e_b) \frac{1/R}{1 + T_\sigma}$$

$$i_c = (V_c - e_c) \frac{1/R}{1 + T_\sigma}$$

Trong đó $T_\sigma = L_\sigma / R_\sigma$ được gọi là hằng số thời gian điện từ của động cơ BLDC.

Từ 3 phương trình trên, kết hợp với các phương trình momen điện từ (2-11) và phương trình động học (2-14), bỏ qua ma sát trong động cơ, sơ đồ khối của động cơ BLDC được trình bày như trong hình 2.4.



Hình 2.4: Sơ đồ khối động cơ BLDC

2.2. CÁC PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG CƠ BLDC

Để điều khiển động cơ BLDC có hai phương pháp chính: phương pháp dùng cảm biến vị trí Hall (hoặc Encoder) và phương pháp điều khiển không cảm biến (sensorless control). Trong đó ta có hai phương pháp điều chế điện áp ra từ bộ điều khiển đó là điện áp dạng sóng hình thang và dạng sóng hình sin. Cả hai phương pháp hình thang và hình sin đều có thể sử dụng cho điều khiển có cảm biến Hall và không cảm biến, trong khi phương pháp không cảm biến chỉ dùng phương pháp điện áp dạng sóng hình thang.

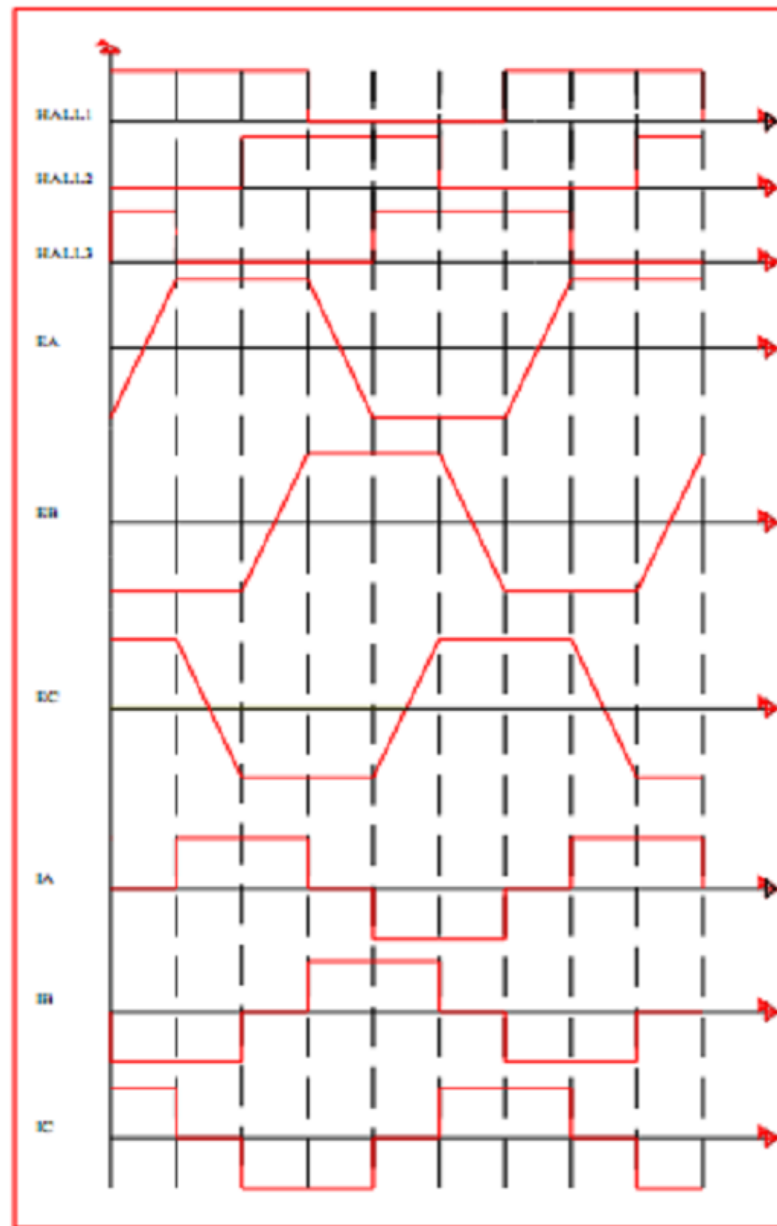
2.2.1. Phương pháp điều khiển bằng tín hiệu cảm biến Hall-phương pháp 6 bước

Hình 2.5 là một ví dụ về các tín hiệu của cảm biến Hall tương ứng với sức phản điện động của động cơ và dòng điện pha. Hình 2.6 chỉ ra thứ tự chuyển mạch tương ứng với các cảm biến Hall khi động cơ quay thuận chiều kim đồng hồ. Hình 2.7 là một ví dụ về các tín hiệu của cảm biến Hall tương ứng với sức

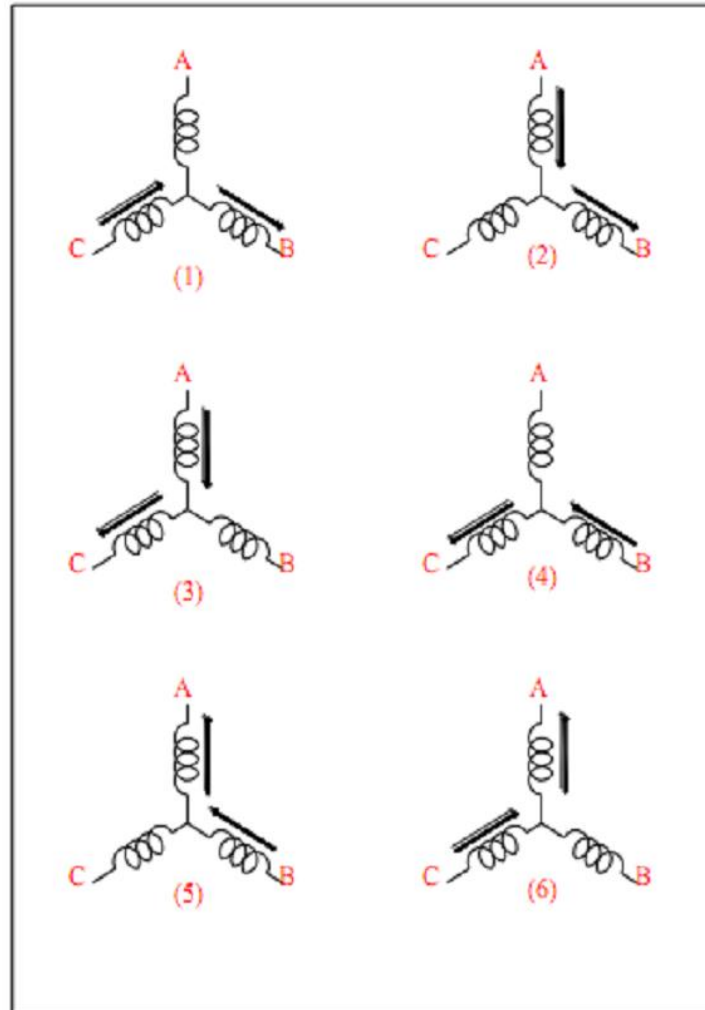
phản điện động của động cơ và dòng điện pha. Hình 2.8 chỉ ra thứ tự chuyển mạch tương ứng với các cảm biến Hall khi động cơ quay ngược chiều kim đồng hồ.

Cứ mỗi khi quay được 60° điện, một cảm biến Hall lại thay đổi trạng thái. Như vậy, có thể thấy, nó cần 6 bước để hoàn thành một chu kỳ điện. Đồng thời, cứ mỗi 60° điện, chuyển mạch dòng điện pha cần được cập nhật. Tuy nhiên, cũng chú ý là Một chu kỳ điện có thể không tương ứng với một vòng quay của rotor về cơ khí. Số lượng chu kỳ điện cần lặp lại để hoàn thành một vòng quay của động cơ được xác định bởi số cặp cực của rotor. Một chu kỳ điện được xác định bởi một cặp cực rotor. Do đó số lượng chu kỳ điện trên một chu kỳ cơ bằng số cặp cực rotor.

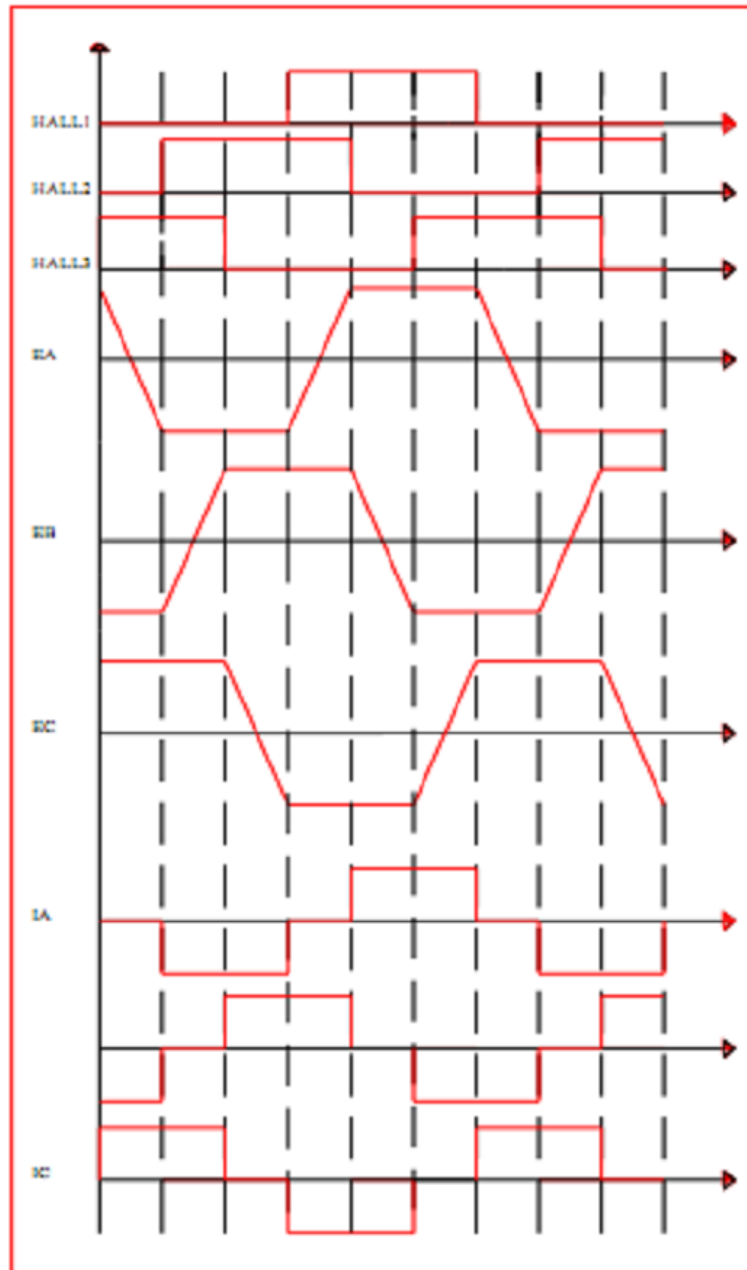
Không giống như các loại động cơ thông thường như động cơ một chiều và động cơ đồng bộ thì động cơ BLDC có đường sức phản điện động là hình thang còn dòng điện chảy trong các pha là dạng hình chữ nhật. Đặc tính sức phản điện động của ba cuộn dây lệch nhau $2\pi/3$ do các cuộn dây stator được đặt lệch nhau $2\pi/3$ và góc chuyển mạch của sức phản điện động là $\pi/3$ vì thế trong thời gian này thì không cấp dòng cho cuộn dây stator tương ứng. Căn cứ vào dạng dòng điện của 3 pha của động cơ theo vị trí của cảm biến Hall để xác định được sơ đồ mở van cho bộ nghịch lưu. Do một chu kỳ có 6 lần cảm biến Hall thay đổi vị trí nên sẽ có 6 trạng thái mở van.



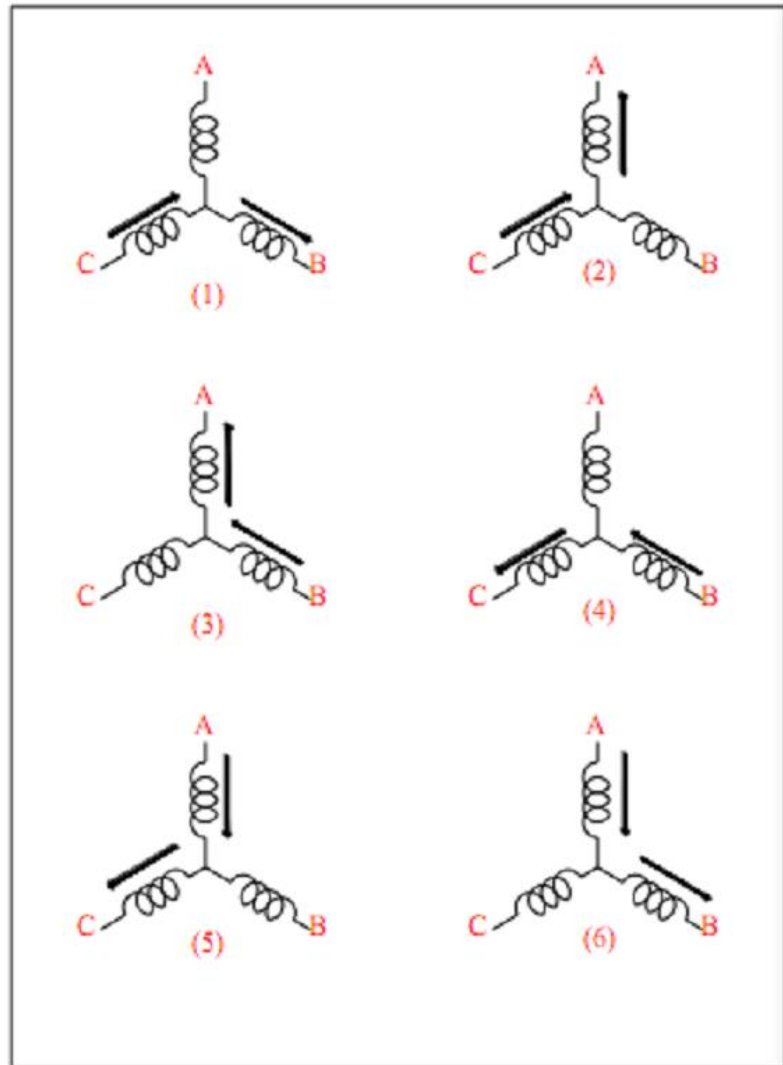
Hình 2.5: Tín hiệu cảm biến Hall, sức phản điện động và dòng điện pha trong chế độ quay thuận chiều kim đồng hồ



Hình 2.6: Thứ tự cấp điện cho các cuộn dây tương ứng với các cảm biến Hall trong chế độ quay thuận chiều kim đồng hồ

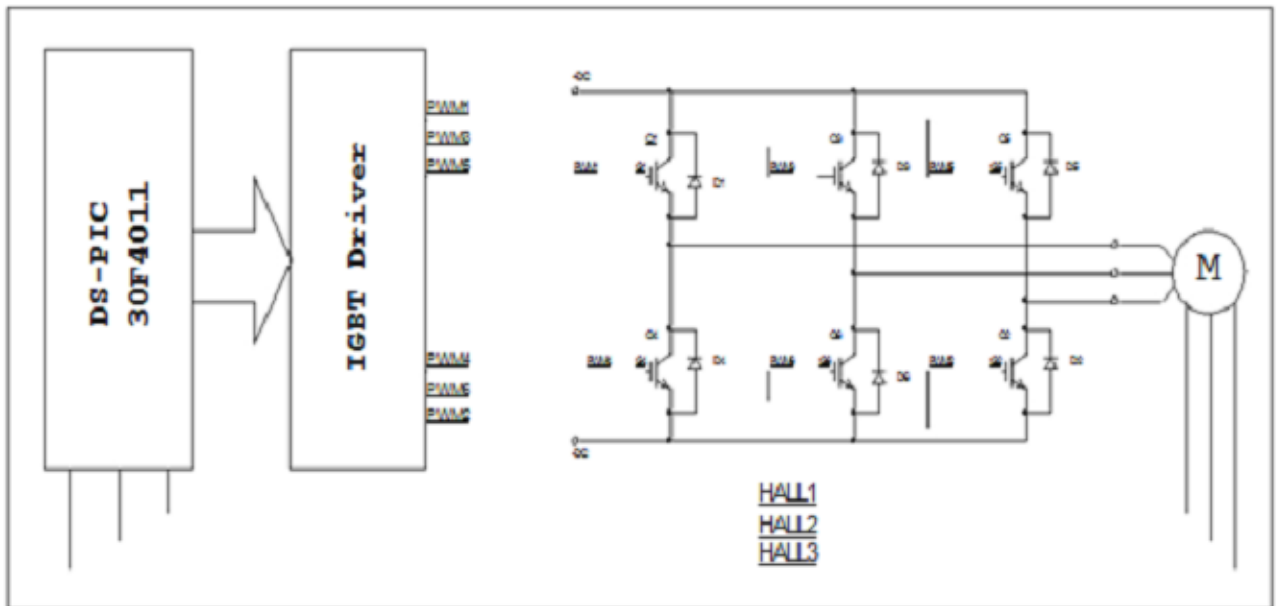


Hình 2.7: Tín hiệu cảm biến Hall, sức phản điện động và dòng điện pha trong chế độ quay ngược chiều kim đồng hồ



Hình 2.8: Thứ tự cấp điện cho các cuộn dây tương ứng với các cảm biến Hall trong chế độ quay ngược chiều kim đồng hồ

Hình 2.9 là sơ đồ khối của hệ điều khiển động cơ một chiều không chổi than. Hệ thống điều khiển có sử dụng vi điều khiển làm bộ điều khiển chính, phát xung PWM cho bộ đệm PWM - IGBT driver. Để phát xung PWM cho bộ đệm thì vi điều khiển phải thực hiện công việc lấy tín hiệu từ cảm biến Hall về và căn cứ vào bảng cảm biến Hall để phát xung mở van đúng theo thứ tự cấp điện.



Hình 2.9: Hệ điều khiển động cơ một chiều không chổi than

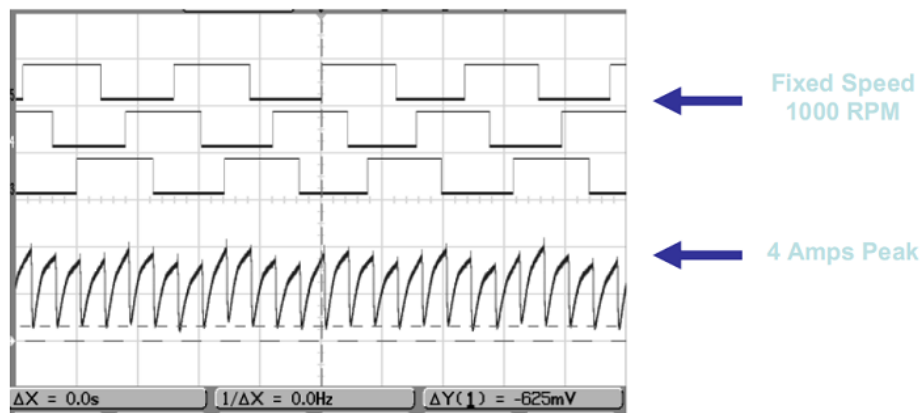
Bảng 1.2 và 1.3 là thứ tự chuyển mạch của các van dựa trên các đầu vào từ các cảm biến Hall A, B, C ứng với chiều quay của động cơ. Trong đó các cảm biến Hall đặt lệch nhau 60° .

Bảng 2.1: Thứ tự chuyển mạch khi động cơ quay theo chiều kim đồng hồ

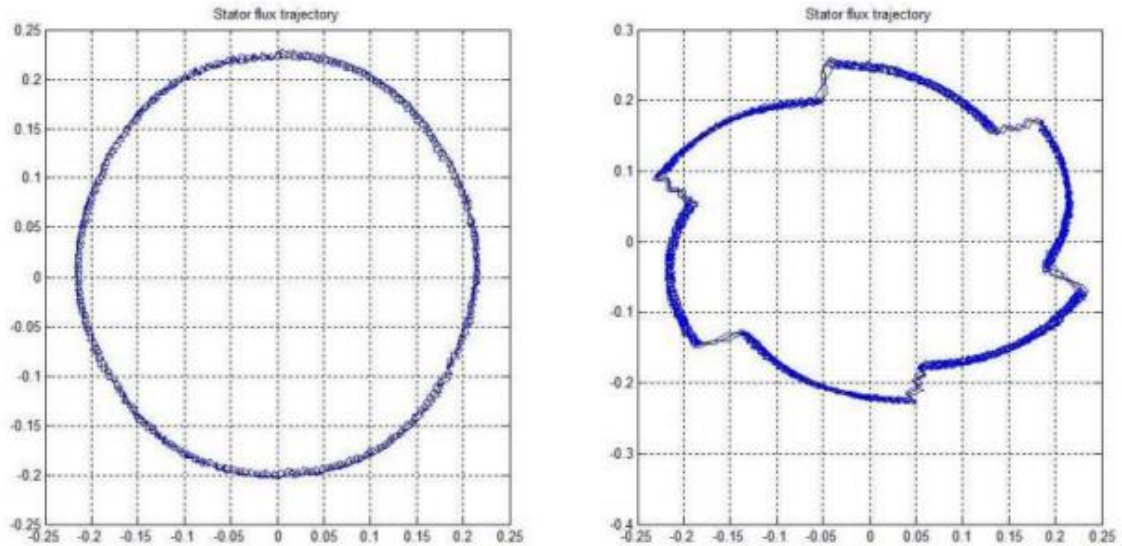
Thứ tự	Đầu vào từ cảm biến Hall			Các tín hiệu PWM		Dòng điện pha		
	A	B	C			A	B	C
1	1	0	1	PWM5(Q5)	PWM5(Q5)	-	-DC	+DC
2	1	0	0	PWM1(Q1)	PWM6(Q6)	+DC	-DC	-
3	1	1	0	PWM1(Q1)	PWM2(Q2)	+DC	-	-DC
4	0	1	0	PWM3(Q3)	PWM2(Q2)	-	+DC	-DC
5	0	1	1	PWM3(Q3)	PWM4(Q4)	-DC	+DC	-
6	0	0	1	PWM5(Q5)	PWM4(Q4)	-DC	-	+DC

Bảng 2.2: Thứ tự chuyển mạch khi động cơ quay ngược chiều kim đồng hồ

Thứ tự	Đầu vào từ cảm biến Hall			Các tín hiệu PWM		Dòng điện pha		
	A	B	C			A	B	C
1	0	0	1	PWM5(Q5)	PWM6(Q6)	-	-DC	+DC
2	0	1	1	PWM5(Q5)	PWM4(Q4)	-DC	-	+DC
3	0	1	0	PWM3(Q3)	PWM4(Q4)	-DC	+DC	-
4	1	1	0	PWM3(Q3)	PWM2(Q2)	-	+DC	-DC
5	1	0	0	PWM1(Q1)	PWM2(Q2)	+DC	-	-DC
6	1	0	1	PWM1(Q1)	PWM6(Q6)	+DC	-DC	-



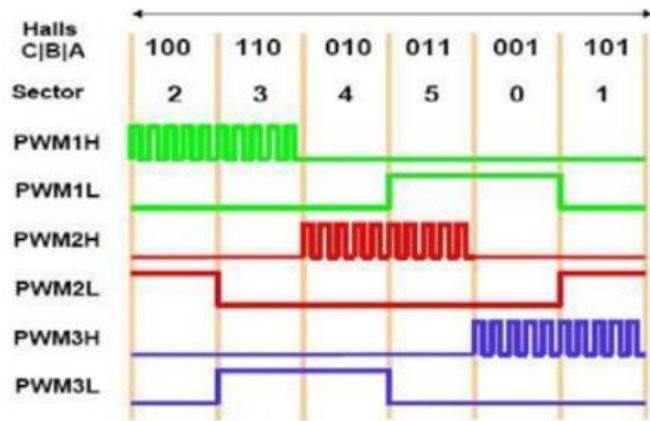
Hình 2.10: Giải đồ Hall sensor và dòng điện ngõ ra tổng



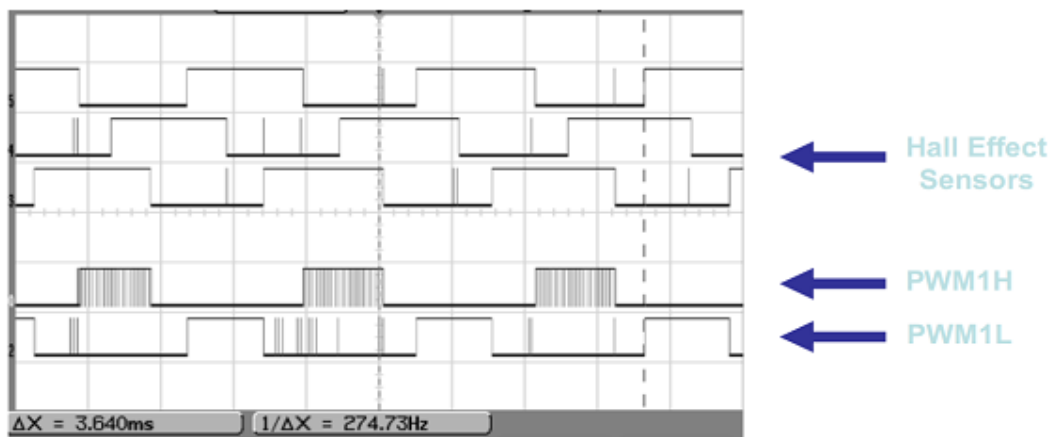
Hình 2.11: Quỹ đạo từ thông stato khi không tải và có tải

2.2.2 Điều khiển bằng phương pháp PWM.

Trên cơ sở điều khiển tốc độ động cơ BLDC bằng phương pháp điều chỉnh điện áp vào ta có thể áp dụng kỹ thuật PWM để điều khiển tốc độ động cơ. Đây cũng là phương pháp được sử dụng rộng rãi trong điều khiển điện áp hiện nay. Với phương pháp này điện áp cung cấp cho bộ khóa công suất không đổi, tuy nhiên điện áp ra khỏi bộ khóa đến động cơ thay đổi theo thuật toán điều khiển. Phương pháp PWM có thể dùng cho khóa trên, khóa dưới hay đồng thời cả hai khóa trên và dưới cùng lúc.



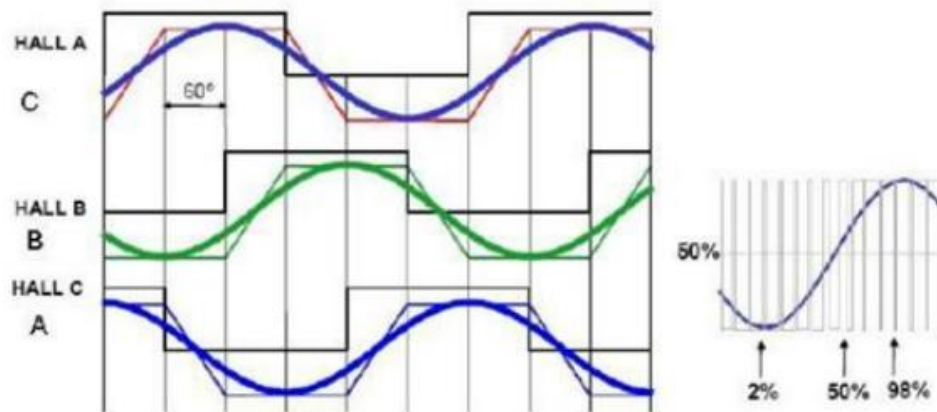
Hình 2.12:Giản đồ xung điều khiển PMW kênh trên BLDC Motor có điều chế PMW



Hình 2.13: BLDC motor có điều chế PWM

2.2.3. Điều khiển điện áp hình sin

Kỹ thuật này còn được gọi là kiểu AC không chổi than (brushless AC). Kỹ thuật này làm giảm tiến ồn có thể nghe thấy được, giảm gợn sóng momen do dạng sóng điện áp và dòng điện ra ít bị gợn sóng.



Hình 2.14: Giải đồ điều chế điện áp hình sin.

2.2.4. Điều khiển động cơ BLDC không sử dụng cảm biến (sensorless control)

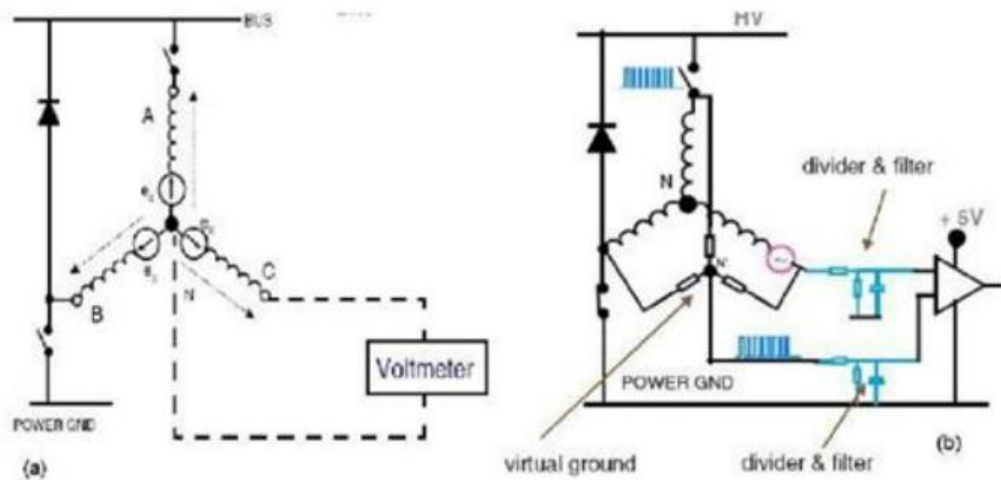
Đây là phương pháp sử dụng các ước lượng từ thông rotor để điều khiển các khóa đóng cắt thay cho cảm biến Hall truyền thống. Do đó phương pháp này được gọi là phương pháp điều khiển không cảm biến (sensorless control). Cơ sở chính của điều khiển không cảm biến đối với động cơ BLDC là dựa vào thời điểm qua zezo của SĐĐ cảm ứng trên các pha của động cơ. Tuy nhiên phương pháp này chỉ áp dụng được phương pháp điện áp hình thang.

Về cơ bản có hai kỹ thuật điều khiển không cảm biến:

- Một là xác định vị trí rotor dựa vào sức điện động của động cơ, phương pháp này đơn giản, dễ dàng thực hiện và giá thành rẻ.
- Hai là ước lượng vị trí dùng các tổng số của động cơ, các giá trị điện áp và dòng điện trên động cơ. Phương pháp này tính toán phức tạp, khó điều khiển, giá thành cao.

Phương pháp ước lượng vị trí rotor dựa vào thời điểm qua zezo của SĐĐ đòi chúng ta tạo ra một điểm trung tính để có thể đo và bắt điểm qua zezo của SĐĐ. Điểm trung tính có thể là trung tính hoặc trung tính ảo.

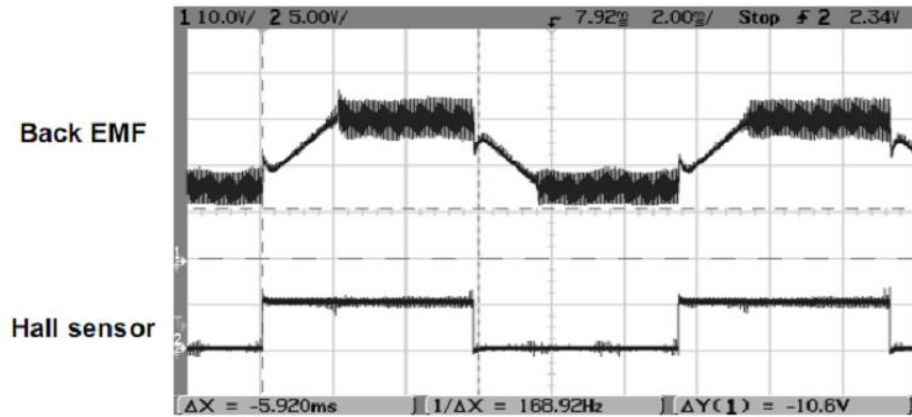
Điểm trung tính ảo trên lý thuyết có cùng điện thế với trung tính thật của các cuộn dây đấu hình Y. Tuy nhiên điểm trung tính không phải là điểm cố định. Điện áp của điểm trung tính có thể thay đổi từ 0 đến gần điện áp DC của nguồn. Trong khi điều chế PWM, tín hiệu PWM chồng chất lên điện áp trung tính, gây ra nhiễu rất lớn trên tín hiệu cảm biến, điều này gây trở ngại không cần thiết cho tín hiệu cảm biến.



Hình2.15: Đo điện áp cảm ứng bằng điểm trung tính

a. Điểm trung tính thật

b. Điểm trung tính ảo



Hình 2.16: EMF hồi tiếp v/s Hall sensors

2.2.5. Điều khiển vòng kín động cơ BLDC

❖Hiệu chỉnh PID:

Phương trình vi phân mô tả khâu hiệu chỉnh PID:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

Trong đó:

K_P : Hệ số khâu tỉ lệ

K_I : Hệ số khâu tích phân

K_D : Hệ số khâu vi phân

Khâu hiệu chỉnh khuếch đại tỷ lệ (K_P) được đưa vào hệ thống nhằm làm giảm sai số xác lập, với đầu vào thay đổi theo hàm nấc sẽ gây ra vọt lố và trong một số trường hợp là không chấp nhận được đối với mạch động lực.

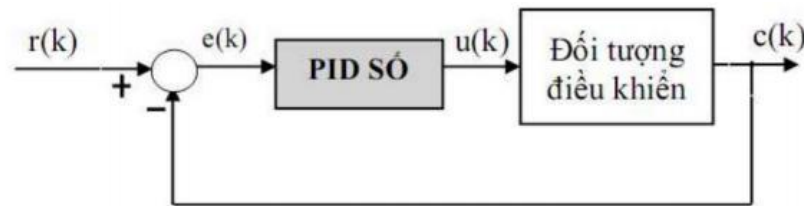
Khâu tích phân tỉ lệ (PI) có mặt trong hệ thống dẫn đến sai lệch tĩnh triệt tiêu(hệ vô sai). Muốn tăng độ chính xác của hệ thống ta phải tăng hệ số khuếch

đại, song với mọi hệ thống thực đều bị hạn chế và sự có mặt của khâu PI là bắt buộc.

Sự có mặt của khâu vi phân tỉ lệ (PD) làm giảm độ vọt lố, đáp ứng ra bớt nhấp nhô và hệ thống sẽ đáp ứng nhanh hơn.

Khâu hiệu chỉnh vi tích phân tỉ lệ (PID) kết hợp những ưu điểm của hai khâu PI và PD, có khả năng tăng độ dự trữ pha ở tần số cắt, khử chậm pha. Sự có mặt của khâu PID có thể dẫn đến sự dao động của hệ do đáp ứng quá độ bị vọt lố bởi hàm dirac (t). Các bộ hiệu chỉnh PID được ứng dụng nhiều trong lĩnh vực công nghiệp dưới dạng thiết bị điều khiển hay thuật toán phần mềm.

❖PID rời rạc:



Hình 2.17: Sơ đồ khối PID số

$$u(k) = u_P(k) + u_I(k)$$

$$u_P(k) = K_P \cdot e(k)$$

$$u_I(k) = u_I(k-1) + K_I \cdot T \cdot e(k) = u_I(k-1) + K'_I \cdot e(k)$$

PID số (phương pháp 1)

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

Rời rạc hóa:

$$u(k) = u_P(k) + u_I(k) + u_D(k)$$

$$u_P(k) = K_P \cdot e(k)$$

$$u_I(k) = u_I(k-1) + K_I \cdot T \cdot e(k) = u_I(k-1) + K'_I \cdot e(k)$$

$$u_D(k) = K_D[e(k) - e(k-1)]/T = K'_D[e(k) - e(k-1)]$$

Trong đó T là tần số lấy mẫu

Rời rạc hóa- phương pháp gần đúng

$$u(k) = u_P(k) + u_I(k) + u_D(k)$$

$$u_P(k) = K_P \cdot e(k)$$

$$u_I(k) = K_I [e(k) - e(k-1)]$$

$$u_D(k) = K_D[e(k) - e(k-1)]$$

PID số - phương pháp 2

Đạo hàm hai vế

$$\frac{du(t)}{dt} = K_P \frac{de(t)}{dt} + K_I e(t) + \frac{d^2 e(t)}{dt^2}$$

$$\frac{u(k) - u(k-1)}{T} = u_P(k) + u_I(k) + u_D(k)$$

$$u_P(k) = K_P \frac{e(k) - e(k-1)}{T} = K'_P(e(k) - e(k-1))$$

$$u_I(k) = K_I \cdot e(k)$$

$$u_D(k) = K_D \left(\frac{e(k) - e(k-1)}{T} - \frac{e(k-1) - e(k-2)}{T} \right) \\ = K'_D(e(k) - 2 \cdot e(k-1) + e(k-2))$$

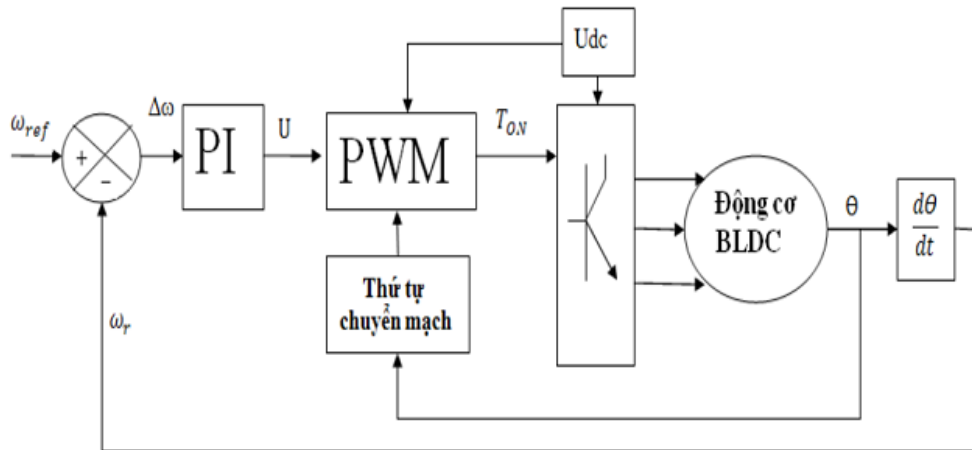
Hay:

$$u(k) = u(k-1) + (u'_P(k) + u'_I(k) + u'_D(k))$$

$$u_P(k) = K_P(e(k) - e(k-1))$$

$$u_I(k) = K_I \cdot e(k)$$

$$u_D(k) = K'_D(u'_P(k) + u'_P(k-1))$$



Hình 2.18: Sơ đồ khối điều khiển vòng kín tốc độ sử dụng khâu PI

Độ lỗi $\Delta\omega$ là sự sai khác giữa tốc độ đặt ω_r với tốc độ thực tế ω_m , độ lỗi có thể có thể âm (hay dương) phụ thuộc vào tốc độ thực lớn hơn (hay nhỏ hơn) tốc độ đặt. Độ lỗi này được đưa qua khâu hiệu chỉnh PI để khuếch đại độ lỗi lên. Khuếch đại của độ lỗi được sử dụng để hiệu chỉnh lại độ rộng xung PWM của xung điều khiển. Tùy thuộc vào khả năng đáp ứng của từng loại động cơ, tùy thuộc vào từng loại tải mà ta hiệu chỉnh hệ số của các quá trình và thời gian lấy mẫu. Thông thường tốc độ PI được đưa lên cao nhất có thể, khi mà nó còn đủ khả năng xử lý các phép toán trong hàm hiệu chỉnh và các tác vụ cần thiết.

Để ứng dụng các phương pháp điều khiển nói trên vào mô hình thực nghiệm đòi hỏi phải có bộ điều khiển đáp ứng đủ chức năng, có thể dùng IC hay vi điều khiển ,... cho bộ điều khiển.

CHƯƠNG 3

HOẠT ĐỘNG ĐIỀU KHIỂN ĐỘNG CƠ BLDC KHÔNG CẢM BIẾN VỊ TRÍ [3]

3.1. GIỚI THIỆU

Dòng điện chạy trong cuộn dây của BLDC cần phải đồng bộ tới vị trí tức thời của rotor, và vì thế, bộ điều khiển dòng điện phải tiếp nhận thông tin về vị trí của rotor máy. Thiết bị phụ trợ (ví dụ như bộ mã quang, bộ giải mã) có thể được sử dụng để đo lường vị trí rotor, nhưng đã có nhiều quan tâm trong các sơ đồ không “cảm biến”. Trong đó thông tin vị trí ở được cung cấp bằng phân tích trực tuyến của điện áp và dòng điện ở trong những cuộn dây. Hình 1 một sơ đồ không cảm biến với một khối chức năng “ước lượng vị trí” nhận các số liệu đo điện áp máy, dòng điện và cung cấp dữ liệu vị trí rotor cho bộ điều khiển dòng điện và bộ chuyển mạch.

Cách tiếp cận không cảm biến có một số lợi thế: 1) Chi nối điện tới máy là các cuộn dây pha chính, vì thế chi phí lắp đặt là thấp nhất. 2) Chức năng vị trí cảm biến có thể được định vị với thiết bị điều khiển khác: nó không cần được bố trí liền kề với máy, và do đó không làm cản trở phạm vi nhiệt độ hoạt động. 3) Sự thiếu vắng của kết nối dẫn đến ngăn cản sự hư hỏng của dữ liệu vị trí bằng nhiễu điện từ. 4) Giá trị của thiết bị mã hóa vị trí đã được loại bỏ.

Ý tưởng về vận hành không cảm biến vị trí của BLDC lần đầu được đề xuất bởi Frus và Kuo [4] khi sử dụng kỹ thuật được gọi là “phát hiện dạng sóng” để suy luận vị trí rotor trong biến từ trở của điện áp cấp cho động cơ bước bởi phân tích của dạng sóng dòng điện. Kể từ đó, một số chủ đề đã được sử dụng để mô tả lĩnh vực công nghệ này. Theo dõi chặt chẽ trên “phát hiện dạng sóng” dẫn

đến thuật ngữ “cảm ứng vị trí gián tiếp”, được chứng minh bằng quan sát gián tiếp vị trí từ dạng sóng điện áp và dòng điện. Một số tác giả khác đã sử dụng thuật ngữ “cảm biến vị trí trực tiếp”, vì vị trí rotor được lấy trực tiếp từ máy và không từ một bộ mã hóa riêng. Ngay cả thuật ngữ “không có cảm biến” có thể được coi là gây hiểu lầm: kỹ thuật là không có cảm biến vị trí, nhưng thường yêu cầu cảm biến dòng điện và đôi khi điện áp.

3.2. ĐẶC ĐIỂM VÀ YÊU CẦU CẢM BIẾN VỊ TRÍ CỦA CÁC ĐỘNG CƠ NAM CHÂM VĨNH CỬU KHÔNG CHỎI THAN

Mục đích của mục này là để phác thảo những đặc tính cơ bản của các động cơ nam châm vĩnh cửu với những tham chiếu cụ thể về những yêu cầu cho thông tin rotor vị trí.

3.2.1. Các loại động cơ PM không chổi than

Truyền động động cơ PM không chổi than có thể được chia thành 2 loại [5]. Đầu tiên sử dụng phản hồi vị trí rotor liên tục để cung cấp điện thế hình sin và dòng điện cho động cơ bằng cách điều chế độ rộng xung của điện áp cấp nguồn 1 chiều. SĐĐ (SĐĐ) lý tưởng là hình sin, để sự tương tác với dòng điện hình sin tạo ra mô men xoắn không đổi với gợn sóng thấp nhất. Loại hệ truyền động này được gọi là truyền động xoay chiều nam châm vĩnh cửu, truyền động xoay chiều không chổi than, truyền động nam châm vĩnh cửu cấp nguồn hình sin, hoặc truyền động 1 chiều không chổi than hình sin.

Loại thứ 2 của truyền động động cơ nam châm vĩnh cửu được xem như là truyền động 1 chiều không chổi than, truyền động 1 chiều hình thang, hoặc truyền động cấp nguồn hình chữ nhật. ở dạng 3 pha, những khối dòng hình chữ nhật lệch nhau của một góc 120^0 điện được cấp đến máy, trong đó SĐĐ cảm ứng lý tưởng là hình thang cùng với phần hằng số của dạng sóng được định thời gian

trùng với các khoảng thời gian của dòng pha không đổi. Với loại thiết bị này, thông tin vị trí rotor chỉ cần tại điểm giao nhau ví dụ mỗi 60° điện trong động cơ 3 pha.

Cả động cơ hình thang và hình sin có thể được biểu diễn bởi mạch tương đương giống nhau cho dây dẫn mỗi pha, trong đó nguồn điện thế v cấp dòng I cho mỗi pha bao gồm điện trở R nối tiếp với độ tự cảm L , và suất điện động cảm ứng e . Suất điện động cảm ứng được gây ra bởi sự dịch chuyển của rotor nam châm vĩnh cửu và vì thế phụ thuộc vào vị trí của rotor, cũng như tỷ lệ thuận với vận tốc của rotor. Nguồn được cấp cho lực điện động e bởi dòng I được chuyển đổi thành công suất cơ học ở đầu ra khi thiết bị hoạt động như 1 động cơ. Vị trí rotor phụ thuộc vào độ tự cảm và SĐĐ cảm ứng tác động lên dạng điện áp và dạng dòng điện. Mỗi liên kết này được dùng trong mạch không cảm biến cùng với dạng áp và dòng được phân tích để chiết xuất SĐĐ hoặc độ tự cảm (hoặc cả 2), từ đó suy ra vị trí rotor.

Đầu ra moment quay của động cơ PM không chổi than là không đổi trong 1 khoảng tốc độ được giới hạn bởi khả năng của bộ chuyển đổi nguồn điện tử để duy trì dòng pha trong phạm vi yêu cầu. Điều khiển nhanh và chính xác của dòng dây dẫn pha chỉ có thể nếu điện áp nguồn có sẵn từ phần liên kết 1 chiều lớn hơn nhiều so với suất điện động cảm ứng, sao cho điện áp dư có sẵn để dẫn đến thay đổi dòng điện. Tốc độ mà tại đó điện áp dư không còn đủ được gọi là tốc độ cơ bản. Động cơ có thể chạy trên tốc độ cơ bản trong chế độ từ trường yếu, trong đó một thành phần của dòng điện phản ứng tạo ra một từ trường ngược với từ trường sinh ra bởi nam châm vĩnh cửu và làm giảm suất điện động cảm ứng. Sự suy yếu từ trường được thực hiện trong cả động cơ hình sin và hình thang bằng cách tăng góc pha để cho dòng điện vượt trước suất điện động cảm ứng [6]. Yêu

cầu này có ý nghĩa quan trọng đối với cảm biến vị trí : Nếu khả năng sinh mô men của máy được sử dụng trên một phạm vi rộng của tốc độ trong vùng suy yếu trường, thì cần có cảm biến vị trí có độ phân giải cao, ngay cả đối với các máy hình thang.

3.2.2. Cấu hình động cơ nam châm vĩnh cửu

Sự thay đổi vị trí của điện cảm và suất điện động cảm ứng trong động cơ nam châm vĩnh cửu phụ thuộc vào cấu trúc từ tính. Các động cơ nam châm vĩnh cửu không chổi than được đặc trưng bởi có một trường được tạo ra bởi nam châm vĩnh cửu trên rôto và cuộn dây phản ứng trên stato. Đối với động cơ xuyên tâm thông thường , có 3 cấu trúc rotor, như hình 3.1. Trong sự sắp xếp nam châm gắn trên bề mặt [Hình 3.1. (a)], sử dụng vật liệu đất hiếm hiện đại có tính thẩm từ tương đối, khe hở không khí thực bằng tổng của khe hở không khí vật lý giữa rotor và stator cộng với độ sâu nam châm. Vì thế, dòng điện chạy trong các dây dẫn phản ứng chỉ tạo ra một phần từ thông nhỏ, và do đó, độ tự cảm của cuộn dây pha là nhỏ. Hơn nữa, nếu toàn bộ bề mặt rotor được bao phủ bởi một nam châm vĩnh cửu, thì có thể bỏ qua sự biến đổi không đáng kể độ cảm ứng trong cuộn dây với vị trí rotor.

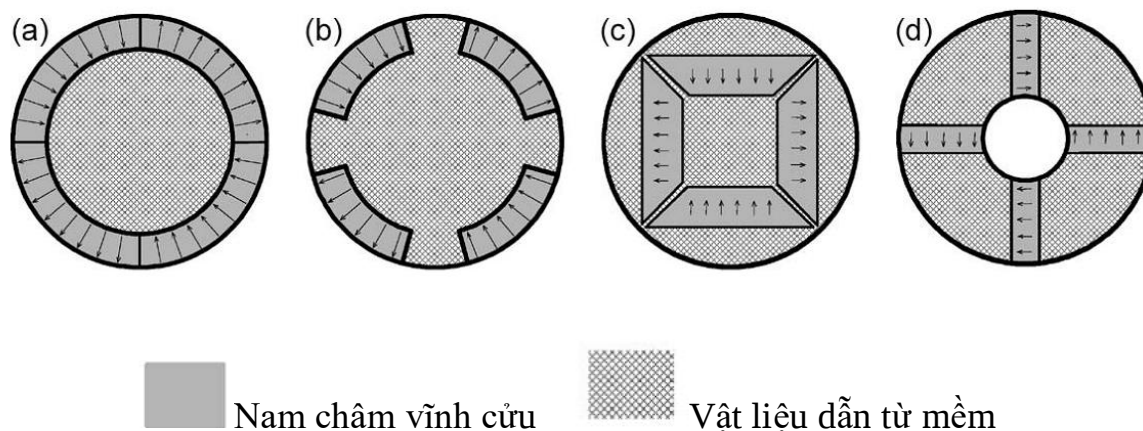
Cấu hình nam châm ghép bề mặt [Hình 3.1. (b)] thường được ưu tiên cho máy hình thang, vì vòng cung cực nam châm có thể được điều chỉnh để hỗ trợ hình thành dạng sóng suất điện động cảm ứng. Sự có mặt của vật liệu từ mềm ở khe hở không khí vật lý trong vùng giữa các cực nam châm gây ra sự thay đổi đáng kể về điện cảm cuộn dây, với điện cảm tối đa xảy ra ở các vị trí rôto trong đó các cực nam châm được căn chỉnh lệch trục. Hai cấu hình khác [Hình 3.1. (c) và (d)] có nam châm được chôn trong thân rotor. Đối với cấu trúc nam châm bên trong (Hình 3.1. (c)], hướng từ hóa là hướng tâm. Cấu trúc này được ưu tiên cho

các máy PM hình sin, vì nó dễ dàng hơn để đạt được sự thay đổi hình sin cần thiết của mật độ từ thông xung quanh vùng ngoại vi khe hở không khí. Các vật liệu từ tính thẩm cao tiếp giáp với khe hở không khí dẫn đến giá trị điện cảm máy cao hơn so với những gì xảy ra trong hai cấu hình đầu tiên. Cuối cùng, loại tập trung từ thông [Hình 3.1. (d)] có các nam châm đặt theo hướng vòng tròn, sao cho từ thông trên một vòng cung cực rôto được tạo bởi hai nam châm riêng biệt. Cấu hình này cũng thể hiện các hiệu ứng rõ nét đáng kể, gây ra một sự thay đổi đáng kể của cuộn cảm với vị trí rotor.

3.3. CẢM BIẾN VỊ TRÍ SỬ DỤNG “SĐĐ CẢM ỨNG”

3.3.1. Nguyên tắc

Trong BLDC, sự di chuyển của các nam châm so với cuộn dây phản ứng gây ra một SĐĐ cảm ứng. Vì độ lớn tức thời của SĐĐ là một hàm của vị trí rotor so với cuộn dây, thông tin về vị trí được chứa bên trong dạng sóng SĐĐ. Trong thực tế, tuy nhiên, rất khó để trích xuất thông tin về SĐĐ, bởi vì các cuộn dây máy đang mang dòng điện thay đổi nhanh chóng và điện áp cảm ứng đáng kể từ chuyển pha. Một trở ngại nữa là chuyển động SĐĐ thì tỉ lệ thuận với tốc độ rotor. Khi máy vận hành từ trạng thái đứng im, cảm biến vị trí chỉ có thể xảy ra khi đạt được tốc độ ngưỡng, do đó, thông thường là thực hiện bằng gia tốc ban đầu dưới sự kiểm soát vòng mở bằng tín hiệu tần số nhảy bậc [7], [8], các tham số trong đó phải được chọn để phù hợp với thông số điều khiển và tải. Sự tăng tốc từ vị trí nghỉ ở vị trí khởi động trên tọa độ đối với rroo to là trường hợp đặc biệt, vì nó có thể cho động cơ chạy ban đầu theo hướng ngược lại, và vì thế, một số sơ đồ liên quan đến các cảm biến phụ hoặc các phép thử kích thích tần số cao để thiết lập vị trí rôto và xác định mẫu kích thích cuộn dây ban đầu thích hợp.

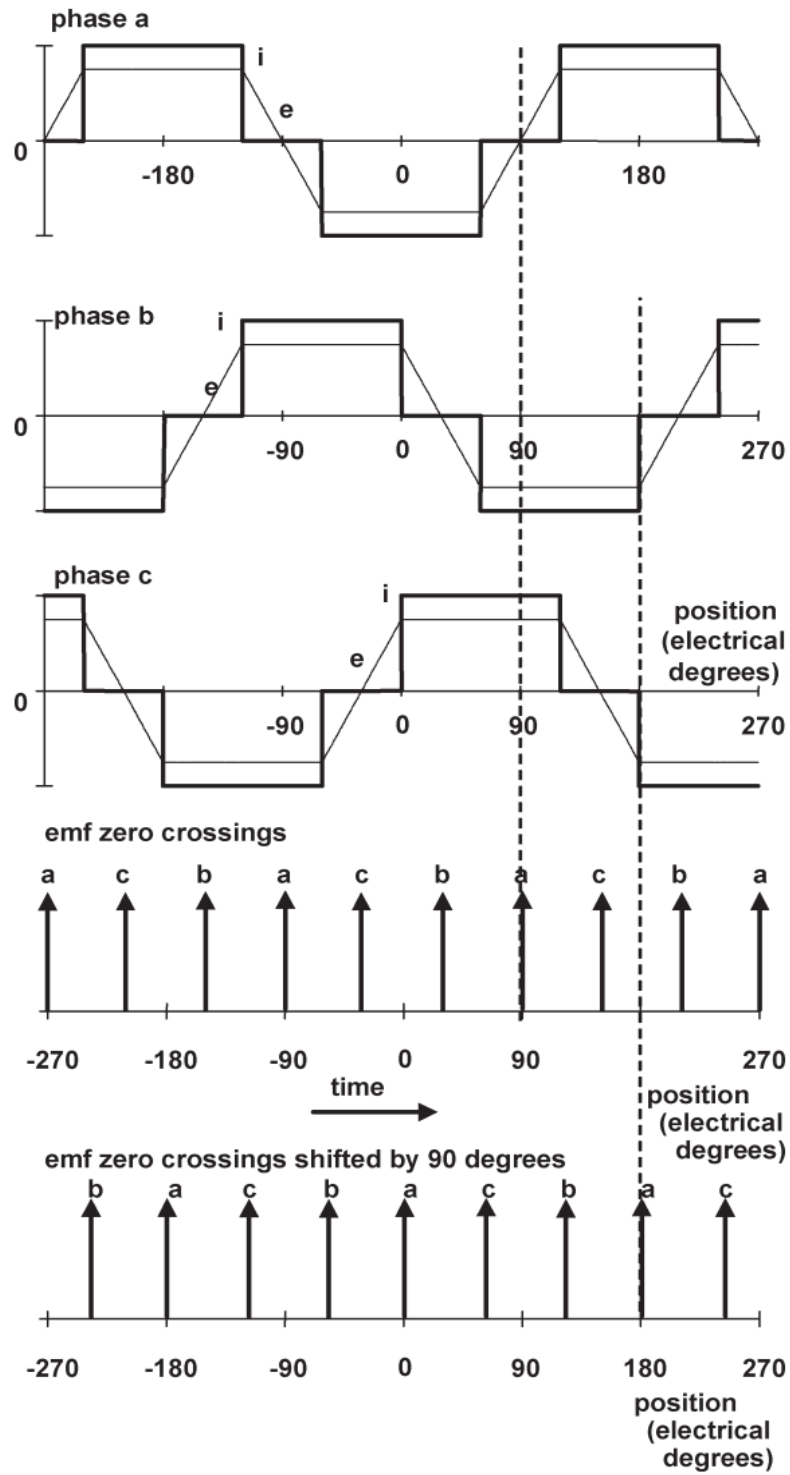


Hình 3.1. Cấu hình cánh quạt của các máy từ trường xuyên tâm bốn cực. a) Bề mặt được gắn. b) Phía ngoài. c) Phía trong. d) Từ thông nén.

Hình thức đơn giản nhất của sự sắp xếp cảm biến này, báo cáo bởi Iizuka et al (và cộng sự). [9], có thể được hiểu bằng cách tham khảo sơ đồ thời gian kích thích cho một máy hình thang ở phần trên của hình 3.2.

Sự vượt qua điểm không dương của các SĐĐ cảm ứng trong mỗi pha là một nét đặc trưng dung cho cảm biến vì rằng ở đây có sự phụ thuộc vào tốc độ và vì vậy nó sẽ mang thông tin vị trí rô to ở đó cuộn dây pha không được kích từ. Tuy nhiên, như được hiển thị ở hình 3.2, điểm cắt zero của sđđ không tương ứng với các vị trí rô to đó, nơi sự chuyển mạch giữa các pha sẽ diễn ra. Vì thế, các tín hiệu phải được dịch pha bằng 90° điện trước khi chúng có thể được sử dụng cho các chuyển mạch. Ví dụ, ở trong hình 3.2, sự dịch pha giá trị dương của sđđ được sử dụng để chuyển mạch dòng điện âm ở từ pha b sang c.

Một sơ đồ cảm biến dung sđđ cảm ứng được miêu tả ở trên có một số hạn chế cần phải vượt qua khi sử dụng chung.



Hình 3.2.Giá trị đạo hàm tín hiệu chuyển mạch dòng điện từ sđđ cảm ứng (e) cho động một động cơ hình thang PM.

1) Tổng quát tất cả các sơ đồ dung cảm biến SĐĐ cảm ứng thì không thể ở tốc độ thấp. Có hai hạn chế đối với hoạt động tốc độ thấp. Thứ nhất là sự vắng mặt của SĐĐ cảm ứng ở tốc độ bằng không, có thể được giải quyết bằng cách tăng tốc động cơ đến một tốc độ phù hợp với một chuỗi kích thích định sẵn. Yếu tố thứ hai là yêu cầu sự dịch pha tín hiệu qua điểm không bằng 90^0 điện. Trong tác phẩm gốc [7], sự dịch pha được thực hiện bằng cách sử dụng ba mạch R-C riêng biệt để tạo ra sự dịch pha cần thiết chỉ khi tần số làm việc đủ cao. Mạch lọc nặng nề vốn có trong xử lý tín hiệu giới hạn tính năng động của sơ đồ cảm biến vị trí.

2) Người ta cho rằng có sự phân rã rất nhanh của dòng điện khi một pha bị tắt, do đó điện áp xuất hiện trên các cực của pha không được phép là bằng SĐĐ cảm ứng. Giả thiết này có thể không đúng ở tốc độ tiến tới tốc độ cơ sở, hoặc trong vùng trường suy yếu. Vì thế, có một giới hạn trên phạm vi tốc độ hữu ích có thể đạt được với dạng cảm biến SĐĐ cảm ứng này.

3) SĐĐ cảm ứng được đo qua các đầu cuối của từng pha của ba pha máy. Đối với máy được nối sao, cần thiết để có một kết nối với điểm nối sao của máy, và do đó có bốn, thay vì ba kết nối máy thông thường.

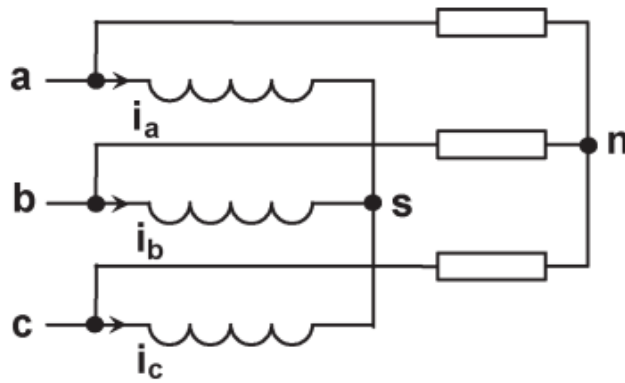
Mặc dù những hạn chế này phương pháp này đã được áp dụng thành công trong các ứng dụng chi phí thấp cho quạt gió và máy bơm với hoạt động một chiều. Ví dụ, Iizuka et al. [7] mô tả một động cơ BLDC bốn cực 1,2kW hoặc một máy điều hòa không khí với cảm biến vị trí SĐĐ cảm ứng trên một dải tốc độ từ 1950 tới 5700r/min. Một ứng dụng cảm biến SĐĐ cảm ứng trong điều khiển không chổi than cho một máy bơm nhiên liệu ô tô đã được trình bày bởi Shao et al. [10], người đã vượt qua vấn đề khởi động với xác định chuỗi kích từ vòng hở. Toliyat et al [11] mô tả cảm biến vị trí ở một máy nam châm bề mặt gắn kết một số cực lõi đủ lớn. Sự phát triển này liên quan đến việc tạo cuộn dây máy

có thể loại bỏ cả thành phần thứ ba của s_{dd} cảm ứng vào sụt điện áp do điện trở, do đó không gây ra sai số khi điện trở cuộn dây thay đổi do nhiệt. Hoạt động không cảm biến ở tần số kích thích thấp đến 2Hz được mô tả. Một vòng khóa pha số đã được sử dụng bởi Amano et al. [12] để giải quyết vấn đề chuyển pha, mặc dù phạm vi hoạt động của hoạt động cảm biến bị hạn chế bởi các đặc tính thông thấp của bộ lọc vòng lặp. Một giới hạn tương tự đã được thực nghiệm bởi những người khác giải quyết cùng một vấn đề [13]-[15]. Vì nam châm trong máy, phản ứng phần ứng có thể gây ra sự biến dạng của sự phân bố từ thông gây ra sai số trong phát hiện vị trí rôto. Shen and Tseng [16] đã phân tích cơ chế sai số và phát triển một kỹ thuật bù phản ứng phần ứng.

Hầu hết các hoạt động trên cảm biến SDD cảm ứng đã được thực hiện trong môi trường phòng thí nghiệm bằng cách sử dụng các mạch tương tự / kỹ thuật số hoặc bộ xử lý tín hiệu số (DSPs). Tuy nhiên, Cheng and Tzou [8] đã thiết kế và thử nghiệm mạch tích hợp chế độ hỗn hợp, trong công nghệ CMOS bốn kim loại đơn lẻ 0.35- μm tiêu chuẩn, để thực hiện tất cả các khía cạnh của bộ cảm biến SDD cảm ứng. Ngoài ra, đã có một số mạch tích hợp thương mại, ví dụ: các [17].

3.3.2. Cảm biến sử dụng sóng hài thứ ba của SDD cảm ứng

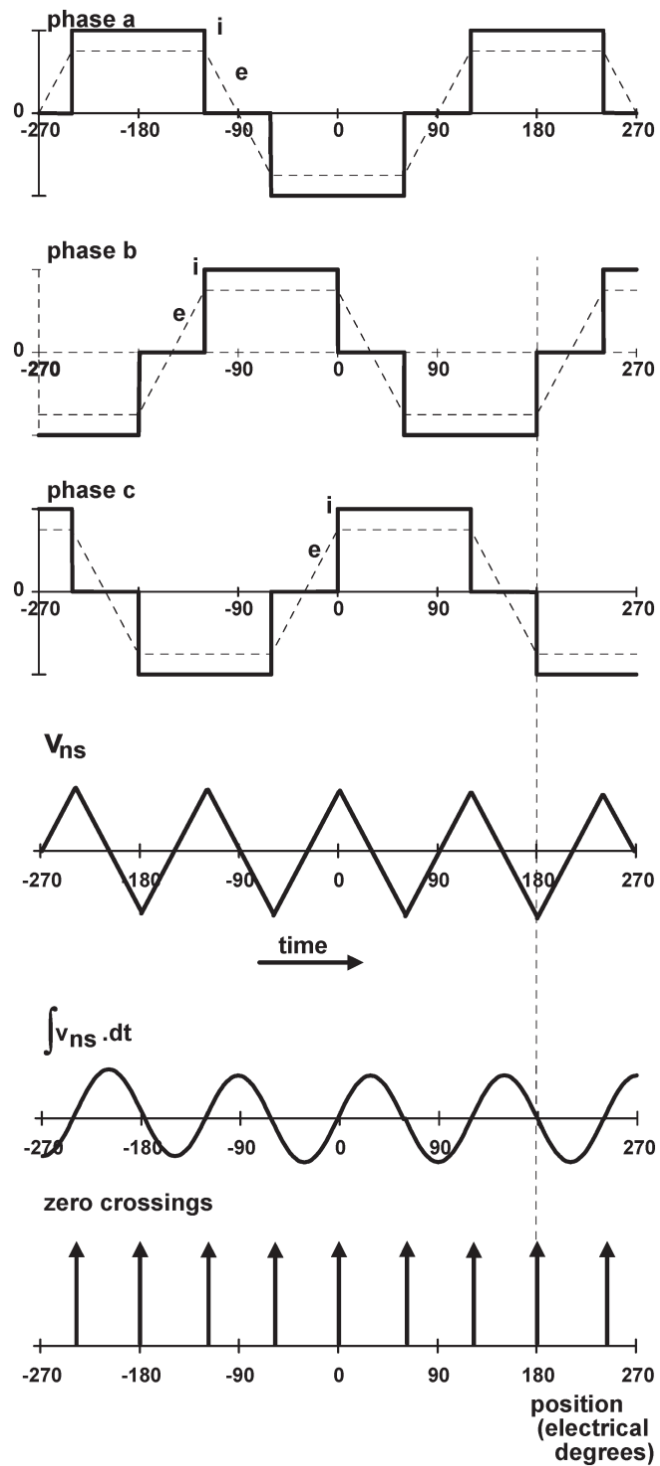
Moriera [18] giới thiệu một phương pháp cải tiến cho cảm biến vị trí sử dụng SDD cảm ứng, trong đó sử dụng sóng hài bậc ba của sóng SDD cảm ứng của máy PM hình thang, và do đó làm giảm vấn đề dịch chuyển pha được nêu ở trên. Hình 3.3 cho thấy ba cuộn dây của một máy được nối với sao có zero s. Một nối sao bổ sung của ba điện trở giống hệt nhau được nối giữa cuối các pha a, b, c và một điểm sao riêng biệt n.



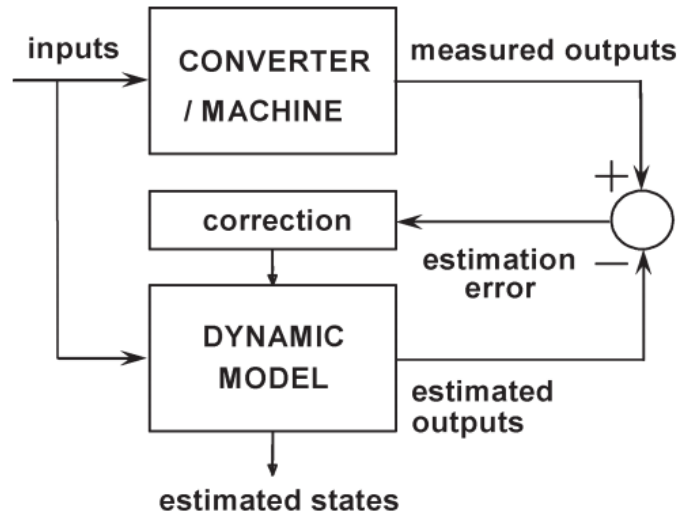
Hình 3.3 Các biến dòng điện và điện áp so sánh trong một máy ba pha nối sao.

Giả sử rằng các điện trở R và điện cảm (L) của ba cuộn dây máy là giống hệt nhau và các SĐĐ cảm ứng pha được hiển thị trong hình 3.4, có thể thấy rằng điện áp giữa hai điểm sao n và s bằng với giá trị trung bình của 3 pha SĐĐ cảm ứng.

Hình 3.4 cho thấy điện áp v_{ns} và mối quan hệ của nó với các vị trí rôto để chuyển đổi giữa các pha. Dạng sóng v_{ns} có tần số ba lần so với thành phần cơ bản của bất kỳ các SĐĐ cảm ứng pha nào, và do đó, nó được gọi là "sóng bậc 3" của SĐĐ cảm ứng, mặc dù nó cũng chứa các sóng hài cao hơn. Các sóng này dịch chuyển qua vị trí rotor 30° bằng cách tích hợp. Các giao điểm không của dạng sóng tích hợp tương ứng với các vị trí rôto tại đó sự kích thích phải được chuyển đổi giữa các pha, và do đó, các giao điểm bằng không là các tín hiệu chuyển đổi kích thích thích hợp.



Hình 3.4. Đạo hàm tín hiệu chuyển mạch dòng điện của song hài thứ 3 của SĐĐ cảm ứng (e) trong một động cơ hình thang PM.



Hình 3.5. Nguyên lý bộ quan sát vòng kín.

Trong mỗi chu kỳ kích từ, dạng sóng của v_{ns} đi qua ba chu kỳ. Do đó, tín hiệu điều khiển kích từ được đồng bộ hóa với sự thay đổi kích từ pha thích hợp, tùy thuộc vào các hướng yêu cầu của mô-men và tốc độ. Các tín hiệu điều khiển được đồng bộ một lần cho mỗi chu kỳ kích từ bằng cách xác định một vị trí tham chiếu phù hợp, chẳng hạn như chuyển tiếp sđđ cảm ứng dương trong pha a. So với phương pháp cơ bản của cảm biến vị trí sử dụng sđđ cảm ứng (Phần III-A), phương pháp sóng hài bậc 3 có các ưu điểm sau.

- 1) Giảm yêu cầu lọc, bởi vì chức năng tích hợp (thông thấp lọc) được thực hiện trên một tín hiệu, trong đó có một tần số ba lần so với tín hiệu cơ bản. Bộ lọc nhẹ hơn cải thiện tính năng động.
- 2) Hoạt động ở tốc độ cao hơn có thể về nguyên tắc, bởi vì điện áp v_{ns} có thể được phục hồi ngay cả khi dòng điện tiếp tục chảy trong pha thứ ba (không được phép). Shen et al.[19] đã áp dụng thành cảm biến sóng bậc ba SĐĐ cảm ứng trong vùng suy giảm kích từ tốc độ cao với dòng điện chạy liên tục trong cả ba pha của máy.

Một hạn chế quan trọng về phương pháp ứng dụng sóng hài bậc ba là giả định ban đầu trong phân tích rằng điện cảm là bằng nhau trong cả ba pha. Giả định này thường là hợp lệ cho các máy nam châm gắn trên bề mặt, nhưng không chính xác đối với các cấu hình có rô nam châm cụ thể. Trong trường hợp này, các sai số trong ước tính vị trí sẽ tăng lên do sự thay đổi dòng quá nhanh và có thể cần thêm bộ lọc thông thấp.

3.3.3. Phương pháp dựa trên bộ quan sát

Nguyên lý bộ quan sát (Hình 3.5) đã được áp dụng cho hoạt động không cảm biến của máy PM. Một máy điện và bộ biến đổi công suất được cung cấp bởi một hoặc nhiều đầu vào (ví dụ: điện áp) và tạo ra một số đầu ra được đo (ví dụ: dòng). Một mô hình toán học của tổ hợp bộ chuyển đổi / máy được cung cấp cùng một đầu vào và tạo ra các ước tính của các đầu ra. Các kết quả đầu ra ước tính này được so sánh với các đầu ra được đo để tạo ra một sai số ước tính, được đưa trở lại mô hình để hỗ trợ trong việc hiệu chỉnh các ước tính. Nếu sai số ước lượng nhỏ, mô hình sẽ tái tạo lại hành vi của bộ chuyển đổi và máy thực. Tất cả các trạng thái trong mô hình toán học đều có thể đạt được, do đó, ước tính của tất cả các đại lượng vật lý có sẵn, bao gồm cả các trạng thái khó hoặc tốn kém để đo (ví dụ: vị trí rôto hoặc từ thông móc vòng).

Khâu quan sát vòng kín được sử dụng để giải quyết cảm biến vị trí trong các máy PM [20]-[28]. Solsana et al. [20] mô tả ứng dụng của nguyên tắc này cho một máy PM hình sin và trình bày kết quả mô phỏng cho thấy máy có thể khởi động thành công ngay cả khi có sai số ban đầu ở tốc độ ước tính và vị trí rôto. Một bài báo sau đó của cùng một tác giả [21] đã thảo luận về tác động của các sai số mô hình hóa, chẳng hạn như sóng hài không gian của từ trường, lên tốc độ ước lượng rotor. Hai mô hình thay thế (một “mô hình điện áp” và “mô hình

hiện tại”) cho một máy PM có rotor lõi đáng kể đã được sử dụng để ước lượng vị trí bởi Matsui và đồng nghiệp [22], [23]. Tuy nhiên, vấn đề khởi động vẫn còn tồn tại, và để nghiên cứu khởi động, cần một kỹ thuật riêng biệt [24], thường sử dụng phương pháp biến đổi điện cảm được mô tả trong Phần IV. Trong các ứng dụng ở đó sự chuyển động ban đầu có thể được xem xét, các luật điều khiển được sửa đổi đã được đề xuất [25] để điều khiển không cảm biến bền vững ở tốc độ thấp.

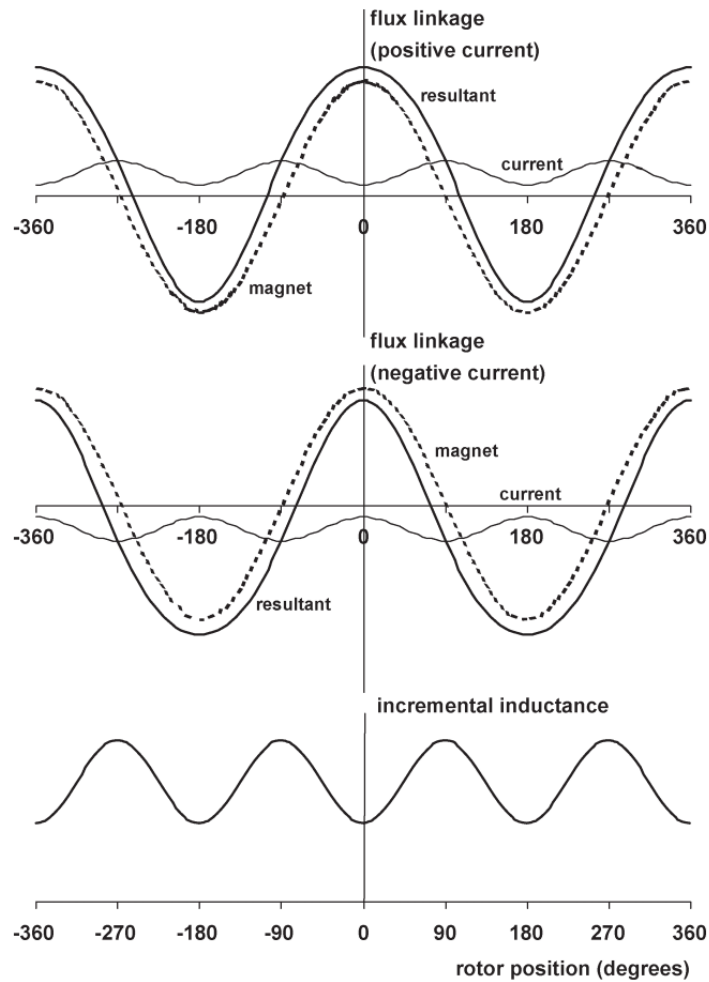
Một tiếp cận dựa trên mô hình cảm biến SĐĐ cảm ứng đã được mô tả bởi Cho et al. [26] cho điều khiển trực tiếp trong một máy giặt. Trong ứng dụng này, máy đã chịu sự thay đổi nhiệt độ lớn, ảnh hưởng đến cả điện trở stato và mật độ từ thông còn lại của nam châm ferrite. Do đó, nhiệt độ của máy được ước tính, thông qua điện trở stator, ở những phần của chu trình giặt, nơi tốc độ rotor bằng không, và các hiệu chỉnh thích hợp được áp dụng cho các thông số mô hình. Một cách tiếp cận khác để bám tham số phụ thuộc nhiệt độ [27] liên quan đến việc bơm tín hiệu nhiễu loạn hiện tại khi máy hoạt động ở tốc độ ổn định.

3.4. CẢM BIẾN VỊ TRÍ SỬ DỤNG SỰ BIẾN ĐỔI CẢM ỨNG

Một phương pháp thay thế của cảm biến vị trí liên quan đến việc theo tỷ lệ thay đổi dòng điện cuộn dây. Vì tỷ lệ thay đổi dòng điện phụ thuộc vào độ tự cảm của cuộn dây, và điện cảm này là một hàm của vị trí rotor và dòng điện cuộn dây, thì vị trí rôto có thể được suy ra từ dòng điện xoay chiều và tốc độ thay đổi của nó. Một sơ đồ như vậy có lợi thế quan trọng là nó hữu ích ngay cả ở tốc độ bằng không, nơi không có SĐĐ cảm ứng. Cảm biến vị trí rotor bằng biến thiên cảm ứng trong máy PM không chỗi than phức tạp vì:

- 1) Trong một máy có nam châm gắn trên bề mặt, không có sự cố định vốn có, vì vậy bất kỳ biến thiên cuộn cảm nào với vị trí rotor chỉ phát sinh từ độ bão hòa từ tính.
- 2) Tốc độ thay đổi dòng điện trong máy PM bị chi phối bởi SĐĐ cảm ứng.
- 3) biến thiên của điện cảm gia tăng với vị trí rôto trải qua hai chu kỳ trên một chu trình điện đơn của máy PM, gây ra sự mơ hồ ở cảm biến vị trí.

Điểm cuối cùng được minh họa trong hình 3.6, cho thấy sự biến đổi của các thành phần khác nhau của từ thông móc vòng qua hai chu kỳ của một máy PM hai cực. Giá trị tối thiểu của điện cảm gia tăng xảy ra ở các vị trí rotor của cả 0^0 và 180^0 , nhưng từ thông móc vòng của nam châm là cực dương ở vị trí 0^0 và âm cực đại ở vị trí 180^0 . Mặc dù có những khó khăn rõ ràng, đã có nhiều nỗ lực để sử dụng điện cảm biến đổi để phát hiện vị trí rotor trong các máy PM.

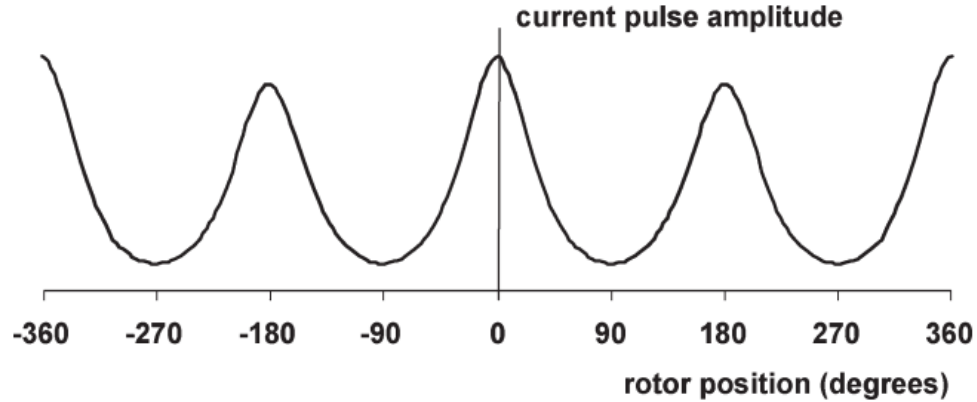


Hình 3.6 Từ thông móc vòng và điện cảm gia tăng như là một hàm của vị trí rôto trong một máy PM hiện.

Ứng dụng đầu tiên của các phương pháp tự cảm giải quyết vấn đề khởi động, bao gồm việc xác định vị trí rôto trước khi kích thích đầy đủ được áp dụng cho máy. Định danh vị trí ban đầu đặc biệt quan trọng trong các ứng dụng như lực kéo, nơi bất kỳ chuyển động ngược nào gây ra do kích thích không chính xác là không thể chấp nhận được. Tín hiệu điện áp thăm dò đã được áp dụng cho các cuộn dây pha của một máy PM cực hiện [23], [29] - [32]. Biên độ dòng điện tổng phụ thuộc vào điện cảm gia tăng, và do đó vị trí rotor. Tuy nhiên, vị trí được cảm

nhận mở rộng phạm vi 180^0 điện và vẫn còn vấn đề giải quyết hướng của rotor trên toàn bộ phạm vi 360^0 điện

Giải pháp được chấp nhận phổ biến cho vấn đề mơ hồ về hướng của rotor là xem xét hiệu quả của độ bão hòa từ tính trên điện cảm gia tăng. Các nguyên tắc của phương pháp này có thể được hiểu bằng cách tham khảo các đặc tính từ thông móc vòng trong hình 3.6. Giả sử vị trí rôto được xác định là 0^0 hoặc 180^0 , bằng cách quan sát điện cảm gia tăng của một pha có giá trị nhỏ nhất. Bây giờ, hãy xem xét ảnh hưởng của một xung dương dòng điện. Nếu rôto được căn chỉnh tại vị trí 0^0 hiệu ứng của xung là tăng tổng dòng dương liên kết với pha, nhưng nếu rôto ở vị trí 180^0 dòng điện sẽ giảm tổng từ thông móc vòng âm. Do đó, có sự khác biệt giữa biên độ dòng cho hai vị trí rotor thay thế và do đó, sự khác biệt về mức độ bão hòa từ. Nếu độ bão hòa từ tăng, điện cảm gia tăng thấp hơn và do đó biên độ của xung dòng điện lớn hơn tại một trong hai vị trí rotor có thể, như minh họa trong hình 3.7. Độ bão hòa từ có ảnh hưởng nhỏ nhưng đáng kể đến điện cảm gia tăng ngay cả trong một máy từ tính bề mặt không có hiệu ứng thông thường vốn có. Nghiên cứu của Nakashima et al. [33] đã thành công trong việc sử dụng các hiệu ứng bão hòa để ước tính vị trí rotor ban đầu của máy móc, mặc dù với độ chính xác giảm: sai số tối đa 18^0 điện đã được báo cáo.



Hình 3.7 Biên độ xung dòng điện như một hàm của vị trí rôto trong một máy có độ bão hòa từ.

Vị trí khởi động ban đầu của động cơ PM cực lõi có thể được nghiên cứu bằng các phương pháp bơm tần số cao để phát hiện hiệu quả điện cảm gia tăng vị trí [36], [37], [38] - [40]. Ví dụ, Noguchi et al.[36] đã phỏng đoán trở kháng cuộn dây với bộ điều khiển điện áp điều chế xung, tạo ra đầu ra biên độ thấp ở tần số 50 Hz. Sự mơ hồ trong hướng nam châm được giải quyết bằng cách điều chỉnh các thông số của bộ điều khiển vòng kín dòng để đáp ứng dòng điện dao động cho các giá trị thấp nhất của điện cảm gia tăng, tương ứng với độ bão hòa tối đa. Aihara et al.[35] sử dụng tần số cao hơn (500 Hz) để bơm tín hiệu và phân biệt giữa các cực nam châm bằng các hiệu ứng bão hòa từ rotor.

Vị trí rôto ban đầu có thể được phát hiện bằng cách sử dụng xung điện áp, như mô tả của Lai et al. [36]. Trong bài báo này, điện áp liên kết dc được áp dụng cho các tổ hợp khác nhau của ba pha được kết nối với nhau bằng cách sử dụng cầu sáu van. Dòng điện được phép đạt giá trị ở mức ổn định trong tất cả các pha, nhưng khi điện áp được tháo ra, dòng điện phân hủy nhanh hơn trong pha có điện cảm thấp nhất. Không cần thiết các cảm biến dòng điện pha, bởi vì sự

phân rã dòng điện được đánh giá bằng các điện áp đường dây, mà đã trải qua một sự thay đổi mức đột ngột khi các dòng pha tương ứng giảm xuống 0.

Một số phương pháp cảm biến vị trí từ biến thiên điện cảm đã được phát triển để quay liên tục các máy móc nổi bật. Kulkarni và Ehsani [40] đã đề xuất một phương pháp tính toán điện cảm pha hiệu quả từ cách xử lý của bộ điều khiển dòng trễ cho một pha kích thích. Sự không rõ ràng ở cảm biến vị trí được tránh bằng cách khởi động máy từ một vị trí đã biết và liên tục theo dõi các thay đổi về điện cảm với giả định rằng máy luôn xoay theo một hướng. Corley và Lorenz [41] sử dụng bơm điện áp ở tần số sóng 2 kHz. Thành phần tần số tương ứng của dòng điện được điều chế bởi biến thiên vị trí rotor của điện cảm pha. Thông tin về vị trí rôto được trích xuất bằng cách so sánh với một tập hợp các tín hiệu ở cùng tần số sóng mang và được điều chế bởi một vị trí rôto ước tính, được bắt nguồn từ một bộ ước lượng chuyển động đơn giản. Kết quả của việc so sánh là một tín hiệu được điều chế bởi sai số giữa các vị trí rotor thực tế và ước tính. Thông tin lỗi vị trí đã được giải mã và được sử dụng để điều chỉnh đầu ra của bộ ước lượng chuyển động, do đó theo dõi vị trí rotor thực tế trên một phạm vi tốc độ rộng, bao gồm tốc độ bằng không. Một cách tiếp cận tương tự đã được báo cáo bởi Noguchi và Kohno [42], người đã sử dụng tần số sóng mang 4 kHz, trong khi Shinnaka [43] đã phát triển một thuật toán lọc mới, dựa trên vòng lặp khóa pha, thể hiện hiệu suất tốc độ thấp tốt.

Hoạt động sensorless từ biến thiên điện cảm đã đạt được bằng cách sử dụng các trình tự điện áp được tiêm trong khi ngắt trong điều chế điện áp bình thường [44], và từ các thành phần tần số xung điều tần ở tần số chuyển đổi lên tới 5,5 kHz [45], [46]. Có một sự cân bằng trong việc lựa chọn tần số điều chế: tần số thấp dẫn đến biên độ dòng điện dễ phát hiện lớn hơn, nhưng có thể gây

nhiều âm thanh từ động cơ, trong khi tần số điều chế cao tránh nhiều âm thanh, nhưng biên độ hiện tại giảm nhiều. Choeisai et al.[47] có thể làm việc với tần số điều chế 20 kHz bằng cách sử dụng một máy dò Walsh để hỗ trợ đo các biên độ dòng điện tần số cao. Hartas et al.[48] đã phát triển một máy sáu pha mới và thực hiện thao tác cảm biến từ hành vi phụ thuộc vào vị trí của bộ điều khiển dòng trễ. Một nghiên cứu chi tiết về tiêu tin hiệu tần số cao, sử dụng các kỹ thuật phân tích thực nghiệm và hữu hạn, bởi Jang et al.[49] đã nhấn mạnh sự cần thiết phải lựa chọn cẩn thận biên độ và tần số tín hiệu.

Một tùy chọn nữa để cải thiện cảm biến vị trí là sửa đổi rôto máy. Ví dụ, Nondahl et al.[50] đã thêm một cuộn dây rôto mạch xoay gắn vào một máy nam châm bề mặt mà không có sự cố hữu vốn có. Cuộn dòng phản ứng với các trường thay đổi theo thời gian hoạt động theo hướng của từ trường chính, và do đó tăng cường sự phụ thuộc vị trí của điện cảm cuộn dây. Một hiệu ứng tương tự đã thu được bằng cách phủ các cực rôto giống như cực với vật liệu dẫn điện không từ tính [51]. Matsuse et al.[52] đã sử dụng cấu hình mới của thiết bị đóng mở để hỗ trợ ước tính vị trí rôto. Cầu từ trên các khe stator bao gồm một khu vực cắt ngang. Các khu vực này đã tiến hành một thành phần của dòng điện rò rỉ quanh co, nhưng trở nên bão hòa bởi từ thông nam châm rotor, do đó ảnh hưởng đến các cuộn cảm cuộn pha.

3.5. CÀI ĐẶT VỊ TRÍ DỰA TRÊN TỪ THÔNG MÓC VÒNG

3.5.1. Nguyên tắc

Cảm biến vị trí thông qua biến đổi từ thông móc vòng đã được biết trong nhiều năm, nhưng việc thực hiện thành công của nó đã trở thành có thể chỉ trong thập kỷ qua với sự xuất hiện của các thiết bị có đủ khả năng xử lý thời gian thực.

Ý tưởng cơ bản của cảm biến vị trí từ thông móc vòng là đơn giản. Phương trình điện áp pha có thể được viết là

$$v = R \cdot i + \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

Ở đây

v -điện áp đầu cuối pha

i - pha hiện tại

R - pha kháng

ψ - pha từ thông móc vòng

và các từ thông móc vòng là một chức năng của vị trí hiện tại và rotor. Phương trình (1) có thể được sắp xếp lại thành

$$\psi = \int \{v - R \cdot i\} \cdot dt. \quad (2)$$

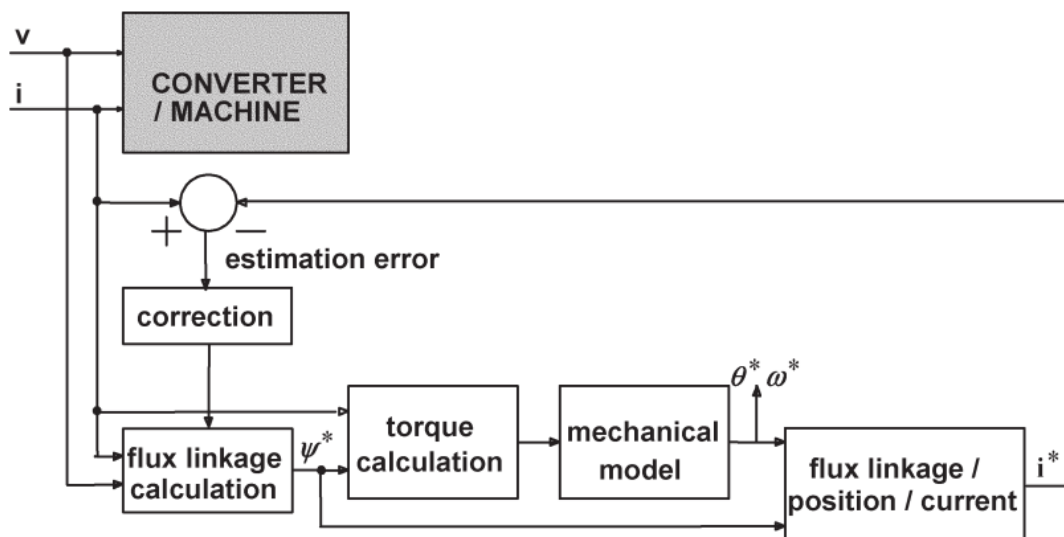
Do đó, có vẻ như bằng cách trừ đi điện áp điện trở giảm từ điện áp pha và tích hợp, thì có thể tạo ra một ước lượng liên tục của từ thông móc vòng.

Trong hầu hết các máy điện, không thể đo trực tiếp điện áp đầu cuối pha, vì các vấn đề cách ly, và thay vào đó, pha điện áp được áp dụng được ước tính từ kiến thức về điện áp cung cấp DC và bộ chuyển đổi trạng thái rắn được đưa vào bộ điều khiển điện áp. Một nguyên nhân lỗi quan trọng ở đây là việc chuyển đổi nhu cầu điện áp thành tín hiệu chuyển đổi thiết bị chuyển đổi, phải bao gồm một số thời gian chết giữa việc tắt một thiết bị trong một chân pha biến tần và chuyển sang thiết bị kia trong cùng một chân. Hiệu ứng của thời gian chết là cho vào

một lỗi giữa các giá trị điện áp pha và giá trị thực của điện áp pha, với sai số lớn nhất ở điện áp đầu ra gần bằng không. Một số tác giả đã nhấn mạnh lỗi đo điện áp này và đã phát triển các kỹ thuật để bù đắp các lỗi thời gian chết [53], [54].

Sự tích hợp vòng mở trong (2) dễ bị lỗi do trôi dạt: Các tín hiệu bù nhỏ trong các phép đo được cộng lại theo thời gian, khiến cho đầu ra của bộ tích hợp bị bão hòa. Có thể giảm trôi tích hợp nếu bộ tích hợp thuần túy được thay thế bằng bộ lọc thông thấp hoặc cấu trúc tích hợp thay thế [56], nhưng điều chỉnh này ức chế phạm vi hoạt động tốc độ thấp của bộ ước lượng từ thông. Thay vào đó, xu hướng chung của nghiên cứu gần đây về khía cạnh này của hoạt động cảm biến là tập trung vào ước lượng từ thông móc vòng kín như một phần của quá trình cảm biến vị trí. Phần này kiểm tra hoạt động cảm biến vị trí bằng cách sử dụng các từ thông móc vòng và rút ra sự khác biệt giữa các bộ ước lượng bao gồm mô hình hệ thống cơ khí, và do đó phù hợp hơn cho hoạt động với điều kiện tải biến đổi.

Ước lượng vị trí sử dụng các từ thông móc vòng có thể được xem như là sự pha trộn của các phương pháp cảm biến sử dụng EMF chuyển động (Phần III) và điện cảm (Phần IV): Một số tác giả đã phối hợp với các khái niệm bằng cách giới thiệu ý tưởng về một ước lượng SĐĐ cảm ứng mở rộng (EEMF), bao gồm SĐĐ cảm ứng và các thuật ngữ quy nạp [57] - [59]. Tuy nhiên, cần nhấn mạnh rằng từ thông móc vòng không truy cập được bất kỳ thông tin vị trí nào nhiều hơn so với sự kết hợp của EMF chuyển động và cảm biến vị trí, do đó vẫn có các loại máy hoạt động không cảm biến vị trí cực kỳ khó khăn trong một số điều kiện vận hành nhất định.



Hình 3.8. Khâu quan sát vòng kín để ước lượng vị trí bằng cách sử dụng các từ thông móc vòng (* = trạng thái ước tính).

3.5.2. Tính toán từ thông với mô hình cơ khí

Trong máy PM không chổi than, từ thông liên kết với mỗi pha phát sinh từ chính nam châm vĩnh cửu và các dòng điện trong cuộn dây của máy. Các liên kết từ thông từ là một chức năng của vị trí rotor với tính chất của chức năng tùy thuộc vào chế độ vận hành dự kiến của máy. Trong một máy không chổi than, mỗi liên kết từ thông là một hàm hình thang của vị trí, nhưng trong máy hình sin, một sự biến đổi hình sin của mỗi liên kết từ thông với vị trí là cần thiết. Như đã lưu ý trong Phần IV, sự thay đổi điện cảm pha, và do đó sự thay đổi của các từ thông móc vòng từ dòng pha, phụ thuộc vào cấu trúc máy. Tiếp cận từ thông móc vòng để ước lượng vị trí trong tất cả các loại máy thường xuyên sử dụng các nguyên tắc quan sát vòng kín được chỉ ra trong hình 3.8. Điện áp và dòng điện được cung cấp cho một máy là đầu vào cho một bộ ước lượng, đầu tiên tính giá trị của từ thông móc vòng với mỗi pha. Liên kết từ thông và dòng điện có thể

được sử dụng để tính toán mô-men xoắn, và dữ liệu mô-men xoắn được nhập vào một mô hình cơ học

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (T - B\omega - T_L), \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (3)$$

(Ở đây: J- quán tính cơ học; B- hằng số ma sát nhớt; T_L - mô-men xoắn tải). Ước tính tốc độ rotor ω và vị trí θ được tạo ra. Để đóng vòng lặp ước lượng, các giá trị ước tính của các liên kết vị trí và pha từ thông được sử dụng để ước lượng dòng pha, được so sánh với các dòng được đo để tạo ra lỗi ước lượng. Lỗi này được đưa trở lại vào bộ ước lượng từ thông móc vòng ban đầu, nơi nó chống lại xu hướng trôi dạt do sai số trong phép đo.

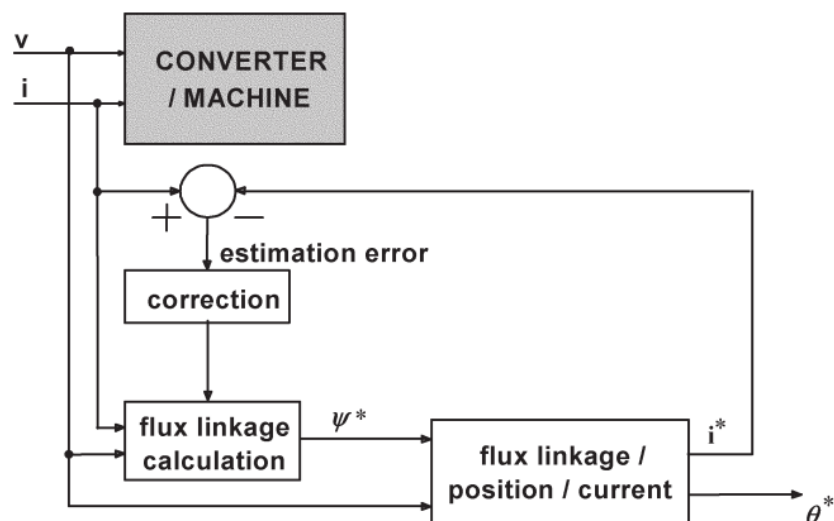
Các mục đích ban đầu tại từ thông móc vòng kết hợp và quan sát vị trí cho các máy PM không chổi than bởi Jones và Lang [60] và Sepe và Lang [61] đã bị thất bại bởi các giới hạn về khả năng xử lý thời gian thực tại thời điểm đó. Những tiến bộ tiếp theo trong công nghệ DSP đã cho phép các nguyên tắc quan sát này được thực hiện hiệu quả. Ví dụ, một bộ lọc Kalman mở rộng cho một động cơ không chổi than dc đã được phát triển bởi Terzic và Jadric [54] và thực hiện trong một DSP. Stator-kháng ước tính cũng được bao gồm trong thuật toán để chống lại những ảnh hưởng của lỗi tính toán từ thông móc vòng gây ra bởi một giá trị không chính xác của kháng khi nhiệt độ động cơ tăng trong hoạt động liên tục. Vận hành không cảm biến ở tốc độ xuống tới 50r/phút đã được ghi lại cho một máy có độ không đáng kể. Một trở ngại để áp dụng thuật toán lọc Kalman mở rộng cho ước lượng vị trí rotor là cần phải thiết lập các giá trị thích hợp cho các tham số ma trận hiệp phương sai, phản ánh sự không chắc chắn trong mô hình hóa và phép đo. Các giá trị tham số thường được chọn bởi thử nghiệm và sai, nhưng Bolognani et al.[55] đã phát triển các nguyên tắc lựa chọn.

3.5.3. Tính toán từ thông không có mô hình cơ khí

Các khâu quan sát vòng kín bao gồm một mô hình động lực học cơ học dễ bị lỗi do đặc điểm kỹ thuật không chính xác hoặc sự thay đổi của các thông số cơ học. Vì vậy, một số phương pháp để tránh một mô hình cơ học đã được giới thiệu.

Ước lượng vị trí từ sự biến đổi từ thông móc vòng được nghiên cứu bởi Wu và Slemon [62] đối với trường hợp của một máy hình sin mà không có sự hiệu quả đáng kể. Các bộ tích hợp tương tự được sử dụng để tính toán liên kết từ thông, bởi vì biến tần được kiểm soát trễ, do đó sẽ rất khó để đồng bộ hóa việc lấy mẫu dữ liệu với các sự cố chuyển đổi ngẫu nhiên. Tích hợp sai lệch được trung hòa bằng cách tính toán một tín hiệu bù đắp, đảm bảo rằng các từ thông móc vòng trung bình với mỗi giai đoạn là số không khi máy hoạt động ở tốc độ ổn định và mô-men xoắn. Cách tiếp cận này là một giải pháp chi phí thấp hiệu quả, nhưng không cho phép máy tự khởi động và không thể đối phó với những thay đổi nhanh về tốc độ hoặc mô-men xoắn.

Các nguyên tắc liên kết từ thông và ước lượng vị trí với một khâu quan sát vòng kín nhưng không cần mô hình cơ học được biểu diễn sơ đồ trong hình 3.9. Liên kết từ thông được tính bằng cách tích hợp điện áp đầu vào và dòng điện, và đặc tính dòng / vị trí / dòng chảy được lưu trữ được sử dụng để ước tính vị trí hiện tại và rôto. Dòng ước tính được nạp lại để sử dụng trong khối tra cứu, cũng như được so sánh với các dòng được đo để tạo ra một lỗi ước lượng. Tính năng đóng vòng lặp này chống lại sự tích hợp sai lệch.



Hình 3.9. Ước lượng vị trí bằng cách sử dụng các từ thông móc vòng không có mô hình cơ học (* = trạng thái ước tính).

Batzel và Lee đã sử dụng một khâu quan sát Luenberger để liên kết từ thông và ước lượng vị trí trong một máy PM hình sin, cả hai đều không có khe và có các nam châm rotor gắn trên bề mặt. Đặc tính liên kết / vị trí / dòng chảy được biểu diễn bằng một đặc tính hình sin cho mỗi liên kết từ thông của nam châm. Trong trường hợp không có tính định lượng, ước lượng vị trí không thể ở tốc độ thấp nhất, do đó cảm biến Hall được sử dụng để cung cấp phép đo vị trí phụ với độ phân giải 30° cho hoạt động dưới 100r/phút. Một tác phẩm sau đó của cùng một tác giả [63] đã tham gia vào mạng nơron để sửa lỗi thời gian thực của các lỗi ước tính vị trí phát sinh từ sự không chắc chắn trong các thông số máy.

Một thay thế cho mô hình cơ học trong từ thông móc vòng và bộ ước lượng vị trí là lấy ước tính ban đầu về vị trí rôto, bằng phép ngoại suy từ các ước tính vị trí trước đó, và sau đó sửa vị trí để đáp ứng với điện áp đo được và thông tin hiện tại. Một ví dụ về cách tiếp cận này [65], [66] đã sử dụng một bộ kết hợp từ thông pha và bộ định vị vị trí rôto, trong đó tích phân sai lệch được chống lại

bằng cách điều chỉnh các giá trị đo hiện tại theo lưu lượng liên kết/dòng/rotor-vị trí đặc điểm của máy. Thuật toán tương tự đã được sử dụng thành công bởi Ostlund và Brokemper [29], người đã báo cáo nhu cầu về phương pháp khởi động phụ khi sử dụng một máy nam châm gắn trên bề mặt. Thao tác cảm biến với ước lượng từ thông móc vòng đã được phát triển để điều khiển động cơ PM với bộ chuyển đổi công suất ma trận [67]. Các vấn đề về tích hợp từ thông sai lệch đã được tránh [68] bằng cách xem xét mối quan hệ giữa những thay đổi gia tăng trong mối liên kết từ thông và vị trí rotor để thiết lập một thuật toán theo dõi chỉ yêu cầu tích hợp các gia số vị trí.

3.6. Phần kết luận

Công nghệ cảm biến cho các máy PM đã được nghiên cứu rộng rãi với sự gia tăng mối quan tâm gần đây được thúc đẩy bởi sự sẵn có của các thiết bị xử lý tín hiệu số mạnh mẽ hơn. Giải pháp đã được tìm thấy cho các vấn đề khó khăn hơn của hoạt động cảm biến, chẳng hạn như bắt đầu từ phần còn lại và cảm biến vị trí cho các máy nam châm gắn trên bề mặt. Mặc dù sự phát triển rộng rãi này, chỉ ở những khu vực đặc biệt của lowcost [10], [26] hoặc các ứng dụng quan trọng về an toàn [69] cho các máy PM không chối than là có lợi ích thương mại được thiết lập, với các nhà sản xuất chính sản xuất mạch tích hợp cho hoạt động không cần thiết sử dụng EMF chuyển động. Tuy nhiên, việc giảm chi phí xử lý năng lượng hơn nữa sẽ cải thiện tính khả thi về kinh tế của nhiều kỹ thuật cảm biến phức tạp hơn được mô tả ở đây.

KẾT LUẬN

Sau một khoảng thời gian ngắn thực hiện đề tài tốt nghiệp, cùng với nỗ lực cố gắng của bản thân và sự giúp đỡ tận tình của các thầy cô giáo, bạn bè cùng lớp, đến nay em đã hoàn thành đề tài tốt nghiệp của mình. Trong đề tài của mình em đã tìm hiểu và thực hiện được các yêu cầu sau:

- Tìm hiểu về động cơ một chiều không chổi than.
- Đưa ra mô hình toán và phương pháp điều khiển động cơ một chiều không chổi than.
- Đi sâu tìm hiểu hoạt động điều khiển động cơ BLDC không có cảm biến vị trí.

Tuy nhiên do thời gian có hạn và cũng như trình độ của bản thân còn nhiều hạn chế nên đề tài thực hiện còn nhiều sơ sót. Em rất mong nhận được sự chỉ bảo, sửa chữa đóng góp ý kiến của các thầy cô giáo, các bạn trong lớp để em có thể thực hiện và hoàn thành đề tài được tốt hơn.

Một lần nữa em xin chân thành cảm ơn sự chỉ bảo, hướng dẫn tận tình của GS.TSKH. Thân Ngọc Hoàn, các thầy cô trong khoa, các bạn bè trong lớp đã giúp đỡ em trong quá trình thực hiện đề tài.

Em xin chân thành cảm ơn!

Hải Phòng, ngày 21 tháng 8 năm 2018

Sinh viên thực hiện

Trương Quỳnh Lâm

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt:

1. Thư viện online trường Đại học Dân lập Hải Phòng.
2. GS. TSKH. Thân Ngọc Hoàn, TS. Nguyễn Trọng Thắng. “*Nguyên lý hoạt động của máy điện*” năm 2016, Nhà xuất bản Xây dựng.

Tiếng Anh

3. Paul P. Acarnley and John F. Watson, Senior Member, “*Review of Position-Sensorless Operation of Brushless Permanent-Magnet Machines*”.
4. J. R. Frus and B. C. Kuo, “*Closed-loop control of step motors using waveform detection*,” in Proc. Int. Conf. Stepping Motors and Systems, Leeds, U.K., 1976, pp. 77–84.
5. P. Pillay and R. Krishnan, “*Application characteristics of permanent magnet synchronous and brushless DC motors for servo drives*,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 27, no. 5, pp. 986–996, Sep./Oct. 1991.
6. S. K. Safi, P. P. Acarnley, and A. G. Jack, “*Analysis and simulation of the high-speed torque performance of brushless DC motor drives*,” Proc. Inst. Elect. Eng.—Electr. Power Appl., vol. 142, no. 3, pp. 191–200, Mar. 1995.
7. H.-C. Chen and C.-M. Liaw, “*Current-mode control for sensorless BDCM drive with intelligent commutation tuning*,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 17, no. 5, pp. 747–756, Sep. 2002.

8. K.-Y. Cheng and Y.-Y. Tzou, “***Design of a sensorless commutation IC for BLDC motors,***” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 6, pp. 1365–1375, Nov. 2003.
9. K. Iizuka, H. Uzuhashi, M. Kano, T. Endo, and K. Mohri, “***Microcomputer control for sensorless brushless motor,***” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-21, no. 4, pp. 595–601, May/Jun. 1985.
10. J. Shao, D. Nolan, M. Teissier, and D. Swanson, “***A novel microcontrollerbased sensorless brushless DC (BLDC) motor drive for automotive fuel pumps,***” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 6, pp. 1734–1740, Nov./Dec. 2003.
11. H. A. Toliyat, L. Hao, D. S. Shet, and T. A. Nondahl, “***Position-sensorless control of surface-mount permanent-magnet AC (PMA) motors at low speeds,***” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 1, pp. 157–164, Feb. 2002.
12. Y. Amano, T. Tsuji, A. Takahashi, S. Ouchi, K. Hamatsu, and M. Iijima, “***A sensorless drive system for brushless DC motors using a digital phaselocked loop,***” *Electr. Eng. Jpn.*, vol. 142, no. 1, pp. 57–66, 2003.
13. G.-J. Su and J. W. McKeever, “***Low-cost sensorless control of brushless DC motors with improved speed range,***” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 2, pp. 296–302, Mar. 2004.
14. ———, “***Low-cost sensorless control of brushless DC motors with improved speed range,***” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 3, pp. 878–879, May 2004.

15. D.-H. Jung and I.-J. Ha, "***Low-cost sensorless control of brushless DC motors using a frequency-independent phase shifter,***"IEEE Trans. Power Electron., vol. 15, no. 4, pp. 744–752, Jul. 2000.
16. J. X. Shen and K. J. Tseng, "***Analyses and compensation of rotor position detection error in sensorless pm brushless DC motor drives,***"IEEE Trans. Energy Convers., vol. 18, no. 1, pp. 87–93, Mar. 2003.
17. J. P. M. Bahlmann, "***A full-wave motor drive IC based on the backemf sensing principle,***"IEEE Trans. Consum. Electron., vol. 35, no. 3, pp. 415–420, Aug. 1989.
18. J. C. Moreira, "***Indirect sensing for rotor flux position of permanent magnet AC motors operating over a wide speed range,***"IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 32, no. 6, pp. 1394–1401, Nov./Dec. 1996.
19. J. X. Shen, Z. Q. Zhu, and D. Howe, "***Sensorless flux-weakening control of permanent-magnet brushless machines using third harmonic back emf,***" IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 40, no. 6, pp. 1629–1636, Nov./Dec. 2004.
20. J. Solsona, M. I. Valla, and C. Muravchik, "***A nonlinear reduced order observer for permanent magnet synchronous motors,***"IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 43, no. 4, pp. 492–497, Aug. 1996.
21. ———, "***On speed and rotor position estimation in permanent-magnet AC drives,***"IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 47, no. 5, pp. 1176–1180, Oct. 2000.
22. N. Matsui and M. Shigyo, "***Brushless DC motor control without position and speed sensors,***"IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 28, no. 1, pp. 120–127, Jan./Feb. 1992.

23. N. Matsui, "***Sensorless pm brushless DC motor drives***,"IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 43, no. 2, pp. 300–308, Apr. 1996.
24. T. Takeshita, A. Usui, and N. Matsui, "***Sensorless salient-pole PM synchronous motor drive in all speed ranges***,"Electr. Eng. Jpn., vol. 135, no. 3, pp. 64–73, 2001
25. B. Nahid-Mobarakeh, F. Meibody-Tabar, and F.-M. Sargos, "***Mechanical sensorless control of PMSM with online estimation of stator resistance***,"IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 40, no. 2, pp. 457–471, Mar./Apr. 2004.
26. K. Y. Cho, S. B. Yang, and C. H. Hong, "***Sensorless control of a PM synchronous motor for direct drive washer without rotor position sensors***,"Proc. Inst. Elect. Eng.—Electr. Power Appl., vol. 151, no. 1, pp. 61–69, Jan. 2004.
27. K.-W. Lee, D.-H. Jung, and I.-J. Ha, "***An online identification method for both stator resistance and back-emf coefficients of PMSMs without rotational transducers***," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 51, no. 2, pp. 507–510, Apr. 2004.
28. G. D. Andreescu, "***Adaptive observer for sensorless control of permanent magnet synchronous motor drives***,"Electr. Power Compon. Syst., vol. 30, no. 2, pp. 107–119, Feb. 2002.
29. S. Ostlund and M. Brokemper, "***Sensorless rotor position detection from zero to rated speed for an integrated PM synchronous motor drive***,"IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 32, no. 5, pp. 1158–1165, Sep./Oct. 1996.

30. J.-I. Ha, K. Ide, T. Sawa, and S.-K. Sul, “**Sensorless rotor position estimation of an interior permanent-magnet motor from initial states**,”IEEETrans. Ind. Appl., vol. 39, no. 3, pp. 761–767, May/Jun. 2003.
31. G. H. Jang, J. H. Park, and J. H. Chang, “**Position detection and startup algorithm of a rotor in a sensorless BLDC motor utilising inductancevariation**,”Proc. Inst. Elect. Eng.—Electr. Power Appl., vol. 149, no. 2,pp. 137–142, Mar. 2002.
32. M. Tursini, R. Petrella, and F. Parasiliti, “**Initial rotor position estimationmethod for pm motors**,”IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 6, pp. 1630–1640, Nov./Dec. 2003.
33. S. Nakashima, Y. Inagaki, and I. Miki, “**Sensorless initial rotor position estimation of surface permanent-magnet synchronous motor**,” IEEE Trans.Ind. Appl., vol. 36, no. 6, pp. 1598–1603, Nov./Dec. 2000.
34. T. Noguchi, K. Yamada, S. Kondo, and I. Takahashi, “**Initial rotor positionestimation method of sensorless PM synchronous motor with no sensitivity to armature resistance**,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 45, no. 1,pp. 118–125, Feb. 1998.
35. T. Aihara, A. Toba, T. Yanase, A. Mashimo, and K. Endo, “**Sensorless torque control of salient-pole synchronous motor at zero-speed operation**,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 14, no. 1, pp. 202–208,Jan. 1999.
36. Y.-S. Lai, F.-S. Shyu, and S. S. Tseng, “**New initial position detection technique for three-phase brushless DC motor without position andcurrent sensors**,”IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 2, pp. 485–491,Mar./Apr. 2003.

37. J.-H. Jang, S.-K. Sul, J.-I. Ha, K. Ide, and M. Sawamura, “***Sensorless drive of surface-mounted permanent-magnet motor by high-frequency signal injection based on magnetic saliency***,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 4, pp. 1031–1038, Jul./Aug. 2003.
38. M. E. Haque, L. Zhong, and M. F. Rahman, “***A sensorless initial rotor position estimation scheme for a direct torque controlled interior permanent magnet synchronous motor drive***,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 8, no. 6, pp. 1376–1383, Nov. 2003.
39. H. Kim, K.-K. Huh, R. D. Lorenz, and T. M. Jahns, “***A novel method for initial rotor position estimation for IPM synchronous machine drives***,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 40, no. 5, pp. 1369–1378, Sep./Oct. 2004.
40. A. B. Kulkarni and M. Ehsani, “***A novel position sensor elimination technique for the interior permanent-magnet synchronous motor drive***,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 28, no. 1, pp. 144–150, Jan./Feb. 1992.
41. M. J. Corley and R. D. Lorenz, “***Rotor position and velocity estimation for a salient-pole permanent magnet synchronous motor at standstill and high speeds***,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 34, no. 4, pp. 784–789, Jul./Aug. 1998.
42. T. Noguchi and S. Kohno, “***Mechanical-sensorless permanent-magnet motor drive using relative phase information of harmonic currents caused by frequency-modulated three-phase PWM carriers***,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 4, pp. 1085–1092, Jul./Aug. 2003.
43. S. Shinnaka, “***New ‘mirror-phase vector control’ for sensorless drive of permanent-magnet synchronous motor with pole saliency***,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 40, no. 2, pp. 599–606, Mar./Apr. 2004.

44. E. Robeischl and M. Schroedl, “**Optimized INFORM measurement sequence for sensorless pm synchronous motor drives with respect to minimum current distortion**,”IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 40, no. 2, pp. 591–598, Mar./Apr. 2004.
45. V. Petrovic, A. M. Stankovic, and V. Blasko, “**Position estimation in salient PM synchronous motors based on PWM excitation transients**,”IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 3, pp. 835–843, May/Jun. 2003.
46. S. Ogasawara, T. Matsuzawa, and H. Akagi, “**A position-sensorless IPM motor drive system using a position estimation based on magnetic saliency**,”Electr. Eng. Jpn., vol. 131, no. 2, pp. 68–79, 1999.
47. K. Choeisai, N. Kobayashi, and S. Kondo, “**Walsh function-based position sensorless control for interior permanent-magnet motor drives using ripple current of high-frequency triangular-wave-carrier PWM inverter**,”Electr. Eng. Jpn., vol. 145, no. 3, pp. 80–88, 2003.
48. P. Hartas, A. Shahin, K. I. Nuttall, and D. W. Shimmin, “**A novel permanent magnet DC motor and sensorless electrical drive system**,”Electr. Power Compon. Syst., vol. 29, no. 1, pp. 15–28, Jan. 2001.
49. J.-H. Jang, J.-I. Ha, M. Ohto, K. Ide, and S.-K. Sul, “**Analysis of permanent-magnet machine for sensorless control based on high frequency signal injection**,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 40, no. 6, pp. 1595–1604, Nov./Dec. 2004.
50. T. A. Nondahl, G. Ray, P. B. Schmidt, and M. L. Gasperi, “**A permanent magnet rotor containing an electrical winding to improve detection**

of rotor angular position,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 35, no. 4, pp. 819–824, Jul./Aug. 1999.

51. M. Tomita, S. Doki, S. Okuma, and H. Yamaguchi, “**Sensorless rotor position estimation at standstill of cylindrical brushless DC motors using opened phase voltage change caused by eddy currents,**” Electr. Eng. Jpn., vol. 126, no. 1, pp. 52–60, 1999.

52. K. Matsuse, T. Baba, I. Masukane, H. Ohta, and R. Tsuchimoto, “**Position sensorless starting method and driving characteristics of closed-slot small permanent-magnet motor,**” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 2, pp. 451–456, Mar./Apr. 2003.

53. L. Harnefors and H. P. Nee, “**A general algorithm for speed and position estimation of AC motors,**” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 47, no. 1, pp. 77–83, Feb. 2000.

54. B. Terzic and M. Jadric, “**Design and implementation of the extended Kalman filter for the speed and rotor position estimation of brushless DC motor,**” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 48, no. 6, pp. 1065–1073, Dec. 2001.

55. S. Bolognani, L. Tubiana, and M. Zigliotto, “**Extended Kalman filter tuning in sensorless PMSM drives,**” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 6, pp. 1741–1747, Nov./Dec. 2003.

56. J. Hu and B. Wu, “**New integration algorithms for estimating motor flux over a wide speed range,**” IEEE Trans. Power Electron., vol. 13, no. 5, pp. 969–977, Sep. 1998.

57. S. Ichikawa, Z. Chen, M. Tomita, S. Doki, and S. Okuma, ***“Sensorless controls of salient-pole permanent magnet synchronous motors using extended electromotive force models,”*** Electr. Eng. Jpn., vol. 146, no. 3, pp. 55–64, 2004.
58. Z. Chen, M. Tomita, S. Doki, and S. Okuma, ***“An extended electromotive force model for sensorless control of interior permanent-magnet synchronous motors,”*** IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 50, no. 2, pp. 288–295, Apr. 2003.
59. S. Morimoto, K. Kawamoto, and Y. Takeda, ***“Position and speed sensorless control for IPMSM based on estimation of position error,”*** Electr. Eng. Jpn., vol. 144, no. 2, pp. 43–52, 2003.
60. L. A. Jones and J. H. Lang, ***“A state observer for the permanent magnet synchronous motor,”*** IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 36, no. 3, pp. 374–382, Aug. 1989.
61. R. B. Sepe and J. H. Lang, ***“Real-time observer-based (adaptive) control of a permanent-magnet synchronous motor without mechanical sensors,”*** IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 28, no. 6, pp. 1345–1352, Nov./Dec. 1992.
62. R. Wu and G. R. Slemon, ***“A permanent magnet motor drive without a shaft sensor,”*** IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 27, no. 5, pp. 1005–1011, Sep./Oct. 1991.
63. T. D. Batzel and K. Y. Lee, ***“Slotless permanent magnet synchronous motor operation without a high resolution rotor angle sensor,”*** IEEE Trans. Energy Convers., vol. 15, no. 4, pp. 366–371, Dec. 2000.

64. ———, “**An approach to sensorless operation of the permanent-magnetsynchronous motor using diagonally recurrent neural networks,**” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 18, no. 1, pp. 100–106, Mar. 2003.
65. N. Ertugrul and P. P. Acarnley, “**New algorithm for sensorless operation of permanent magnet motors,**” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 30, no. 1, pp. 126–133, Jan./Feb. 1994.
66. C. D. French and P. P. Acarnley, “**Control of permanent magnet motor drives using a new position estimation technique,**” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 32, no. 5, pp. 1089–1097, Sep./Oct. 1996.
67. T.-H. Liu, S.-H. Chen, and D.-F. Chen, “**Design and implementation of a matrix converter PMSM drive without a shaft sensor,**” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 39, no. 1, pp. 228–243, Jan. 2003.
68. L. Ying and N. Ertugrul, “**A novel, robust DSP-based indirect rotor position estimation for permanent magnet AC motors without rotor saliency,**” IEEE Trans. Power Electron., vol. 18, no. 2, pp. 539–546, Mar. 2003.
69. S. Green, D. J. Atkinson, A. G. Jack, B. C. Mecrow, and A. King, “**Sensorless operation of a fault tolerant PM drive,**” Proc. Inst. Elect. Eng.—Electr. Power Appl., vol. 150, no. 2, pp. 117–125, Mar. 2003.