

LỜI MỞ ĐẦU

Ngày nay khi xã hội này càng phát triển , nhu cầu sử dụng xe ô tô cùng với các phương tiện sử dụng các loại nhiên liệu hóa thạch tăng cao. Nhưng vấn đề ở đây là nguồn nguyên liệu này không phải là vô tận. Chúng ta khai thác một cách thiếu tổ chức và sử dụng chưa hợp lý, đứng trước nguy cơ một ngày nào đó chúng sẽ cạn kiệt nhiên liệu hóa thạch. Do đó ,ngày nay đi cùng sự phát triển của khoa học ô tô sử dụng động cơ điện đã dần trở lên phổ biến hơn. Trong một tương lai không xa những chiếc ô tô điện sẽ là một phương tiện di chuyển số một.

Động cơ điện một có từ thông đảo chiều không cổ góp có 2 nam châm vĩnh cửu cho ô tô đang được sử dụng rộng rãi. Là loại động cơ ưu việt dung cho ô tô trong thời điểm hiện tại, với cấu trúc đơn giản nhưng vấn đề hoạt động trên dải tốc độ của động cơ rất rộng luôn là mục tiêu tìm hiểu. Vì vậy em được bộ môn giao cho đề tài:” ***Tìm hiểu động cơ điện một chiều có từ thông đảo chiều không cổ góp có 2 nam châm vĩnh cửu*** “

Đồ án gồm 3 chương:

Chương 1: Tổng quan về các loại động cơ một chiều

Chương 2: Tìm hiểu các loại máy điện một chiều không chổi than có từ thông đảo chiều

Chương 3: Điều khiển-Đánh giá-Ứng dụng động cơ một chiều không chổi than

Em xin cảm ơn các thầy cô trong bộ môn Điện Tự Động Công Nghiệp và đặc biệt là thầy GS.TSKH Thân Ngọc Hoàn đã hướng dẫn nhiệt tình, cùng với quá trình tìm hiểu của bản thân giúp em hoàn thành bản đồ án này

Hải Phòng, ngày ... tháng... năm....

Sinh viên

CHƯƠNG 1.

TỔNG QUAN VỀ CÁC LOẠI ĐỘNG CƠ MỘT CHIỀU

1.1. CÁC LOẠI ĐỘNG CƠ MỘT CHIỀU THÔNG THƯỜNG

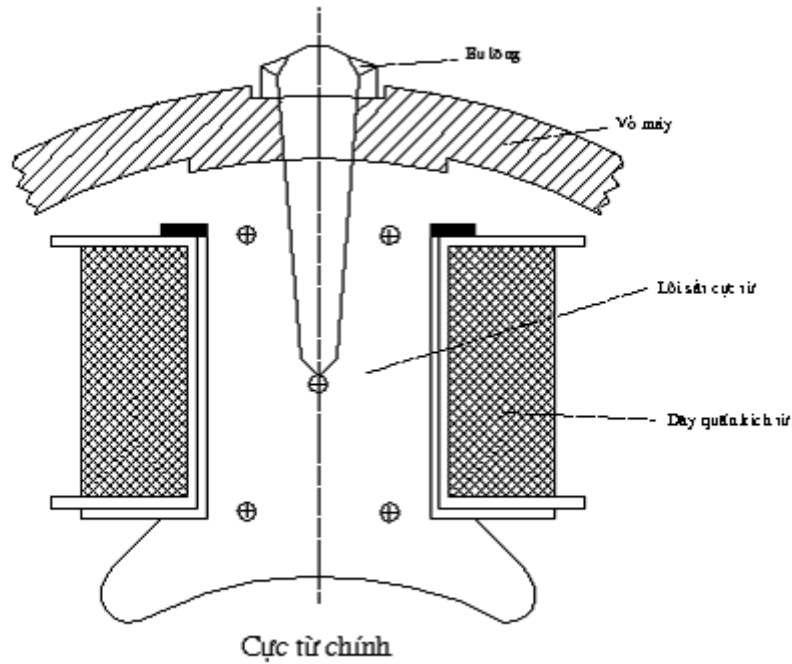
1.1.1. Cấu tạo chung của các loại động cơ điện một chiều thông thường

Cấu tạo của động cơ điện một chiều gồm 2 phần chính là phần tĩnh (Stator) và phần động (Rotor).

1.1.1.1. Phần tĩnh gồm có

a. Cực từ chính

Cực từ chính là phần sinh ra từ trường gồm có lõi sắt và cuộn dây : Lõi sắt cực từ được làm từ các lá thép kỹ thuật hoặc thép cacbon dày : 0,5 41 mm được ép lại với nhau và tán chặt thành một khối các cực từ được gắn vào vỏ máy bằng các bulông. Một cặp cực từ(đôi cực) gồm hai cực nam - bắc đặt đối xứng với nhau qua trục động cơ, tùy theo động cơ mà động cơ có thể có 1,2,3,... các máy điện nhỏ cực từ được làm bằng thép khối. Dây quấn kích từ làm bằng dây đồng có tiết diện tròn hoặc chữ nhật được sơn cách điện và được quấn thành từng cuộn. Các cuộn dây được mắc nối tiếp với nhau. Các cuộn dây được bọc cách điện cẩn thận trước khi đặt vào các cực từ.



Hình 1.1. Hình mặt cắt của một gông từ

b. Cực từ phụ

Cực từ phụ được đặt giữa các cực từ chính để cải thiện tình trạng đổi chiều.

Cực từ phụ được làm bằng thép khối trên đặt các cuộn dây quấn. Dây quấn cực từ phụ tương tự như dây quấn cực từ chính.

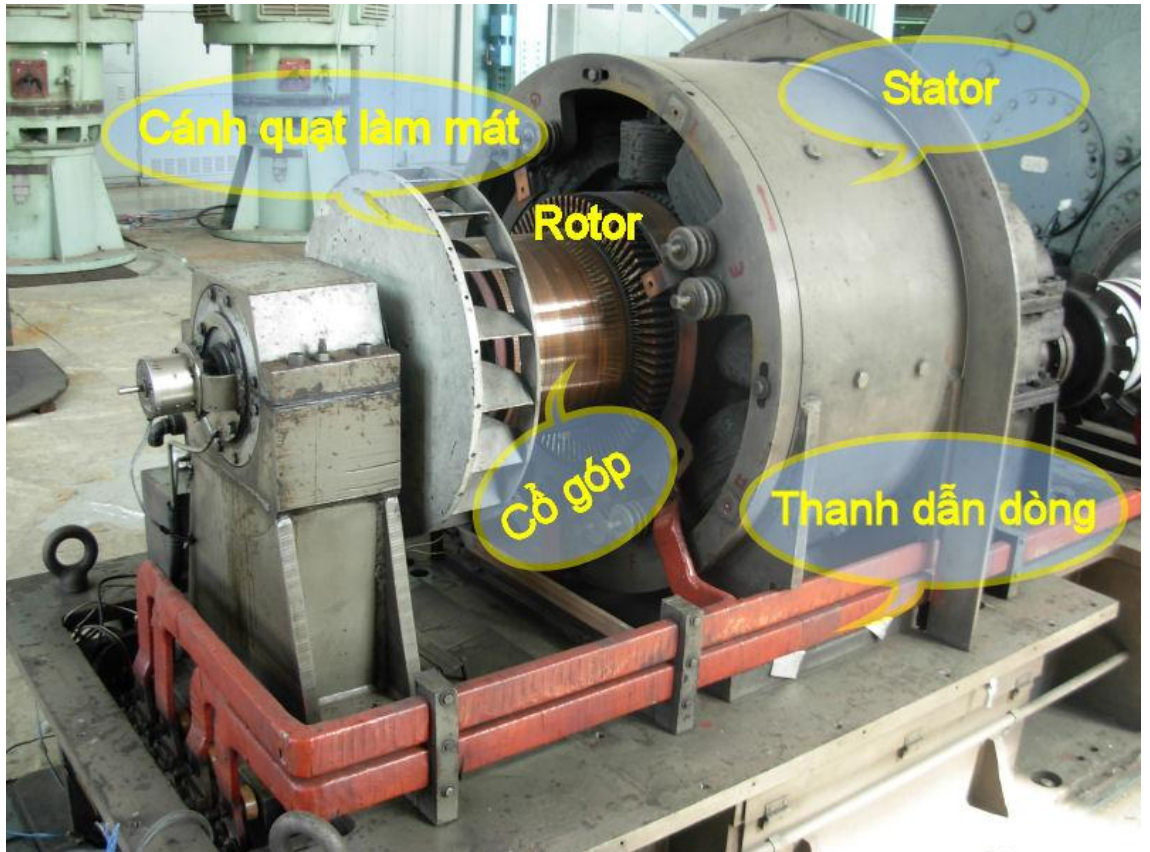
c. Gông từ

Gông từ là phần nối tiếp các cực từ. Đồng thời gông từ làm vỏ máy, từ thông móc vòng qua các cuộn dây và khép kín sẽ chạy trong mạch từ. Trong máy điện lớn gông từ làm bằng thép đúc, trong các máy điện nhỏ gông từ làm bằng thép lá được uốn lại thành hình trụ tròn rồi hàn.

d. Các bộ phận khác

- Nắp máy: Nắp máy dùng để bảo vệ các chi tiết của máy tránh không cho các vật bên ngoài rơi vào trong máy có thể làm hỏng cuộn dây, mạch từ... Đồng thời nắp máy để cách ly người sử dụng với bộ phận của máy khi động cơ đang quay, đang có điện. Ngoài ra nắp máy còn là giá đỡ ổ bi của trục động cơ.

- Cơ cấu chổi than: Cơ cấu chổi than để đưa dòng điện từ ngoài vào nếu máy là động cơ và đưa dòng điện ra nếu máy là phát điện. Cơ cấu chổi than gồm có 2 chổi than làm từ than cacbon thường là hình chữ nhật. Hai chổi than được đựng trong hộp chổi than và luôn tỳ lên hai vành góp nhờ 2 lò xo. Hộp chổi than có thể thay đổi được vị trí sao cho phù hợp.



Hình 1.2. Máy điện một chiều thông thường

1.1.1.2. Phần quay

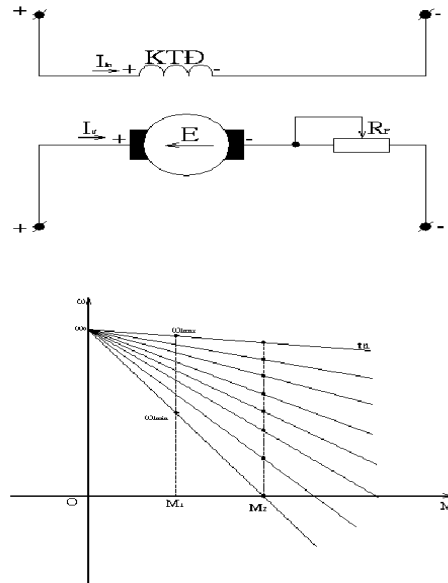
a. Lõi sắt phản ứng

Lõi sắt phản ứng dùng để dẫn từ, thường được làm bằng tôn Silic dày 0,5mm có phủ một lớp cách điện sau đó được ép lại để giảm tổn hao do dòng điện xoáy Phuocô gây lên. Trên các lá thép có dập các rãnh để khi ép lại tạo thành các rãnh đặt cuộn dây phản ứng vào. Lõi sắt là hình trụ tròn và được ép cứng vào với trục tạo thành một khối thống nhất.

1.1.2. Các loại động cơ một chiều thông thường

- Động cơ một chiều kích từ độc lập

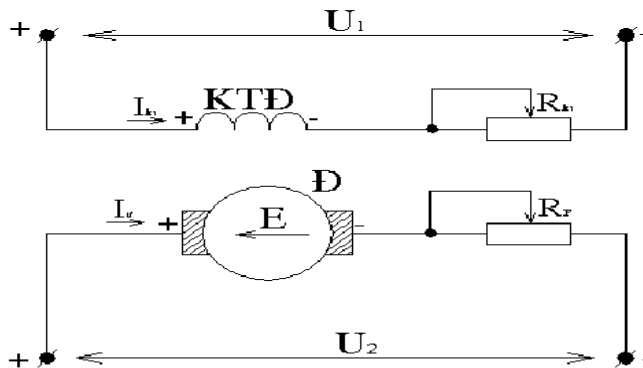
Khi nguồn điện một chiều có công suất không đủ lớn thì mạch điện phân ứng và mạch kích từ mắc vào hai nguồn độc lập với nhau, lúc này động cơ được gọi là kích từ độc lập



Hình 1.3. Sơ đồ và đặc tính của động cơ kích từ độc lập

- Động cơ một chiều kích từ song song

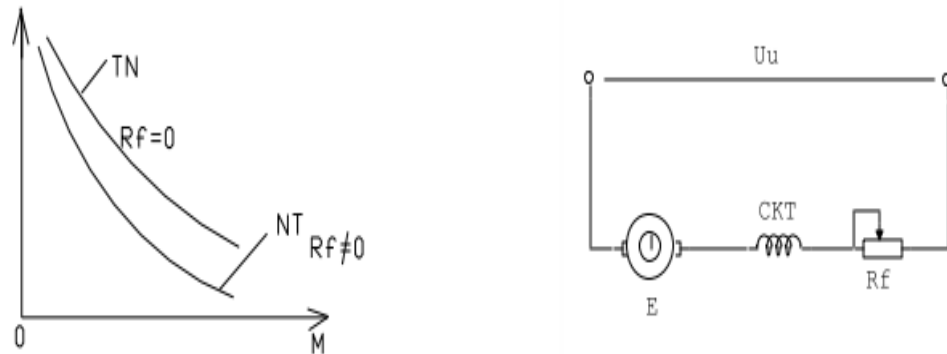
Mạch kích từ và rotor được mắc song song với nguồn điện



Hình 1.4. Sơ đồ tương đối của động cơ kích từ song song

- Động cơ một chiều kích từ nối tiếp

Mạch kích từ được mắc nối tiếp so với nguồn điện



Hình 1.5. Sơ đồ tương đối của động cơ kích từ nối tiếp

- Động cơ một chiều kích từ hỗn hợp hay bằng nam châm vĩnh cửu

Kết hợp cả hai phương pháp trên.

1.2. CÁC LOẠI ĐỘNG CƠ DÙNG CHO ÔTÔ ĐIỆN

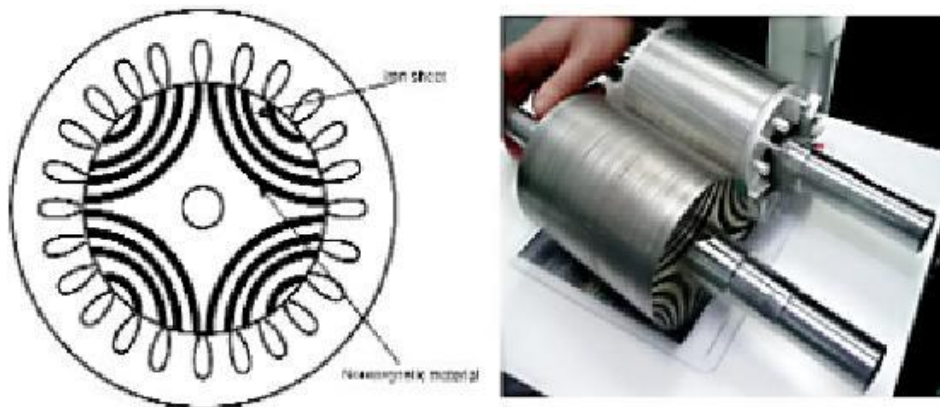
1.2.1. Động cơ không đồng bộ (Induction Motor-IM)

Động cơ IM có ưu điểm giá thành thấp, thông dụng, dễ chế tạo. Với kỹ thuật hiện nay, hoàn toàn có thể thực hiện các thuật toán điều khiển vector tiên tiến cho động cơ IM, đáp ứng yêu cầu công nghệ cần thiết. Nhược điểm của động cơ IM là có hiệu suất thấp. Các hãng xe của Hoa Kỳ như GM phần lớn sử dụng động cơ IM làm động cơ truyền động, lý do là xe ở Mỹ chủ yếu chạy trên đường cao tốc, khoảng cách dài, đường trong đô thị cũng rộng rãi và thoáng. Khi đó động cơ IM sẽ phát huy tối đa được hiệu suất của mình thì tổn thất không lớn.

Ở Việt Nam chúng ta chủ yếu là nhỏ hẹp, đông đúc, xe thường chạy ở tốc độ thấp và hay phải dừng đỗ. Với chế độ hoạt động như vậy, động cơ IM sẽ phải thường xuyên chạy ở dưới tốc độ định mức gây hiệu suất thấp, hạn chế đáng kể quãng đường đi cho một lần nạp ắc quy.

1.2.2. Động cơ từ trở đồng bộ(Synchronous Reluctance Motor-SynRM)

Động cơ SynRM có cấu trúc stator giống động cơ xoay chiều thông thường với dây quấn và lõi sắt từ. Rotor của động cơ được thiết kế gồm các lớp vật liệu từ tính và phi từ tính đan xen nhau như hình 1.6. Cấu trúc này khiến cho từ trở dọc và từ trở ngang của động cơ khác nhau, sinh ra mômen từ trở làm động cơ quay



Hình 1.6. Cấu trúc động cơ từ trở đồng bộ-SynRM và hai rotor động cơ SynRm và IM

1.2.3. Động cơ từ trở thay đổi(Switches Reluctance Motor-SRM)

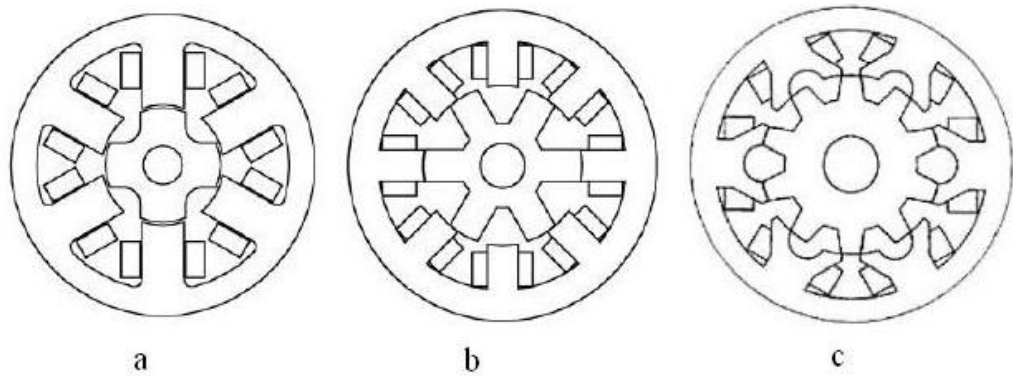
Động cơ SRM có cấu tạo của rotor và stator đều có dạng cực lồi, trên stator có dây quấn tương tự như dây quấn kích từ của động cơ một chiều, rotor chỉ là một khối sắt, không có dây quấn hay nam châm. Với cấu tạo đặc biệt này, SRM rất bền vững về cơ khí, cho phép thiết kế ở dải tốc độ cao, lên tới hàng chục nghìn vòng/phút. Nguyên lý hoạt động của động cơ như sau: các dây quấn stator được kích từ lần lượt (gần giống động cơ bước- stepping motor), lực từ trường tác dụng lên rotor làm nó quay từ vị trí có từ trở lớn nhất(vị trí lệch trục) đến vị trí có từ trở vùng tuyến tính và vùng bão hòa nên ta có thể sử dụng tối đa khả năng của vật liệu từ đó, do vậy động cơ SRm có tỉ

lệ công suất trên khối lượng lớn. Sau đây là hình ảnh của động cơ từ trở thay đổi- SRM



Hình 1.7. Cấu tạo máy điện không chổi than (SRM)

Động cơ SRM cũng có thể có những nhược điểm làm hạn chế khả năng ứng dụng của nó. Nguyên lý vận hành đơn giản, nhưng nó lại khó điều khiển với chất lượng cao vì nó có mômen gợn sóng lớn, đặc biệt là trong thời gian chuyển mạch. Mặt khác, do cấu tạo cực lồi, động cơ có tinh phi tuyến cao, gây khó khăn cho việc điều khiển và thiết kế động cơ. Những nhược điểm này đang được nghiên cứu, nếu khắc phục thành công sẽ mở ra các hướng ứng dụng rộng rãi cho SRM, cả trong công nghiệp và lĩnh vực ô tô điện. Bản thân các tác giả đang tiến hành nghiên cứu về thiết kế và điều khiển loại động cơ này, cho đến nay có những kết quả ban đầu.



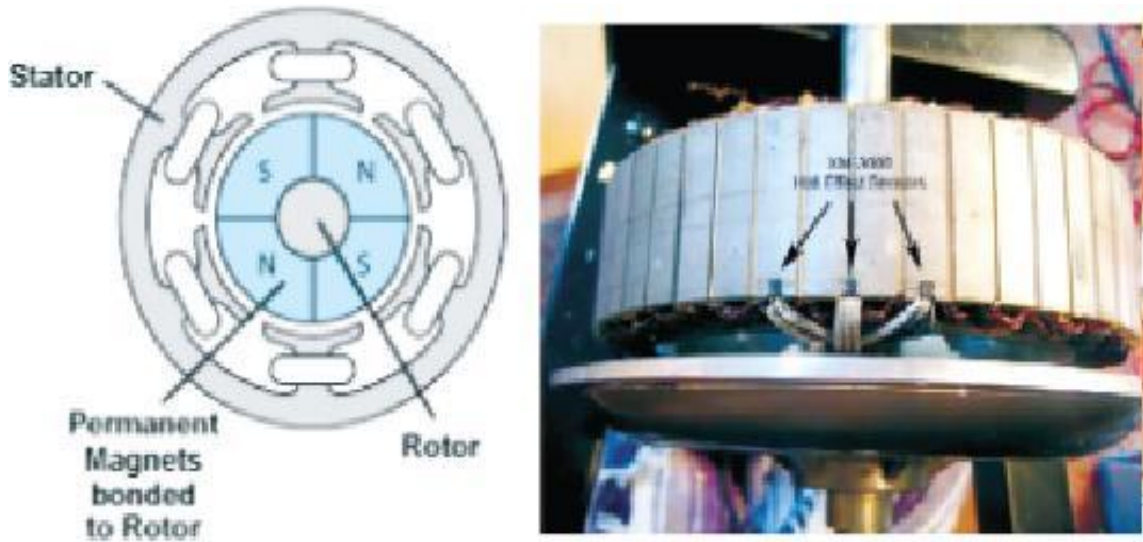
Hình 1.8. Đường sức từ tại các vị trí điển hình trong quá trình hoạt động của SRM

a: lệch trục b: các cực gồ lên nhau c: đồng trục

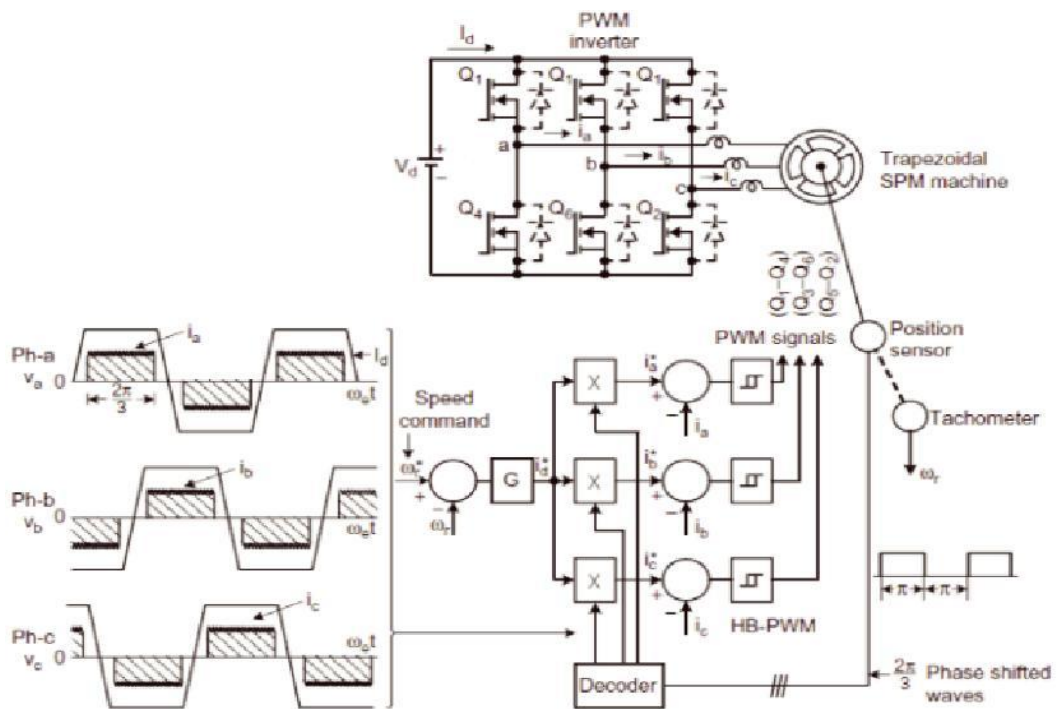
1.2.4. Động cơ một chiều không chổi than (Brushless DC motor-BLDC motor)

Động cơ BLDC trên thực tế là một loại động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu. Điểm khác biệt cơ bản so với các động cơ đồng bộ khác là sức phản kháng điện động (back-EMF) của động cơ có dạng hình thang do cấu trúc dây quấn tập trung (các loại khác có dạng hình sin do cấu trúc dây quấn phân tán). Dạng sóng sức phản điện động hình thang khiến cho động cơ BLDC có đặc tính cơ giống động cơ một chiều, mật độ công suất, khả năng sinh mômen cao, hiệu suất cao

Động cơ được điều khiển dựa vào tín hiệu từ các cảm biến Hall các định vị trí của rotor như hình dưới. Nhược điểm cơ bản của động cơ BLDC là có mômen gợn sóng. Một trong những phương pháp hiệu quả nhất là thuật toán điều khiển giả vector (Pseudo-vector Control-PVC) được đề xuất bởi tác giả Cao Minh và hiện nay đã đi vào ứng dụng cho thiết bị trợ lái vô lăng của công ty NSK tại Nhật bản.



Hình 1.9. Cấu trúc động cơ BLDC và cảm biến vị trí Hall



Hình 1.10. Nguyên lý điều khiển động cơ BLDC

1.2.5. Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu chìm (Interior Permanent Motor-IPM motor)

Động cơ IPM có những ưu thế gần như tuyệt đối trong ứng dụng ô tô điện. Động cơ nam châm vĩnh cửu thông thường có nam châm được gắn trên bề mặt rotor (SPM) vốn đã có đặc tính điều khiển rất tốt. Động cơ IPM có nam châm chìm bên trong rotor, dẫn tới sự khác biệt giữa điện cảm dọc trục và điện cảm ngang trục, từ đó tạo khả năng sinh mômen từ trở (Reluctance Torque) cộng thêm vào mômen vốn có do nam châm sinh ra (Magnet Torque). Đặc tính này khiến động cơ IPM có khả năng sinh mômen rất cao, đặc biệt phù hợp cho ô tô điện. Mặt khác, động cơ Ipm có phản ứng phần ứng mạnh, dẫn tới khả năng giảm từ thông mạnh, cho phép nâng cao vùng điều chỉnh tốc độ, làm việc tốt ở góc phần tư thứ II.

CHƯƠNG 2.

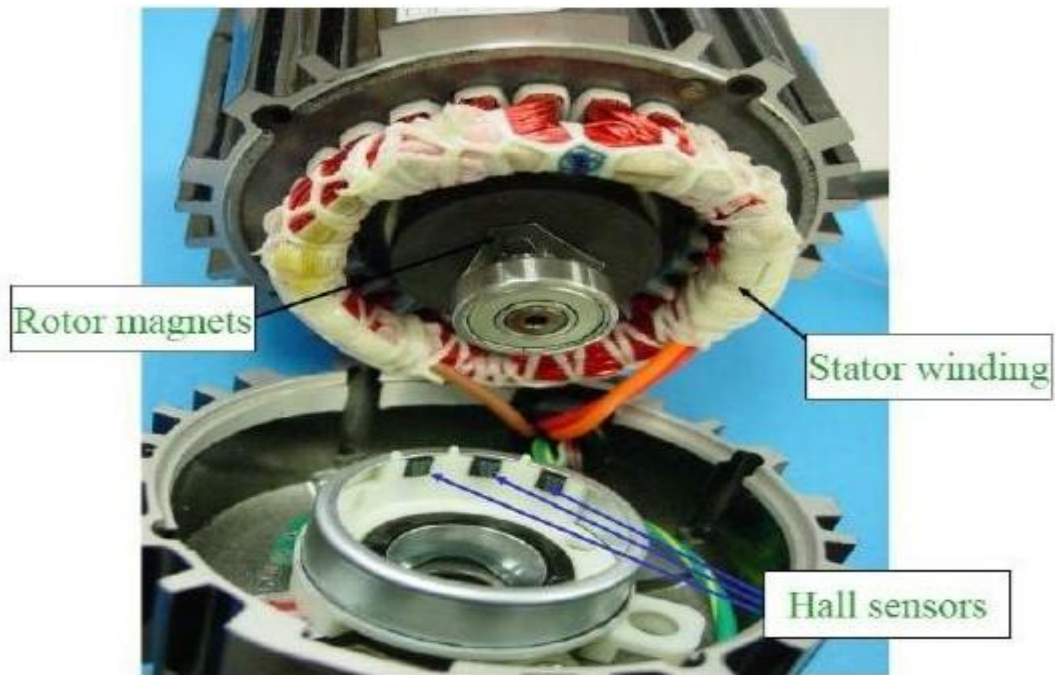
TÌM HIỂU CÁC LOẠI MÁY ĐIỆN MỘT CHIỀU KHÔNG CHỖI THAN CÓ TỪ THÔNG ĐẢO CHIỀU

Với sự quan tâm ngày càng tăng về bảo vệ môi trường và bảo toàn năng lượng việc sử dụng ô tô điện (Evs) cho giao thông trên đường là sự quan tâm đặc biệt. Để có khả năng kết hợp trực tiếp với ô tô động cơ đốt trong người ta sử dụng động cơ BLDC.

2.1. TỔNG QUAN VỀ ĐỘNG CƠ MỘT CHIỀU KHÔNG CỔ GÓP

Động cơ DC không chổi than-BLDC (Brushless Dc motor) là một dạng động cơ đồng bộ tuy nhiên động cơ BLDC kích từ bằng một loại nam châm vĩnh cửu dán trên rotor và dùng dòng điện DC ba pha cho dây quấn phản ứng stator.

Cũng giống như động cơ đồng bộ thông thường, các cuộn dây BLDC cũng được đặt lệch nhau 120 độ trong không gian của stator. Các thanh nam châm được dán chắc chắn vào thân rotor làm nhiệm vụ kích từ cho động cơ. Đặc biệt điểm khác biệt về hoạt động của động cơ BLDC so với các động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khác là động cơ BLDC bắt buộc phải có cảm biến vị trí rotor để cho động cơ hoạt động. Nguyên tắc điều khiển của động cơ BLDC là xác định vị trí rotor để điều khiển dòng điện vào cuộn dây stator tương ứng, nếu không động cơ không thể tự khởi động hay thay đổi chiều quay. Chính vì nguyên tắc điều khiển dựa vào vị trí rotor như vậy nên động cơ BLDC đòi hỏi phải có một bộ điều khiển chuyên dụng phối hợp với cảm biến Hall để điều khiển động cơ.



Hình 2.1. Cấu tạo chung của máy điện một chiều không cổ góp

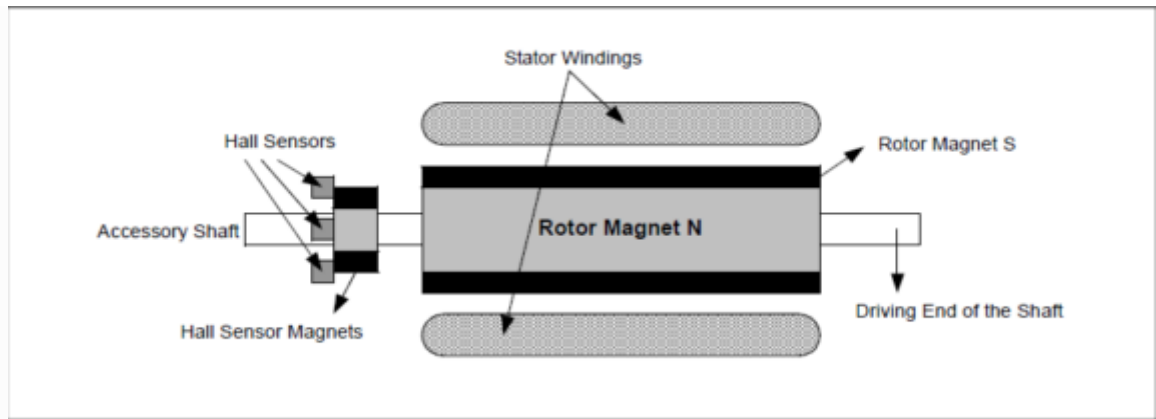
2.1.1. Khái quát chung về cấu tạo và cấu trúc động cơ BLDC

- Cấu tạo của động cơ BLDC

Khác với động cơ một chiều bình thường, động cơ một chiều không chổi than BLDC có phần ứng đứng yên nằm trên stator và phần cảm quay nằm trên rotor.

Stator: bao gồm lõi sắt (các lá thép kỹ thuật điện ghép lại với nhau) và dây quấn, trong các rãnh của stator đặt cuộn ứng như trong các rãnh phân ứng bình thường.

Rotor thường là nam châm vĩnh cửu.

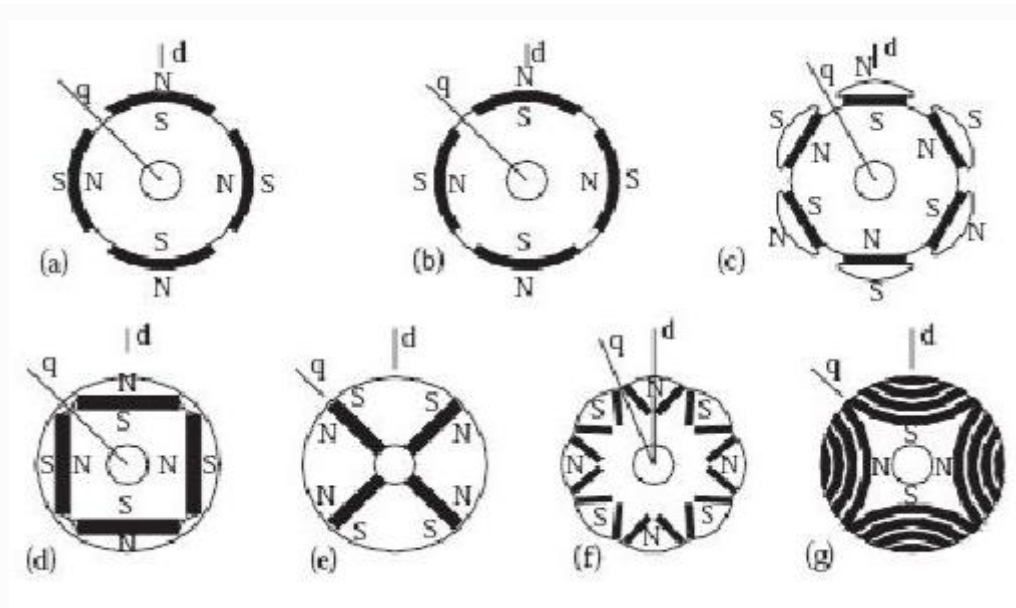


Hình 2.2. Bản vẽ sơ đồ máy điện một chiều không cổ góp

- Cấu trúc của động cơ BLDC

Nam châm vĩnh cửu dùng để kích từ có thể là loại nam châm điện từ hoặc loại nam châm hiếm như: AlNiCo, NdFeB, SmCO... Tuy nhiên hiện nay người ta thường sử dụng các loại nam châm hiếm vì chúng có từ dư lớn, từ tính ít thay đổi khi nhiệt độ tăng, khó bị khử từ... Với công nghệ chế tạo nam châm ngày càng phát triển mạnh các đặc tính từ của nam châm vĩnh cửu ngày càng được cải thiện, chất lượng nam châm ngày càng tốt hơn. Điều này cho phép động cơ BLDC được chế tạo và ứng dụng nhiều hơn.

Theo cách dán nam châm vào rotor động cơ ta phân thành hai kiểu rotor: rotor có nam châm dán trên bề mặt bên ngoài (rotor-surface-mounted magnet) và dạng rotor nam châm nằm bên trong (interior magnets).



Hình 2.3. Các cách bố trí nam châm trên động cơ

a,b,c: nam châm dán bề mặt ngoài rotor

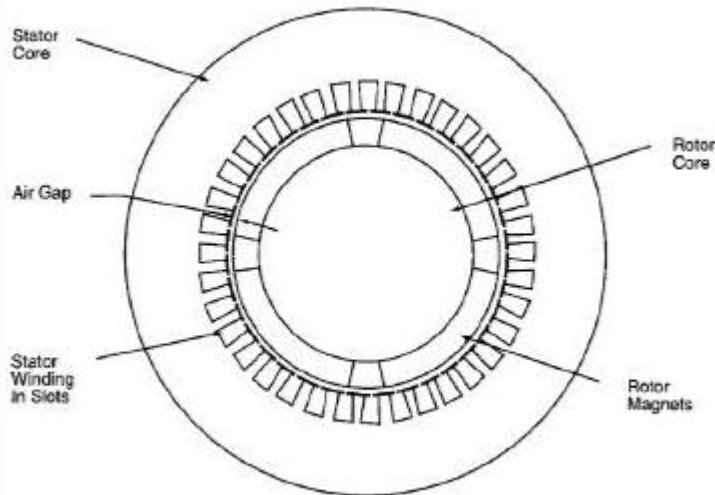
d,e,f,g: nam châm đặt bên trong rotor.

- Nam châm được đặt trên rotor của động cơ BLDC

Theo vị trí tương đối của rotor đối với stator ta có hai kiểu động cơ: Động cơ rotor nằm bên trong (interior rotor) và động cơ rotor nằm bên ngoài (exterior rotor).

- Động cơ nam châm dán ngoài bề mặt rotor

Máy điện có nam châm vĩnh cửu dán trên bề mặt rotor được xem như một động cơ cực từ ẩn. Thiết kế và cấu trúc stator và các cuộn dây tương tự như trong các máy điện đồng bộ truyền thống. Nam châm vĩnh cửu được đặt trên bề mặt cả rotor và được gắn chặt vào rotor. Do nam châm có độ thấm từ rất nhỏ so với sắt cho nên ảnh hưởng của khe hở không khí lên máy là lớn. Thông thường giả thiết khi phân tích máy điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu thì khe hở không khí là đồng dạng



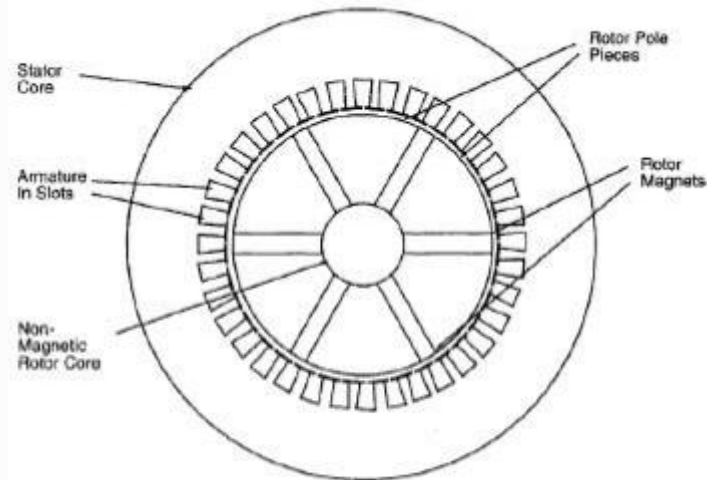
Hình 2.4. Kiểu rotor nam châm dán ngoài bề mặt.

Trong trường hợp các thanh nam châm được gắn trên bề mặt của rotor, sự ra tăng độ thâm từ do môi trường bên ngoài là 1,02-1,2. Chúng có cường độ từ trường lớn, cho nên có thể xem máy điện có khe hở không khí lớn, do đó có thể bỏ qua hiện tượng cực lõi. Hơn nữa, do khe hở không khí lớn, điện cảm đồng bộ nhỏ và vì vậy có thể bỏ qua hiện tượng phản ứng phản ứng. Một hệ quả của khe hở không khí lớn là hằng số điện của cuộn stator nhỏ. Nam châm dán nên rotor có thể có nhiều hình dạng, dạng cung trong hay dạng phẳng có độ dày vài milimet. Nam châm dạng cung tạo một từ thông trong khe hở không khí bằng phẳng và mômen ít dao động. Cũng có thể giảm dao động của mômen bằng cách thiết kế stator thích hợp.

- Động cơ có nam châm vĩnh cửu đặt bên trong rotor

Động cơ loại này, nam châm được đặt bên trong của than rotor, nam châm có thể được đặt vuông góc nhau hay chéo nhau. Máy điện có nam châm bên trong rotor cũng như động cơ đồng bộ cực lõi. Do các thanh nam châm được đặt bên trong rotor, ảnh hưởng của khe hở không khí nhỏ hơn nhiều so với máy điện có các thanh nam châm đặt bên ngoài rotor. Đặc tính này cho phép có thể vận hành dễ dàng trong vùng từ trường yếu mà rất khó trong trường hợp nam châm dán ở mặt ngoài rotor. Do khe hở không khí là không

đồng dạng nên điều khiển phức tạp hơn nhiều so với máy điện có nam châm dán ở mặt ngoài rotor, do mômen tạo ra gồm cả hai thành phần: thành phần cơ bản và thành phần cưỡng bức.



Hình 2.5. Kiểu rotor nam châm nằm bên trong

Động cơ một chiều không cổ góp hiện có 3 loại thông dụng :

- Máy điện một chiều từ kháng đóng ngắt (SRM)
- Máy điện một chiều nam châm vĩnh cửu cực lõi kép (DSPM)
- Động cơ một chiều từ kháng biến đổi (VRM)

Chúng ta sẽ tìm hiểu từng loại động cơ trên.

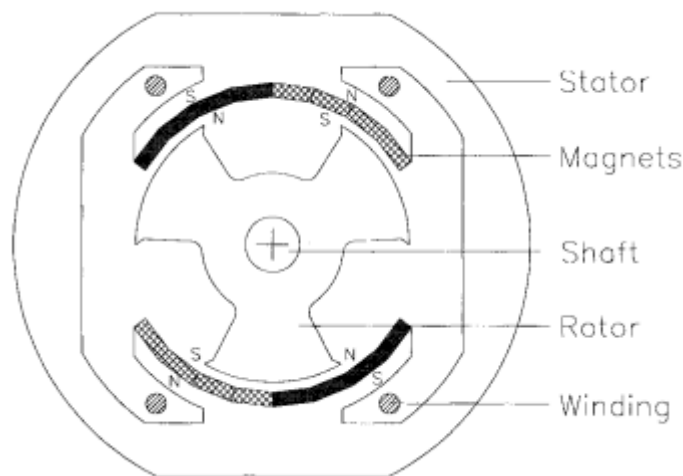
2.2. ĐỘNG CƠ MỘT CHIỀU TỪ KHÁNG ĐÓNG NGẮT(SRM)

2.2.1. Giới thiệu

Việc nghiên cứu động cơ từ kháng đóng ngắt (SRM) được quan tâm trong những năm gần đây vì nó có các ưu điểm: cấu trúc đơn giản thứ lỗi khi mắc lỗi, và rất bền vững về cơ khí [1]. Mặt khác có một số hạn chế như kích thước, điều khiển phức tạp, ồn cơ khí và dao động đã thúc đẩy nghiên cứu phối hợp động cơ nam châm vĩnh cửu vào cấu trúc cơ bản của máy SRM. Một loại

máy mới là loại máy nam châm vĩnh cửu (DSPMM) [2] được đề xuất. Loại máy này về cơ bản có cùng cấu trúc với SRM nhưng với nam châm có năng lượng cao đặt vào lưng stato bằng sắt. Loại máy có từ thông đổi chiều (FRM) là một loại máy mới không có góp 2 nam châm vĩnh cửu tiếp điểm được đề xuất nhằm mục đích phối hợp các ưu điểm của SRM và PMM trong một máy. Trong khi FRM không phải là loại DSPMM đầu tiên có nam châm tĩnh kết hợp với một rotor từ kháng đơn giản không kích từ nó xuất hiện là đầu tiên có từ thông lưỡng cực và MMF biến đổi với vị trí của rotor. Nó cũng xuất hiện rằng FRM có độ tự cảm nhỏ và vì thế có hằng số điện từ nhỏ. Tính chất này đã được kết hợp với cấu trúc đơn giản của nó và quán tính rotor nhỏ đã làm cho FRM có sức thu hút hơn như là một máy phát tốc độ cao mà giá thành hạ. Điều này đặc biệt được quan tâm trong công nghiệp ô tô để hướng tới một giới hạn nhất định của loại máy phát xoay chiều có từ trường dạng vấu như giới hạn hiệu suất, giới hạn khả năng cho đáp ứng nhanh khi tải tăng đột ngột. Vấn đề này đã trở thành vấn đề được quan tâm cho xe ô tô điện [3]–[4]. Hình 2.10 chỉ ra mặt cắt ngang của một pha máy FRM với 2 cực stato và 3 cực rotor cảm ứng (từ trở) biến đổi. Hai nam châm có cực từ đối nhau được đặt trên mỗi mặt cực của stato. Hình 2.11 là từ trường biến đổi và dòng điện còn Hình 2.8 chỉ ra sự biến đổi của từ thông pha và MMF với vị trí rotor. Lưu ý rằng từ thông móc vòng trong bài báo này được vẽ ở đại lượng so sánh trên vòng dây. Như vậy từ thông pha có nghĩa là từ thông móc vòng trên vòng (dây) trong khi đó MMF đơn giản lại được tính bằng tích của pha dòng điện và số vòng trên pha [5]. Sự thay đổi từ thông là lưỡng cực (lý tưởng là hình tam giác) dẫn tới nhảy bậc phẳng hoặc hình thang tạo ra sóng MMF. Dòng là dòng biến đổi (lý tưởng hình chữ nhật). Từ thông tự nhiên đảo cực của máy điện có thể nhìn thấy rõ ở Hình 2.11 và 2.8. Dấu của từ thông đảo cực cho mỗi một chu kỳ điện khi rotor dịch chuyển một bước cực (một bước

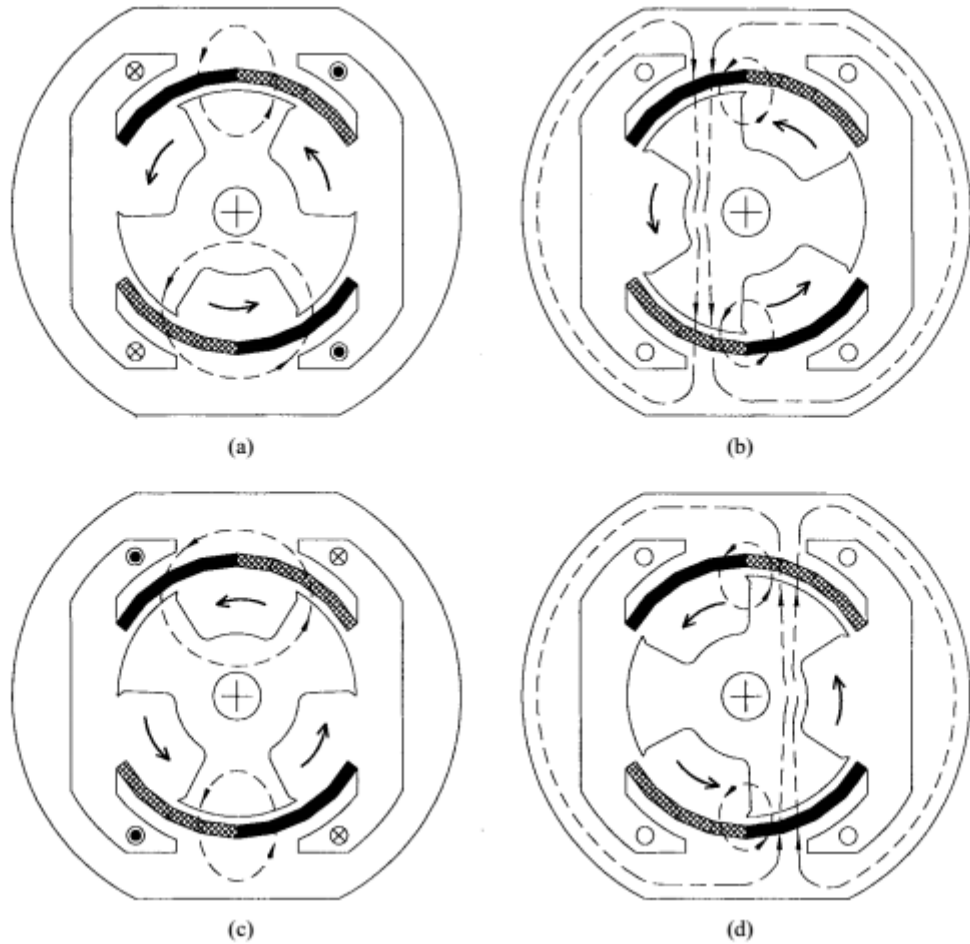
cực rotor). Trên Hình 2.2 là cấu trúc 2/3 một pha có một số biến đổi có khả năng hướng tới số lượng pha và số lượng cực stator và số lượng cực rotor



Hình 2.6. Mặt cắt của động cơ cấu tạo 2/3

2.2.2. Nguyên lý hoạt động

Nguyên lý hoạt động của loại máy này có thể giải thích dựa vào hình 2.11 và 2.8. Ở hình 2.11(a) là một vị trí cân bằng trong đó từ thông xuất hiện bởi một nam châm dạng hình cung bên trong nằm giữa cực stator và vì vậy không có từ thông ở phần sắt bọc stator. Không có từ thông móc vòng với cuộn dây ở vị trí này (point (a) ở hình 2.8). Trong (b), rotor dịch đi một góc 30 ngược chiều kim đồng hồ do vậy các cực của rotor phủ lên cực này hoặc cực khác của nam châm stator, từ thông lúc này đi qua cuộn dây và phần sắt từ phía vỏ của stator và từ thông pha đạt được giá trị cực đại tại vị trí này (point (b) ở Hình 2.8). Ở (c), rotor lại ở vị trí cân bằng dịch đi 60 so với vị trí thứ nhất ở đây lần nữa từ thông lại không đi qua lõi sắt stator và móc vòng với cuộn dây (point (c) ở Hình 2.8). Tiếp tục dịch đi 30 theo hướng ngược kim đồng hồ hướng tới vị trí chỉ ra ở (d), ở đây từ thông lại đạt được cực đại ở chiều ngược lại với vị trí chỉ ra ở (b) (point (d) ở Hình. 2.8). Sự biến đổi lưỡng cực tuyến tính của từ thông pha dẫn tới dạng sóng chữ nhật của MMF. Khi áp dụng định luật Faraday ta có thể thấy từ H.2 là

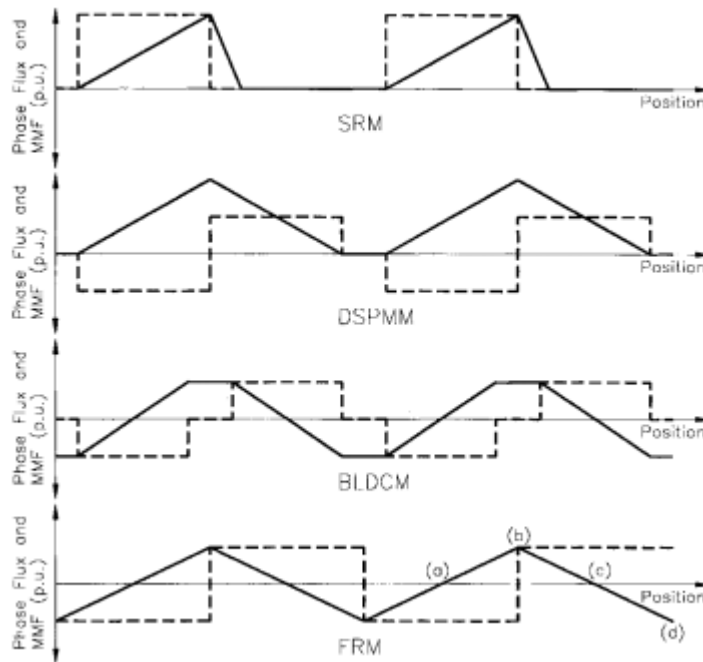


Hình 2.7. Nguyên tắc hoạt động của máy đảo ngược từ thông

EMF đạt cực đại tại (a), cực đại âm tại (c), và zero tại (b) và (d). Dựa trên phần thảo luận này ta quan sát thấy nguyên lý hoạt động của FRM.

- Giống như PMM, hoạt động của FRM trên nguyên lý của sự thay đổi từ thông móc vòng cảm ứng một EMF liên quan với dòng xoay chiều của phần ứng.

- Mặc dầu từ trường kích từ được cung cấp bởi nam châm vĩnh cửu từ thông móc vòng với cuộn dây phần ứng được điều biên bởi sự thay đổi của mạch từ cảm ứng khi rotor quay bằng cách đó một EMF xoay chiều được cảm ứng không cần nam châm quay..



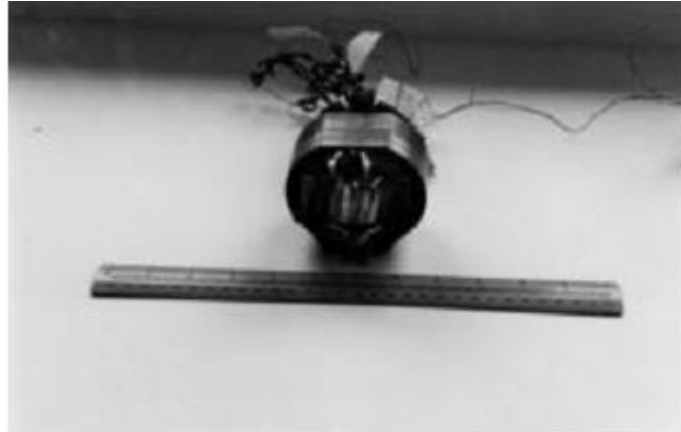
Hình 2.8. Sự thay đổi lý tưởng của từ thông và MMF với vị trí của các loại máy không chổi than

2.2.3 Thiết kế sơ bộ, phân tích và đánh giá thực nghiệm

2.2.3.1. Thiết kế sơ bộ

Thiết kế sơ bộ về nguyên lý và cấu trúc một của máy có từ thông đảo chiều để qua giá số đo thiết kế ta thấy ưu điểm của máy. Đã quyết định để định xây dựng 2/3 cấu trúc của máy phát 1 pha giá thành rẻ, tốc độ cao gọi là máy phát từ thông đảo chiều (FRG), với một bộ điều chỉnh điện áp điện tử đơn giản. Một stato động cơ vạn năng có 2 cực hiện có được biến đổi và sử dụng để xây dựng một động cơ mới có rotor 3 cực từ kháng biến đổi.

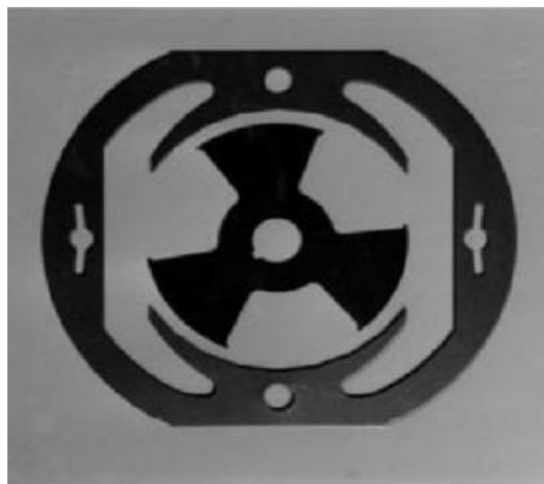
Những khối nam châm Sm-Co được sử dụng với 4 khối làm thành một cực từ đơn hình cung 60 độ (Hình 2.9).



Hình 2.9. Động cơ FRG với cuộn dây stator và nam châm vĩnh cửu

Khe hở không khí được thiết kế có độ dài 0.5 mm để nhận được giá trị hệ số thẩm từ đạt 4.9. Cung của cực từ stato và rotor được thiết kế là 120 và 60 tương ứng. Kích thước hình học của rotor được tối ưu bằng phân tích nhờ phần tử hữu hạn (FEA). Hình 2.10 là kích thước của là thép stato và rotor. Một thông số quan trọng trong thiết kế loại máy từ thông đảo chiều hệ số viên K_f , hệ số này là tỷ số của từ thông móc vòng pha cực đại của pha stato đối với từ thông của nam châm (2.1). Một tính toán chính xác là cần thiết trong thiết kế bản sơ bộ đã dùng phần tử hữu hạn tính và nhận được giá trị $K_f=0,45$:

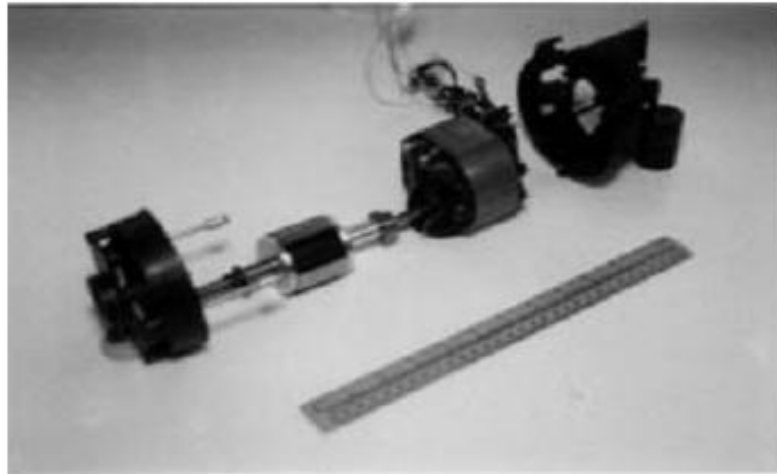
$$K_f = \frac{\phi_{ph}}{\phi_m} = \frac{\phi_{ph}}{AmBm} = \frac{\phi_{ph}}{\frac{AmBr}{1 + \left(\frac{g\mu_{rec}}{lm}\right)}} \quad (2.1)$$



Hình 2.10. Nguyên mẫu stator và rotor rất mỏng máy FRG

Số lượng vòng dây trên pha, N_{ph} , tính theo (2.2), giá trị đó tính theo luật Faraday với cấu trúc 2/3 động cơ với giả thiết rằng sự biến đổi từ thông pha theo vị trí rotor là tuyến tính:

$$E = -\omega N_{ph} \frac{d\phi_{ph}}{d\theta} = -\omega N_{ph} \frac{\phi_m 2K_f}{\frac{\pi}{3}} \quad (2.2)$$



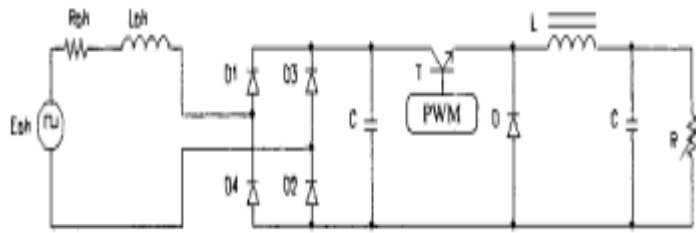
Hình 2.11. Nguyên mẫu máy FRG gồm có stator, rotor và thiết bị bảo vệ hai đầu động cơ

Trục mới được thiết kế cho phù hợp với rotor của FRG và phân bảo vệ. Bảng 2.1 đã tổng hợp các thông số cơ bản của máy thiết kế FRG. Một số chi tiết cụ thể như tốc độ máy phát, phạm vi điện áp dựa trên máy phát ô tô hiện có.

| Bảng 2.1 Thiết kế thông số kỹ thuật nguyên mẫu máy FRG | |
|--|-------------------------|
| Nguyên liệu cán Stator | Newcor800,dày 0.65mm |
| Nguyên liệu cán Rotor | Lossil 400/50,dày 0.5mm |
| Vật liệu làm nam châm | SmCo _s |
| Chiều dài nam châm | 2.45 mm |
| Từ thông nam châm | 0.85 T |
| Đường kính ngoài Stator | 89.10 mm |
| Đường kính mặt cán bên trong | 55.30 mm |
| Đường kính lỗ khoan | 50.40 mm |
| Độ rộng của khe hở không khí | 00.50 mm |
| Chiều dài rãnh | 40.00 mm |
| Đường kính ngoài Rotor | 49.40 mm |
| Độ dài cực Rotor | 13.75 mm |
| Cỡ dây đồng | AWG 23 |
| Dải tốc độ động cơ | 900 tới 9000 vòng/phút |
| Dải điện áp AC | 30V tới 300V |
| Điện áp DC của điều khiển | 14V |

2.2.3.2. Bộ điều khiển điện tử

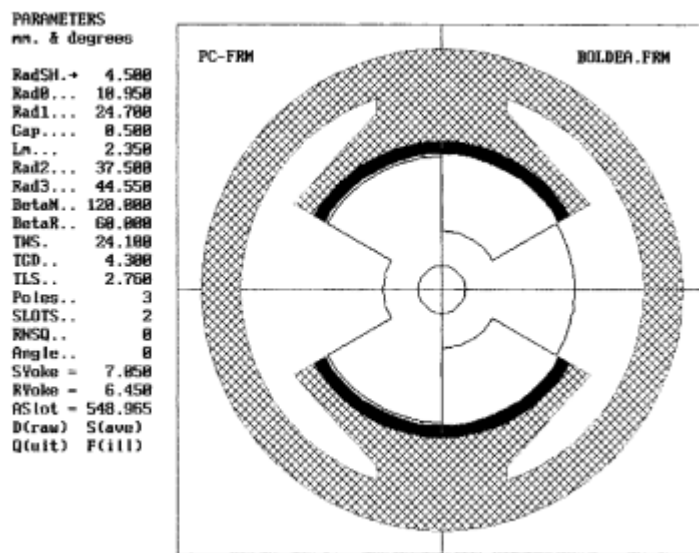
Một bộ điều khiển điện tử đơn giản được xây dựng, được thể hiện trong hình 2.8, để có được điện áp DC đầu ra quy định từ điện áp AC biên độ rộng. Nó bao gồm một chỉnh lưu cầu và một DC to DC chuyển đổi PWM có kiểm soát. Tôi cung cấp bảng cho kỹ thuật thiết kế cho các máy phát điện hoàn toàn, hệ thống bao gồm máy phát điện và điều khiển điện tử.



Hình 2.12. Bộ điều khiển điện tử cho đầu ra DC định mức

- V.PC-FRM-Chương trình Cad sơ bộ cho thiết kế máy từ thông đảo chiều

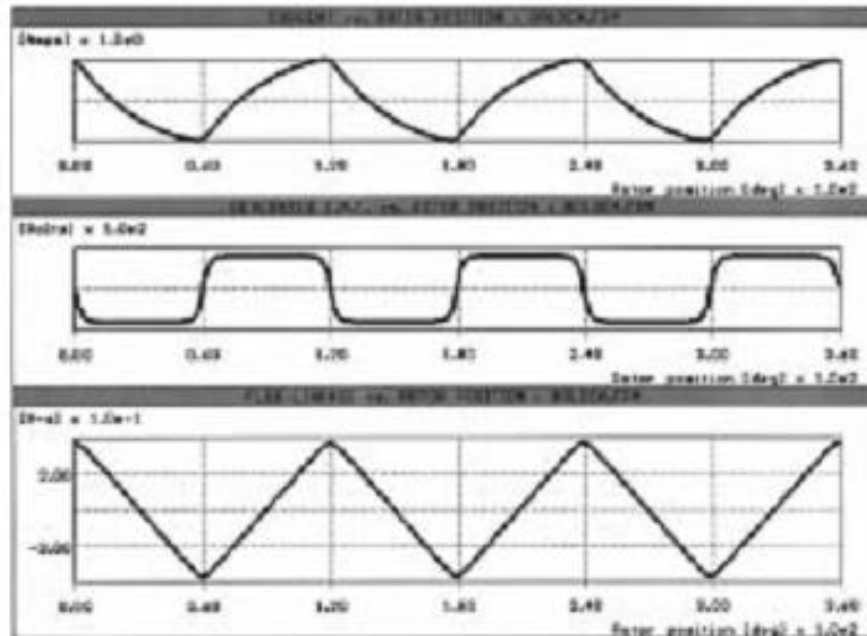
Một chương trình CAD cho thiết kế sơ bộ FRM và các liên quan đến thiết bị điện tử điều khiển đã được phát triển. hình 2.9 cho thấy biên tập mặt cắt ngang của chương trình, nơi mà máy hình học có thể được xem và chỉnh sửa. Nó cho thấy một pha 2/3 cấu hình tương tự như hình 1.1.



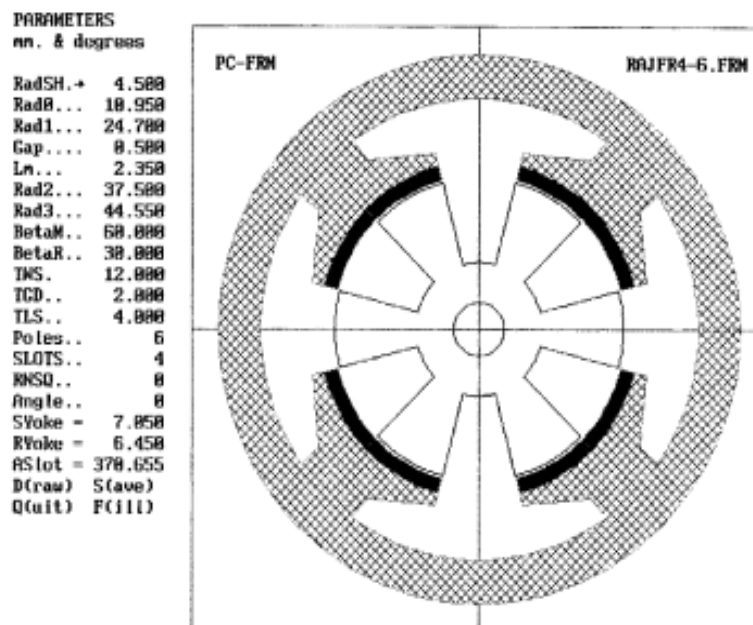
Hình 2.13. Mặt cắt ngang của động cơ có cấu trúc 2/3

Chương trình có một tùy chọn “ phân tích động lực”, cái mà thiết kế thực hiện tính toán và tạo ra một “ bản thiết kế đầu ra” có chứa một danh sách

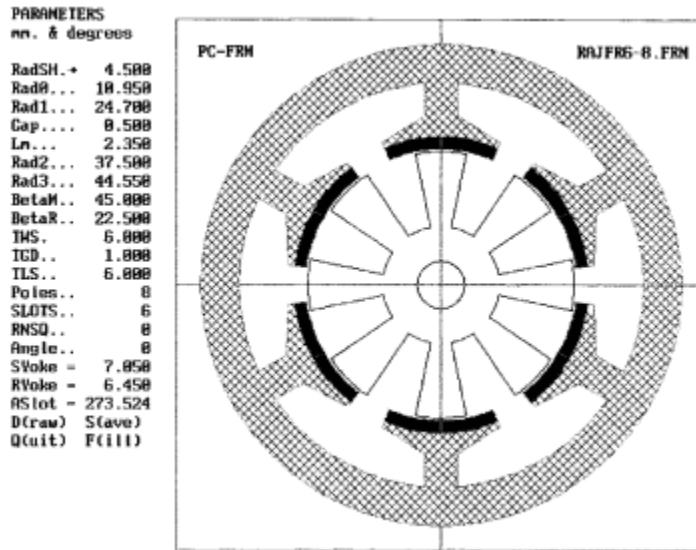
chi tiết các thông số thiết kế. Nó cũng phát ra đầu ra dạng sóng, như hình 2.14. Một số cấu hình khác có thể cho các máy từ thông đảo chiều, chẳng hạn như một 4/6 hoặc 6/8 được thể hiện trong hình 2.15 và 2.16.



Hình 2.14. Các dạng sóng đầu ra sau khi phân tích năng lượng trên hình 2.13.



Hình 2.15. Máy từ thông đảo ngược có cấu trúc 4/6

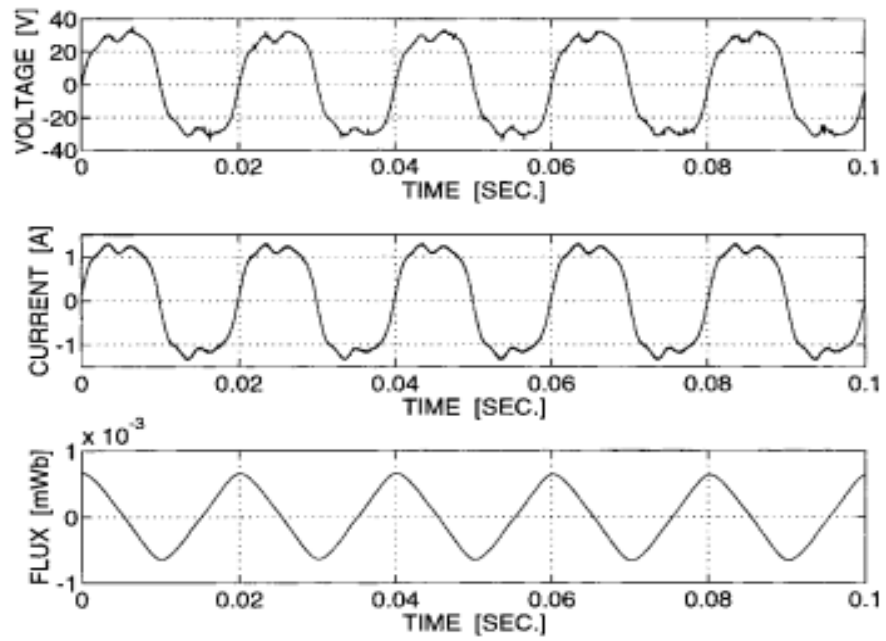


Hình 2.16. Máy từ thông đảo ngược có cấu trúc 6/8

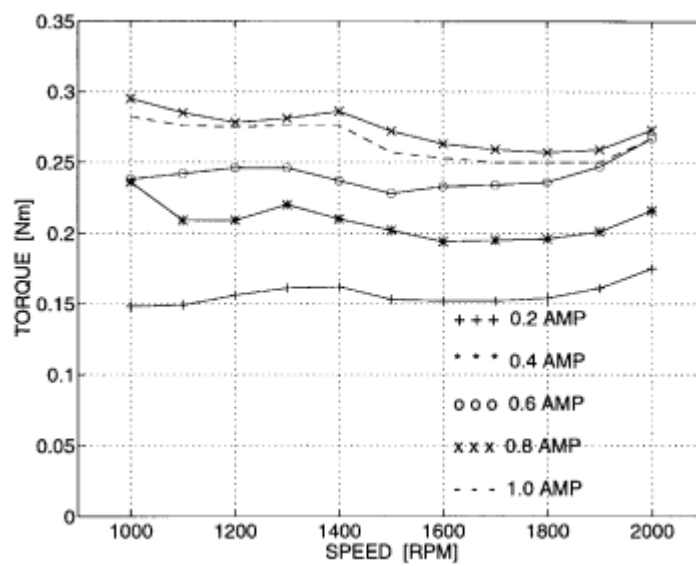
Chương trình này cơ bản đóng vai trò một cách nhanh chóng và đơn giản “ kích thước phần mềm và bổ sung nào khác chính xác hơn nhưng kỹ thuật phân tích chậm hơn, chẳng hạn như các FEA và FMDT. Nó Cung cấp tốc độ tính toán cao, cùng với sự linh hoạt để đánh giá một loạt các tùy chọn thiết kế và các thay đổi của thông số.

2.2.3.3. Phân tích và đặc tính

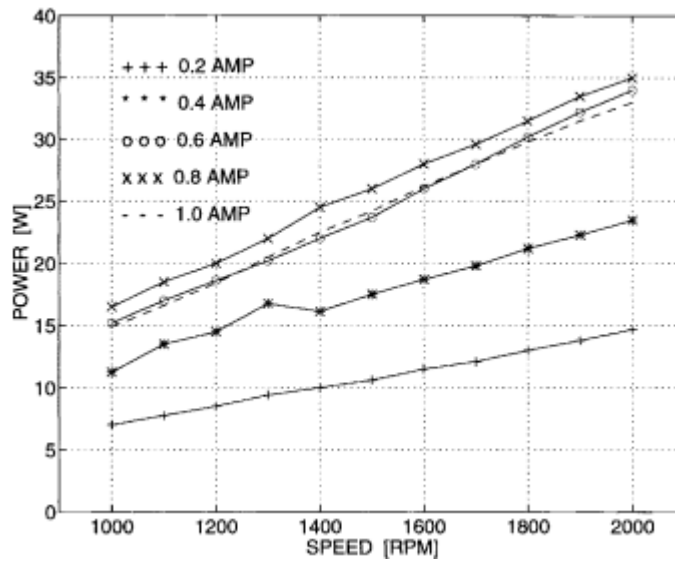
Hình 2.17 cho thấy một đầu ra điển hình của các phép đo kiểm tra năng lượng đã được chụp trên một dao động lưu trữ kỹ thuật số. Sử dụng các thử nghiệm kiểm tra năng lượng, tốc độ so với momen xoắn(hình 2.18). Tốc độ so với năng lượng (hình 2.19) và tốc độ so với hiệu suất (hình 2.20) đặc tính thu được.



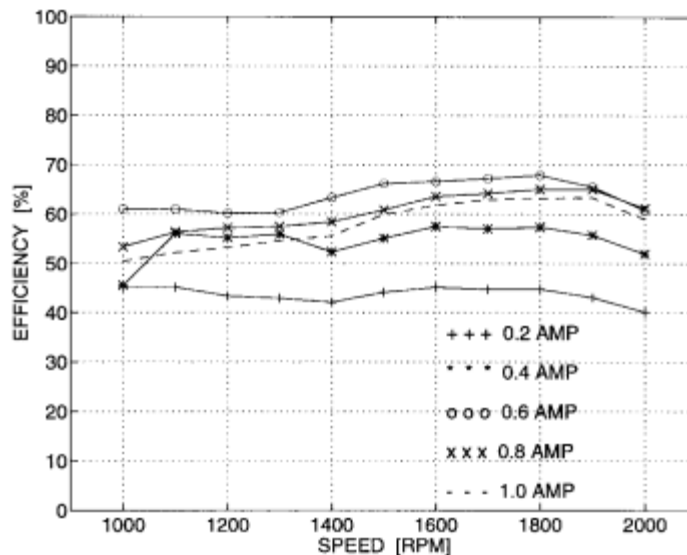
Hình 2.17. Đầu ra điển hình của các phép đo kiểm tra năng lượng cho thấy điện áp tạo ra và thay đổi của từ thông với tải điện trở ở tốc độ 1000 vòng /phút



Hình 2.18. Tốc độ máy phát so với các đặc tính của mômen xoắn

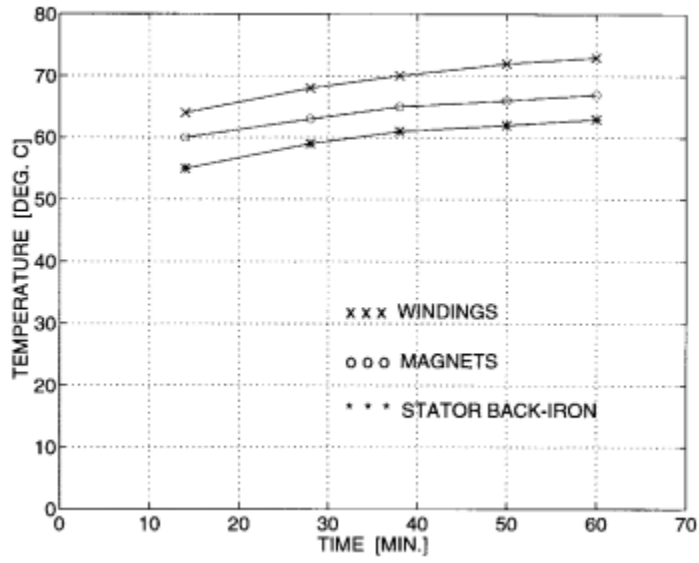


Hình 2.19. Tốc độ máy phát so với các đã tính điện



Hình 2.20. Tốc độ máy phát so với hiệu suất của máy

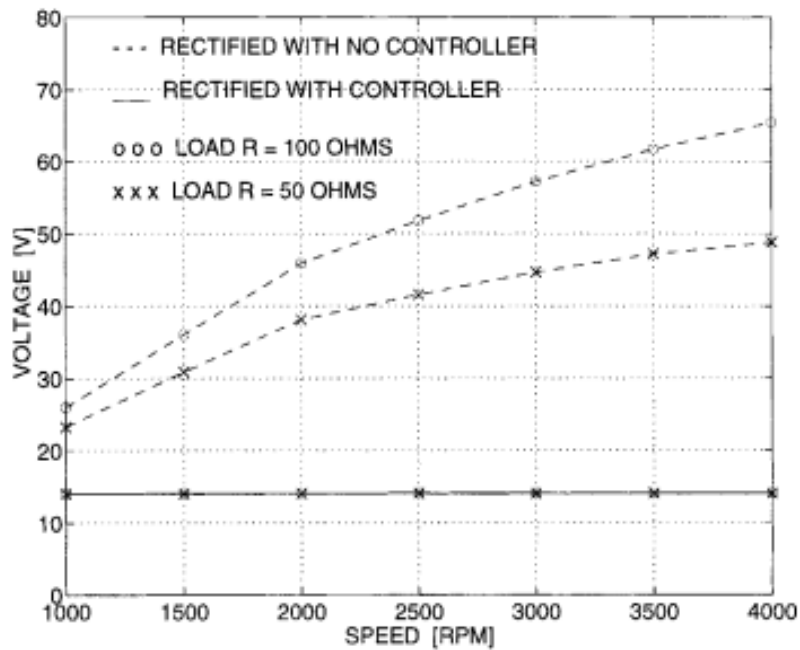
Các thử nghiệm năng lượng được tạo từ máy một chiều không chổi than PM, điều khiển động cơ máy phát điện ở tốc độ khác nhau thông qua một bộ chuyển đổi momen xoắn sử dụng để đo momen xoắn và năng lượng đầu vào. Điện áp đầu ra hiện tại và năng lượng được đo bằng cách sử dụng phân tích năng lượng. Một tải thuần trở thay đổi đã được sử dụng để có được các phép đo tại giá trị hiện tại khác nhau. Hình 2.21 cho thấy một ảnh chụp các đường cong nhiệt độ tăng. Các bài kiểm tra được thực hiện bằng cách chạy máy phát điện không đổi với tải điện trở trong một thời gian dài hợp lý.



Hình 2.21. Độ tăng nhiệt độ theo thời gian tại các vị trí khác nhau

- Bộ điều khiển điện tử

Hệ thống máy phát điện hoàn chỉnh bao gồm máy và bộ điều khiển điện tử đã được thử nghiệm. Với mục đích này, máy phát điện đã có tải, có và không có điều khiển, sử dụng tải điện trở không đổi. Kết quả được thể hiện trong hình 2.22, cho biết một hiệu quả tốt của điều chỉnh điện áp trên một dải tốc độ rộng.

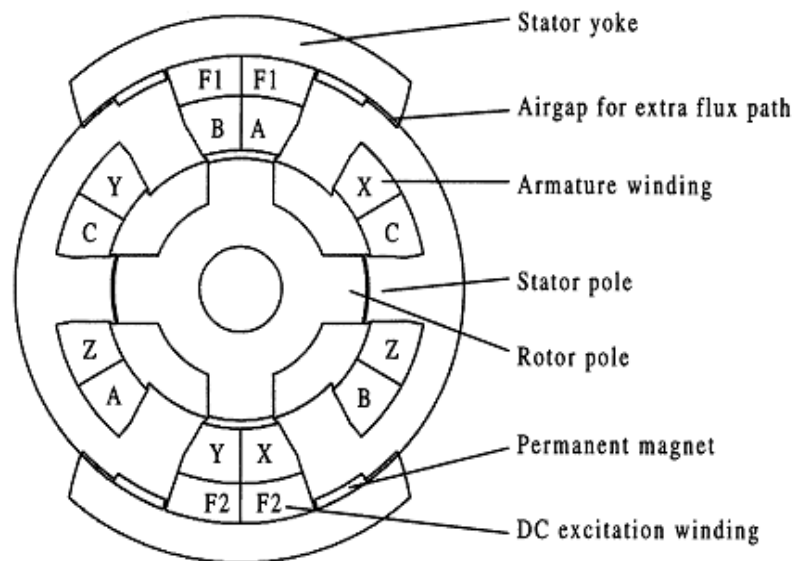


Hình 2.22. Điều chỉnh điện áp trên một dải tốc độ rộng

2.3. ĐỘNG CƠ MỘT CHIỀU NAM CHÂM VĨNH CỬU CỰC LÒI KÉP (DSPM)

2.3.1. Giới thiệu

Máy này tích hợp ưu điểm của cả máy PM không chổi than và máy đồng nhất cảm kháng (SR) [2], [3]. Tuy nhiên nó vẫn còn chứa một số nhược điểm do giá thành của vật liệu là nam châm vĩnh cửu (PM) cao và không có khả năng điều khiển từ thông của PM. Để làm giảm bớt vấn đề này một máy điện stato kép cấp điện từ 2 phía (SDFDS) được trình bày ở [4], trong đó thay thế vật liệu PM bằng cuộn dây kích từ dc để dễ dàng làm yếu từ thông ở cùng tốc độ cao. Tuy nhiên sơ đồ này chắc chắn cần một cuộn dây có stđ lớn để thực hiện việc làm yếu từ trường theo yêu cầu vì nó đã làm giảm tải điện cũng như mật độ công suất của nó. Trong bài này một máy điện SDFDS-PM không chổi than mới được đề xuất máy đó không những giảm được cả vật liệu làm PM và stđ cuộn dây kích từ mà còn đưa ra những ưu điểm của vùng làm việc với $P = \text{const}$ (cụ thể đạt tới 4 lần tốc độ cơ sở) máy này rất quan trọng trong công nghệ EV



Hình 2.23. Đề xuất máy cấu trúc liên kết

2.3.2. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động

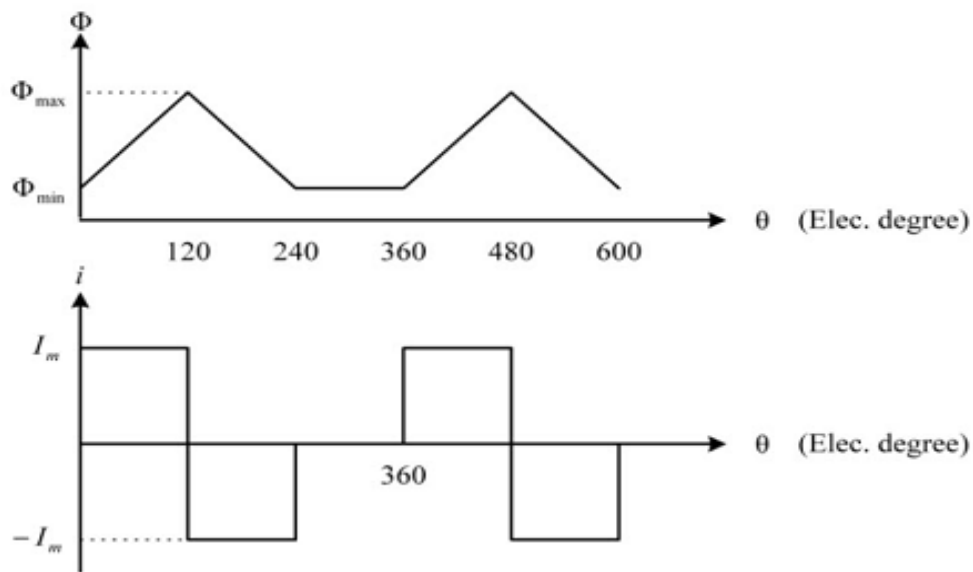
2.3.2.1. Cấu tạo

Hình 2.23 là sơ đồ cấu trúc của máy) SDFDS-PM đề suất, máy gồm 3 pha stato 6/4(6 cực stato 4 cực). Nó chứa 2 cuộn dây stato và cuộn dây 3 pha phần ứng và cuộn dây kích từ. Cuộn dây 3 pha phần ứng hoạt động giống như cuộn dây của máy DSPM [3], tuy nhiên cuộn dây kích từ không chỉ làm việc như là một nam châm mà còn như một thiết bị làm yếu từ trường hoặc làm tối ưu công suất. Lưu ý rằng hoạt động yếu từ thông là cần thiết khi ô tô tăng tốc trên đường tuy nhiên việc điều khiển để có hiệu suất tối ưu lại là bản chất đối với EV trong phạm vi truyền động.

Loại cấu trúc mới này là có một đường khép kín từ thông ngoài song song với mỗi cực nam châm vĩnh cửu. Nếu như stđ khi hoạt động yếu từ thông làm cho stđ của PM mạnh lên thì đường từ thông ngoài sẽ kéo theo hiệu ứng làm tăng từ thông móc vòng kết quả là làm tăng hiệu ứng làm yếu từ thông

2.3.2.2. Nguyên lý hoạt động

Dưới giả thiết rằng hiệu ứng dao động được bỏ qua và độ dẫn từ của lõi thép là vô hạn, sự thay đổi tuyến tính của từ thông móc vòng Φ , ở đây giá trị cực đại của Φ_{max} xảy ra khi có sự trùng giữa cực của rotor và cực của stato còn giá trị cực tiểu của từ thông Φ_{min} xảy ra khi chúng không trùng nhau. Khi Φ tăng lên dòng phần ứng i với giá trị dương I_m được cấp cho cuộn pha vì vậy nó sẽ tạo ra mô men dương, tương tự khi Φ giảm một dòng âm $-I_m$ sẽ được cấp cho cuộn pha để sao cho cũng tạo ra mô men dương. Như vậy 2 khả năng mô men đã sinh ra 2 vùng được sử dụng hoàn toàn. Dạng sóng lý thuyết của Φ và i tương ứng theo góc θ biểu diễn trên hình 2.24.



Hình 2.24. Lý thuyết từ thông và dạng sóng hiện tại

Như vậy sức phản điện động **E** cảm ứng ở không tải có thể đã bị giảm đi.

$$E = N \frac{d\Phi}{d\theta} \omega_r \approx N \frac{\Delta\Phi}{\Delta\theta} \omega_r \quad (2.3)$$

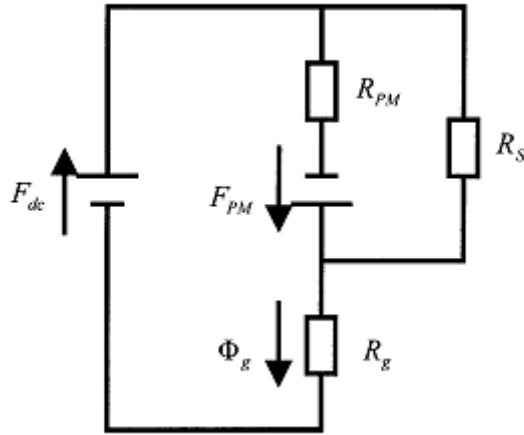
Trong đó N là số vòng dây nối tiếp của mỗi pha, $\Delta\Phi$ là hiệu của Φ_{\max} và Φ_{\min} , $\Delta\theta$ là hiệu số góc giữa vị trí rotor của Φ_{\max} và Φ_{\min} còn ω_r là tốc độ của rotor .

2.3.3. Phân tích mạch từ và tính chất của máy

2.3.3.1. Phân tích mạch từ

Như đã trình bày ở trên cấu trúc của máy điện mới là có sử dụng đường từ thông ngoài song song với mỗi một cực từ PM. Để có thể minh họa ưu điểm của nó một mô hình mạch từ tương đương được sử dụng để phân tích. Hình 2.25 là mạch từ tương đương của máy đề xuất khi không tải cụ thể là dòng phản ứng bằng không. Dựa trên mạch này từ thông ở khe hở không khí có thể biểu diễn:

$$\Phi_g = \frac{F_{dc}(R_S+R_{PM})+F_{PM}R_S}{R_S R_g+R_{PM}R_g+R_S R_{PM}} \quad (2.4)$$



Hình 2.25. Mạch từ tương đương ở chế độ không tải

Trong đó F_{dc} là số từ dc của cuộn dây kích từ, F_{PM} là số từ của PM, R_{PM} là từ kháng của cực từ PM, R_S là từ kháng của đường khép từ thông ngoài còn R_g là từ trở của khe hở không khí. Khi không có từ thông kích từ $F_{dc}=0$ thì từ thông ở khe hở không khí có thể biểu diễn như sau:

$$\Phi_{g0} = \frac{F_{PM}R_S}{R_S R_g+R_{PM}R_g+R_S R_{PM}} \quad (2.5)$$

Khi số từ kích từ có giá trị dương $F_{dc}=F_{dc+}$ thì từ thông khe hở không khí lại có giá trị:

$$\Phi_{g+} = \frac{F_{dc+}(R_S+R_{PM})+F_{PM}R_S}{R_S R_g+R_{PM}R_g+R_S R_{PM}} \quad (2.6)$$

Tương tự Khi số từ kích từ có giá trị âm $F_{dc}=F_{dc-}$ thì từ thông khe hở không khí lại có giá trị:

$$\Phi_{g-} = \frac{F_{dc-}(R_S+R_{PM})+F_{PM}R_S}{R_S R_g+R_{PM}R_g+R_S R_{PM}} \quad (2.7)$$

Với (2.5) và (2.6), (2.7) ta sẽ có:

$$F_{dc+} = \frac{\frac{\Phi_{g+}-1}{\Phi_{g0}}}{\frac{R_{PM}+1}{R_S}} F_{PM} \quad (2.8)$$

Tương tự bằng sử dụng (2.5) và (2.7), chúng ta nhận được:

$$F_{dc-} = \frac{1-\frac{\Phi_{g-}}{\Phi_{g0}}}{\frac{R_{PM}+1}{R_S}} F_{PM} \quad (2.9)$$

Khi ta chọn

$$\left(\frac{R_S}{R_{PM}}\right) = \frac{1}{3}, \left(\frac{\Phi_{g+}}{\Phi_{g0}}\right) = 2 \quad \text{và} \quad \left(\frac{\Phi_{g-}}{\Phi_{g0}}\right) = \frac{1}{2}$$

biểu thức (2.8) và (2.9) có thể viết lại: như sau:

$$F_{dc+} = \frac{F_{PM}}{4} \quad (2.10)$$

$$F_{dc-} = \frac{F_{PM}}{8} \quad (2.11)$$

Điều đó minh họa rằng sự thay đổi gấp 4 lần tức là $(\Phi_{g+}/\Phi_{g-})=4$, chỉ cần một sự thay đổi nhỏ Fdc cụ thể là $=25\% F_{PM}$ khi từ thông tăng và khoảng 12.5% khi từ thông yếu đi. Ta nhận thấy rằng hiệu quả khuếch đại khi từ thông yếu đi đặc biệt quan trọng khi EV cần làm việc ở vùng tốc độ cao.

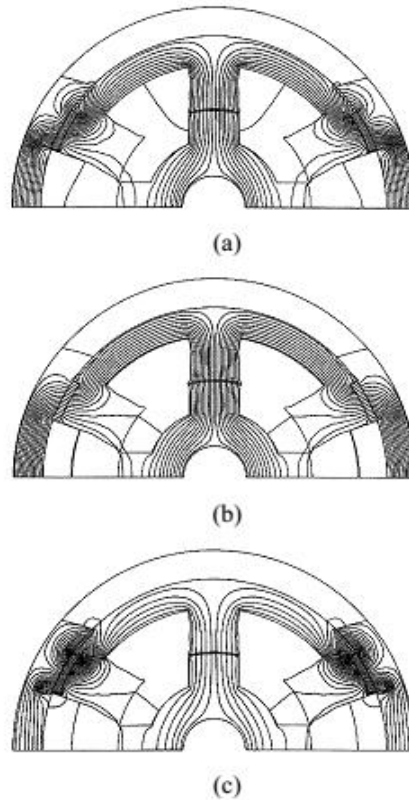
2.3.3.2. Tính chất của máy

Để cập nhật tính chất của máy đề xuất khi chúng ta nhận vào tính toán cả tính bão hòa của mạch từ, từ thông tản, và phản ứng phần ứng ta áp dụng phần tử hữu hạn của máy đề xuất có các thông số cho ở bảng 2.2. Hình 2.26 chỉ ra sự phân bố của máy đề xuất dưới điều kiện kích từ với $F_{DC}=0$.

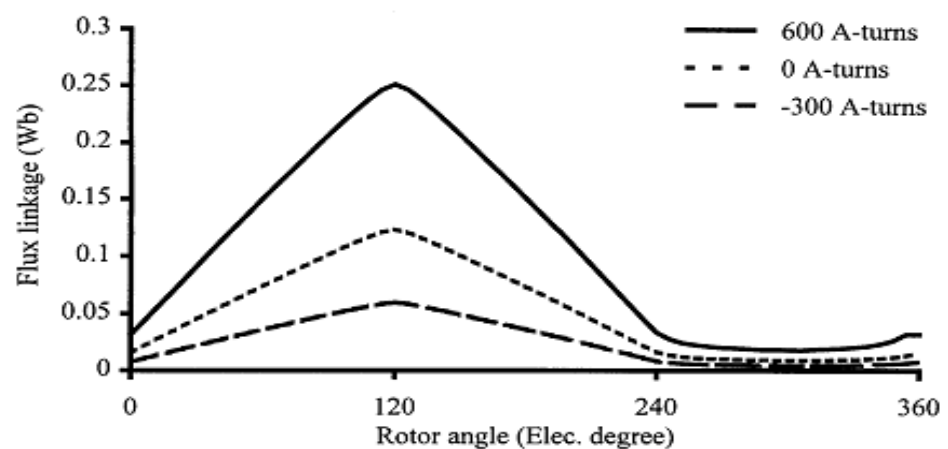
| Bảng 2.2 Dữ liệu thiết kế | |
|---------------------------|----------|
| Giá trị điện áp | 48V |
| Giá trị dòng điện | 6.5A |
| Số pha | 3 |
| Số cực của Stator | 6 |
| Số cực của Rotor | 4 |
| Số vòng dây mỗi pha | 64×2 |
| Đường kính ngoài Stator | 166.0 mm |
| Đường kính trong Stator | 81.2 mm |
| Đường kính ngoài Rotor | 80.0 mm |
| Đường kính trong Rotor | 26.0 mm |
| Chiều dài của rãnh | 80.0 mm |

Từ thông tăng lên tới $F_{dc}=600A/vòng$ và khi từ thông yếu với $F_{dc}=300A.vòng$ tương ứng. Đặc biệt Hình. 2.26(c) chỉ ra rằng đường từ thông ngoài đủ để tạo từ thông móc vòng và do đó hiệu ứng khuếch đại của từ thông yếu đúng như ta đã tìm được các kết quả từ phân tích mạch từ. Khi máy hoạt động không tải và chạy với tốc độ không đổi thì từ thông móc vòng ứng với những vị trí khác nhau của rotor dưới điều kiện kích từ khác nhau cụ thể 600, 0, và 300 A.vòng. được mô phỏng trên hình 2.27. Nó cũng cho ta thấy rằng cả khi từ thông tăng và từ thông giảm hoàn toàn đạt được bằng điều khiển dòng dc. Cũng nhận thấy mẫu mô phỏng này hoàn toàn phù hợp với lý thuyết chỉ ra ở Hình. 2.24. khi máy hoạt động với tải định mức cụ thể là dòng

phần ứng là 6.5A, thì phản ứng phần ứng gây nên làm biến dạng từ thông chính. Tuy nhiên do từ của đường khép kín từ thông phần ứng phản ứng phần ứng và ảnh hưởng của nó lên tốc độ là tương đối nhỏ.

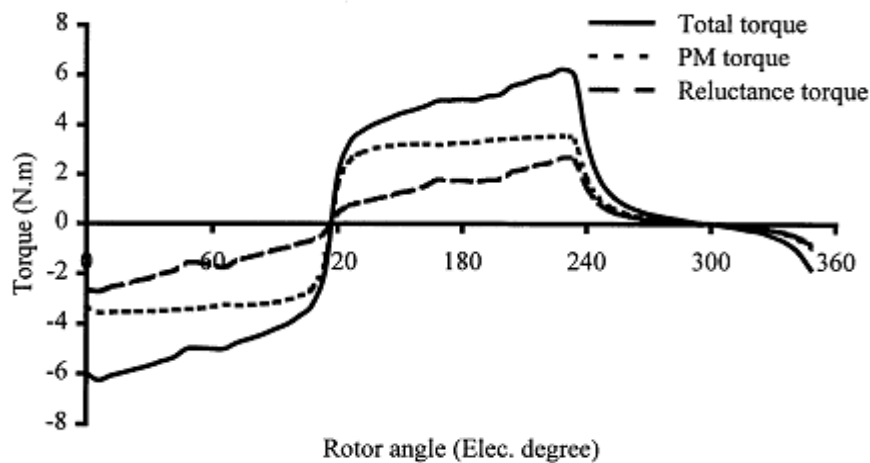


Hình 2.26. Phân bố từ thông tại các ngưỡng điện áp DC khác nhau: (a) Không có kích thích (b) từ thông tăng cường (c) từ thông suy giảm

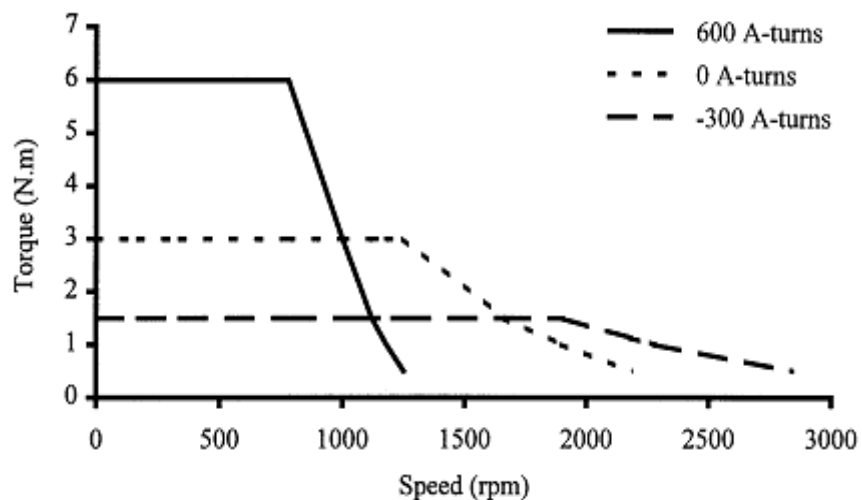


Hình 2.27. Từ thông liên kết tại các ngưỡng điện áp DC kích thích

Bằng ứng dụng phương pháp Maxwell mô men phát triển ứng với vị trí rotor khi không có kích từ dòng dc có thể mô phỏng như Hình. 2.28. Ta nhận thấy rằng tổng mô men gồm 2 thành phần cụ thể là mô men PM và mô men từ kháng. Tuy nhiên đặc tính cowcuar máy đề xuất với những dòng kích từ khác nhau mô phỏng trên hình 2.29. Chung ta có thể thấy rằng phạm vi tốc độ có thêm ở rộng tương đối lớn gấp 4 lần tốc độ cơ bản.



Hình 2.28. Tổng mômen xoắn và các thành phần của nó



Hình 2.29. Đặc điểm của mômen xoắn –tốc độ tại các ngưỡng điện áp DC kích thích

2.4. ĐỘNG CƠ MỘT CHIỀU TỪ KHÁNG BIẾN ĐỔI(VRM)

2.4.1. Giới thiệu

Động cơ từ kháng biến đổi (VRM) được thực hiện bởi 2 cấu trúc lõi đang được nghiên cứu tích cực vào những năm gần đây. Việc tạo mô men, đặc tính thiết kế và tính chất điều khiển đã được khai thác tốt. [1]-[4]. Đặc biệt đặc tính thứ lõi vốn có của máy này trong số các tính chất xứng đáng khác đã được nêu lên bởi các thành phần khác của nó đã được mô tả rõ ràng và động cơ từ kháng thay đổi đã trở thành một sự dự trữ cho khai thác bền vững của động cơ [5]. Động cơ VRM về cơ bản là một lớp chỉ có một thiết bị điện từ biến đổi năng lượng. Không giống như máy điện 2 lần kích từ sự thiếu vắng của cuộn dây kích từ riêng biệt trong cấu trúc VRM đã làm cho cấu trúc đơn giản và nó là một thiết bị có độ tin cậy làm việc lớn. Tuy nhiên tính chất này cũng làm tăng vấn đề nếu đứng về phía biến đổi năng lượng. Đầu tiên hoạt động của từ kháng biến đổi cần phải sử dụng chỉ một trong 2 vùng tạo mô men có thể, Thế có nghĩa là mô men động cơ có thể được tạo ra chỉ khi cực của rotor đi vào vùng chiếm bởi pha cho trước, tức là khi cảm kháng của động cơ tăng. Chỉ có mô men hãm được tạo ra nếu pha được cấp năng lượng trong khi cực còn lại được sắp thẳng hàng, vị trí cực đại của cảm kháng. Việc sử dụng đồng và sắt từ như vậy nhìn chung về nguyên lý là kém trong RVM.

Thứ 2 VRM hoạt động chính xác ở chế độ trong đó năng lượng từ trường được cung cấp và nó rút khỏi từ một pha của máy tại một thời điểm. Không sớm hơn khi năng lượng của từ trường được cấp cho máy sau đó nó cần phải rút ra rất nhanh từ mỗi pha chính xác khi độ cảm kháng của pha đạt tới giá trị cực đại để chống lại sự kéo năng lượng từ hệ thống cơ khí tức là tạo mô men âm. Vấn đề giới hạn này nằm ở trong giá trị lớn của cảm kháng ngắt giá trị này chống lại dòng điện giảm rất nhanh. Vấn đề chuyển mạch dòng điện đi theo điện kháng ngắt lớn đã làm giảm nhiều khả năng tạo mô men của máy VR được cấp điện bởi một bộ biến đổi không hoàn hảo có giới hạn công

suất biểu kiến. Đặc điểm này có thể thấy rõ khi bỏ xung một bất lợi vào ‘kích từ bất lợi’ mà bình thường đã có với tất cả các máy có kích từ đơn đặc biệt đối với máy có công suất nhỏ. Sự kích từ bất lợi liên quan tới một thực tế rằng các pha của máy kích từ đơn không phải chỉ mang thành phần tạo mô men của dòng điện mà còn phải trợ giúp thành phần kích từ thành phần đó phục vụ cho việc nhiễm từ phần lõi thép. Kết quả là cả cuộn dây máy điện và bộ biến đổi công suất thường chịu áp lực rất cao nhìn từ góc độ dòng điện và điện áp kết quả là cần phải tăng điện áp định mức đối với truyền động này. Khe hở không khí của máy này cần phải giảm khi cạnh tranh với các máy khác để đẩy máy này vào vùng bão hòa lớn. Yêu cầu này đã bù đắp điều bất lợi ưu điểm là giá thành thấp của VRM thêm vào đó là ồn và mô men dao động. Động cơ từ kháng biến đổi (VRM) đang được nghiên cứu mạnh trong thời gian gần đây. Dưới đây trình bày một loại động cơ 2 cực lõi nam châm vĩnh cửu trong đó từ trường kích từ được cung cấp bởi một nam châm vĩnh cửu PM đặt ở stato hoặc rotor; loại động cơ mới này được phát triển từ loại động cơ dị bộ đồng từ (homopolar) [11] và vì vậy nó được gọi là động cơ nam châm vĩnh cửu 2 cực hiện (DSPM). Bài báo sẽ chỉ ra bởi những nam châm vĩnh cửu hiện đại trong những máy như thế. Mô men tạo ra bởi động cơ này có thể được làm tăng lên đáng kể. Loại mới này phù hợp với động cơ DSPM và có thể tạo từ trường đồng cấp nam châm quay và nam châm [12], [13]. Bài báo này tập trung vào động cơ DSPM với nam châm tĩnh trong khi nam châm quay của DSPM được mô tả trong [14]

2.4.2. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động

2.4.2.1. Cấu tạo

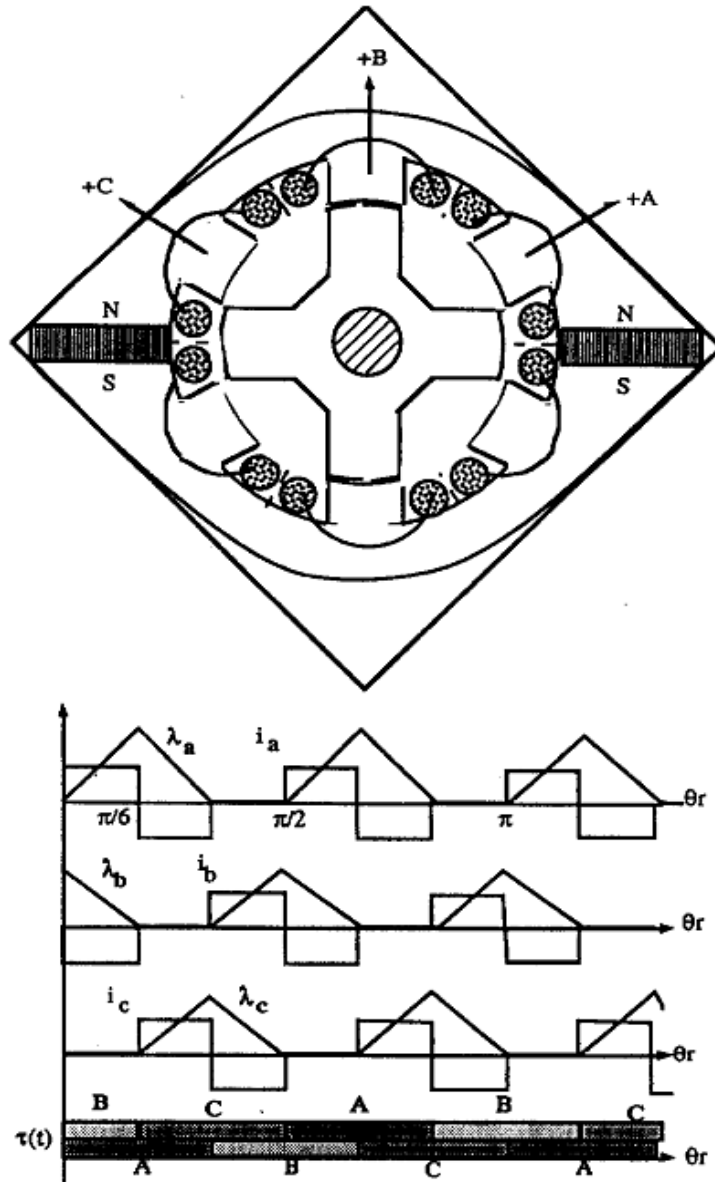
Hình 2.30 là mặt cắt ngang của động cơ DSPM nam châm tĩnh loại 6/4 cực. Loại cấu trúc 3 pha 6/4- cực là một phát minh đơn giản nhất cho hoạt động của động cơ khi đòi hỏi phải đáp ứng tính chất khởi động. Tuy nhiên loại 2 pha ngay cả loại 1 pha có thể được chấp nhận như máy phát. Đối với

các áp dụng tốc độ thấp và cao máy có thể được cấu tạo ở dạng bội số số cực ví dụ loại 12/8 cực. Có thể nhận thấy rằng ro to của máy DSPM rất giống với rotor loại máy điện 3 pha từ kháng biến đổi.

Cấu trúc của stato rất giống với stato của VRM trừ trường hợp có 2 miếng của nam châm được đặt trong lõi và vì vậy nó hình thành đường dẫn từ thông chính của cuộn dây stato. Để nhận được sự tập trung cao từ thông trong máy như thế, máy được làm bằng những lá thép cán mỏng. Sự thay đổi này đã xuất hiện vật lý một mặt cắt ngang có dạng chữ nhật hoặc dạng quả bóng và nó cộng thêm một chút trọng lượng và không gian chiếm bởi máy này.

Tính chất cao của vật liệu PM với tính chất khử từ tuyến tính được sử dụng để chống đỡ hiện tượng nhiễm từ và khử từ của phản ứng phần ứng sao cho giữ từ thông gần như không đổi ở khe hở không khí. Cực từ hình cung có góc cơ khí $\pi/6$ radians, và cực rotor hình cung được chọn lớn hơn hình cung của stato để cho phép dòng đổi chiều.

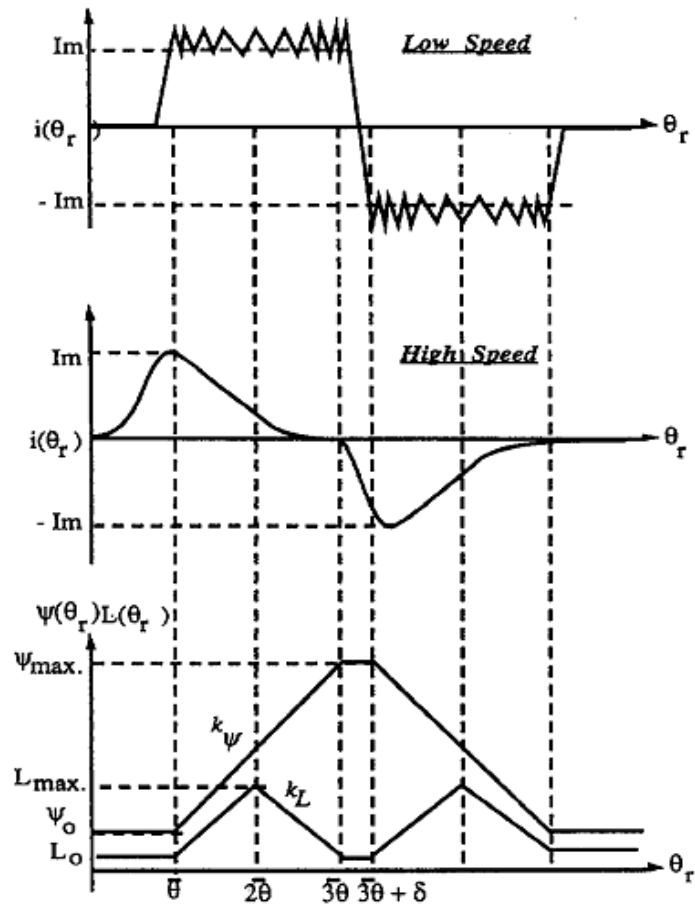
Khi cấu trúc đã được chấp nhận từ trở của khe hở không khí được nhìn bởi kích từ của PM là không đổi đối với vị trí của rotor nếu ta bỏ qua ba via vì vậy về bản chất mô men không dao động khi không tải. Lý tưởng sự biến đổi của từ thông móc vòng PM được coi là tuyến tính và do đó dạng hình thang của EMF sẽ cảm ứng trong mỗi cuộn dây stato khi không tải trong Hình 2.30.



Hình 2.30. Minh họa các nguyên tắc hoạt động của động cơ DSPM

Khi máy có tải từ thông của PUPU được tạo ra bởi cuộn dây cộng với từ thông của PM. Ta nhận thấy một điều quan trọng là do sự có mặt của PM được kết cấu có đường từ trở rất lớn đối với từ thông phản ứng phần ứng và vì vậy nó tác động một lực lớn tới từ thông phản ứng phần ứng làm cho từ thông pupu phải khép kín vòng quanh chông lên một cặp cực khác, kết quả là cuộn dây tích cực pha của stato sẽ tạo ra một cảm ứng nhỏ a_1 ở cả vị trí trùng và không trùng và cảm ứng từ lớn nhất xuất hiện khi các cực từ trong thực tế chính xác là phủ lên một nửa như ở Hình. 2.31. Ngược lại đối với

VRM, cảm ứng nhỏ trùng vị trí này lại có khả năng đảo chiều dòng điện rất nhanh ở vị trí trùng. Do đó mô men có thể được tạo ra bằng áp dụng dòng dương cho cuộn dây khi từ thông cảm ứng PM tăng lên và sử dụng dòng âm khi từ thông giảm như ở Hình 2.30.



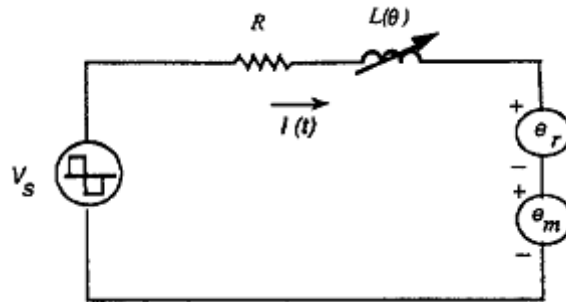
Hình 2.31. Dạng sóng hiện tại của động cơ DSPM

2.4.2.2. Nguyên lý hoạt động

a. Việc tạo momen trong máy DSPM

Các biểu thức momen xoắn bắt nguồn dựa trên một mô hình tuyến tính đơn giản với mục đích minh họa. Là một sự gần đúng, sự biến đổi của điện cảm cuộn dây và từ thông móc vòng gây ra bởi PM của cuộn dây tích cực stato được coi là một đoạn tuyến tính và chỉ phụ thuộc vào không gian, thể

hiện trong hình 2. Phương trình điện áp đầu cuối cho một hoạt động cuộn dây stator là giai đoạn sau đó:



Hình 2.32. Mạch tương đương của động cơ DSPM

$$v = Ri + e \approx e = \frac{d\psi}{dt} \quad (2.12)$$

Sự liên kết từ thông φ , gồm các PM gây ra từ thông liên kết φ_m và từ thông phản ứng phần ứng liên kết (Li)

$$\psi = Li + \psi_m \quad (2.13)$$

Do đó :

$$\begin{aligned} e &= \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} + \frac{d\psi_m}{dt} \quad (2.14) \\ &= L \frac{di}{dt} + e_r + e_m. \end{aligned}$$

Kết quả này cho thấy các mạch tương đương của hình (2.32)

Nguồn điện đi vào bất kỳ của các cuộn dây, bỏ qua tổn hao ohmic (dạng thuần trở) và tổn thất sắt từ.

$$\begin{aligned} 3. \mathcal{P}_e = ei &= iL \frac{di}{dt} + i^2 \frac{dL}{dt} + \frac{d\psi_m}{dt} \\ &= \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} Li^2 \right) + \left\{ \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta_r} + i \frac{\partial \psi_m}{\partial \theta_r} \right\} \omega_r. \quad (2.15) \end{aligned}$$

Cân bằng điện cung cấp.

$$\mathcal{P}_e = \frac{d}{dt} \mathcal{W}_f + \mathcal{T} \omega_r \quad (2.16)$$

Do đó, momen xoắn có thể được viết như là tổng của hai thành phần.

$$\mathcal{T} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta_r} + i \frac{\partial \psi_m}{\partial \theta_r} \quad (2.17)$$

Trong khi trường năng lượng là.

$$\mathcal{W}_f = \frac{1}{2} Li^2. \quad (2.18)$$

Kiểm tra cẩn thận (2.17) và (2.18) cho thấy các tính năng sau của động cơ DSPM:

- Phản ứng phản ứng có trường năng lượng \mathcal{W}_f , cái mà được phục hồi trong thời gian đảo mạch là rất nhỏ vì giá trị điện cảm của stator nhỏ. Do đó, tỷ lệ chuyển đổi năng lượng là rất cao.

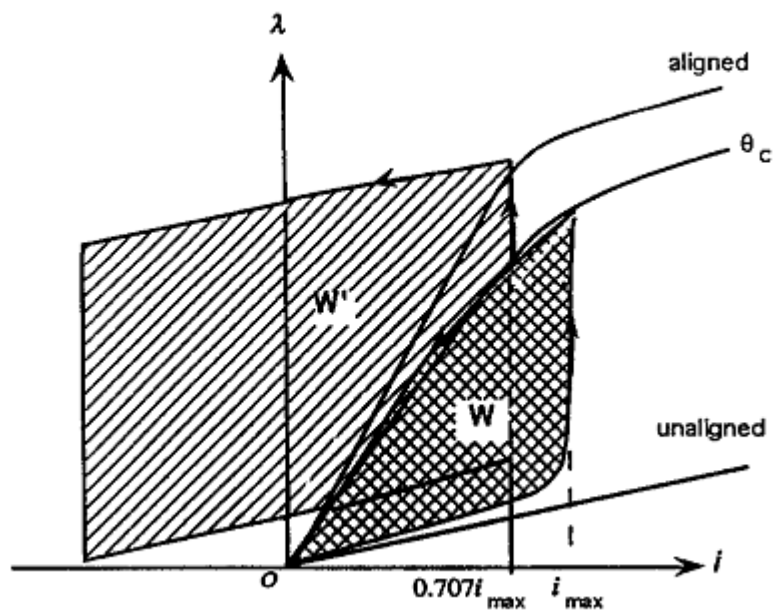
- Bởi vì sự biến đổi hình tam giác của cuộn cảm stator, momen xoắn cường bức \mathcal{T}_r sẽ nhỏ và có một giá trị trung bình bằng 0 nếu hiện tại biên độ được giữ không đổi trong thời gian chu kỳ. Tuy nhiên mạng momen xoắn cường bức sẽ khác không nếu thay đổi dòng từ hình chữ nhật sang dạng sóng ở hình 1.

- Momen phản ứng \mathcal{T}_m , đó là momen xoắn thành phần chiếm ưu thế, có thể tạo ra bằng cách áp dụng hoặc dòng dương sang cuộn dây pha khi mà từ thông liên kết tăng lên ($e_m > 0$) hoặc dòng âm khi từ thông liên kết đang giảm ($e_m < 0$).

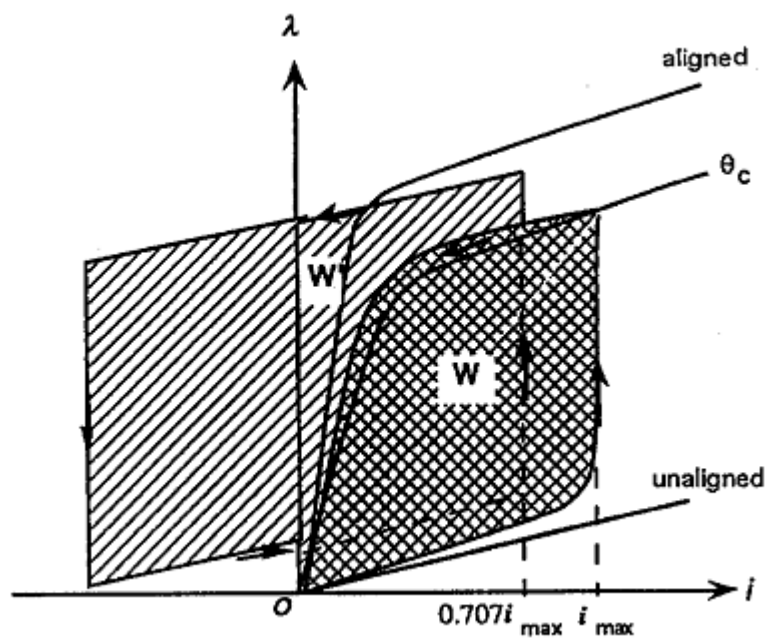
Rõ ràng là ở tốc độ thấp động cơ DSPM, về nguyên tắc tương tự như các động cơ PM không chổi than DC (PM-BLDC) với 120° gần vuông dòng dạng sóng. Sự khác biệt chính là hai 120° dẫn dòng, từ trở được vẽ chung trong trường hợp của động cơ DSPM. Cần nhận ra rằng một khoảng thời gian đủ giữa hai khối dòng phải được cung cấp trong thiết kế của động cơ DSPM

để đảm bảo đảo ngược dòng. Ở tốc độ cao, dòng không thể duy trì liên tục do qua mức PM cảm ứng lại EMF. Trong trường hợp này, các đỉnh của dòng trong nửa chu kỳ đầu tiên mà điện cảm ngày càng tăng và giảm nhanh chóng trong nửa chu kỳ thứ hai chu kỳ mà điện cảm giảm dần. Giai đoạn này phân bố không đồng đều, tuy nhiên có ích kể từ khi phát một số lượng đáng kể của momen xoắn cưỡng bức mà cuối cùng góp phần vào việc duy trì năng lượng không đổi của động cơ DSPM. Tận dụng hiệu suất đặc biệt này của động cơ DSPM từ PM BLDC đặc biệt với hoạt động trên một phạm vi tốc độ rộng.

Điều thú vị khi so sánh việc tạo ra momen xoắn của động cơ DSPM với các VRM thông thường. Để hình dung sự khác biệt giữa VRM và động cơ DSPM, sẽ rất hữu ích để xem xét các từ thông so với quỹ đạo hiện tại cho cả hai động cơ thể hiện trong hình 2.33. Hai trường hợp được thể hiện trong đồ thị, một cho máy có độ bão hòa không đáng kể (máy nhỏ) và một cho máy có độ bão hòa cao (máy lớn). Để tạo ra tổn thất đồng giống nhau trong hai động cơ, dòng stator cho động cơ DSPM được thu gọn xuống $\sqrt{2}/2$ của VRM. Momen xoắn được tạo ra trong một chu kỳ được biểu diễn bởi các vùng W cho VRM và W' cho máy DSPM. Vùng W' là rõ ràng lớn hơn nhiều so với W vì thực tế rằng: i) Trường năng lượng này được phục hồi, tương trưng bởi vùng R chỉ có một phần nhỏ trong tổng số trường năng lượng; ii) góc mở-tắt có thể được tiến tới gần hơn đến vị trí phù hợp do điện cảm nhỏ gặp phải; iii) hoạt động hai chiều mang lại một lợi ích lớn đáng kể trong việc tạo ra momen xoắn. Giả sử từ thông dao động tương tự, nó rất rõ ràng rằng động cơ DSPM có thể đạt được lý tưởng giữa $\sqrt{2}$ tới $2\sqrt{2}$ lần mật độ momen xoắn của VRM, phụ thuộc vào bao nhiêu SRM bị bắt kích từ.



(a)

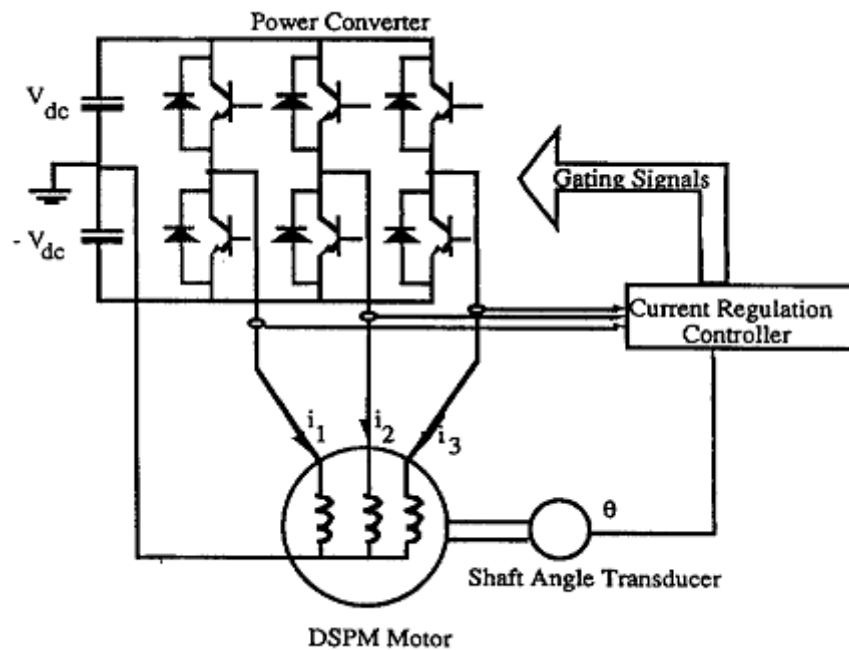


(b)

Hình 2.33. So sánh mômen tạo giữa hai động cơ VRM và DSPM

2.4.2.3. Điều khiển truyền động của động cơ DSPM

Động cơ DSPM linh hoạt liên quan đến việc chuyển đổi lựa chọn và có thể hỗ trợ hoặc bởi một trong những chuyển đổi cực đơn là thường được sử dụng cho VRM là (6) hoặc bằng một chuyển đổi lưỡng cực được sử dụng cho động cơ PM-BLDC (15). Hình 5 cho thấy cấu trúc liên kết lưỡng cực với một đương trung tính để thích ứng với điều chỉnh dòng mà dòng phải đảo mạch trong chu kỳ. Truyền động của động cơ DSPM như sơ đồ hình 2.34.



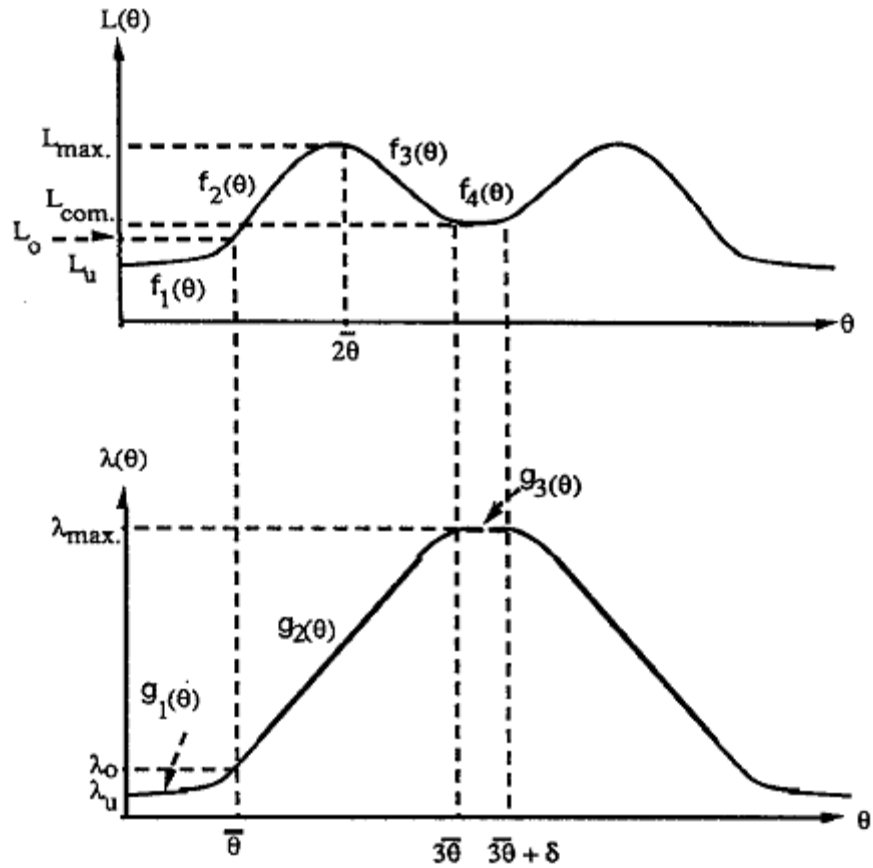
Hình 2.34. Sơ đồ truyền động của động cơ DSPM

Còn có trục truyền động để cung cấp thông tin về vị trí rotor để kiểm soát dòng stato theo cách thông thường. Điều khiển động cơ DSPM là tương tự của các động cơ PM-BLDC. Bốn góc phần tư hoạt động dễ dàng bằng cách thay đổi trình tự dẫn và phân cực dòng stator. Dưới tốc độ cơ bản, quy định hiện hành được ưa chuộng để đạt được việc tạo ra momen xoắn bằng phẳng. Trên cơ sở tốc độ, động cơ sẽ trở thành điện áp nuôi. Kiểm soát góc và sau đó sẽ được sử dụng để thực hiện cấp năng lượng liên tục trong nhiều cách thức tương tự như với một VRM.

2.4.2.4. Phân tích , thiết kế nguyên mẫu động cơ DSPM

- Phân tích từ tính phi tuyến

Phân tích phần tử hữu hạn FEA là một công cụ quan trọng đối với mô hình trạng thái ổn định chính xác và phân tích hiệu suất của máy DSPM, tính toán từ tính bão hòa, viền và khử từ. Trong (16) phương pháp phần tử hữu hạn được áp dụng cho việc tính toán từ trường hai chiều trong mặt cắt ngang của DSPM. Các dữ liệu giải pháp. Các trường dữ liệu giải pháp này sau đó được xử lý sẽ được sử dụng cho dự đoán các đặc tính động lực và trạng thái ổn định của động cơ. Kinh nghiệm cho thấy , tuy nhiên những lợi ích bằng cách sử dụng FEA trong máy DSPM . trong đó có dạng hình học khá đơn giản, thường là nhỏ so với cách tiếp cận truyền thống hơn phân tích mạch phi tuyến (MCA), đặc biệt là cho máy nhỏ, nơi bão hòa từ tính không phải rất gay gắt (16). Nó cũng được chứng minh rằng cho máy có khung kích cỡ nhỏ, khớp nối chéo giữa các từ thông PM và từ thông phản ứng phần ứng khá yếu, do đó các thay đổi của từ thông PM liên kết và từ thông phản ứng phần ứng liên kết có thể được giả định là phụ thuộc vào không gian duy nhất. Phân tích mạch từ trường phi tuyến được áp dụng như một sự lựa chọn để cấu trúc liên kết này để tính toán từ thông liên kết PM và các thay đổi giai đoạn điện cảm cho các mục đích của thiết kế và phân tích động lượng. Dòng không tải phi tuyến PM mạch từ tương đối đơn giản . Tính toán hệ số tự cảm cuộn dây stator dựa trên tính toán độ từ thẩm của khoảng cách không khí cho một vị trí rotor được đưa ra, mà được thiết lập tốt(16).



Hình 2.35. Biến thể của từ thông liên kết PM(a) và điện cảm cuộn dây của động cơ DSPM(b)

Ảnh hưởng của vùng bão hòa, khi mong muốn cũng có thể được đưa vào trong các tính toán của giai đoạn độ tự cảm với sửa đổi chút ít, đặc biệt là cho việc tính toán độ tự cảm tối đa mà các phản ứng phần ứng là lớn nhất.

Khi đơn giản hóa hơn nữa, các kỹ thuật đường cong phù hợp có thể sử dụng để xây dựng các biến thể của dòng liên kết PM và từ thông phản ứng phần ứng liên kết từ các giá trị tính toán tại các vị trí rotor thông thường, theo một cách tiếp cận tương tự như đề xuất của Miller cho VRM(17). Vị trí quan tâm bao gồm các khoảng liên kết, liên kết, tối đa và vị trí điện cảm tối thiểu, v.v..Hình 2.35 thể hiện các biến thể của một phần tử tiêu biểu trong ma trận điện cảm $\mathcal{L}(\theta_r)$ có thể xấp xỉ bằng một hàm phân bằng phẳng gần đúng ($\mathcal{L}\theta_r$).

$$f_1(\theta_r) = \mathcal{L}_0 + \frac{a(\theta_r - \bar{\theta})}{b - (\theta_r - \bar{\theta})}; \quad 0 \leq \theta_r \leq \bar{\theta}$$

$$f_2(\theta_r) = \mathcal{L}_{max} - c(\theta_r - 2\bar{\theta})^2; \bar{\theta} \leq \theta_r \leq 2\bar{\theta}$$

$$f_3(\theta_r) = \frac{\mathcal{L}_{max} - \mathcal{L}_{com}}{2} \cos\left[\frac{\pi}{\bar{\theta}}(\theta_r - 2\bar{\theta})\right] + \frac{\mathcal{L}_{max} + \mathcal{L}_{com}}{2}; 2\bar{\theta} \leq \theta_r \leq 3\bar{\theta}$$

$$f_4(\theta_r) = \mathcal{L}_{com}. 3\bar{\theta} \leq \theta_r \leq 3\bar{\theta} + \delta$$

Trong đó a, b và c có thể tính được theo tính liên tục hạn chế (ràng buộc)

Sự thay đổi liên kết từ thông sau đó có thể tính xấp xỉ bằng $\bar{\lambda}(\theta_r)$ gồm các đường parabol và thẳng.

$$g_1(\theta_r) = \lambda_0 + \frac{a(\theta_r - \bar{\theta})}{b - (\theta_r - \bar{\theta})}; 0 \leq \theta_r \leq \bar{\theta}$$

$$g_2(\theta_r) = \lambda_{max} - c(\theta_r - 3\bar{\theta}); \bar{\theta} \leq \theta_r \leq 3\bar{\theta}$$

$$g_3 = \lambda_{max}. \bar{\theta} \leq \theta_r \leq 3\bar{\theta} + \delta$$

Trong đó a, b và c có thể được tính theo tính liên tục hạn chế (ràng buộc)

- Thiết kế nguyên mẫu động cơ DSPM

Một động cơ nguyên mẫu DSPM đã được thiết kế để hỗ trợ các lý thuyết nêu trên. Thiết kế của động cơ DSPM được dựa trên mỗi pha tương đương như hình 3, với việc bao gồm của nhiều tính thực tiễn [16]. Để so sánh có ý nghĩa các nguyên mẫu được thiết kế có đường kính ngoài cùng của stator ghép lại như là một động cơ cảm ứng có song suất 1 mã lực được chế tạo bởi Marathon Electric Co. Các cấu trúc cho cả hai máy là cấu trúc NEMA 145. Chiều dài dây là khác nhau từ các máy cảm ứng chủ yếu để chứa các mảnh nam châm đó là một chiều dài tiêu chuẩn. Khoảng cách không khí đã được đặt là 0.5 mm. Nguyên liệu đất hiếm năng lượng cao Magnequench II đã được sử dụng làm nam châm vĩnh cửu. Thép ghép lớp sử dụng là 24 Gauge, M19 AISI lớp. Tỷ lệ tối ưu của OD/ID được xác định là một kết quả của một tối ưu hóa thiết kế sử dụng một thuật toán lập trình phi tuyến gọi là lập trình

tuần tự bậc hai phi tuyến , với hàm mục tiêu thiết lập để được mật độ momen xoắn và mỗi đơn vị diện tích tổn thất đồng bắt buộc[16]. Mật độ từ thông lớn và mật độ dòng của cuộn dây lựa chọn để được giống như những động cơ cảm ứng Marathon ví dụ như:

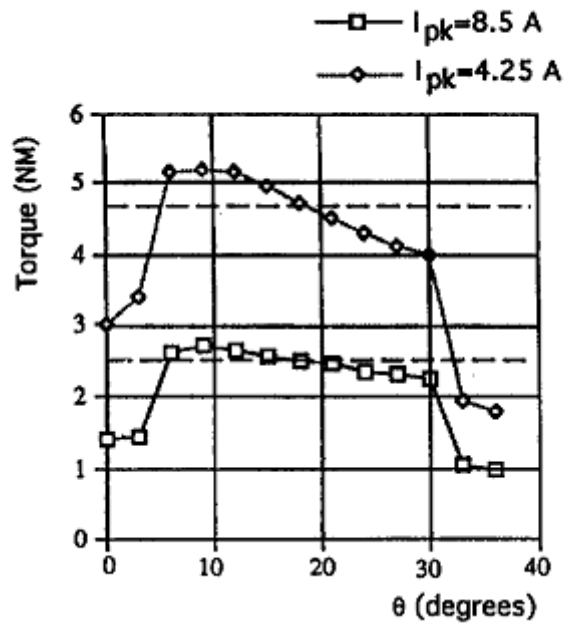
$$B_t = 16.5 \text{ kG}$$

$$\text{and } J_s = 3375 \text{ A/in}^2$$

Với lựa chọn này, mỗi đơn vị diện tích tổn hao đồng trong cả động cơ được giữ gần như giống nhau để đặt cả hai động cơ trong điều kiện làm mát giống nhau.

- Đo điện cảm

Như một kết quả của các bài kiểm tra thử nghiệm, đo được tối đa khoảng cách không khí mật độ từ thông của máy hoàn toàn được tìm thấy 12.0kG, mà 20% ngắn mạch giá trị thiết kế của 15.1kG. Việc giảm này rõ ràng là sự tồn tại của đường dẫn rò rỉ từ thông trong khu vực giới hạn và không gian bên ngoài của động cơ mà đã không được biểu diễn đầy đủ trong các chương trình thiết kế . Để bù đắp cho tác động tiêu cực đến việc tạo ra momen xoắn của máy, quấn lại động cơ với lần lượt các cuộn dây stator tăng 20%. Dây số 17-AWG sau đó đã được sử dụng thay vì 16-AWG. Với sự thay đổi này, mật độ dòng stator của nguyên mẫu DSPM động cơ cao hơn của động cơ Marathon 20%. Do đó , tổn hao đồng sẽ tăng lên 44%. Tuy nhiên, kể từ khi động cơ Marathon bổ sung 34% tổn hao đồng trên rotor(lỗ trượt), có vẻ như tổng tổn hao trên mỗi đơn vị diện tích cho hai máy hiện nay là như nhau.



Hình 2.36. Biểu đồ mô men xoắn tĩnh của động cơ nguyên mẫu DSPM dưới 50% và 100% dòng định mức

Kết quả là nhiệt độ tăng lên của hai máy vẫn như nhau.

- Đo lường momen xoắn tĩnh

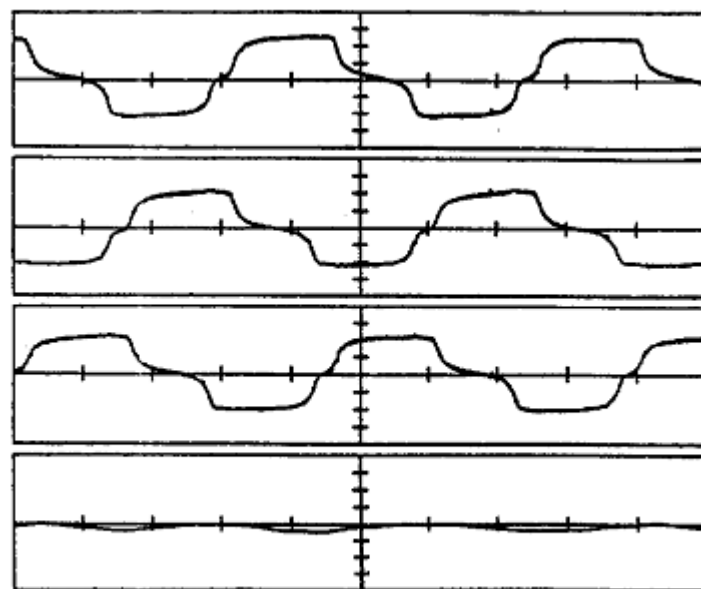
Đo momen xoắn tĩnh, nguồn cung cấp Sorenson DC(DCR 150 -12B) đã được sử dụng để cung cấp một điện áp DC hiện tại cho hai trong số các cuộn dây pha stator nối tiếp. Một cảm biến đo momen xoắn Lebow Strain Gauge (đời 1604) cùng với tín hiệu ConditionerIndicator Daytronic (đời 3278) đo momen xoắn tĩnh của rotor tại bất kỳ vị trí nào đã bị khóa. Hình 2.36 cho thấy các biên dạng của momen xoắn của động cơ rotor dịch chuyển dưới 50%(4.25 A) và 100% (8.5 A) dòng tải của stator. Sự sụt giảm của biên dạng momen xoắn ở hai đầu của khu vực này là do chồng chéo của stator và cung của cực rotor.

Từ hình 2.36 , nó có thể nhìn thấy dễ dàng rằng gợn momen xoắn tăng gần như bình phương dòng. Khi dòng tải đầy, đỉnh của các momen xoắn đạt 16% momen xoắn trung bình. Cũng có thể thấy rằng khi dòng tải đầy, momen xoắn trung bình là 6.0% thiếu của giá trị thiết kế (5.0NM),trong khi dòng ở

mức 50%, máy cung cấp chính xác 50% momen xoắn định mức thiết kế. Nguyên nhân sau đây là cho có tác dụng khử từ của dòng cuộn dây stator trong sự có mặt của từ tính bão hòa, tương tự như tác dụng khử từ của phản ứng phản ứng trong máy DC.

- Các thử nghiệm không tải

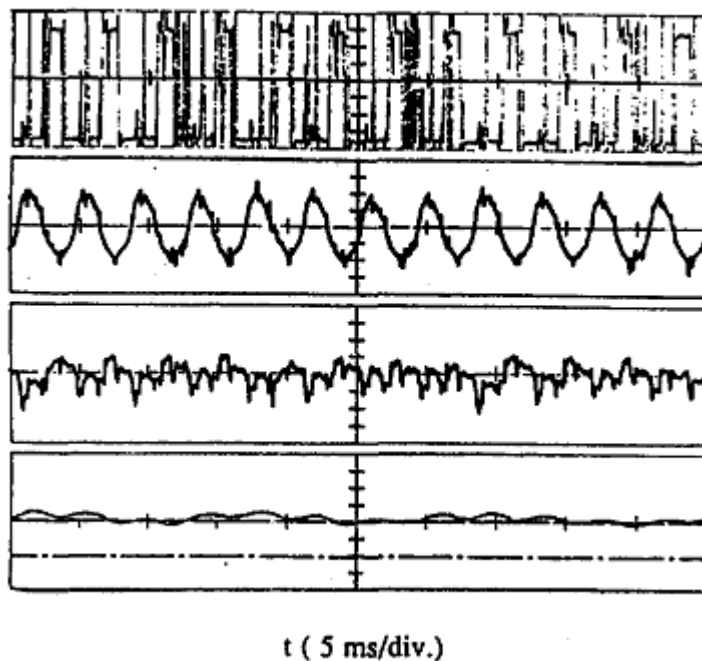
Theo một thử nghiệm không tải , bộ chuyển đổi được tắt và động cơ DSPM hoạt động nhờ động cơ DC nuôi bằng chuyển đổi Cutler-Hammer Responder. EMF lại gây ra trong mỗi cuộn dây stator và trục momen xoắn từ bộ chuyển đổi momen xoắn có thể ghi lại thông qua bốn kênh LeCroy dao động kỹ thuật số. Hình cho thấy cuộn dây sau EM và các dạng sóng momen xoắn của động cơ DSPM thử nghiệm ở 30% tốc độ định mức mà momen xoắn tức thời có thể được nhận biết chính xác. Có thể thấy rằng các EMF dạng sóng sau có độ dốc nhỏ hơn ở phần trên, đó là do sự không đồng tâm của rotor. Giá trị đỉnh của EMF sau đạt 56.0V ở tốc độ định mức (1800 vòng/phút) đáp ứng các giá trị thiết kế.



t (5 ms/div.)

Hình 2.37. Dao động của động cơ DSPM tại không tải

Hình 2.37 cho thấy điện áp pha áp dụng, dòng áp, dòng pha, dòng trung tính và các dấu momen xoắn của động cơ DSPM ở 200% tốc độ định mức, với cùng một dòng định cực đại yêu cầu là 8.4A. Sự khác biệt trong các sóng hiện tại ở tốc độ cao và tốc độ thấp thể hiện rất rõ ràng, trong khi dòng trung tính vẫn còn tương đối nhỏ so với pha (giai đoạn) hiện tại. Có thể thấy rằng momen xoắn trung bình được duy trì ở khoảng 4.0N.m lên đến tốc độ định mức nơi mà dòng điều chỉnh có nguy cơ triệt tiêu. Ở tốc độ cao hơn tốc độ định mức, động cơ lấy điện áp nuôi để vận hành và momen xoắn trung bình giảm. Điều quan trọng là đề cập đến bộ chuyển đổi momen xoắn không thể phản ánh động lượng của momen xoắn tạo ra của động cơ DSPM tại đầu tốc độ cao để tăng độ bền vững của hệ thống ở tốc độ cao.



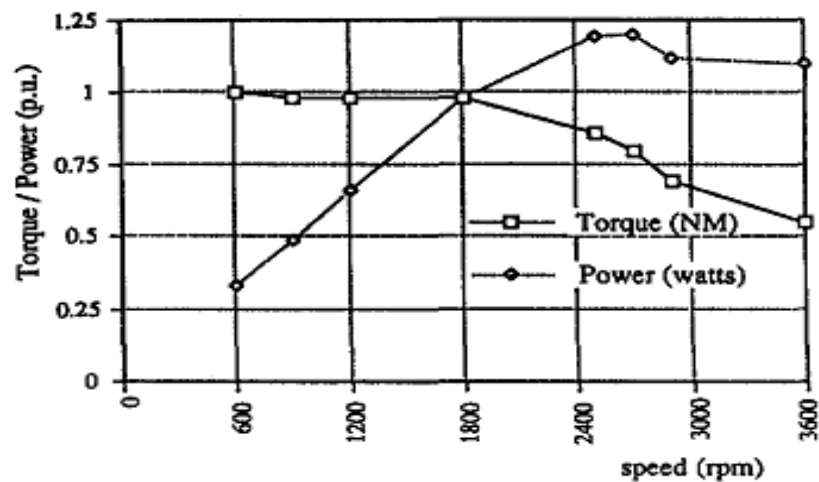
Hình 2.38. Độ dao động của động cơ DSPM tại tốc độ 3600vong/phút

- ESJiciency, Momen xoắn và điện năng

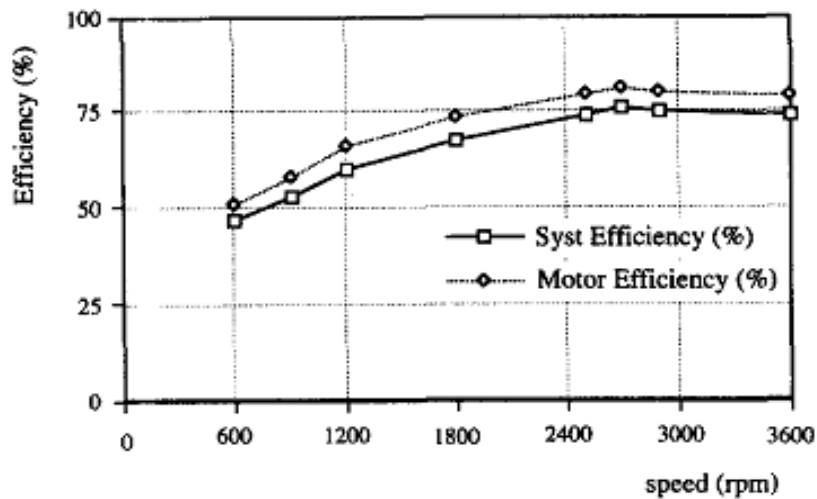
Để đánh giá tính năng momen xoắn và công suất và hiệu quả của các thử nghiệm điều khiển động cơ DSPM, động cơ được điều khiển ở tốc độ khác nhau với dòng cực đại cố định ở mức 8.5A. Các thử nghiệm đã được

thực nghiệm đến hai lần tốc độ định mức chỉ do những hạn chế tốc độ của chân đế thử nghiệm. Công suất đầu ra được đánh giá bởi kết quả đo của tốc độ và momen xoắn. Năng lượng đầu vào thu được bằng kết quả của hai nguồn điện áp và dòng DC. Đầu vào động cơ được đọc trực tiếp từ một đồng hồ điện kỹ thuật số.

Momen xoắn và tiềm năng công suất và hiệu suất đường cong của các thử nghiệm điều khiển động cơ DSPM được thể hiện trong hình 2.37 và 2.40, với momen xoắn và công suất trung bình tới 1 mã lực. Điều thú vị để nhận thấy rằng cả công suất đầu ra và hiệu quả đạt tới đỉnh cao với tốc độ ngay trên tốc độ định mức, nơi cắt mạch kết thúc và động cơ bắt đầu chọn lọc momen xoắn cưỡng bức. Mặt khác ở tốc độ thấp nơi dòng hiện hành được duy trì bởi cắt mạch, momen xoắn đầu ra thấp so với giá trị thiết kế khoảng 20%, trong khi thử nghiệm momen xoắn tĩnh chỉ giảm 6.0%.



Hình 2.39. Các đường cong thể hiện khả năng của động cơ DSPM

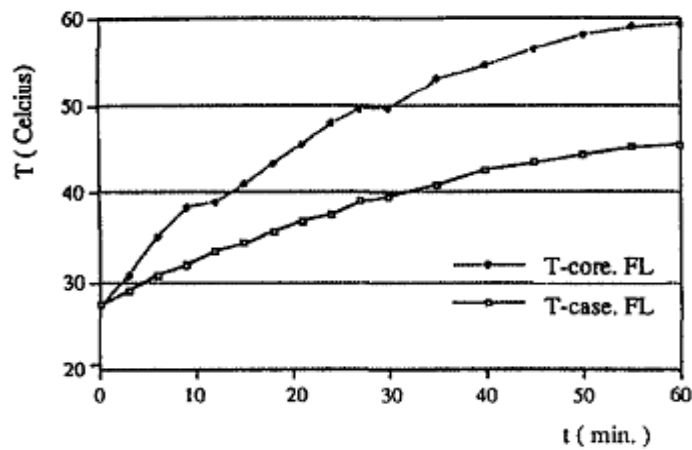


Hình 2.40. Đường hiệu suất của động cơ DSPM

Sự sụt giảm trong việc tạo ra momen xoắn ở tốc độ đánh giá được đi kèm với giảm hiệu quả với giá trị thiết kế. Các yếu tố gây ra sự khác biệt này có thể gồm 3 phần: các liên kết với điện cảm lớn, tổn thất không tải tương đối cao và quan trọng hơn sự tồn tại của sự phân tán đồng và tổn hao sắt do cắt mạch với tần số cao của dòng cuộn dây đó, tất nhiên, một tính năng vốn có của bất kỳ điều khiển vận hành từ khối chuyển đổi năng lượng vững chắc.

- Kiểm tra độ tăng nhiệt độ

Một thử nghiệm tăng nhiệt độ ở tốc độ đánh giá dưới một nửa tải ($I_{pk} = 4.25A$) cũng được thử nghiệm trên động cơ DSPM thử nghiệm. Nhiệt độ của vỏ máy, nam châm và lõi đo bằng cặp nhiệt Bamant 115, đo nhiệt độ trong khoảng thời gian 60 phút. Các đường cong nhiệt độ đối với vỏ máy và lõi sau đó được dự kiến tới điều kiện đầy tải bằng cách nhân nhiệt độ tăng lên bằng tỉ lệ tổn thất đầy tải đến tổn thất một phần, xác định thử nghiệm này là 1.69. Các dự báo đường cong nhiệt độ tăng cho đầy tải được thể hiện trong hình 2.41. Có vẻ sự gia tăng nhiệt độ là khá bình thường cho các máy trong phạm vi này.



Hình 2.41. Dự kiến nhiệt độ tăng khi động cơ đủ tải

Bảng 2.3 tóm tắt các chỉ số hiệu suất lớn của động cơ nguyên mẫu so với động cơ cảm ứng Marathon 1 mã lực. Chi tiết thiết kế của máy mẫu thử nghiệm (độ dày lõi, độ dày của răng, v..v) có thể tìm thấy trong[16]. Có thể thấy rằng , với chỉ 3/5 chiều dài dây của máy cảm ứng, động cơ hiện tại vẫn còn vượt quá các máy cảm ứng trong việc tạo ra momen xoắn, với hiệu quả cải thiện đáng kể.

Tỉ lệ momen xoắn đến quán tính của động cơ DSPM cũng rất ấn tượng được ghi trong bảng I. Để đánh giá đầy đủ tiềm năng của động cơ DSPM, hai thiết kế dự kiến khác cũng được bao gồm. Thiết kế I(DSPM-I) có cùng chiều dài dây như của các máy cảm ứng, được thể hiện để có thể tạo ra hai lần momen xoắn như tạo bởi các máy cảm ứng, đi kèm theo sự gia tăng hiệu quả hơn nữa.

| Bảng 2.3 Thực hiện so sánh giữa động cơ cảm ứng và động cơ DSPM | | | | |
|---|-------|-----------------|--------|---------|
| Động cơ DSPM | | Động cơ cảm ứng | DSPM-I | DSPM-II |
| Stator OD(mm) | 150. | 150. | 150. | 150. |
| Rãnh(mm) | 30 | 47.7 | 47.7 | 64 |
| Khe hở không khí(mm) | 0.50 | 0.30 | 0.50 | 0.50 |
| Chiều dài tổng thể(mm) | 48. | 82 | 66 | 82 |
| P_{cu-sta} (watts) | 72.2 | 114 | 90.5 | 109 |
| P_{loss} (watts) | 101.4 | 232 | 146 | 175 |
| Hiệu quả(%) | 90.5 | 75.0 | 91.1 | 91.5 |
| Momen xoắn(N-M) | 5.0 | 3.96 | 7.94 | 9.44 |
| % | 126 | 100 | 200 | 248 |
| Momen xoắn/dòng(%) | 134 | 100 | 134 | 134 |
| Momen xoắn/quán tính(%) | 554 | 100 | 554 | 554 |

Thiết kế II (DSPM-II) được thiết lập để có chiều dài tổng thể cùng(chiều dài hơn cuộn dây giới hạn) như của các máy cảm ứng, với tổng chiều dài dây vượt quá của các máy cảm ứng. Sau đó động cơ DSPM có thể cung cấp khoảng 2.5 lần so với momen xoắn và năng lượng của các máy cảm ứng nằm trong cùng kích thước khung hình.

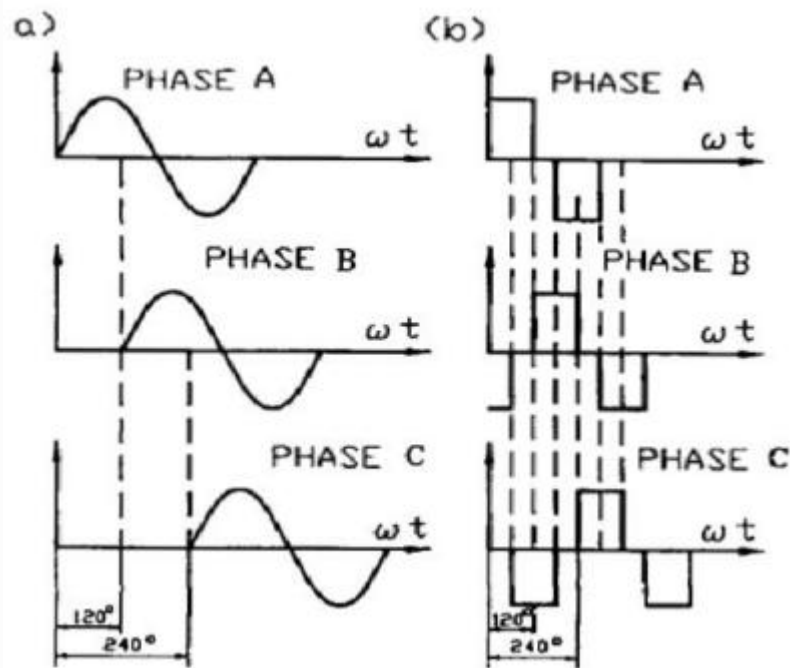
CHƯƠNG 3.

ĐIỀU KHIỂN - ĐÁNH GIÁ – ỨNG DỤNG ĐỘNG CƠ MỘT CHIỀU KHÔNG CHỖI THAN

3.1. ĐIỀU KHIỂN

3.1.1. Đặc điểm bộ điều khiển

Giống với các loại động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu thông thường, động cơ BLDC cũng sử dụng nguồn điện 3 pha để tạo từ trường quay. Tuy nhiên động cơ BLDC sử dụng dòng điện một chiều được điều khiển bằng các khóa công suất để tạo điện áp DC 3 pha lệch nhau 120° để hoạt động, do đó nó có tên gọi động cơ DC không chổi than. Giả đồ dòng điện áp một chiều ba pha và xoay chiều 3 pha như sau:



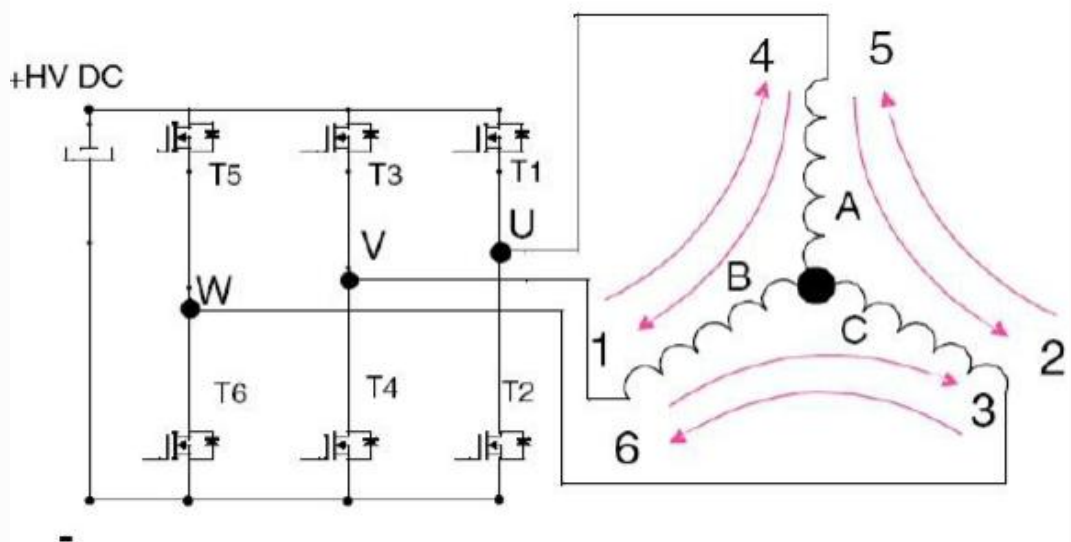
Hình 3.1. Giả đồ so sánh dạng sóng sin ba pha và DC ba pha:

(a): sóng sin

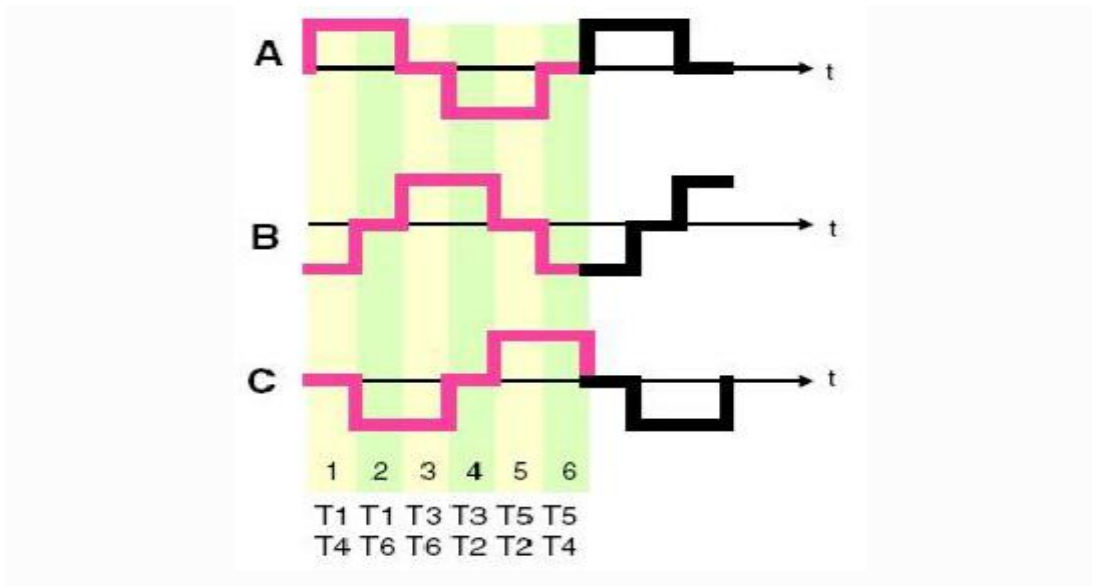
(b): sóng DC

Động cơ BLDC hoạt động trên nguyên tắc xác định vị trí rotor và điều khiển dòng điện phần ứng cho phù hợp với vị trí đó. Do đó động cơ BLDC hoạt động phải có thiết bị xác định vị trí rotor như Encoder hoặc cảm biến từ trường Hall. Cảm biến này sẽ gửi tín hiệu vị trí rotor về bộ điều khiển để đóng ngắt dòng điện DC chạy qua các cuộn dây của các pha tương ứng với vị trí của rotor lúc đó. Đây là một trong những nhược điểm về hoạt động và điều khiển của động cơ BLDC. Tuy nhiên với nguyên tắc hoạt động như vậy ta có thể dễ dàng điều khiển vận tốc và vị trí của động cơ.

Động cơ BLDC được điều khiển bằng một bộ điều khiển tương ứng. Bộ điều khiển này cấu tạo giống như một bộ nghịch lưu ba pha thông thường tuy nhiên dòng điện ra là dòng điện không đổi DC. Tại một thời điểm hoạt động bộ điều khiển chỉ cho dòng điện DC chạy qua hai cuộn dây của hai pha tương ứng với vị trí của rotor lúc đó. Đây là khác biệt giữa động cơ BLDC với các động cơ đồng bộ tương ứng.



Hình 3.2. Sơ đồ khóa và quá trình đóng cắt điều khiển động cơ BLDC



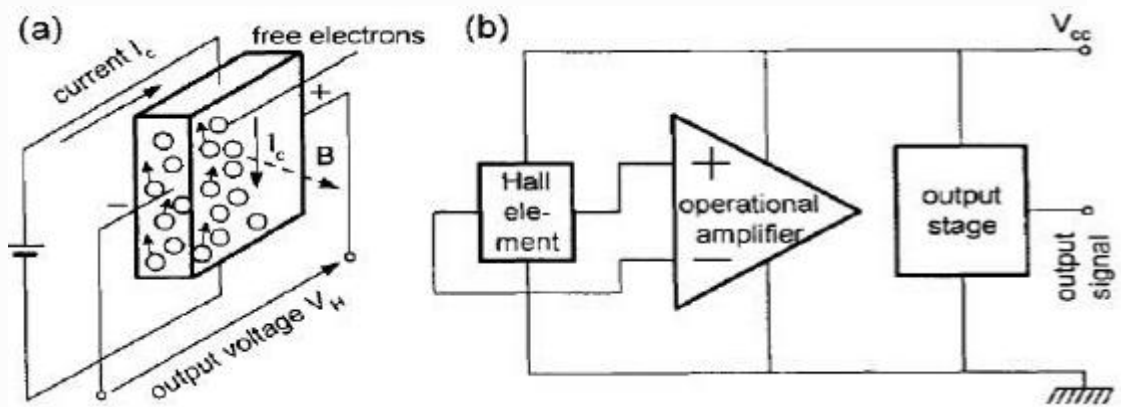
Hình 3.3. Biểu đồ dòng điện tương ứng ba pha của dây quấn stator

- Cảm biến vị trí rotor - Cảm biến Hall

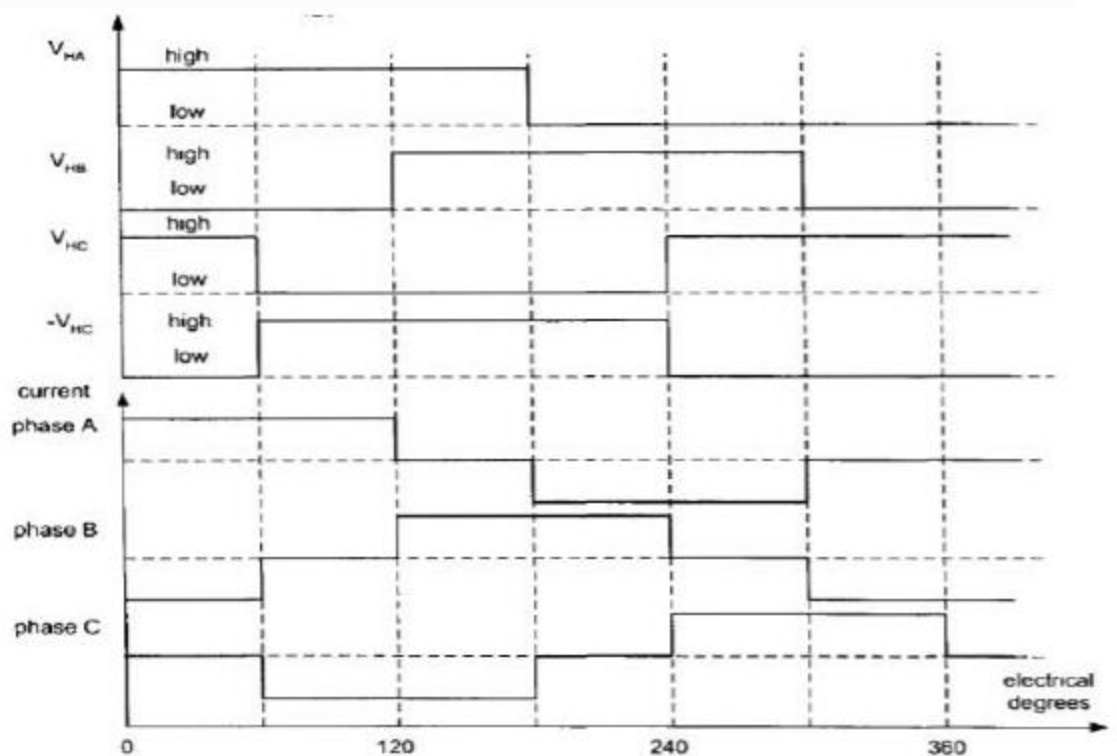
Để xác định vị trí rotor có thể dùng cảm biến Hall hoặc Encoder. Có thể đặt các phần tử cảm biến bên trong động cơ, trên đầu trục động cơ hay dùng cảm biến bên ngoài lắp vào trục động cơ.

Cảm biến hiệu ứng Hall (gọi tắt là cảm biến Hall) được dùng trong động cơ BLDC để xác định vị trí cực nam châm của rotor. Tín hiệu vị trí này là cơ sở để bộ điều khiển đóng cắt các khóa công suất cấp dòng DC cho cuộn dây stator tương ứng. Khi đặt cảm biến Hall trong vùng từ trường và có một dòng điện DC chạy qua thì sẽ có một điện áp sinh ra tại ngõ ra của cảm biến.

Sự phân cực xuất hiện khi cảm biến quét qua các nam châm của động cơ. Điện áp V sinh ra có dạng tuyến tính thay đổi theo góc lệch giữa cảm biến và từ trường. Chúng ta cần tín hiệu kỹ thuật số để điều khiển có dạng nhị phân 1/0 do đó cả cảm biến đều được chế tạo tích hợp trong một IC để dạng điện áp ra là dạng xung vuông. Các cảm biến Hall đặt trong động cơ lệch nhau một góc 120 độ điện hay 60 độ điện để xác định chính xác vị trí rotor để điều khiển tương ứng các pha của dòng điện phản ứng stator.



Hình 3.4. Tích hợp cảm biến Hall vào một IC.



Hình 3.5. Tín hiệu cảm biến Hall và dòng điện tương ứng các pha.

3.1.2. 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

khiến 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.

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

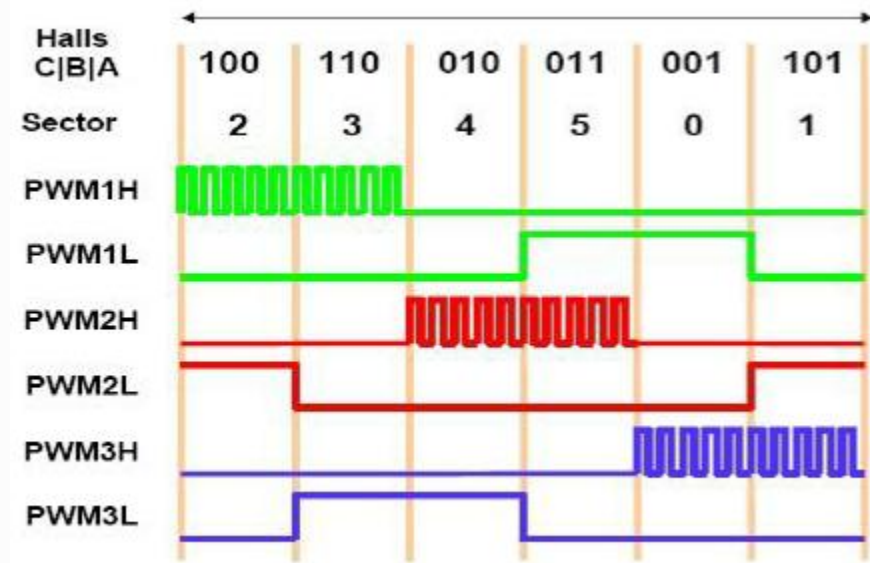
Phương pháp này được dựa trên nguyên lý hoạt động cơ bản của động cơ BLDC dùng tín hiệu đưa về từ cảm biến vị trí rotor để làm tín hiệu đóng ngắt dòng điện vào các cuộn dây tương ứng. Giải đồ xung kích và dòng điện đóng ngắt tương ứng thể hiện ở trong biểu đồ về "tín hiệu cảm biến Hall và dòng điện tương ứng các pha" ở trên.

- Điều khiển động cơ BLDC điện áp bằng cách điều chỉnh điện áp ngõ vào.

Đây là phương pháp điều khiển giống với điều khiển động cơ DC thông thường. Tốc độ động cơ được điều khiển bằng cách điều chỉnh điện áp DC cung cấp cho bộ khóa công suất. Điện áp ngõ vào được điều chỉnh sao cho tốc độ ngõ ra bám sát theo tốc độ đặt cho hệ thống. Để thay đổi chiều quay ta thay đổi các khóa công suất sao cho dòng điện chạy qua các cuộn dây các pha có chiều ngược lại. Trong phương pháp này các khóa bán dẫn chỉ có nhiệm vụ đóng hoặc cắt dòng điện qua nó.

- 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.

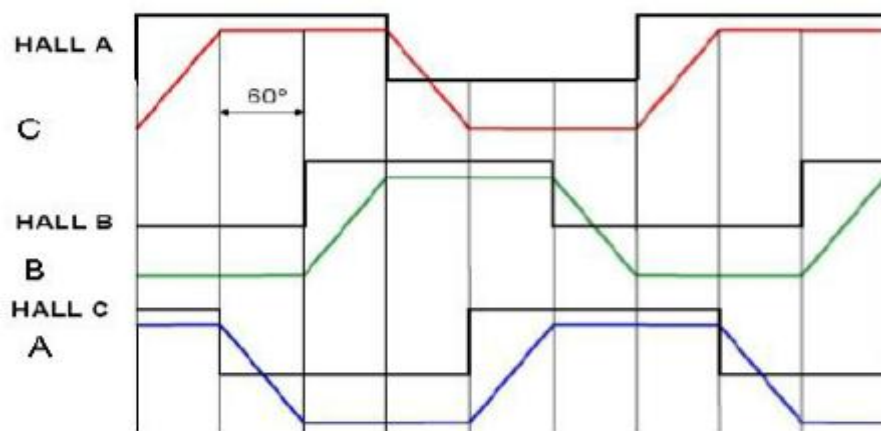


Hình 3.6. Giải đồ xung điều khiển PWM kênh trên

Trong khi điều chế PWM ta có thể điều khiển điện áp ra kiểu sóng hình thang hay kiểu sóng sin, do đó phương pháp này được chia thành hai kỹ thuật: kỹ thuật điện áp hình thang và kỹ thuật điện áp hình sin.

- Kỹ thuật điện áp hình thang

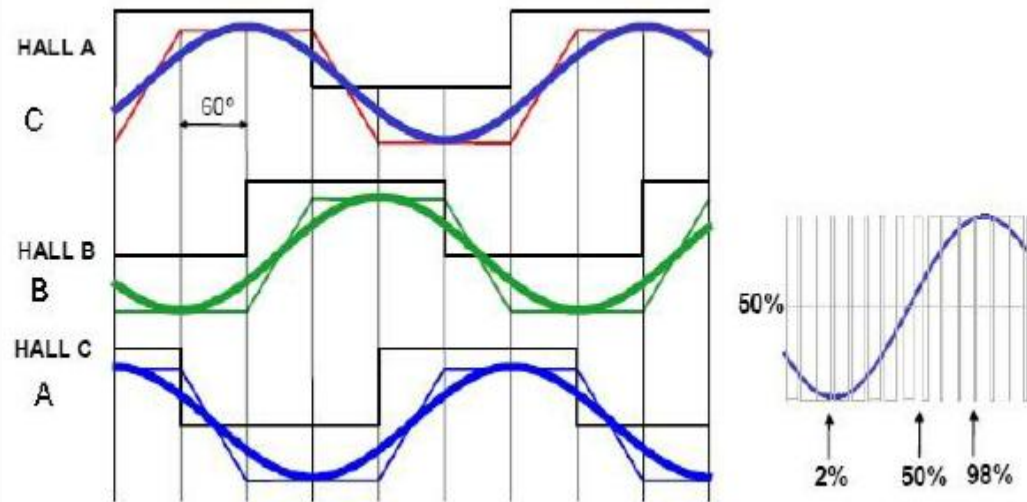
Đây là kỹ thuật cơ bản trong điều khiển động cơ BLDC và các IC chuyên dùng cũng áp dụng kỹ thuật này để điều khiển. Kỹ thuật này chỉ đòi hỏi các khóa đóng ngắt đồng bộ với cảm biến Hall theo tần số PWM nhất định.



Hình 3.7. Giải đồ điện áp hình thang tương ứng với cảm biến Hall.

- Kỹ thuật điện áp hình sin

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



Hình 3.8. Giảm độ điều chế điện áp hình sin.

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

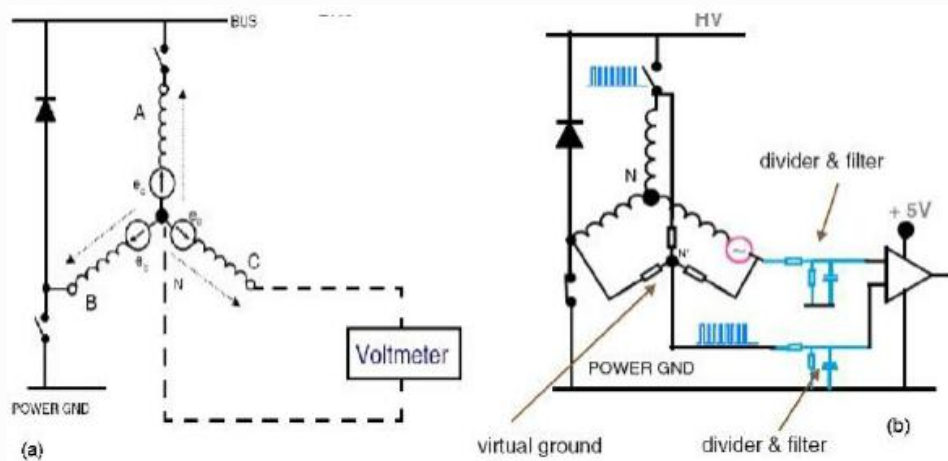
Đây là phương pháp sử dụng các ước lượng từ thông rotor để điều khiển các khóa đóng cắt thay cho cảm biến Hall truyền thống. Do đó phương pháp này được gọi là phương pháp điều khiển không cảm biến (sensorless control). Cơ sở chính của điều khiển không cảm biến đối với động cơ BLDC là dựa vào thời điểm qua zero của sức điện động 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. Trong đề tài chỉ nói đề cập đến phương pháp này.

- Hai là ước lượng vị trí dùng các thông số của động cơ, các giá trị điện áp và dòng điện trên động cơ. Phương pháp này đòi hỏi phải tính toán phức tạp để tính toán các thông số. 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 zero của sức điện động đòi chúng ta tạo ra một điểm trung tính để có thể đo và bắt điểm qua zero của sức điện động. 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. Để lấy tín hiệu chuẩn ta cần mạch lọc nhiễu cho cảm biến, điều này gây trì hoãn không cần thiết cho tín hiệu cảm biến.

Đặc biệt là lúc động cơ khởi động tín hiệu nhận được rất nhỏ dẫn đến điều khiển không chính xác. Do vậy phương pháp này chỉ áp dụng trong phạm vi tốc độ hạn chế và có đặc tính khởi động nhỏ.



Hình 3.9. Đo điện áp cảm ứng bằng điểm trung tính.

(a):điểm trung tính thật

(b):điểm trung tính ảo.

3.2. ƯU-NHUỢC ĐIỂM CHUNG CỦA ĐỘNG CƠ MỘT CHIỀU KHÔNG CHỖI THAN

3.2.1. Ưu điểm

Động cơ DC không chổi than BLDC (Brushless DC motor) có các ưu điểm của động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu như: tỷ lệ momen/quán tính lớn, tỷ lệ công suất trên khối lượng cao.

Do máy được kích từ bằng nam châm vĩnh cửu nên giảm tổn hao đồng và sắt trên rotor hiệu suất động cơ cao hơn.

Động cơ kích từ nam châm vĩnh cửu không cần chổi than và vành trượt nên không tốn chi phí bảo trì chổi than. Ta cũng có thể thay đổi đặc tính động cơ bằng cách thay đổi đặc tính của nam châm kích từ và cách bố trí nam châm trên rotor.

Một số đặc tính nổi bật của động cơ BLDC khi hoạt động:

- Mật độ từ thông khe hở không khí lớn.
- Tỷ lệ công suất/khối lượng máy điện cao.
- Tỷ lệ momen/quán tính lớn (có thể tăng tốc nhanh).
- Vận hành nhẹ nhàng (dao động của momen nhỏ) thậm chí ở tốc độ thấp (để đạt được điều khiển vị trí một cách chính xác).
- Mômen điều khiển được ở vị trí bằng không.
- Vận hành ở tốc độ cao.
- Có thể tăng tốc và giảm tốc trong thời gian ngắn.
- Hiệu suất cao.
- Kết cấu gọn.

3.2.2. Nhược điểm

Do động cơ được kích từ bằng nam châm vĩnh cửu nên khi chế tạo giá thành cao do nam châm vĩnh cửu khá cao nhưng với sự phát triển công nghệ hiện nay thì giá thành nam châm có thể giảm.

Động cơ BLDC được điều khiển bằng một bộ điều khiển với điện ngõ ra dạng xung vuông và cảm biến Hall được đặt bên trong động cơ để xác định vị trí rotor. Điều này làm tăng giá thành đầu tư khi sử dụng động cơ BLDC. Tuy nhiên điều này cho phép điều khiển tốc độ và mômen động cơ dễ dàng, chính xác hơn.

Nếu dùng các loại nam châm sắt từ chúng dễ từ hóa nhưng khả năng tích từ không cao, dễ bị khử từ và đặc tính từ của nam châm bị giảm khi tăng nhiệt độ. Nhưng với loại nam châm hiếm như hiện nay thì nhược điểm này đã được cải thiện đáng kể.

3.2.3. Ưu điểm của động cơ SRM

Với cấu trúc đơn giản, có cực cả hai phía, Rotor không cần có thành phần kích thích, SRM có một số ưu điểm sau:

- Đặc tính làm việc: Momen khởi động lớn hơn nhiều so với các loại động cơ không đồng bộ. Do yêu cầu dòng điện chảy vào các cuộn dây Stator theo một chiều duy nhất giúp cho mạch công suất có cấu tạo đơn giản và tin cậy

- Kích thước nhỏ hơn đáng kể so với các loại động cơ khác, điều này tăng hiệu quả sử dụng vật liệu, giảm giá thành và quán tính của hệ truyền động cũng nhờ thế mà giảm thiểu đáng kể.

- Với cấu tạo đơn giản và kích thước nhỏ gọn, giá thành của hệ truyền động sử dụng SRM cũng thấp hơn so với các hệ truyền động sử dụng các loại động cơ khác, và theo đó sẽ giảm được giá thành vật liệu, giảm chi phí sản xuất, vận hành và bảo dưỡng hệ thống.

- Tốc độ lớn và khả năng gia tốc nhanh, theo tính toán thì với những bộ điều khiển chất lượng cao, SRM có thể đạt được tốc độ tối đa tới 50.000 vòng/phút.

- Do chỉ cấp điện phía stator nên việc làm mát đối với SRM là vô cùng đơn giản, vì vậy mà SRM có thể làm việc tốt trong các môi trường khắc nghiệt.

- Động cơ từ kháng có thể được cấp nguồn bằng cách đóng vào nguồn xoay chiều một pha hoặc ba pha, hoặc có thể đóng ngắt nguồn một chiều một cách độc lập và tuần tự và các cuộn dây pha Stator, việc sử dụng phương pháp đóng ngắt nguồn một chiều một cách độc lập và tuần tự vào từng cặp dây pha làm giảm 50% số lượng các phần tử chuyển mạch công suất so với các bộ nghịch lưu điều khiển cầu trong các bộ điều khiển tốc độ SRM.

- Một hệ truyền động sử dụng SRM vốn sẵn có tính ổn định cao và vẫn có thể hoạt động khi hệ truyền động gặp lỗi, SRM có thể hoạt động trong chế độ “limp-home” bằng cách thu nhỏ đặc tính làm việc khi một van công suất bị hỏng. Điều này khác hoàn toàn so với các hệ truyền động sử dụng động cơ khác.

3.3. ỨNG DỤNG CỦA ĐỘNG CƠ MỘT CHIỀU KHÔNG CHỖI THAN

- Các hệ truyền động đặc biệt như: Máy nén khí, quạt gió, máy bơm li tâm(do đòi hỏi tốc độ quay lớn).

- Các hệ truyền động khác như: Chế biến thức ăn, máy giặt, máy hút bụi(đòi hỏi tính bền vững, ít phải bảo dưỡng).

- Các hệ cơ điện tử(đòi hỏi kích thước nhỏ do không chứa thành phần kích thích)

- Các ứng dụng giao thông vận tải(đòi hỏi momen khởi động lớn).

- Các ứng dụng trong ngành hàng không(đòi hỏi không phát sinh tia lửa điện, ít phải bảo dưỡng, cần tốc độ quay lớn).

- Đặc biệt là trong ô tô , ứng dụng làm động cơ với tính bền bỉ cao hoạt động trong dải tốc độ rộng và chi phí bảo trì thấp.

KẾT LUẬN

Sau 3 tháng nghiên cứu và thực hiện đề tài, đồ án đã thực hiện được những nội dung sau:

- Tìm hiểu tổng quan về các loại động cơ một chiều
- Tìm hiểu cấu tạo nguyên lý hoạt động của động cơ một chiều không chổi than
- Vấn đề điều khiển và đánh giá ưu-nhược điểm, ứng dụng của động cơ một chiều không chổi than

Tuy nhiên do kinh nghiệm và khả năng bản thân còn hạn chế khi thực hiện đồ án nên quyển đồ án này chắc hẳn không tránh khỏi những khuyết điểm và thiếu sót. Những thông tin và tài liệu về nội dung đồ án còn hạn chế, tuy vậy đây là một vấn đề mới đang nghiên cứu, nó là một xu hướng phát triển trong tương lai không xa và thực tế, hy vọng trong thời gian tới nhiều kết quả nghiên cứu, nhiều thông tin về việc này sẽ được công bố.

Em xin trân thành cảm ơn thầy !

Hải Phòng ,ngày...tháng...năm...2013

Sinh viên

Đỗ Trung Kiên

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. K. T. Chau, Member, IEEE, J. Z. Jiang, and Yong Wang, Student Member, IEEE, (SEPTEMBER 2003) **A Novel Stator Doubly Fed Doubly Salient .**
2. Rajesh P. Deodhar, Student Member, IEEE, Svante Andersson, Ion Boldea, Fellow, IEEE and Timothy J. E. Miller, Fellow, IEEE, (JULY/AUGUST 1997) **The Flux-Reversal Machine: A New Brushless Doubly-Salient Permanent-Magnet Machine.**
3. Yuefeng Liao, Member, IEEE, Feng Liang, Member, IEEE, and Thomas A. Lipo, Fellow, IEEE, (SEPTEMBER/OCTOBER 1995) **A Novel Permanent Magnet Motor with Doubly Salient Structure.**
4. TRANG TÌM KIẾM TÀI LIỆU <https://www.google.com.vn>
5. TÀI LIỆU ĐIỆN TỬ **WIKI PEDIA**(Tiếng Việt)
6. DIỄN ĐÀN <http://diendanxedapdien.hkbike.com.vn>
7. DIỄN ĐÀN <http://baohuy.wordpress.com>