

فهرست مطالب

| عنوان | شماره صفحه |
|--|------------|
| مقدمه | ۸ |
| فصل اول: اصول کارکرد و مشخصات موتور DC بدون جاروبک (BLDC) | ۱۲ |
| ۱-۱: مقدمه | ۱۲ |
| ۲-۱: ساختار موتور BLDC | ۱۳ |
| ۳-۱: ساختمان استاتور موتور BLDC | ۱۳ |
| ۴-۱: ساختمان روتور موتور BLDC | ۱۵ |
| ۵-۱: حسگرهای موقعیت | ۱۷ |
| ۶-۱: تئوری عملکرد موتور BLDC | ۱۸ |
| ۷-۱: توالی کلیدزنی | ۱۹ |
| ۸-۱: مزایا و معایب موتور BLDC | ۲۲ |
| ۱-۸-۱: مزایای موتور BLDC | ۲۲ |
| ۲-۸-۱: معایب موتور BLDC | ۲۳ |
| ۹-۱: مقایسه موتورهای BLDC با دیگر موتورها | ۲۳ |
| ۱۰-۱: نتیجه گیری | ۲۴ |
| فصل دوم: روش‌های کنترل موتور BLDC با اینورتر شش سوئیچ | ۲۵ |
| ۱-۲: مقدمه | ۲۵ |
| ۲-۲: بررسی روشهای کنترل موتور BLDC | ۲۶ |
| ۱-۲-۲: روش کنترل هیستریزس جریان در موتورهای BLDC | ۲۶ |
| ۲-۲-۲: روش کنترل PWM جریان در موتورهای BLDC | ۲۷ |
| ۳-۲-۲: کنترل PWM جریان با شکل دهی جریان | ۲۸ |
| ۴-۲-۲: کنترل از طریق لینک DC جریان | ۲۹ |
| ۳-۲: کنترل مستقیم گشتاور (DTC) در موتور BLDC | ۳۰ |
| ۱-۳-۲: کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC در حالت هدایت دوفاز | ۳۰ |
| ۱-۳-۲-۱: کنترل مستقیم گشتاور بر اساس الگوریتم معمول در موتورهای القایی | ۳۲ |
| ۲-۳-۲-۱: کنترل مستقیم گشتاور بدون استفاده از مرجع شار استاتور و با استفاده از حسگر موقعیت دقیق | ۳۵ |
| ۳-۳-۲-۱: کنترل مستقیم گشتاور به همراه تخمین موقعیت روتور با استفاده از رویتر لغزشی شار روتور | ۳۷ |
| ۴-۳-۲-۱: کنترل مستقیم گشتاور به همراه تخمین موقعیت تصحیح شده روتور با استفاده از رویتر لغزشی شار روتور | ۴۰ |
| ۲-۳-۲: کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC در حالت هدایت سه فاز | ۴۲ |
| ۱-۲-۳-۲: کنترل مستقیم گشتاور و غیر مستقیم شار موتور BLDC بدون حسگر موقعیت | ۴۳ |
| ۴-۲: نتیجه گیری | ۴۹ |
| فصل سوم: تحلیل ریپل گشتاور ناشی از کموتاسیون جریان فاز در موتورهای BLDC | ۵۰ |
| ۱-۳: مقدمه | ۵۰ |
| ۲-۳: توالی کموتاسیون | ۵۱ |
| ۳-۳: تحلیل کموتاسیون | ۵۲ |

| | | |
|---|---|----|
| ۴-۳ | گشتاور حین کموتاسیون | ۵۵ |
| ۵-۳ | معرفی چند روش کاهش ریپل گشتاور در موتور BLDC | ۵۶ |
| ۱-۵-۳ | روش زاویه پیش فازی | ۵۶ |
| ۱-۱-۵-۳ | محاسبه مقدار بهینه زاویه پیشفازی | ۵۷ |
| ۲-۵-۳ | روش کنترل جریان PWM اصلاح شده | ۵۹ |
| ۶-۳ | تحلیل کموتاسیون درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه با هدایت دوفاز | ۶۲ |
| ۷-۳ | عملکرد موتور BLDC با استفاده از اینورتر چهار سوئیچه | ۶۲ |
| ۱-۷-۳ | مدل درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه | ۶۲ |
| ۲-۷-۳ | تنظیم جریان برای درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه | ۶۲ |
| ۸-۳ | تحلیل کموتاسیون | ۶۴ |
| ۱-۸-۳ | رفتار جریان فاز در کموتاسیون | ۶۴ |
| ۲-۷-۳ | کموتاسیون در سکتورهای متفاوت | ۶۵ |
| ۱-۲-۸-۳ | سکتور II | ۶۵ |
| ۲-۲-۸-۳ | سکتور IV | ۶۸ |
| ۳-۲-۸-۳ | سکتور VI | ۷۰ |
| ۹-۳ | ریپل گشتاور در کموتاسیون ها | ۷۲ |
| ۱-۹-۳ | گشتاور در حین کموتاسیون | ۷۲ |
| ۱-۱-۹-۳ | سکتور II | ۷۲ |
| ۲-۱-۹-۳ | سکتور IV | ۷۳ |
| ۳-۱-۹-۳ | سکتور VI | ۷۳ |
| ۱۰-۳ | تحلیل نتایج تئوری | ۷۴ |
| ۱۱-۳ | نتایج شبیه سازی تنظیم جریان برای درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه | ۷۶ |
| ۱۲-۳ | نتیجه گیری | ۷۹ |
| فصل چهارم: کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه | | |
| ۱-۴ | مقدمه | ۸۰ |
| ۲-۴ | کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت دوفاز | ۸۱ |
| ۱-۲-۴ | طرح کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه | ۸۱ |
| ۱-۱-۲-۴ | کنترل گشتاور الکترومغناطیسی با انتخاب بردارهای فضایی ولتاژ | ۸۴ |
| ۲-۲-۴ | روش پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت دوفاز با کاهش ریپل گشتاور | ۸۹ |
| ۳-۲-۴ | نتایج شبیه سازی در حالت هدایت دوفاز | ۹۱ |
| ۱-۳-۲-۴ | نتایج شبیه سازی کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه بدون حضور کنترل کننده شار استاتور | ۹۱ |
| ۲-۳-۲-۴ | نتایج شبیه سازی کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه پیشنهادی در حالت هدایت دوفاز | ۹۴ |
| ۳-۳-۲-۴ | نتایج شبیه سازی کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه طرح پیشنهادی در دو جهت موافق و مخالف عقربه های ساعت | ۹۷ |

| | |
|---|-----|
| ۴-۳-۲-۴: نتایج شبیه سازی کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه طرح پیشنهادی | ۹۷ |
| در دو جهت موافق و مخالف عقربه های ساعت با کنترل سرعت | ۹۷ |
| ۴-۳-۲-۵: تحلیل نتایج شبیه سازی | ۹۹ |
| ۳-۴: کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت سه فاز | ۱۰۰ |
| ۱-۳-۴: کنترل مستقیم گشتاور و غیرمستقیم شار موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه | ۱۰۲ |
| ۴-۴: نتایج شبیه سازی روش پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت سه فاز | ۱۰۴ |
| ۵-۴: نتیجه گیری | ۱۰۸ |
| فصل پنجم: کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه بدون حسگر موقعیت | ۱۰۹ |
| ۱-۵: مقدمه | ۱۰۹ |
| ۲-۵: معرفی روشهای تعیین موقعیت | ۱۱۰ |
| ۱-۲-۵: روشهای تعیین موقعیت با حسگر | ۱۱۰ |
| ۲-۲-۵: تعیین موقعیت بدون حسگر | ۱۱۰ |
| ۱-۲-۲-۵: روشهای تعیین موقعیت بدون حسگر مبتنی بر تخمین ولتاژ ضدمحرکه | ۱۱۰ |
| ۲-۲-۲-۵: روش اصلاح شده آشکارسازی مستقیم نیروی ضدمحرکه برای کاربردهای ولتاژ پایین | ۱۱۳ |
| ۳-۲-۲-۵: تخمین نیروی ضدمحرکه به روش لغزش | ۱۱۶ |
| ۴-۲-۲-۵: روش تعیین موقعیت روتور توسط تخمین شار استاتور | ۱۱۷ |
| ۵-۲-۲-۵: روش تخمین موقعیت روتور از روی تابع انتقال | ۱۱۸ |
| ۳-۵: روش تخمین موقعیت برای طرح پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت دو فاز | ۱۲۰ |
| ۴-۵: نتایج شبیه سازی روش پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در حالت دوفاز بدون حسگر موقعیت و با استفاده از تخمین نیروی ضدمحرکه با مشاهده گر مد لغزشی | ۱۲۳ |
| ۵-۵: روش تخمین نیروی ضدمحرکه مورد استفاده برای طرح پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور و غیر مستقیم شار موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت سه فاز | ۱۳۳ |
| ۶-۵: نتایج شبیه سازی روش پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در حالت سه فاز بدون حسگر موقعیت و با استفاده از تخمین نیروی ضدمحرکه با مشاهده گر مد لغزشی | ۱۳۳ |
| ۷-۵: نتیجه گیری | ۱۳۹ |
| فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات | ۱۴۱ |
| ۱-۶: نتیجه گیری | ۱۴۱ |
| ۲-۶: پیشنهادات | ۱۴۳ |
| مراجع انگلیسی | ۱۴۴ |
| مراجع فارسی | ۱۴۵ |

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: استاتور موتور BLDC ۱۴
- شکل ۲-۱: نیروی محرکه بازگشتی دوزنقه ای شکل ۱۴
- شکل ۳-۱: نیروی محرکه بازگشتی سینوسی شکل ۱۵
- شکل ۴-۱: منحنی هیستریزیس مناسب برای ماشینهای BLDC ۱۶
- شکل ۵-۱: خروجی حسگرهای اثر هال، جریان فازها، گشتاور خروجی و ولتاژ ضدمحرکه ۲۰
- شکل ۶-۱: دیاگرام سیستم کنترل موتور BLDC ۲۱
- شکل ۱-۲: سه قسمت اصلی درایو موتور BLDC ۲۵
- شکل ۲-۲: ساختار کلی کنترل جریان هیستریزیس برای یک موتور BLDC ۲۶
- شکل ۳-۲: (الف) دیاگرام کنترل PWM جریان در نرم افزار MATLAB، (ب) دیاگرام تولید PWM ۲۷
- شکل ۴-۲: شماتیک کنترل PWM جریان با تکنیک شکل دهی جریان ۲۸
- شکل ۵-۲: مدل موتور BLDC ۲۹
- شکل ۶-۲: بلوک دیاگرام کنترل از طریق لینک DC جریان ۳۰
- شکل ۷-۲: (الف) بردارهای مجاز فعال، (ب) دیاگرام فضایی بردارهای فعال و غیرفعال ۳۱
- شکل ۸-۲: دیاگرام کنترل مستقیم گشتاور بر اساس الگوریتم معمول در موتورهای القایی ۳۳
- شکل ۹-۲: نمای شار استاتور ایده آل (شش ضلعی) و غیرایده آل (خطوط انحنا دار ضخیم) در حالت شش سوئیچ ۳۴
- شکل ۱۰-۲: نمودار گشتاور طرح کنترل مستقیم گشتاور با استفاده از مرجع شار استاتور ۳۴
- شکل ۱۱-۲: بلوک دیاگرام الگوریتم کنترل مستقیم گشتاور بدون استفاده از مرجع شار استاتور و با استفاده از حسگر ۳۵
- شکل ۱۲-۲: نمودار گشتاور کنترل مستقیم گشتاور بدون استفاده از مرجع شار استاتور ۳۶
- شکل ۱۳-۲: نمایش بردارهای جریان و نیروی ضدمحرکه ۳۸
- شکل ۱۴-۲: بلوک دیاگرام کنترل مستقیم گشتاور به همراه تخمین موقعیت روتور با استفاده از رویکرد لغزشی شار روتور ۳۹
- شکل ۱۵-۲: بلوک دیاگرام کنترل مستقیم گشتاور به همراه تخمین موقعیت تصحیح شده روتور با استفاده از رویکرد لغزشی شار روتور ۴۱
- شکل ۱۶-۲: نمودار گشتاور طرح کنترل مستقیم گشتاور به همراه تخمین موقعیت تصحیح شده روتور با استفاده از رویکرد لغزشی شار روتور ۴۱
- شکل ۱۷-۲: (الف) بردارهای مجاز فعال، (ب) دیاگرام فضایی بردارهای فعال و غیرفعال ۴۲
- شکل ۱۸-۲: نمای شار استاتور در محور ساکن ۴۳
- شکل ۱۹-۲: بلوک دیاگرام طرح کنترل مستقیم گشتاور و غیر مستقیم شار موتور BLDC با هدایت سه فاز بدون حسگر موقعیت ۴۴
- شکل ۲۰-۲: نتایج شبیه سازی طرح کنترل مستقیم گشتاور و غیر مستقیم شار در حالت هدایت سه فاز با تغییر گشتاور از ۰/۵ به ۰/۲۵ در لحظه $t = 1 \text{ sec}$ ۴۷
- شکل ۲۱-۲: نتایج شبیه سازی طرح کنترل مستقیم گشتاور و غیر مستقیم شار در حالت هدایت سه فاز با تغییر i_{ds}^* از صفر به منفی نیم در لحظه $t = 1 \text{ sec}$ ۴۸
- شکل ۱-۳: مراحل کموتاسیون ۵۱
- شکل ۲-۳: محاسبه جریان برای شکل (۳-۱-الف) ۵۳

| | |
|--|-----|
| شکل ۳-۳: محاسبه جریان برای شکل (۳-۱-ب)..... | ۵۳ |
| شکل ۴-۳: محاسبه جریان برای شکل (۳-۱-ج)..... | ۵۴ |
| شکل ۵-۳: الف) اعمال روش زاویه پیشفازی، ب) شکل موجهای جریان استاتور و ولتاژ..... | ۵۷ |
| شکل ۶-۳: مؤلفه جریان و ولتاژ ضدمحرکه روی محور q..... | ۵۸ |
| شکل ۷-۳: الگوی کلیدزنی در لحظات کموتاسیون در سرعت های پایین..... | ۵۹ |
| شکل ۸-۳: الگوی کلیدزنی در لحظات کموتاسیون در سرعت های بالا..... | ۶۱ |
| شکل ۹-۳: دیاگرام کنترل PWM اصلاح شده..... | ۶۱ |
| شکل ۱۰-۳: شکل موج جریان و نیروی محرکه سه فاز موتور BLDC..... | ۶۳ |
| شکل ۱۱-۳: بلوک دیاگرام درایو موتور BLDC با اینورتر سه فاز چهار سوئیچ..... | ۶۴ |
| شکل ۱۲-۳: رفتار جریان در حین کموتاسیون..... | ۶۵ |
| شکل ۱۳-۳: توالی کموتاسیون در سکتور II..... | ۶۸ |
| شکل ۱۴-۳: توالی کموتاسیون در سکتور IV..... | ۶۹ |
| شکل ۱۵-۳: توالی کموتاسیون در سکتور VI (الف) قبل از کموتاسیون، (ب) کموتاسیون با یک سوئیچ و یک دیود، (ج) کموتاسیون با دو دیود، (د) بعد از کموتاسیون..... | ۷۱ |
| شکل ۱۶-۳: دامنه ریپل نسبی گشتاور در سکتورهای متفاوت..... | ۷۵ |
| شکل ۱۷-۳: کموتاسیون در سکتورهای متفاوت..... | ۷۵ |
| شکل ۱۸-۳: بلوک دیاگرام تنظیم جریان برای درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ..... | ۷۶ |
| شکل ۱۹-۳: نتایج شبیه سازی تنظیم جریان برای درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ..... | ۷۸ |
| شکل ۱-۴: بلوک دیاگرام طرح کنترل مستقیم گشتاور درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ..... | ۸۱ |
| شکل ۲-۴: نمودارهای جریان و Back-EMF سه فاز و گشتاور فاز برای درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ..... | ۸۲ |
| شکل ۳-۴: نمای شار استاتور ایده آل (شش ضلعی) و غیرایده آل (خطوط انحنا دار ضخیم) در حالت چهار سوئیچ..... | ۸۴ |
| شکل ۴-۴: شکل بردارهای ولتاژ بکار رفته در طرح DTC موتور BLDC چهار سوئیچ با حالت هدایت دو فاز..... | ۸۵ |
| شکل ۵-۴: نمودار جریان فازها و گشتاور..... | ۸۷ |
| شکل ۶-۴: کنترل گشتاور فاز a و b به صورت جداگانه در سکتورهای II و V..... | ۸۸ |
| شکل ۷-۴: نتایج شبیه سازی با حضور کنترل شار استاتور..... | ۸۸ |
| شکل ۸-۴: بلوک دیاگرام طرح کنترل مستقیم گشتاور پیشنهادی درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ در حالت هدایت دوفاز..... | ۹۰ |
| شکل ۹-۴: نتایج شبیه سازی بدون حضور کنترل کننده شار استاتور بر اساس مرجع [۱۸]..... | ۹۳ |
| شکل ۱۰-۴: نتایج شبیه سازی طرح پیشنهادی..... | ۹۶ |
| شکل ۱۱-۴: نتایج شبیه سازی طرح پیشنهادی در دو جهت ساعتگرد و پادساعتگرد در حالت کنترل گشتاور مرجع..... | ۹۷ |
| شکل ۱۲-۴: نتایج شبیه سازی طرح پیشنهادی در دو جهت ساعتگرد و پادساعتگرد با کنترل سرعت..... | ۹۹ |
| شکل ۱۳-۴: الف) بردارهای مجاز، ب) دیاگرام فضایی بردارهای مجاز..... | ۱۰۱ |
| شکل ۱۴-۴: مکان هندسی شار استاتور..... | ۱۰۳ |
| شکل ۱۵-۴: بلوک دیاگرام طرح پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور و غیر مستقیم شار موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ در حالت هدایت سه فاز..... | ۱۰۴ |
| شکل ۱۶-۴: نتایج شبیه سازی طرح کنترل مستقیم گشتاور و غیر مستقیم شار در حالت هدایت سه فاز با $i_{ds}^* = -4$ | ۱۰۶ |
| | ۱۰۷ |

| | |
|--|-----|
| شکل ۴-۱۷: نتایج شبیه سازی طرح کنترل مستقیم گشتاور و غیر مستقیم شار در حالت هدایت سه فاز با کاهش i_{ds}^* | |
| از ۴- به ۸-..... | ۱۰۷ |
| شکل ۵-۱: شکل اینورتر، توالی کموتاسیون جریان و الگوریتم PWM..... | ۱۱۲ |
| شکل ۵-۲: روش مستقیم آشکارسازی نیروی ضد محرکه با میکروکنترلر..... | ۱۱۲ |
| شکل ۵-۳: مدل موتور BLDC در حال هدایت فاز A, B..... | ۱۱۳ |
| شکل ۵-۴: الگوریتم PWM متمم..... | ۱۱۵ |
| شکل ۵-۵: مدار آشکارساز عبور از صفر نیروی ضد محرکه..... | ۱۱۵ |
| شکل ۵-۶: مشخصه تابع G0 برای تخمین موقعیت روتور از روی تابع انتقال..... | ۱۱۹ |
| شکل ۵-۷: بلوک دیاگرام طرح پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ در حالت هدایت دوفاز بدون حسگر موقعیت..... | ۱۲۰ |
| شکل ۵-۸: بلوک دیاگرام مشاهده گر مد لغزشی با فیلتر پایین گذر..... | ۱۲۳ |
| شکل ۵-۹: نتایج شبیه سازی شکل موجهای جریان طرح پیشنهادی..... | ۱۲۵ |
| شکل ۵-۱۰: نتایج شبیه سازی شکل موجهای Back-EMF طرح پیشنهادی..... | ۱۲۵ |
| شکل ۵-۱۱: نتایج شبیه سازی شکل موجهای گشتاور طرح پیشنهادی..... | ۱۲۶ |
| شکل ۵-۱۲: نتایج شبیه سازی سرعت و موقعیت طرح پیشنهادی..... | ۱۲۸ |
| شکل ۵-۱۳: بلوک دیاگرام طرح پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ در حالت هدایت دوفاز بدون حسگر موقعیت با کنترل سرعت در دو جهت ساعتگرد و پادساعتگرد..... | ۱۲۹ |
| شکل ۵-۱۴: نتایج شبیه سازی روش پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ در حالت هدایت دوفاز بدون حسگر موقعیت و با استفاده از تخمین نیروی ضد محرکه با مشاهده گر لغزشی همراه با کنترل سرعت در دو جهت ساعتگرد و پادساعتگرد..... | ۱۳۲ |
| شکل ۵-۱۵: بلوک دیاگرام طرح پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ در حالت هدایت سه فاز بدون حسگر موقعیت..... | ۱۳۳ |
| شکل ۵-۱۶: نتایج شبیه سازی طرح پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور و غیر مستقیم شار موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ در حالت هدایت سه فاز بدون حسگر موقعیت با $i_{ds}^* = -4$ | ۱۳۷ |
| شکل ۵-۱۷: نتایج شبیه سازی طرح پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور و غیر مستقیم شار موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ در حالت هدایت سه فاز بدون حسگر موقعیت با کاهش i_{ds}^* از ۴- به ۸-..... | ۱۳۸ |

فهرست جداول

| | |
|--|-----|
| جدول ۱-۱: مشخصات چند نمونه آهنربای دائم | ۱۶ |
| جدول ۱-۲: جدول کلیدزنی موتور BLDC به منظور چرخش در جهت عقربه های ساعت | ۲۱ |
| جدول ۱-۳: جدول کلیدزنی موتور BLDC به منظور چرخش درخلاف جهت عقربه های ساعت | ۲۲ |
| جدول ۱-۴: مقایسه بین موتورهای DC بدون جاروبک و موتور DC | ۲۴ |
| جدول ۱-۵: مقایسه بین موتورهای DC بدون جاروبک با موتورهای القایی | ۲۴ |
| جدول ۱-۲: الگوی کلیدزنی با استفاده از شار استاتور | ۳۳ |
| جدول ۲-۲: الگوی کلیدزنی با استفاده از حسگر موقعیت بسیار دقیق | ۳۶ |
| جدول ۲-۳: جدول کلیدزنی کنترل مستقیم گشتاور با استفاده از تخمین ولتاژ ضدمحرکه | ۳۹ |
| جدول ۲-۴: الگوی کلیدزنی کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با حالت هدایت سه فاز | ۴۳ |
| جدول ۲-۵: پارامترهای موتور مورد شبیه سازی | ۴۸ |
| جدول ۱-۴: معادله گشتاور الکترومغناطیسی برای نواحی عملکرد | ۸۳ |
| جدول ۲-۴: انتخاب بردار ولتاژ اینورتر درایو DTC موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه | ۸۴ |
| جدول ۳-۴: انتخاب بردار ولتاژ برای سکتورهای II و V برای برای DTC موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه | ۸۶ |
| جدول ۴-۴: انتخاب بردار ولتاژ درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت دوفاز طرح پیشنهادی در جهت خلاف عقربه های ساعت (CCW) | ۸۹ |
| جدول ۴-۵: انتخاب بردار ولتاژ درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت دوفاز طرح پیشنهادی در جهت عقربه های ساعت (CW) | ۸۹ |
| جدول ۴-۶: الگوی کلیدزنی طرح پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت سه فاز | ۱۰۳ |

مقدمه

با مقایسه موتورهای DC بدون جاروبک (BLDC¹) با موتورهای القایی و DC دیده می‌شود که این موتورها مزیت‌های بسیار نسبت به سایر موتورها دارند. مزایایی چون نویز پایین، راندمان بالا، کاهش تلفات حرارتی، طول عمر زیاد، هزینه نگهداری کم و کنترل ساده و آسان، باعث شده در صنایعی نظیر خودروسازی و صنایع فضایی کاربرد وسیع داشته باشند.

یکی از ویژگی‌های موتور BLDC این است که نیازی به حسگرهای موقعیت پیوسته نداشته و به علت نوع سیم‌پیچی‌های استاتور با استفاده از حسگرهای گسسته می‌توان این موتور را در سرعت‌های پایین کنترل کرد. اما با افزایش سرعت دیگر این حسگر کارایی لازم را نخواهند داشت. از سوی دیگر حسگرهای موقعیت گسسته علیرغم ارزان بودن نسبت به حسگرهای پیوسته نیاز به محاسبات پیچیده‌تر و تکنولوژی پیشرفته برای جایگزین آنها در موتور دارند.

استفاده از حسگر اثر هال در موتور BLDC علاوه بر کاهش قابلیت اطمینان آن باعث افزایش قیمت و پیچیدگی مجموعه درایو نیز می‌شود. از این‌رو تحقیقات وسیعی در راستای حذف حسگر موقعیت و استفاده از روشهای محاسباتی تاکنون صورت گرفته است. در ابتدا کارهای انجام شده را مرور کرده و در نهایت به معرفی فصول پایان نامه می‌پردازیم.

الف: مروری بر کارهای انجام شده

بطور کلی از روش‌های بسیار معمول برای کنترل موتور BLDC کنترل جریان هیستریزس و PWM جریان هستند که در [۱،۲] مطرح شده است. ایده کلی کنترلی در این روش‌ها بر این اساس است که موتور BLDC را همانند موتورهای DC معمول در نظر گرفته و رابطه خطی بین جریان و گشتاور آنها فرض می‌شود. اما همانگونه که می‌دانیم در شرایط دینامیکی رفتار این موتور خطی نمی‌باشد و اگر واقعاً بدنبال تخمین دقیق گشتاور و کنترل بلادرنگ آن باشیم، در نظر گرفتن مشخصه این موتور بصورت خطی آن‌چنان سودمند به نظر نمی‌رسد. از سوی دیگر وجود بلوک PI به علت وابستگی شدید آن به پارامترهای سیستم و مشکلات در تنظیم ضرایب آن از دیگر عیوب این روش‌ها است. در ضمن نحوه کلیدزنی در کنترل‌های PWM و هیستریزس جریان باعث ایجاد ریپل گشتاور در لحظات کموتاسیون می‌شود. البته برجسته‌ترین ویژگی این روش‌ها حجم کم در محاسبات و سادگی در محاسبات آنها می‌باشد.

برای کاهش ریپل گشتاور روشی در [۳] تحت عنوان کنترل PWM جریان با شکل‌دهی جریان مطرح شده است که با افزودن بلوک‌هایی به ساختار PWM و هیستریزس جریان ریپل را کاهش می‌دهد در حالی که خود باعث افزایش حجم محاسبات و پیچیدگی بیشتر سامانه کنترلی می‌شود.

در روش DTC که هدف اصلی کنترل مستقیم گشتاور الکتریکی موتور با در نظر گرفتن حالات دینامیکی آن و در حقیقت کنترل گشتاور الکتریکی در حالات دینامیکی می‌باشد. از این‌رو روش‌های متعددی برای نحوه کلیدزنی و نیز انتخاب پارامترهای کنترلی وجود دارد، بطور کلی در موتورهای BLDC تا سال ۲۰۰۷ تنها ۲ روش مورد بحث قرار گرفته که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارد [۴،۵،۶].

در روش کنترل مستقیم گشتاور بر اساس الگوریتم معمولی موتور دارای چند عیب عمده است [۴]. اولین عیب عمده آن استفاده از بردار صفر و V_0 می‌باشد که باعث اثرات نامطلوب بر روی جریان می‌شود و به خوبی در مرجع [۵] به آن اشاره شده است.

روش کنترل مستقیم گشتاور بدون استفاده از مرجع شار استاتور و با استفاده از حسگر موقعیت بسیار دقیق [۵،۶]، الگوی کلیدزنی ساده و خوبی دارد که کاملاً مشابه الگوی کلیدزنی در هیستریزس جریان می‌باشد و عمده عیب این روش ریپل بالای گشتاور آن در حدود ۵۰٪ است که اصلاً قابل قبول نمی‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد که باید ایده‌ای را دنبال کرد که هدف آن کاهش ریپل و معرفی روش برای کنترل در تمام سرعت‌های کاری موتور باشد.

از جمله روش‌های کاهش ریپل گشتاور در موتور BLDC، روش اعمالی زاویه پیش‌فازی به جریان استاتور که در [۷] مطرح شده، ایده بسیار خوب و جامعی به نظر می‌رسد، اما عمده اشکال آن نداشتن یک رابطه مشخص برای محاسبه میزان خطای قابل جبران است. بدین معنا که در این روش بر حسب تجربه طراح بسته به ساختار سامانه طراحی شده و سرعت‌های مختلفی که موتور در آن‌ها کار خواهد کرد و نیز مشخصات موتور، مجموعه مقادیر ثابتی به ازای شرایط مختلف بصورت جدول در نظر گرفته شده و در الگوریتم کنترلی لحاظ می‌شود.

روش دیگری که برای کاهش ریپل، روش کنترل جریان PWM اصلاح شده که در [۸] مطرح شده است، یکی از روش‌های بسیار خوب در الگوریتم کنترلی PWM جریان است و کارآمدی قابل قبول دارد، اما این روش تنها برای PWM جریان کاربرد دارد و نسبتاً حجم محاسبات بالایی را شامل می‌شود و به علت آنکه هدف ما کنترل دقیق گشتاور است، انتخاب خوبی نمی‌تواند باشد.

روش‌های تعیین موقعیت بدون حسگر با استفاده از تخمین مستقیم نیروی ضد محرکه در [۹] بیان شده و روش اصلاح شده آن [۱۰]، همگی این عیب عمده را دارند که در سرعت‌های پایین به علت کوچک بودن سیگنال به نوبت آن دارای اغتشاشات زیادی است. البته از مدارات تقویت‌کننده و فیلترهایی بسته به نوع موتور استفاده می‌شود تا این عیب مرتفع گردد. عیب دیگر این روش آن است که به علت آنکه در این روش عبور از صفر نیروی ضد محرکه تشخیص داده می‌شود نیازمند آن است که همواره ۳۰ درجه بعد فاز مورد نظر تحریک گردد که این عامل نیز مشکلات خاص خود را دارد. علاوه بر نکات فوق عامل اشباع که در اثر سرعت‌های مختلف ممکن است مدار آشکارساز دچار آن شود نیز نباید فراموش کرد.

روش تخمین نیروی ضد محرکه به روش کنترل مود لغزش^۲ که در [۱۱،۱۲] ذکر شده بسیار متداول بوده و اگر حجم محاسبات نه چندان زیاد آن در نظر گرفته شود، ایده بسیار خوب با دقت قابل قبول است که امکان ترکیب آن با روش‌های کنترل تطبیقی و هوشمند برای همگرایی هر چه بهتر آن و مقاوم بودن بیشتر در برابر نامعینی‌های موتور را سبب می‌گردد. تنها عیبی که این روش را تحت تاثیر قرار می‌دهد اثرات ذاتی این روش که به صورت اثرات کلیدزنی خود را نمایان می‌سازد، است که با قرار دادن یک فیلتر پایین‌گذر بسیار ضعیف می‌توان آن را تا حد قابل قبولی جبران کرد. این روش نه تنها در تعیین موقعیت بلکه بیشتر در تخمین نیروی ضد محرکه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

روش دیگری به عنوان تخمین موقعیت توسط شار استاتور در [۱۳] معرفی شده است که یک روش اقتباس شده از موتورهای القایی است که با توجه به ساختار موتور BLDC و شکل خاص جریان‌های آن بطور کلی مردود بوده و دارای خطای زیاد و متغیری است.

روش دیگری که به عنوان بهترین و دقیق‌ترین روش و دارای گستره عملیاتی وسیعی در سرعت‌های مختلف می‌باشد که به عنوان روش تخمین وضعیت حسگرهای اثر هال در [۱۴] معرفی شده است. تنها عیب این روش را می‌توان در این موضوع خلاصه کرد که تنها قابلیت تخمین لحظات کموتاسیون را دارد و به عنوان یک تخمین‌گر موقعیت پیوسته روتور نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. نهایتاً باید روشی را معرفی کرد که تمام ویژگی‌های تخمین وضعیت حسگرهای اثر هال را داشته باشد و همچنین بطور پیوسته و با دقت بالا موقعیت روتور را تخمین بزند.

روشی برای کنترل مستقیم گشتاور موتورهای BLDC در [۴] ارائه شده که علاوه بر کنترل گشتاور با بهره‌وری بالا امکان کار بدون حسگر موقعیت را نیز فراهم می‌سازد. اهداف طرح عبارتند از: (۱) کاهش ریپل گشتاور، (۲) معرفی یک روش بدون حسگر که با کمترین خطا و در بیشترین بازه تغییرات سرعت جوابگو باشد. از این رو سعی شد تا به جای استفاده از شار استاتور که پارامتر خوبی برای سامانه کنترلی نمی‌باشد، پارامترهای بهتری با کارایی بالاتر برای سامانه کنترلی معرفی شود تا علاوه بر کاهش ریپل، کارایی سامانه کنترلی را نیز بالا ببرد.

روش تعیین موقعیت روتور توسط تخمین‌گر شار روتور در [۱۵] بیان شده است که در این روش از یک تصحیح‌کننده موقعیت روتور تخمینی استفاده می‌شود. از آنجا که در پیاده‌سازی ما نیازمند فیلترهای بالاگذر برای حذف DC سنسورهای اندازه‌گیری هستیم که مسلماً این فیلترها تأخیر ایجاد می‌کنند و ایده‌آل نخواهند بود. از سوی دیگر در سرعت‌های پایین با حالت‌های دینامیکی که تغییرات ناگهانی در جریان موتور ایجاد می‌شود نیاز به یک تصحیح‌کننده کاملاً احساس می‌شود [۱۶].

در این رساله کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ بدون حسگر موقعیت مورد بررسی قرار گرفته است. کنترل مستقیم گشتاور مشابه کنترل برداری مبتنی بر شار استاتور می‌باشد که جزئیات آن‌ها با هم متفاوت است. بطور کلی در موتورهای BLDC تا سال ۲۰۱۰ تنها دو روش برای درایو این موتور با اینورتر چهار سوئیچ در حالت هدایت دوفاز مورد بحث قرار گرفته که هر دو روش در یک مقاله بررسی شده است. در ابتدا روش مطرح شده مورد بررسی قرار گرفته و سپس به منظور کاهش ریپل گشتاور روش پیشنهادی مطرح شده است. همچنین برای اولین بار کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ در حالت هدایت سه‌فاز بیان گردیده است.

همچنین به منظور حذف حسگر موقعیت از روش تخمین نیروی ضد محرکه به روش رویترگر لغزشی استفاده شده است و اگر حجم محاسبات نه چندان زیاد آن در نظر گرفته شود، ایده بسیار خوب با دقت قابل قبول است که امکان ترکیب آن با روش‌های کنترل تطبیقی و هوشمند برای همگرایی هر چه بهتر آن و مقاوم بودن بیشتر در برابر نامعینی‌های موتور را سبب می‌گردد.

ب: معرفی فصول پایان نامه

در فصل اول ضمن معرفی موتور BLDC، مزایا و معایب آن مطرح شده است. در فصل دوم برخی از روش‌های متداول و کارآمد کنترل موتور BLDC با اینورتر شش سوئیچه مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل سوم به تحلیل کموتاسیون ریپل گشتاور درایو موتور BLDC با اینورتر شش سوئیچه و چهار سوئیچه پرداخته شده است. در فصل چهارم کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت دو فاز با نرم افزار مطلب شبیه‌سازی شده است و سپس روش پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور با اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت دوفاز شبیه‌سازی شده است و در نهایت روش پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور با اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت سه‌فاز شبیه‌سازی شده است. در فصل پنجم به تحلیل روش‌های موجود برای تخمین نیروی ضدحرکه پرداخته و مزایا و معایب این روش‌ها بیان شده است و در نهایت با استفاده از تکنیک روینگر لغزشی، روش‌های پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور با اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت دوفاز و سه‌فاز با نرم افزار مطلب شبیه‌سازی شده است.

فصل اول

اصول کارکرد و مشخصات موتور DC بدون جاروبک (BLDC)

۱-۱: مقدمه

ارائه نظریه مربوط به موتورهای DC بدون جاروبک به بیش از نیم قرن پیش باز می‌گردد، زمانی که تنها عناصر کلیدی موجود و قابل دسترس تایپوترون‌ها بودند. تنها در سال‌های اخیر (در طول دو دهه گذشته یا بیشتر) بوده که سامانه‌های مؤثر و ارزشمندی ساخته شده‌اند. دو مورد از مهمترین عواملی که به افزایش محبوبیت این نوع محرک منجر گردیده، مربوط به بهبودهایی است که در زمینه مواد آهنربائی و کاهش قیمت مدارهای مجتمع (ICها) و کلیدهای الکترونیک قدرت صورت گرفته است. پیشرفت اخیر کلیدهای نیمه هادی ولتاژ بالا، جریان بالا، باعث شده تا ساخت این قبیل سامانه‌ها برای کاربردهای صنعتی مختلف عملی شود. هم‌اکنون مجموعه‌ای از محرکه‌های DC بدون جاروبک در دست تولید است که با کاهش قیمت، افزایش سادگی و قابلیت اطمینان بهتر اجزاء الکترونیکی، باز هم جذابتر خواهند شد.

موتور DC بدون جاروبک به عنوان یک موتور کنترل توان کم به‌طور گسترده‌ای به کار می‌رود. این سیستم دارای ظاهر فیزیکی شبیه یک ماشین سنکرون سه‌فاز مغناطیس دائم است. این ماشین عموماً از یک اینورتر شش‌پالسه تغذیه می‌شود که یک ولتاژ ثابت را به ولتاژهای سه‌فاز با فرکانس متناظر با سرعت لحظه‌ای روتور تبدیل می‌کند. ترکیب اینورتر-ماشین دارای مشخصه‌های پایانه و خروجی شبیه به موتور DC سنت است، بنابراین آن را موتور DC بدون جاروبک می‌نامیم.

موتورهای DC بدون جاروبک مشخصه‌های مطلوب دو موتور معمول را با یکدیگر ترکیب می‌کنند، آن‌ها ضمن آنکه قابلیت گشتاور ایستای موتور معمول DC با جاروبک را دارند، قابلیت عملکرد سرعت بالای مربوط به

موتور رلوکتانس یا موتور القایی ac را نیز دارا می‌باشند. برخی مزایایی که سامانه‌های محرکه DC بدون جاروبک ارائه می‌کنند به صورت زیر خلاصه می‌شود.

حذف لوازم جاروبک و کموتاتور به موتور اجازه می‌دهد تا در سرعت‌های بسیار بالاتر از سرعت ماشین‌های DC متداول کار کرده و کاهش وزن و حجم موتور را به دنبال داشته باشد. علاوه بر این، عدم وجود تیغه‌های کموتاتور مشکل اکسیداسیون تیغه را برطرف می‌نماید. این مسئله به قابلیت اطمینان بیشتر منجر شده و موتور عملاً به تعمیر نیاز ندارد. در برخی کاربردها، جرقه زدن جاروبک می‌تواند خطرناک باشد، لذا برای این کاربردها بکارگیری موتور بدون جاروبک لازم و ضروری است. همچنین، نبودن جاروبک‌ها موجب حذف انواع تداخل فرکانس رادیویی می‌گردد.

استفاده از روتور آهنربای دائم منجر به حذف تلفات مسی روتور و بهبود قابل توجهی در مشخصه‌های حرارتی می‌گردد [۲۳].

گسترش و پیشرفت مواد آهنربای دائم انرژی بالا از قبیل ساماریوم-کبالت و ترکیبات نئودیمیوم-آهن-برم اجازه می‌دهد تا قطر روتور نسبت به روتور موتور معمول DC با جاروبک کوچکتر گردد. این مسئله کوچکی اینرسی روتور و در نتیجه شتاب سریعتر را موجب می‌گردد.

۱-۲: ساختار موتور BLDC

موتورهای BLDC نیز مانند سایر موتورهای الکتریکی دارای یک قسمت دوار و یک قسمت ثابت می‌باشد. این‌گونه موتورها را می‌توان مانند موتورهای سنکرون در نظر گرفت زیرا که میدان روتور و استاتور با یک فرکانس یکسان یکدیگر را دنبال می‌کنند. از دیدگاه دیگر می‌توان این‌گونه موتورها را مانند یک موتور DC در نظر گرفت که عمل کموتاسیون توسط کلیدهای الکترونیکی انجام می‌شود. از این‌رو همواره برای تعیین کلیدزنی صحیح به موقعیت روتور نیاز است. بنابراین در این‌گونه موتورها از حسگرهای موقعیت برای تعیین، موقعیت روتور استفاده می‌شود. در ادامه به بررسی قسمت‌های اصلی یک موتور BLDC می‌پردازیم.

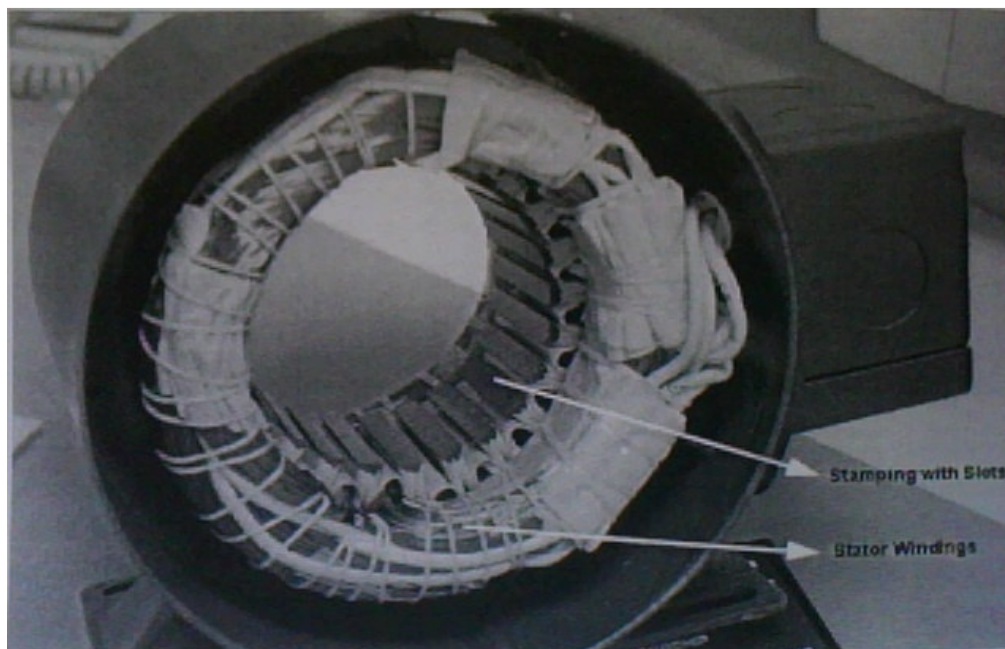
۱-۳: ساختمان استاتور موتور BLDC

همانطور که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است، استاتور موتورهای DC بدون جاروبک شامل ورق‌های فولادی و سیم‌پیچ‌هایی می‌باشد که در شیارهای درونی آن قرار گرفته است. استاتور موتورهای DC بدون جاروبک شبیه استاتور یک موتور القایی می‌باشد و تنها تفاوت در توزیع سیم‌پیچ‌های استاتور است. استاتور بیشتر موتورهای DC بدون جاروبک دارای سه سیم‌پیچ متمرکز است که به صورت ستاره به هم وصل می‌شوند. هر کدام از این سیم‌پیچ‌های متمرکز از کلاف‌هایی با تعداد دور مشخص بوجود می‌آیند.

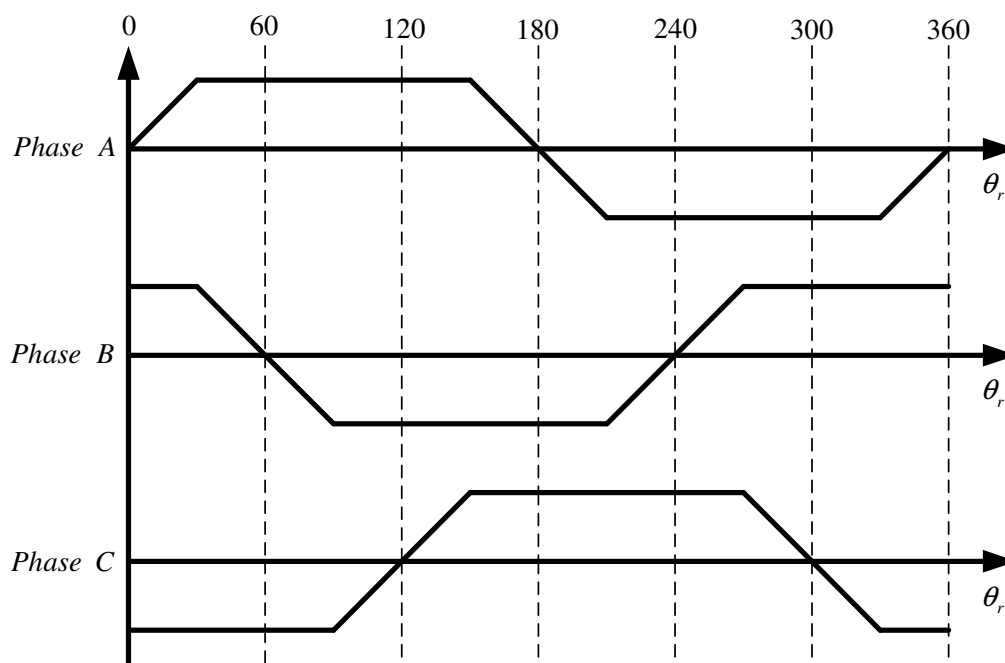
تعداد معینی از سیم‌پیچ‌ها در شیارها قرار می‌گیرند و به هم وصل می‌شوند تا کلاف‌ها را بسازند، هر کدام از این کلاف‌ها در اطراف استاتور توزیع می‌شوند تا زوج‌قطب‌ها ساخته شوند. ارتباط داخلی سیم‌پیچ‌ها در استاتور باعث می‌شود تا دو نوع متفاوت از نیروهای ضدمحرکه بوجود آیند: موتورهای با نیروی ضدمحرکه دوزنقه‌ای و موتورهای با نیروی ضدمحرکه سینوسی.

همانطور که از نام آنها مشخص است؛ موتورهای دوزنقه‌ای، نیروی ضدمحرکه به صورت دوزنقه‌ای شکل دارند و موتورهای سینوسی نیروی ضدمحرکه به شکل سینوسی دارند، این مطلب در شکل‌های (۱-۲) و (۱-۳) نشان داده شده است. علاوه بر نیروهای ضدمحرکه، جریان فاز در موتورهای دوزنقه‌ای و سینوسی با هم متفاوت است. گشتاور خروجی موتورهای سینوسی نرم‌تر از موتورهای دوزنقه‌ای است، این مسئله هزینه

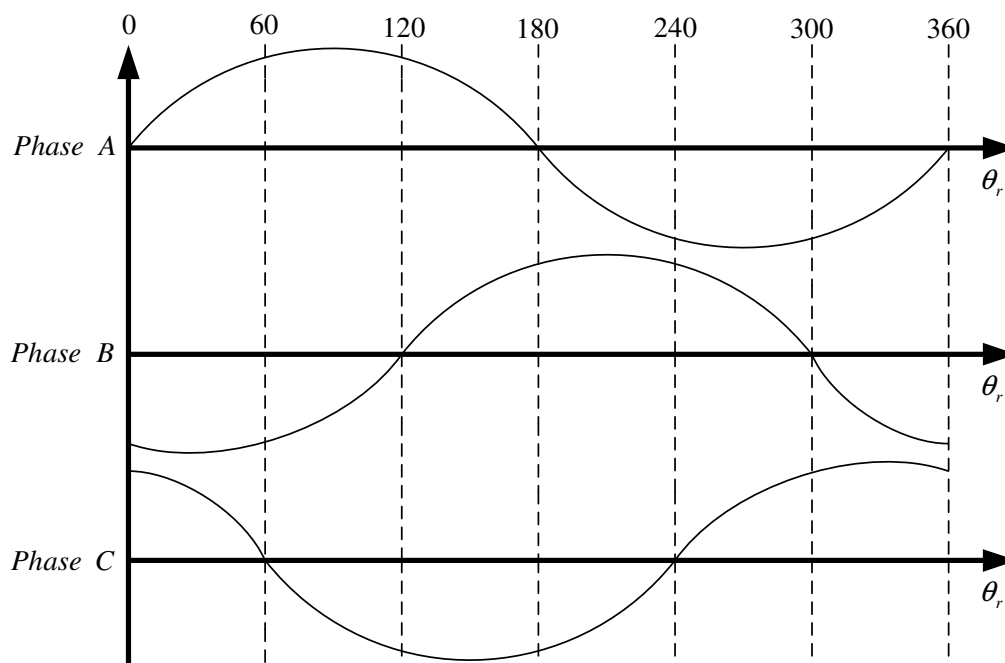
بیشتری دارد چرا که موتورهای سینوسی سیم‌پیچ‌های بیشتری به دلیل توزیع سینوسی شار فاصله هوایی در اطراف استاتور دارند و به همین سبب سیم‌پیچ‌های استاتور، مس بیشتری مصرف می‌کنند [۲۴].



شکل ۱-۱: استاتور موتور BLDC



شکل ۱-۲: نیروی محرکه بازگشتی دوزنقه‌ای شکل



شکل ۱-۳: نیروی محرکه بازگشتی سینوسی شکل

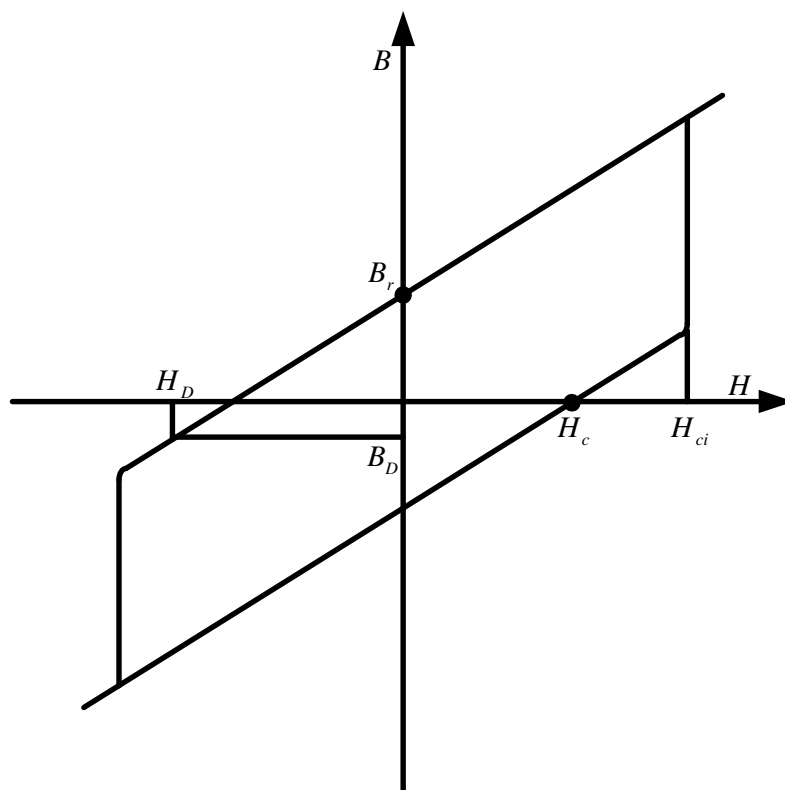
۴-۱: ساختمان روتور موتور BLDC

در موتور BLDC، روتور از آهنربای دائمی تشکیل شده که با توجه به چگالی شار مورد نیاز در روتور، ماده آهنربایی مناسب برای ساختن روتور انتخاب می‌شود. گسترش مواد مغناطیس دائم مفید به صورت تجاری در قرن بیستم شروع شد. در سال ۱۹۳۰ اولین ماده مغناطیسی که می‌توانست در وسایل الکترومکانیکی بکار رود معرفی شد. این ماده ALNICO بود که هنوز هم در کاربردهای خاص بکار می‌رود. عیب اساسی آن کوچک بودن H_c بود. در سال ۱۹۵۰ مغناطیس‌های دائم فریت (Fe_2O_3) ارائه شد که خیلی ارزانتر از مواد قبل بود و H_c قابل ملاحظه و ضریب انرژی $(BH)_{max}$ بزرگتری نسبت به مواد قبلی داشت. به خاطر مقرون به صرفه بودن تا به امروز هم این ماده کاربردهای زیادی دارد. بلندگوها و موتورهای DC کوچک، از جمله کاربردهای این مواد به شمار می‌روند. به خاطر B_r نسبتاً کم این مواد، رسیدن به چگالی شار فاصله هوایی به اندازه کافی بزرگ برای ماشین‌های با کارایی بالا مشکل بود.

پس از آن در حدود سال ۱۹۷۰ مواد مغناطیس 4 ارائه شد. به‌طور خاص می‌توان به آلیاژهای $SmCo^5$ اشاره کرد. این مواد هم B_r بزرگتری داشتند و هم H_c بزرگی داشتند که ضریب انرژی بسیار بزرگتری نسبت به فریت را قابل دستیابی قرار می‌دادند. این ویژگی‌ها باعث شد که این مواد برای ماشین‌های با کارایی بالا انتخاب بسیار مناسبی باشند.

3-Coercive force
4-rare-earth cobalt
5-Samarium- Cobalt

ولی از طرف دیگر قیمت این مواد بالا بود که استفاده از آن‌ها را محدود می‌کرد. بعد از آن تلاش بر این بود که به موادی برسند که این ویژگی‌ها را داشته باشد و در عین حال ارزان قیمت هم باشد. این تلاش‌ها به مغناطیس‌های Ndfeb^۱ منجر شد که در سال ۱۹۸۳ معرفی شدند. این مواد از SmCo ارزان‌تر بودند و حتی چگالی انرژی بیشتری داشتند. موردی که کاربرد آنها را محدود می‌کرد پایداری حرارتی پایین آنها بود. در شکل (۴-۱) منحنی هیستریزس مناسب برای ماشین‌های BLDC ترسیم شده است. این شکل به غیر از B_r و H_c دو پارامتر دیگر که مربوط به حدود ضد مغناطیس شدن آهنربای دائم است را به صورت H_D و B_D معرفی می‌کند.



شکل ۴-۱: منحنی هیستریزس مناسب برای ماشین‌های BLDC

جدول ۱-۱: مشخصات چند نمونه آهنربای دائم

| آهنربا/مشخصه | $(BH)_{max}$ | $B_T (T)$ | $H_c (KA/m)$ | قیمت واحد |
|----------------------------------|--------------|-----------|--------------|-----------|
| Nd - Fe - B | 200-290 | 1.2 | 870 | 2.3 |
| SmCo ₅ | 130-190 | 0.97 | 750 | 5.7 |
| Sm ₂ Co ₁₇ | 180-240 | 1.05 | 660 | 5.1 |
| Alnico | 70-85 | 1.1 | 130 | 2.7 |
| Ceramics | 27-35 | 0.4 | 240 | 0.3 |

۱-۵: حسگرهای موقعیت

بر خلاف موتورهای DC معمولی، کموتاسیون موتورهای DC بدون جاروبک از طریق کلیدهای الکترونیک قدرت انجام می‌شود. برای چرخاندن یک موتور BLDC، سیم‌پیچ‌های استاتور باید به ترتیب به منبع DC وصل شوند پس دانستن موقعیت روتور برای فهمیدن این مطلب که کدام سیم‌پیچ باید به منبع وصل شود لازم است. این حسگرها موقعیت آهنرباهای گردان را آشکار ساخته و کدهای منطقی را به یک رمزگشای کموتاسیون ارسال می‌کنند، رمزگشا پس از پردازش این کد، مدارهای آتش کلیدهای نیمه هادی که تامین کننده توان سیم‌پیچی استاتور موتور تحریک هستند را به کار می‌اندازد. از طریق تأثیر متقابل بین آهنرباهای دائم و جریان‌های جاری شده در سیم‌پیچی، گشتاوری ایجاد می‌شود. بدیهی است که روش‌های قابل اطمینان در حس کردن وضعیت و موقعیت روتور، همواره مستلزم تماس بین قسمت‌های متحرک و ساکن نمی‌باشد. حسگرهای عملی بدون تماس را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی نمود:

- حسگرهای نوری
- حسگرهای رلوکتانسی
- حسگرهای میدان مغناطیسی
- حسگرهای خازنی

توضیح عملکرد هر یک از این حسگرها در زیر ارائه شده است.

• حسگرهای نوری:

در این وسایل، یک منبع نور از میان یک صفحه الگو که به محور روتور متصل شده نور می‌تاباند و یک دیود حساس به نور، حضور یا غیاب نور را آشکار می‌کند. منبع نور و دیود حساس به نور هر دو ثابت هستند. مزیت اصلی این روش این است که سیگنال از دیود حساس به نور افزایش یافته و به‌طور کاملاً ناگهانی کاهش می‌یابد و لذا نقاط کلیدزنی به‌خوبی مشخص می‌شوند. سیگنال خروجی نیز DC می‌باشد، بنابراین به یکسوسازی یا فیلترنمودن نیازی نیست. معایب حسگرهای نوری قیمت بالای آنهاست و اینکه آنها به یک محیط تمیز احتیاج دارند. همچنین، این منبع نور قابلیت اطمینان کار خیلی بالایی ندارد. به‌علاوه، سیگنال خروجی از دیود حساس به نور معمولاً خیلی ضعیف است و لذا لازم است قبل از استفاده برای اهداف کنترلی تقویت گردد.

• حسگرهای رلوکتانسی:

در این روش، از یک چرخ مغناطیسی دندانه‌دار که روی محور روتور نصب شده و بین سیم‌پیچ‌های ثابت حامل قطب‌ها می‌چرخد استفاده می‌شود. در این ساختار شار ac فرکانس بالا در اطراف مدار مغناطیسی جهت داده می‌شود که دامنه سیگنال القاء شده در هر قطب سیم‌پیچ تابعی از رلوکتانس فاصله هوایی بین چرخ دندانه‌دار و قطب مربوطه است و این مقدار ثبت می‌گردد. از آنجا که رلوکتانس فاصله هوایی برحسب وضعیت روتور تغییر می‌کند، این امکان وجود دارد که موقعیت روتور از روی دامنه سیگنال القاء شده، تشخیص داده شود. مزایای این روش عبارتست از: قیمت پایین، سادگی طراحی و مناسب بودن جهت استفاده در محیط‌های آلوده. معایب این روش عبارتست از: نیاز به یکسوسازی و فیلتر نمودن سیگنال خروجی و هم اینکه سیگنال به تدریج

ساخته شده و شکل می‌گیرد. معمولاً یک مدار تریگر برای آشکار نمودن نقاط صحیح کلیدزنی، مورد نیاز است [۱۳].

• حسگرهای میدان مغناطیسی:

در این روش موقعیت آهنرباهای دائم متصل به روتور، بوسیله حسگرهای اثر هال مشخص می‌شود. میدان مغناطیسی روتور را می‌توان بطور مستقیم مشخص نمود، بنابراین به آهنرباهای کمکی نیازی نیست. همچنین حسگرها باید به اندازه کافی دور از سیم‌پیچ استاتور قرار داده شوند تا از مزاحمت میدان مغناطیسی تولید شده بوسیله جریان‌های استاتور نسبت به عملکردشان جلوگیری شود. مزیت حسگرهای میدان مغناطیسی هال عبارتند از: عاری بودن از تداخل فرکانس‌های رادیویی، مناسب بودن برای محدوده گسترده شرایط کارکرد و دقت بالا. در گذشته، مهندسين تمایل چندانی به استفاده از حسگرهای اثر هال نداشتند زیرا قیمت مدارهای مجتمع (IC ها) و هایبریدهای هال خیلی بیشتر از قیمت اجزاء مکانیکی یا نوری مربوط به حسگرهای رلوکتانسی بود. قیمت حسگرهای هال در سال‌های اخیر به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است و هم‌اکنون این حسگرها به‌صورت گسترده در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. حسگر اثر هال در قسمت ثابت موتور تعبیه می‌شود. تعبیه کردن حسگر اثر هال در عمل فرایند پیچیده‌ای است. چراکه هرگونه جابجایی در این حسگرها باعث می‌شود کاربر در تعیین موقعیت روتور دچار خطا گردد. در موتورهای BLDC وضعیت قرار گرفتن حسگرهای اثر هال نسبت به همدیگر در زاویه ۶۰ یا ۱۲۰ درجه می‌باشد. بر این اساس سازندگان موتور توالی کموتاسیون را معین می‌سازند که در زمان کنترل موتور باید دنبال شود.

• حسگرهای خازنی:

این وسایل تا حدی مشابه با حسگرهای رلوکتانسی هستند. موقعیت یک چرخ که به‌طور مناسبی طراحی و ساخته شده و روی محور روتور نصب شده است، بوسیله یک حسگر اندازه‌گیر خازنی مشخص می‌شود. حسگرهای خازنی، فشرده و کم حجم بوده . می‌توانند به راحتی در داخل قاب موتور قرار داده شوند. اما با این حال، برای افزایش سیگنال خروجیبه یک سطح قابل استفاده، تقویت نسبتاً زیادی مورد نیاز است.

۱-۶: تئوری عملکرد موتور BLDC

موتور DC بدون جاروبک (BLDC) نوعی از موتورهای بدون جاروبک می‌باشد. در این موتور آهنربای دائمی روی روتور واقع است و استاتور آن از طریق یک اینورتر تغذیه می‌گردد. در موتور DC کموتاتوری میدان استاتور ثابت بوده و عمل معکوس کردن پلاریته میدان مغناطیسی استاتور توسط کموتاتورها و جاروبک‌ها صورت می‌گیرد و از آنجا که کموتاتورها ثابت هستند لحظات کلیدزنی به صورت اتوماتیک با پلاریته میدان مغناطیسی خارجی (که هادی‌ها در بین آنها در حرکتند) سنکرون می‌گردند. در موتور BLDC عمل معکوس کردن پلاریته میدان مغناطیسی استاتور به صورت سنکرون با موقعیت روتور توسط ترانزیستورهای قدرت صورت می‌گیرد. از آنجا که عمل کموتاسیون در هر دو نوع ماشین DC و BLDC یکسان است، بنابراین مشخصه‌های گشتاور-سرعت نیز تقریباً معادل است. در موتور DC بدون جاروبک پلاریته جریان هر فاز به صورت سنکرون با چرخش N و S آهنربای دائمی روتور تغییر می‌کند، بنابراین شکل جریان فاز به صورت مربعی بوده و به این نوع تحریک، تحریک مربعی اطلاق می‌شود. همچنین ولتاژ ضدمحرکه القایی نیز در این

نوع تحریک به صورت دوزنقه‌ای می‌باشد و به همین دلیل واژه تحریک دوزنقه‌ای اغلب به جای تحریک مربعی نیز به این روش اطلاق می‌شود.

عملکرد یک موتور DC با سه کموتاتور از نظر ساختاری مشابه یک موتور DC بدون جاروبک مربعی می‌باشد. سیم‌پیچ‌های موتور DC همان فازهای موتور بدون جاروبک می‌باشند. جاروبک‌ها و کموتاتورها در واقع مشابه ترانزیستورها در اینورتر منبع ولتاژ می‌باشند. مشخصه‌های اساسی و مهم در این دو نوع موتور با هم یکی هستند. شکل موج جریان در فازها مربعی با زاویه هدایت 120° درجه هستند و دقیقاً در هر لحظه فقط دو فاز در حال هدایت می‌باشند. کموتاتورها موجب کشیدن جریان DC ثابت از منبع تغذیه DC می‌شوند و همچنین گشتاور موتور نیز تقریباً ثابت خواهد بود. تولید گشتاور ثابت مخصوصاً در سرو درایوهایی که در آن‌ها کنترل دقیق سرعت و موقعیت مد نظر باشد، حائز اهمیت است. در کاربردهای ماشین‌کاری میزان صیقلی شدن سطوح مابین غلطک‌ها شدیداً تحت تأثیر گشتاور تولیدی سرو درایو قرار دارد. تغییرات پررودیک گشتاور (ریپل) نیز به نوبه خود سبب ایجاد لرزش و ارتعاش در تجهیزات سرو درایو می‌گردد. در سرعت ثابت، گشتاور الکترومغناطیسی ثابت و جریان DC منبع تغذیه منجر به تولید انرژی الکترومغناطیسی ثابت بر اساس رابطه زیر می‌شود:

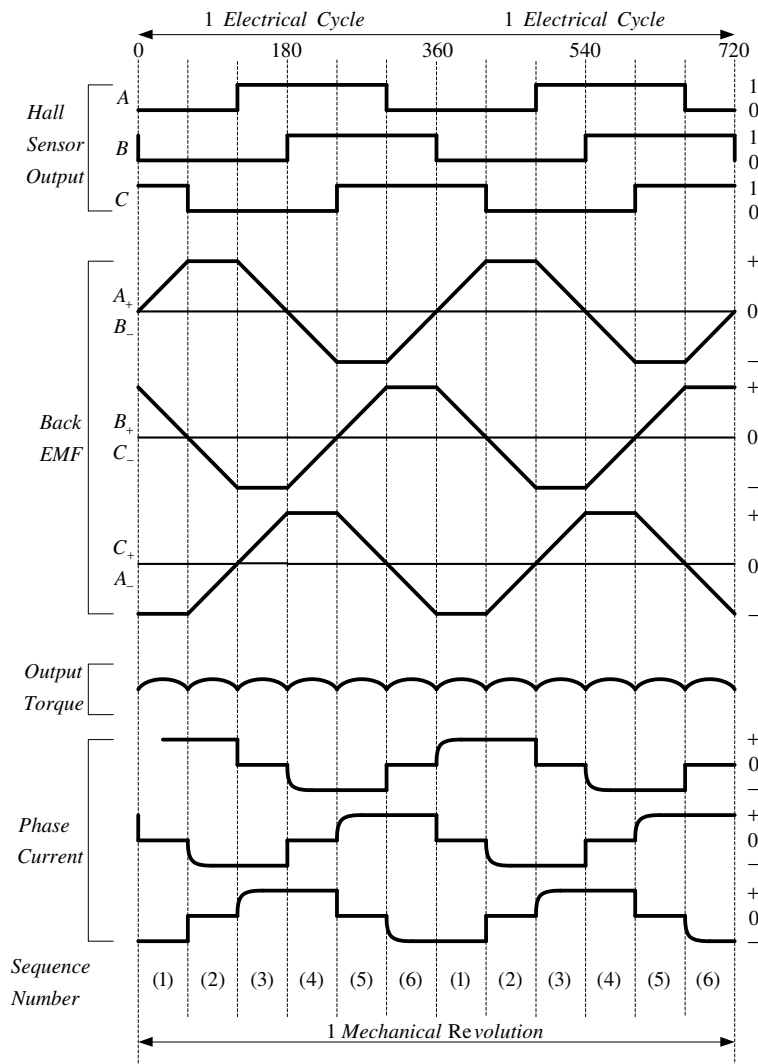
$$E \cdot I = T \cdot \omega_m \quad (1-1)$$

که در آن E ولتاژ ضدمحرکه دو سر دو فاز سری شده و I نیز جریان منبع تغذیه می‌باشد. ولتاژ ضدمحرکه در دو سر هر دو فاز نیز باید در هر 120° درجه ثابت بماند و اگر تغییرات شار پیوندی هر فاز با چرخش روتور به صورت خطی تغییر نماید این حالت محقق می‌شود. به علاوه تغییرات خطی شار پیوندی بستگی به توزیع یکنواخت شار مغناطیسی آهنربای دائم در اطراف استاتور دارد.

بر اساس رابطه (1-1) و از نقطه نظر کنترل، موتور DC به سادگی و بطور کاملاً خطی قابل کنترل است و به همین دلیل در سرو درایوهای DC و درایوهای دور متغیر در صنعت کاربرد وسیع دارد و از آنجا که موتورهای DC بدون جاروبک نیز در فرم ایده‌آل خود دقیقاً مشابه موتورهای DC رفتار می‌کنند و می‌توانند همان کارایی را در صنعت داشته باشند.

۷-۱: توالی کلیدزنی

شکل (۵-۱) نمونه‌ای از سیگنال حسگرهای اثر هال را با توجه به نیروی ضدمحرکه و جریان فاز نشان می‌دهد. در هر 60° درجه از چرخش یکی از حسگرهای اثر هال تغییر حالت می‌دهد. با توجه به این مسئله شش حالت صحیح وجود دارد که چرخه الکتریکی کامل شود. بنابراین بطور همزمان در هر 60° درجه توالی کلیدزنی را باید تغییر داد. لزوماً یک چرخه الکتریکی نباید با یک دور مکانیکی کامل روتور مطابقت داشته باشد، بلکه با تعداد مشخصی از چرخه‌های الکتریکی، یک دور مکانیکی کامل می‌شود که به تعداد جفت قطب‌های روتور بستگی دارد، به ازای هر جفت قطب روتور یک چرخه الکتریکی اتفاق می‌افتد.



شکل ۱-۵: خروجی حسگرهای اثر هال، جریان فازها، گشتاور خروجی و ولتاژ ضد محرکه

نمودار شکل (۱-۶) تجهیزات مورد نیاز که برای کنترل موتورهای DC بدون جاروبک استفاده می‌شود را نشان می‌دهد. Q_0 تا Q_6 کلیدهای اینورتر هستند که با یک میکروکنترلر PIC_{8FXX31} کنترل می‌شوند. نوع کلیدهای قدرت می‌تواند بر اساس ولتاژ موتور و جریان‌های استاتور، IGBT، POWER MOSFET یا ترانزیستورهای دوقطبی باشد.