

بِسْمِ اللّٰهِ

الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشگاه سبز

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه قدرت

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق - قدرت

عنوان

طراحی کنترلر سرعت برای موتور جریان مستقیم بدون

جاروبک برای کاربردهای با اینرسی متغیر بار

استادان راهنما

دکتر محمدرضا فیضی

دکتر مهران صباحی

پژوهشگر

بهروز قیاسی

آذر ۱۳۹۰

تقدیم به ...

با ژرفترین سپاسها و محبتها

این کار را به تمام کسانی که در شکل گیری لحظه به لحظه زندگی من
نقش داشتند، تقدیم می‌کنم. بویژه:

پدر بزرگوار و مادر
مهربانم

به خاطر زحمات بی دریغشان

تقدیر و تشکر

خدوند متعال را شاکرم که توفیق انجام این پایان نامه را به من عطا کرد.

استاد ارجمند و بزرگوار، جناب آقای دکتر محمد رضا فیضی

جنابعالی اسوه تلاش و کوشش برای من و سایر دانشجویان هستید، بر خود لازم می دانم که از زحمات فراوان و خستگی ناپذیر جنابعالی کمال تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین از استاد گرامی جناب آقای دکتر مهران صباحی که که از علم وافر و تجربه گرانقدرشان بهره ها برده ام، صمیمانه سپاسگزارم.

همچنین از استاد محترم داور، جناب آقای دکتر محمد باقر شریفیان که با نقطه نظرات ارزشمند خود در اصلاح پایان نامه مرا یاری کردند بینهایت ممنونم. از خداوند متعال موفقیت و سربلندی روزافزون تمامی این عزیزان را دارم.

نام خانوادگی دانشجو: قیاسی	نام: بهروز
عنوان پایان نامه: طراحی کنترلر سرعت برای موتور جریان مستقیم بدون جاروبک برای کاربردهای با اینرسی متغیر بار	
استادان راهنما: دکتر محمد رضا فیضی - دکتر مهران صباحی	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی برق - قدرت گرایش: ماشین های الکتریکی و درایو دانشگاه: تبریز دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر تاریخ فارغ التحصیلی: آذر ۱۳۹۰ تعداد صفحه: ۹۶	
کلید واژه‌ها	
موتور BLDC، کنترلر تطبیقی، تخمین گر اغتشاش، ESO	
چکیده	
<p>به دلیل پیشرفت در ساخت ادوات الکترونیک قدرت و ارزانی مواد مغناطیسی، استفاده از موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک افزایش یافته است. این نوع موتورها به دلیل بازده زیاد و نسبت گشتاور به وزن بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند و به همین دلیل روش‌های کنترلی فراوانی برای کنترل این نوع از موتورها مطرح شده است.</p> <p>ساده‌ترین روش کنترلی برای کنترل موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک (BLDC)، استفاده از کنترلرهای خطی مانند کنترلرهای تناسبی-انتگرالی (PI) است که به دلیل سادگی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از طرف دیگر چون موتورهای BLDC ذاتاً سیستمهایی غیر خطی هستند استفاده از کنترلرهای خطی روش مناسبی برای کنترل این موتور نیست. با توجه به پیشرفت تئوری کنترل و ساخت پردازنده‌های سریع‌تر، روش کنترل غیر خطی می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای کنترل موتورهای BLDC باشد. به عنوان مثال کنترلرهایی مانند کنترلر تطبیقی، کنترلر مقاوم، کنترلرهای مد لغزشی و کنترلرهای هوشمند می‌توانند عملکرد موتور BLDC را از جنبه‌های مختلف بهبود دهند. در این روش‌ها معمولاً با فرض اینکه دینامیک موتور و بار کاملاً مشخص است و هیچگونه اغتشاش به سیستم وارد نمی‌شود، به طراحی کنترلر پرداخته می‌شود.</p> <p>در کاربردهای واقعی همواره اغتشاشات درونی مانند اصطکاک و دینامیک مدل نشده و اغتشاشات بیرونی مانند گشتاور بار بر سیستم وارد می‌شود که در نظر نگرفتن هر کدام از آنها در طراحی کنترلر ممکن است باعث دور شدن عملکرد کنترلر از اهداف کنترلی از پیش تعیین شده گردد.</p> <p>در این پایان نامه از یک روش جدید که بر مبنای تخمین گر اغتشاش طراحی شده است برای کنترل موتور BLDC استفاده می‌شود. این نوع کنترلر علاوه بر اینکه نسبت به اغتشاشات ورودی مقاوم است، نسبت به تغییرات اینرسی بار نیز کاملاً مقاوم است، به نحوی که تغییر در اینرسی بار تا چندین برابر، عملکرد این کنترلر را مختل نمی‌کند.</p> <p>در طراحی این نوع کنترلر از پارامترهای بار مانند اینرسی و اصطکاک استفاده نشده است که این موضوع خود باعث می‌شود</p>	

عملکرد این نوع کنترلر تقریباً مستقل از پارامترهای بار شود؛ به این معنی که اگر در حین کار میزان اصطکاک و اینرسی چندین برابر شود تغییری در عملکرد کنترلر به وجود نمی‌آید که از این نظر در میان انواع کنترلرها برتر است. در پایان نتایج شبیه‌سازی برای بررسی تأثیر تغییر در پارامترهای اصطکاک و اینرسی توسط نرم افزار سیمولینک متلب ارائه شده است.

فهرست مطالب

III	فهرست مطالب
VI	فهرست شکل‌ها
VIII	فهرست جدول‌ها

فصل اول

۱	مقدمه
۳	۱- بررسی منابع
۳	۱-۱ بررسی پژوهش‌های پیشین در رابطه با موتورهای BLDC
۵	۲-۱ موتورهای BLDC
۵	۱-۲-۱ ساختار
۶	۲-۲-۱ عملکرد
۸	۳-۲-۱ مدل ریاضی موتور

فصل دوم

۱۱	۲- موادها و روشها
۱۱	۱-۲ تخمین گره‌های اینرسی [۳۲]
۱۱	۱-۱-۲ طراحی مشاهده‌گر گشتاور مزاحم [۳۲]
۱۳	۲-۱-۲ تخمین اینرسی [۳۲]

۱۴	۳-۱-۲ سیگنال‌های متعامد [۳۲].....
۱۵	۴-۱-۲ الگوریتم تخمین اینرسی [۳۲].....
۱۸	۲-۲ کنترلرهای مبتنی بر تخمین گرهای توسعه یافته [۳۱].....
۱۸	۱-۲-۲ مقدمه.....
۱۸	۲-۲-۲ طراحی کنترلرهای مبتنی بر تخمین گرهای توسعه یافته برای سیستمهای درجه دو [۳۱].....
۲۲	۳-۲ کنترل موتور BLDC با استفاده از روش باند محدود (هیستریزیس).....
۲۲	۱-۳-۲ کنترل سرعت به روش هیستریزیس.....
۲۴	۴-۲ کنترل موتور BLDC با استفاده از روش شبکه عصبی.....
۲۴	۱-۴-۲ سیستمهای کنترلی و شبکه‌های عصبی.....
۲۵	۲-۴-۲ شبکه‌های عصبی پرسپترون.....
۲۶	۳-۴-۲ تعریف سیستم.....
۲۷	۴-۴-۲ کنترلر NARMA_L2.....
۲۹	۵-۴-۲ کنترل سرعت به کمک کنترلر NARMA_L2.....
۳۰	۵-۲ طراحی کنترلر پیشنهادی برای موتور BLDC.....
۳۰	۱-۵-۲ مقدمه.....
۳۰	۲-۵-۲ طراحی کنترلر بر مبنای تخمین گر اغتشاش برای موتور BLDC.....
۳۳	۳-۵-۲ طراحی کنترلر مبتنی بر تخمین گر تطبیقی.....
۳۶	۴-۵-۲ طراحی کنترلر تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش.....

فصل سوم

۳۹	۳- نتایج شبیه‌سازی و بحث.....
۳۹	۱-۳ شبیه‌سازی کنترلر هیستریزیس برای موتور BLDC در سیمولینک متلب.....
۳۹	۱-۱-۳ مقدمه.....
۳۹	۲-۱-۳ نتایج شبیه‌سازی برای کنترلر هیستریزیس.....

۴۳	..... شبیه‌سازی کنترلر NARMA-L2 برای موتور BLDC در سیمولینک متلب
۴۳	..... ۱-۲-۳ مقدمه
۴۳	..... ۲-۲-۳ نتایج شبیه‌سازی
۴۸	..... ۳-۳ شبیه‌سازی کنترلرهای مبتنی بر تخمین‌گر اغتشاش برای موتور BLDC در سیمولینک متلب
۴۸	..... ۱-۳-۳ مقدمه
۴۸	..... ۲-۳-۳ نتایج شبیه‌سازی برای کنترلر مبتنی بر تخمین‌گر اغتشاش
۶۱	..... ۳-۳-۳ نتایج شبیه‌سازی برای کنترلر مبتنی بر تخمین‌گر تطبیقی اغتشاش
۷۱	..... ۴-۳-۳ نتایج شبیه‌سازی برای کنترلر تطبیقی مبتنی بر تخمین‌گر تطبیقی اغتشاش
۷۸	..... ۵-۳-۳ عملکرد کنترلر تطبیقی مبتنی بر تخمین‌گر تطبیقی با وجود نویز در سیستم
۸۱	..... ۴-۳ مقایسه روش کنترل تطبیقی مبتنی بر تخمین‌گر تطبیقی اغتشاش با روش کنترل NARMA-L2
۸۵	..... ۵-۳ شبیه‌سازی کنترلر تطبیقی مبتنی بر تخمین‌گر تطبیقی با اینورتر چهار سوئیچ
۸۸	..... ۶-۳ شبیه‌سازی بدون سنسور کنترلر تطبیقی مبتنی بر تخمین‌گر تطبیقی و بررسی مشکلات بوجود آمده
۹۰	..... ۷-۳ شبیه‌سازی کنترلر تطبیقی مبتنی بر تخمین‌گر تطبیقی با وجود تغییرات اینرسی بار در زمان کارکرد موتور
۹۳	..... ۸-۳ نتیجه‌گیری
۹۴	..... ۹-۳ پیشنهادات
۹۵	..... ۴- مراجع
۹۷	..... ضمیمه شماره یک

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱): نمای کناری موتور بدون جاروبک جریان مستقیم..... ۶
- شکل (۲-۱): جریان و نیروی محرکه تولیدی فازهای مختلف موتور BLDC..... ۷
- شکل (۳-۱): موتور BLDC سه فاز با سیم‌پیچ استاتور ستاره..... ۷
- شکل (۴-۱): موتور BLDC سه فاز با سیم‌پیچ استاتور ستاره..... ۸
- شکل (۱-۲): بلوک دیاگرام سیستم مکانیکی دلخواه..... ۱۲
- شکل (۲-۲): مشاهده گر گشتاور مزاحم..... ۱۳
- شکل (۳-۲): بلوک دیاگرام معادلات (۲۳-۲) و (۲۴-۲)..... ۱۶
- شکل (۴-۲): بلوک دیاگرام تخمین گر اینرسی..... ۱۷
- شکل (۵-۲): سیستم کنترل حلقه بسته با کنترلر تناسبی - مشتقی..... ۲۰
- شکل (۶-۲): سیستم کنترل حلقه بسته با کنترلر دلخواه..... ۲۱
- شکل (۷-۲): بلوک دیاگرام کنترل موتور BLDC به روش هیستریزس..... ۲۳
- شکل (۸-۲): نمایش یک شبکه عصبی پرسپترون سه لایه [۳۷]..... ۲۵
- شکل (۹-۲): روند آموزش شبکه عصبی [۳۷]..... ۲۶
- شکل (۱۰-۲): ساختار شبکه عصبی مورد استفاده برای پیشگویی مقادیر آینده خروجی دستگاه [۳۷]..... ۲۶
- شکل (۱۱-۲): NARMA-L2..... ۲۸
- شکل (۱۲-۲): ساختار شبکه عصبی مورد استفاده در کنترلر NARMA-L2..... ۲۸
- شکل (۱۳-۲): نحوه استفاده از کنترلر NARMA-L2 برای کنترل سرعت موتور BLDC..... ۲۹
- شکل (۱۴-۲): بلوک دیاگرام کنترلر پیشنهادی برای موتور BLDC..... ۳۲
- شکل (۱۵-۲): بلوک دیاگرام تخمین گر اینرسی برای موتور BLDC..... ۳۴
- شکل (۱۶-۲): خروجی تخمین گر اینرسی در شبیه سازی..... ۳۵
- شکل (۱۷-۲): کنترلر مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش برای موتور BLDC..... ۳۵
- شکل (۱۸-۲): بلوک دیاگرام معادل سیستم..... ۳۶
- شکل (۱۹-۲): مکان هندسی سیستم حلقه بسته..... ۳۷
- شکل (۲۰-۲): کنترلر تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش برای موتور BLDC..... ۳۷
- شکل (۲۱-۲): بلوک دیاگرام معادل سیستم نشان داده شده در شکل (۱۸-۲)..... ۳۸
- شکل (۱-۳): نحوه استفاده از روش هیستریزس برای کنترل موتور BLDC..... ۴۰
- شکل (۲-۳): سرعت موتور در زمان شبیه سازی در کنترل موتور به روش هیستریزس..... ۴۱
- شکل (۳-۳): گشتاور الکتریکی موتور در زمان شبیه سازی در کنترل موتور به روش هیستریزس..... ۴۱
- شکل (۴-۳): ریپل سرعت موتور در زمان شبیه سازی در کنترل موتور به روش هیستریزس..... ۴۲
- شکل (۵-۳): ریپل گشتاور الکتریکی موتور در زمان شبیه سازی در کنترل موتور به روش هیستریزس..... ۴۲
- شکل (۶-۳): نحوه استفاده از کنترلر NARMA-L2 برای کنترل سرعت موتور BLDC..... ۴۴
- شکل (۷-۳): سرعت موتور در زمان شبیه سازی در کنترل موتور به روش NARMA-L2..... ۴۵
- شکل (۸-۳): گشتاور الکتریکی در زمان شبیه سازی در کنترل موتور به روش NARMA-L2..... ۴۵
- شکل (۹-۳): ریپل سرعت موتور در زمان شبیه سازی در کنترل موتور به روش NARMA-L2..... ۴۶
- شکل (۱۰-۳): ریپل گشتاور الکتریکی در زمان شبیه سازی در کنترل موتور به روش NARMA-L2..... ۴۶
- شکل (۱۱-۳): سرعت موتور در زمان شبیه سازی در کنترل موتور به روش NARMA-L2 ($J=2*B_n, B=5*B_n$)..... ۴۷

- شکل (۱۲-۳): گشتاور الکتریکی موتور در زمان شبیه‌سازی در کنترل موتور به روش (NARMA-L2 ($J=2*J_n, B=5*B_n$))..... ۴۷
- شکل (۱۳-۳): نحوه استفاده از روش کنترل بر مبنای تخمین اغتشاش برای کنترل موتور BLDC..... ۴۹
- شکل (۱۴-۳): سرعت موتور در زمان شبیه‌سازی در روش کنترل بر مبنای تخمین اغتشاش..... ۵۰
- شکل (۱۵-۳): گشتاور الکتریکی موتور در زمان شبیه‌سازی در روش کنترل بر مبنای تخمین اغتشاش..... ۵۱
- شکل (۱۶-۳): ولتاژ لینک DC در زمان شبیه‌سازی در روش کنترل بر مبنای تخمین اغتشاش..... ۵۱
- شکل (۱۷-۳): ریپل ولتاژ لینک DC در زمان شبیه‌سازی در روش کنترل بر مبنای تخمین اغتشاش..... ۵۲
- شکل (۱۸-۳): جریان فازهای استاتور در زمان شبیه‌سازی در روش کنترل بر مبنای تخمین اغتشاش..... ۵۲
- شکل (۱۹-۳): سرعت موتور در زمان شبیه‌سازی در روش کنترل بر مبنای تخمین اغتشاش ($R=10R_n$)..... ۵۳
- شکل (۲۰-۳): گشتاور الکتریکی موتور در زمان شبیه‌سازی در روش کنترل بر مبنای تخمین اغتشاش ($R=10R_n$)..... ۵۴
- شکل (۲۱-۳): جریان فازهای استاتور در زمان شبیه‌سازی در روش کنترل بر مبنای تخمین اغتشاش ($R=10R_n$)..... ۵۴
- شکل (۲۲-۳): سرعت موتور در زمان شبیه‌سازی در روش کنترل بر مبنای تخمین اغتشاش ($L=10L_n$)..... ۵۵
- شکل (۲۳-۳): گشتاور الکتریکی موتور در زمان شبیه‌سازی در روش کنترل بر مبنای تخمین اغتشاش ($L=10L_n$)..... ۵۵
- شکل (۲۴-۳): جریان فازهای استاتور در زمان شبیه‌سازی در روش کنترل بر مبنای تخمین اغتشاش ($L=10L_n$)..... ۵۶
- شکل (۲۵-۳): سرعت موتور در زمان شبیه‌سازی در روش کنترل بر مبنای تخمین اغتشاش ($B=10B_n$)..... ۵۷
- شکل (۲۶-۳): گشتاور الکتریکی موتور در زمان شبیه‌سازی در روش کنترل بر مبنای تخمین اغتشاش ($B=10B_n$)..... ۵۷
- شکل (۲۷-۳): جریان فازهای استاتور در زمان شبیه‌سازی در روش کنترل بر مبنای تخمین اغتشاش ($B=10B_n$)..... ۵۸
- شکل (۲۸-۳): سرعت موتور در زمان شبیه‌سازی در روش کنترل بر مبنای تخمین اغتشاش ($J=5J_n$)..... ۵۸
- شکل (۲۹-۳): گشتاور الکتریکی موتور در زمان شبیه‌سازی در روش کنترل بر مبنای تخمین اغتشاش ($J=5J_n$)..... ۵۹
- شکل (۳۰-۳): جریان فازهای استاتور در زمان شبیه‌سازی در روش کنترل بر مبنای تخمین اغتشاش ($J=5J_n$)..... ۵۹
- شکل (۳۱-۳): روش کنترل مبتنی بر تخمین اغتشاش برای موتور BLDC..... ۶۰
- شکل (۳۲-۳): سیستم کنترل شبیه‌سازی شده برای روش کنترل مبتنی بر تخمین تطبیقی اغتشاش موتور BLDC در سیمولینک متلب..... ۶۲
- شکل (۳۳-۳): سرعت موتور کنترل شده با کنترل کننده مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش در زمان شبیه‌سازی..... ۶۳
- شکل (۳۴-۳): گشتاور الکتریکی موتور کنترل شده با کنترل کننده مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش در زمان شبیه‌سازی..... ۶۳
- شکل (۳۵-۳): ولتاژ لینک DC در زمان شبیه‌سازی..... ۶۴
- شکل (۳۶-۳): ریپل ولتاژ لینک DC در زمان شبیه‌سازی..... ۶۴
- شکل (۳۷-۳): جریان فازهای موتور استاتور کنترل شده با کنترل کننده مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش در زمان شبیه‌سازی..... ۶۵
- شکل (۳۸-۳): سرعت موتور کنترل شده با کنترل کننده مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش ($R=10R_n, L=10L_n$)..... ۶۶
- شکل (۳۹-۳): گشتاور الکتریکی موتور کنترل شده با کنترل کننده مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش در زمان شبیه‌سازی ($R=10R_n, L=10L_n$)..... ۶۶
- شکل (۴۰-۳): جریان فازهای استاتور کنترل شده با کنترل کننده مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش ($R=10R_n, L=10L_n$)..... ۶۷
- شکل (۴۱-۳): سرعت موتور کنترل شده با کنترل کننده مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش در زمان شبیه‌سازی ($B=10B_n$)..... ۶۸
- شکل (۴۲-۳): گشتاور الکتریکی موتور کنترل شده با کنترل کننده مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش در زمان شبیه‌سازی ($B=10B_n$)..... ۶۸
- شکل (۴۳-۳): جریان فازهای استاتور در روش کنترل مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش در زمان شبیه‌سازی ($B=10B_n$)..... ۶۹
- شکل (۴۴-۳): سرعت موتور کنترل شده با کنترل کننده مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش در زمان شبیه‌سازی ($J=5J_n$)..... ۶۹
- شکل (۴۵-۳): گشتاور الکتریکی موتور کنترل شده با کنترل کننده مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش در زمان شبیه‌سازی ($J=5J_n$)..... ۷۰
- شکل (۴۶-۳): خروجی تخمین گر اینرسی در شبیه‌سازی..... ۷۰
- شکل (۴۷-۳): جریان فازهای استاتور در روش کنترل مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش در زمان شبیه‌سازی ($J=5J_n$)..... ۷۱
- شکل (۴۸-۳): سرعت موتور کنترل شده با کنترل کننده تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش در زمان شبیه‌سازی..... ۷۳
- شکل (۴۹-۳): گشتاور الکتریکی موتور کنترل شده با کنترل کننده تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش در زمان شبیه‌سازی..... ۷۳

- شکل (۵۰-۳): سرعت موتور کنترل شده با کنترل کننده تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش در زمان شبیه سازی ($J=5J_n$)..... ۷۴
- شکل (۵۱-۳): گشتاور الکتریکی موتور کنترل شده با کنترل کننده تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش در زمان شبیه سازی ($J=5J_n$)..... ۷۴
- شکل (۵۲-۳): جریان فازهای استاتور در کنترل کننده تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی در زمان شبیه سازی ($J=5J_n$)..... ۷۵
- شکل (۵۳-۳): سرعت موتور کنترل شده با کنترل کننده تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش در زمان شبیه سازی ($J=15J_n$)..... ۷۵
- شکل (۵۴-۳): گشتاور الکتریکی موتور کنترل شده با کنترل کننده تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش در زمان شبیه سازی ($J=15J_n$)..... ۷۶
- شکل (۵۵-۳): خروجی تخمین گر اینرسی ($J=15J_n$)..... ۷۶
- شکل (۵۶-۳): سرعت موتور کنترل شده با کنترل کننده تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش در زمان شبیه سازی ($J=15J_n, B=100B_n$)..... ۷۷
- شکل (۵۷-۳): گشتاور الکتریکی موتور کنترل شده با کنترل کننده تطبیقی اغتشاش در زمان شبیه سازی ($J=15J_n, B=100B_n$)..... ۷۷
- شکل (۵۸-۳): نویز تزریق شده به سرعت اندازه گیری شده موتور در روش کنترل کننده تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش..... ۷۸
- شکل (۵۹-۳): نویز تزریق شده به جریان اندازه گیری شده موتور در روش کنترل کننده تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش..... ۷۹
- شکل (۶۰-۳): سرعت موتور در روش کنترل کننده تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش با وجود نویز در جریان و سرعت..... ۷۹
- شکل (۶۱-۳): خروجی تخمین گر اینرسی با وجود نویز در جریان و سرعت..... ۸۰
- شکل (۶۲-۳): سرعت موتور در روش کنترل کننده تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش..... ۸۲
- شکل (۶۳-۳): سرعت موتور در روش کنترل NARMA-L2..... ۸۲
- شکل (۶۴-۳): ریبیل گشتاور در روش کنترل تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش..... ۸۳
- شکل (۶۵-۳): ریبیل گشتاور در روش کنترل NARMA-L2..... ۸۳
- شکل (۶۶-۳): سرعت موتور در روش کنترل تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی اغتشاش..... ۸۴
- شکل (۶۷-۳): سرعت موتور در روش کنترل NARMA-L2 ($J=3*J_n$)..... ۸۴
- شکل (۶۸-۳): موتور کنترل شده با اینورتر چهار سوئیچه..... ۸۵
- شکل (۶۹-۳): سرعت موتور در روش کنترل با کنترل تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی با استفاده از اینورتر چهار سوئیچه..... ۸۶
- شکل (۷۰-۳): گشتاور الکتریکی موتور در روش کنترل با کنترل تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی با استفاده از اینورتر چهار سوئیچه..... ۸۶
- شکل (۷۱-۳): ریبیل سرعت موتور در روش کنترل با کنترل تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی با استفاده از اینورتر چهار سوئیچه..... ۸۷
- شکل (۷۲-۳): ریبیل سرعت موتور در روش کنترل با کنترل تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی با استفاده از اینورتر چهار سوئیچه..... ۸۷
- شکل (۷۳-۳): سرعت واقعی موتور در روش کنترل با کنترل تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی بدون استفاده از سنسور سرعت..... ۸۹
- شکل (۷۴-۳): سرعت تخمین زده شده موتور در روش کنترل با کنترل تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی بدون استفاده از سنسور سرعت..... ۸۹
- شکل (۷۵-۳): سرعت موتور در روش کنترل با کنترل تطبیقی مبتنی بر تخمین گر تطبیقی با وجود تغییر در اینرسی بار در زمان کارکرد موتور..... ۹۰
- شکل (۷۶-۳): گشتاور الکتریکی موتور در روش کنترل مبتنی بر تخمین گر تطبیقی با وجود تغییر در اینرسی بار در زمان کارکرد موتور..... ۹۱
- شکل (۷۷-۳): جریان فازهای موتور در روش کنترل بر تخمین گر تطبیقی با وجود تغییر در اینرسی بار در زمان کارکرد موتور..... ۹۱
- شکل (۷۸-۳): تغییرات اینرسی بار و اینرسی تخمین زده شده در زمان شبیه سازی..... ۹۲

فهرست جدولها

- جدول (۱-۱): ترتیب سوئیچ زنی برای موتور BLDC..... ۸
- جدول (۱-۲): مقادیر لازم برای طراحی کنترلر بر مبنای تخمین گر..... ۲۱
- جدول (۲-۲): جدول سوئیچ زنی مورد استفاده در روش هیستریزس..... ۲۳
- جدول (۱-۳): مشخصات موتور مورد استفاده در شبیه سازی..... ۳۹
- جدول (۲-۳): مشخصات کنترلر..... ۵۰
- جدول (۳-۳): مشخصات کنترلر..... ۶۲

فصل اول

بررسی منابع

مقدمه

موتورهای جریان مستقیم معمول دارای ویژگی‌های خوبی مانند بازده بالا و کنترل پذیری ساده هستند. مهمترین عیب موتورهای جریان مستقیم نیاز آنها به تعمیر و نگهداری دوره‌ای است. در این موتورها، به دلیل این که از تجهیزات مکانیکی برای عمل کموتاسیون استفاده می‌شود و این تجهیزات پس از مدتی دچار فرسایش شده و نیاز به تعمیر دارند، باید به طور دوره‌ای مورد بازرسی و تعمیر قرار گیرند. همچنین وجود تجهیزات مکانیکی در این گونه موتورها باعث می‌شود موتور در رسیدن به سرعت‌های بالا دارای محدودیت باشد. از معایب دیگر موتورهای جریان مستقیم معمولی وجود جرقه، نویز بالا و آلودگی ناشی از تکه‌های کربن جاروبک‌ها بر روی موتور است.

موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک (BLDC) در بسیاری از کاربردها می‌توانند جایگزین موتورهای جریان مستقیم معمولی شوند. با وجود این که نام این گونه از موتورها، موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک است، در واقع گونه‌ای از موتورهای سنکرون مغناطیس دائم هستند. این موتورها با ولتاژ DC راه‌اندازی می‌شوند و کموتاسیون جریان با استفاده از ادوات الکترونیکی انجام می‌شود. در این موتورها، لحظات کموتاسیون با توجه به مکان روتور بوسیله‌ی سنسورها تشخیص داده می‌شود.

موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک دارای مزیت‌های زیادی نسبت به موتورهای جریان مستقیم معمولی هستند که در زیر به چند مورد اشاره شده است [۱]:

- عمر طولانی‌تر
- پاسخ دینامیکی بالاتر
- بازدهی بالاتر
- مشخصه سرعت و گشتاور بهتر
- تولید نویز کمتر
- رنج سرعت بالاتر
- نسبت گشتاور به وزن بیشتر

موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک در محدوده توان‌های مختلف در دسترس هستند. از موتورهای BLDC در اندازه کوچک در هارد دیسک‌ها، تا اندازه بزرگ در ماشین آلات صنعتی به کار گرفته می‌شوند. در

بسیاری از کاربردهای موتورهای BLDC از نوع سه فاز آن استفاده می‌شود، به همین دلیل در این پایان‌نامه فقط به موتورهای BLDC سه فاز پرداخته می‌شود.

در این پایان‌نامه، یک کنترلر دقیق و سریع برای موتور BLDC پیشنهاد شده است. این کنترلر که در نرم افزار سیمولینک متلب بررسی شده، نسبت به تغییرات پارامترهای موتور و بار به خصوص اینرسی سیستم کاملاً مقاوم است.

۱ - بررسی منابع

۱-۱ بررسی پژوهش‌های پیشین در رابطه با موتورهای BLDC

موتورهای آهنربای دائم بدون جاروبک در تجهیزات کامپیوتری، رباتها و وسایل الکتریکی استفاده می‌شوند. ویژگی‌های خوب این نوع موتورها، باعث استفاده روز افزون آنها در صنایع مختلف در کاربردهایی مانند کنترل سرعت و راه اندازها شده است [۴-۲]. به عنوان مثال، در سال ۱۹۹۴ موریموتو و همکارانش، به بهبود عملکرد راه‌اندازها با استفاده از بهینه کردن مقدار تلفات الکتریکی که شامل تلفات آهنی و مسی می‌شد، پرداختند [۵].

بوس در سال ۲۰۰۲ انواع مختلف موتورهای سنکرون را با موتورهای القائی مقایسه کرد و معادلات مربوط به موتور PM از نوع قطب برجسته را بدست آورد [۶]. در سال ۲۰۰۴، جیان و همکارانش با استفاده از روش کنترل مدولار توانستند سرعت این‌گونه موتورها را کنترل کنند [۷]. روش‌های زیادی برای کنترل موتورهای آهنربای دائم ارائه شده که همگی دارای روابط ریاضی پیچیده هستند [۸-۱۰]. استفاده از الگوریتم‌های هوشمند برای کنترل این نوع موتورها در سالهای اخیر متداول شده است [۱۱ و ۱۲]. در مرجع [۱۳]، از کنترلر تناسبی-انتگرالی (PI) برای کنترل موتور بدون جاروبک استفاده شده است. کنترلرهای PI به دلیل سادگی، همواره جزء اولین کنترلرهایی هستند که برای سیستم‌های جدید استفاده شده‌اند؛ اما با استفاده از کنترلرهای PI در کنترل موتورهای BLDC، به علت اینکه این‌گونه موتورها در عمل غیرخطی هستند، نمی‌توان به اهداف کنترلی از پیش تعیین شده رسید. در مراجع [۱۴-۱۹]، از روش خطی‌سازی فیدبک برای کنترل موتور BLDC استفاده شده است. این روش برای کنترل سیستم‌های غیرخطی بسیار مناسب است. با استفاده از این روش تأثیر قسمت‌های غیرخطی موتور در کنترل از بین می‌رود. برای استفاده از این روش باید پارامترهای موتور و بار به صورت دقیق مشخص شود. به علاوه هرگونه تغییر در پارامترها ممکن است باعث شود کنترلر به خوبی کار نکند.

در مرجع [۲۰]، از کنترلر منطق فازی (FLC) برای کنترل موتور BLDC استفاده شده است. این روش برای حل رفتار غیرخطی موتور BLDC بسیار مناسب است. ولی کاربرد آن برای کنترل سیستم‌های با پارامترهای ثابت محدود می‌شود لذا در مواردی که پارامترهای موتور و بار در شرایط مختلف تغییر می‌کند، کنترلر فوق انتخاب درستی نیست.

کنترل مستقیم گشتاور (DTC) یکی از پیشرفته ترین تکنولوژی‌ها در کنترل موتورهای BLDC است. این روش که توسط شرکت ABB ارائه شد، در حقیقت جانشین مناسبی برای روش مدولاسیون پهنای پالس است. در این روش، کنترل گشتاور و سرعت مستقیماً بر پایه موقعیت الکترومغناطیسی موتور انجام می شود. DTC مزایای بسیار زیادی دارد اما از مهم ترین آنها که باعث روی آوردن صنایع به این روش شده است می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱ - سرعت بسیار بالا در پاسخ به گشتاور

۲ - کنترل دقیق گشتاور حتی در سرعت های پایین

۳ - محاسبات ساده تر در مقایسه با کنترل برداری مرسوم

پاسخ گذرای سریع یکی از خصوصیات برجسته روش کنترل مستقیم گشتاور موتور سنکرون آهنربای دائم است. عیب عمده این روش وجود ریپل های بزرگ در گشتاور و شار پیوندی تولیدی است. استفاده از کنترلرهای هیستریزیس و موقعیت نامناسب بردار فضائی ولتاژ، موجب تولید این ریپل ها است. کنترل مستقیم گشتاور موتور سنکرون آهنربای دائم در مراجع [۲۴-۲۱] آمده است.

استفاده از مدولاسیون پهنای پالس یکی از متداول ترین روش ها در کنترل موتورها در صنایع است. برای چرخیدن یک موتور جریان مستقیم بدون جاروبک، سیم پیچ های استاتور باید به ترتیب با توجه به موقعیت روتور روشن شوند. برای این کار می توان از یک اینورتر که توسط مدولاسیون پهنای پالس کنترل می شود، استفاده نمود.

۲-۱ موتورهای BLDC

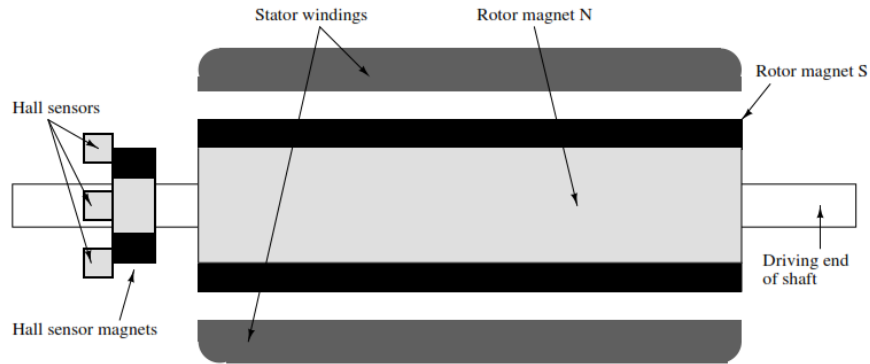
۱-۲-۱ ساختار

موتور BLDC یک موتور سنکرون مغناطیس دائم است که در آن از سنسور موقعیت و یک اینورتر برای کنترل جریان آرمیچر استفاده شده است. موتور BLDC در واقع نوعی از موتورهای جریان مستقیم است که در آن آرمیچر در استاتور قرار گرفته است و آهنرباها بر روی روتور قرار دارند. به همین دلیل مشخصه‌های عملکردی موتورهای BLDC و DC معمولی تقریباً شبیه به هم هستند [۲۵]. در موتورهای BLDC به جای استفاده از کموتاتورهای مکانیکی که در موتورهای DC معمولی استفاده می‌شود، از کموتاسیون الکترونیکی استفاده شده است که به نگهداری کمتر نیاز دارد.

موتورهای بدون جاروبک به دو دسته‌ی با میدان دوزنقه‌ای، و سینوسی تقسیم می‌شود. در نوع دوزنقه‌ای شکل موج EMF القا شده در سیم‌پیچ‌های استاتور شکل دوزنقه‌ای دارد و برای استفاده از این نوع موتور باید موتور را با جریان مربعی تغذیه کرد. در نوع سینوسی نیروی محرکه تولیدی القا شده در سیم‌پیچ‌های استاتور همانند موتورهای AC، از نوع سینوسی است و برای استفاده از آن موتور باید با جریان سینوسی تغذیه شود. شکل EMF القا شده در سیم‌پیچ‌های استاتور با توجه به شکل آهنرباها و نحوه‌ی سیم‌پیچی استاتور تعیین می‌شود.

برای عملکرد بهینه موتور در نوع سینوسی، موقعیت روتور باید با دقت بالا به وسیله‌ی سنسور موقعیت در هر لحظه مشخص شود. همچنین این نوع موتور برای عملکرد بهتر نیازمند سخت‌افزار و نرم‌افزار پیچیده‌تری است. موتور BLDC نوع دوزنقه‌ای به دلیل سادگی، ارزانی و بازده بالاتر برای بسیاری از کاربردها مورد پسندتر است [۲۵]. در بخش‌های بعدی این پایان‌نامه فقط در مورد موتور BLDC از نوع دوزنقه‌ای بحث خواهد شد.

موتور BLDC در شکل‌بندی‌های مختلف وجود دارد، اما استفاده از موتور BLDC سه فاز به دلیل بازده بالا و ریپل گشتاور پایین، بیشتر مرسوم است. در ضمن در نوع سه فاز، مصالحه‌ی خوبی بین دقت کنترلر و تعداد قطعات الکترونیکی مورد نیاز برای کنترل جریان استاتور برقرار است [۲۶]. در شکل (۱-۱) نمایی از موتور BLDC نشان داده شده است. در این نوع موتور برای مشخص کردن مکان روتور معمولاً از سه عدد سنسور اثر هال استفاده می‌شود.



شکل (۱-۱): نمای کناری موتور بدون جاروبک جریان مستقیم

۲-۲-۱ عملکرد

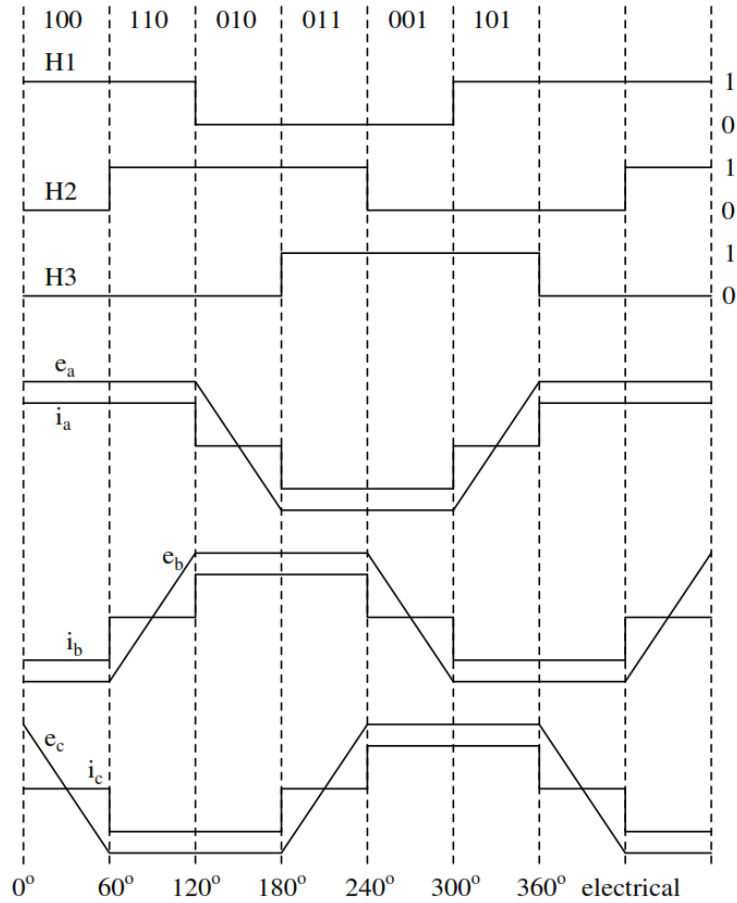
عملکرد موتور جریان مستقیم بدون جاروبک سه فاز به گونه‌ای است که در هر لحظه فقط دو فاز آن روشن است. در واقع برای تولید گشتاور بیشتر، دو فازی که می‌توانند گشتاور بیشتری را تولید کنند، روشن می‌شوند و فاز سوم خاموش است. انتخاب این دو فاز بستگی به موقعیت روتور دارد.

در موتور BLDC، برای دانستن موقعیت روتور از سنسورهای اثر هال استفاده می‌شود. این سنسورها سیگنال‌هایی تولید می‌کنند که به ازای هر ۶۰ درجه الکتریکی، یک حالت خاص را به وجود می‌آورند و پس از ۶۰ درجه عوض می‌شوند. در شکل (۲-۱) جریان ایده‌آل و نیروی محرکه تولیدی موتور در هر فاز، نشان داده شده است.

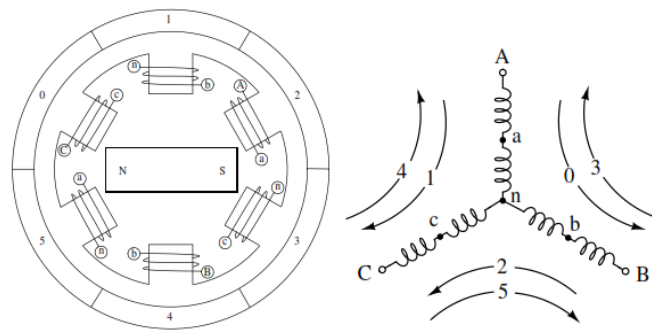
در شکل (۳-۱) یک موتور سه فاز BLDC که استاتور آن به صورت ستاره بسته شده، نشان داده شده است. در این شکل ترتیب روشن شدن فازها مشخص است. هر کدام از مراحل، وقتی محور مغناطیسی روتور و استاتور ۱۲۰ درجه اختلاف فاز دارند، شروع می‌شود و وقتی اختلاف آن‌ها به ۶۰ درجه رسید پایان می‌یابد. گشتاور در لحظه‌ای به مقدار ماکسیمم می‌رسد که محور مغناطیسی روتور و میدان استاتور به صورت عمود بر هم قرار گیرند.

کموتاسیون جریان به وسیله‌ی یک اینورتر شش سوئیچ که به صورت ساده در شکل (۴-۱) نشان داده شده است، انجام می‌شود. سوئیچ‌های نشان داده شده در شکل (۴-۱) از ترانزیستور ساخته شده‌اند. امروزه استفاده از

سوئیچ‌های ماسفتی به دلیل تلفات سوئیچ‌زنی کمتر، معمول‌تر است. جدول (۱-۱) ترتیب سوئیچ‌زنی، جهت جریان و سیگنال سنسور موقعیت را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱): جریان و نیروی محرکه تولیدی فازهای مختلف موتور BLDC



شکل (۳-۱): موتور BLDC سه فاز با سیم‌پیچ استاتور ستاره