به نام خدا

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده‌ی برق و کامپیوتر

طراحی و ساخت یک اینورتر با قابلیت سوئیچینگ نرم برای درایو موتور BLDC

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد

محمد مهدی شهبازی

استاد راهنما

دکتر سید محمد مدنی، دکتر اکبر ابراهیمی

۱۳۸۸

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده‌ی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق – قدرت آقای محمد مهدی شهبازی

تحت عنوان

طراحی و ساخت یک اینورتر با قابلیت سوئیچینگ نرم برای درایو موتور BLDC

در تاریخ ۸۸/۲/۲۰ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر سید محمد مدنی
۲- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر اکبر ابراهیمی
۳- استاد مشاور پایان نامه	دکتر حسین فرزانه فرد
۴- استاد داور	دکتر حمیدرضا کارشناس
۵-استاد داور	دکتر مهدی معلم
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر علی‌محمد دوست‌حسینی

بر خود لازم می‌دانم که از توجه، راهنمایی و همراهی استاد گرانقدر جناب آقای دکتر سید محمد مدنی و جناب آقای دکتر اکبر ابراهیمی، و همکاری و مساعدتهای جناب آقای مهندس روح الله کافی موسوی نجف آبادی، مهندس مهرداد چپری‌ها ومهندس عبدالله مختاری سپاسگزاری کنم.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به :

پدر و مادرم که تمامی آنچه دارم مدیون آنهاست.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل یکم: مقدمه

1-1 کلیات و اهداف پایان‌نامه ۳

۱-۲ روند ارائه مطالب ۴

فصل دوم: آشنایی با موتورهای BLDC

۲-۱ ساختمان و نحوه عملکرد موتور BLDC ۶

۲-۲ روشهای درایو موتور BLDC ۱۰

۲-۲-۱ نحوه کنترل گشتاور در اینورترهای منبع ولتاژ ۱۱

۲-۲-۲ تغذیه تک قطبی و دو قطبی ماشین BLDC ۱۲

۲-۲-۳ ریپل گشتاور ۱۳

۲-۳ ماشین BLDC تک فاز ۱۴

۲-۴ ماشین BLDC دو فاز ۱۵

فصل دوم: آشنایی و دسته بندی اینورترهای سوئیچینگ نرم

۳-۱ نمای کلی توپولوژی‌های مختلف مبدلها ۱۷

۳-۱-۱ دسته بندی مبدلهای سوئیچینگ نرم دارای لینک DC ۱۹

3-2 مبدلهای سوئیچینگ نرم با لینک DC رزونانسی ۲۰

۳-۲-۱ مبدل با لینک DC رزونانسی پایه ۲۲

۳-۲-۲ توپولوژی‌های مبدل BRDCL کلمپ شده ۲۵

۳-۲-۳ توپولوژی‌های لینک DC شبه رزونانسی کلمپ شده ۲۶

۳-۲-۴ حفظ تعادل با خازن کلمپ در توپولوژی‌های کلمپ اکتیو ۲۹

۳-۲-۵ مبدلهای رزونانسی موازی ۳۰

۳-۳ مبدلهای رزونانسی با کموتاسیون در قطب ۳۲

۳-۳-۱ مبدلهای رزونانسی با کموتاسیون قطب دارای دیود کمکی ۳۲

۳-۳-۲ مبدلهای با قطب کمکی رزونانسی ۳۳

فصل چهارم: درایو ماشین BLDC با قابلیتهای خاص

۴-۱ مقدمه ۴۲

۴-۲ توپولوژی‌های درایو-ماشین BLDC با المانهای کاهش یافته ۴۳

۴-۲-۱ موتور BLDC دوفاز با Back-EMF ۱۸۰ درجه ۴۳

۴-۲-۲ درایو ماشین BLDC سه فاز با المانهای کاهش یافته ۴۶

۴-۲-۳ درایو موتور BLDC با تعداد المانهای کاهش یافته و تعداد فازهای بیشتر ۴۹

۴-۳ درایو موتور BLDC با ضریب توان تصحیح شده ۵۲

۴-۳-۱ بررسی مشخصه ورودی جریان-ولتاژ یک مبدل SEPIC ۵۴
۴-۴ اینورتر با لینک DC رزونانسی برای موتور BLDC با ریپل گشتاور پایین ۵۷
۴-۴-۱ بررسی عملکرد مدار ۵۸
۴-۴-۲ نحوه کنترل جریان ۶۲
۴-۴-۳ نحوه بهبود کموتاسیون با استفاده از اینورتر ۱۲ سوئیچی ۶۳
فصل پنجم: اینورتر سوئیچینگ نرم پیشنهادی
۵-۱ مقدمه ۶۶
۵-۲ توپولوژی مدار پیشنهادی ۶۷
۵-۳ روش عملکرد ۶۸
۵-۴ ملاحظات طراحی ۷۵
۵-۴-۱ نحوه تولید سیگنالهای فرمان ۷۸
۵-۵ شبیه سازی و پیاده سازی عملی ۸۰
۵-۵-۱ شبیه سازی ۸۰
۵-۵-۲ نتایج پیاده سازی عملی ۸۴
۵-۶ بررسی نتایج مدار پیشنهادی ۹۰
فصل ششم: نتیجه‌گیری
۶-۱ نتیجه گیری ۹۳
۶-۲ پیشنهادات ۹۵
مراجع ۹۵

چکیده

ماشین جریان مستقیم بدون جاروبک، یک ماشین ac مغناطیس دائم است که بدلیل شباهت بسیار زیاد مشخصه ورودی آن به ماشین جریان مستقیم، به این نام خوانده می‌شود. این ماشین از نظر طراحی و ساختار ظاهری با ماشین مغناطیس دائم سنکرون دارای شباهتهای بسیار است. یکی از تفاوتهای این دو نوع ماشین مغناطیس دائم در پروفایل ولتاژ القا شده در فازهای استاتور آنهاست. به همین دلیل گاهی این ماشین را ماشین مغناطیس دائم جریان متناوب ذوزنقه‌ای می نامند. برای درایو این ماشین یک اینورتر پالسهای جریانی سنکرون با موقعیت روتور به فازهای موتور اعمال می‌کند. با توجه به خصوصیات این ماشین مانند نسبت گشتاور به حجم بالا، عدم نیاز به نگهداری، اینرسی کم و سادگی تبادل حرارت با محیط خارج، افقهای جدیدی برای کاربرد این ماشین به‌وجود آمده است. به این ترتیب بهبود مشخصه‌های روشهای درایو این ماشین، همگام با گسترش کاربرد آن، مد نظر مهندسان قرار گرفته است.

یکی از شاخصه‌های بهبود عملکرد سیستمهای مبتنی بر این ماشین، کاهش تلفات سوئیچینگ و تداخلات الکترومغناطیسی اینورتر بکار رفته در درایو آن، بدون افزایش چشمگیر هزینه‌های اینورتر است. برای نیل به این هدف، عموما استفاده از روشهای سوئیچینگ نرم برای اینورتر بکار رفته در سیستم ماشین- درایو، در دستور کار طراحان قرار دارد. در روشهای سوئیچینگ نرم، با افزودن مدارهای کمکی به مدار اصلی اینورتر، همپوشانی زمانی تغییرات ولتاژ و جریان سوئیچها تقریبا از بین رفته و تلفات سوئیچینگ حذف می‌گردد. از دیگر شاخصه‌های مورد توجه در مدار درایو این ماشین، می‌توان به کاهش هزینه و بهبود مشخصه‌های کیفیت توان در سمت ورودی مدار درایو اشاره کرد.

در این پایان‌نامه، ابتدا ماشین جریان مستقیم بدون جاروبک سه فاز و اصول حاکم بر عملکرد آن معرفی می‌گردند. سپس انواع دیگر این ماشین به همراه روشهای پایه درایو آن ذکر می‌شود. سپس با ارائه یک دسته‌بندی سعی می‌شود اصول حاکم بر اینورترهای سوئیچینگ نرم بیان گردد. در ادامه با توجه به فاکتورهای مد نظر طراحان برای ارائه توپولوژی‌های مختلف درایو این ماشین، چند نمونه از این توپولوژی‌های دارای قابلیت خاص، به همراه نحوه عملکرد آنها ارائه می‌شود. هدف از انجام این پایان‌نامه، با توجه به روشهای به‌کار گرفته شده برای ارائه توپولوژی‌های مختلف درایو این ماشین و اینورترهای سوئیچینگ نرم، ارائه یک توپولوژی سوئیچینگ نرم با المانهای کاهش یافته است. به این ترتیب در فصل پنجم یک توپولوژی به همراه روش درایو ماشین پیشنهاد می‌گردد. در ادامه با توضیح نحوه عملکرد توپولوژی و روش پیشنهادی درایو، کارکرد آن تحلیل می‌شود. سپس با ارائه روش طراحی مقادیر مورد نیاز، یک نمونه از این توپولوژی پیشنهادی- با توجه به مشخصات یک نمونه موتور در دسترس- طراحی می‌شود. با توضیح روش شبیه‌سازی و مدل‌سازی المانهای به‌کار رفته در نرم افزار، مثال طراحی شده شبیه سازی گشته، و نتایج حاصل از آن برای بررسی صحت تحلیلهای صورت گرفته، ارائه می‌گردد. برای پیاده سازی این اینورتر از یک پردازنده سیگنال دیجیتال استفاده شده است. این پردازنده ضمن دریافت و تحلیل داده‌های به‌دست آمده از حسگرهای اثر هال، وظیفه محاسبه سرعت لحظه‌ای و پیاده سازی حلقه کنترلی و تولید سیگنالهای کنترل کننده را نیز بر عهده دارد. برای پیاده‌سازی نهایی این توپولوژی، مدارات شکل دهنده سیگنال مورد نیاز و مدارات واسط درایو سوئیچهای قدرت نیز طراحی و ساخته شد. در انتها با راه‌اندازی مجموعه نتایج حاصل از پیاده سازی عملی یک نمونه آزمایشگاهی از توپولوژی پیشنهادی در پایان نامه ارائه گشته است. با بررسی عملکرد این نمونه عملی، دسترسی به هدف پایان نامه مورد تایید قرار می‌گیرد. با جمع بندی نتایج و ارائه پیشنهاداتی برای ادامه کار، پایان‌نامه به اتمام می‌رسد.

کلمات کلیدی

۱- موتور جریان مستقیم بدون جاروبک ۲- سوئیچینگ نرم ۳- اینورتر ۴- اینورتر با قطب رزونانسی ۵- سوئیچینگ در ولتاژ صفر

فصل یکم
مقدمه

با گسترش کاربرد سیستمهای درایو برای کنترل سرعت، گشتاور و راندمان ماشینهای الکتریکی، استفاده از موتور های مغناطیس دائم[1] بدلیل آسان تر بودن روش کنترل آنها نسبت به سایر موتورهای جریان متناوب[2] و نیز عدم نیاز به نگهداری و قابلیت کارکرد در سرعتهای بسیار بالا، مورد توجه بیشتر قرار گرفته است [۱]-[۴]. موتور جریان مستقیم بدون جاروبک[3] - که به‌دلیل شباهت زیاد مشخصه گشتاور-جریان آن به موتور جریان مستقیم[4]، به این نام خوانده شده – نیز نوعی موتور مغناطیس دائم به حساب می آید. این موتور بدلیل نسبت بالای گشتاور به حجم، عدم نیاز به نگهداری، تولید تداخلات الکترومغناطیسی پایین و قابلیت کارکرد در سرعتهای بسیار بالا، توجه بسیاری را در کاربردهای مختلف به خود جلب کرده است.

روش عملکردی موتور جریان مستقیم بدون جاروبک نیز همانند موتور جریان مستقیم است، با این تفاوت که در آن مغناطیسهای دائم قرار گرفته روی روتور عمل ایجاد میدان مغناطیسی عمود بر میدان استاتور را برای تولید گشتاور انجام می دهند. به این ترتیب دیگر نیازی به استفاده از جاروبکها برای ثابت نگهداشتن موقعیت میدان روتور وجود ندارد و در عوض با استفاده از کموتاسیون الکتریکی سیم پیچهای استاتور، میدان حاصل از سیم پیچی‌های استاتور را نسبت به میدان حاصل از مغناطیسهای دائم در حال گردش ثابت نگه می دارند. عمل تبدیل ولتاژ DC

---

[1] Permanent Magnet (PM)
[2] Alternative Current (AC)
[3] Brushless DC (BLDC)
[4] Direct Current (DC) motor

تغذیه به ولتاژ AC مورد نیاز سیم پیچی های استاتور، توسط اینورتر انجام می شود. به این ترتیب برای کارکرد صحیح موتور، دانستن محل میدان حاصل از مغناطیسهای دائم قرار گرفته روی روتور، مورد نیاز است. برای تشخیص محل کنونی روتور و درنتیجه یافتن میدان حاصل از آن، از decoder های نوری یا سنسورهای مغناطیسی اثر هال استفاده می‌شود.

۱ ـ کلیات و اهداف پایان‌نامه

چون با توجه به کاربردهای مختلف انواع مختلفی از موتورهای BLDC طراحی و ساخته شده، انواع مختلفی از اینورترها نیز برای درایو این موتورها ساخته شده اند. برای کاربردهای مختلف این موتورها روشهای کنترلی مختلفی برای کنترل جریان ورودی به موتور که تعیین کننده گشتاور موتور است ارائه شده است[۱]-[۶]. آن‌چه در تمامی این روشها و اینورترها - که می توانند تکفاز یا چند فاز باشند - مشترک است، قابلیت ایجاد کموتاسیون بین فازهای موتور و قابلیت کنترل ولتاژ یا جریان خروجی است. برای بهبود عملکرد سیستمها مبتنی بر ماشین BLDC فاکتورهای مختلفی را مانند راندمان بالا، هزینه کمتر، ریپل گشتاور پایین‌تر و مشخصه‌های کیفیت توان ورودی بهتر، می‌توان در نظر گرفت. در این اینورترها هم مانند اینورترهای تغذیه موتورهای AC برای رسیدن به ریپل کمتر گشتاور و کاهش هارمونیکهای تزریق شده به شبکه، افزایش فرکانس سوئیچینگ یکی از گزینه‌هاست. از آنجا که استفاده از روشهای سوئیچینگ سخت که در آن بین جریان و ولتاژ سوئیچ حین تغییر وضعیت همپوشانی وجود دارد، باعث بوجود آمدن تلفات، خروج سوئیچ از ناحیه کار مطمئن[1] و افزایش $\frac{dv}{dt}$ و $\frac{di}{dt}$ و در نتیجه تداخلات الکترو مغناطیسی[2] می شود؛ استفاده از روشهایی مانند استفاده از اسنابرهای تلفاتی یا مدارات سوئیچینگ نرم، برای مهار این اثرات یکی از فاکتورهای طراحی اینورترهای تغذیه موتور BLDC است.

برای رسیدن به فاکتورهای فوق روشها و مدارات زیادی پیشنهاد شده است[۷]-[۱۱]. یکی از راههای افزایش راندمان کلی سیستم نیز با توجه به کاستن از تلفات اینورتر، استفاده از اینورترهای سوئیچینگ نرم است[۱۲]-[۱۴]. در این اینورترها چون ابتدا ولتاژ یا جریان سوئیچ با استفاده از المانهای رزونانسی در نزدیکی صفر نگهداشته می شود، سپس به سوئیچ اجازه تغییر وضعیت داده می‌شود، تلفات مدار تا حد قابل ملاحظه‌ای کاسته می‌شود.

---

[1] Safe Operating Area (SOA)
[2] Electro-Magnetic Interference (EMI)

هدف از انجام این پایان نامه طراحی یک اینورتر سوئیچینگ نرم برای درایو موتور BLDC سه فاز با مدار کنترلی ساده، تعداد المان کمکی کم و هزینه پایین است. برای رسیدن به اهداف تعریف شده ابتدا با اصول کارکرد موتور آشنا شده، سپس روشهای مختلف درایو ماشین و درایوهای دارای قابلیتهای خاص، برای رسیدن به یک مسیر کلی مورد بررسی قرار گرفت. سپس انواع کلی اینورترهای رزونانسی مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به خصوصیتهای اینورتر رزونانسی با کموتاسیون در قطب، این نوع درایو برای ادامه کار در نظر گرفته شد. سپس با توجه به نوع مدار رزونانسی انتخاب شده، یک توپولوژی طراحی شد.

پس از طراحی توپولوژی، اجزای آن با توجه به موتور BLDC موجود طراحی و انتخاب می‌شود. به این منظور توپولوژی پیشنهادی برای تعیین نحوه عملکرد آن، و محاسبه مقادیر کلیدی مورد نیاز برای انجام شبیه سازی، تحلیل شد. سپس با توجه به مقادیر محاسبه شده و الگوریتم بکاررفته، توپولوژی پیشنهادی با استفاده از نرم افزار PSIM شبیه سازی شده است. با تایید عملکرد کلی توپولوژی پیشنهادی، طراحی مدارات منطقی و میکروپروسسوری برای تولید سیگنالهای کنترلی انجام شد. با انتخاب اجزای مدارات، ساخت عملی مدرا درایو انجام، و طراحی با توجه به نتایج به‌دست آمده مورد چندین مرحله تجدید نظر قرار گرفت. در نهایت با تست مدار صحت طراحی و تحلیلهای ارائه شده مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۱ ۴ روند ارائه مطالب

این پایان‌نامه مشتمل بر شش فصل می باشد. پس از بیان مقدمه‌ای بر موضوع و اهداف پایان‌نامه در فصل اول،خلاصه‌ای از کارهای صورت گرفته در قالب پایان‌نامه ارائه شده است.در فصل دوم موتور BLDC، نحوه درایو، و انواع آن به‌طور اجمالی بررسی می گردد. از آن‌جا که بخشی از این پایان‌نامه به طراحی یک اینورتر سوئیچینگ نرم مربوط می‌شود، در فصل سوم یک نوع دسته بندی و بررسی خصوصیات هر یک از انواع آن ارائه شده است. در فصل چهارم چند اینورتر مورد استفاده در درایو ماشین BLDC با قابلیتهای خاص بررسی می‌شوند. در فصل پنجم توپولوژی پیشنهادی، به همراه توضیح نحوه عملکرد و کنترل آن ارائه شده است. در ادامه فصل پنجم روش طراحی اجزا، روش پیاده سازی شبیه سازی و مشخصات کلی سیستم ساخته شده ارائه شده است. در انتهای فصل پنجم نیز نتایج شبیه سازی ها و نتایج بدست آمده از پیاده سازی عملی برای بررسی صحت طراحی و تحلیلها آورده شده است. در انتها از اطلاعات جمع آوری شده و نتایج بدست آمده یک جمع بندی کلی در مورد اینورتر درایو موتور BLDC، به همراه پیشنهاداتی برای ادامه کار ارائه شده است.

فصل دوم
آشنایی با موتورهای BLDC

موتور جریان مستقیم بدون جاروبک، یک موتور مغناطیس دائم با سیم پیچی شبیه به موتور سنکرون مغناطیس دائم[1] است. تفاوت عمده این دو دسته موتور در نحوه اعمال ولتاژ به سیم پیچی‌های فازهای آن است. برای درایو موتور های سنکرون مغناطیس دائم، از ولتاژهای سه فاز متعادل سینوسی که دامنه و فاز آن با توجه به روش کنترل تعیین می گردد، استفاده می‌شود؛ اما برای موتورهای BLDC عموما از یک مبدل شش پالسه، که یک ولتاژ ثابت را به ولتاژهای سه فاز با فرکانس متناظر با سرعت لحظه‌ای روتور تبدیل می‌کند، استفاده می‌شود. ترکیب اینورتر–موتور این ماشین دارای مشخصه‌ای بسیار شبیه به موتور DC شنت است و به همین دلیل آن را موتور DC بدون جاروبک نامیده‌اند.

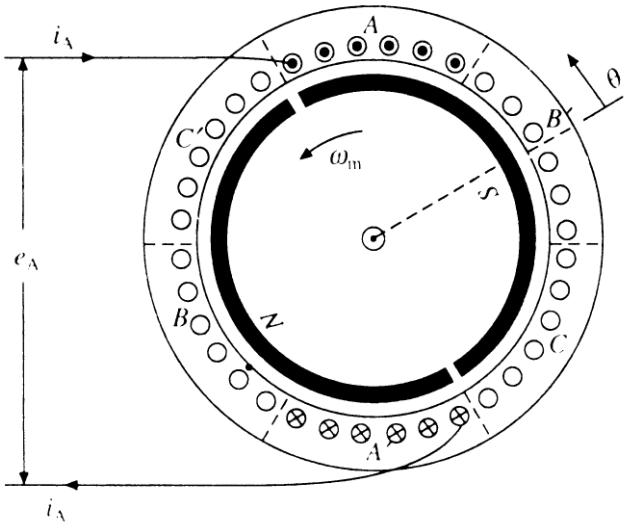
در این فصل ابتدا اصول کلی عملکرد موتور BLDC به‌طور اجمالی معرفی می‌گردد. سپس با ارائه توضیحاتی در مورد نحوه تولید گشتاور در این ماشین، روشهای درایو این موتور نام برده می شوند. با توضیح نحوه عملکرد روشهای اعمال کنترل سرعت ماشین، معادلات حاکم بر کمیتهای مختلف ماشین مانند ولتاژ القایی در فازها و گشتاور حاصل از بر هم‌کنش نیروهای مغناطیسی ارائه خواهد شد. در ادامه توپولوژی‌های معمول برای اعمال روشهای کنترل ذکر شده، به همراه توپولوژی‌های خاص قابل اعمال بر موتورهای BLDC خواهد آمد. در انتها با ارائه توضیحی مختصر موتورهای با تعداد فازهای مختلف نیز بررسی می‌گردند.

---

[1] Permanent Magnet Synchronous Machines (PMSM)

۲ ـ ساختمان و نحوه عملکرد موتور BLDC

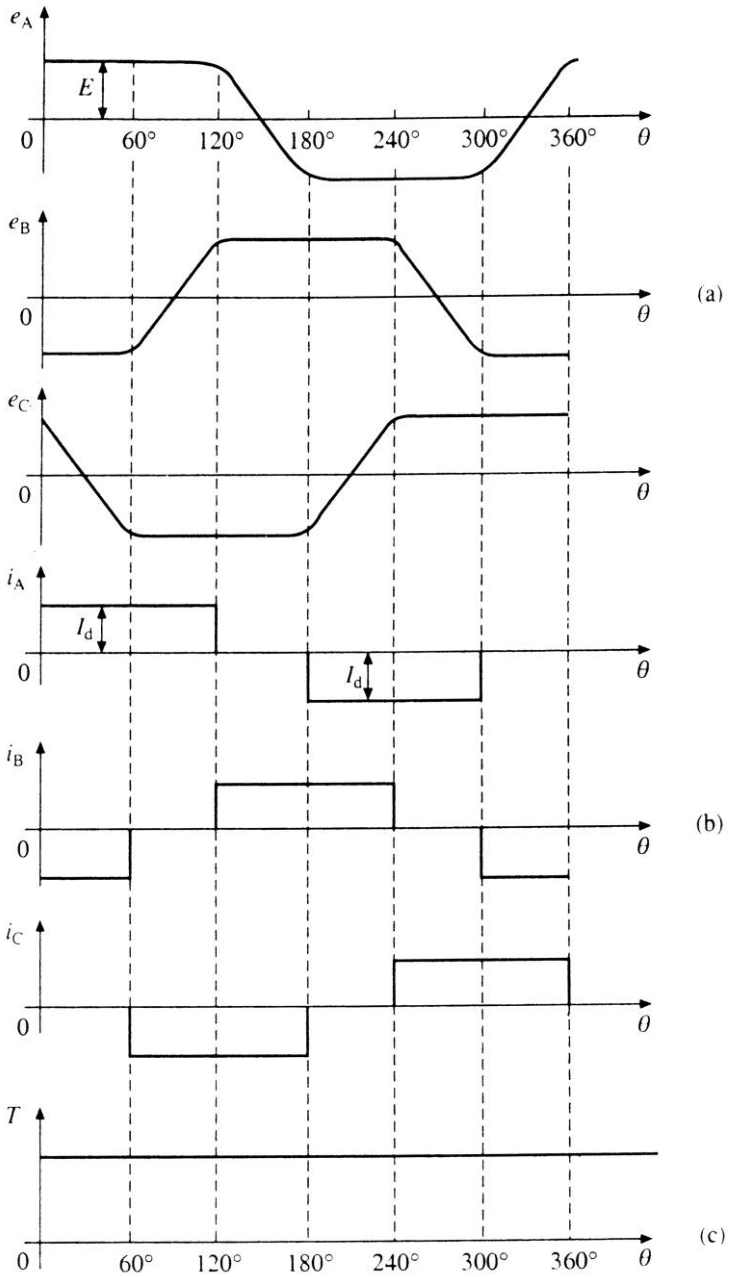
در شکل ۲-۱ مقطع عرضی یک ماشین BLDC سه فاز دو قطب آورده شده است[۱]. در این شکل فرض بر آن است که ماشین سه فاز دارای سه سیم‌پیچی متمرکز با فاصله ۱۲۰ درجه است که در هر سمت ۶۰ درجه از آن قرار دارد. ولتاژ القا شده ناشی از گردش روتور در سه فاز ماشین نیز در بخش a شکل ۲-۲ آورده شده است. همان‌گونه که در شکل قابل مشاهده است، با گردش ۱۲۰ درجه‌ای در جهت پاد-ساعتگرد از وضعیت نشان داده شده در شکل ۲-۱، تمامی سیم‌پیچی‌های بالایی فاز A زیر قطب S و تمامی سیم‌پیچی‌های پایینی فاز A زیر قطب N قرار می‌گیرند؛ بنابراین در تمام مدت گردش ۱۲۰ درجه ای روتور ولتاژ ثابتی در سیم پیچ‌های فاز A القا خواهد شد. با عبور از مرز ۱۲۰ درجه، برخی از سیمهای بخش بالایی فاز A زیر قطب N و برخی دیگر زیر قطب S قرار می‌گیرند؛ لذا ولتاژ القایی در سیم‌پیچی فاز A بطور خطی کاهش می‌یابد تا نهایتا با عبور از صفر جهت آن معکوس گردد.به این ترتیب برای ولتاژ القا شده در سیم پیچی های استاتور، پروفایلی همانند آنچه در بخش a شکل ۲-۲ آمده، حاصل می‌گردد. برای سایر فاز های موتور نیز با بررسی مشابهی می‌توان شکل موجهای ولتاژ القایی را ترسیم کرد.



شکل ۲-۱- مقطع عرضی یک ماشین BLDC [۱]

برای درایو یک موتور BLDC عموما از یک اینورتر همانند آنچه در شکل ۲-۵ آمده است استفاده می‌گردد. برای تولید گشتاور باید سیم پیچی‌های موتور با پالسهای جریانی همانند آنچه در بخش b شکل ۲-۲ آمده است، تغذیه

گردنـد. این پالـسهای جـریانـی - که می‌توانند خروجی یک اینورتر منبع ولتاژ[1] و یـا اینـورتر منبـع جریـان[2] باشـند - در طول ۱۲۰ درجه‌ای که ولتاژ القا شده در سیم پیچی هر فاز مقدار ثابتی دارند به سیم پیچها اعمال می‌گردند. بـرای این منظور باید بنحوی محل قرار گیری روتور نسبت به فازهای استاتور برای اعمال این پالسـها مشـخص باشـد. بـرای این منظور از سنسورهای موقعیت یا سنسورهای اثرهال استفاده می‌گردد.

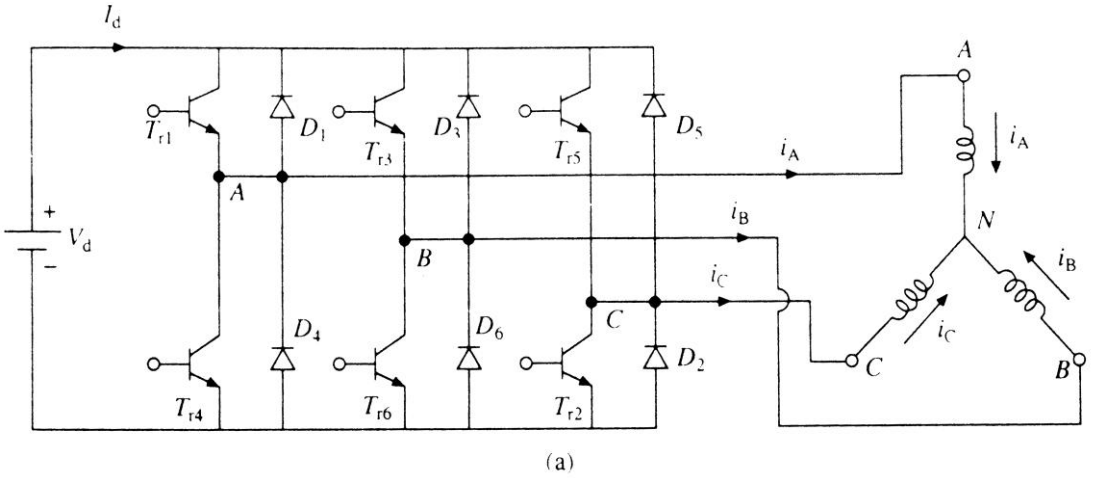


شکل ۲-۲- شکل موجهای ولتاژ القا شده، پالسهای جریان فازها و گشتاور تولیدی ماشین BLDC [۱]

[1] Voltage Source Inverter (VSI)
[2] Current Source Inverter

شکل ۲-۳- استاتور یک ماشین BLDC سه فاز

شکل ۲-۴- سنسور های اثر هال بر روی استاتور ماشین BLDC



شکل ۲-۵- ماشین BLDC تغذیه شده از یک اینورتر منبع ولتاژ [۱]

در شکل ۲-۳ استاتور یک ماشین BLDC سه فاز ۱۲ قطب نشان داده شده است. همان طور که در شکل هم قابل مشاهده است سه سنسور اثر هال برای تشخیص محل قرار گرفتن مغناطیسهای دائم نسبت به سیم پیچی های استاتور روی استاتور قرار گرفته اند. در شکل ۲-۴ این سنسورها از نزدیک نشان داده شده اند. چون فاصله هوایی در موتور نمونه نشان داده شده در شکل ۲-۱ ثابت است، ولتاژ القا شده با سرعت موتور رابطه خطی دارد[۱].

$$E = K_e \omega_m \qquad ۱-۲$$

در هر بازه ۶۰ درجه‌ای نشان داده شده در شکل ۲-۲ جریان به یکی از فازها وارد و از دیگری خارج می‌شود؛ به این ترتیب توان ورودی به موتور در چنین بازه هایی را می‌توان با استفاده ار رابطه‌ی ۲-۲ بیان کرد:

$$P = EI_d + (-E)(-I_d) = 2EI_d = 2K_e \omega_m I_d \qquad ۲-۲$$

و در نهایت برای گشتاور موتور به رابطه ۲-۳ خواهیم رسید.

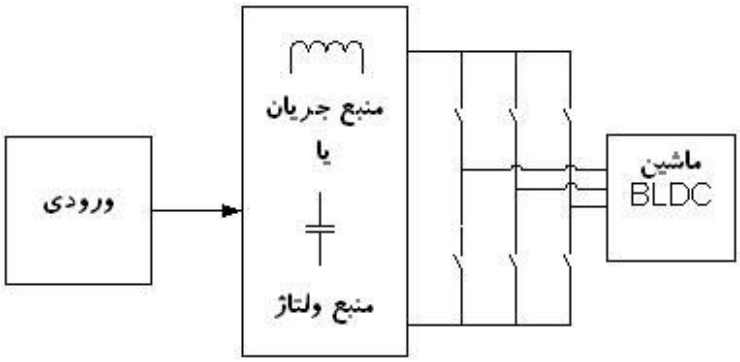
$$T = \frac{P}{\omega_m} = 2K_e I_d = K_T I_d \qquad ۳-۲$$

به این ترتیب مشاهده می‌شود گشتاور ماشین در تمامی بازه‌ها ثابت و متناسب با جریان ورودی اینورتر (I_d) است. از روابط فوق می توان به مشابهتهای ماشین BLDC که ماشینی با تغذیه ac است، با ماشین dc پی‌برد. در هر دو ماشین گشتاور تولیدی لحظه‌ای نسبت مستقیم با جریان آرمیچر دارد، ولتاژ Back-EMF نیز با سرعت رابطه خطی دارد و نیز همیشه میدانهای استاتور و روتور نسبت به یکدیگر وضعیت ثابتی دارند. در ماشین DC جاروبکها،

وظیفه ثابت نگهداشتن میدانهای استاتور و روتور نسبت به یکدیگر را با تعویض جهت جریان در سیم‌پیچهای روتور، و در ماشین BLDC این خصوصیت با کموتاسیون الکتریکی سیم‌پیچهای استاتور از طریق سوئیچهای اینورتر حاصل می‌گردد.به این ترتیب به‌عنوان مثال در بازه ۰ تا ۶۰ درجه، که $i_B = -I_d$,$i_A = I_d$ است، بدلیل روشن بودن سوئیچهای T_{r1}, T_{r6} جریان ورودی اینورتر از فاز A به ماشین وارد شده و از فاز B خارج می‌گردد؛ با رسیدن روتور به ۶۰ درجه T_{r6} خاموش و T_{r2} روشن می‌شوند. اما بدلیل وجود اندوکتانس سیم‌پیچی‌های فازهای موتور پس از قطع گیت T_{r6} دیود D_6 شروع به هدایت کرده و تا صفر شدن جریان فاز B روشن خواهد ماند. همین فرایند برای سایر سوئیچهای اینورتر در هنگام خاموش شدن تکرار خواهد شد.

۲ ۴ روشهای درایو موتور BLDC

همان طور که در معرفی موتور آمد، برای درایو یک موتور BLDC باید پالسهای جریانی سنکرون با موقعیت روتور به فازهای استاتور اعمال کرد. مطابق شکل ۲-۶، برای اعمال این پالسها از دونوع اینورتر منبع جریان و منبع ولتاژ می‌توان استفاده کرد. در اینورترهای نوع منبع ولتاژ، ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچی ها می‌تواند هم به‌صورت تک قطبی[1] و هم به‌صورت دو قطبی[2] به ماشین اعمال گردد.



شکل ۲-۶- ماشین BLDC تغذیه شده از اینورتر منبع ولتاژ یا جریان

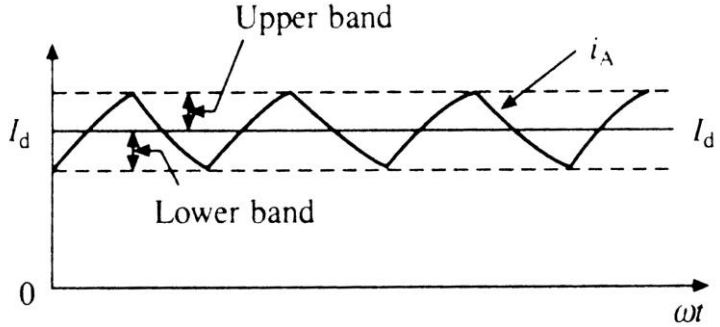
در درایوهای مبتنی بر اینورترهای نوع منبع جریان، جریان ورودی اینورتر که جریان عبوری از فازهای موتور نیز هست، رابطه مستقیم با گشتاور تولیدی موتور و مقداری تحت کنترل دارد. لذا اینورتر مورد استفاده در این نوع درایو فقط لازم است عمل کموتاسیون الکتریکی بین فازها را انجام دهند. این خصیصه به طراح اجازه

[1] Unipolar
[2] Bipolar

می‌دهد ، در اینورتر از سوئیچهایی با سرعت پایین‌تر استفاده کند. اما از آنجا اکثر منابع قدرت مورد استفاده برای تامین توان ماشینهای BLDC – که بدلیل نسبت بالای گشتاور به حجم مورد استفاده قرار می‌گیرند- از نوع منابع ولتاژ هستند، عملا بخش منبع جریان، ترکیبی از سوئیچهای با سرعت بالا و المانهای پسیوی است که در مسیر اصلی انتقال توان قرار گرفته‌اند. به همین دلیل استفاده از این دسته از درایوها نه تنها هزینه را افزایش خواهد داد، بلکه باعث افزایش پیچیدگی سیستم و کاهش راندمان خواهد شد.

۲ ۴ ۱ نحوه کنترل گشتاور در اینورترهای منبع ولتاژ

طبق رابطه ۲-۳ بدلیل آن‌که جریان و گشتاور ماشین BLDC دارای رابطه خطی و مستقیم هستند، برای کنترل گشتاور ماشین باید بتوان جریان گذرنده از آن را در محدوده مشخصی از یک مقدار مرجع نگهداشت. در درایو های مبتنی بر منبع ولتاژ، برای رسیدن به این منظور از روش PWM به شرح زیر استفاده می‌کنند. برای توضیح فرض می‌شود که برای سیستم نشان داده شده در شکل ۲-۵، ماشین در وضعیتی است که جریان به فاز A ماشین وارد و از فاز B آن خارج می‌گردد. هنگامی که سوئیچهای T_{r1} و T_{r6} روشن هستند ترمینالهای A و B نشان داده شده به ترتیب به ترمینالهای مثبت و منفی منبع ولتاژ dc متصل هستند. در این هنگام جریان از طریق مسیری شامل منبع V_d، سوئیچ T_{r1}، فاز A ماشین، فاز B ماشین و سوئیچ T_{r6} می‌گذرد و با توجه به پلاریته منبع مقدار آن افزایش خواهد یافت. هنگامی که سوئیچهای T_{r1} و T_{r6} خاموش شوند، جریان ماشین از طریق مسیری شامل منبع فاز A ماشین، فاز B ماشین، دیود D_3، V_d، و دیود D_4 می‌گذرد. در این وضعیت بدلیل آنکه جریان باید در خلاف جهت پلاریته V_d حرکت کند، مقدارش کاهش می‌یابد. با تکرار این عمل همان‌طور که در شکل ۲-۷ نشان داده شده، می‌توان جریان موتور را در یک محدوده نگهداشت. به این ترتیب با مقایسه جریان موتور با یک مرجع می‌توان به سیگنالی رسید که با استفاده از یک کنترلر مناسب برای استفاده در روش PWM بکار رود.



شکل ۲-۷- جریان فاز A موتور در محدوده‌ای بین حد بالا و پایین [۱]

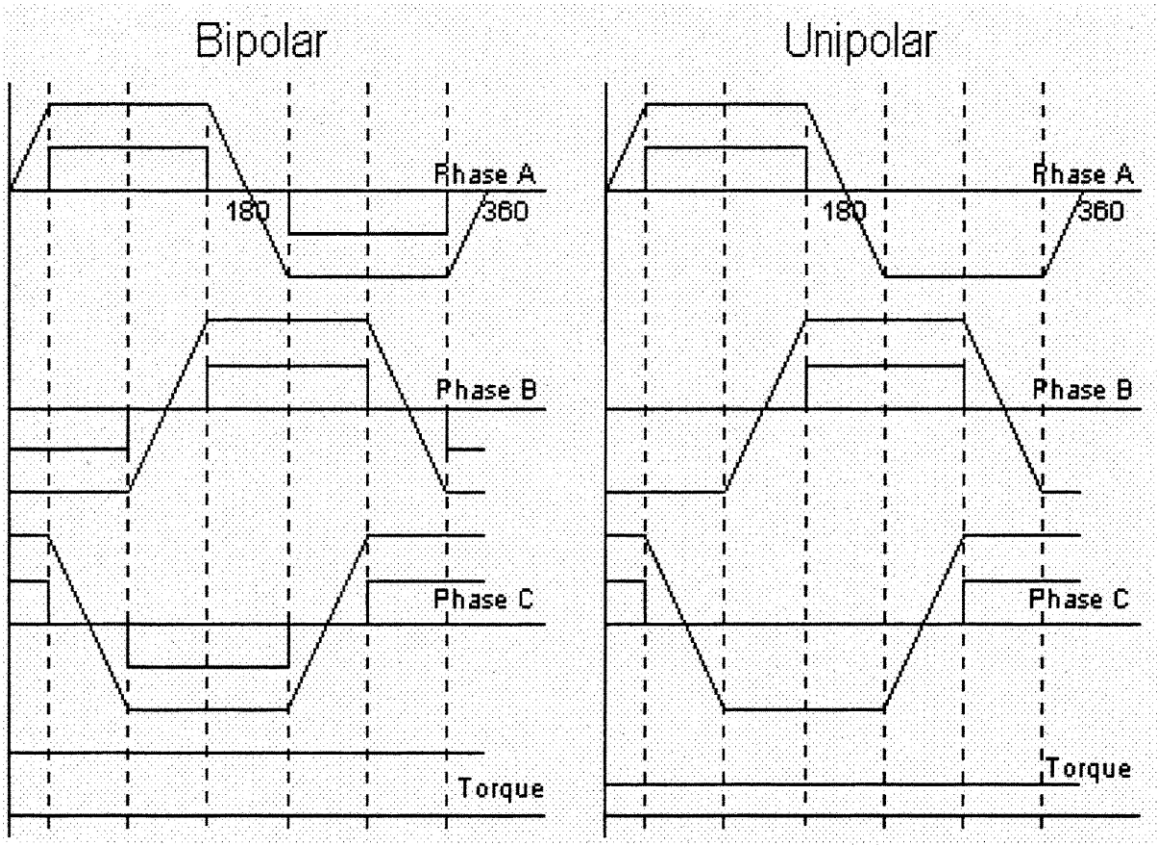
۲ ۲ ۲ تغذیه تک قطبی و دو قطبی ماشین BLDC

طبق آنچه در بخش ۲-۲ آورده شد فرض بر این بود که در هر لحظه، جریان به یکی از فازهای موتـور وارد و از فاز دیگر خارج می‌شود. در کاربردهایی که کاهش هزینه درایو مد نظر باشـد مـی تـوان بـه جـای آنکـه هماننـد آن‌چه در شکل ۲-۸۶ تحت عنوان Bipolar آورده شده، هم در نیم سیکلی که Back EMF مثبت اسـت بـه یـک فاز جریان فرستاد و هم در نیم سیکل منفی،فقط در موقعی که Back EMF القا شده در یک فاز مثبت اسـت اجـازه عبور جریان را داد. این مطلب در شکل ۲-۶ تحت عنوان Unipolar نشان داده شده است. به این ترتیب چون در هر لحظه جریان فقط در یکی از فازها برقرار است رابطه ۲-۲ به صورت زیر در خواهد آمد.

$$P = EI_d = K_e \omega_m I_d \qquad ۴\text{-}۲$$

و به این ترتیب برای گشتاور نیز خواهیم داشت.

$$T = \frac{P}{\omega_m} = K_e I_d = K_{T_{Unipolar}} I_d \qquad ۵\text{-}۲$$



شکل ۲-۸- ولتاژ القا شده و جریان هر فاز برای موتور BLDC با درایو بصورت تک قطبی (سمت راست) و دو قطبی (سمت چپ)[۹]