



دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر
گروه قدرت

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق - قدرت

عنوان

کنترل گشتاور موتورهای سنکرون مغناطیس
دائم با بهبود کنترل جریان پیشگویانه

استادان راهنما

دکتر محمدباقر بناء شریفیان
دکتر محمدرضا فیضی

استاد مشاور

دکتر سید حسین حسینی

پژوهشگر

ترانه هریرچی

مهر ماه 1387

نام خانوادگی دانشجو: هریزچی قدیم

نام: ترانه

عنوان پایان نامه: کنترل گشتاور موتور های سنکرون مغناطیس دائم با بهبود کنترل جریان پیشگویانه

استاد راهنما: دکتر محمدباقر بناء شریفیان - دکتر محمد رضا فیضی
استاد مشاور: دکتر سید حسین حسینی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: برق گرایش: قدرت دانشگاه: دانشگاه تبریز
دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر تاریخ فارغ التحصیلی: 1387/07/22 تعداد صفحه: 92

کلیدواژه ها: موتور سنکرون مغناطیس دائم- کنترل جریان پیشگویانه- کنترل برداری- مدولاسیون پهنای پالس فضای برداری
فرکانس ثابت کلید زنی

چکیده

موتور های سنکرون مغناطیس دائم (PMSM)، به دلیل مزیت هایی از جمله عدم نیاز به تغذیه میدان و همچنین پاسخ سریع گشتاور در محدوده وسیعی از سرعت به عنوان یکی از آلترناتیو های صنعت در بهره گیری از موتور های سنکرون بشمار می آیند. در مبحث کنترل گشتاور PMSM، کنترل و ردگیری دقیق جریان مرجع مورد نیاز، به روش هایی نظیر کنترل جریان هیستریزس و مدولاسیون پهنای باند و کنترل جریان پیشگویانه به لحاظ دقت مناسب در عملکرد کنترلی و دیگر مزایا، طیف وسیعی از پژوهش های انجام شده را به خود اختصاص داده است. در این میان کنترل جریان پیشگویانه به لحاظ فرکانس کلیدزنی ثابتی که در اینورتر منبع ولتاژ ایجاد می نماید از جایگاه مناسبی برخوردار است.

در این پایان نامه ضمن بررسی روشهای کنترلی متداول با توجه به اینکه روش کنترل برداری (FOC) یک روش رایج و قدرتمند در زمینه درایو ماشین PMSM می باشد، کنترلر بهینه ای با ترکیب مدولاسیون بردار فضائی- کنترل برداری (FOC-SVM) با کنترل جریانی بر مبنای کنترل جریان پیشگویانه ارائه شده که منجر به بهبود کارائی سیستم در ردگیری دقیق جریان مرجع می شود.

با محاسبه جریان رفرنس از طریق تخمین گشتاور الکتریکی مطلوب بر مبنای کنترل برداری و تخمین جریان استاتور به روش پیشگویانه، بردار مناسب ولتاژ اینورتر تغذیه کننده به کمک الگوی سوئیچینگ بر مبنای مدولاسیون بردارهای فضائی، انتخاب می گردد تا گشتاور مکانیکی را در یک سرعت مرجع دنبال کند.

نتایج حاصل از شبیه سازی ها نشان می دهد که کنترلر ارائه شده ضمن تثبیت فرکانس سوئیچ زنی، منجر شده که رپل جریان خروجی بهبود یافته و به مقدار ناچیزی محدود شود. کاهش خطای سرعت، پاسخ گذرای سریع در برابر تغییر ناگهانی بار، جریان هارمونیک پایین، گشتاور و سرعت قابل تنظیم با خطای کم از دیگر ویژگی های کنترلر معرفی شده می باشد.

i.....	فهرست مطالب
ii.....	فهرست شکلها و جداول.....
1.....	مقدمه

فصل اول: بررسی منابع

3.....	1-1- مروری بر پژوهشهای پیشین در زمینه کنترل ماشینهای سنکرون مغناطیس دائم (PMSM)
6.....	1-2- طبقه بندی ماشینهای سنکرون
7.....	1-3- جایگاه ماشینهای PMSM
8.....	1-4- ساختار PMSM
8.....	1-4-1- استاتور
8.....	1-4-2- سنسورها
8.....	1-4-3- روتور
9.....	1-4-4- نصب مغناطیس دائم بر روی روتور
10.....	1-4-5- مواد مغناطیس دائم و مشخصه های آنها.....
11.....	1-5- مدل PMSM.....
13.....	1-5-1- موج mmf دوار.....
15.....	1-5-2- معادلات ولتاژ در قاب مرجع abc
16.....	1-5-3- ماتریس اندوکتانس L_s
16.....	1-5-3-1- اندوکتانس خودی.....
18.....	1-5-3-2- اندوکتانس متقابل.....
20.....	1-5-3-3- مغناطیس دائم
20.....	1-5-4- گشتاور الکترومغناطیسی
21.....	1-5-5- انتقال معادلات به قاب مرجع dqo.....
23.....	1-5-5-1- معادلات ولتاژ.....
25.....	1-5-5-2- معادله گشتاور.....
27.....	1-6- روشهای مدولاسیون و کنترل اینورتر منبع ولتاژ
27.....	1-6-1- مقدمه
28.....	1-6-2- مدولاسیون پهنای پالس سینوسی (SPWM).....
31.....	1-6-2-1- PWM با سوئیچینگ دو قطبی
33.....	1-6-2-2- PWM با سوئیچینگ تک قطبی
34.....	1-6-3- مدولاسیون پهنای پالس فضای برداری (SVPWM).....
37.....	1-6-4- کنترل مدولاسیون پهنای پالس هیستریزس.....

- 39.....1-4-6-1- کنترل جریان باند هیستریزیس با کلیدزنی دو قطبی.....
- 41.....2-4-6-1- کنترل جریان باند هیستریزیس با کلیدزنی تک قطبی.....
- 42.....5-6-1- کنترل جریان پیشگویانه (Predictive Current Control).....
- 43.....1-5-6-1- کنترل جریان پیشگویانه اینورتر تکفاز.....
- 45.....2-5-6-1- کنترل جریان پیشگویانه اینورتر سه فاز.....

فصل دوم: مبانی و روشها

- 48.....1-2- برخی روش های معمول در کنترل موتورهای سنکرون مغناطیس دائم.....
- 48.....1-1-2- مقدمه.....
- 49.....2-1-2- کنترل اسکالر.....
- 52.....3-1-2- کنترل گشتاور مستقیم (DTC).....
- 54.....1-3-1-2- ترکیب DTC و مدولاسیون بردار فضایی (DTC-SVM).....
- 55.....2-3-1-2- ترکیب DTC با مدولاسیون بردار فضایی گسسته (DTC-DSVM).....
- 58.....4-1-2- کنترل برداری (FOC).....
- 60.....2-2- کنترل برداری PMSM با روشهای کلاسیک.....
- 60.....1-2-2- مقدمه.....
- 61.....1-2-2- کنترل جریان هیستریزیس.....
- 62.....2-2-2- کنترل جریان PWM.....
- 63.....3-2-2- کنترل جریان پیشگویانه.....
- 63.....4-2-2- شبیه سازی درایو PMSM به روشهای کلاسیک.....
- 70.....3-2- روش پیشنهادی.....
- 71.....1-3-2- پیاده سازی کنترلر پیشنهادی.....
- 72.....2-3-2- کنترل برداری از منظری دیگر.....
- 73.....3-3-2- کنترل مبتنی بر FOC و SVM.....

فصل سوم: نتایج و بحث

- 79.....1-3- نتایج شبیه سازی کنترلر پیشنهادی.....
- 85.....2-3- نتایج پایان نامه.....
- 86.....3-3- پیشنهادات.....
- 87.....مراجع.....

فهرست شکلها

- شکل (1-1) - موتور سنکرون با مغناطیس دائم بر سطح خارجی روتور..... 9
- شکل (2-1) - موتور سنکرون با مغناطیس دائم بر سطح داخلی روتور..... 9
- شکل (3-1) - منحنی های مغناطیس شونده برای مواد مغناطیس دائم..... 11
- شکل (4-1) - شکل ساده شده موتور مغناطیس دائم..... 12
- شکل (5-1) - میدان B سیم پیچ های متمرکز شده در گستره π رادیان..... 13
- شکل (6-1) - میدان مغناطیسی سیم پیچ های توزیع شده و مولفه فرکانس اصلی..... 13
- شکل (7-1) - شماتیک مدولاسیون پهنای پالس سینوسی..... 29
- شکل (8-1) - تولید ولتاژ مرجع با استفاده از حلقه کنترل جریان اضافی..... 29
- شکل (9-1) - (الف) - اینورتر سه فاز منبع ولتاژ پل (ب) مبنای تولید PWM سینوسی سه فاز..... 30
- شکل (10-1) - اینورتر تکفاز منبع ولتاژ پل..... 31
- شکل (11-1) - PWM با سوئیچینگ دو قطبی ولتاژ (تکفاز)..... 32
- شکل (12-1) - PWM با سوئیچینگ تک قطبی ولتاژ (تکفاز)..... 33
- شکل (13-1) - نمایش اینورتر منبع ولتاژ سه فاز با سوئیچهای دو وضعیت..... 35
- شکل (14-1) - بردارهای کلیدزنی و sector های شش گانه اینورتر منبع ولتاژ سه فاز..... 35
- شکل (15-1) - مدولاسیون بردار فضایی..... 36
- شکل (16-1) - کنترل جریان هیستریزس، شماتیک حالت های کلیدزنی..... 38
- شکل (17-1) - کنترل جریان باند هیستریزس با کلیدزنی دو قطبی..... 40
- شکل (18-1) - کنترل جریان باند هیستریزس با کلیدزنی تک قطبی..... 41
- شکل (19-1) - کنترل جریان پیشگویانه با فرکانس کلیدزنی ثابت..... 42
- شکل (20-1) - اینورتر پل تکفاز با بار غیر خطی..... 43
- شکل (21-1) - نحوه ردیابی جریان مرجع در یک پریود T..... 44
- شکل (22-1) - اینورتر پل سه فاز با بار غیر خطی..... 45
- شکل (23-1) - جریان بار و ولتاژ خروجی اینورتر با 20 نمونه برداری در یک سیکل جریان مرجع با کنترل جریان پیشگویانه..... 47
- شکل (24-1) - جریان بار و ولتاژ خروجی اینورتر با 100 نمونه برداری در یک سیکل جریان مرجع با کنترل جریان پیشگویانه..... 47
- شکل (1-2) - روش های کنترلی معمول در PMSM..... 50
- شکل (2-2) - ولتاژ استاتور بر حسب فرکانس..... 50
- شکل (3-2) - بلوک دیاگرام کنترل اسکالر..... 50
- شکل (4-2) - دیاگرام فازوری جریانها و فلوهای ماشین در محورهای dq..... 51
- شکل (5-2) - بلوک دیاگرام DTC..... 52
- شکل (6-2) - بردار فضایی ولتاژ در یک مبدل سه فاز محرکه موتور ac..... 54
- شکل (7-2) - بردارهای ولتاژ با تقسیم زمان نمونه برداری به سه مدت زمانی برابر..... 57
- شکل (8-2) - مقایسه گر هیستریزس گشتاور پنج سطحی..... 57
- شکل (9-2) - بردار جریان استاتور..... 59
- شکل (10-2) - کنترل جریان هیستریزس..... 61

- شکل (2-11)- کنترل جریان PWM 62
- شکل (2-12)- کنترل جریان پیشگویانه 63
- شکل (2-13)- مدل نمونه ای شبیه سازی کنترل PMSM با روش سوئیچینگ PWM 64
- شکل (2-14)- مدل نمونه ای شبیه سازی کنترل PMSM با روش سوئیچینگ هیستریزس 64
- شکل (2-15)- مدل نمونه ای شبیه سازی کنترل PMSM با روش سوئیچینگ پیشگویانه 64
- شکل (2-16)- کنترل گشتاور PMSM با روش سوئیچینگ PWM 65
- شکل (2-17)- کنترل گشتاور PMSM با روش سوئیچینگ هیستریزس 66
- شکل (2-18)- کنترل گشتاور PMSM با روش سوئیچینگ پیشگویانه 66
- شکل (2-19)- ریپل گشتاور در سه روش سوئیچینگ مذکور در حالت دائم 67
- شکل (2-20)- سرعت کنترل شده PMSM با روش سوئیچینگ پیشگویانه 66
- شکل (2-21)- (الف) شکل موج جریان سه فاز تزریقی به PMSM با روش سوئیچینگ PWM (ب) THD جریان 68
- شکل (2-22)- (الف) شکل موج جریان سه فاز تزریقی به PMSM با روش سوئیچینگ هیستریزس (ب) THD جریان 69
- شکل (2-23)- (الف) شکل موج جریان سه فاز تزریقی به PMSM با روش سوئیچینگ پیشگویانه (ب) THD جریان 70
- شکل (2-24)- بلوک دیاگرام کنترلر پیشنهادی درایو موتور سنکرون مغناطیس دائم 71
- شکل (2-25)- فضاهای برداری در مختصات ab 72
- شکل (2-26)- روند سوئیچینگ بر حسب زاویه روتور و مقادیر Δi_q و Δi_d 77
- شکل (3-1)- پاسخ گشتاور درایو به تغییر ناگهانی گشتاور 80
- شکل (3-2)- پاسخ سرعت درایو به تغییر ناگهانی گشتاور 81
- شکل (3-3)- زاویه روتور 82
- شکل (3-4)- شار استاتور در مختصات $a-b$ 82
- شکل (3-5)- (الف) شکل موج جریان سه فاز تزریقی به PMSM با روش سوئیچینگ پیشنهادی (ب) THD جریان 83
- شکل (3-6)- ولتاژ مربعی پایانه موتور در فاز A 83
- شکل (3-7)- تغییر بردار های سوئیچینگ در یک پنجره 6 میلی ثانیه ای 84

فهرست جداول

- جدول (1-1)- حالت های مختلف سوئیچینگ در مدولاسیون تک قطبی 34
- جدول (1-2)- چگونگی انتخاب بردار فضائی ولتاژ مورد نیاز DTC 55
- جدول (2-2)- افزایش و کاهش جریان در اثر بردار کلیدزنی انتخاب شده 73
- جدول (3-2)- الگوی انتخاب بردار سوئیچینگ 77
- جدول (1-3)- پارامترهای شبیه سازی 79

مقدمه

موتورهای سنکرون مغناطیس دائم ($PMSM^1$) بر اساس ساختار روتور بدون سیم‌پیچی و در نتیجه حذف جاروبکهای تغذیه میدان، و پیشرفت روزافزون در زمینه‌های مواد مغناطیسی و تئوریهای کنترل، از جمله ماشینهای سنکرون نسل جدید رنج توانهای کم الی متوسط مورد استفاده در صنعت بشمار می‌آیند که دارای پاسخ سریع گشتاور در محدوده وسیعی از سرعت می‌باشند. تحقیقات در زمینه این ماشینها در سه حوزه مختلف صورت می‌گیرد.

1) طراحی موتور، که فعالیت‌هایی از قبیل تعیین تعداد قطب‌های استاتور و روتور، تعیین تعداد فازهای موتور، انتخاب جنس مواد به کار رفته، طراحی شکل هندسی موتور و طراحی نحوه سیم‌پیچی استاتور از این جمله اند.

2) مبدل قدرت، که انتخاب ساختار مبدل، انتخاب ادوات کلیدزنی و دیودهای مورد استفاده و انتخاب الگوریتم مناسب جهت کنترل آن، از جمله این موارد هستند.

3) استراتژی کنترل، قبل از طراحی الگوریتم مورد استفاده، ابتدا باید استراتژی کنترل مورد توجه قرار گیرد. اینکه کنترل بر روی جریان استاتور، فلوی پیوندی استاتور و یا مستقیماً بر روی گشتاور خروجی موتور و یا مورد دیگری اعمال خواهد شد، مشخص کننده نوع الگوریتم کنترل است. مباحث مطرح در این پایان نامه در حوزه بندهای دوم و سوم می‌گنجد.

در مورد کنترل گشتاور $PMSM$ ، کنترل و ردگیری دقیق جریان مرجع مورد نیاز حائز اهمیت فراوانی است و روش‌های متعددی جهت کنترل جریان اینورتر مطرح شده اند که از میان آنها، روش‌های کنترل جریان باند هیستریزس و روش PWM ، به دلیل سادگی و عملکرد مطلوب، به صورت گسترده مورد توجه قرار گرفته‌اند. بعنوان نمونه، کنترل جریان باند هیستریزس پیاده سازی آسان و دقت عملکرد قابل قبولی دارد.

¹Permanent Magnet Synchronous Motor

اما به علت در نظر گرفتن باند های ثابت برای محدوده تغییرات جریان بار نسبت به جریان مرجع، سوئیچینگ متغیر شده و در نتیجه تلفات سوئیچینگ بالا میشود.

تکنیک کنترل جریان پیشگویانه PCC^1 از جمله تکنیک های نوین مطرح شده در مبحث الکترونیک قدرت می باشد. مهم ترین مزیت این روش علاوه بر موارد ذکر شده در خصوص تکنیک هیستریزیس، فرکانس سوئیچینگ ثابت می باشد که نیازی به ثابت نمودن فرکانس سوئیچینگ با پیچیده نمودن سیستم کنترلی ندارد.

طبق بررسی های انجام یافته، هر دو روش FOC^2 و PCC^1 در درایو $PMSM$ عملکرد مناسبی دارند. همچنین روش SVM^3 عملکرد غیر قابل انکاری در کاربردهای الکترونیک قدرت مانند درایوهای الکتریکی دارد. بنابراین برای برخورداری از ظرفیت های FOC و SVM کنترلر بهینه ای مبتنی بر کنترل جریان پیشگویانه (سازگار با روشهای FOC و SVM) طراحی شده است که ضمن تثبیت فرکانس سوئیچینگ منجر به کنترل دقیق تر گشتاور $PMSM$ شده است.

پایان نامه حاضر شامل چهار فصل است. در مقدمه حاضر به کلیاتی در ارتباط با موضوع پایان نامه اشاره شده است. فصل اول با معرفی، مدلسازی و روشهای کنترلی مرسوم ماشینهای $PMSM$ ، مقدماتی برای درک بهتر روش پیشنهادی فراهم کرده است

در فصل دوم کنترل گشتاور این ماشینها بصورت برداری مطرح شده و با استفاده از نرم افزار **MATLAB** به شبیه سازی و بررسی عملکرد اعمال کنترلر های مبتنی بر کنترل جریان هیستریزیس، رگولاتور PI به همراه PWM ، کنترل پیشگویانه مرسوم و کنترلر پیشنهادی بر ماشین $PMSM$ پرداخته شده است. در فصل سوم مهمترین نتایج پژوهش و پیشنهاد هایی برای تکمیل و بهبود مباحث مطرح در فصلهای قبل را ارائه شده است. در ادامه مراجع مورد استفاده در متن پایان نامه آورده شده است.

¹Predictive Current Control

²Field Oriented Control

³Space Vector Modulation

1-1- مروری بر پژوهشهای پیشین در زمینه کنترل ماشینهای PMSM

در سالهای اخیر موتورهای سنکرون مغناطیس دائم (PMSM) شهرت روزافزونی در کاربردهای مختلف صنعتی کسب کرده اند [1]. علاوه بر این تحقیقات وسیعی در جهت کاهش ریپل گشتاور و هارمونیک ها در ماشینهای PMSM صورت گرفته است [2].

با توسعه شیوه های کنترلی ماشین های الکتریکی مخصوص، این ماشین ها کاربردهای مناسب صنعتی پیدا کرده اند. دو روش کنترل برداری و کنترل مستقیم گشتاور در صنعت بیشتر مورد استفاده قرار گرفته اند [3]. گرچه اساس کار این دو روش با هم متفاوتند، اما هدف هر دو روش یکی است. هدف آنها کنترل بهینه گشتاور و فلو برای واداشتن موتور به تعقیب دقیق مسیر مورد نظر می باشد. هر دو روش کنترلی در تولیدات صنعتی بسیار موفق عمل کرده اند [4].

در سال 1989 آقایان پیلای و کریشنان با صرف نظر کردن از سیم پیچ دمپر، سیستم درایو موتور را با کنترل میدان جهت دار (FOC) طراحی کردند [5].

FOC با کنترل جریان استاتور برای کار نرم موتور، ریپل گشتاور را کاهش می دهد. حامیان دو روش کنترل میدان جهت دار و کنترل مستقیم گشتاور ادعای برتری روش خودشان را در مقابل دیگری دارند.

تا بحال به این پرسش که کدامیک از دو روش بر دیگری برتری دارد، پاسخی داده نشده است [6]. معمولاً DTC در مقایسه با FOC بسیار کمتر تحت تاثیر تغییر پارامترها قرار می گیرد و در صورتی که گشتاور و فلو درست برآورد شوند، قادر است به طور سریع گشتاور و فلو را کنترل کند و با لحاظ کردن اغتشاشات و پارامتر های موتور، پایدار عمل کند [7].

ایده ترکیب مزایای DTC و PMSM ها در قالب یک درایو با قابلیت انعطاف بالا در مقالات بعد از سال 1990 پدیدار شد و در دهه گذشته تعدادی از محققان، روشهایی را برای تطبیق DTC با PMSM ها پیشنهاد داده اند [8-10].

آقایان قیاند و رحمان FOC را در PMSM گسترش داده و میکروپروسسوری را براساس FOC برای موتور PMSM معرفی کردند [11].

برخی تحقیقات نیز طرحی تغییر یافته از DTC با فرکانس سوئیچینگ ثابت و ریپل پایین گشتاور و فلو معرفی شده است [12-17].

اما با این نوع طراحی دو عدد رگلاتور PI برای کنترل گشتاور و فلو مورد نیاز است که باید به طور مناسبی تنظیم شوند برای کاهش ریپل گشتاور آقای سان. ال. ال یک الگوریتم بر پایه منطق فازی برای بهبود انتخاب بردار ولتاژها پیشنهاد داد [18].

چنانکه قبلاً ذکر شد، جریان و ریپل گشتاور بالا در DTC بخاطر حضور مقایسه کننده هیستریزس به همراه تعداد محدودی از بردارهای ولتاژ موجود است [19]. مرجع [20] نیز با استفاده از مدولاسیون بردار فضایی (SVM) ریپل گشتاور و فلور را به طور قابل توجهی کاهش داده است اخیراً از بین شیوه های متداول DTC یک روش جدید در مشارکت با بردار فضایی مدوله شده

(DTC-SVM) گسترش یافته است. در این روش جدید معایب DTC متداول حذف شده است.

اساساً DTC-SVM ها روش‌هایی هستند که بر اساس فرکانس سوئیچینگ ثابت کار می کنند. در مراجع [21,22] کنترل کننده های DTC-SVM یادشده به عنوان گزینه های مختلف برای کاهش ریپل در موتورهای القایی پیشنهاد می شوند. روش DTC-SVM با همان مزیت که برای موتور القایی دارد، در سالهای اخیر در درایو PMSM نیز به کار رفته است [23-25].

در پژوهشهای گسترده‌ای که در مبحث کنترل گشتاور موتور های سنکرون مغناطیس دائم بصورت کنترل برداری یا کنترل مستقیم گشتاور صورت پذیرفته است، روشهای مختلف کنترل جریان به لحاظ سادگی و قابلیت بالای عملکرد مورد توجه قرار گرفته‌اند [26-30]. کنترل گشتاور PMSM معمولاً با کنترل جریان صورت می گیرد و آن هم بر پایه تناسب گشتاور الکترومغناطیسی با جریان آرمیچر است [31]. به منظور ارتقاء کارایی این روش، کنترل جریان معمولاً در قاب مرجع dq روتور که

با سرعت سنکرون می چرخد، صورت می پذیرد. در این قاب، اندوکتانس‌های آرمیچر و فلوی پیوندی آهنربا به شرطی که EMF و تغییرات اندوکتانس‌ها سینوسی باشند، ثابتند [7].

مرجع [32] با روش هیستریزیس و مقایسه جریان موتور با جریان مرجع و کلیدزنی بر اساس تلورانس باند، این روش را برای کنترل جریان اینورتر منبع ولتاژ بکار برده و با کاهش مقدار تلورانس باند، اختلاف بین جریان بار و جریان مرجع را به حداقل رسانده است و به نتایجی دست یافته که بیانگر عدم توانایی روش مذکور در ارائه سیستم کنترل کلیدزنی با فرکانس ثابت و در نتیجه اینورتر با تلفات کلیدزنی بالا می‌باشند.

علیرغم اینکه فرکانس کلیدزنی متغیر، به عنوان راه حلی برای شناسایی و کاهش نویز مکانیکی موتور در مراجع [34,33] ارائه شده، ولی همچنان تلفات کلیدزنی اینورتر در توان بالا قابل چشم پوشی نیست. به منظور رفع مشکل فرکانس کلیدزنی متغیر، مراجع [35-37] با متغیر نمودن باند هیستریزیس، با ارائه روش‌های متنوعی تلفات کلیدزنی اینورتر را به حداقل رسانده‌اند.

مراجع [38,39]، با کنترل جریان به روش PWM و محاسبه خطای جریان توسط یک کنترل کننده، پاسخ‌های مناسب کلیدزنی را تعیین می‌کنند. ساده‌ترین کنترل کننده جریان، PI یا P می‌باشد. کنترل کننده‌های پیچیده‌تر، از روش‌های کنترل مدرن تطبیقی استفاده می‌کنند [40]. در برخی موارد نیز از روش‌های خطی‌سازی استفاده شده است که پیاده‌سازی آنها به DSP احتیاج دارد [41]. عیب این روش‌ها پیچیدگی و وابستگی آنها به پارامترهای ماشین می‌باشد.

روش کنترل جریان پیشگویانه PCC ، از دیگر روش‌هایی است که با فرکانس کلیدزنی ثابت و رپیل کم جریان مزیت‌هایی را بر روش‌های کنترلی یاد شده می‌افزاید [42-45]. در این روش با در اختیار داشتن جریان حالت فعلی اینورتر و جریان مرجع در حالت بعدی و همچنین ولتاژ پایانه اینورتر، سیکل کاری هر فاز، به منظور رسیدن جریان فعلی بار به جریان مرجع حالت بعدی تعیین و به عناصر بالا و پایین هر پایه اعمال می‌گردد. همچنین تکنیک کنترل جریان پیشگویانه در کاربرد کنترل گشتاور $PMSM$ نیز در مرجع [42] بررسی شده است. مرجع [43] با افزایش کارایی تکنیک کنترل

جریان پیشگویانه روشی را برای کاهش خطای جریان موجود بخاطر عدم دقت در پارامترهای سیستم و رفتار غیر ایده‌آل اینورتر پیشنهاد داده و اختلاف بین جریان واقعی موتور را با جریان مرجع آن کاهش داده است.

مراجع [45-47] روشی مبتنی بر کنترل جریان پیشگویانه بر روی اینورترهای منبع ولتاژ ارائه نموده که پاسخ دینامیکی سیستم کنترلی اینورتر را به نحو مطلوبی افزایش می‌دهد. طبق آنچه گفته شد هر دو روش FOC و PCC در درایو PMSM عملکرد مناسبی دارند. همچنین روش SVM عملکرد غیر قابل انکاری در کاربردهای الکترونیک قدرت مانند درایوهای الکترونیکی دارد.

بنابراین برای برخورداری از ظرفیت های FOC و SVM روش مبتنی بر کنترل جریان پیشگویانه (سازگار با روشهای FOC و SVM) برای تثبیت فرکانس سوئیچینگ و کاهش ریپل گشتاور پیشنهاد می‌شود. در روش پیشنهادی فرم $d-q$ معادلات موتور و روابط الکترومکانیکی PMSM برای تخمین جریان‌های مطلوب و بردار مناسب تثبیت سرعت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

1-2- طبقه بندی ماشینهای سنکرون

ماشینهای سنکرون سه فاز بطور وسیع برای تولید توان الکتریکی و نیز به منزله محرکه های الکتریکی بزرگ بکار می‌روند. روتور این ماشینها می‌تواند بصورت قطب برجسته یا قطب صاف باشد. از ساختار قطب برجسته در کاربردهای سرعت پایین که نسبت قطر به طول روتور برای امکان ازدیاد تعداد قطبها بزرگ انتخاب می‌شود، استفاده می‌گردد. چینش پی در پی قطبها و فاصله بین آنها سبب جهت دهی دلخواه مسیر شار مغناطیسی می‌گردد.

ساختار روتور صاف برای کاربردهای سرعت بالا مناسب است. چون نسبت قطر به طول روتور را می‌توان برای محدود کردن تنشهای مکانیکی ناشی از نیروهای گریز از مرکز کوچک گرفت.

روتور شامل سیم پیچی میدان است که توسط جریان مستقیم تغذیه می‌شود. اما اغلب برای نشان دادن سیم بندی میراکننده و آثار جریانهای فوکو جاری در هسته آهنی قطبهای روتور سیم پیچی دمپر نیز لحاظ می‌شود [62]:

تحریک DC سیم‌بندی میدان ماشین را می‌توان با مغناطیس دائم فراهم آورد. بنابراین می‌توانیم روتور ماشینهای سنکرون را با توجه به روتورشان به دو دسته تقسیم‌بندی کنیم [31]:

الف) ماشینهای سنکرون با سیم پیچی تحریک یا *Electric Excited Synchronous Machines*

ب) ماشینهای سنکرون مغناطیس دائم یا *(PMSM) Permanent Magnet Synchronous Motor*

1-3- جایگاه ماشینهای PMSM

موتورهای PMSM ضعیفتر از ماشینهای سنکرون معمولی بوده و محدوده قدرتشان 5KW تا 30KW می‌باشد. جایگزینی سیم‌پیچ با مغناطیس دائم و حذف تلفات اهمی مهمترین مزیت این موتورها محسوب می‌شود. همچنین دارای ساختار ساده تر، وزن و حجم کمتر بوده و به دلیل کاهش تلفات بازده بالاتری دارند. موتوری که با اینورتر تغذیه می‌شود، چون فرکانس منبع می‌تواند با سرعت روتور سنکرون شود، برای راه اندازی نیازی به داشتن قفس سنجابی در روتور نخواهد داشت. معایب این موتورها هزینه بالای مواد مغناطیس دائم (بجز فریت‌ها) و تغییر مشخصات مغناطیس با زمان می‌باشد [62].

این موتورها از نظر نوع تغذیه ی سیم پیچ استاتورشان به دو دسته تقسیم می‌شوند [61]:

الف) موتورهای تغذیه شده با جریانهایی به شکل موجهای شبه مربعی که توزیع چگالی فلوی دوزنقه ای شکل در فاصله هوایی ایجاد می‌نماید. به این نوع موتور، *Brushless DC Motor* یا موتور DC فاقد جاروبک اطلاق می‌شود.

ب) موتورهای تغذیه شده با ولتاژ سینوسی حاصل از PWM که توزیع چگالی فلوی سینوسی شکل در فاصله هوایی خود دارند. موتور مورد بحث ما نوع دوم این موتورها خواهد بود.

1-4-1- ساختار PMSM

یک موتور PMSM، از روتور، استاتور، سنسور، قاب، بلبرینگ و قسمت‌های اتصال‌دهنده تشکیل شده است. بعضی از این موتورها ترمز نیز دارند. در ادامه به شرح مختصر هر کدام از این اجزاء می‌پردازیم.

1-4-1-1- استاتور

استاتور شامل هسته و سیم پیچ آرمیچر است. هسته آرمیچر از ورقه‌های نازک فولادی سیلیکون دار به ضخامت 0/35 الی 0/5 میلی‌متر تشکیل شده که به هم پرچ شده‌اند. از آنجا که استاتور قسمت مهمی از مسیر فلوی مغناطیسی را تشکیل می‌دهد، در نتیجه شکل هسته استاتور بایستی برای کارکرد صحیح موتور قابل توجه باشد.

در بسیاری از موارد استاتور دندانه دار با شیارهای کج ساخته می‌شود تا تضاریس گشتاور که مولد تضاریس سرعت‌اند را کم کند. تضاریس گشتاور عموماً بواسطه غیر یکنواختی چگالی میدان مغناطیسی تولید می‌شود. اگر هسته آرمیچر محکم پرچ نشده باشد به واسطه عبور جریان از سیم پیچ آرمیچر به ارتعاش در می‌آید و در حالتی که فرکانس ارتعاش در محدوده فرکانسهای صوتی باشد نویز تولید می‌کند. کلافهای استاتور بطور مساوی روی زوج قطبها توزیع شده‌اند و محورهای فازها نسبت به هم به اندازه $2\pi/3$ رادیان الکتریکی فاصله دارند [47,48].

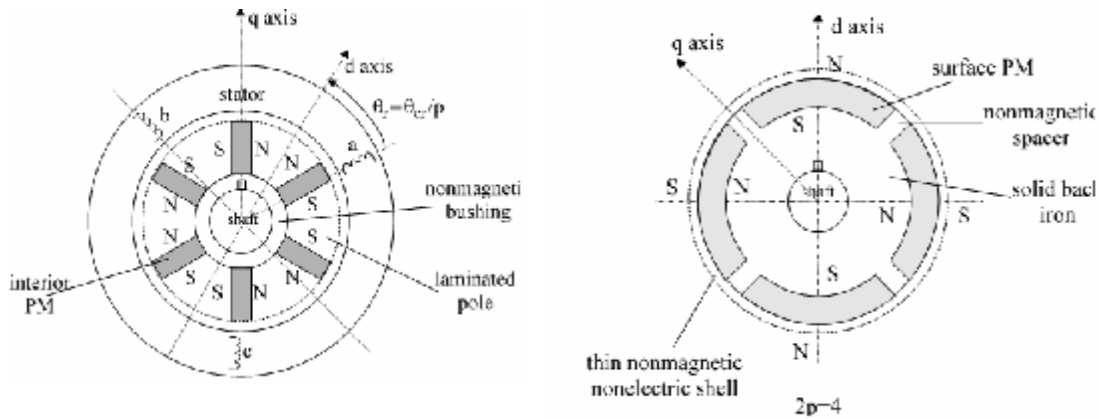
1-4-2- سنسورها

سنسورها به همراه یک مدار کنترل مخصوص که اطلاعات موقعیت روتور را برای کنترل‌کننده مشخص می‌کنند، به این موتورها وصل می‌شوند. از این سنسورها می‌توان انکودر نوری، انکودر مغناطیسی، ری‌سلور و سنسور اثر هال را نام برد [47].

1-4-3- روتور

ساختمان کلی روتور طوری است که میدان مغناطیسی گردانی توسط آهن‌ربای دائمی ثابت روی آن تولید می‌شود. چنانچه گفته شد موتورهای مغناطیس دائم از نظر چگونگی قرار گرفتن مغناطیسها

بر روتور به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. شکل (1-1) سطح مقطع یک موتور PMSM با مغناطیس تقریباً استوانه‌ای بر سطح خارجی روتور و شکل (2-1) موتور PMSM با مغناطیسهای داخلی را نشان می‌دهد [48,49].



شکل (2-1) - موتور سنکرون با مغناطیس دائم بر سطح داخلی روتور

شکل (1-1) - موتور سنکرون با مغناطیس دائم بر سطح خارجی روتور

1-4-4- نصب مغناطیس دائم بر روی روتور

از جمله مسائل فنی مهم نصب مغناطیس دائم بر روی روتور است. پیچ کردن یکی از روشهای متداول برای نصب مغناطیس‌های دائم ریخته‌گری شده است. اما این روش برای نصب فریت بر روی روتور مناسب نیست چون استقامت مکانیکی فریت بسیار کم است. امروزه به کمک چسبهای مرغوب امکان اتصال خوب مغناطیس دائم (به خصوص فریت) به روتور وجود دارد و روشهای متعددی در این مورد بکار می‌رود. تدابیر ویژه‌ای برای چسباندن مغناطیس دائم لازم است تا از جدا شدن آن در سرعت‌های زیاد و یا تغییرات سریع سرعت به واسطه نیروی گریز از مرکز جلوگیری کند.

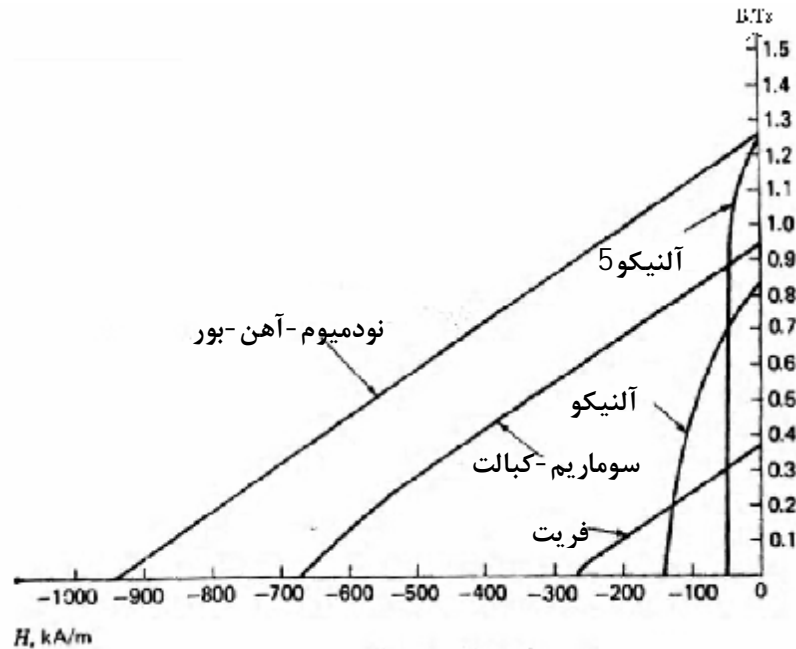
برای جلوگیری از جدا شدن مغناطیس دائم از سطح روتور و تثبیت آن از چند قطعه فلز یا یک ورق استیل نازک استوانه‌ای بر روی سطح خارجی مغناطیس دائم استفاده می‌شود و یا سطح خارجی مغناطیس دائم با مواد غیر مغناطیسی مثل فایبر گلاس پوشانده می‌شود. در تمامی این روشها چسب

بکار می رود. در انتخاب ماده چسبنده باید دقت داشت که آن ماده بطور یکنواخت روی سطح پخش شود و در عین حال در مقابل تغییرات حرارتی نیز مقاوم باشد [48].

1-4-5- مواد مغناطیسی دائم و مشخصه های آنها

انتخاب مغناطیسی دائم برای موتور متاثر از عواملی نظیر کارائی موتور، وزن، حجم، بازده و هزینه های مواد و تولید است. قابلیت ماشین کاری ماده، تفرانس گذاری و آسانی کار با مواد مغناطیسی دائم می تواند بر هزینه های تولید تاثیر چشم گیری داشته باشد [62].

در سروموتورهایی که ثابت زمانی مکانیکی کوچک و پاسخ سریع مورد نیاز است بایستی از آهنرباهای دائم مرغوب استفاده کرد. عملکرد مغناطیسی آهنرباهای دائم با منحنی مغناطیسی زدایی آنها نشان داده می شود. بطور تقریبی کارآیی مغناطیسی دائم با چگالی فلو پسماند مغناطیسی B_r و شدت میدان ضد مغناطیسی H_c و حاصلضری انرژی ماکزیمم $(BH)_{max}$ معین می شود. انرژی ذخیره شده در فاصله هوایی مدار مغناطیسی که شامل آهنربای دائم نیز می شود، با حاصلضرب چگالی فلو مغناطیسی و توان مغناطیسی دائم متناسب است. بنابراین ماده مغناطیسی بهتر است که انرژی مغناطیسی بیشتری داشته باشد. در شکل (1-3) مشخصه انواع مختلف آهنرباها مقایسه شده اند. چگالی فلو مغناطیسی هنگامی که $H=0$ است به چگالی پسماند معروف است و شدت میدان مغناطیسی وقتی که چگالی فلو مغناطیسی $B=0$ است به عنوان میدان ضد مغناطیسی H_c نامیده می شود. حاصلضرب چگالی فلو مغناطیسی و شدت میدان مغناطیسی بر روی منحنی مغناطیسی زدایی به انرژی تعبیر می شود [47,49].



شکل (3-1)- منحنی های مغناطیس شوندگی برای مواد مغناطیس دائم

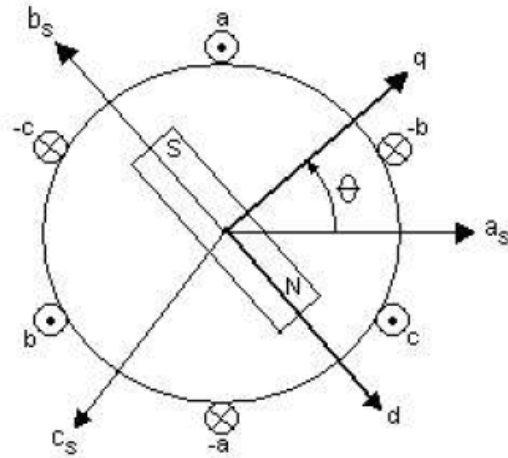
5-1- مدل PMSM

مقالات بسیاری در زمینه مدلسازی PMSM ها و محاسبه پارامترهای آنها وجود دارد. مدل‌های کامل عموماً به داده‌های بیشتری از آنچه معمولاً در دسترس است نیاز دارند که نتیجه آن اشغال بیشتر حافظه و طولانی شدن زمان اجرای برنامه‌های رایانه‌ای می‌باشد. مدلی که در این بخش بحث شده در اکثر مقالات و کتابها که در مورد PMSM بحث شده، کاربرد دارد.

این مدل بر روی مولفه‌های فرکانس اصلی تمرکز نموده است. مدار مغناطیسی خطی فرض گردیده، سیم پیچ‌های استاتور به صورت سینوسی توزیع شده‌اند و فرض شده میدان مغناطیسی در طول محور رتور به صورت مساوی توزیع شده باشد. در اکثر مقالات و کتاب‌هایی که در مورد موتورهای سنکرون مغناطیس دائم بحث شده این مدل کاربرد دارد [59 و 51].

موتور سنکرون مغناطیس دائم یک ماشین AC سه فاز است. سیم پیچ‌ها به صورت ستاره متصل اند و در زاویه 120 درجه فضایی نسبت به هم قرار گرفته‌اند. در شکل (4-1) شکل ساده شده موتور

مغناطیس دائم، سیم پیچ های استاتور، مغناطیس رتور و محورهای مغناطیسی آن نشان داده شده است.

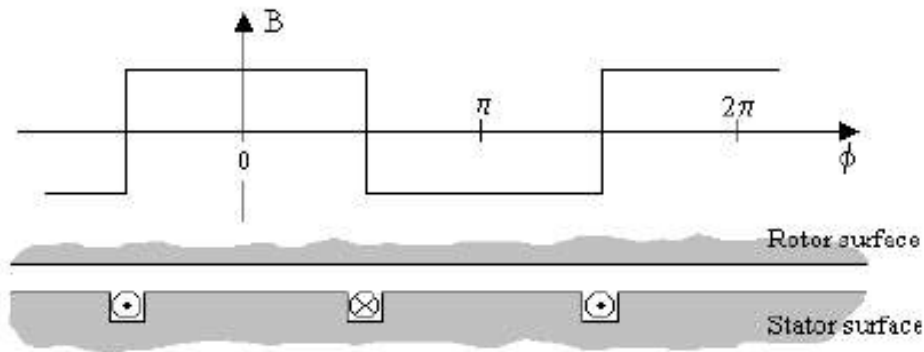


شکل (1-4) - شکل ساده شده موتور مغناطیس دائم

سیم پیچ های استاتور شامل بوبین های مجزایی است که در شیارهای متمایزی جهت ایجاد یک توزیع سینوسی تقریبی به منظور کمینه نمودن هارمونیک های فضایی پیچیده شده اند [50]. در شکل (1-3)، سیم پیچ های استاتور به صورت تک بوبین با محورهای مغناطیسی منتهی آن نشان داده شده است.

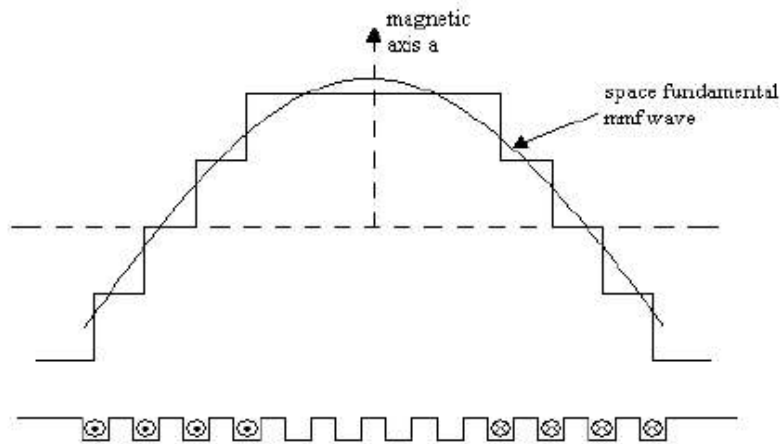
ماده ای که رتور و استاتور از آن تشکیل شده اند رلوکتانس کمتری نسبت به فاصله هوایی بین آنها دارد. از این رو، می توانیم از رلوکتانس مغناطیسی رتور و استاتور صرف نظر کنیم و فرض کنیم تمام انرژی مغناطیسی در فاصله هوایی متمرکز است. همچنین چون فاصله هوایی نسبت به شعاع رتور کوتاه تر است، می توانیم فرض کنیم میدان در طول فاصله هوایی ثابت است. فرض می کنیم میدان ها شعاعی اند، زیرا تمایل دارند کوتاه ترین مسیر را انتخاب نمایند.

شکل (1-5) میدان مغناطیسی سیم پیچ های متمرکز شده را نشان می دهد.



شکل (1-5)- میدان B سیم پیچ های متمرکز شده در گستره π رادیان

وقتی که سیم پیچ استاتور بر روی چندین شیار توزیع می گردند میدان منتهجه بسیار شبیه به موج سینوسی است. شکل (1-6) سیم پیچ های توزیع شده و مولفه اصلی میدان مغناطیسی را نشان میدهد.



شکل (1-6)- میدان مغناطیسی سیم پیچ های توزیع شده و مولفه فرکانس اصلی

1-5-1- موج mmf دوار:

زمانی که سه سیم پیچ استاتور با زاویه الکتریکی $2\pi/3$ رادیان فضایی قرار گرفتند و توسط

جریانهای سینوسی متعادل تغذیه شدند، یک موج mmf دوار با فرکانسی مشابه و دامنه $1/5$ برابر mmf

هر سیم پیچی خواهیم داشت. در فاز a هارمونیک اول موج mmf وابسته به زمان و مکان به این صورت نوشته می شود:

$$F_a = F_{\max} \cos(\theta) \cos(\omega t) \quad (1-1)$$

θ از محور مغناطیسی a تعیین می شود.

با استفاده از تساوی:

$$\cos(a) \cos(b) = \frac{1}{2} \cos(a-b) + \frac{1}{2} \cos(a+b) \quad (2-1)$$

می توان F_a را به این صورت بازنویسی نمود:

$$F_a = F_{\max} \left(\frac{1}{2} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} \cos(\theta + \omega t) \right) \quad (3-1)$$

که نشان دهنده انطباق دو موج دوار است؛ $F_a^+ = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t)$ در جهت مثبت و یا در جهت

عقربه های ساعت و $F_a^- = \frac{1}{2} F_{\max} \cos(\theta + \omega t)$ در جهت منفی. سیم پیچ های b, c دارای تاخیر فاز

زمانی و فضایی به ترتیب $2p/3$ و $4p/3$ رادیان می باشند. نتایج به صورت زیر بیان می گردند:

$$F_b = F_b^+ + F_b^- = F_{\max} \left(\frac{1}{2} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} \cos(\theta + \omega t + 2p/3) \right) \quad (4-1)$$

$$F_c = F_c^+ + F_c^- = F_{\max} \left(\frac{1}{2} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} \cos(\theta + \omega t - 2p/3) \right) \quad (5-1)$$

مجموع موج های مثبت و منفی mmf ، بصورت زیر است:

$$F_a^+ + F_b^+ + F_c^+ = \frac{3}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (6-1)$$

$$F_a^- + F_b^- + F_c^- = 0 \quad (7-1)$$

از اینرو موج برآیند F ، عبارتست از:

$$F = \frac{3}{2} F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (8-1)$$