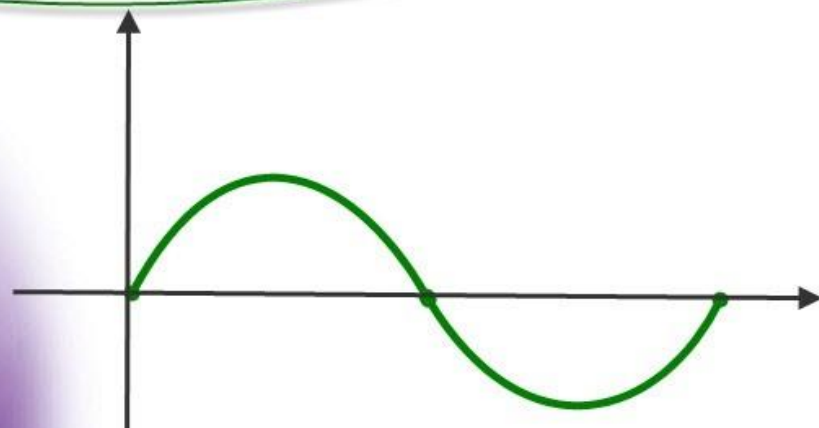


برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



برای دریافت فایل word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

موضوع پروژه:

تفاوت کنترل دور ماشینهای BLDC با اینورترهای ۴ سوئیچ و ۶ سوئیچ



برای خرید فایل word این پروژه [اینجا کلیک کنید](#).

(شماره پروژه = ۲۶۵)

پشتیبانی : ۰۹۳۵۵۴۰۵۹۸۶

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

فهرست مطالب

عنوان	شماره صفحه
چکیده.....	۱.....
فصل اول: اصول کارکرد و مشخصات موتور DC بدون جاروبک.....	۳.....
۱-۱-مقدمه.....	۳.....
۲-۱ : ساختار موتور BLDC.....	۵.....
۳-۱ : ساختمان استاتور موتور BLDC.....	۶.....
۴-۱ : ساختمان روتور موتور BLDC.....	۹.....
۵-۱ : حسگرهای موقعیت.....	۱۲.....
۶-۱ : تئوری عملکرد موتور BLDC.....	۱۶.....
۷-۱ : توالی کلید زنی.....	۱۸.....
۸-۱ : سنسورهای اثر هال.....	۱۹.....
۹-۱ : مزایا و معایب موتور BLDC.....	۲۴.....
۱-۹-۱ : مزایای موتور BLDC.....	۲۴.....
۲-۹-۱ : معایب موتور BLDC.....	۲۵.....
۱۰-۱ : مقایسه موتورهای BLDC با دیگر موتورها.....	۲۶.....
۱۱-۱ : نتیجه گیری.....	۲۹.....
فصل دوم: روش های کنترل موتور BLDC با اینورتر شش سوئیجه.....	۳۰.....
۱-۲ : مقدمه.....	۳۰.....

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

۲-۲: بررسی روش های کنترل موتور BLDC..... ۳۱

۱-۲-۲ : روش کنترل هیستریزیس جریان در موتورهای

BLDC..... ۳۳

۲-۲-۲: روش کنترل PWM جریان در موتور BLDC..... ۳۳

۳-۲-۲ : کنترل PWM جریان با شکل دهی

جریان..... ۳۴

۴-۲-۲ : کنترل از طریق لینک DC

جریان..... ۳۵

۳-۲ : کنترل مستقیم گشتاور (DTC) در موتور

BLDC..... ۳۷

۱-۳-۲ : کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC در حالت هدایت دو فاز

..... ۳۸

۱-۱-۳-۲ : کنترل مستقیم گشتاور بر اساس الگوریتم معمول در موتور های

القایی..... ۴۲

۴-۲ : نتیجه گیری..... ۴۶

فصل سوم: کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ و تفاوت آن با اینورترش

سوئیچ..... ۴۸

۱-۳ : مقدمه..... ۴۸

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

۲-۳ : کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت دو

فاز.....۴۸

۱-۲-۳ : طرح کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار

سوئیچه.....۴۹

۱-۱-۲-۳ : کنترل گشتاور الکترو مغناطیسی با انتخاب بردار های فضایی

ولتاژ.....۵۵

۱-۳-۳ : کنترل مستقیم گشتاور و غیر مستقیم شار موتور BLDC با اینورتر چهار

سوئیچه.....۶۲

۴-۳ : نتایج شبیه سازی روش پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار

سوئیچه در حالت هدایت سه

فاز.....۶۷

۵-۳ : تحلیل کموتاسیون درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه با هدایت دو

فاز.....۷۱

۶-۳ : عملکرد موتور BLDC با استفاده از اینورتر چهار

سوئیچه.....۷۲

۱-۶-۳ : مدل درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه.....۷۲

۲-۶-۳ : تنظیم جریان برای درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه.....۷۲

۷-۳ : تحلیل کموتاسیون.....۷۵

۱-۷-۳ : رفتار جریان فاز در کموتاسیون.....۷۵

۲-۷-۳ : کموتاسیون در سکتورهای متفاوت.....۷۷

۱-۲-۷-۳ : سکتور II.....۷۷

۲-۲-۷-۳ : سکتور IV.....۸۵

۳-۲-۷-۳ : سکتور VI.....۸۷

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

- ۸-۳: ریپل گشتاور در کموتاسیون ها..... ۹۲
- ۱-۸-۳: گشتاور در حین کموتاسیون..... ۹۲
- ۱-۱-۸-۳: سکتور II..... ۹۳
- ۲-۱-۸-۳: سکتور IV..... ۹۵
- ۳-۱-۸-۳: سکتور VI..... ۹۵
- ۹-۳: تحلیل نتایج تئوری..... ۹۶
- ۱۰-۳: نتایج شبیه سازی تنظیم جریان برای درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ..... ۹۹
- ۱۱-۳: نتیجه گیری..... ۱۰۳
- ۱۲-۳: مقایسه اقتصادی بین درایو چهار سوئیچ با شش سوئیچ..... ۱۰۴
- ۱-۱۲-۳: مقایسه اقتصادی دو اینورتر چهار سوئیچ و شش سوئیچ برای کاربردهای توان پایین (کسری از اسب بخار)
- ۱۳-۳: شبیه سازی درایو چهار سوئیچ و مقایسه آن با اینورتر شش سوئیچ..... ۱۰۵
- مراجع..... ۱۲۷
- نتیجه گیری..... ۱۳۰



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

چکیده:

موتورهای BLDC در مقایسه با موتورهای القایی و DC مزایای بسیاری دارند . مزایای چون نویز پایین،راندمان بالا،کاهش تلفات حرارتی،هزینه نگهداری کم و کنترل ساده و اسان باعث شده در صنایع فضایی کاربرد وسیع داشته باشد. تاکنون کنترل موتور BLDC با روشهای گوناگونی از قبیل کنترل هیستریزس جریان، کنترل PWM جریان،کنترل PWM جریان با شکل دهی جریان، کنترل از طریق لینک DC جریان و کنترل مستقیم گشتاور مطرح شده است.روش کنترل هیستریزس جریان روشی ساده و با کاربرد وسیع که براساس فرض رابطه خطی بین جریان فاز و گشتاور می باشد، اما در عمل مشخصه جریان و گشتاور غیر خطی است.روش کنترل PWM جریان مشابه روش کنترل هیستریزس جریان است با این تفاوت که پالس های کنترل جریان توسط یک بلوک PWM با فرکانس ثابت تولید می شود. در روش کنترل PWM جریان با شکل دهی جریان یک مرجع اختصاصی به منظور کاهش ریپل مورد نیاز است که می تواند امری نسبتا پیچیده و مشکل باشد . در روش کنترل از طریق لینک DC با فرض باریک بودن پهنای باند هیستریزس باعث می شود که جریان ماشین در کموتاسیون های متوالی دارای مقدار ثابت باشد.

در موتورهای BLDC به دلیل سیم پیچی متمرکز می توان از حسگرهای موقعیت گسسته استفاده نمود.این ویژگی باعث می شود که ساختار حسگرهای موقعیت در موتورهای BLDC بسیار ساده تر و حجم و هزینه این حسگرها کمتر گردد. اما این

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

حسگرها علیرغم ویژگی ها ، معایبی دارند از جمله افزایش هزینه، حجم موتور و پیچیدگی که در ساختار موتور ایجاد می کنند، زیرا نحوه طراحی موتور و جایگذاری این حسگرها نیازمند تکنولوژی و محاسبات بسیار دقیق می باشد. از سوی دیگر در سرعت های بالا به علت پسفازی جریان در این سرعت ها نسبت به نیروی ضد محرکه که عملا نیاز به روش های دقیق تر را الزامی می کند تا از رپل زیاد گشتاور بخصوص در لحظات کموتاسیون جلوگیری کند.

مقایسه بین اینورترهای ۴ سوئیچه و ۶ سوئیچه در ماشین های BLDC نشان می دهد در اینورترهای ۴ سوئیچه کاهش دو سوئیچ نسبت به اینورترهای شش سوئیچه مرسوم ، منجر به کاهش هزینه در ساخت اینورتر، کاهش تلفات سوئیچینگ، کاهش پیچیدگی در الگوریتم کنترلی ، کاهش مدارات واسط و مدارات تولید پالس می شود و مقایسه اقتصادی بین اینورترهای چهار سوئیچه و شش سوئیچه نشان می دهد که در موارد بکارگیری از موتورهایی با اینورتر چهار سوئیچه در صورتیکه برای توانهای پائین بکار رود به صرفه است ولی اگر بخواهد در توانهای بالا استفاده کنیم دیگر توجیح اقتصادی ندارد. و به عبارت دیگر ناحیه عملکرد مناسب درایو چهار سوئیچه نسبت به شش سوئیچه محدودتر (تقریبا برابر با نصف سرعت نامی) است. همچنین در این رساله تفاوت اینورترهای چهار سوئیچه و شش سوئیچه با نرم افزار مطلب شبیه سازی نشان داده شده که می توان مورد بررسی قرار داد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

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 می گردد ، زمانی که تنها عناصر کلید زنی موجود و قابل دسترس تایر وترون ها بودند . تنها در سال های اخیر (در طول دو دهه گذشته یا بیشتر) بوده که سامانه های موثر و ارزشمندی ساخته شده اند . 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 قسمت مدارها مجتمع (IC ها) و کلیدهای الکترونیک قدرت صورت گرفته است . پیشرفت اخیر کلیدهای نیمه هادی ولتاژ بالا ، جریان بالا ، باعث شده تا ساخت این قبیل سامانه های برای کاربردهای صنعتی مختلف عملی شود .

هم اکنون مجموعه ای از محرکه های DC بدون جاروبک در دست تولید است که با کاهش قسمت ، افزایش سادگی و قابلیت اطمینان بهتر اجزاء الکترونیکی ، باز هم جذاب تر خواهند شد .

موتور DC بدون جاروبک به عنوان یک موتور کنترل توان کم به طور گسترده ای به کار می رود این سیستم دارای ظاهر فیزیکی شبیه یک ماشین سنکرون سه فاز مغناطیس دائم است

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

. این ماشین عموماً از یک اینورتر شش پالس تغذیه مس شود که یک ولتاژ ثابت را به ولتاژهای سه فاز با فرکانس متناظر با سرعت لحظه ای روتور تبدیل می کند . ترکیب اینورتر – ماشین دارای مشخصه های پایانه و خروجی شبیه به موتور DC شنت است ، بنابراین ؟ آن را موتور DC بدون جاروبک می نامیم .

موتورهای DC بدون جاروبک مشخصه های مطلوب دو موتور معمول را با یکدیگر ترکیب می کنند ، آن ها ضمن آن که 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 می باشند . برخی مزایائی که سامانه های محرکه DC بدون جاروبک ارائه می کنند به صورت زیر خلاصه می شود .

حذف لوازم جاروبک و کموتاتور به موتور اجازه می دهد تا در سرعت های بسیار بالاتر از سرعت ماشین های DC متداول کار کرده و کاهش وزن و حجم موتور را به دنبال داشته باشد . علاوه بر این ، عدم وجود تیغه های کموتاتور مشکل اکسیداسیون تیغه را برطرف می نماید . این مسئله به قابلیت اطمینان بیشتر منجر شده و موتور عملاً به تعمیر نیاز ندارد . در برخی کاربردها ، جرقه زدن جاروبک می تواند خطرناک باشد ، لذا برای این کاربردها به کارگیری موتور بدون جاروبک لازم و ضروری است . هم چنین ، نبودن جاروبک ها موجب حذف انواع تداخل فرکانس رادیویی می گردد .

استفاده از روتور آهنربای دائم منجر به حذف لازم و ضروری است . هم چنین ، نبودن جاروبک ها موجب حذف انواع تداخل فرکانس رادیویی می گردد .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

استفاده از روتور آهنربای دائم منجر به حذف تلفات مسی روتور و بهبود قابل توجهی در مشخصه های حرارتی می گردد [۷].

گسترش و پیشرفت مواد آهنربای دائم انرژی بالا از قبیل ساماریوم - کبالت و ترکیبات نئودیمیوم - آهن - برم اجازه می دهد 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 می گردد.

۲-۱: ساختار موتور BLDC

موتورهای BLDC نیز مانند سایر موتورهای الکتریکی دارای یک قسمت دوار و یک قسمت ثابت می باشد. این گونه موتورها را می توان مانند موتورهای سنکرون در نظر گرفت زیرا که میدان روتور و استاتور با یک فرکانس یکسان یکدیگر را دنبال می کنند. از دیدگاه دیگر می توان این گونه موتورها را مانند یک موتور DC در نظر گرفت که عمل کموتاسیون توسط کلیدهای الکترونیکی انجام می شود. از این رو همواره برای تعیین کلید زنی صحیح به موقعیت روتور نیاز است. بنابراین در این گونه موتورها از حسگرهای موقعیت برای تعیین، موقعیت روتور استفاده می شود. در ادامه به بررسی قسمت های اصلی یک موتور BLDC می پردازیم.

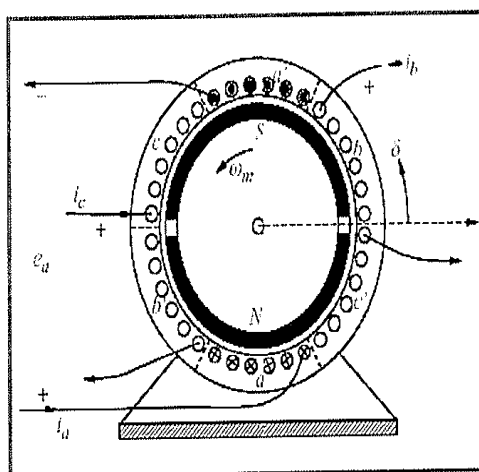
۳-۱: ساختمان استاتور موتور BLDC

همان طور که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است، استاتور موتورهای DC بدون جاروبک شامل ورق های فولادی و سیم پیچ هایی می باشد که در شیارهای درونی آن قرار گرفته است. استاتور موتورهای DC بدون جاروبک شبیه استاتور یک موتور القایی می باشد و تنها

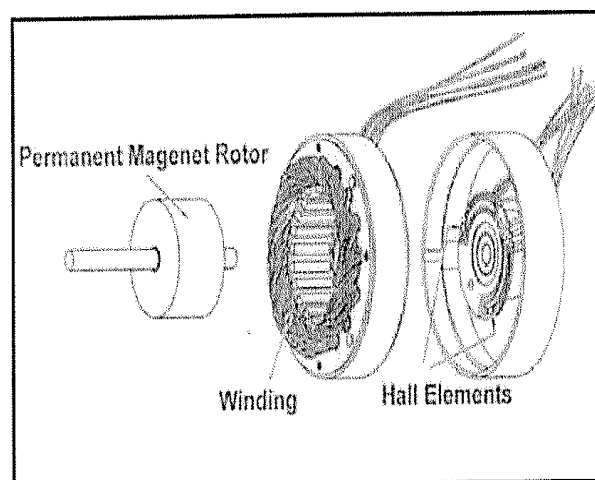
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

تفاوت در توزیع سیم پیچ های استاتور است . استاتور بیشتر موتورهای DC بدون جاروبک دارای سه سیم پیچ متمرکز است که به صورت ستاره به هم وصل می شوند . هر کدام از این سیم پیچ های متمرکز از کلاف هایی با تعداد دور مشخص به وجود می آیند تعداد معینی از سیم پیچ ها در شیارها قرار می گیرند و به هم وصل می شوند تا کلاف ها را بسازند ، هر کدام از این کلاف ها در اطراف استاتور توزیع می شوند تا زوج قطب ها ساخته شوند . ارتباط داخلی سیم پیچ ها در استاتور باعث می شود تا دو نوع متفاوت از نیروهای ضد محرکه به وجود آیند : موتورهای با نیروی ضد محرکه دوزنقه ای و موتورهای با نیروی ضد محرکه سینوسی .

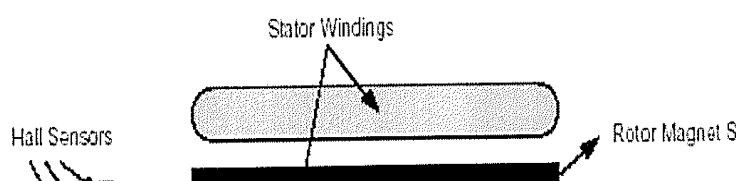
همان طور که از نام آن ها مشخص است ؛ موتورهای دوزنقه ای ، نیروی ضد محرکه به صورت دوزنقه ای شکل دارند و موتورهای سینوسی نیروی ضد محرکه به شکل سینوسی دارند ، این مطلب در شکل های (۱-۲) و (۱-۳) نشان داده شده است . علاوه بر نیروهای ضد محرکه ، جریان فاز در موتورهای دوزنقه ای و سینوسی با هم متفاوت است . گشتاور خروجی موتورهای سینوسی نرم تر از موتورهای دوزنقه ای است ، این مسئله هزینه



(ب) سیم پیچی استاتور موتور BLDC



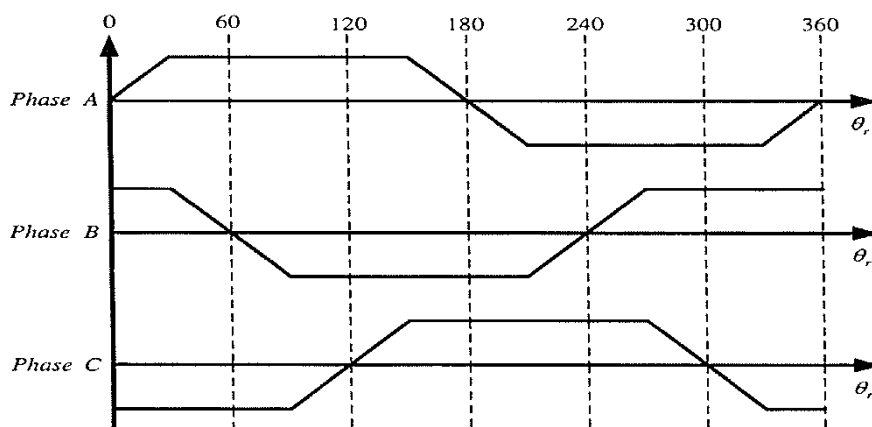
(الف) سه جزء اصلی موتور BLDC



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

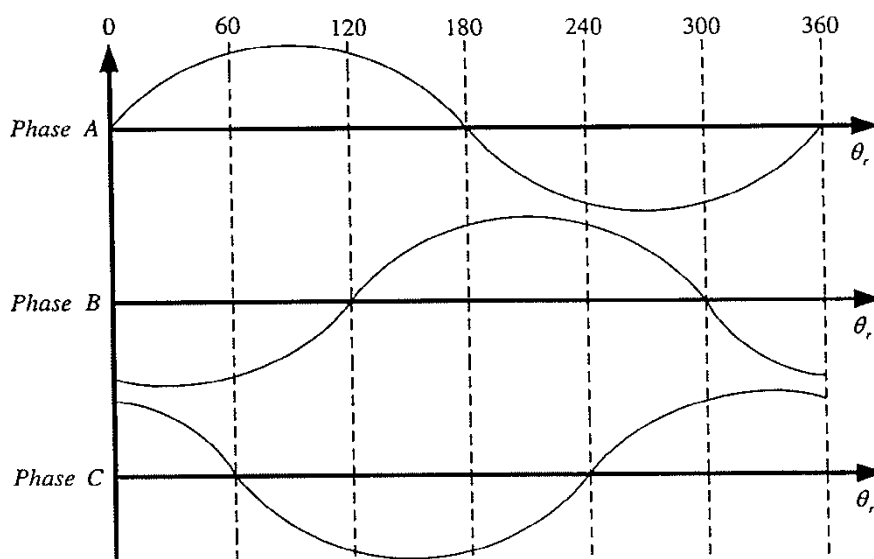
ساختمان موتور BLDC

بیشتری دارد چرا که موتورهای سینوسی سیم پیچ های بیشتری به دلیل توزیع سینوسی شار فاصله هوایی در اطراف استاتور دارند و به همین سبب سیم پیچ های استاتور، مس بیشتری مصرف می کنند.



شکل ۱-۲: نیروی محرکه بازگشتی دوزنقه‌ای شکل

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



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 متناسب برای ساختن روتور انتخاب می شود . گسترش مواد مغناطیسی دائم مفید به صورت تجاری در قرن بیستم شروع شد . در سال ۱۹۳۰ اولین ماده مغناطیسی که می توانست در وسایل الکترو مکانیکی به کار رود معرفی شد . این ماده ALNICO بود که هنوز هم در کاربردهای خاص به کار می رود . عیب اساسی آن کوچک بودن H_C ^۱ بود . در سال ۱۹۵۰ مغناطیس های 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

^۱ Coercive force-

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

دارد. بلندگوها و موتورهای DC کوچک، از جمله کاربردهای این مواد به شمار می روند. به خاطر B_r نسبتا کم این مواد، رسیدن به چگالی شار فاصله هوایی به اندازه کافی بزرگ برای ماشین های با کارایی بالا مشکل بود.

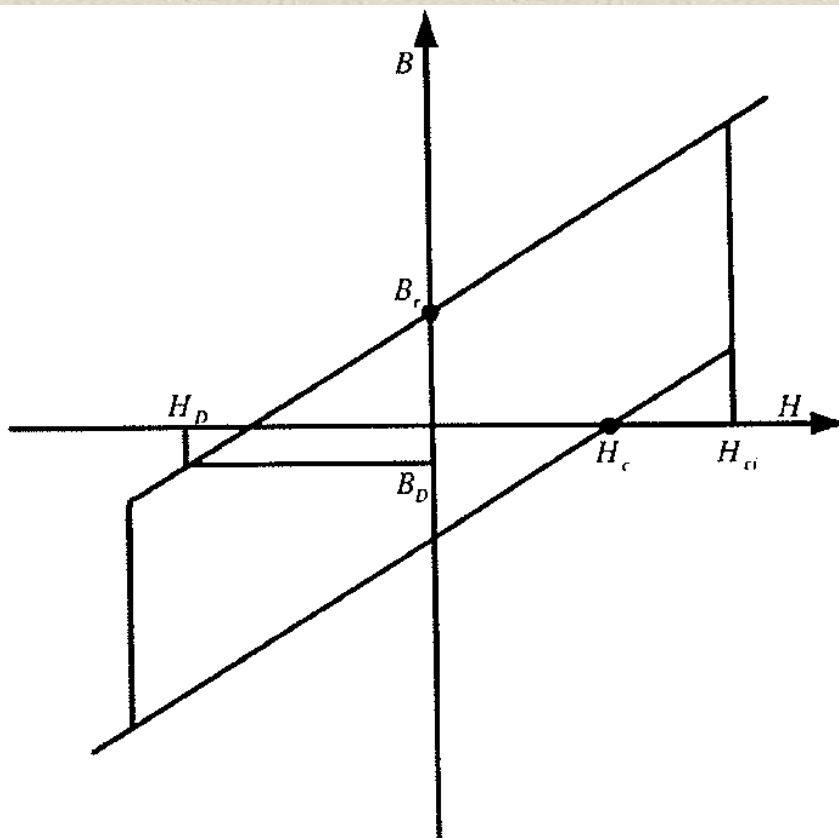
پس از آن در حدود سال ۱۹۷۰ مواد مغناطیسی^۱ ارائه شد. به طور خاص می توان به آلایژهای SmCo^۲ اشاره کرد. این مواد هم B_r بزرگتری داشتند و هم H_C بزرگی داشتند که ضریب انرژی بسیار بزرگتری نسبت به فریت را قابل دستیابی قرار می دادند. این ویژگی ها باعث شد که این مواد برای ماشین های با کارایی بالا انتخاب بسیار مناسبی باشند. ولی از طرف دیگر قیمت این مواد بالا بود که استفاده از آن ها را محدود می کرد. بعد از آن تلاش بر این بود که به موادی برسند که این ویژگی ها را داشته باشند و در عین حال ارزان قیمت هم باشند. این تلاش ها به مغناطیس های Ndfeb^۳ منجر شد که در سال ۱۹۸۳ معرفی شدند. این مواد از SmCo ارزان تر بودند و حتی چگالی انرژی بیشتری داشتند. موردی که کاربرد آن ها را محدود می کرد پایداری حرارتی پایین آن ها بود. در شکل (۱-۴) منحنی هیستریزیس مناسب برای ماشین های 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 می کند.

^۱ Rare – earth cobalt-

^۲ Samarium - Cobalt -

^۳ Neodymium – iron - boron -

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۱-۴: منحنی هیستریزیس مناسب برای ماشینهای BLDC

WikiPower.ir

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

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_2Co_{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 می شود. برای چرخاندن یک موتور BLDC، سیم پیچ های استاتور باید به ترتیب به منبع DC وصل شوند پس دانستن موقعیت روتور برای فهمیدن این مطلب که کدام سیم پیچ باید به منبع وصل شود لازم است. این حسگرها موقعیت آهنرباهای گردان را آشکار ساخته و کدهای منطقی را به یک رمز گشای کموتاسیون ارسال می کنند، رمز گشا پس از پردازش این کد، مدارهای آتش کلیدهای نیمه هادی که تامین کننده توان سیم پیچی استاتور موتور تحریک هستند را به کار می اندازد. از طریق تاثیر متقابل بین آهنرباهای دائم و جریان های جاری شده در سیم پیچی، گشتاوری ایجاد می شود. بدیهی است که روش های قابل اطمینان در حس کردن وضعیت و موقعیت روتور، همواره مستلزم تماس بین قسمت های متحرک و ساکن نمی باشد. حسگرهای عملی بدون تماس را می توان به صورت زیر طبقه بندی نمود:

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

* 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 می تابد و یک دیود حساس به نور ، حضور یا غیاب نور را آشکار می کند . 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 به طور کاملاً ناگهانی کاهش می یابد و لذا نقاط کلید زنی به خوبی مشخص می شوند . سیگنال خروجی نیز DC می باشد ، بنابراین به یک سوسازی یا فیلتر نمودن نیازی نیست . معایب حسگرهای نوری قیمت بالای آن ها است و این که آن ها به یک محیط تمیز احتیاج دارند . هم چنین ، این منبع نور قابلیت اطمینان کار خیلی بالایی ندارد به علاوه ، 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 دندانه دار که روی محور روتور نصب شده و بین سیم پیچ های ثابت حامل قطب ها میچرخد استفاده می شود . در این ساختار شار ac فرکانس بالا در اطراف مدار مغناطیسی جهت داده می شود که دامنه سیگنال القا شده در هر قطب

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

سیم پیچ تابعی از رلوکتانس فاصله هوایی بین چرخ دندانه دار و قطب مربوطه است و این مقدار ثابت می گردد. از آن جا که رلوکتانس فاصله هوایی بر حسب وضعیت روتور تغییر می کند، این امکان وجود دارد که موقعیت روتور از روی دامنه سیگنال القا شده، تشخیص داده شود. مزایای این روش عبارتست از: قیمت پایین، سادگی طراحی و مناسب بودن جهت استفاده در محیط های آلوده. معایب این روش عبارتست از: نیاز به یک سو سازی و فیلتر نمودن سیگنال خروجی و هم این که سیگنال به تدریج ساخته شده و شکل می گیرد. معمولاً یک مدار تریگر برای آشکار نمودن نقاط صحیح کلید زنی، مورد نیاز است [۱۳].

* حسگرهای میدان مغناطیسی :

در این روش موقعیت آهنرباهای دائم متصل به روتور، به وسیله حسگرهای اثر هال مشخص می شود. میدان مغناطیسی روتور را می توان به طور مستقیم مشخص نمود، بنابراین به آهنرباهای کمکی نیازی نیست. هم چنین حسگرها باید به اندازه کافی دور از سیم پیچ استاتور قرار داده شوند تا از مزاحمت میدان مغناطیسی تولید شده به وسیله جریان های استاتور نسبت به عملکرد شان جلوگیری شود. مزیت حسگرهای میدان مغناطیسی هال عبارتند از: عاری بودن از تداخل فرکانس های رادیویی، مناسب بودن برای محدوده گسترده شرایط کارکرد و دقت بالا. در گذشته، مهندسين تمايل چندانی به استفاده از حسگرهای اثر هال نداشتند زیرا قیمت مدارهای مجتمع (IC ها) و هابیریدهای هال خیلی بیشتر از قیمت اجزاء مکانیکی یا نوری مربوط به حسگرهای رلوکتانسی بود. قیمت حسگرهای هال در سال های اخیر به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است و هم اکنون این حسگرها به صورت گسترده در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می گیرند. حسگر اثر هال در قسمت ثابت

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

موتور تعبیه می شود. تعبیه کردن حسگر اثر هال در عمل فرایند پیچیده ای است. چر که هر گونه جابه جایی در این حسگرها باعث می شود 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 می باشد. بر این اساس سازندگان موتور توالی کموتاسیون را معین می سازند که در زمان کنترل موتور باید دنبال شود.

*حسگرهای خازنی :

این و سایل تا حدی مشابه با حسگرهای رلوکتانسی هستند. موقعیت یک چرخ که به طور مناسبی طراحی و ساخته شده و روی محور روتور نصب شده است، به وسیله یک حسگر اندازه گیر خازنی مشخص می شود. حسگرهای خازنی، فشرده و کم حجم بوده. می توانند به راحتی در داخل قاب موتور قرار داده شوند. اما با این حال، برای افزایش سیگنال خروجیه یک سطح قابل استفاده، تقویت نسبتا زیادی مورد نیاز است.

۱-۶: تئوری عملکرد موتور BLDC

موتور DC بدون جاروبک BLDC نوعی از موتورهای بدون جاروبک می باشد. در این موتور آهنربای دائمی روی روتور واقع است و استاتور آن از طریق یک اینورتر تغذیه می گردد. در موتور DC کموتاتوری میدان استاتور ثابت بوده و عمل معکوس کردن پلاریته میدان مغناطیسی استاتور توسط کموتاتورها و جاروبک ها صورت می گیرد و از آن جا که کموتاتورها ثابت هستند لحظات کلیدزنی به صورت اتوماتیک با پلاریته میدان مغناطیسی خارجی (که هادی ها در بین آن ها در حرکتند) سنکرون می گردند. در موتور BLDC عمل معکوس کردن پلاریته میدان مغناطیسی استاتور به صورت سنکرون با موقعیت روتور

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

توسط ترانزیستورهای قدرت صورت می گیرد. از آن جا که عمل کموتاسیون در هر نوع ماشین DC و BLDC یکسان است، بنابراین مشخصه های 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 می کند، بنابراین شکل جریان فاز به صورت مربعی بوده و به این نوع تحریک، تحریک مربعی اطلاق می شود. هم چنین ولتاژ ضد محرکه القایی نیز در این نوع تحریک به صورت ذوزنقه ای می باشد و به همین دلیل واژه تحریک ذوزنقه ای اغلب به جای تحریک مربعی نیز به این روش اطلاق می شود.

عملکرد یک موتور DC با سه کموتاتور از نظر ساختاری مشابه یک موتور DC بدون جاروبک مربعی می باشد. سیم پیچ های موتور DC همان فازهای موتور بدون جاروبک می باشند. جاروبک ها و کموتاتورها در واقع مشابه ترانزیستورها در اینورتر منبع ولتاژ می باشند. مشخصه های اساسی و مهم در این دو نوع موتور با هم یکی هستند. شکل موج جریان در فازها مربعی با زاویه هدایت ۱۲۰ درجه هستند و دقیقاً در هر لحظه فقط دو فاز در حال هدایت می باشند. کموتاتورها موجب کشیدن جریان DC ثابت از منبع تغذیه DC می شوند و هم چنین گشتاور موتور نیز تقریباً ثابت خواهد بود. تولید گشتاور ثابت مخصوصاً در سرو رادیوهای که در آن ها کنترل دقیق سرعت و موقعیت مد نظر باشد، حائز اهمیت است. در کاربردهای ماشین کاری میزان صیقلی شدن سطوح ما بین غلطک شدیداً تحت تاثیر گشتاور تولیدی سرو درایو قرار دارد. تغییرات پرریودیک گشتاور (ریپل) نیز به نوبه خود سبب ایجاد لرزش و ارتعاش در تجهیزات سرو درایو می گردد. در سرعت ثابت، گشتاور الکترو

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

مغناطیسی ثابت و جریان DC منبع تغذیه منجر به تولید انرژی الکترو مغناطیسی ثابت بر

اساس رابطه زیر می شود :

(۱-۱)

$$E * I = T * \omega_m$$

که در آن E ولتاژ ضد محرکه دو سر دو فاز سری شده و I نیز جریان منبع تغذیه می باشد .

ولتاژ ضد محرکه در دو سر هر دو فاز نیز باید در هر ۱۲۰ درجه ثابت بماند و اگر تغییرات

شار پیوندی هر فاز با چرخش روتور به صورت خطی تغییر نماید این حالت محقق می شود .

به علاوه تغییرات خطی شار پیوندی بستگی به توزیع یکنواخت شار مغناطیسی آهنربای دائم

در اطراف استاتور دارد .

بر اساس رابطه (۱-۱) و از نقطه نظر کنترل ، موتور DC به سادگی و به طور کاملا خطی

قابل کنترل است و به همین دلیل در سرو درایو های DC و درایوهای دور متغیر در صنعت

کاربرد وسیع دارد و از آنجا که موتورهای DC بدون جاروبک نیز در فرم ایده آل خود دقیقا

مشابه موتورهای DC رفتار می کنند و می توانند همان کارایی را در صنعت داشته باشند .

۷-۱ : توالی کلید زنی

شکل (۵-۱) نمونه ای از سیگنال حسگرهای اثر هال را با توجه به نیروی ضد محرکه و

جریان فاز نشان می دهد . در هر ۶۰ درجه از چرخش یکی از حسگرهای اثر هال تغییر

حالت می دهد . با توجه به این مسئله شش حالت صحیح وجود دارد که چرخه الکتریکی

کامل شود . بنابراین به طور هم زمان در هر ۶۰ درجه توالی کلید زنی را باید تغییر داد .

لروما یک چرخه الکتریکی نباید با یک دور مکانیکی کامل روتور مطابقت داشته باشد ، بلکه

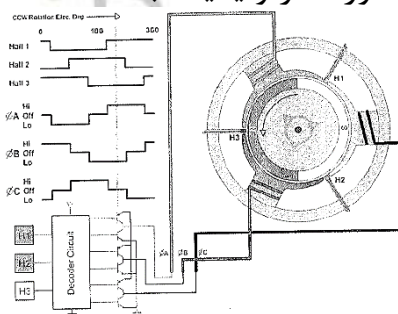
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

تا تعداد مشخصی از چرخه های الکتریکی ، یک دور مکانیکی کامل می شود که به تعداد جفت قطب های روتور بستگی دارد ، به ازای هر جفت قطب روتور یک چرخه الکتریکی اتفاق می افتد .

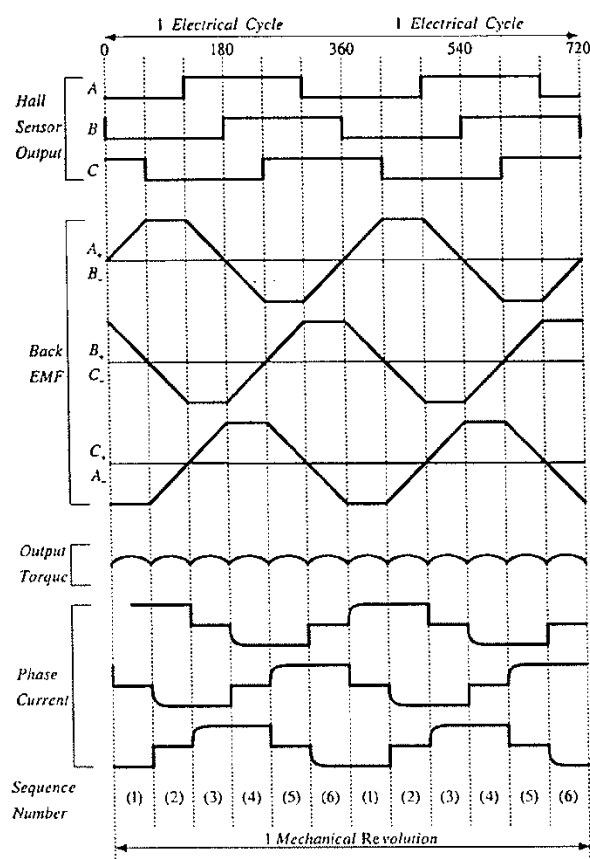
۸-۱: سنسورهای اثر هال

- * سنسورهای اثر هال بین سیم پیچی ها قرار می گیرند .
- * با عبور قطب N روتور از مقابل هر سنسور اثر هال ، خروجی سنسور ۱ منطقی می شود .
- * با عبور قطب S روتور از مقابل هر سنسور اثر هال ، خروجی سنسور صفر منطقی می شود .
- * در یک موتور BLDC سه فاز دو قطبی ، سنسورهای اثر هال به فاصله ۱۲۰ درجه مکانیکی نسبت به یکدیگر قرار گرفته اند .
- * لذا خروجی های سنسورهای اثر هال با یکدیگر اختلاف فاز ۱۲۰ درجه دارند .

* حالتی که خروجی هر سه سنسور صفر و یا یک باشند ، اصلا وجود ندارد .



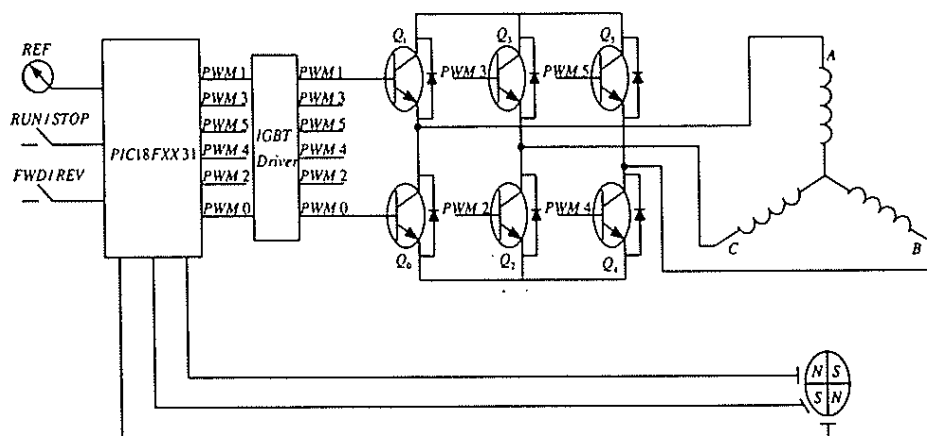
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



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

نمودار شکل (۱-۶) تجهیزات مورد نیاز که برای کنترل موتورهای DC بدون جاروبک استفاده می شود را نشان می دهد Q_0 تا Q_6 کلیدهای اینورتر هستند که با یک میکروکنترلر $PIC_{8FXX} 31$ کنترل می شوند. نوع کلیدهای قدرت می تواند بر اساس ولتاژ موتور و جریان های استاتور، IGBT, POWER MOSFET یا ترانزیستورهای دوقطبی باشد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۱-۶: دیاگرام سیستم کنترل موتور BLDC

جداول (۱-۲) و (۱-۳) توابع کلید زنی را بر اساس حسگرهای اثر هال A, B, C در جهت عقربه های ساعت و خلاف عقربه های ساعت نشان می دهد. همان طور که در بخش حسگرهای اثر هال به آن پرداخته شد، حسگرهای اثر هال می توانند نسبت به یکدیگر زاویه ۶۰ یا ۱۲۰ درجه داشته باشند. زمانی که یک سیستم کنترل برای یک موتور خاص در نظر گرفته می شود، توالی را سازنده موتور مشخص می کند که باید؟ آن را مد نظر قرار دارد.

[۸]

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

جدول ۱-۲: جدول کلید زنی موتور BLDC به منظور چرخش در جهت عقربه های

ساعت

حالت هدایت	وضعیت سنسور اثر هال			کلیدهای فعال		وضعیت ها		
	A	B	C			فاز A	فاز B	فاز C
۱	۰	۰	۱	کلید ۱	کلید ۴	قطب مثبت منبع	شناور	قطب منفی منبع
۲	۰	۰	۰	کلید ۱	کلید ۲	قطب مثبت منبع	قطب منفی منبع	شناور
۳	۱	۰	۰	کلید ۵	کلید ۲	شناور	قطب منفی منبع	قطب مثبت منبع
۴	۱	۱	۰	کلید ۵	کلید ۰	قطب منفی منبع	شناور	قطب مثبت منبع
۵	۱	۱	۱	کلید ۳	کلید ۰	قطب منفی منبع	قطب مثبت منبع	شناور
۶	۱	۱	۱	کلید ۳	کلید ۴	شناور	قطب مثبت منبع	قطب منفی منبع

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

جدول ۱-۳: جدول کلیدزنی موتور BLDC به منظور چرخش در خلاف جهت عقربه

های ساعت

حالت هدایت	وضعیت سنسور اثر هال			کلیدهای فعال		وضعیت فازها		
	A	B	C			فاز A	فاز B	فاز C
۱	۰	۰	۱	کلید ۱	کلید ۴	شناور	قطب منفی منبع	قطب مثبت منبع
۲	۰	۰	۰	کلید ۱	کلید ۲	قطب مثبت منبع	قطب منفی منبع	شناور
۳	۱	۰	۰	کلید ۵	کلید ۲	قطب مثبت منبع	شناور	قطب منفی منبع
۴	۱	۱	۰	کلید ۵	کلید ۰	شناور	قطب مثبت منبع	قطب منفی منبع
۵	۱	۱	۱	کلید ۳	کلید ۰	قطب منفی منبع	قطب مثبت منبع	شناور
۶	۰	۱	۱	کلید ۳	کلید ۴	قطب منفی منبع	شناور	قطب مثبت منبع

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

۹-۱ : مزایا و معایب موتور BLDC

۱-۹-۱ : مزایای موتور BLDC

موتورهای BLDC به دلیل مزایای زیر در صنایعی نظیر خودرو سازی ، صنایع فضایی کاربرد وسیع دارند :

- نویز پایین : در موتور BLDC از لحاظ مکانیکی به علت نبود جاروبک یا حلقه لغزان تمام نویزهای مکانیکی به جز نویزهایی که در اثر اتصالات ، بلبرینگ و بار هستند ، حذف می شوند .

- راندمان بالا : موتور BLDC دارای راندمان مکانیکی بالایی می باشد . راندمان بالای موتور BLDC به علت وجود میدان حاصل از آهنربای دائم بوده ، که دارای شار تقریباً پیوسته و ثابتی است و در نتیجه هیچ گونه میرایی در توان الکتریکی وجود ندارد . ویژگی مهم دیگر آهنرباهای دائم طول عمر زیاد آن می باشد ، تحت کارکرد در شرایط مورد نظر آهنربای دائم دارای ضریب آسیب پذیری بسیار پایینی است زیرا این آهنرباهای دائم برای آنکه خاصیت آهنربایی خود را برای مدت طولانی نگه دارند ، طراحی شده اند .

- کاهش تلفات حرارتی : در موتورهای BLDC ، آهنربای دائم بر روی روتور قرار گرفته است و فقط استاتور دارای سیم پیچی است ، بنابراین فقط تلفات حرارتی مربوط به سیم پیچ های استاتور وجود دارد .

- طول عمر زیاد و نگهداری کم : نبود جاروبک یا حلقه لغزان باعث افزایش طول عمر روتور می شود و تنها عواملی که در طول عمر موتور تاثیر گذارند عایق بندی بلبرینگ ها و آهنربای دائم می باشند .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

- کنترل ساده و آسان : در موتور BLDC گشتاور خروجی به طور مستقیم به جریان استاتور وابسته بوده در نتیجه کنترل آن ساده می باشد . به همین دلیل بسیاری از کارخانجات نیمه هادی به تولید تراشه هایی برای کنترل موتور BLDC رو آورده اند .

۱-۹-۲ : معایت موتور BLDC

موتورهای BLDC ، همانند سایر ماشین های الکتریکی دارای معایبی هستند :

- هزینه آهنربای دائم : هزینه های آهنربای دائم با چگالی انرژی بالا در کاربردهایی که هزینه اولیه آن ها مهم می باشد ، استفاده از آن ها را نفی می کند . به طور معمول سرامیک ها هزینه کمتری داشته و دارای چگالی انرژی کمتری نیز هستند . آهنرباهای ندیم - آهن - برم دارای چگالی انرژی بیشتری نسبت به انواع دیگر تا حد سه برابر می باشند . آهنرباهای ساماریوم - کبالت دارای چگالی انرژی قابل مقایسه ای با آهنرباهای ندیم - آهن - برم هستند که هزینه آن ها شش برابر انواع سرامیکی است .

- احتمال آهنربا زدایی آهنرباهای دائم : برای آن که آهنربای دائم دچار آهنربا زدایی نشود حفاظت بسیار بالا مورد نیاز است . عوامل مختلف از جمله حرارت می تواند باعث آهنربا زدایی شود .

۱-۱۰ : مقایسه موتورهای BLDC با دیگر موتورها

با مقایسه موتورهای DC بدون جاروبک با موتورهای القایی و موتورهای DC ، موتورهای DC بدون جاروبک مزیت های بسیار و معایب کمی دارند . موتورهای DC بدون جاروبک به نگهداری کمی نیاز دارند بنابراین طول عمر بیشتری در مقایسه با موتورهای DC دارند . موتورهای DC بدون جاروبک نسبت توان خروجی به اندازه قاب بیشتری ، نسبت به

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

موتورهای DC و موتورهای القایی دارند. از آن جایی که روتور این موتورها از آهنربای دائمی ساخته شده لختی روتور در مقایسه با انواع دیگر موتورها کمتر است. این امر پاسخ دینامیکی موتور را بهبود می بخشد و هم چنین زمان راه اندازی موتور را کوتاه تر میکند. موتورهای DC بدون جاروبک نیاز به بازرسی و تعمیر ندارند، بنابراین می توان آن ها را برای مکان هایی که دسترسی به آن مشکل است و وسایلی که نگهداری آن ها مشکل است به کار برد. موتورهای DC بدون جاروبک نسبت به موتورهای DC سر و صدای کمتری دارند. مدل هایی که با ولتاژ پایین تغذیه می شوند برای سیستم هایی که با باتری کار می کنند، و سایل قابل حمل یا مصارف پزشکی بسیار مناسب است. جداول (۱-۴) و (۱-۵) مقایسه بین موتورهای DC، موتورهای القایی و موتورهای DC بدون جاروبک را نشان می دهد [۹]



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

جدول ۱-۴ : مقایسه بین موتورهای BLDC و موتور DC

موتور DC	موتور DC بدون جاروبک	خصوصیات
با جاروبک صورت می گیرد	با کلیدهای الکترونیک قدرت صورت می گیرد	کموتاسیون
نگهداری مستمر نیاز است	به خاطر نبودن ذغال کمتر مورد نیاز است .	تعمیر و نگهداری
کوتاه تر است	طولانی تر است	طول عمر
متوسط	بالا(افت و ولتاژ دو سر جاروبک وجود ندارد.)	راندمان
حرارت سیم پیچی روتور در فاصله هوایی باعث افزایش دمای آن می شود و نسبت توان خروجی به اندازه قاب محدود می شود.	نسبت توان به اندازه قاب به دلیل آنکه روتور آهنربای دائم است و اتلاف حرارت فقط از طریق استاتور صورت می گیرد ، کاهش می یابد	نسبت توان خروجی به اندازه قاب
بالاتر است ، زیرا روتور دارای سیم پیچی است ، این موضوع پاسخ دینامیکی را محدود می سازد.	پایین است، چرا که روتور آهنربای دائم است ، این موضوع پاسخ دینامیکی را بهبود می بخشد .	لختی روتور
پایین است ، به دلیل محدودیت های مکانیکی که توسط ذغال و جاروبک ها ایجاد می شود	بالاتر است ، زیرا هیچ گونه محدودیت مکانیکی به دلیل نبود جاروبک یا کموتاتور وجود ندارد	محدوده سرعت
بالا (جرقه در جاروبک باعث ایجاد سرو صدا می شود)	پایین	تولید صدا
کمتر	بیشتر (به دلیل این که آهنربای دائمی دارد هزینه ساخت بیشتر است)	هزینه ساخت

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

جدول ۱-۵ : مقایسه بین موتورهای BLDC با موتورهای القایی

موتورهای القایی AC	موتورهای DC بدون جاروبک	خصوصیات
گشتاور پایین در سرعت هایی پایین	در تمام سرعت ها در گشتاور نامی کار می کند	خصوصیات سرعت - گشتاور
از آنجایی که استاتور و روتور سیم پیچ دارند برای توان خروجی یکسان دارای اندازه بزرگ تری نسبت به موتورهای BLDC است	با توجه به این که روتور آهنربای دائم است اندازه کوچک تری برای توان خروجی مشخص می توان به دست آورد	نسبت توان خروجی به اندازه قاب
بالا ، خصوصیات دینامیک ضعیف	پایین ، خصوصیات دینامیک بهتر	لختی روتور
تقریبا بیشتر از ۷ برابر مقدار نامی	هیچ مقدار مشخصی ندارد	جریان شروع حرکت موتور
برای سرعت ثابت هیچ دستگاه کنترل لازم نیست . برای کنترل سرعت به دستگاه کنترل نیاز است	دستگاه کنترل برای کارکرد مداوم موتور مورد نیاز است. از یک دستگاه کنترل در سرعت های مختلف می توان استفاده کرد	دستگاه کنترل
روتور با فرکانس پایین تری نسبت به استاتور کار می کند	هیچ گونه افتی بین فرکانس استاتور و روتور مشاهده نمی شود	افت بین فرکانس استاتور و روتور

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

۱-۱۱: نتیجه گیری

در این فصل به بررسی اصول عملکرد موتور BLDC پرداخته شد. این گونه موتورها راندمان بالاتری نسبت به موتورهای القایی و DC دارد. از سوی دیگر کنترل این موتور بسیار ساده می باشد. اما باید خاطر نشان کرد که ساخت این موتورها، خصوصا در توان های بالا پیچیدگی و هزینه بالایی دارد.



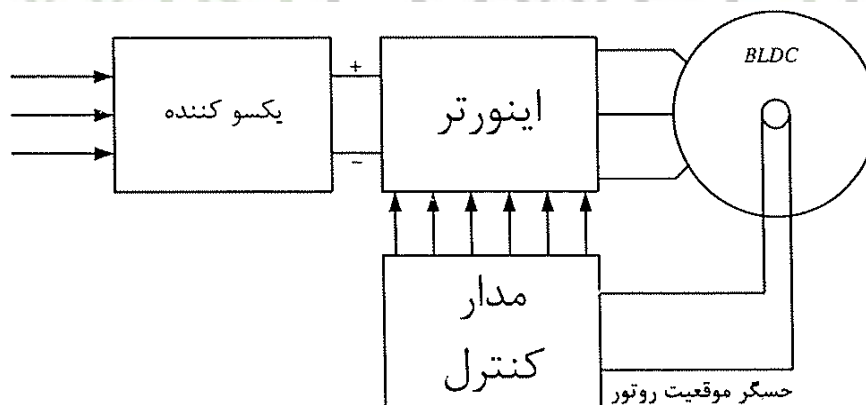
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

فصل دوم

روش های کنترل موتور BLDC با اینورتر شش سوئیچ

۱-۲ : مقدمه

در فصل اول اصول کارکرد موتور BLDC مورد بررسی قرار گرفت . در این فصل به بررسی برخی روش های کنترلی موتور BLDC می پردازیم ، به منظور فراهم کردن ولتاژ و جریان های مورد نیاز برای موتور BLDC به سه بخش اصلی نیاز داریم . قسمت اول منبع تغذیه ای است که شامل یکسو کننده می باشد که برای تبدیل ولتاژ AC و DC به کار می رود . دومین قسمت ، اینورتر می باشد که شامل کلیدهای قدرت (برای هر فاز دو کلید) ، حسگرهای جریان و مدار حفاظت از آن ها است . سومین قسمت ، کنترلر درایو می باشد ، این قسمت وظایفی مانند ، مدولاسیون پهنای پالس و عملیات کنترل حلقه سرعت ، گشتاور و موقعیت را بر عهده دارد . شکل (۱-۲) ارتباطات بین این سه بلوک را نشان می دهد .



شکل ۱-۲: سه قسمت اصلی درایو موتور BLDC

عملیات لازم در مدار شکل (۱-۲) به شرح زیر می باشد :

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

۱- قطع و وصل کردن ترانزیستورهای مدار قدرت به دو وضعیت خاموش و روشن به منظور تنظیم جریان روی یک مقدار پیش از تعیین شده . این مقدار «مرجع جریان» یا "Set - point current" می باشد .

۲- ایجاد حفاظت در مقابل جریان بیش از حد در موتور و یا خطای حاصل از اتصال کوتاه .
۳- ترتیب هدایت ترانزیستورهای قدرت ، این امر باعث خواهد شد تا جهت جریان در هر فاز موتور متناسب با موقعیت روتور باشد .

۴- تعیین جریان مرجع (I_{SP}) بر حسب تابعی از سیگنال خطای سرعت ($\Delta\omega$) که خطای بین سرعت واقعی و سرعت مطلوب را ارائه می دهد .

۲-۲: بررسی روش های کنترل موتور BLDC [۱۰]

۲-۲-۱: روش کنترل هیستریزیس جریان در موتورهای BLDC

الگوریتم معمول کنترل برای یک موتور BLDC ، کنترل PWM جریان است . این روش بر اساس فرض رابطه خطی بین جریان فاز و گشتاور ، همانند یک موتور DC دارای جاروبک است . بنابراین با تنظیم جریان فاز ، می توان گشتاور الکترو مغناطیسی را کنترل کرد . این روش ، روشی ساده و با کاربرد سریع و کم هزینه است اما مشخصه های کوپلینگ بین جریان تغذیه و گشتاور حاصله در عمل ، غیر خطی است . در درایوهای موتورهای BLDC مشکلات ناشی از نیروی ضد محرکه و کموتاسیون جریان فاز عوامل عمده اعوجاج گشتاور الکترو مغناطیسی است .

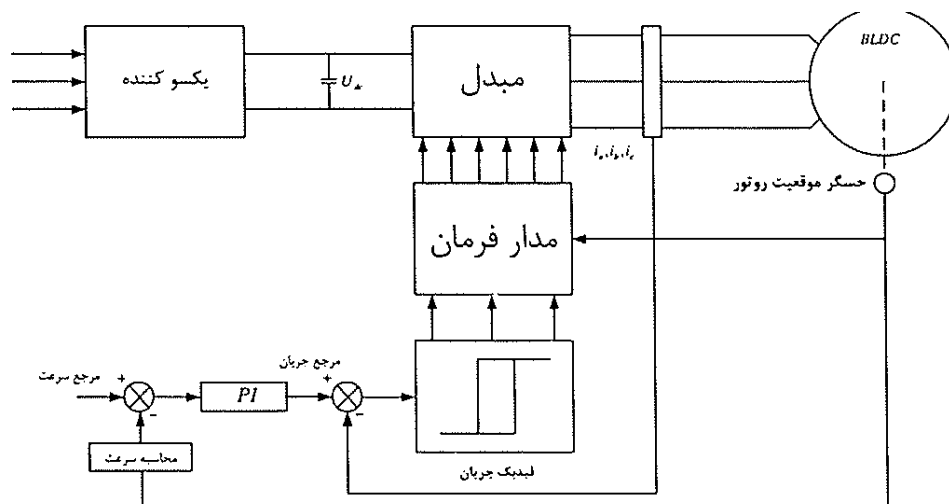
ساختار کلی کنترل جریان برای یک موتور BLDC در شکل (۲-۲) نشان داده شده است . جریان لحظه ای در موتور در هر فاز توسط سگ تنظیم کننده هیستریزیس ، تنظیم می شود

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

. اطلاعات موقعیت روتور به منظور فعال کردن منطق کموتاسیون ، حس می شوند و مجموعا

شش خروجی برای کنترل کلیدهای قدرت به دست می آید . مرجع جریان توسط یک

رگولاتور PI تعیین می شود ، که سرعت روتور را ثابت نگه دارد [۱] .



شکل ۲-۲: ساختار کلی کنترل جریان هیستریزس برای یک موتور BLDC [۱]

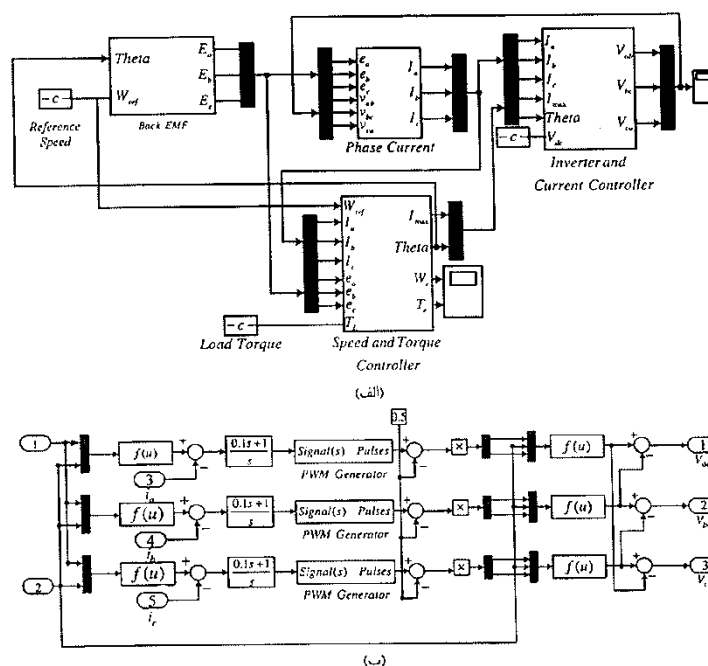
WikiPower.ir

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۲-۲-۲: روش کنترل PWM جریان در موتور BLDC

ساختار کلی این روش مشابه روش هیستریزس است، با این تفاوت که پالس های کنترل جریان توسط یک بلوک PWM با فرکانس ثابت تولید می شود. در این روش خطای ناشی از مقایسه جریان مرجع و جریان های فاز یا خط توسط بلوک PI و با در نظر گرفتن موقعیت الکتریکی روتور یک خروجی برای مقایسه با موج مثلثی حامل تولید کرده که با تغییرات سطح آن مدت زمان روشنایی کلیدهای هر فاز تغییر می کند و باعث کنترل جریان می شود. در شکل (۲-۳) شمای الگوریتم PWM جریان و نحوه شبیه سازی آن در نرم افزار

MATLAB نشان داده شده است [۲].



شکل ۲-۳: (الف) دیاگرام کنترل PWM جریان در نرم افزار MATLAB، (ب) دیاگرام تولید PWM [۲]

۳-۲-۲: کنترل PWM جریان با شکل دهی جریان

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

به منظور کاهش ریپل گشتاور یک مرجع جریان اختصاصی نیاز است که می تواند امری نسبتا پیچیده و مشکل باشد. در این بخش، یک مثال ساده از کنترل جریان با تکنیک شکل دهی جریان ارائه شده است [۳].

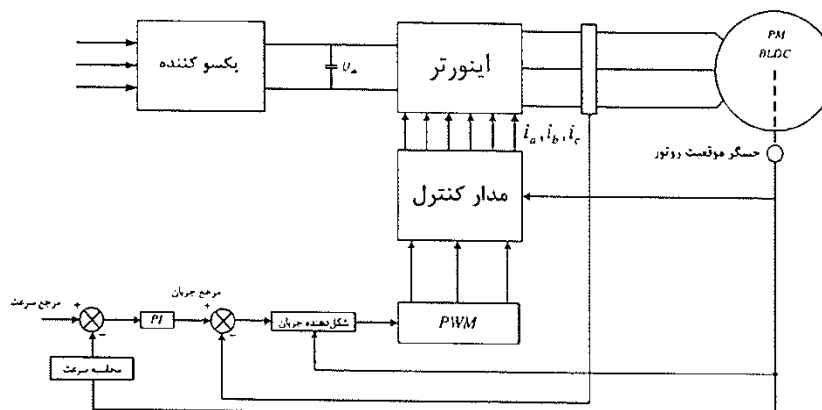
شکل (۲-۴) شماتیک کنترل PWM جریان را با تکنیک شکل دهی جریان نشان می دهد. در روش کنترل PWM جریان، مرجع بر طبق یک شکل موج نیروی ضد محرکه از پیش تعیین شده، تولید می شود تا گشتاور الکترو مغناطیسی ثابت بماند. کنترل هیستریزیس جریان، جریان فاز را بر اساس این مرجع تنظیم می کند. معادله گشتاور الکترو مغناطیسی در موتورهای BLDC به فرم زیر می باشد:

(۱-۲)

$$T = \frac{1}{\omega} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)$$

که ω سرعت زاویه ای روتور، e_a, e_b, e_c نیروی ضد محرکه فازهای a, b, c می باشند. هم چنین i_a, i_b, i_c جریان فازهای a, b, c می باشند. با توجه به این که ثابت زمانی مکانیکی بسیار بزرگ تر از ثابت زمانی الکتریکی است، در نتیجه هنگامی که جریان فاز بر اساس شکل موج جریان مرجع کنترل می شود، با فرض ثابت بودن سرعت روتور، گشتاور الکترو مغناطیسی نیز ثابت می ماند.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۲-۴: شماتیک کنترل PWM جریان با تکنیک شکل دهی جریان [۳]

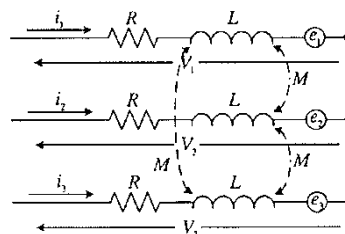
۲-۲-۴: کنترل از طریق لینک DC جریان

به منظور ساده سازی تحلیل، از کنترل هیستریزس برای دامنه جریان استفاده کرده ایم. برای این تحلیل، پهنای باند هیستریزس بسیار باریک فرض شده است. این امر باعث می شود جریان سیم پیچی های ماشین در کموتاسیون های متوالی دارای مقدار ثابت باشد. شکل (۲-۴) ساختار کلی درایو را با این روش کنترل نشان می دهد. ماشین BLDC با اینورتر PWM کنترل شده با جریان تغذیه می و شد. در این جا فرض می کنیم منبع ایده آل است. در این مدل دو سطح کنترل کننده جریان وجود دارد. یکی از آن ها توالی فاز و مقدار جریان کموتاسیون فازها را از یکدیگر جدا می کند، این کنترل تحت تاثیر حسگرهای موقعیت روتور می باشد. سطح دوم از کنترل جریان، دامنه جریان های ماشین را که توسط حسگرها اندازه گیری می شوند، کنترل می کنند. سطح دوم کنترل می تواند توسط کنترل PWM یا هیستریزس انجام شود معمولاً جریان های ماشین مستقیماً توسط حسگرهایی که در لینک AC بین اینورتر و ماشین قرار گرفته اند، اندازه گیری می شوند. اما با توجه به شکل مربعی جریان ها و مدلی که فازهای ماشین داریم می توان اندازه گیری جریان را

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

توسط حسگرهایی روی لینک DC در ورودی اینورتر انجام داد. مدل ماشین و قرار دادهای

ذکر شده در شکل (۲-۵) به منظور مطالعه آورده شده است [۱۳].



شکل ۲-۵: مدل موتور BLDC [۱۳]

معادلات ولتاژ عبارتند از :

(۲-۲)

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}$$

که v_1, v_2, v_3 ولتاژهای استاتور ، R مقاومت استاتور ، L_s اندوکتانس نشستی استاتور ،

i_1, i_2, i_3 جریان های استاتور ، e_1, e_2, e_3 ولتاژهای ضد محرکه روتور و $L_s = L - M$ می

باشند .

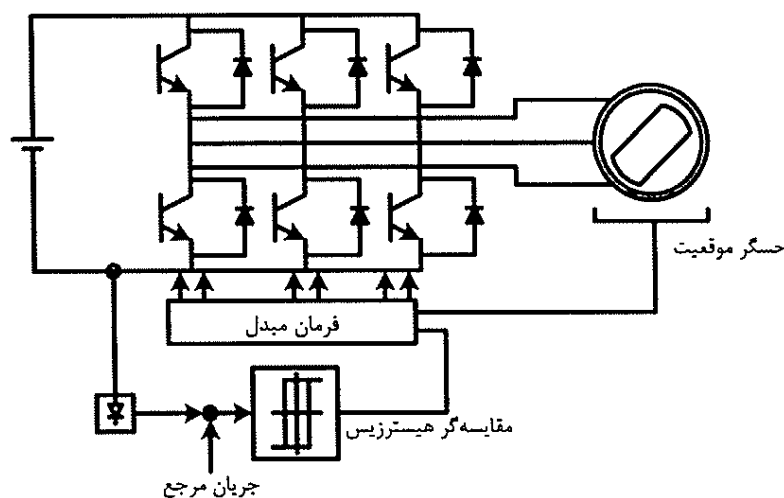
(۳-۲)

$$T = \frac{1}{\omega} (e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3)$$

برای این که نشان دهیم گشتاور از نظر تئوری بدون ریپل است ، نیروهای ضد محرکه را

دوزنقه ای شکل و با اختلاف فاز ثابت ۱۲۰ درجه در نظر می گیریم .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۲-۶: بلوک دیاگرام کنترل از طریق لینک DC جریان [۱۳]

۲-۳: کنترل مستقیم گشتاور^۱ (DTC) در موتور BLDC

در سال ۱۹۸۶ تاکاهاشی [۱۱] یک روش اسکالر که عموماً تحت عنوان کنترل مستقیم گشتاور شناخته می شود را برای کنترل موتور القایی مطرح نمود. این روش گشتاور، تقریباً مشابه کنترل برداری مبتنی بر شار استاتور می باشد که جزئیات آن ها با هم متفاوت است. اساس کنترل مستقیم گشتاور، کنترل مستقیم حالت های اینورتر به منظور کاهش خطاهای گشاور و شار استاتور و محدود کردن این خطاها به محدوده های از پیش تعیین شده هیستریزیس می باشد. بر خلاف روش کنترل برداری این روش نیاز به رگولاتورهای جریان، تبدیل محورهای مختصات و تولید کننده سیگنال PWM مرسوم (با زمان بندی مشخص) ندارد. با وجود سادگی، این روش امکان کنترل مناسب گشتاور در شرایط گذرا و ماندگار شار را داراست. از طرف دیگر این روش کنترلی حساسیت کمتری به تغییر پارامترها

^۱ Direct torque control-

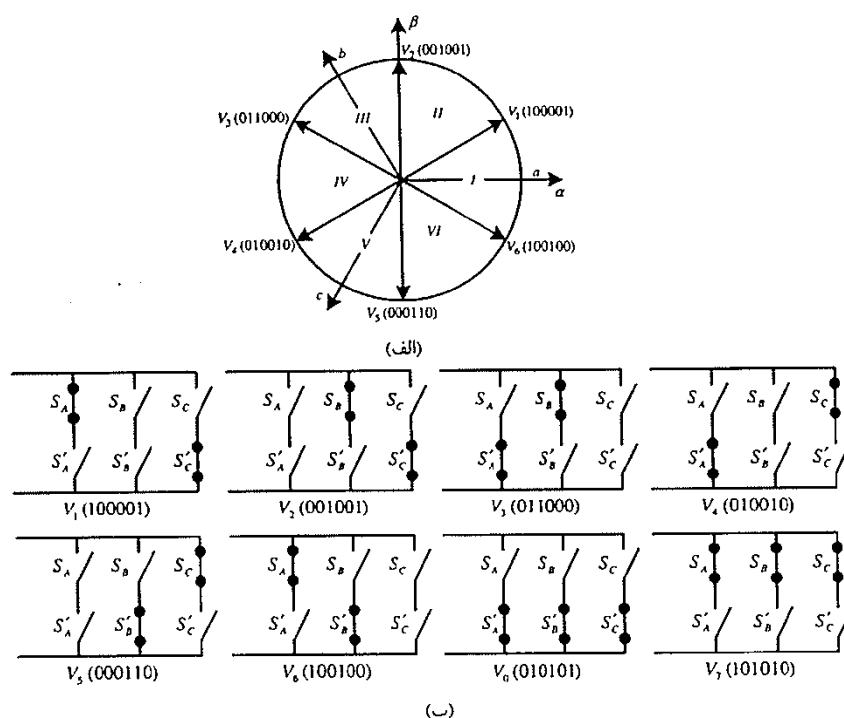
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

در مقایسه با FOC دارد . به طور کلی تا کنون برای کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC ، دو حالت مود هدایت دو فاز و مود هدایت سه فاز مورد بحث قرار گرفته که در ادامه به تفسیر آن ها می پردازیم .

۲-۳-۱ : کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC در حالت هدایت دو فاز .

در این حالت در هر لحظه دو فاز در حال هدایت بوده و یکی از فازها به صورت شناور می باشد در حقیقت علیرغم سه فاز بودن این نوع موتورها در هر لحظه دو فاز از این موتور در روابط گشتاور و جریان موثر هستند (به جز در ناحیه کموتاسیون) . به همین علت نحوه قرار گرفتن بردارهای فضایی با آن چه که در موتورهای القایی لحاظ می شود ، ۳۰ درجه اختلاف فاز دارد ، که در شکل (۲-۷-الف) نشان داده شده است . با توجه به حالت های مجاز کلید زنی برای این اینورتر می توان وضعیت سوئیچ ها را در قالب یک عدد ۶ رقمی به صورت زیر نشان داد $(S_A, S'_A, S_B, S'_B, S_C, S'_C)$. در این صورت ۶ بردار مجاز فعال v_1 تا v_6 و ۲ بردار غیر فعال $v_0(010101)$ و $v_7(101010)$ خواهیم داشت (شکل ۲-۷-ب) .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۲-۷: (الف) بردارهای مجاز فعال، (ب) دیاگرام فضایی بردارهای فعال و غیرفعال [۱۵]

روابطی که در روش DTC مورد استفاده قرار می گیرد به صورت زیر بیان می شود .

به طور معمول در روابط گشتاور از تاثیر متقابل سلف ها بر هم چشم پوشی می شود و هم چنین روابط در مختصات گردان روتور بیان می گردد که به شکل زیر است [۱۴] .

(۴-۲)

$$T_e \frac{3P}{4} \left[\left(\frac{dL_d}{d\theta_e} i_{sd} + \frac{d\varphi_{rd}}{d\theta_e} - \varphi_{sq} \right) i_{sd} + \left(\frac{dL_q}{d\theta_e} i_{sq} + \frac{d\varphi_{rq}}{d\theta_e} - \varphi_{sq} \right) i_{sq} \right]$$

هم چنین رابطه بین شار استاتور و شار روتور نیز بدین گونه قابل بررسی است :

(۵-۲)

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_d i_{sd} + \varphi_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_q i_{sq} + \varphi_{rq} \end{cases}$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

در این روابط θ_e زاویه الکتریکی زوتور ، P تعداد قطب ها ، i_{sd} و i_{sq} ، جریان های استاتور در مختصات گردان d-q هستند و L_d و L_q اندوکتانس سلف ها و نیز $\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}, \varphi_{rq}$ شارهای روتور و استاتور در این مختصات گردان می باشند . پس از تبدلی d-q ، مولفه اصلی شار پیوندی به یک مولفه DC بدل می شود ، که در آن هارمونیک های ۵ام و ۷ام به هارمونیک ۶ام و هارمونیک های ۱۱ و ۱۳ام به هارمونیک ۱۲ام و هارمونیک های ۱۷ام و ۱۹ام به هارمونیک ۱۸ام تبدیل می گردند و این روند به همین شکل ادامه دارد [۴].

نوسانات گشتاور ناشی از هارمونیک های شار بوده و اثرات هارمونیک های بالاتر را چه شم پوشی می کنیم .

در این موتور با صرف نظر از اشباع فرض می شود که $L_d = L_{d0}$ و $L_q = L_{q0}$ و بنابراین گشتاور الکتریکی به صورت زیر بیان می شود :

(۶-۲)

$$T_e = \frac{3P}{4} \left[\left(\frac{d\varphi_{rd}}{d\theta_e} - \varphi_{rq} \right) i_{sd} + \left(\frac{d\varphi_{rq}}{d\theta_e} + \varphi_{rd} \right) i_{sq} + (L_{d0} L_{q0}) i_{sd} i_{sq} \right]$$

در موتورهای غیر قطب بر جسته با شار استاتور غیر سینوسی داریم $L_s = L_{q0} = L_{d0}$.

پس گشتاور الکتریکی به صورت زیر خواهد شد .

(۷-۲)

$$T_e = \frac{3P}{4} \left[\left(\frac{d\varphi_{rd}}{d\theta_e} - \varphi_{rq} \right) i_{sd} + \left(\frac{d\varphi_{rq}}{d\theta_e} + \varphi_{rd} \right) i_{sq} \right]$$

که با تبدیلی این رابطه در مختصات ساکن $\alpha - \beta$

(۸-۲)

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$T_e = \frac{3P}{4} \left[\left(\frac{d\varphi_{r\alpha}}{d\theta_e} \right) i_{s\alpha} + \left(\frac{d\varphi_{r\beta}}{d\theta_e} \right) i_{s\beta} \right]$$

برای محاسبه شار استاتور از رابطه زیر استفاده خواهد شد .

(۹-۲)

$$\begin{cases} \varphi_{s\alpha} = \int (V_{s\alpha} - Ri_{s\alpha}) dt \\ \varphi_{s\beta} = \int (V_{s\beta} - Ri_{s\beta}) dt \end{cases}$$

مسلم است که موقعیت و اندازه شار استاتور از روابط زیر قابل محاسبه است .

(۱۰-۲)

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\varphi_{s\beta}}{\varphi_{s\alpha}} \right)$$

(۱۱-۲)

$$\phi = \sqrt{(\varphi_{s\alpha}^2 + \varphi_{s\beta}^2)}$$

از این روش های متعددی برای نحوه کلید زنی و نیز انتخاب پارامترهای کنترلی وجود دارد ، به طور کلی در موتورهای BLDC تا سال ۲۰۱۰ تنها ۴ روش برای کنترل مستقیم گشتاور در حالت هدایت دو فاز مورد بحث قرار گرفته که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارد که در ادامه به تفسیر آن ها می پردازیم .

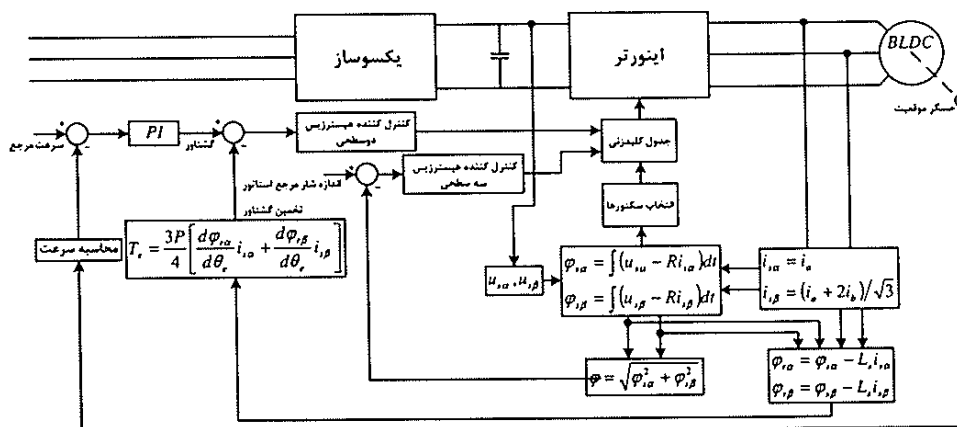
۲-۳-۱-۱ : کنترل مستقیم گشتاور بر اساس الگوریتم معمول در موتورهای القایی

این روش از نظر الگوریتم کنترل به روش DTC معمول موتورهای القایی شبیه است . بدین معنا که پارامترهای کنترلی ، گشتاور الکتریکی و اندازه شار استاتور بوده و موقعیت روتور از طریق شار استاتور تخمین زده می شود . به طور کلی در روش DTC همان طور که نشان

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

داده شد ۶ بردار غیر صفر وجود دارد که قابل قبول هستند و در دیاگرام فضایی بردارهای مجاز نشان داده شد (شکل (۲-۷)).

جدول کلید زنی و الگوریتم در این روش نشان داده شده است (جدول (۲-۱)). همان طور که در الگوریتم کاملا مشهود است، تنها جریان های دو فاز نمونه برداری شده و ولتاژهای خط از طریق اندازه گیری ولتاژ لینک DC و وضعیت کلید زنی اعمال شده قابل محاسبه می باشد. بدین ترتیب با توجه به روابط مذکور گشتاور الکتریکی، شارهای مولفه $\alpha-\beta$ و نیز اندازه و زاویه شار استاتور محاسبه می شوند (روابط (۲-۸) تا (۲-۱۱)). سپس گشتاور و اندازه شار استاتور تخمین زده شده با مقدار مرجع خود مقایسه شده و به یک تابع هیستریزیس دو سطحی داده می شوند [۱۶ و ۱۵]. دیاگرام کنترل مستقیم گشتاور بر اساس الگوریتم معمول در موتورهای القایی در شکل (۲-۸) نشان داده شده است.



شکل ۲-۸: دیاگرام کنترل مستقیم گشتاور بر اساس الگوریتم معمول در موتورهای القایی [۴]

همان طور که دیده می شود جدول کلید زنی در این روش به ازای $\tau=1$ مشابه DTC در حالت القایی است اما به ازای $\tau=0$ باز هم همین جدول تکرار می شود با این تفاوت که در

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

قسمت $\varphi=0$ تماما بردار صفر اعمال می شود. بازه نمونه برداری در این روش بستگی به حجم محاسبات داشته و کاملا مشخص است هر چه سرعت پردازنده بیشتر باشد و یا حجم محاسبات کمتر شود، این بازه نمونه برداری می تواند کوچک تر شده و در نتیجه دینامیک سیستم کنترلی بالاتر می رود.



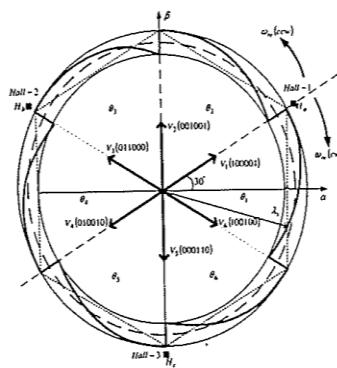
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

جدول ۱-۲: الگوی کلید زنی با استفاده از شار استاتور

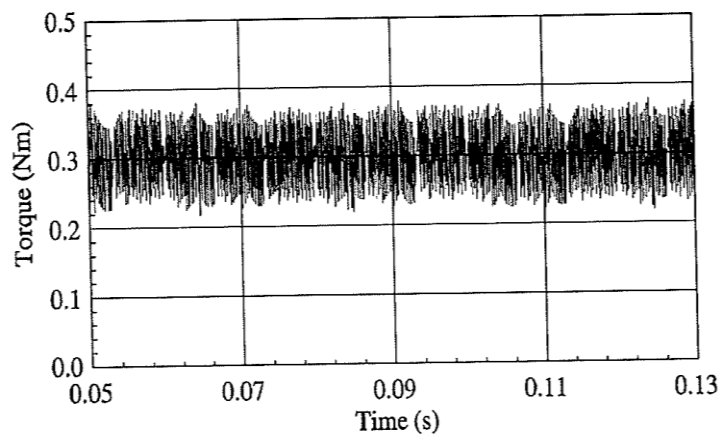
گشتاور τ	شار φ	سکتور					
		I	II	III	IV	V	VI
۱	۱	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6
	۰	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_1
	-1	v_3	v_4	v_5	v_6	v_1	v_2
	۱	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6
	۰	v_0	v_0	v_0	v_0	v_0	v_0
	-1	v_3	v_4	v_5	v_6	v_1	v_2

در شکل (۲-۹) شار استاتور کاملا مشخص است که دارای ۶ تغییر حالت ناگهانی است هر چند که شکل آن شبیه دایره است ولی این ۶ تغییر ناگهانی بیانگر همان لحظات کموتاسیون است و مشخص است که این روش کنترلی تاثیر چندانی در کنترل شار استاتور در لحظات کموتاسیون ندارد و این امر باعث ریپل گشتاور در لحظات کموتاسیون می شود. ریپل گشتاور در این روش تقریبا ۲۷٪ می باشد (شکل (۲-۱۰)) که البته این در صد ریپل کاملا بستگی به پارامترهای موتور به خصوص مقدار R و L استاتور دارد، در حقیقت به هر چه ثابت زمانی الکتریکی موتور بزرگ تر باشد، دینامیک یا همان تغییرات لحظه ای جریان موتور آرام تر و ریپل گشتاور کمتر خواهد شد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۲-۹: نمای شار استاتور ایده آل (شش ضلعی) و غیرایده آل (خطوط انحنا دار ضخیم) در حالت شش سوئیچه



شکل ۲-۱۰: نمودار گشتاور طرح کنترل مستقیم گشتاور با استفاده از مرجع شار استاتور [۶]

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۴-۲: نتیجه گیری

روش هایی که در این فصل مطرح شد متداول ترین و کارآمدترین ایده های کنترل برای موتور BLDC بوده که در مقالات و مراجع مختلف ارائه شده است. ویژگی های اساسی که برای مقایسه روش های مختلف کنترل مورد نظر می باشند شامل: (۱) ریپل گشتاور در لحظات هدایت (۲) ریپل گشتاور در لحظات کموتاسیون (۳) دینامیک و دقت الگوریتم کنترل گشتاور موتور BLDC است. از این رو به بیان ویژگی ها و معایب ایده های کنترل ارائه شده می پردازیم.

به طور کلی از روش های بسیار معمول برای کنترل موتور BLDC کنترل جریان هیستریزس و PWM جریان می باشد. ایده کلی کنترلی در این روش ها بر این اساس است که موتور BLDC را همانند موتورهای DC معمول در نظر گرفته و رابطه خطی بین جریان و گشتاور آن ها فرض می شود. از این رو با استفاده از خطای جریان با کنترل کننده خطی گشتاور را کنترل می کنند. اما همان گونه که می دانیم در شرایط دینامیکی رفتار این موتور واقعا خطی نمی باشد و اگر واقعا به دنبال تخمین دقیق گشتاور و کنترل بلادرنگ آن باشیم، در نظر گرفتن مشخصه این موتور به صورت خطی آن چنان سودمند به نظر نمی رسد. از سوی دیگر وجود بلوک PI به علت وابستگی شدید آن به پارامترهای سیستم و مشکلات در تنظیم ضرایب آن از دیگر عیوب این روش ها است. در ضمن نحوه کلید زنی در کنترل های PWM و هیستریزس جریان باعث ایجاد ریپل گشتاور در لحظات کموتاسیون می شود. البته برجسته ترین ویژگی این روش ها حجم کم و سادگی در محاسبات آن ها می باشد. البته برای کاهش ریپل گشتاور لازم است که بلوک هایی به ساختار PWM و هیستریزس

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

جریان اضافه شود که خود باعث افزایش حجم محاسبات و پیچیدگی بیشتر سامانه کنترلی

می شود .



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

فصل سوم

کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه و تفاوت آن

با اینورترشش سوئیچه

۳-۱: مقدمه

در این فصل کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه به جای اینورتر شش سوئیچه مورد بررسی قرار گرفته است. کاهش هزینه در ساخت اینورتر، کاهش تلفات سوئیچینگ، کاهش پیچیدگی در الگوریتم کنترلی، کاهش مدارات واسط و مدارات تولید پالس، مزایای استفاده از این نوع اینورترها می باشد.

در ابتدا به معرفی روش های کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در مورد هدایت دو فاز می پردازیم و سپس روش پیشنهادی در حالت هدایت دو فاز مطرح می گردد. در نهایت روش پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در مود هدایت سه فاز نیز بیان گردیده است.

۴-۲: کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در حالت

هدایت دو فاز

همان طور که قبلا بیان شد، اساس کنترل مستقیم گشتاور، کنترل مستقیم حالت های اینورتر به منظور کاهش خطاهای گشتاور و شار استاتور و محدود کردن این خطاها به محدوده های از پیش تعیین شده هیستریزیس می باشد. به طور کلی در موتورهای BLDC تا سال ۲۰۱۰ تنها دو روش برای درایو این موتور با اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

دو فاز مورد بحث قرار گرفته که هر دو روش در یک مقاله مورد بحث قرار گرفته و مقایسه شده اند که در ادامه به تشریح آن ها می پردازیم [۱۸].

۳-۲-۱: طرح کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ [۱۸]

بلوک دیاگرام کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ در شکل (۴-۱) آمده است که در ادامه به تشریح آن می پردازیم.

تخمین صحیح گشتاور الکترو مغناطیسی طرح DTC چهار سوئیچ موتور BLDC در ناحیه گشتاور ثابت مشابه حالت شش سوئیچ [۵] می باشد. برای محاسبه گشتاور مطابق رابطه زیر از مرجع ساکن استفاده شده است [۱۷، ۱۹].

(۳-۱)

$$T_{em} = \frac{3P}{4} \left[\frac{e_{\alpha}}{\omega_e} i_{s\alpha} + \frac{e_{\beta}}{\omega_e} i_{s\beta} \right] = \frac{3P}{4} \left[K_{\alpha}(\theta_e) i_{s\alpha} + K_{\beta}(\theta_e) i_{s\beta} \right]$$

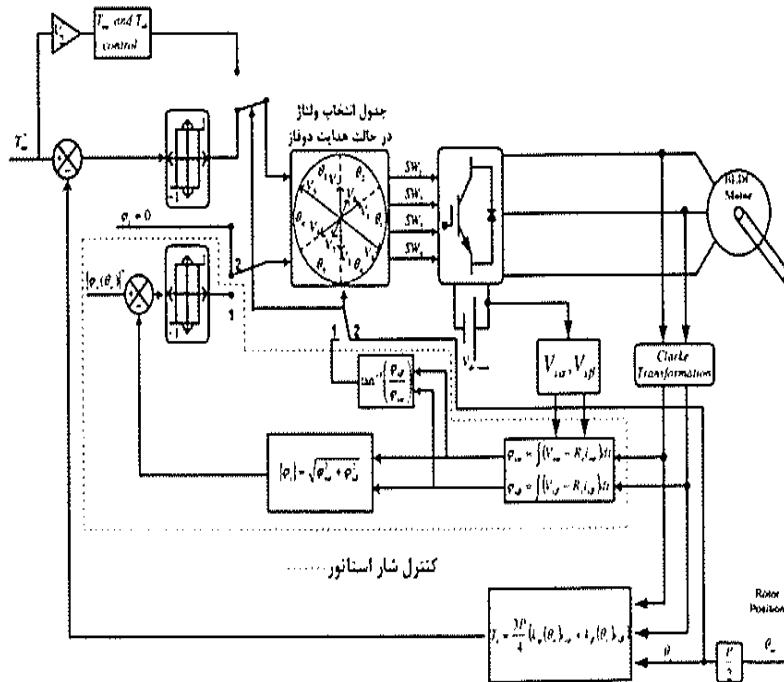
که در این رابطه P: تعداد قطب ها، θ_e : موقعیت الکتریکی روتور، ω_e : سرعت الکتریکی روتور، $K_{\beta}(\theta_e), K_{\alpha}(\theta_e)$: ثابت های Back - EMF در مرجع ساکن، e_{β}, e_{α} : Back - EMF های موتور در مرجع ساکن و $i_{s\beta}, i_{s\alpha}$: جریان های موتور در مرجع ساکن می باشند.

شار روتور در مرجع ساکن $\varphi_{s\beta}, \varphi_{s\alpha}$: از رابطه زیر به دست می آید.

(۳-۲)

$$\begin{cases} \varphi_{r\alpha} = \varphi_{s\alpha} - L_s i_{s\alpha} \\ \varphi_{r\beta} = \varphi_{s\beta} - L_s i_{s\beta} \end{cases}$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



۳-۱: بلوک دیاگرام طرح کنترل مستقیم گشتاور درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه

با استفاده از رابطه (۳-۲) شار مرجع استاتور $|\phi_s(\theta_e)|^*$ برای کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC در ناحیه گشتاور ثابت مشابه با الگوریتم کنترل مستقیم گشتاور موتور PMS به صورت زیر به دست می آید

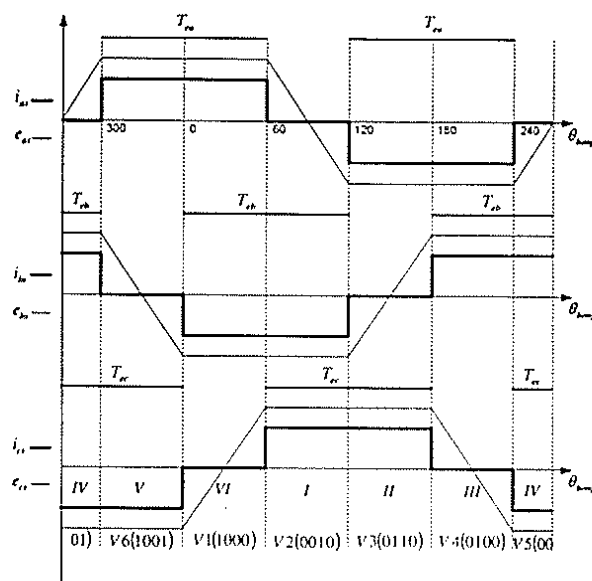
(۳-۴)

$$|\phi_s(\theta_e)|^* = |\phi_r(\theta_e)| = \sqrt{\phi_{r\alpha}^2(\theta_e) + \phi_{r\beta}^2(\theta_e)}$$

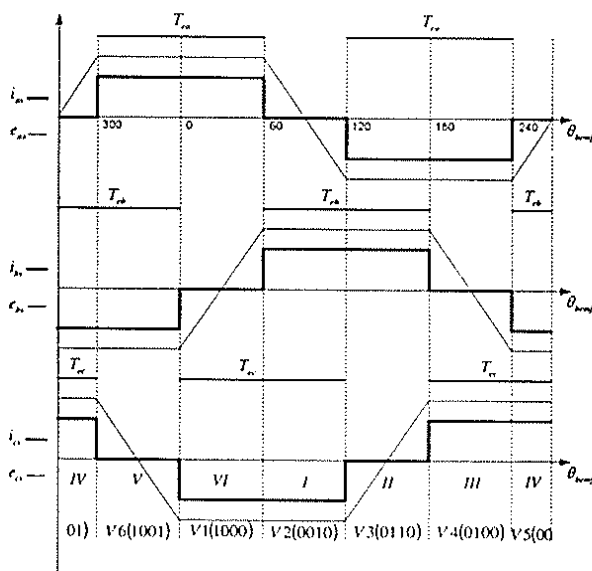
گشتاور الکترو مغناطیسی با حاصل ضرب Back - EMF و جریان نظیر آن متناسب است . وقتی که شکل موج ثابت های Back - EMF از یک جدول از پیش تعیین شده در رابطه (۴-۱) استفاده شود ، گشتاور الکترو مغناطیسی صاف مطابق شکل (۴-۲) به دست خواهد

آمد .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



(الف)



(ب)

شکل ۴-۲: نمودارهای جریان و Back-EMF سه فاز و گشتاور فاز برای درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ (الف) جهت عقربه‌های ساعت (ب) خلاف جهت عقربه‌های ساعت

همان طور که شکل (۴-۲) دیده می شود برای تولید گشتاور الکترو مغناطیسی ثابت در حالت هدایت دو فاز ، در هر ۶۰ درجه الکتریکی فقط دو گشتاور در معادله گشتاور نقش دارد و گشتاور فاز سوم صفر می باشد (مطابق جدول (۴-۱)).

جدول ۴-۱: معادله گشتاور الکترو مغناطیسی برای نواحی عملکرد

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$I : (0^\circ < \theta < 30^\circ \text{ or } 330^\circ < \theta < 360^\circ)$	$T_e = T_{eb} + T_{ec} \ \& \ T_{ea} = 0$
$II : (30^\circ < \theta < 90^\circ)$	$T_e = T_{ea} + T_{eb} \ \& \ T_{ec} = 0$
$III : (90^\circ < \theta < 150^\circ)$	$T_e = T_{ea} + T_{ec} \ \& \ T_{eb} = 0$
$IV : (150^\circ < \theta < 210^\circ)$	$T_e = T_{eb} + T_{ec} \ \& \ T_{ea} = 0$
$V : (210^\circ < \theta < 270^\circ)$	$T_e = T_{ea} + T_{eb} \ \& \ T_{ec} = 0$
$VI : (270^\circ < \theta < 330^\circ)$	$T_e = T_{ea} + T_{ec} \ \& \ T_{eb} = 0$

شکل (۳-۴) نمای شار استاتور ایده آل و غیر ایده آل برای حالت چهار سوئیجه را نشان می دهد ، همان طور که در شکل می بینید تغییر ناگهانی^۱ در شار استاتور در هر ۶۰ درجه الکتریکی و تمایل جریان ها برای تطبیق یافتن با ناحیه صاف Back – EMF سبب می شود که کنترل دامنه شار استاتور مشکل گردد . از طرف دیگر ، سرعت چرخش استاتور می تواند به راحتی کنترل شود و پاسخ سریع گشتاور حاصل می شود .

اندازه عمق تغییر ناگهانی شار استاتور غیرقابل پیش بینی است و به چندین عامل از قبیل : زمان نمونه برداری ، ولتاژ لینک DC ، پهنای باند هیس-ترزیس ، پارامترهای موتور به ویژه اندوکتانس سیم پیچ ها ، سرعت موتور ، مدارات اسنابر و مقدار گشتاور بار وابسته می باشد .

بهترین راه کنترل دامنه شار استاتور دانستن شکل دقیق آن می باشد که با توجه به شکل (۳-۴) این کار بسیار مشکل خواهد بود . اگر اثر Back – EMF فاز تحریک نشده و دیودهای هرزگرد حذف گردد ، شکل شار استاتور یک شش ضلعی منتظم مطابق شکل (۴-۴)

^۱ Sharp dips -

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

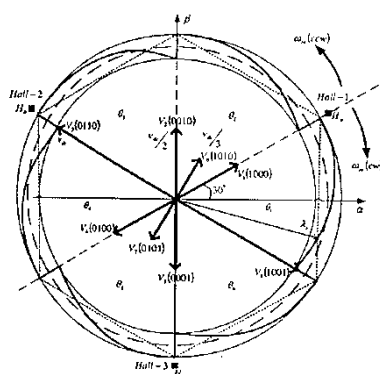
(۳) خطوط مستقیم نقطه چین) به دست خواهد آمد، اما در حالت کلی مکان هندسی شار

استاتور به صورت انحنادار خواهد بود (خطوط انحنادار ضخیم در شکل (۴-۳)).

بنابراین در کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه مشابه با الگوریتم

روش شش سوئیچه [۵]، خطای شار صفر در نظر گرفته شده و تنها به خطای گشتاور

(اختلاف گشتاور مرجع و گشتاور محاسبه شده) وابسته خواهد بود.



شکل ۴-۳: نمای شار استاتور ایده آل (شش ضلعی) و غیرایده آل (خطوط انحنادار ضخیم) در حالت چهار سوئیچه [۱۸]

۴-۲-۱-۱: کنترل گشتاور الکترو مغناطیسی با انتخاب بردارهای فضایی ولتاژ

در این روش برای عملکرد کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC چهار سوئیچه یک Look

up table - با شش بردار ولتاژ مطابق جدول (۴-۲) طراحی شده است.

جدول ۴-۲: انتخاب بردار ولتاژ اینورتر درایو DTC موتور BLDC با اینورتر چهار

سوئیچه

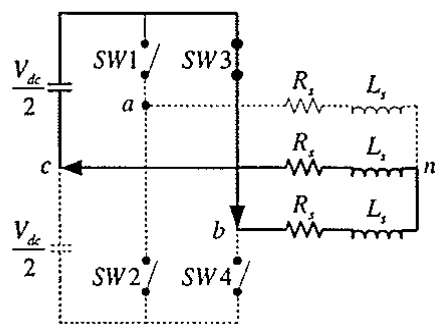
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

φ	T_e	موقعیت الکتریکی روتور					
		θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
۱	۱	$V_1(1000)$	$V_2(0010)$	$V_3(0110)$	$V_4(0100)$	$V_5(0001)$	$V_6(1001)$
	-1	$V_6(1001)$	$V_1(1000)$	$V_2(0010)$	$V_3(0110)$	$V_4(0100)$	$V_5(0001)$
۰	۱	$V_2(0010)$	$V_3(0110)$	$V_4(0100)$	$V_5(0001)$	$V_6(1001)$	$V_1(1000)$
	-1	$V_5(0001)$	$V_6(1001)$	$V_1(1000)$	$V_2(0010)$	$V_3(0110)$	$V_4(0100)$
-1	۱	$V_3(0110)$	$V_4(0100)$	$V_5(0001)$	$V_6(1001)$	$V_1(1000)$	$V_2(0010)$
	-1	$V_4(0100)$	$V_5(0001)$	$V_6(1001)$	$V_1(1000)$	$V_2(0010)$	$V_3(0110)$

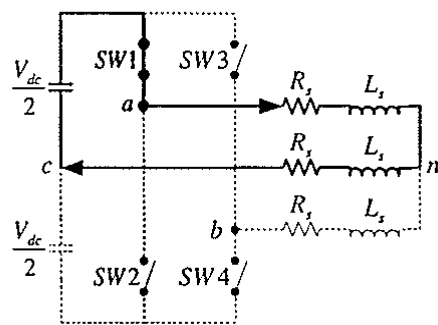
نکته : سطرهای خاکستری و خانه هایی که روی آن علامت ضربدر دارد در این طرح استفاده نمی شود .

در حالت طبیعی شش بردار فضایی ولتاژ امکان پذیر برای توپولوژی چهار سوئیچه مورد استفاده قرار می گیرد که در جدول (۴-۲) مشابه حالت شش سوئیچه [۵] نشان داده شده است . شکل (۴-۴) این بردارها را نشان می دهد .

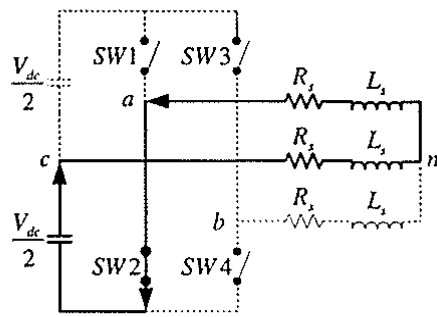
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



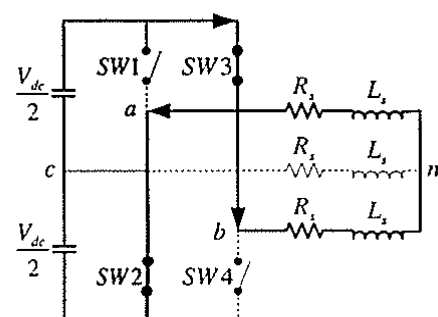
(ب)



(الف)



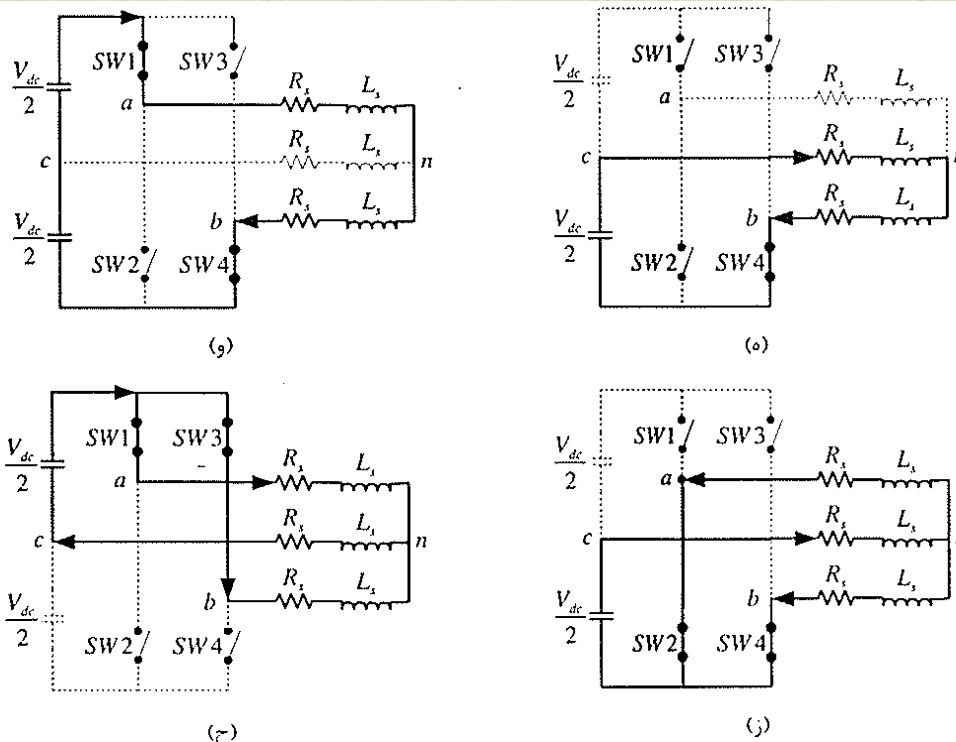
(د)



(ج)

WikiPower.ir

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۳-۴: شکل بردارهای ولتاژ به کار رفته در طرح DTC موتور BLDC چهار سوئیچه با حالت هدایت دو فاز (الف) بردار $V_1(1000)$ (ب) بردار $V_2(0010)$ (ج) بردار $V_3(0110)$ (د) بردار $V_4(0100)$ (ه) بردار $V_5(0001)$ (و) بردار $V_6(1001)$ (ز) بردار $V_7(0101)$ (ح) بردار $V_0(1010)$

دو بردار V_6, V_3 نشان داده شده در شکل (۳-۴) برای کنترل گشتاور مشکل ایجاد می کند. وقتی بردارهای V_6, V_3 مستقیماً در انتخاب بردار فضایی جدول (۳-۲) استفاده شود، Back - EMF فاز غیر قابل کنترل (فاز c) جریان نا مطلوبی تولید می کند و بنابراین یک اعوجاج در گشتاور فاز ایجاد می گردد (مطابق شکل (۴-۵-۵))، در نتیجه گشتاور الکترو مغناطیسی نا مطلوبی به دست خواهد آمد.

بنابراین وقتی موقعیت روتور در سکتورهای V, II قرار می گیرد، یک الگوی سوئیچینگ مخصوص مطابق جدول (۳-۳-ب) برای حرکت در خلاف جهت عقربه های ساعت (CCW)

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

باید اعمال گردد ، جدول (۳-۳-الف) مطرح شده در مرجع [۱۸] اشتباه می باشد ، جدول

(۳-۳-ب) ، جدول اصلاح شده این مرجع را نشان می دهد .

جدول ۳-۳ : انتخاب بردار ولتاژ برای سکتورهای V, II برای DTC موتور BLDC با

اینورتر چهار سوئیچه (الف) جدول مرجع [۱۸] ، (ب) جدول اصلاح شده

φ	T_{ea}	T_{eb}	θ_2	θ_5
.	۱	۱	$V_0(1010)$	$V_7(0101)$
		-1	$V_6(1001)$	$V_3(0110)$
	-1	۱	$V_7(0101)$	$V_6(1001)$
		-1	$V_3(0110)$	$V_0(1010)$

(الف)

φ	T_{ea}	T_{eb}	θ_2	θ_5
.	۱	۱	$V_3(0110)$	$V_6(1001)$
		-1	$V_7(0101)$	$V_0(1010)$
	-1	۱	$V_0(1010)$	$V_7(0101)$
		-1	$V_6(1001)$	$V_3(0110)$

(ب)

در این دو سکتور گشتاور فاز a و b (دو فاز قابل کنترل) به طور جداگانه توسط کنترلرهای

گشتاور هیستریزس کنترل می شود. علاوه بر این بردارهای ولتاژ V_7, V_0 که در طرح

PWM چهار سوئیچه مرسوم استفاده شده بود، در این جدول برای داشتن گشتاور بدون

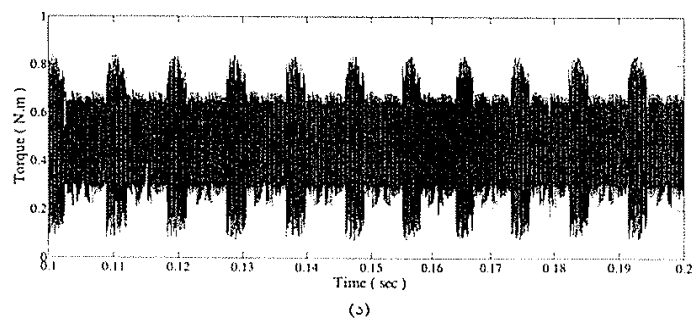
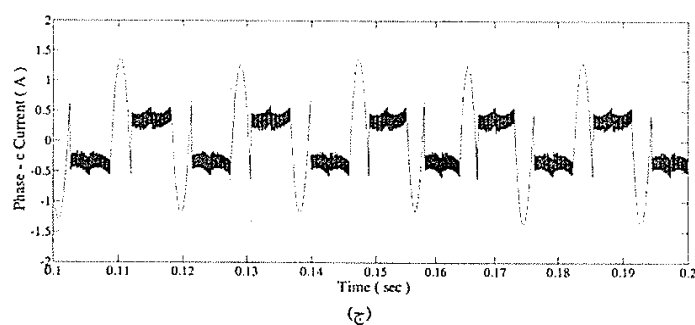
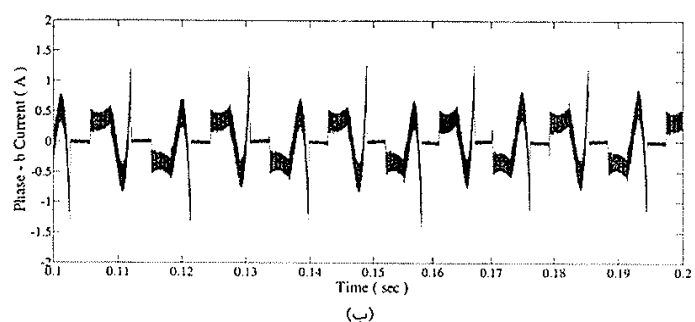
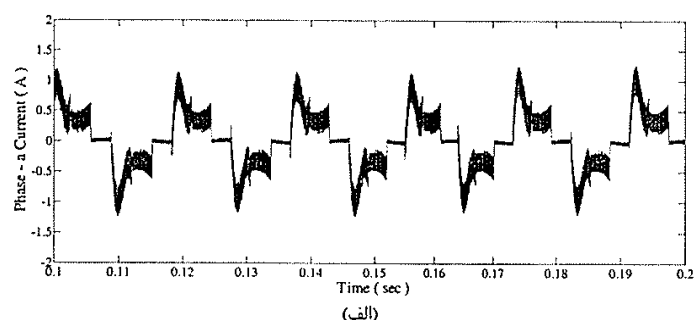
اعوجاج و صاف در طرح کنترل مستقیم گشتاور چهار سوئیچه موتور BLDC مورد استفاده

قرار گرفته است (شکل ۴-۴ (ز) و (ح)). بنابراین هشت بردار ولتاژ مفید برای هدایت دو فاز

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

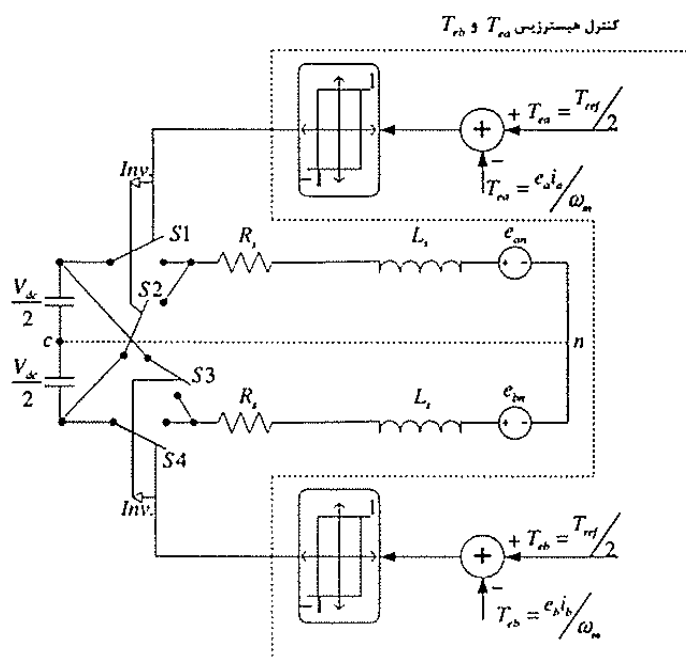
در طرح کنترل مستقیم گشتاور مطرح شده در [۱۸] مورد استفاده قرار گرفته است (شکل (۴-۳)).

جزئیات سوئیچینگ و تنظیم گشتاور طرح کنترل مستقیم گشتاور چهار سوئیچه موتور BLDC در شکل (۶-۳) نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: نمودار جریان فازها و گشتاور (الف) جریان فاز a، (ب) جریان فاز b، (ج) جریان فاز c، (د) گشتاور

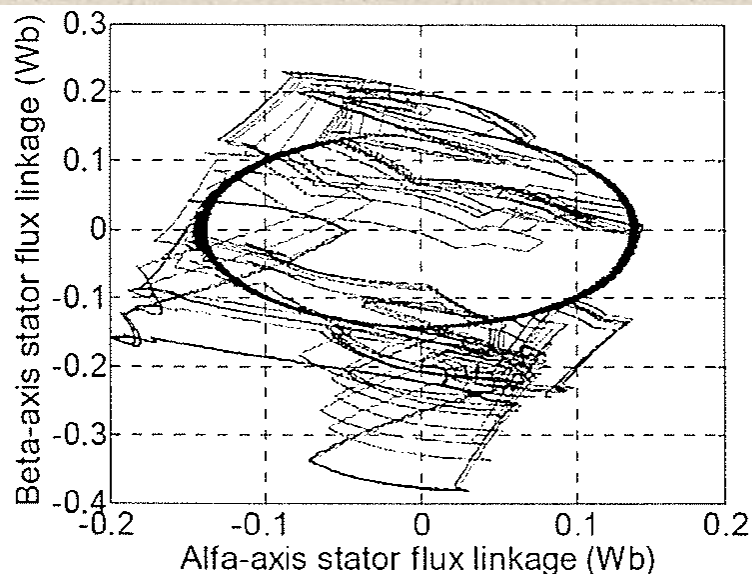
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۴-۶: کنترل گشتاور فاز a و b به صورت جداگانه در سکتورهای II و V [۱۸]

بلوک دیاگرام مورد شبیه سازی برای طرح کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه مطابق با شکل (۴-۱) می باشد، ناحیه نقطه چین کنترل شار استاتور را نشان می دهد که صرفاً جهت مقایسه با حالت بدون انتخاب شار می باشد (شکل (۴-۷)). عیب این روش زیاد بودن ریپل گشتاور می باشد که در روش پیشنهادی این عیب برطرف شده است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۴-۷: نتایج شبیه سازی با حضور کنترل شار استاتور [۱۸]

۴-۳-۱: کنترل مستقیم گشتاور و غیر مستقیم شار موتور BLDC با اینورتر چهار

سوئیچ

در این فصل روش کنترل مستقیم گشتاور و غیر مستقیم شار موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ مورد بررسی قرار گرفته است. در این جا بر خلاف [۱۹] برای تخمین گشتاور نیازی به استفاده از ماتریس 2×2 پیشنهاد شده در [۱۹] نیست، زیرا روش جدیدی برای تخمین گشتاور الکترو مغناطیسی استفاده شده است. برای تخمین گشتاور الکترو مغناطیسی از شار و جریان در مختصات d_q استفاده شده است. بردار شار استاتور در مختصات ساکن با رابطه (۲-۹) به دست می آید.

برای تخمین گشتاور الکترو مغناطیسی جریان و شار باید در مختصات d_q محاسبه شوند. به منظور تبدیل بین دو مرجع فرض بگیریم از مرجع X به مرجع Y برویم که با رابطه زیر این تبدیل صورت می گیرد.

$$(۴-۶)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$f_{qdos}^y = {}^x k^y f_{qdos}^x$$

که در این رابطه f متغیر مورد نظر می باشد و

(۷-۴)

$${}^x k^y = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y - \theta_x) & -\sin(\theta_y - \theta_x) & 0 \\ -\sin(\theta_y - \theta_x) & \cos(\theta_y - \theta_x) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

که در این رابطه θ_x, θ_y به ترتیب موقعیت الکتریکی روتور در مرجع اول و دوم می باشد.

به منظور تبدیل از مرجع ساکن به مرجع روتور رابطه زیر را خواهیم داشت.

(۸-۴)

$$\begin{bmatrix} \psi_q \\ \psi_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) & -\cos(\theta_r) \\ \cos(\theta_r) & \sin(\theta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_\beta \\ \psi_\alpha \end{bmatrix}$$

(۹-۴)

$$\beta\alpha_{kqd} = \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) & -\cos(\theta_r) \\ \cos(\theta_r) & \sin(\theta_r) \end{bmatrix}$$

که در این روابط θ_r موقعیت الکتریکی روتور می باشد. گشتاور الکترو مغناطیسی با رابطه

زیر محاسبه می گردد.

(۱۰-۴)

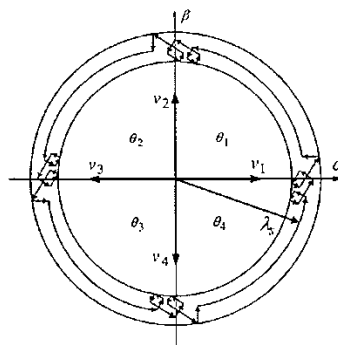
$$T_e = \frac{3P}{4} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds})$$

که در این رابطه P تعداد قطب ها، $\psi_{qs}, \psi_{ds}, i_{qs}, i_{ds}$ به ترتیب شار و جریان در مختصات

d_q می باشد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

همان طور که قبلا گفته شد زمانی که موتور BLDC دارای Back – EMF غیر سینوسی است مکان هندسی شار استاتور مانند موتور PMS دایره ای نیست ، شکل شار استاتور در حالت هدایت سه فاز با اینورتر چهار سوئیچه در شکل (۴-۱۴) نشان داده شده است ، بنابراین کنترل مستقیم شار استاتور امکان پذیر نیست . در مرجع [۱۹] به جای کنترل مستقیم دامنه شار استاتور ، دامنه شار به طور غیر مستقیم توسط جریان استاتور محور d در مرجع روتور کنترل می گردد .



شکل ۴-۱۴: مکان هندسی شار استاتور

در مرجع [۱۹] در ناحیه گشتاور ثابت برای حالت شش سوئیچه i_{ds}^* را صفر در نظر گرفته و در ناحیه تضعیف شار مقدار i_{ds}^* کاهش می یابد . پس عملا می توان نتیجه گرفت که می توان مقدار i_{ds}^* را کمتر از صفر نیز انتخاب نمود ، در روش پیشنهادی مقدار i_{ds}^* را برابر ۴- در نظر می گیریم ، این کار سبب می گردد که ریپل گشتاور نسبت به زمانی که i_{ds}^* برابر با صفر است ، کاهش یابد . از سوی دیگر با کاهش i_{ds}^* راندمان موتور کاهش می یابد . در نتیجه مقدار i_{ds}^* را نباید خیلی کم کرد . شکل (۴-۱۵) بلوک دیاگرام طرح پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور و غیر مستقیم شار موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت سه فاز را نشان می دهد . هم چنین الگوی کلید زنی طرح پیشنهادی

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

کنترل مستقیم گشتاور و غیر مستقیم شار موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ در جدول

(۴-۶) نشان داده شده است .

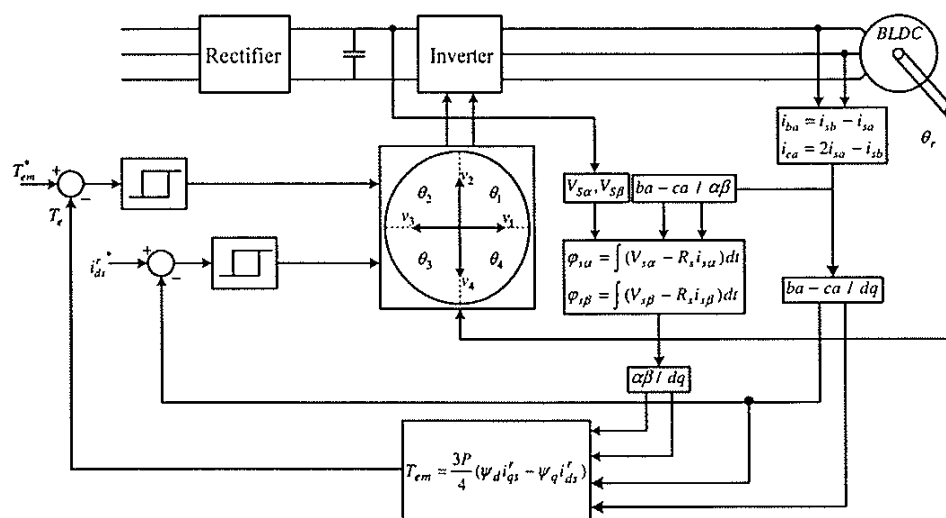


برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

جدول ۴-۶: الگوی کلید زنی طرح پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور موتور

BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت سه فاز

φ	T	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
۱	۱	v_2	v_3	v_4	v_1
	-1	v_1	v_2	v_3	v_4
-1	۱	v_3	v_4	v_1	v_2
	-1	v_4	v_1	v_2	v_3



شکل ۴-۱۵: بلوک دیاگرام طرح پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور و غیر مستقیم شار موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت سه فاز

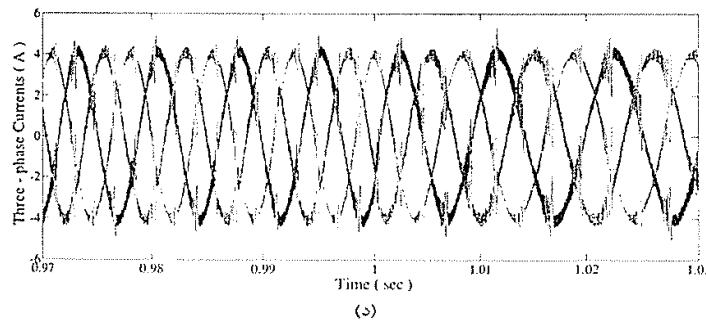
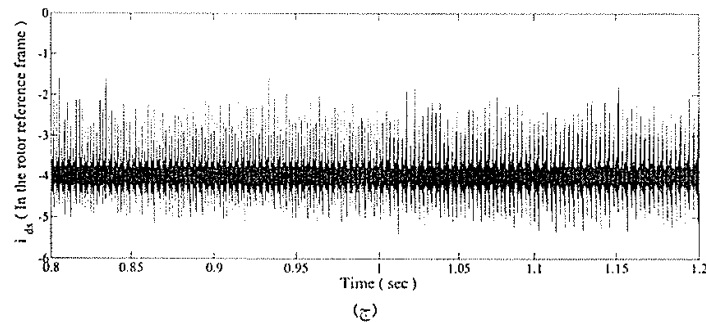
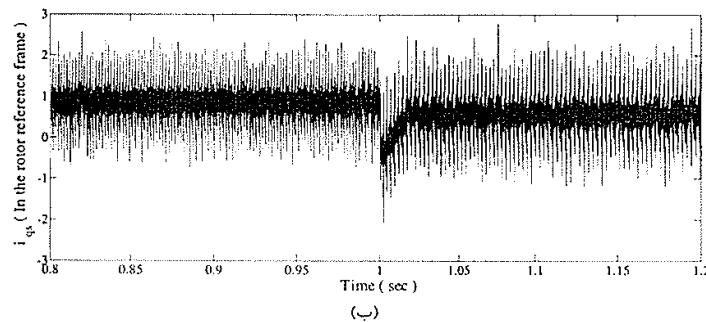
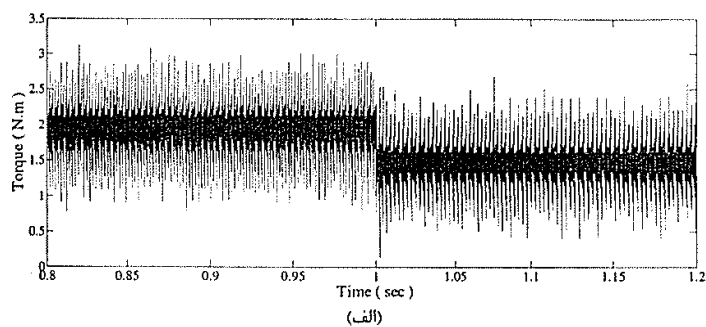
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

۳-۴ : نتایج شبیه سازی روش پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با ۱

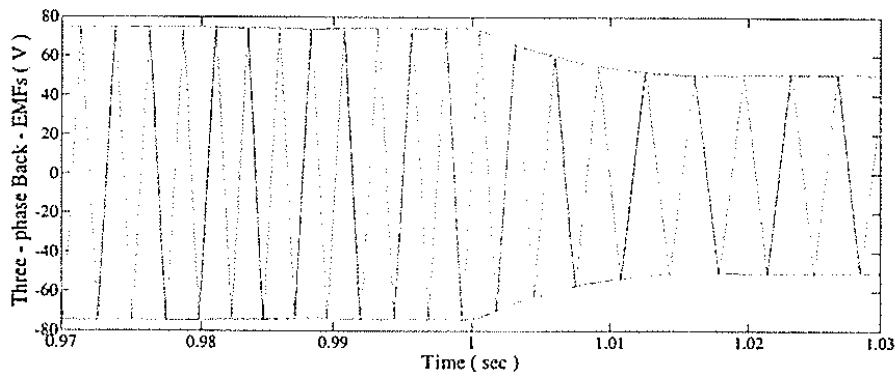
اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت سه فاز

نتایج شبیه سازی طرح پیشنهادی کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در حالت هدایت سه فاز بر اساس بلوک دیاگرام شکل (۴-۱۵) در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده است. در این شبیه سازی i_{ds}^* برابر با ۴- در نظر گرفته شده است این کار سبب می گردد که ریپل گشتاور نسبت به زمانی که i_{ds}^* برابر با صفر است، کاهش یابد. همان طور که از شکل (۴-۱۶-الف) پیداست گشتاور مرجع در لحظه $t=1^{sec}$ از $2^{N.m}$ به $1.5^{N.m}$ کاهش می یابد. با تغییر گشتاور، i_{qs} نیز کاهش می یابد (شکل ۴-۱۶-ب)). شکل (۴-۱۶-ج) جریان i_{ds} را نشان می دهد که مقدار مرجع ۴- را به خوبی دنبال می کند و با کاهش گشتاور تغییر نمی کند. با کنترل جریان i_{ds} ، موتور BLDC در حالت سه فاز کار می کند. شکل (۴-۱۶-د) جریان سه فاز را نشان می دهد که دارای هدایت سه فاز می باشد. با توجه به نحوه سیم بندی متمرکز موتورهای BLDC، شکل موج Back – EMF همواره به صورت دوزنقه ای خواهد بود (شکل (۴-۱۶-ه)). در نهایت شکل مکان هندسی شار استاتور و روتور به ترتیب در شکل های (۴-۱۶-و) و (۴-۱۶-ز) نشان داده شده است. هم چنین مشابه حالت شش سوئیچه می توان در ناحیه تضعیف شار مقدار i_{ds}^* را کاهش داد. در شکل (۴-۱۷) با تغییر i_{ds}^* از ۴- به ۸- تضعیف شار نشان داده شده است.

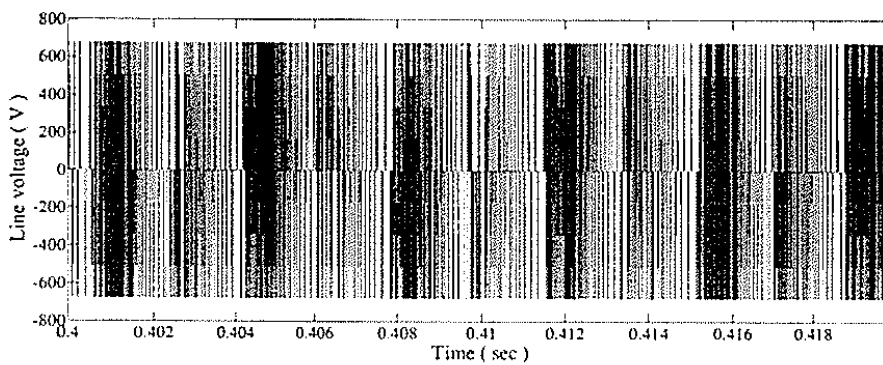
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



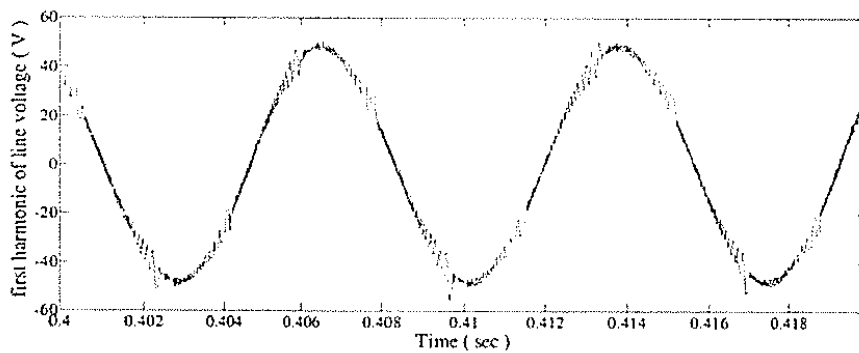
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



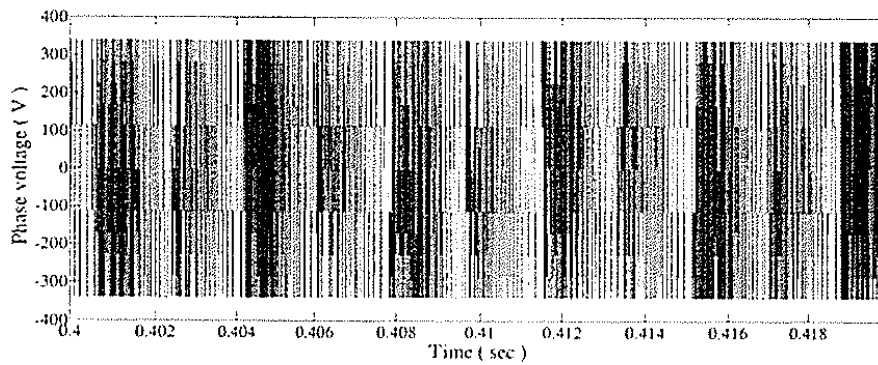
(e)



(g)

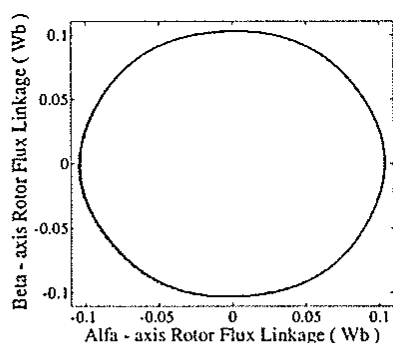


(j)

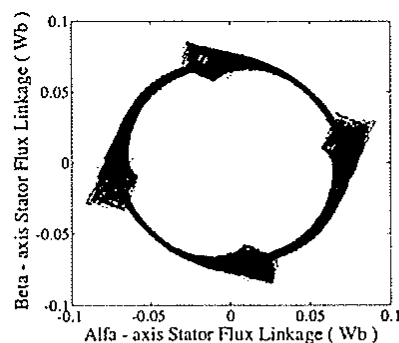


(z)

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

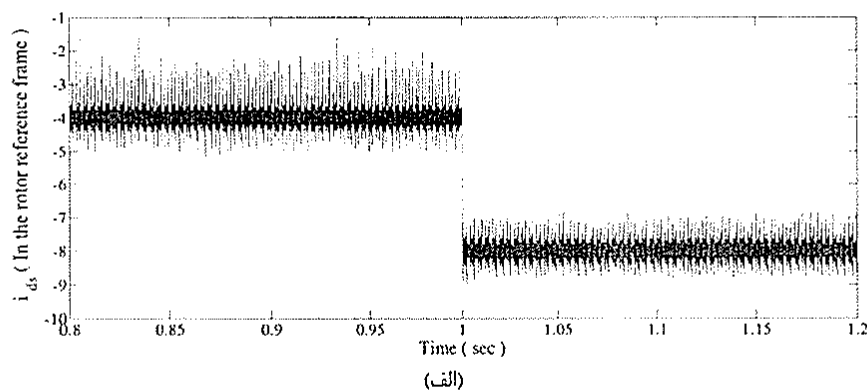


(ی)

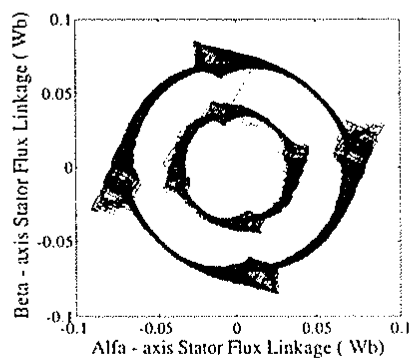


(ط)

شکل ۴-۱۶: نتایج شبیه سازی طرح کنترل مستقیم گشتاور و غیر مستقیم شار در حالت هدایت سه فاز با (الف) نمودار $i_{ds}^* = -4$ ار گشتاور، (ب) نمودار i_{qs}^* ، (ج) نمودار i_{ds} ، (د) جریان سه فاز، (ه) Back-EMF سه فاز، (و) ولتاژ خط، (ز) هارمونیک اول ولتاژ خط، (ح) ولتاژ فاز، (ط) مکان هندسی شار استاتور، (ی) مکان هندسی شار روتور.



(الف)



(ب)

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-، (الف) نمودار i_{ds} ، (ب) مکان هندسی شار استاتور.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

۳-۵ : تحلیل کموتا سیون درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه با هدایت دو

فاز

ریپل گشتاور تولید شده در لحظه کموتاسیون یکی از اشکالات اصلی موتور BLDC است. در این قسمت یک مطالعه کامل روی ریپل گشتاور تولید شده ناشی از کموتاسیون فاز درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه سه فاز ارائه گردیده است [۱۶، ۲۰]. ریپل گشتاور و دوره کموتاسیون برای شرایط عملکرد متفاوت و مشکل در ناحیه سرعت بالا نشان داده شده است. در نهایت نشان داده شده که به واسطه ولتاژهای نامتقارن فازها در موتور BLDC چهار سوئیچه، کموتاسیون ها در شش سکتور، متفاوت می باشند.

بنابراین، می توان نشان داد که ریپل، وابسته به جریان و تغییرات سرعت است. هم چنین در عمل ممکن است، ریپل گشتاور به خاطر موتور BLDC و سیستم تغذیه باشد که دقت عملکرد موتور BLDC را خراب می کند. [۱۶، ۲۰].

اگر چه با اینورتر چهار سوئیچه تولید جریان با هدایت ۱۲۰ درجه ذاتا مشکل است (شکل (۳-۱۰))، اما به منظور استفاده از توپولوژی چهار سوئیچه در درایو موتور BLDC سه فاز، طرح های کنترلی جدید باید اعمال گردد. تکنیک های کنترلی بیان شده به واسطه مشکل عدم تقارن ولتاژ فاز به بازه زمانی سکتورها پرداخته است و بنابراین در این جا به آن ها اشاره نخواهد شد [۱۶، ۲۰].

۳-۶ : عملکرد موتور BLDC با استفاده از اینورتر چهار سوئیچه

۳-۶-۱ : مدل درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

بلوک دیاگرام و درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در شکل (۳-۱۱) نشان داده شده است. موتور به پایه های a ، b متصل شده و فاز C به وسط لینک DC اتصال یافته است.

مدل ریاضی موتور BLDC سه فاز عبارتند از

(۳-۴۸)

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & O & O \\ O & R & O \\ O & O & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_S - M & O & O \\ O & L_S - M & O \\ O & O & L_S - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{an} \\ e_{bn} \\ e_{cn} \end{bmatrix}$$

(۳-۴۹)

$$\begin{cases} V_a = V_{an} + V_{no} \\ V_b = V_{bn} + V_{no} \\ V_c = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad \text{and} \quad V_{no} = \frac{e_{an} + e_{bn} + e_{cn}}{3}$$

۳-۶-۲: تنظیم جریان برای درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه

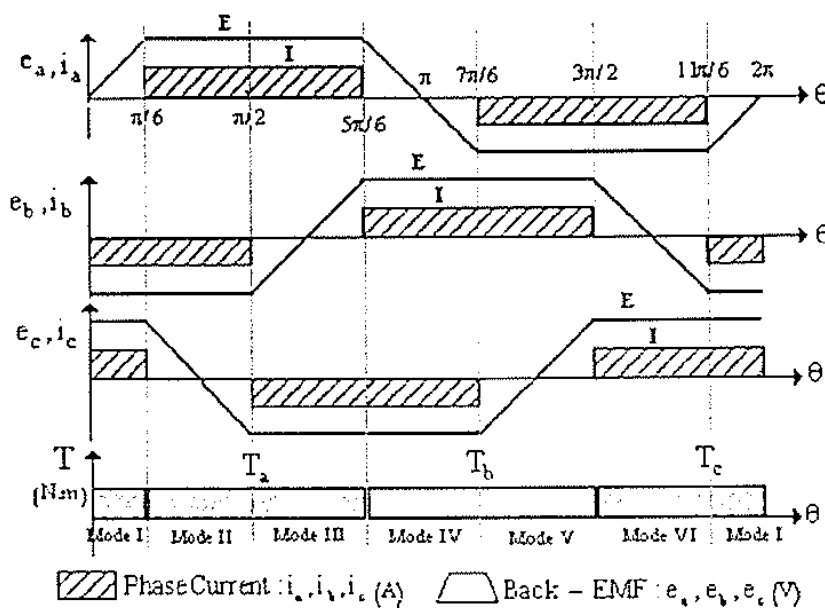
در درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه ، تنظیم جریان نسبت به درایو شش سوئیچه به دقت بیشتری نیاز دارد. مطابق شکل (۳-۱۰) در سکتورهای II و V ، فازهای a و b در حال هدایت هستند و فاز C به عنوان فاز تحریک نشده می باشد ، به طوری که هیچ جریانی در فاز C نمی باشد. با این حال ، Back – EMF فاز C جریان ناخواسته تولید می کند ، که باعث اعوجاج در فازهای a و b می گردد. بنابراین اگر جریان i_a, i_b به طور مستقل کنترل گردد ، اثر Back – EMF فاز C می تواند حذف گردد و هیچ جریانی در فاز C وجود نخواهد داشت. هنگامی که با کنترل هیستریزس جریان یا PWM ، سیگنال های سوئیچینگ SF_{1-a}, SF_{1-b} برای سوئیچینگ S_1 تا S_4 تولید خواهد شد. بحث کامل درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه در شش سکتور در [۱۶ ، ۲۰] ارائه گردیده است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

به طور کلی موتور BLDC دو ناحیه عملکرد کاری ناحیه هدایت و ناحیه کموتاسیون را در بر می گیرد. در ناحیه هدایت معمولا دو فاز هدایت می کند. در ناحیه کموتاسیون ناحیه گذر می باشد، به طوری که هدایت جریان یک فاز به فاز دیگر انتقال می یابد و هر سه فاز (فازی که می خواهد هدایت کند، فازی که می خواهد قطع گردد، فاز بدون کموتاسیون) هدایت می کنند.

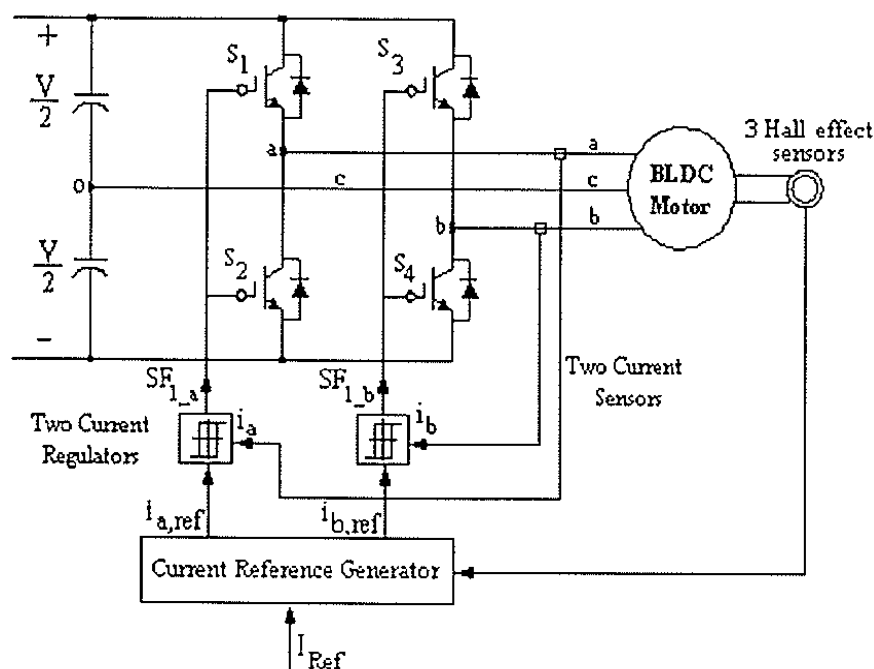
در [۳۸] ثابت شده است که ریپل گشتاور در ناحیه کموتاسیون موتور BLDC حتمی است، حتی اگر روش کنترلی موفق باشد.

با این حال با اعمال الگوریتم های مناسب، کاهش ریپل امکان پذیر است.



شکل ۳-۱: شکل موج جریان و نیروی محرکه سه فاز موتور BLDC [۲۰]

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۳-۱۱: بلوک دیاگرام درایو موتور BLDC با اینورتر سه فاز چهار سوئیچه [۲۰]

۳-۷: تحلیل کموتاسیون

۳-۷-۱: رفتار جریان فاز در کموتاسیون

همان طوری که در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است، درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه می تواند به شش سکتور تقسیم گردد و توالی های سوئیچینگ مطابق با سکتورها تعیین می گردد. کموتاسیون های فاز در این شش سکتور برای درایو موتور BLDC با اینورتر شش سوئیچه مشابه می باشند، اما در درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه، متفاوت هستند، مطابق با شرط عملکرد، سه حالت متفاوت در شش سکتور به وقوع می پیوندد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

حالت الف : صفر شدن جریان فاز در حال نزول (i_d) همزمان با به ا رسیدن جریان فاز در

حال صعود (i_r) ، به وقوع می پیوندد که در شکل (۳-۱۲-الف) نشان داده شده است .

حالت ب : صفر شدن جریان فاز در حال نزول (i_d) زودتر از به ا رسیدن جریان فاز در حال

صعود (i_r) ، به وقوع می پیوندد که در شکل (۳-۱۲-ب) نشان داده شده است .

حالت ج : به ا رسیدن جریان فاز در حال صعود (i_r) زودتر از صفر شدن جریان فاز در حال

نزول (i_d) ، به وقوع می پیوندد که در شکل (۳-۱۲-ج) نشان داده شده است .

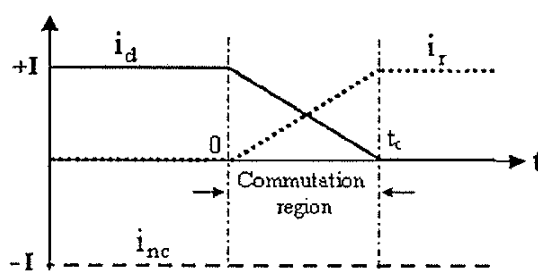
برای این تحلیل ، مقاومت سیم پیچ صرف نظر شده است و فرض شده که Back – EMF

در طی کموتاسیون ثابت باقی می ماند . بنابراین ، دامنه جریان سیم پیچ بین کموتاسیون ها

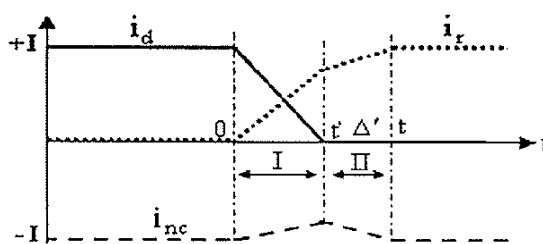
ثابت و برابر +۱ فرض شده است .



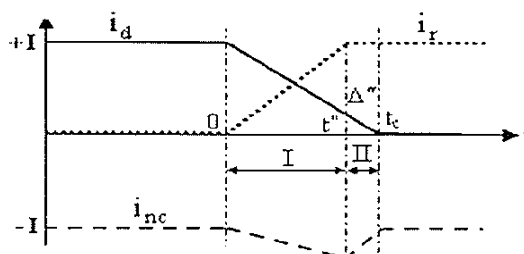
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳-۱۲: رفتار جریان در حین کموتاسیون (الف) حالت الف، (ب) حالت ب، (ج) حالت ج [۲۰]

۳-۷-۲: کموتاسیون در سکتورهای متفاوت

در این جا فقط کموتاسیون در سطح جریان مثبت، یعنی سکتورهای II، IV و VI تحلیل شده است.

۳-۷-۲-۱: سکتور II

مطابق با شکل (۳-۱۰) در این سکتور، i_d ، i_r ، i_{nc} جریان فاز کموتاسیون نشده، به ترتیب نظیر با فاز c، a و b می باشند و کموتاسیون از فاز c به فاز a می باشد. این انتقال جریان انجام شده با روشن نگه داشتن S_1 و S_4 انجام می شود. با این حال، این انتقال مستقیماً انجام نمی شود و در مرحله اول با عمل دیودهای هرزگرد انجام می شود. مدار در قبل از

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

کموتاسیون در شکل (۳-۱۳-الف) نشان داده شده است. بلافاصله با سوئیچینگ روی S_1 ، وضعیت مدار مشابه شکل (۳-۱۳-ب) می باشد. از این به بعد، سه حالت الف، ب یا ج می تواند اتفاق افتد. برای تحلیل مدار در این حالت ها، ابتدا مشتق جریان از روابط زیر به دست می آید. با توجه به شکل (۳-۱۳-ب)، معادلات KVL با استفاده از رابطه (۳-۴۸) عبارتند از:

(۳-۵۰)

$$\begin{cases} +\frac{V}{2} = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a + V_{no} \\ -\frac{V}{2} = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b + V_{no} \\ 0 = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c + V_{no} \end{cases}$$

که در رابطه فوق $L = L_s - M$ می باشد. با جایگزین کردن Back - EMF رابطه زیر به دست می آید.

(۳-۵۱)

$$V_{no} = -\frac{e_a + e_b + e_c}{3} = -\frac{E}{3}$$

با ساده سازی، مشتقات جریان با رابطه زیر به دست می آید.

(۳-۵۲)

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$\frac{di_a}{dt} = + \frac{3V - 4E}{6L}$$

$$\frac{di_b}{dt} = - \frac{3V - 8E}{6L}$$

$$\frac{di_c}{dt} = - \frac{4E}{6L}$$

مشابه با محاسبات فوق برای شکل (۳-۱۳-ج) ، مشتقات جریان به وسیله روابط زیر به

دست می آیند .

(۵۳-۳)

$$\frac{di_a}{dt} = - \frac{3V + 4E}{6L}$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{3V + 8E}{6L}$$

$$\frac{di_c}{dt} = - \frac{4E}{6L}$$

مطابق با وضعیت عملکرد موتور (سرعت) ، سه حالت زیر می تواند رخ دهد .

حالت الف : در این حالت ، i_a, i_c همزمان به مقدار نهایی برسند . بنابراین شیب ها برابر

هستند . وضعیت حالت الف با استفاده از رابطه (۳-۴۹) به صورت زیر خواهد شد .

(۵۴-۳)

$$3V = 8E \Rightarrow \frac{E}{V} = \frac{3}{8}$$

با اتخاذ شروع کموتاسیون به عنوان زمان مبدا و با استفاده از رابطه (۳-۴۹) ، جریان i_a با

رابطه زیر به دست می آید .

(۵۵-۳)

$$i_a(t) = \frac{3V - 4E}{6L} t$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

بنابراین، زمان کموتاسیون t_c بدین صورت محاسبه می گردد.

(۵۶-۳)

$$t_c = \frac{6LI}{3V - 4E}$$

حالت ب: شرط داشتن این حالت این است که $\left| \frac{di_r}{dt} \right| > \left| \frac{di_a}{dt} \right|$ باشد و یا به عبارت دیگر

$$\left| \frac{di_c}{dt} \right| > \left| \frac{di_a}{dt} \right|, \text{ در نتیجه خواهیم داشت.}$$

(۵۷-۳)

$$3V < 8E \Rightarrow \frac{E}{V} > \frac{3}{8}$$

این معادله مطابق با ناحیه سرعت بالا در موتور BLDC با اینورتر سه فاز چهار سوئیچه می باشد. در این حالت جریان i_b مستقیماً کموتاسیون را در بر نمی گیرد. اما ثابت باقی نمی ماند. زیرا مشتق جریان i_c و i_a متفاوت است.

در این حالت، کموتاسیون در دو توالی ۱ و ۱۱ به دست می آید. در توالی اول ($0 < t < t'$)، جریان i_c به صفر می رسد، که در شکل (۳-۱۳-ب) نشان داده شده است و با استفاده از رابطه (۳-۵۲)، $i_c(t)$ رابطه زیر به دست می آید.

(۵۸-۳)

$$i_c(t) = I - \frac{4E}{6L} t$$

مدت زمان این مرحله با استفاده از رابطه (۳-۵۸) به صورت زیر خواهد بود.

(۵۹-۳)

$$t' = \frac{6LI}{4E}$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

در پایان این توالی ، i_a از رابطه (۳-۵۳) به صورت زیر به دست می آید .

(۳-۶۰)

$$i_a(t') = \frac{-3V + 4E}{4E} I$$

برای توالی دوم ($t' < t < t''$) ، فقط دو فاز a و b به صورت سری (هدایت دو فاز) هدایت می

کنند ($i_a = -i_b$) و KVL آن عبارتست از :

(۳-۶۱)

$$V = L \frac{di_a}{dt} + e_a - L \frac{di_b}{dt} - e_b = 2L \frac{di_a}{dt} + 2E$$

بنابراین ، جریان i_a از رابطه زیر به دست می آید .

(۳-۶۲)

$$i_a(t) = \frac{3V - 4E}{4E} I + \frac{V - 2E}{2L} t$$

در پایان توالی دوم ، i_a به مقدار I می رسد ، بنابراین زمان این مرحله (Δ') به صورت زیر

به دست می آید .

(۳-۶۳)

$$\Delta' = \frac{-3V + 8E}{V - 2E} \cdot \frac{2LI}{4E}$$

کل زمان کموتاسیون در حالت b به وسیله زیر به دست می آید .

(۳-۶۴)

$$t_c = t' + \Delta' = \frac{LI}{V - 2E}$$

زمان کموتاسیون بایستی بزرگ تر از صفر باشد در نتیجه رابطه زیر را خواهیم داشت .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

(۶۵-۳)

$$t_c > 0 \Rightarrow V - 2E > 0 \Rightarrow \frac{E}{V} < \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{3}{8} < \frac{E}{V} < \frac{1}{2}$$

همان طور که در شکل (۳-۱۲-ب) نشان داده شده، در ناحیه سرعت بالا جریان کموتاسیون نشده i_b یک فرو رفتگی دارد و بنابراین گشتاور کاهش می یابد.

حالت ج: شرط داشتن این حالت این است که $\left| \frac{di_d}{dt} \right| < \left| \frac{di_r}{dt} \right|$ باشد و یا به عبارت دیگر

$$\left| \frac{di_c}{dt} \right| < \left| \frac{di_a}{dt} \right| \text{ ، در نتیجه خواهیم داشت .}$$

(۶۶-۳)

$$3V > 8E \Rightarrow \frac{E}{V} < \frac{3}{8}$$

این معادله متناظر با محدوده سرعت پایین موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه سه فاز است. در این جریان i_b مستقیماً کموتاسیون را در بر نمی گیرد، اما ثابت باقی نمی ماند زیرا مشتق جریان های i_c و i_a متفاوت می باشند.

در این حالت، هم چنین کموتاسیون در دو توالی I و II می باشد که در شکل (۳-۱۲-ج) نشان داده شده است. در توالی اول ($0 < t < t''$)، جریان i_c به صفر می رسد و مشخصه آن در شکل (۳-۱۳-ب) نشان داده شده است. در پایان این توالی، $i_a(t)$ به مقدار +I می رسد. با استفاده از $i_a(t)$ از رابطه (۳-۵۲) و محاسبات، مدت زمان توالی I با رابطه زیر به دست می آید.

(۶۷-۳)

$$t'' = \frac{6LI}{3V - 4E}$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

توالی دوم ($t'' < t < t_c$) متناظر با شکل (۳-۱۳-ج) است و در پایان توالی II، i_c به صفر

می رسد. بنابراین زمان این مرحله (Δ'') با رابطه زیر به دست می آید.

(۶۸-۳)

$$\Delta'' = \frac{3V - 8E}{3V - 4E} \cdot \frac{6LI}{4E}$$

کل زمان کموتاسیون در حالت ج با رابطه زیر به دست می آید.

(۶۹-۳)

$$t_c = t'' + \Delta'' = \frac{6LI}{4E}$$

زمان کموتاسیون بایستی بزرگ تر از صفر باشد در نتیجه رابطه زیر را خواهیم داشت.

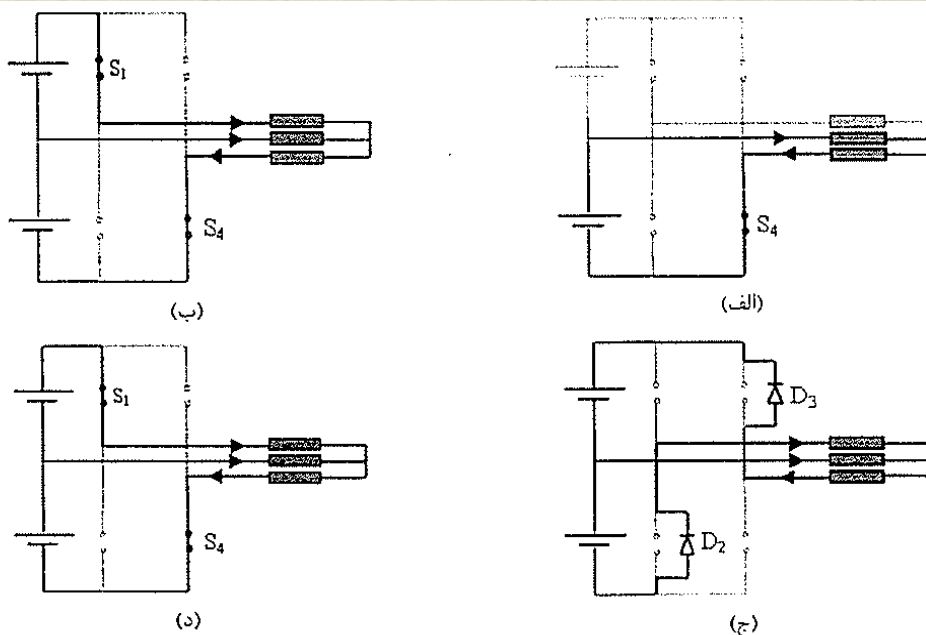
(۷۰-۳)

$$t_c > 0 \Rightarrow 4E > 0 \Rightarrow E > 0 \Rightarrow 0 < \frac{E}{V} < \frac{3}{8}$$

بنابراین، همان طور که در شکل (۳-۱۲-ج) نشان داده شده، در محدوده سرعت پایین

جریان کموتاسیون نشده i_b برجسته می باشد، بنابراین گشتاور افزایش می یابد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۳-۱۳: توالی کموتاسیون در سکتور II (الف) قبل از کموتاسیون، (ب) کموتاسیون با دو سوئیچ، (ج) کموتاسیون با دو دیود، (د) بعد از کموتاسیون [۲۰]

شکل ۳-۱۳: توالی کموتاسیون در سکتور II (الف) قبل از کموتاسیون، (ب) کموتاسیون با دو سوئیچ، (ج) کموتاسیون با دو دیود، (د) بعد از کموتاسیون [۲۰]

۳-۲-۲-۷-۲: سکتور IV

مطابق با شکل (۳-۱۰)، در این سکتور، i_d, i_r, i_{nc} ، به ترتیب متناظر با i_a, i_b, i_c می باشد. کموتاسیون، از فاز a به فاز b می باشد. این انتقال جریان با خاموش کردن S_1 و روشن کردن S_3 انجام می شود. این انتقال جریان مستقیماً انجام نمی شود و در ابتدا با عمل دیودهای هرزگرد انجام می شود. مدار قبل از این کموتاسیون در شکل (۳-۱۴-الف) نشان داده شده است. بعد از شکل (۳-۱۴-ب) کموتاسیون پایان می یابد و شکل مدار، شکل (۳-۱۴-ج) خواهد شد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

با شرح زیر ، نشان داده شده که در این سکتور ، فقط حالت ب در ناحیه کموتاسیون اتفاق خواهد افتاد و این اختلاف با کموتاسیون در سکتور II درایو موتور BLDC با اینورتر شش سوئیچه می باشد . برای تحلیل مدار در حالت ب با استفاده از معادلات KVL و ساده سازی ، مشتقات جریان i_b, i_a عبارتند از

(۷۱-۳)

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = -\frac{3V+4E}{6L} \\ \frac{di_b}{dt} = -\frac{-3V+4E}{6L} \end{cases}$$

با مقایسه مشتقات جریان های i_b, i_a رابطه زیر به دست می آید .

(۷۲-۳)

$$\left| \frac{di_a}{dt} \right| > \left| \frac{di_b}{dt} \right|$$

معادله (۷۲-۳) به این معنی است که همیشه تضعیف جریان i_a و رسیدن به صفر قبل از رسیدن جریان i_b به + در شرایط عملکرد متفاوت می باشد . بنابراین ، مشخصه مدار در شکل (۳-۱۴-ب) نشان داده شده است . برای تعیین زمان کموتاسیون در توالی اول $(0 < t < t')$ از این سکتور ، جریان i_a به صفر کاهش می یابد و از رابطه (۷۱-۳) رابطه زیر به دست خواهد آمد .

(۷۳-۳)

$$t' = \frac{6LI}{3V+4E}$$

برای توالی دوم $(t' < t < t_c)$ ، مشابه با حالت ب در سکتور II ، زمان (Δ') با رابطه زیر به دست می آید .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

(۷۴-۳)

$$\Delta' = \frac{8E}{3V+4E} \cdot \frac{4LI}{V-4E}$$

کل زمان کموتاسیون با رابطه زیر به دست می آید .

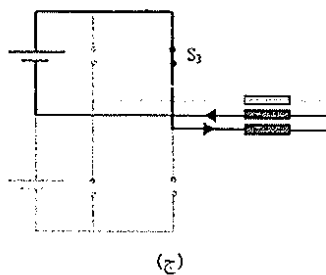
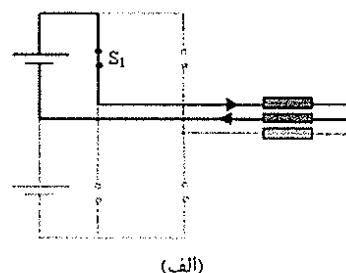
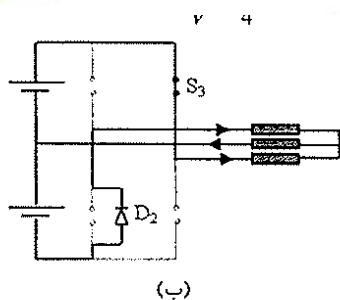
(۷۵-۳)

$$t_c = t' + \Delta' = \frac{2LI}{V-4E}$$

زمان کموتاسیون بایستی بزرگ تر از صفر باشد در نتیجه رابطه زیر را خواهیم داشت .

(۷۶-۳)

$$t_c > 0 \Rightarrow V - 4E > 0 \Rightarrow \frac{E}{V} < \frac{1}{4}$$



شکل ۳-۱۴: توالی کموتاسیون در سکتور IV، (الف) قبل از کموتاسیون، (ب) کموتاسیون، (ج) بعد از کموتاسیون [۲۰]

۳-۲-۷-۳ : سکتور VI

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

مطابق با شکل (۳-۱۰) در این سکتور ، i_r, i_d و i_{nc} به ترتیب متناظر با i_c, i_b و i_a می باشند . کموتاسیون از فاز b به فاز c می باشد . این انتقال جریان به خاموش نگه داشتن سوئیچ S_3 و S_2 ، انجام می شود .

با این حال این انتقال مستقیما انجام نمی شود و ابتدا با عمل دیودهای هرزگرد انجام می گردد که در شکل (۳-۱۵ ب) نشان داده شده است . مدار قبل از این کموتاسیون در شکل (۳-۱۵ الف) نشان داده شده است بلافاصله بعد از خاموش شدن سوئیچ S_3 شکل مدار مطابق با شکل (۳-۱۵ ب) می باشد و با ساده سازی ، مشتقات جریان با رابطه زیر حاصل می گردد .

(۳-۷۷)

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = -\frac{V+4E}{6L} \\ \frac{di_c}{dt} = -\frac{-2V+4E}{6L} \end{cases}$$

مشابه با محاسبات فوق برای شکل (۳-۱۵ ج) مشتقات جریان به وسیله روابط زیر به دست می آید .

(۳-۷۸)

$$\begin{cases} \frac{di_b}{dt} = -\frac{3V+4E}{6L} \\ \frac{di_c}{dt} = -\frac{4E}{6L} \end{cases}$$

حالت الف : در این حالت i_c, i_b همزمان به مقدار نهایی خود می رسد . بنابراین مشتقات آن ها یکسان هستند و شرط اتفاق افتادن حالت الف عبارتست از :

(۳-۷۹)

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$V = 8E$$

بنابراین ، زمان کموتاسیون t_c می تواند با رابطه زیر محاسبه گردد .

(۸۰-۳)

$$t_c = \frac{6LI}{3V - 4V}$$

حالت ب : شرط داشتن این حالت این است که $\left| \frac{di_d}{dt} \right| > \left| \frac{di_r}{dt} \right|$ باشد و یا به عبارت دیگر

$$\left| \frac{di_b}{dt} \right| > \left| \frac{di_c}{dt} \right| \text{ ، در نتیجه خواهیم داشت .}$$

(۸۱-۳)

$$V < 8E \Rightarrow \frac{E}{V} > \frac{1}{8}$$

مشابه با حالت ب سکتورهای II و IV می باشد و t_c بدین صورت به دست می آید .

(۸۲-۳)

$$t_c = t' + \Delta' = \frac{2LI}{V - 4E}$$

زمان کموتاسیون بایستی بزرگ تر از صفر باشد در نتیجه رابطه زیر را خواهیم داشت .

(۸۳-۳)

$$t_c > 0 \Rightarrow V - 4E > 0 \Rightarrow \frac{E}{V} < \frac{1}{4}$$

این عبارت متناظر با ناحیه سرعت بالا می باشد . در این حالت جریان i_a مستقیماً

کموتاسیون را در بر نمی گیرد ، اما ثابت باقی نمی ماند زیرا مشتق جریان های i_a, i_c

متفاوت است . از اینرو ، همان طور که در شکل (۳-۱۲-ب) نشان داده شده است . در ناحیه

سرعت بالا جریان کموتاسیون نشده i_a فرو رفتگی دارد و بنابراین گشتاور کاهش می یابد .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

حالت ج: شرط داشتن این حالت این است که $\left| \frac{di_d}{dt} \right| < \left| \frac{di_r}{dt} \right|$ باشد و یا به عبارت دیگر

$$\left| \frac{di_b}{dt} \right| < \left| \frac{di_c}{dt} \right| \text{ ، در نتیجه خواهیم داشت .}$$

(۸۴-۳)

$$V > 8E \Rightarrow \frac{E}{V} < \frac{1}{8}$$

این معادله متناظر با محدوده سرعت پایین از موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه سه فاز می باشد. در این حالت جریان i_a مستقیماً کموتاسیون را در بر نمی گیرد، اما ثابت باقی نمی ماند، زیرا مشتق جریان i_c, i_b متفاوت است.

در این حالت، کموتاسیون در دو توالی I و II به وجود می آید که در شکل (۳-۱۲-ج) نشان داده شده است. مشابه حالت ج از سکتور II، کل زمان کموتاسیون با رابطه زیر به دست می آید.

$$t_c = t'' + \Delta'' = \frac{6LI}{2V - 4E} \cdot \frac{4V - 4E}{3V + 4E} \quad (۸۵-۳)$$

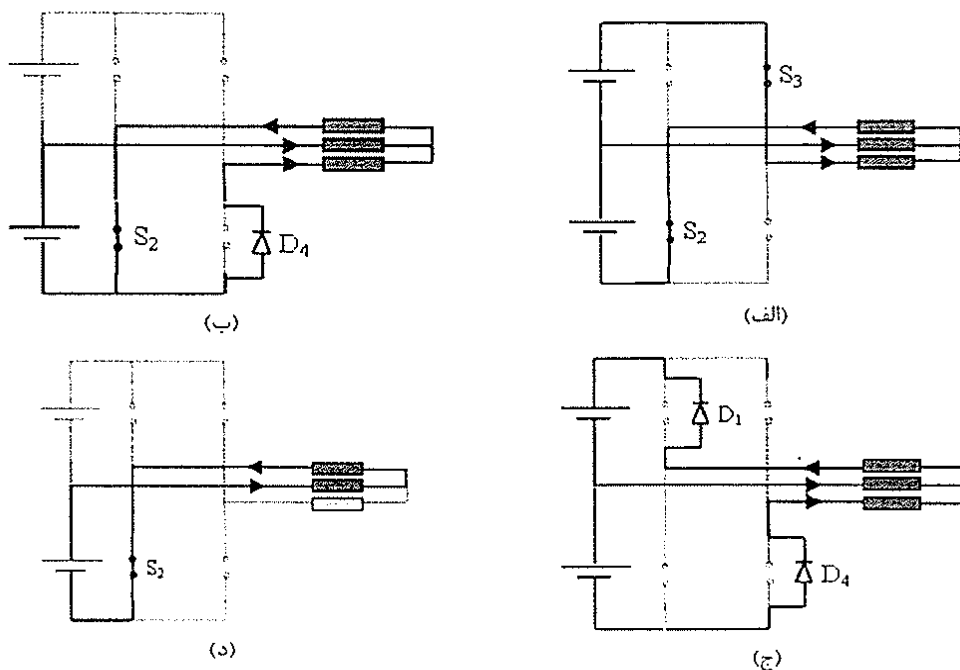
از این رو، همان طور که در شکل (۳-۱۲-ج) نشان داده شده، در محدوده سرعت پایین فاز کموتاسیون نشده i_b برجستگی دارد و بنابراین گشتاور افزایش می یابد.

در این بخش کموتاسیون فاز در سکتورهای II و IV و VI تحلیل شده بود. از تحلیل فهمیده می شود که کموتاسیون درایو موتور BLDC با اینورتر شش سوئیچه متفاوت است. توضیح مشابه می تواند برای سکتورهای I, III و V اعمال گردد. تحلیل آن ها به ترتیب مشابه با

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

سکتورهای IV , VI و II می باشد ، اما در سطح جریان منفی می باشد . زمان های

کموتاسیون و شرایط حالت ها هم چنین یکسان می باشند .



شکل ۳-۱۵: 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 [۲۰]

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۸-۳: ریپل گشتاور در کموتاسیون ها

۱-۸-۳: گشتاور در حین کموتاسیون

عبارت کلی گشتاور برای شش سکتور عبارتست از :

(۸۶-۳)

$$T = \frac{2EI}{\omega} = T_n$$

هم چنین ، عبارت کلی گشتاور بین کموتاسیون ها از رابطه زیر به دست می آید .

(۸۷-۳)

$$T = \frac{1}{\omega} (e_d i_d + e_r i_r + e_{nc} i_{nc})$$

که در رابطه فوق e_d, e_r و e_{nc} ولتاژ نیروی محرکه فاز در حال کاهش جریان ، فازهای کموتا سیون نشده و فاز در حال افزایش جریان می باشند . توالی اول کموتا سیون در سه حالت فوق الذکر برای هر سکتور رایج است . فرض کنید نیروی محرکه در کموتاسیون ها ثابت می باشد . به طوری که :

(۸۸-۳)

$$i_{nc} = -(i_d + i_r)$$

بنابراین گشتاور در طی توالی اول برای جریان مثبت با رابطه زیر به دست می آید .

(۸۹-۳)

$$T = \frac{1}{\omega} (E \cdot i_d + E \cdot i_r - E \cdot i_{nc}) = -\frac{2E \cdot i_{nc}}{\omega}$$

این نتایج نشان می دهد که گشتاور متناسب با جریان مستقیما کموتا سیون را در بر نمی گیرد . با جایگزین کردن i_{nc} در هر سکتور مقدار گشتاور در آن سکتور را نتیجه می دهد .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

برای ارزیابی کردن دامنه ریپل گشتاور در طی کموتاسیون فقط محاسبه مقدار آن در پایان مرحله اول در هر حالت از سکتورها ضروری است .

۳-۸-۱-۱ : سکتور II

مطابق با شکل (۳-۱۳-ب) و با استفاده از رابطه (۳-۵۲) رابطه زیر به دست می آید .
(۳-۹۰)

$$i_{nc}(t) = i_b(t) = -I - \frac{3V - 8E}{6L} t$$

حالت الف : $3V = 8E$

در این حالت ، $i_b(t)$ در کموتاسیون ثابت خواهد بود . بنابراین ، گشتاور ثابت باقی می ماند و برابر است با T_n و هم چنین :

(۳-۹۱)

$$\Delta T = 0(pu)$$

حالت ب : $3V < 8E$

با جایگزین کردن زمان t' از رابطه (۳-۴۸) در رابطه (۳-۸۹۵) ، گشتاور در پایان مرحله اول با رابطه زیر به دست می آید .

(۳-۹۲)

$$T(t') = \frac{2EI}{\omega} \left[1 + \frac{3V - 8E}{4E} \right]$$

با محاسبات و تقسیم بر T_n ، ریپل گشتاور نسبی از رابطه زیر به دست می آید .

(۳-۹۳)

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$\Delta T = \frac{T(t') - T_n}{T_n} = \frac{3V - 8E}{4E} (pu)$$

حالت ج : $3V > 8E$

با جایگزین کردن زمان t'' از رابطه (۳-۶۶) در رابطه (۳-۷۸) ، گشتاور در پایان مرحله اول با رابطه زیر به دست می آید .

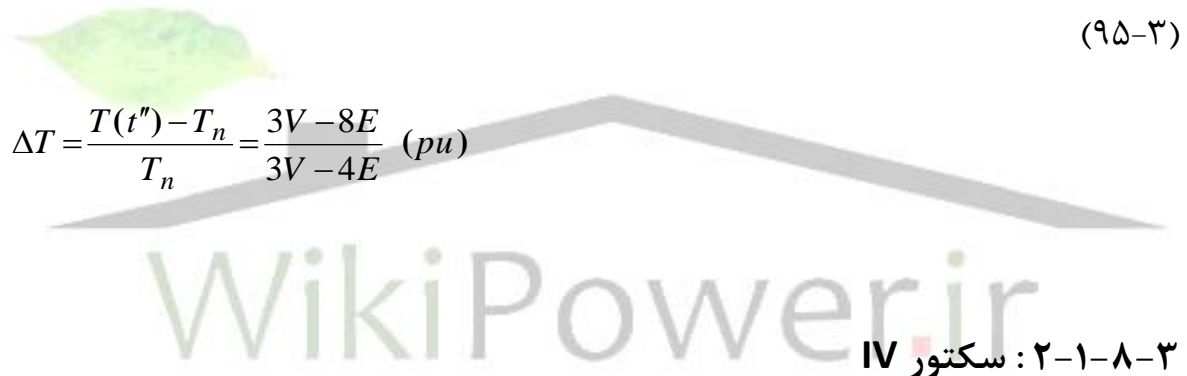
(۳-۹۴)

$$T(t'') = \frac{2EI}{\omega} \left[1 + \frac{3V - 8E}{3V - 4E} \right]$$

با محاسبات و تقسیم بر T_n ، ریپل نسبی گشتاور از رابطه زیر به دست می آید .

(۳-۹۵)

$$\Delta T = \frac{T(t'') - T_n}{T_n} = \frac{3V - 8E}{3V - 4E} (pu)$$



۳-۱-۲ : سکتور IV

در این سکتور ، همیشه حالت ب اتفاق می افتد . بنابراین ، مشابه با سکتور II ، گشتاور در پایان مرحله اول عبارتست از :

(۳-۹۶)

$$T(t') = \frac{2EI}{\omega} \left[1 - \frac{8E}{3V + 4E} \right]$$

با محاسبات و تقسیم بر T_n ، ریپل گشتاور نسبی از رابطه زیر به دست می آید .

(۳-۹۷)

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$\Delta T = \frac{T(t') - T_n}{T_n} = \frac{-8E}{3V + 4E} \text{ (pu)}$$

۳-۸-۱-۳ : سکتور VI

حالت الف : $V = 8E$

در این حالت ، $i_a(t)$ در کموتاسیون ثابت خواهد بود . بنابراین ، گشتاور ثابت باقی می ماند

و برابر است با T_n و هم چنین :

(۹۸-۳)

$$\Delta T = 0 \text{ (pu)}$$

حالت ب : $V < 8E$

با جایگزین کردن زمان t' در رابطه (۳-۸۹) ، گشتاور در پایان مرحله اول عبارتست از :

(۹۹-۳)

$$T(t') = \frac{2EI}{\omega} \left[1 + \frac{V - 8E}{V + 4E} \right]$$

با محاسبات و تقسیم بر T_n ، ریپل نسبی گشتاور از رابطه زیر به دست می آید .

(۱۰۰-۳)

$$\Delta T = \frac{T(t') - T_n}{T_n} = \frac{V - 8E}{V + 4E} \text{ (pu)}$$

حالت ج : $V > 8E$

با محاسبات و تقسیم بر T_n ، ریپل نسبی گشتاور از رابطه زیر به دست می آید .

(۱۰۱-۳)

$$\Delta T = \frac{T(t'') - T_n}{T_n} = \frac{V - 8E}{2V - 4E} \text{ (pu)}$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

توضیحات مشابه برای سکتورهای I, III و V می توان بیان کرد و نتایج یکسان برای ریپل گشتاور کموتاسیون به دست خواهد آمد. معادلات (۳-۹۱)، (۳-۹۳)، (۳-۹۵)، (۳-۹۷)، (۳-۹۸)، (۳-۱۰۰) و (۳-۱۰۱) فقط زمانی معتبر است که جریان کنترل شود ($t_c \leq 60^\circ$).

۳-۹: تحلیل نتایج تئوری

معادلات بیان شده نشان می دهد که برای یک ولتاژ ثابت لینک DC، ریپل نسبی گشتاور ناشی از کموتاسیون، مستقل از جریان است اما به ولتاژ نیروی محرکه وابسته می باشد (سرعت). ریپل نسبی گشتاور در زمان کموتاسیون محاسبه شده از معادلات فوق به ترتیب در شکل (۳-۱۶) و (۳-۱۷) برای یک نوع موتور BLDC برای سکتور متفاوت نشان داده شده است. ریپل نسبی گشتاور پریونیت است و گشتاور مبنا، گشتاور نامی موتور است.

مطابق با شکل (۳-۱۶)، در سکتورها، ماکزیمم ریپل نسبی گشتاور برابر نیست. ریپل نسبی گشتاور در سکتورهای II و V در سرعت های پایین به ۱۰۰٪ افزایش می یابد و سرعت صفر نظیر با $3V=8E$ را عبور می دهد.

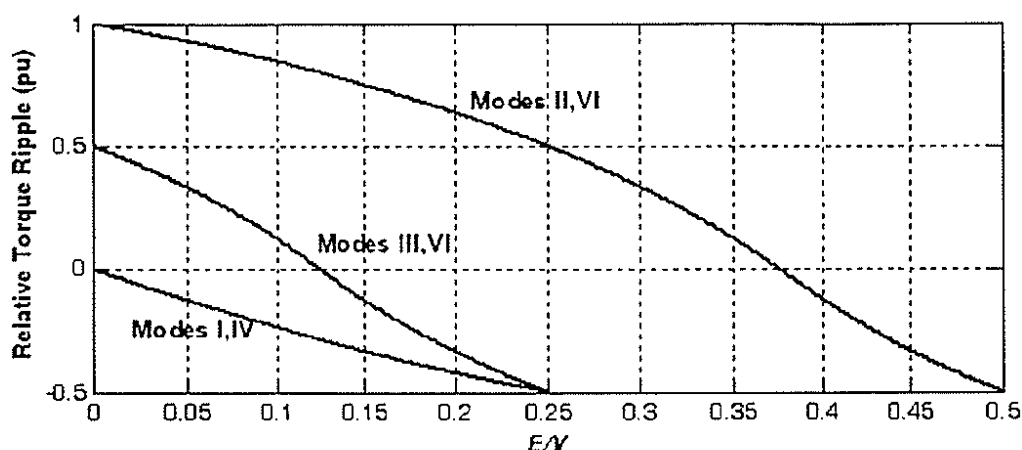
هم چنین برای سرعت های بالا ریپل گشتاور ۵۰٪ کاهش می یابد که به سرعت نظیر با $V=2E$ محدود می شود. این نقطه حد کنترل جریان این سکتور می باشد. برای سکتورهای I و IV، ریپل نسبی گشتاور از صفر به ۵۰٪ در سرعت بالا کاهش می یابد که به سرعت نظیر با $V=4E$ محدود می شود. این نقطه هم چنین حد کنترل جریان سکتورهای I و IV می باشد. برای سکتورهای III و VI، ریپل نسبی گشتاور در سرعت کم ۵۰٪ افزایش می یابد و سرعت صفر نظیر با $V=8E$ را عبور می دهد. هم چنین در سرعت بالا ۵۰٪ کاهش می یابد که به نقطه $V=4E$ محدود می شود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

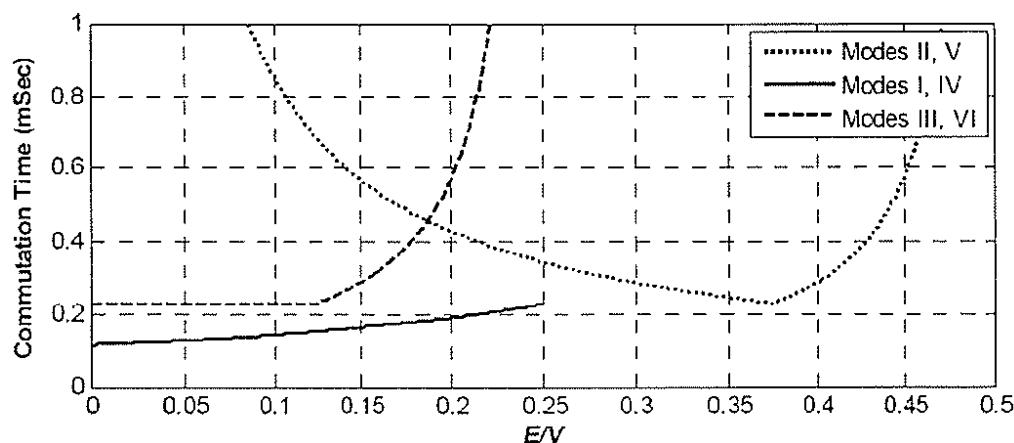
زمان کموتاسیون ، مطابق با شکل (۳-۱۷) در سکتورهای II و V ، کمی کاهش می یابد به طوری که سرعت در محدوده سرعت پایین ($3V < 8E$) افزایش می یابد و زمان کموتاسیون به سرعت افزایش می یابد وقتی که سرعت در محدوده سرعت بالا افزایش یابد . زمان کموتاسیون برای $3V = 8E$ مینیمم است وقتی که ریپل گشتاور صفر باشد . در سکتورهای I و IV ، زمان کموتاسیون کمی افزایش می یابد وقتی که سرعت تا نزدیک به محدوده کنترل جریان ($V = 4E$) افزایش می یابد . بنابراین ، در سکتورهای III و VI ، زمان کموتاسیون تا نقطه $V = 8E$ تغییر ندارد . سپس زمان کموتاسیون به سرعت افزایش می یابد وقتی که سرعت به محدوده سرعت بالا تا نزدیک به نقطه $V = 4E$ افزایش می یابد . اما ، برای درایو موتور BLDC با اینورتر شش سوئیچ در تمام شش سکتور ، ریپل نسبی گشتاور به $50\% +$ می رسد و سرعت صفر نظیر با $V = 4E$ را عبور می دهد و شیب $50\% -$ در سرعت بالا که به سرعت نظیر با $V = 2E$ محدود می شود . بنابراین ، زمان کموتاسیون کمی کاهش می یابد زمانی که سرعت در محدوده سرعت پایین ($V < 4E$) افزایش می یابد و زمان کموتاسیون به سرعت افزایش می یابد وقتی که سرعت در محدوده سرعت بالا افزایش می یابد . این زمان برای $V = 4E$ مینیمم است .

در ادامه یک تکنیک مینیمم سازی ریپل گشتاور ارائه داده خواهد شد که می توان عملکرد درایو را در دو حالت سرعت بالا و پایین بهبود داد .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۳-۱۶: دامنه ریبیل نسبی گشتاور در سکتورهای متفاوت [۲۰]



شکل ۳-۱۷: کموتاسیون در سکتورهای متفاوت [۲۰]

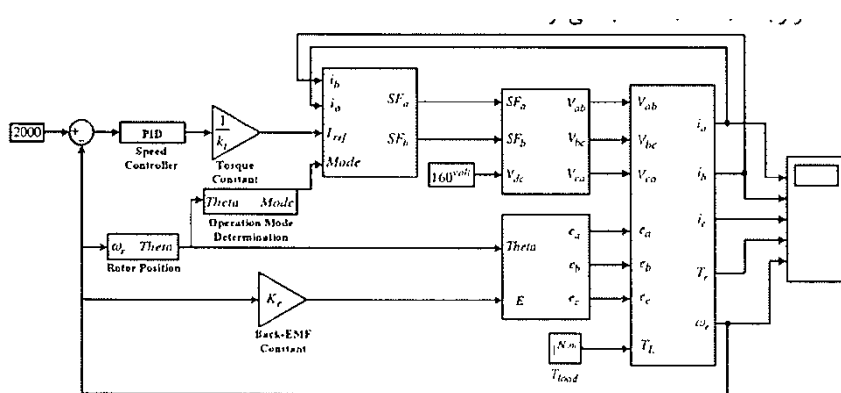
۳-۱۰: نتایج شبیه سازی تنظیم جریان برای درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه

سوئیچه

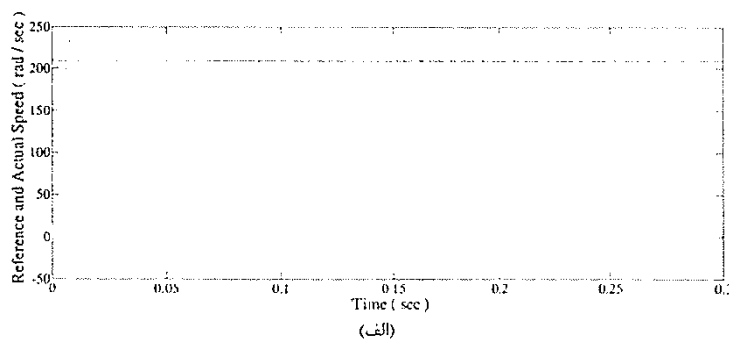
نتایج شبیه سازی تنظیم جریان برای درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه بر اساس بلوک دیاگرام شکل (۳-۱۸) در شکل (۳-۱۹) نشان داده شده است. بلوک Back – EMF نشان داده شده در شکل (۳-۱۸) متناسب با موقعیت روتور و هم چنین طبق رابطه $E = k \varphi \omega = k_e \omega$ مقدار عددی ولتاژ Back – EMF محاسبه می گردد. در بلوک کنترل جریان، جریان فاز با دو کنترلر هیستریزس جریان همان طور که در شکل (۳-۱۱) نشان

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

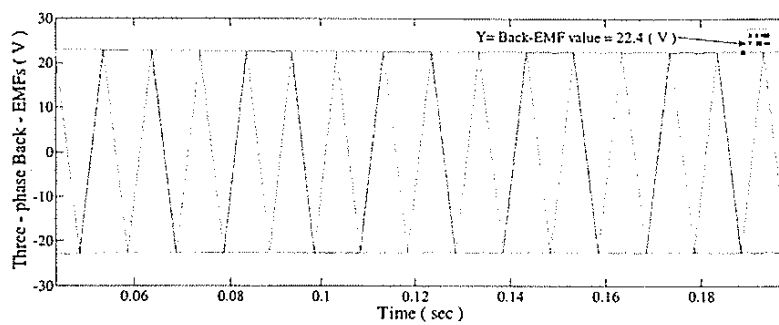
داده شده تنظیم می شود. خروجی این بلوک تابع سوئیچینگ SF_a, SF_b را تولید می کند. ولتاژهای خط در بلوک اینورتر قدرت با استفاده از ولتاژ لینک DC و سیگنال توابع سوئیچینگ (SF_a, SF_b) محاسبه می گردد. ولتاژهای خط تولید شده به موتور اعمال می گردد و بلوک مدل موتور BLDC جریان های فاز با استفاده از رابطه (۳-۴۸) محاسبه می گردد.



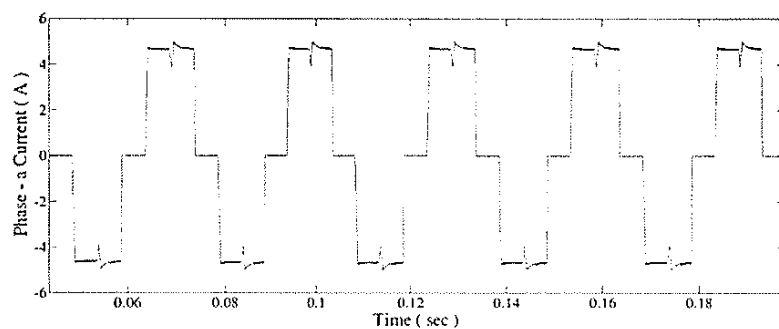
شکل ۳-۱۸: بلوک دیاگرام تنظیم جریان برای درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه



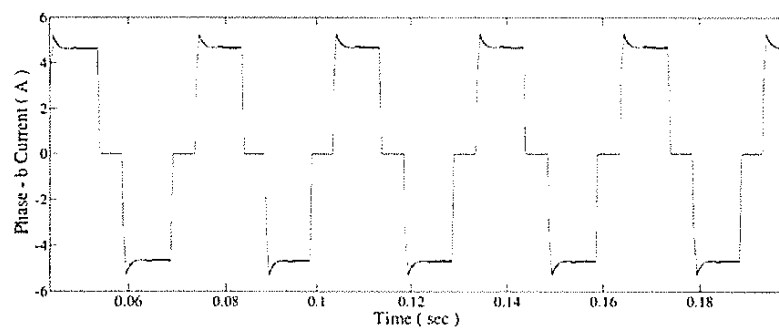
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



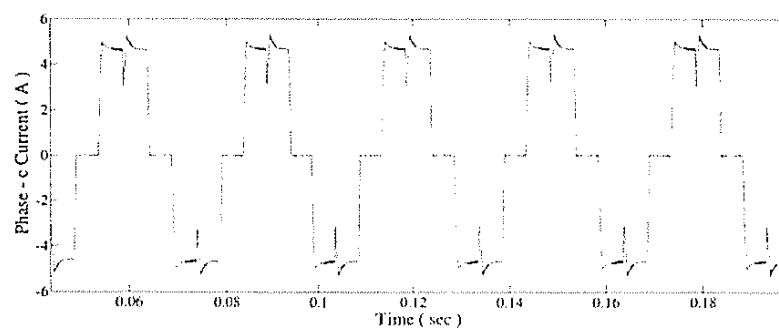
(ب)



(ج)



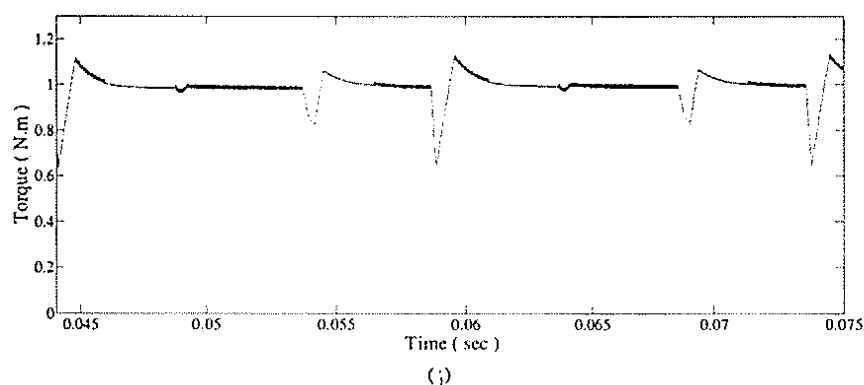
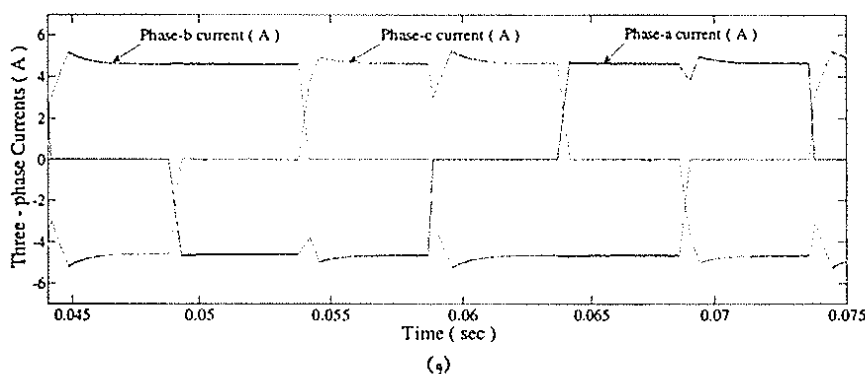
(د)



(ه)



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۳-۱۹: نتایج شبیه سازی تنظیم جریان برای درایو موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچ، (الف) سرعت مرجع و سرعت اندازه گیری شده، (ب) Back-EMF سه فاز، (ج) جریان فاز a، (د) جریان فاز b، (ه) جریان فاز c، (و) جریان سه فاز، (ز) گشتاور الکترومغناطیسی

این شبیه سازی به ازای سرعت مرجع 2000 rpm و تحت گشتاور بار 1 N.m صورت گرفته است. شکل (۳-۱۹-الف) سرعت مرجع و سرعت واقعی موتور را نشان می دهد، همان طور که از شکل پیدا است سرعت واقعی موتور به خوبی سرعت تخمینی را دنبال می کند. شکل (۳-۱۹-ب) نیروی محرکه سه فاز را نشان می دهد که دارای شکل دوزنقه ای می باشد. شکل های (۳-۱۹-ج) تا (۳-۱۹-ه) به ترتیب جریان فازهای a, b و c را نشان می دهد که در ادامه به تحلیل ریپل به وجود آمده در کموتاسیون جریان فاز می پردازیم. ولتاژ نیروی محرکه اندازه گیری شده در این شبیه سازی 22.4 ولت و ولتاژ لینک DC،

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

160 ولت می باشد. بنابراین نسبت $\frac{E}{V}=0.14$ می باشد که از $\frac{3}{8}$ کوچک تر است بنابراین

در سکتور II (V) حالت ج اتفاق می افتد زیرا سرعت 2000 rpm در رنج سرعت پایین است

و بایستی در جریان فاز b یک برجستگی رخ دهد ولی به دلیل نزدیک بودن این عدد به $\frac{3}{8}$

تقریباً شبیه i_a, i_c برابر و برجستگی جریان i_b ناچیز است (شکل (۳-۱۹-و)) و در نتیجه

ریپل گشتاور نیز ناچیز خواهد شده که با توجه به شکل (۳-۱۹-ز) خواهید دید زمانی که

جریان از فاز c به فاز a انتقال می یابد ریپل گشتاور نیز ناچیز خواهد شد. در سکتور IV

همان طور که اثبات شده همواره حالت b رخ می دهد که نتایج شبیه سازی نیز این حالت

را تایید می کند. در سکتور VI با توجه به این که $\frac{E}{V}=0.14$ در بازه $\frac{1}{8} < \frac{E}{V} < 0.25$ قرار می

گیرد پس حالت b بایستی رخ دهد که در نتایج شبیه سازی فرو رفتگی در جریان فاز a

بیانگر وقوع حالت b می باشد. با توجه به شکل (۳-۱۹-ز) هر چه ریپل در جریان فاز

شدیدتر باشد، ریپل گشتاور نیز شدیدتر می گردد.

۳-۱۱: نتیجه گیری

کموتاسیون جریان فاز برای حالت های شش سوئیچه و چهار سوئیچه مورد بررسی قرار

گرفت، هم چنین چند روش کاهش ریپل در حالت شش سوئیچه مورد بررسی قرار گرفت.

روش اعمالی زاویه پیش فازی به جریان استاتور ایده بسیار خوب و جامعی به نظر می رسد،

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

سرعت های مختلفی که موتور در آن ها کار خواهد کرد و نیز مشخصات موتور، مجموعه

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

مقادیر ثابتی به ازای شرایط مختلف به صورت جدول در نظر گرفت و در الگوریتم کنترلی لحاظ شود .

در حالت چهار سوئیچه با استفاده از روابط جریان در لحظات کموتاسیون به تحلیل کامل شرایط وقوع حالت های مختلف در تمام سکتورها پرداخته و در نهایت نتایج شبیه سازی بر اساس تحلیل انجام شده ارائه شده است که نتایج شبیه سازی صحت تحلیل را تایید می کند .

۳-۱۲: مقایسه اقتصادی بین درایو چهار سوئیچه با شش سوئیچه [۱۵]

* مقایسه اقتصادی بین این دو نوع اینورتر را نشان می دهد . با کاهش تعداد کمی قطعات ، قیمت اینورتر چهار سوئیچه حدود ۱۹٪ کمتر از قیمت اینورتر شش سوئیچه است .

* البته به دلیل کاهش ولتاژ اعمالی به موتور در اینورتر چهار سوئیچه ، در توان های بالاتر مقدار جریان فازها بیشتر شده و لذا اندازه خازن ها بیشتر می گردد که در این وضعیت استفاده از اینورتر چهار سوئیچه توجیه اقتصادی ندارد .

* هم چنین به این نکته باید اذعان داشت که استفاده از اینورتر چهار سوئیچه باعث می شود که از ظرفیت نامی موتور استفاده کامل نشود و به همین علت استفاده از درایو چهار سوئیچه برای کاربردهای توان بالا منطقی به نظر نمی رسد .

۳-۱۲-۱: مقایسه اقتصادی دو اینورتر چهار سوئیچه و شش سوئیچه برای کاربردهای

توان پایین (کسری از اسب بخار) [۱۵]

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

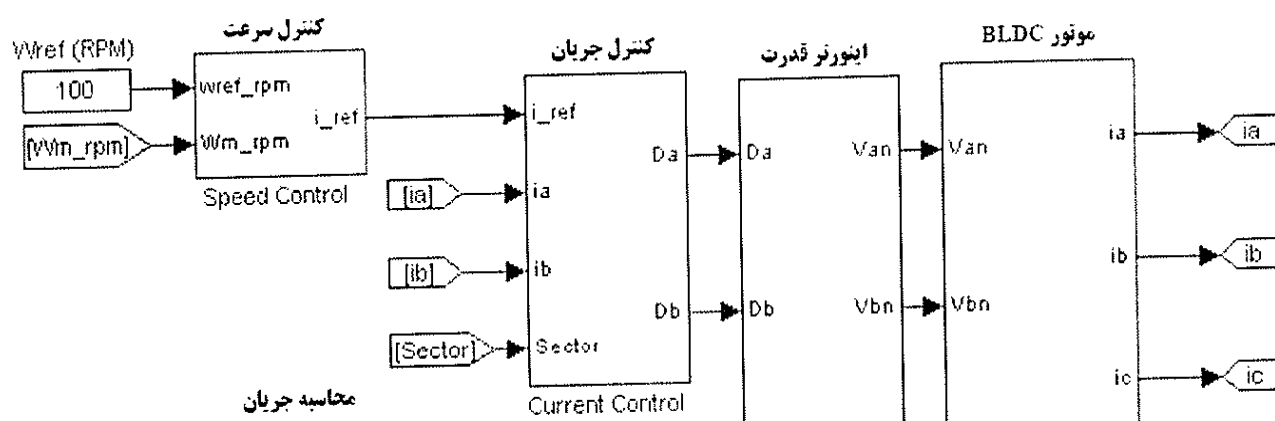
اینورتر نوع چهار سوئیچه		اینورتر نوع شش سوئیچه		قیمت واحد (تومان)	قطعات به کار رفته	
					مشخصات	نوع
۸۸۰۰	۴ عدد	۱۳۲۰۰	۶ عدد	۲۲۰۰	50A, 100Vdc	ماسفت قدرت
۵۲۰۰	۴ عدد	۷۸۰۰	۶ عدد	۱۳۰۰	3113	درايو ماسفت
۲۰۰۰	۲ عدد	۱۰۰۰	۱ عدد	۱۰۰۰	2200 μF , 100Vdc	خازن باس DC
۱۰۰۰	۲ عدد	۵۰۰	۱ عدد	۵۰۰	Bootstrap	منابع تغذيه مجزا
۲۰۰۰	۲ عدد	۱۰۰۰	۱ عدد	۱۰۰۰	شنت • 0.01 Ω , 5 Watt	حسگر جريان
۱۰۰۰۰	۱ عدد	۱۰۰۰۰	۱ عدد	۱۰۰۰۰	dsPIC30F2010	پردازنده و برد کنترل
تومان ۲۹۰۰۰		تومان ۳۳۵۰۰		قیمت کل		

۳-۱۳: شبیه سازی درایو چهار سوئیچه و مقایسه آن با اینورتر شش سوئیچه [۱۵]

* در این بخش درایو چهار سوئیچه شبیه سازی می گردد و رفتار آن با اینورتر شش سوئیچه

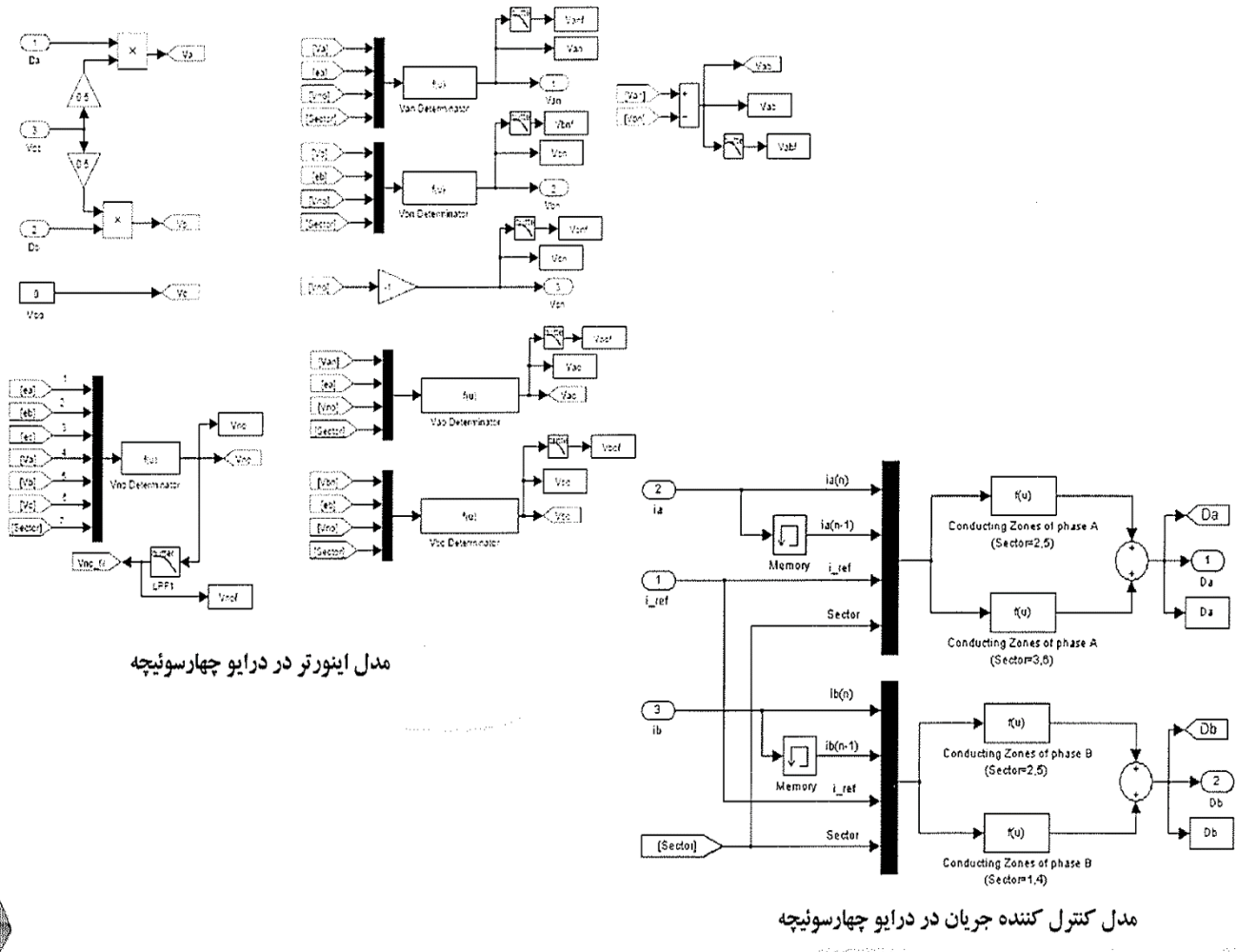
مقایسه می گردد .

* برای تنظیم جریان ها از روش DPC استفاده می شود .



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

شبیه سازی درایو چهار سوئیچه [۱۵]



مدل اینورتر در درایو چهار سوئیچه

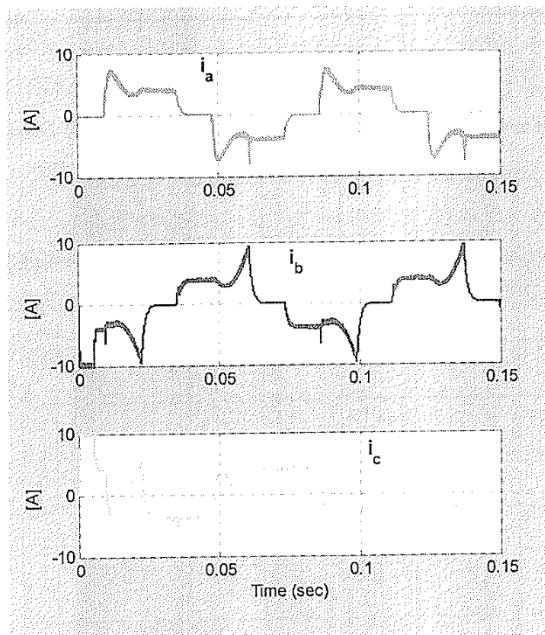
مدل کنترل کننده جریان در درایو چهار سوئیچه

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

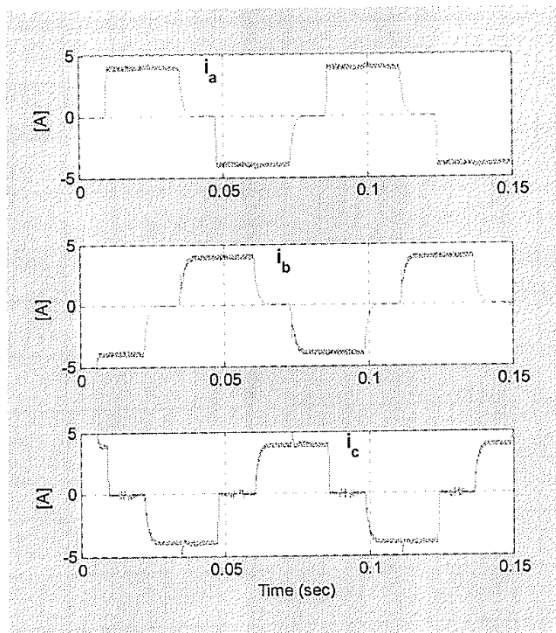
نتایج شبیه سازی درایو چهار سوئیچه [۱۵]:

* تغییرات جریان فازها در اینورتر ۴ سوئیچه به دو روش کنترل جریان لینک dc و روش

DPC انجام و مقایسه گشته اند .



اینورتر چهار سوئیچه و روش کنترل جریان لینک DC



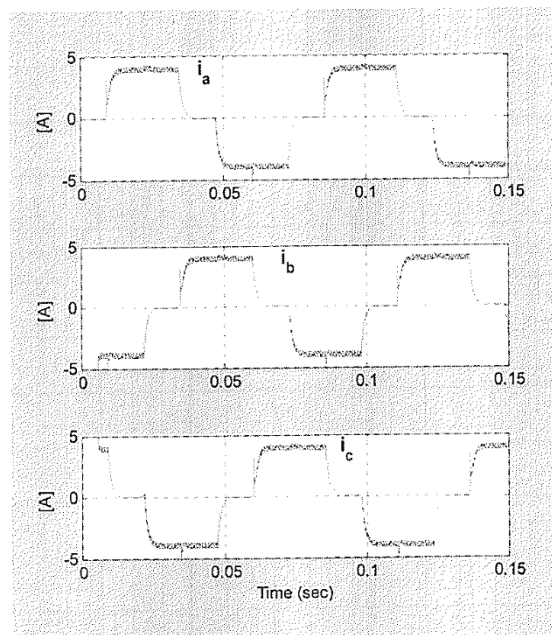
اینورتر چهار سوئیچه و روش کنترل جریان مستقیم فاز (DPC)

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

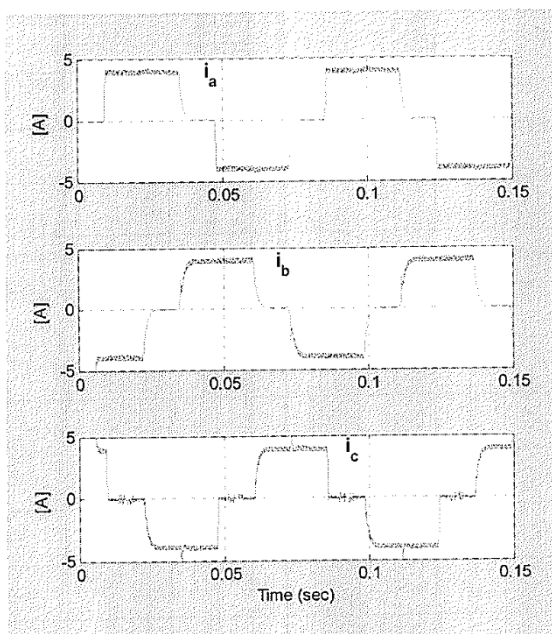
نتایج شبیه سازی درایو چهار سوئیچه [۱۵]:

* ملاحظه می گردد که استفاده از روش DPC در درایو چهار سوئیچه ، سبب می شود تا

جریان ها مشابه درایو شش سوئیچه رفتار کنند .



اینورتر شش سوئیچه و روش کنترل جریان لینک DC



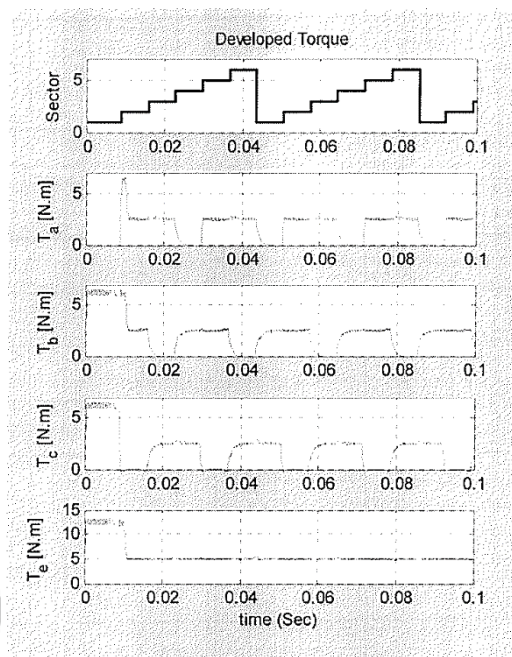
اینورتر چهار سوئیچه و روش کنترل جریان مستقیم فاز (DPC)

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

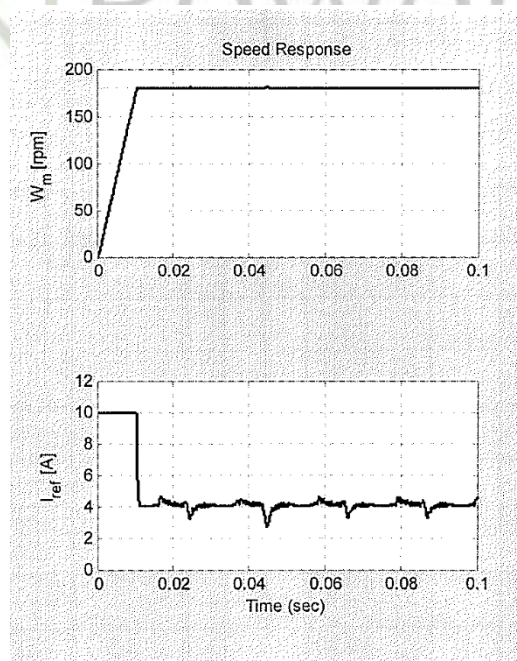
نتایج شبیه سازی درایو چهار سوئیجه [۱۵] :

* شکل های زیر ردیابی سرعت و هم چنین گشتاور ایجاد شده را در سرعت ۱۸۰ rpm

نمایش می دهد .



تغییرات گشتاورهای تولید شده توسط هر فاز و گشتاور کل



پاسخ سیستم به تغییر پله ای مرجع سرعت

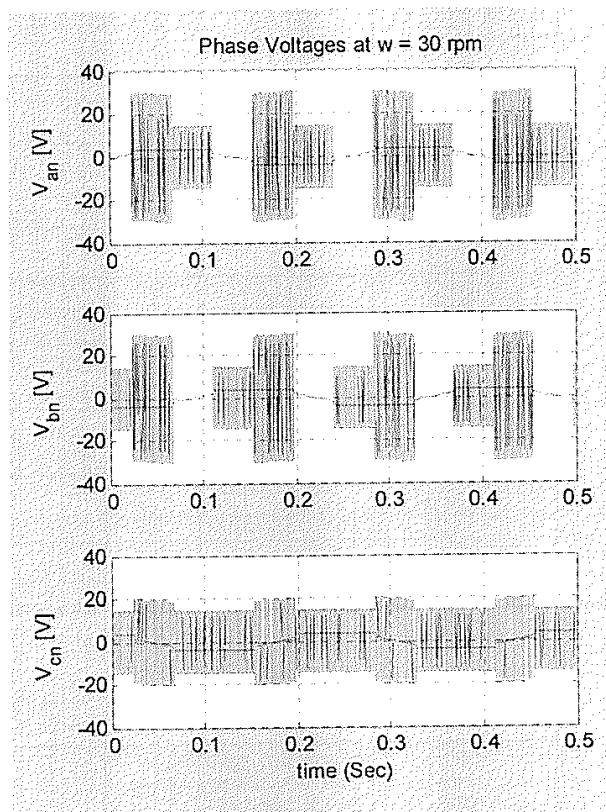
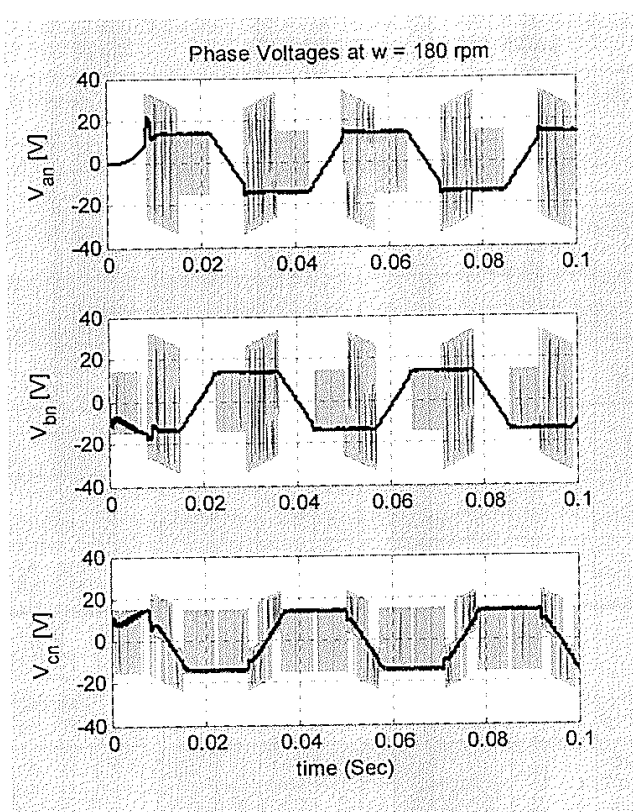
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

نتایج شبیه سازی درایو چهار سوئیچه [۱۵]:

* شکل های زیر تغییرات ولتاژ فازها در دو سرعت پایین و بالا را نمایش می دهد.

* ملاحظه می گردد که با افزایش سرعت مقدار موثر ولتاژ و موثر لحظه ای اعمال شده،

افزایش می یابد.

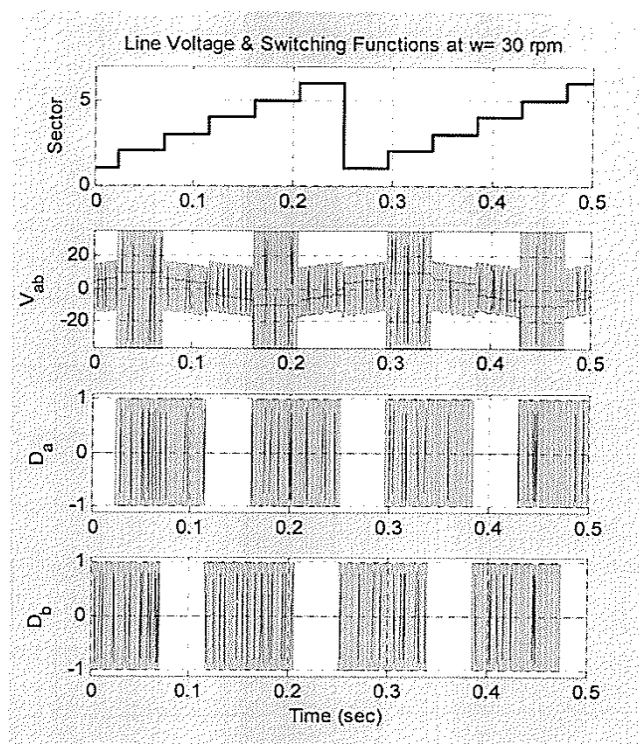
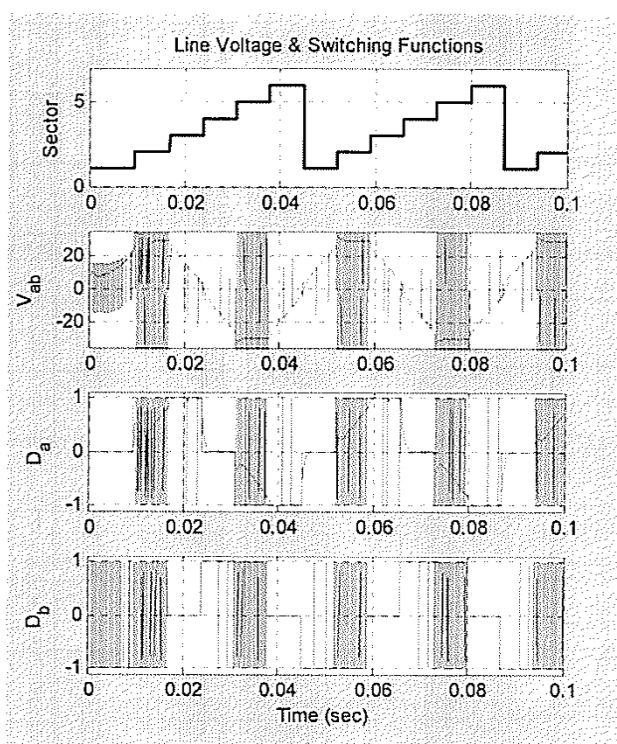


تغییرات جریان فازها در درایو چهار سوئیچه به روش DPC در دو سرعت مختلف

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

نتایج شبیه سازی درایو چهار سوئیچه [۱۵] :

- * شکل های زیر تغییرات ولتاژ خط V_{ab} در دو سرعت پایین و بالا را نمایش می دهد .
- * ملاحظه می گردد که در سرعت های بالا ، توابع سوئیچینگ در Sector های غیر از ۲ و ۵ که از نصف ولتاژ باس dc استفاده می شود ، برای ایجاد ولتاژ موثر بالاتر ، توابع سوئیچینگ بیشتر اوقان در مقدار ۱ هستند و به عبارتی سوئیچ مربوطه اغلب متصل به ولتاژ بالا است .



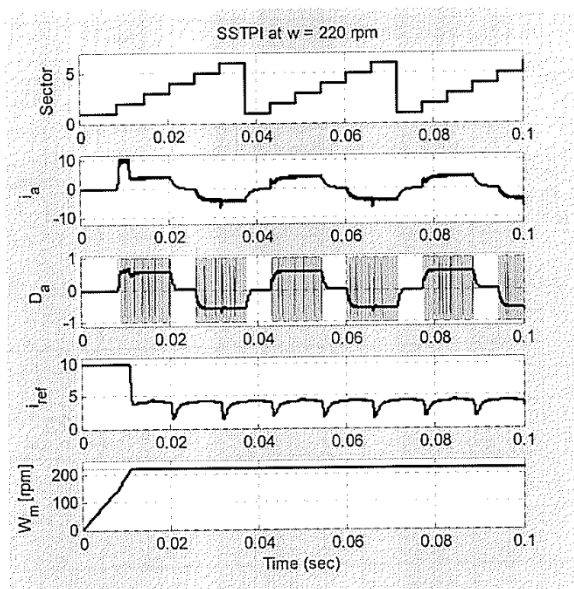
تغییرات ولتاژ خط V_{ab} و توابع سوئیچینگ در درایو چهار سوئیچه به روش DPC در دو سرعت مختلف

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

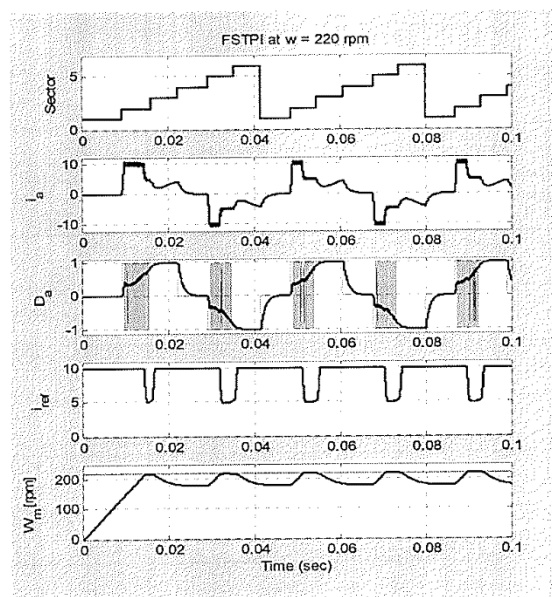
نتایج شبیه سازی درایو چهار سوئیچه [۱۵]:

* برای شتاب گیری و رسیدن و کار در سرعت های بالا ، باید جریان موتور افزایش یابد که در Sector های غیر از ۲ و ۵ ، به دلیل ناکافی بودن ولتاژ (استفاده از نصف ولتاژ باس dc) ، این اتفاق نمی افتد .

* لذا گشتاور تولید شده دارای ریپل خواهد بود و ردیابی سرعت به طور مناسب انجام نمی شود .



رفتار درایو شش سوئیچه در سرعت ۲۲۰ rpm



رفتار درایو چهار سوئیچه در سرعت ۲۲۰ rpm

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

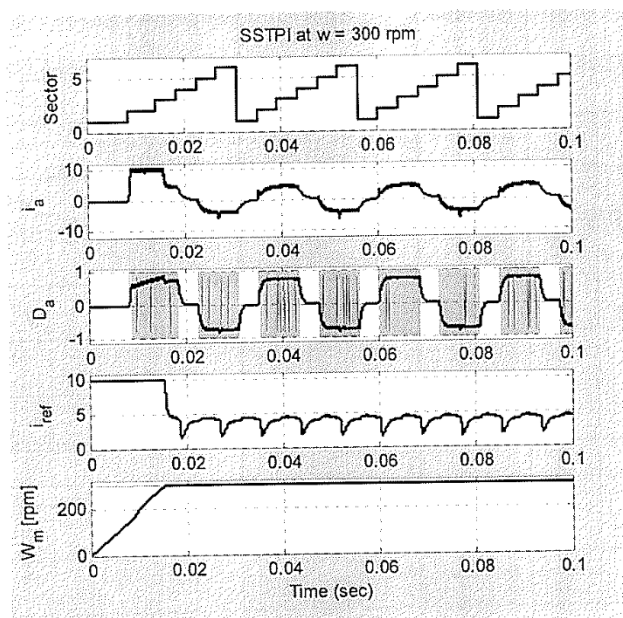
نتایج شبیه سازی درایو چهار سوئیچه [۱۵]:

* ناحیه عملکرد مناسب درایو چهار سوئیچه نسبت به درایو شش سوئیچه محدودتر (تقریباً

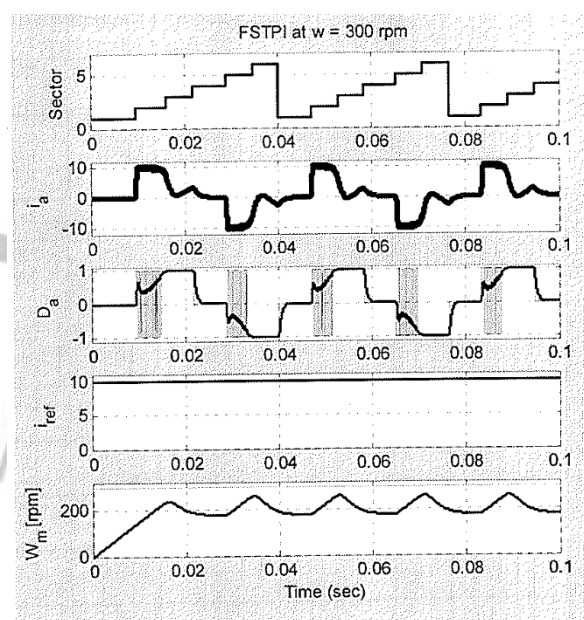
برابر با نصف سرعت نامی) است.

* به عبارت دیگر برای یک موتور با سرعت نامی ۳۰۰ rpm، در صورت استفاده از اینورتر ۴

سوئیچه، موتور نمی تواند در ۳۰۰ rpm بچرخد.



رفتار درایو شش سوئیچه در سرعت ۳۰۰ rpm



رفتار درایو چهار سوئیچه در سرعت ۳۰۰ rpm

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

مراجع انگلیسی:

[1]B.K.Lee,B.Fahimi and M.Ehsani,"Dynamic modeling of brushless dc motor drives",in European conference, power electronics and Appl.,Graz, Austria,2001.

[2]C.S.Berendsen,G.champenois and A.Bolopion,"Commutation strategies for brushless dc motors:influence on instant torque",IEEE Trans.,Power Electronics, vol.8,no.2,pp.231-236,1993.

[3]Z.Q.Zhu,Y.Liu and D.Howe,"commutation of performance of brushless dc drives under direct torque control and PWM current control", IEEE conf., Electrical Machines and Systems,vol.2,pp. 1486-1491,2005.

[4]Y.Liu,Z.Q.zhu and D.Howe ,"direct torque control of brushless dc drives with reduced torque ripple",IEEE Trans.,Ind., Appl.,vol.41,no.2,pp.599-608,2005.

[5]Y.Line,Z.Q.Zhu and D.Howe,"commutation-torque-ripple minimization in direct-torque-controlled PM brushless dc drives ",IEEE Trans.,Ind.,Appl.,vol.43,no.4,pp.1012-1021,2007.

[6]L.Zhang,W.Xiao and W.Qu,"Sensorless control of BLDC Motor using an Improved Low-cost back EMF Detection Method",IEEE Conf.,Power Electronics Specialists,pp.1-7,2006.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

[19]G.Zhou,Z.Wu and j.Ying,"Improved Sensorless brushless DC Motor drive",IEEE conf .,Power Electronics Specialists pp.1353-1357,2005.

[13]R.Carlson,M.Lajoie-Mazenc,and J.D.S.Fagundes,"Analysis of due to phase commutation in brushless dc machines ",IEEE Trans.,Ind.,Appl.,vol.28,no.3,pp.632-638, May/June1992.

[18]S.B.Ozturk,W.C.Alexander,and H.A.Toliat,"Direct Torque control of Four-Switch Brushless DC Motor with Nonsinusoidal Back-EMF",IEEE Trans.,power Electronics, vol.25,no.2,pp.263-271,Feb.2010.

[21]S.B.Ozturk and H.A.Toliat,"Sensorless Direct Torque and Indirect Flux control of Brushless DC Motor with Non-sinusoidal Back-EMF",IEEE conf.,Ind., Electronics,pp.1373-1378,2008.

[20]A.H.Niasar,H.Moghbelli and A.Vahedi,"commutation torque ripple of four-switch, brushless dc motor drives,part I:analysis,"IEEE Conf.,Advanced Motion Control,pp.541-546,2006.

[16]A.H.Niasar,H.Moghbelli and A.Vahedi,"commutation torque ripple of four-switch,brushless dc motor drives,part II" controllability and minimization ,"IEEE Conf.,advanced motion control,pp.547-552,2006.

[7]T.A.Lipo and F.G.Turnbull,"analysis and comparison of two type of square-wave in verter drives",IEEE Trans.,Ind.,Appl.,vol. IA-11,no.2,pp.137-147,march/Apr.1975.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

[8]S.K.Safi,p.p.Acarney and A.G.Jack,"Analysis and simulation of the high-speed torque performance of brushless dc motor drives",IET Trans.,Electric Power Appl.,vol.142,no.3,pp.191-200,may 1995.

[9]B.K.Lee and M.Ehsani,"A simplified functional model for 3-phase voltage-source inverter using switching function concept",IEEE Conf.,Ind.,Electronics Society ,vol.1,pp.462-467,1999.

[14]T.S.Low,K.J.Tseng,T.H.Lee,k.w.Lim and K.S.Lock,"Strategy for the instantaneous torque control of permanent-magnet brushless DC drives",IET Trans., Electric Power Appl.,vol.137,no.6,pp.355-363,November 1990.

[11]I.Takahashi and Y.Ohmori,"High-performance direct torque control of an induction motor",IEEE Trans.,Ind.,Appl.,vol.25,no.2 ,pp.257-264,1989.

WikiPower.ir

مراجع فارسی

[۱۹] موسوی نسب، س.ا.، طراحی و شبیه سازی سیستم مولد بار به منظور تولید پروفیل بارهای مختلف با استفاده از موتور BLDC، دانشکده تحصیلات تکمیلی، ص.ص. ۲۲-۹ و ۱۰۷-۵۷، ۱۳۸۶.

[۱۵] دکتر حلواپی، سیستم های کنترل حرکت پی شرفته، داز شکده مهند سی برق داز شگاه

کاشان، فصل دوم

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

نتیجه گیری

در ابتدا اصول عملکرد موتور BLDC بطور کامل بیان گردید و مزایا و معایب این موتور در مقایسه با سایر موتورها مورد بررسی قرار گیرد.

در فصل دوم روش های متداول و کارآمد کنترل موتور BLDC با اینورتر شش سوئیچه مورد بررسی قرار گرفت و ویژگی و معایب آن مورد بررسی قرار گرفت. در فصل سوم نیز روش کنترل دور موتور BLDC با اینورتر چهار سوئیچه مورد بررسی قرار گرفت و همچنین کموتاسیون جریان فاز برای حالت های موتور چهار سوئیچه و شش سوئیچه مورد بررسی قرار گرفت که کاهش دو سوئیچ نسبت به اینورترهای شش سوئیچه مرسوم منجر به کاهش هزینه در ساخت اینورتر، کاهش تلفات سوئیچینگ

و کاهش پیچیدگی در الگوریتم کنترلی، کاهش مدارات واسط و مدارات تولید پالس می شود و مقایسه اقتصادی بین اینورترهای چهار سوئیچه و شش سوئیچه نشان می دهد که در موارد بکار گیری از موتورهایی با اینورتر چهار سوئیچه در صورتیکه برای توانهای پائین بکار رود به صرفه است ولی اگر بخواهد در توانه ای بالا استفاده کنیم دیگر توجیح اقتصادی ندارد. و به عبارت دیگر ناحیه عملکرد مناسب درایو چهار سوئیچه نسبت به شش سوئیچه محدودتر (تقریباً برابر با نصف سرعت نامی) است.