بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده برق و رباتیک

گروه قدرت

طراحی و شبیه‌سازی کنترل‌کننده مناسب به روش SVPWM برای درایو موتورهای DC بدون جاروبک

دانشجو : وحید رضا نیک‌زاد

استاد راهنما :

دکتر علی دستفان

استاد مشاور:

دکتر احمد دارابی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

خرداد ماه ۱۳۹۰

بر خود واجب می‌دانم از راهنمایی‌ها و تلاش‌های دلسوزانه استاد گرامی جناب آقای دکتر دستفان سپاس‌گزاری نمایم. امیدوارم شاگرد شایسته‌ای برای ایشان بوده و باشم. همچنین از جناب آقای دکتر دارابی به خاطر مشورت‌های راهگشای ایشان سپاسگزارم. در پایان از تمامی دوستانی که اینجانب را در مراحل گوناگون انجام پروژه یاری رساندند، کمال تشکر را دارم.

چکیده

موتورهای بدون جاروبک مغناطیس دائم به خاطر خصوصیات ویژه‌ای که دارند به طور گسترده و به ویژه در کاربردهای خاص استفاده می‌شوند. این موتورها بر اساس توزیع شار در فاصله هوایی به دو گروه شار سینوسی و ذوزنقه‌ای تقسیم می‌شوند که نوع سینوسی آن دارای ریپل گشتاور کم‌تر است و در کاربردهای مرتبط استفاده می‌شود. روش‌های کنترلی این نوع را می‌توان به دو دسته اسکالر و برداری تقسیم کرد که مهم‌ترین روش‌های کنترل برداری عبارتنداز FOC[1] و DTC[2]. در این بین روش DTC به خاطر سادگی و حجم کم‌تر محاسبات آن بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است. اما با وجود سادگی روش DTC این روش دو عیب عمده دارد. ریپل گشتاور و شار این روش زیاد است و فرکانس سوئیچینگ آن ثابت نیست. برای برطرف کردن این دو عیب، پژوهش‌های بسیاری تا کنون انجام و راهکارهایی پیشنهاد شده‌اند. یکی از کارآمدترین روش‌هایی که تا کنون ارائه شده است، استفاده از روش SVPWM[3] همراه با روش DTC (DTC-SVPWM) است.

در روش DTC-SVPWM با استفاده از مقادیر تخمینی، ابتدا بردار مرجع شار پیوندی و سپس بردار ولتاژ مورد نیاز برای جبران خطای گشتاور و شار محاسبه می‌شود. با استفاده از روش DTC-SVPWM ریپل گشتاور و شار پیوندی به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، اما به دلیل حجم زیاد محاسبات این روش، روش DTC-SVPWM در عمل با محدودیت‌هایی مانند محدودیت فرکانس سوئیچینگ روبرو است. در این گزارش، روشی پیشنهادی برای بهبود عملکرد روش DTC-SVPWM ارائه شده است. در روش پیشنهادی (Hystereisis-SVPWM)، از بسیاری محاسبات روش DTC-SVPWM صرفنظر و از یک باند هیسترزیس برای تعیین حالت سوئیچینگ استفاده شده است. در نتیجه زمان مورد نیاز برای انجام محاسبات هر سیکل سوئیچینگ کاهش و حداکثر فرکانس سوئیچینگ افزایش می‌یابد. همچنین به دلیل کاهش تعداد تغییر حالت سوئیچینگ در هر سیکل، تلفات سوئیچینگ نیز کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، نشان داده شده است که ریپل گشتاور الکترومغناطیسی و شار پیوندی با استفاده از روش پیشنهادی در مقایسه با مقدار آن در روش DTC-SVPWM کاهش می‌یابد. همچنین وضعیت هارمونیکی جریان استاتور بهبود و THD آن کاهش می‌یابد. با توجه به مزایای فوق، برتری روش پیشنهادی بر روش DTC-SVPWM کاملا آشکار است.

کلمات کلیدی: موتور بدون جاروبک مغناطیس دائم، موتور سنکرون مغناطیس دائم، کاهش ریپل گشتاور و شار، کنترل سرعت، روش DTC، روش DTC-SVPWM، هیسترزیس

---

[1] Field Oriented Control
[2] Direct Torque Control
[3] Space Vector Pulse Width Modulation

لیست مقالات مستخرج از پایان‌نامه

1- Nikzad V. R., Dastfan A. and Darabi A.,*"A New Hysteresis-SVPWM Method for Torque Ripple Reduction of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Direct Torque Control"*, UPEC 2011, Germany, 2011.

2- Nikzad V. R., Dastfan A., Nabizade N. and Darabi A., *"DTC-SVPWM Method for PMSM Control Using A Fuzzy Stator Resistance Estimator"*, ICECT 2011, India, 2011.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول- مقدمه ۱

فصل دوم- موتورهای بدون جاروبک مغناطیس دائم ۹

۲-۱- بررسی ساختار موتورهای بدون جاروبک مغناطیس دائم ۱۱

۲-۲- مدار معادل موتور بدون جاروبک مغناطیس دائم ۱۵

۲-۳- مدل ریاضی موتور بدون جاروبک مغناطیس دائم ۱۶

۲-۴- بررسی دقیق‌تر PMSM ۱۷

۲-۴-۱- مدل ریاضی PMSM ۱۹

۲-۴-۲- معادله‌های ولتاژ و گشتاور PMSM در دستگاه مرجع دوفاز d-q ۲۲

۲-۴-۳- انتقال متغیرهای ماشین بین دستگاه‌های مرجع مختلف ۲۸

۲-۴-۴- بررسی اصول عملکرد PMSM با استفاده از دیاگرام فازوری ۲۹

۲-۵- شرایط لازم برای عملکرد پایدار PMSM ۳۱

۲-۶- برتری‌های موتور PMSM نسبت به BLDC ۳۳

۲-۷- بررسی مدل استفاده شده برای PMSM در شبیه‌سازی ۳۴

فصل سوم – روش‌های کنترل موتورهای بدون جاروبک مغناطیس دائم ۳۷

۳-۱- روش کنترل موتورهای BLDC ۳۸

۳-۲- بررسی روش‌های کنترلی PMSM ۴۲

۳-۲-۱- کنترل اسکالر ۴۳

کنترل ولت-هرتز ۴۳
۳-۲-۲- کنترل برداری ۴۴
کنترل شارگرا (FOC) ۴۴
کنترل مستقیم گشتاور (DTC) ۴۶
روش DSVM ۴۷
روش DTC-SVPWM ۵۰
۳-۳- مبانی روش DTC ۵۰
۳-۳-۱- کنترل شار در روش DTC برای موتور PMSM ۵۴
۳-۳-۲- الگوریتم انتخاب بردارهای ولتاژ در روش DTC ۵۶
۳-۳-۳- بررسی ساختار کنترل‌کننده DTC ۵۹
تخمین‌گر شار و گشتاور ۶۲
۳-۴- مزایا و معایب روش DTC ۶۳
۳-۵- بررسی و تحلیل روش DTC-SVPWM ۶۵
۳-۵-۱- اصول روش SVPWM برای کنترل اینورتر ۶۵
۳-۵-۲- شرح روش DTC-SVPWM ۶۹
۳-۵-۳- بررسی ساختار مورد استفاده در روش DTC-SVPWM ۷۲
حلقه کنترل سرعت ۷۳
کنترل‌کننده گشتاور ۷۴
بلوک محاسبه‌گر بردار مرجع شار پیوندی (RFVC) ۷۶
بلوک کنترل‌کننده اینورتر ۷۶
فصل چهارم- روش پیشنهادی برای بهبود عملکرد روش DTC-SVPWM ۷۷
۴-۱- ساختار روش پیشنهادی ۷۸
۴-۲- الگوریتم بلوک کنترل‌کننده اینورتر در روش DTC-SVPWM ۸۰
۴-۳- الگوریتم بلوک کنترل‌کننده اینورتر در روش پیشنهادی ۸۱

۴-۴- مقایسه الگوریتم سوئیچینگ روش پیشنهادی با روش DTC-SVPWM ۸۳
۴-۴-۱- حجم محاسبات ۸۳
۴-۴-۲- تلفات سوئیچینگ ۸۴
فصل پنجم- شبیه‌سازی و نتایج ۸۶
۵-۱- گشتاور الکترومغناطیسی ۸۸
۵-۲- شار پیوندی ۹۰
۵-۳- زاویه شار پیوندی و شار روتور ۹۲
۵-۴- سرعت مکانیکی روتور ۹۳
۵-۵- جریان استاتور ۹۴
۵-۶- مولفه‌های شار پیوندی در راستای محورهای D و Q ۹۷
فصل ششم- نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۰۱
۶-۱- نتیجه‌گیری ۱۰۲
۶-۲- پیشنهادها ۱۰۳
مراجع ۱۰۴

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل۲-۱: انواع ساختار موتور بدون جاروبک مغناطیس دائم ۱۲

شکل ۲-۲: ساختار شماتیک یک موتور بدون جاروبک مغناطیس دائم دو قطب سه فاز ۱۳

شکل ۲-۳: مدار معادل موتور بدون جاروبک مغناطیس دائم ۱۵

شکل ۲-۴: مدار معادل موتور بدون جاروبک مغناطیس دائم در شرایط عملکرد متعادل ۱۷

شکل ۲-۵ : ساختار یک PMSM سه فاز و دو قطب به همراه دستگاه مرجع گردان روتور ۲۱

شکل ۲-۶: دستگاه مورد استفاده برای تبدیل پارک در حالتی که محور D روتور مبنا است. ۲۳

شکل ۲-۷ : دستگاه مورد استفاده برای تبدیل پارک برای حالتی که محور Q روتور مبنا است. ۲۴

شکل ۲-۸: انتقال بین دستگاه مرجع ثابت استاتور و دستگاه گردان روتور ۳۰

شکل ۲-۹: دیاگرام فازوری موتور PMSM ۳۰

شکل ۲-۱۰: بردارهای شار روتور در دستگاه مرجع ثابت استاتور ۳۱

شکل ۲-۱۱: نمودار گشتاور- زاویه بار برای موتور PMSM ۳۲

شکل ۲-۱۲: مدلسازی معادلات الکتریکی موتور PMSM در راستای محور Q روتور ۳۵

شکل ۲-۱۳: مدلسازی معادلات الکتریکی موتور PMSM در راستای محور D روتور ۳۵

شکل ۲-۱۴ : مدلسازی معادله گشتاور موتور PMSM ۳۵

شکل ۲-۱۵ : مدلسازی معادله حرکت موتور PMSM ۳۶

شکل ۲-۱۶ : مدل‌سازی انتقال جریان از دستگاه مرجع روتور به دستگاه ثابت استاتور و مختصات ABC ۳۶

شکل ۳-۱: سیگنال خروجی حسگر اثر هال با توجه به مقدار EMF خط ۳۹

شکل ۳-۲: ترتیب هدایت فازهای موتور با توجه به خروجی حسگرهای اثر هال ۴۰
شکل ۳-۳: آرایش فازها و ترتیب هدایت با توجه به جدول ۳-۱ ..... ۴۱
شکل ۳-۴ : گروه‌بندی روش‌های کنترلی PMSM ۴۳
شکل ۳-۵: ساختار مورد استفاده در روش کنترل FOC ۴۶
شکل ۳-۶ : نمودار قطعه‌بندی صفحه بردارهای ولتاژ برای سرعت‌های بالا در روش DSVM ۴۸
شکل ۳-۷: دیاگرام فازوری موتور PMSM قطب صاف ۵۱
شکل ۳-۸ : مدار معادل موتور PMSM ۵۲
شکل ۳-۹ : دیاگرام فازوری شار روتور و شار پیوندی در موتور PMSM ۵۳
شکل ۳-۱۰: تاثیر بردار ولتاژ بر روی بردار شار پیوندی ۵۶
شکل ۳-۱۱ : ساختار یک اینورتر ساده ۵۷
شکل ۳-۱۲ : برداهای ولتاژ حاصل از اینورتر ۵۸
شکل ۳-۱۳ : الگوریتم انتخاب حالت سوئیچینگ در روش DTC ۵۹
شکل ۳-۱۴ : ساختار کنترل کننده DTC ۶۰
شکل ۳-۱۵ : نمودار شماتیک انتخاب بردارهای ولتاژ در روش DTC ۶۱
شکل ۳-۱۶ : مقایسه سیگنال‌های تولیدی در روش PWM متقارن و روش PWM نامتقارن ۶۶
شکل ۳-۱۷ : ساختار اینورتر سه فاز ۶۶
شکل ۳-۱۸ : نگاشت بردارهای ولتاژ به صفحه DQ در روش SVPWM [۳۸] ۶۸
شکل ۳-۱۹ : چیدمان بردارهای ولتاژ در یک سیکل سوئیچینگ برای قطعه‌های مختلف در روش SVPWM ۷۰
شکل ۳-۲۰: نمودار شماتیک حرکت بردار شار پیوندی در یک بازه نمونه‌برداری ۷۱
شکل ۳-۲۱ : بررسی تاثیر بردار ولتاژ بر بردار شار پیوندی در یک بازه نمونه‌برداری ۷۲
شکل ۳-۲۲ : ساختار کلی روش DTC-SVPWM ۷۳

شکل ۳-۲۳ : نمودار گشتاور-زاویه بار برای موتور PMSM ۷۵

شکل ۳-۲۴ : ساختار داخلی بلوک RFVC ۷۶

شکل ۴-۱: ساختار مورد استفاده در روش پیشنهادی ۷۹

شکل ۴-۲ : صفحه بردارهای ولتاژ و حلقه هیسترزیس در روش پیشنهادی ۸۲

شکل ۵-۱: گشتاور الکترومغناطیسی PMSM ۸۹

شکل ۵-۲: مقایسه دقیق‌تر گشتاور الکترومغناطیسی PMSM ۹۰

شکل ۵-۳ : اندازه بردار شار پیوندی ۹۱

شکل ۵-۴ : زاویه شار پیوندی و شار روتور ۹۲

شکل ۵-۵: سرعت مکانیکی روتور ۹۳

شکل ۵-۶ : جریان فاز A استاتور PMSM ۹۵

شکل ۵-۷: طیف هارمونیکی جریان فاز استاتور در سه روش ۹۶

شکل ۵-۸: مولفه شار پیوندی در راستای محور D استاتور ۹۸

شکل ۵-۹: مولفه شار پیوندی در راستای محور Q استاتور ۹۹

شکل ۵-۱۰: مکان هندسی بردار شار پیوندی در دستگاه ثابت استاتور ۱۰۰

فهرست جدول‌ها

عنوان صفحه

جدول ۳-۱: فازهای موتور و ترتیب هدایت سوئیچ‌های اینورتر با توجه به شکل ۳-۲..... ۴۱

جدول ۳-۲ : روش انتخاب بردارهای ولتاژ در روش DSVM برای قطعه شماره ۱ و در سرعت‌های کم..... ۴۹

جدول ۳-۳ : روش انتخاب بردارهای ولتاژ در روش DSVM برای قطعه شماره ۱ و در سرعت‌های متوسط..... ۴۹

جدول ۳-۴ : روش انتخاب بردارهای ولتاژ در روش DSVM برای قطعه شماره $^{-}$۱ و در سرعت‌های بالا..... ۴۹

جدول ۳-۵ : انتخاب بردارهای ولتاژ در روش DSVM برای قطعه شماره $^{+}$۱ و در سرعت‌های بالا..... ۴۹

جدول ۳-۶ : الگوریتم انتخاب بردارهای ولتاژ در هر کدام از شش قطعه برای روش DTC..... ۶۰

جدول ۵-۱: پارامترهای موتور PMSM استفاده شده در شبیه‌سازی..... ۸۸

فصل اول:

مقدمه

انواع موتورهای الکتریکی را در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان به دو گروه DC و AC تقسیم کرد. موتورهای DC جاروبک‌دار[1]، بیش‌ترین کاربرد را در سیستم‌های حساس دارند. در موتورهای DC کنترل گشتاور و شار مستقل از یکدیگر است. به طور کلی در موتورهای DC جاروبک‌دار، شار با استفاده از جریان سیم‌پیچ تحریک و گشتاور با جریان سیم‌پیچی آرمیچر کنترل می‌شوند. همچنین کنترل سرعت موتورهای DC به سادگی امکان‌پذیر است. کنترل سرعت با کنترل ولتاژ انجام می‌شود؛ هر چه ولتاژ بیش‌تر شود، سرعت بیش‌تر می‌شود.

در موتور DC با اعمال ولتاژ به کموتاتور، جریان در سیم‌پیچ‌های آرمیچر جاری می‌شود که باعث تولید میدان مغناطیسی آرمیچر می‌شود. این میدان در تعامل با میدان مغناطیسی استاتور باعث تولید گشتاور می‌شود. برای تولید گشتاور بیشینه، میدان مغناطیسی آرمیچر و استاتور باید بر یکدیگر عمود باشند. کموتاتور این امکان را به میدان مغناطیسی استاتور و آرمیچر می‌دهد تا همواره بر یکدیگر عمود باشند[۱]. بنابراین عمل کموتاسیون نقشی اساسی در عملکرد موتور DC دارد. پس از هر کموتاسیون، جهت جریان در سیم‌پیچ‌های آرمیچر تغییر می‌کند که باعث تغییر قطب‌های آرمیچر می‌شود. به دلیل استفاده از جاروبک در این موتور، تعمیرات دوره‌ای و به احتمال زیاد جایگزینی جاروبک‌ها نیاز است که باعث افزایش هزینه می‌شود. همچنین به دلیل جرقه‌زدن جاروبک‌ها در هنگام کموتاسیون، در محیط‌های پرخطر از این موتورها استفاده نمی‌شود.

موتورهای AC، مانند موتورهای بدون جاروبک مغناطیس دائم[2] و موتورهای القایی[3]، به طور گسترده و در کاربردهای گوناگون استفاده می‌شوند. برتری اساسی موتورهای AC نسبت به موتورهای DC آن است که ارتباط الکتریکی بین قسمت‌های ساکن و گردان وجود ندارد و در نتیجه کموتاتور و جاروبک نیاز ندارند و هزینه نگهداری آن‌ها کاهش می‌یابد. به دلیل نبود جاروبک و جرقه‌های حاصل از آن، این موتورها می‌توانند

[1] DC Brush Motor
[2] Permanent Magnet Brushless Motor
[3] Induction Motor

در محیط‌های پرخطر و انفجاری استفاده شوند. همچنین بازده این موتورها بیش‌تر از موتورهـای DC اسـت [۲]. تمام مزیت‌های بیان شده نشان می‌دهند که موتورهای AC گزینه مناسبی برای تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی هستند.

کنترل سرعت در موتورهای AC با کنترل دامنه و فرکانس ولتاژ انجام می‌شود. تغییـر فرکـانس، سـرعت موتور را تغییر می‌دهد چون سرعت روتور به سرعت میدان مغناطیسی استاتور که بـا همـان فرکـانس ولتـاژ می‌چرخد، وابسته است. افزایش فرکانس ولتاژ اعمالی باعث افزایش سرعت موتور می‌شود [۲]. پیش از ابـداع مبدل‌های الکترونیک قدرت و تکنیک‌های کنترل پیشرفته، مانند کنترل برداری[1] و کنترل مستقیم گشـتاور (DTC[2])، موتورهای AC برای کاربردهای سرعت متغیر مناسب نبودند. دلیل آن تزویج شار و گشتاور موتـور است که تغییر در یکی از آن‌ها بر روی دیگری تاثیر می‌گذارد [۳].

در گذشته برای کنترل سرعت موتورهای القایی از روش تغییر آرایش سیم‌پیچی مثلـث-سـتاره اسـتفاده می‌شد که توانایی محدودی داشت. در این روش، با تغییر آرایش سیم‌پیچی، ولتاژ فاز سیم‌پیچی‌های استاتور موتور تغییر می‌کند. اگر تعداد سیم‌پیچی‌های استاتور بیش از سه باشد، تغییر قطب هم امکان‌پذیر است ولی فقط برای مقادیر گسسته سرعت از این روش استفاده می‌شود. ولی موتوری با چندین سیم‌پیچی آرمیچر در مقایسه با موتورهای معمولی گـران‌تـر اسـت [۴]. روش جـایگزین دیگـر بـرای کنتـرل سـرعت، اسـتفاده از موتورهای القایی روتور سیم‌پیچی و تغییر مقاومت اسـتاتور اسـت. ولـی ایـن موتورهـا، مزیـت‌هـای اساسـی موتورهای القایی متداول را ندارند و تلفات آن‌ها بیش‌تر است [۴].

با توجه به مشکلات و پیچیدگی‌های بیان‌شده، در زمان‌هایی که روش‌های بیان شده برای کنترل سرعت موتورهای القایی استفاده می‌شدند، موتورهای DC جاروبک‌دار همچنان برای کاربردهایی که نیاز بـه تنظـیم

[1] Vector Control
[2] Direct Torque Control

سرعت داشتند، استفاده می‌شدند. پیشرفت‌های اخیر در سوئیچ های نیمه‌هادی سریع، پردازنده‌های دیجیتال سیگنال (DSP[1]) و ریزپردازنده‌ها[2]، زمینه‌های جدیدی را برای کاربرد درایوهای کنترل سرعت فـراهم کـرده است. این پیشرفت‌ها باعث گسترش قابل توجه الگوریتم‌های نرم‌افزاری در مقایسه با روش‌های سخت افزاری و در نتیجه کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد سیستم شده است. ترکیب روش‌های موثر کنترلی مانند کنترل برداری با DSPها و ریزپردازنده‌ها، امکان کنترل مستقل شـار و گشـتاور را در موتورهـای AC فـراهم کـرده است.

موتور بدون جاروبک مغناطیس دائم دارای گشتاور زیاد، اندازه کوچک، بازده بالا است و بـه خـاطر نبـود جاروبک، هزینه نگهداری کمی دارد [۵]-[۶]. این موتور در مقایسه با موتورهای القایی، اینرسی کمتـری دارد و در نتیجه پاسخ دینامیکی آن سریع‌تر است [۷]. از طرفی به خاطر استفاده از مغناطیس دائم، تلفات روتـور کاهش یافته و بازده افزایش می‌یابد. با توجه به خصوصیات فوق، این موتور گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای مختلف است و به همین دلیل به طور گسترده استفاده می‌شود. علیرغم استفاده از عنـوان DC در نـام ایـن موتور، تغذیه این موتور به صورت AC است. درایو مورد استفاده برای کنترل موتور DC بدون جاروبک یک اینورتر است و با کنترل سوئیچ‌های اینورتر، سرعت و گشتاور موتور را کنترل می‌کنند. گشتاور موتور باید به گونه‌ای کنترل شود که ریپل کمی داشته باشد، زیرا وجود ریپل گشتاور باعث تولید لرزه در موتور و ایجـاد صدمات مکانیکی می‌شود.

یکی از کاربردهای خاص موتور بدون جاروبک مغناطیس دائـم اسـتفاده در زیردریـایی اسـت. امـا بـرای استفاده از این موتور در این‌گونه کاربردها باید ملاحظاتی در نظر گرفته شـود. تولیـد امـواج ناشـی از ریپـل گشتاور و انتشار آن‌ها در آب، امکان ردیابی زیردریایی توسط رادارهای دشمن را افزایش می‌دهد. در نتیجـه طراحی سیستمی که ریپل گشتاور کم‌تری داشته باشد، باعث افزایش سطح امنیت زیردریایی می‌شود.

[1] Digital Signal Processor
[2] Microprocessor

بسیاری از روش‌های کاهش ریپل گشتاور بر روی مبدل‌های الکترونیک قدرت متمرکز شده‌اند و سعی دارند با اصلاح پیکربندی این مبدل‌ها (و پیشنهاد مبدل‌های جدید) و یا اصلاح روش‌های کنترل مبدل‌ها، ریپل گشتاور را کاهش دهند. روش‌هایی که در دسته دوم قرار دارند هم هزینه کمتری دارند و هم قابلیت انعطاف بیش‌تری دارند. هدف از انجام این پروژه، طراحی کنترل‌کننده مناسب برای درایو موتور بدون جاروبک مغناطیس دائم است به گونه‌ای که هارمونیک‌های ولتاژ و جریان و ریپل گشتاور آن تا حد امکان کاهش یابند. الگوریتم و روش سوئیچینگ درایو موتور بر روی میزان هارمونیک‌های الکتریکی و ریپل گشتاور موتور تاثیر فراوان دارد. زمینه اصلی پروژه، کنترل سوئیچینگ مدار درایو موتور بدون جاروبک مغناطیس دائم، مورد استفاده در زیردریایی، با استفاده از روشی است که تولید هارمونیک الکتریکی و ریپل گشتاور را کاهش دهد تا امکان ردیابی آن کاهش یابد.

الگوریتم‌های کنترل موتور بدون جاروبک مغناطیس دائم را می‌توان به دو گروه کنترل اسکالر و کنترل برداری تقسیم کرد [۸]. روش کنترل اسکالر بر پایه روابطی است که در حالت ماندگار معتبر هستند. در این روش، دامنه و فرکانس متغیرهای کنترلی مدنظر هستند. در روش کنترل برداری، دامنه و فاز متغیر کنترلی مورد نظر؛ بردار آن، مورد نظر است. این روش برای تمامی حالات موتور از جمله حالت گذرا نیز معتبر است. روش DTC یکی از روش‌هایی است که از کنترل برداری استفاده می‌کند. این روش حدود دو دهه پیش، در ژاپن توسط تاکاهاشی[1]، ناگوچی[2] [۹] و همزمان در آلمان توسط دیپن‌بروک[3] ارائه شد [۱۲]-[۱۰]. پایه استفاده از روش DTC برای موتورهای AC، همان‌گونه که از نامش پیداست، کنترل مستقل و مستقیم گشتاور و شار با استفاده از شش یا هشت بردار ولتاژ است. در این روش، معادلات و پارامترهای موتور به دستگاه مرجع ثابت استاتور منتقل می‌شوند، در نتیجه نیازی به آگاهی از زاویه روتور نیست [۳].

[1] Takahashi
[2] Noguchi
[3] Depenbrock

اگر چه روش DTC برای اولین بار در اواخر دهه ۱۹۸۰ برای موتورهای القایی پیشنهاد شد، ولی پس از آن برای گونه‌های دیگر موتور AC مانند موتورهای SR[1] گسترش یافت. در اوخر دهه ۹۰، استفاده از روش DTC برای کنترل موتورهای PMSM[2] آغاز شد [۱۳] و [۱۴]. علیرغم سادگی روش DTC ولی به دلیل ریپل بالای گشتاور و شار در آن روش‌های دیگری نیز ارائه شده است. یکی از این روش‌ها، استفاده از مبدل‌های چند سطحی است که ریپل شار و گشتاور را کاهش می‌دهد ولی به دلیل افزایش تعداد سوئیچ‌ها، تلفات سوئیچینگ افزایش می‌یابد [۱۵] و [۱۶].

یکی از روش‌های پیشنهادی برای کم کردن ریپل گشتاور و شار پیوندی، استفاده از روش SVPWM[3] همراه با روش DTC است. در این روش، DTC-SVPWM، بردار ولتاژ مطلوب برای جبران خطای گشتاور و شار محاسبه و توسط روش SVPWM ساخته می‌شود. این روش در ابتدا برای موتورهای القایی ارائه شد [۱۷] و سپس برای موتورهای PMSM مورد استفاده قرار گرفت [۱۸]. روش DTC-SVPWM از دیدگاه پاسخ و عملکرد بسیار کارآمد است ولی به دلیل حجم بالای محاسبات، در کاربردهای عملی با محدودیت‌هایی از جمله محدودیت حداکثر فرکانس سوئیچینگ روبرو است. در این گزارش یک روش پیشنهادی بر پایه DTC و SVPWM برای کاهش ریپل گشتاور و شار در PMSM ارائه شده است. با استفاده از این روش، حجم محاسبات به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد که باعث افزایش حداکثر فرکانس سوئیچینگ می‌شود. علاوه بر این به دلیل کاهش دفعات سوئیچینگ در هر سیکل، تلفات سوئیچینگ نیز کاهش می‌یابد. در کنار تمامی این مزایا، با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده که نتایج آن در این گزارش ارائه شده است، عملکرد سیستم از دیدگاه کاهش ریپل گشتاور و شار و کاهش THD[4] جریان استاتور بهبود می‌یابد.

[1] Switched Reluctance
[2] Permanent Magnet Synchronous Motor
[3] Space Vector Pulse Width Modulation
[4] Total Harmonic Distortion

با توجه به اهمیت شناخت کامل موتور برای کنترل مطلوب آن، در فصل دوم ساختار موتورهای بدون جاروبک مغناطیس دائم به طور کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا ساختار استاتور، روتور، سیم‌پیچی استاتور و شار در فاصله هوایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه فصل، مدار معادل موتور و مدل ریاضی آن ارائه می‌شود. سپس موتور با شار سینوسی مورد بررسی دقیق‌تر قرار می‌گیرد؛ مدار معادل، معادله ریاضی، معادلات الکتریکی و معادله گشتاور در دستگاه مرجع دوفاز d-q، شرایط عملکرد پایدار موتور و دیاگرام فازوری موتور ارائه و تحلیل شده است. در ادامه برتری‌های موتور شار سینوسی نسبت به موتور شار ذوزنقه‌ای معرفی می‌شوند. در انتهای فصل اول و با توجه به معادلات موتور، مدل استفاده شده در شبیه‌سازی معرفی و تحلیل می‌شود.

فصل سوم به بررسی روش‌های کنترلی موتورهای بدون جاروبک مغناطیس دائم، به ویژه PMSM، اختصاص دارد. در ابتدا برای آشنایی با روش‌های کنترلی موتور BLDC[1] روش کنترلی دوفاز-روشن معرفی می‌شود. سپس روش‌های کنترلی PMSM شامل دو گروه کنترل اسکالر و کنترل برداری معرفی می‌شوند. در ادامه، مبانی روش DTC با در نظر گرفتن دیاگرام فازوری موتور PMSM بررسی شده است. چگونگی بر هم کنش بین شار روتور و شار پیوندی در فرآیند تولید گشتاور، برای فهم بهتر روش DTC بررسی شده است. بر پایه تحلیل‌های ارائه شده، الگوریتم روش DTC برای انتخاب بردارهای ولتاژ تشریح شده است. در ادامه، ساختار کنترل‌کننده DTC و بلوک‌های آن، مانند بلوک تخمین‌گر شار و گشتاور، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. برتری اصلی روش DTC بر سایر روش‌ها، سادگی این روش است. با این حال، این روش معایبی هم دارد که در فصل سوم به آن‌ها اشاره شده است. ادامه فصل سوم به روش DTC-SVPWM اختصاص دارد. در ابتدا، اصول روش SVPWM برای کنترل اینورتر شامل محاسبات، چیدمان بردارهای سوئیچینگ و ... ارائه شده است. سپس مبانی روش DTC-SVPWM و ساختار کنترل‌کننده آن مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

[1] Brushless DC

فصل چهارم به روش پیشنهادی Hysteresis-SVPWM اختصاص دارد. در این فصل الگوریتم روش پیشنهادی و ساختار کنترل‌کننده آن ارائه شده است. در فصل پنجم، نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از هر سه روش DTC، DTC-SVPWM و روش پیشنهادی ارائه و تحلیل شده است. در این فصل، عملکرد روش‌های فوق از دیدگاه گشتاور الکترومغناطیسی، شار پیوندی، سرعت مکانیکی روتور و جریان استاتور تحلیل و با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین جریان استاتور PMSM در هر سه روش از دیدگاه طیف هارمونیکی و THD مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی، علاوه بر این که کارایی و اعتبار روش پیشنهادی تایید می‌شود، بهبود پاسخ و عملکرد آن نسبت به روش DTC-SVPWM نشان داده شده است. فصل ششم و پایانی گزارش به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها اختصاص دارد.