

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

دانشکده فنی
گروه مهندسی برق
گرایش قدرت

بهینه‌سازی ساختار موتور BLDC برای کاهش صدا و لرزش

از:

مجتبی پورجعفری

اساتید راهنما:

دکتر اسماعیل فلاح

دکتر مهرداد جعفربلند

مهر ماه ۱۳۹۲

برای آنها...

که وجودم با نعمت بودن ایشان آغاز شد، پیش از آنکه موجودی قابل ذکر باشم.

برای آنها...

که با بودنشان رویش را تجربه کردم و کامیابی امروز مدیون وجود آنهاست.

برای آنها...

که امتداد آسمانی نورانی بر سرنوشت خاکیم بودند.

پدر مهربان، مادر فداکار

و

همسر عزیزم

تشکر و قدردانی:

بر خود لازم می‌دانم در ابتدا از زحمات استاد ارجمند، جناب آقای دکتر اسماعیل فلاح که در طول تحصیل و در انجام این پروژه مرایاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی را بنمایم. همچنین از جناب آقای دکتر مهرداد جعفر بلنده خاطر تمام راه‌نمایی‌هایی که در طی انجام این پایان‌نامه کردند، کمال قدردانی را دارم.

چکیده :

بهینه‌سازی ساختار موتور BLDC برای کاهش صدا و لرزش

مجتبی پورجعفری

امروزه استفاده از موتور DC بدون جاروبک به طور فزاینده‌ای در کاربردهای صنعتی و خانگی در حال افزایش است. علی‌رغم مزایای فراوان این موتور، ضربان گشتاور یکی از مهم‌ترین معایب آن است. هدف این پروژه، طراحی و بهینه‌سازی ساختار موتور DC بدون جاروبک برای کاهش ضربان آن است. در آغاز، یک طراحی اولیه بهینه‌شده از موتور DC بدون جاروبک به کمک الگوریتم بهینه‌سازی PSO به دست می‌آید. سپس سایر کمیت‌های موثر بر ضربان گشتاور هم به لحاظ تئوری و هم توسط آنالیز اجزا محدود بررسی می‌شوند. نشان داده می‌شود که ساختار شیار کسری برتری‌های قابل توجهی بر ساختار معمولی دارد. هم گشتاور دندان‌های و هم ضربان گشتاور در ساختار شیار کسری کاهش می‌یابد. در قدم‌های بعدی، سایر پارامترهای موثر بر ضربان گشتاور مانند میزان قوس آهنربا، offset آهنربا و میزان مورب‌سازی شیارها بررسی می‌شوند و مقادیر بهینه پارامترهای ذکر شده توسط آنالیز اجزا محدود به دست می‌آید.

کلید واژه : موتور DC بدون جاروبک، ضربان گشتاور، اجزا محدود، الگوریتم PSO.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
تقدیم	پ
تشکر و قدر دانی	پ
فهرست مطالب	ت
فهرست جدول‌ها.....	ج
فهرست شکل‌ها.....	ح
چکیده فارسی.....	ر
چکیده اینگلیسی.....	ز
فصل اول - مقدمه	۱
۱-۱ معرفی موتور DC بدون جاروبک (BLDC)	۲
۲-۱ مروری بر تحقیقات انجام شده	۳
۳-۱ اهداف و محتوای پایان نامه	۴
۴-۱ ساختار پایان نامه	۵
فصل دوم - اصول اساسی موتورهای DC بدون جاروبک	۶
۱-۲ مقدمه	۷
۲-۲ ساختار موتور DC بدون جاروبک (BLDC).....	۷
۳-۲ مزایا، معایب و کاربرد های موتور DC بدون جاروبک.....	۸
۴-۲ ساختمان موتور	۹
۱-۲ مقدمه	۷
۲-۲ ساختار موتور DC بدون جاروبک (BLDC).....	۷
۳-۲ مزایا، معایب و کاربرد های موتور DC بدون جاروبک.....	۸
۴-۲ ساختمان موتور	۹
۱-۴-۲ ساختمان استاتور	۹
۱-۴-۲-۱ موتور DC بدون جاروبک با تغذیه ولتاژ سینوسی (BLAC).....	۱۰
۲-۴-۲-۱ موتور DC بدون جاروبک با تغذیه ولتاژ دوزنقه‌ای	۱۱
۲-۴-۲ ساختمان روتور	۱۲
۱-۲-۴-۲ ماشین سنکرون PM شار شعاعی	۱۲
۱-۱-۲-۴-۲ ماشین PM آهنربا سطحی (SMPM)	۱۳

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
ماشین SMPM با رتور داخلی ۱-۱-۲-۴-۲	۱۳
ماشین SMPM با رتور خارجی ۲-۱-۲-۴-۲	۱۴
ماشین PM داخلی (IPM) ۲-۱-۲-۴-۲	۱۴
آهنرباهای دائمی V شکل ۱-۲-۱-۲-۴-۲	۱۴
آهنرباهای دائمی بصورت مماسی مغناطیس شده‌اند ۲-۲-۱-۲-۴-۲	۱۵
ماشین سنکرون PM شار محوری (AFPM) ۲-۲-۴-۲	۱۶
مواد مغناطیس دائم ۵-۲	۱۷
چگالی شار پسماند (B_r) و نیروی ضد مغناطیسی (H_c) ۱-۵-۲	۱۸
حسگرهای موقعیت ۶-۲	۱۸
تئوری عملکرد موتورهای DC بدون جاروبک ۷-۲	۱۹
تحلیل معادلات موتور DC بدون جاروبک ۸-۲	۱۹
تعیین رابطه بین شار آهنربا و شار فاصله هوایی ۱-۸-۲	۲۰
تعیین ولتاژ القایی و گشتاور از شار خروجی آهنربا ۲-۸-۲	۲۴
معادلات حاکم بر موتور DC بدون جاروبک ۳-۸-۲	۳۰

فصل سوم - ارائه روشی برای طراحی و بهینه‌سازی موتور DC بدون جاروبک با ضربان گشتاور

و گشتاور دندانه‌ای میثیم معادل ۳۳	۳۳
۱-۳ مقدمه	۳۴
۲-۳ بدست آوردن یک طراحی بهینه اولیه برای موتور DC بدون جاروبک به کمک الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO)	۳۴
۳-۳ موتور شیار کسری	۴۰
۴-۳ بررسی نقش مورب سازی شیارها	۴۱
۵-۳ بررسی نقش قوس آهنربا (embrace)	۴۲
۶-۳ بررسی نقش آفست	۴۳
۷-۳ نقش فاکتور سیم پیچی	۴۴
۸-۳ توضیح مختصری بر الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO)	۴۵
۱-۸-۳ بررسی نقش w	۴۸
۲-۸-۳ تنظیم ضرایب C_1 ، w و C_2	۴۸

فصل چهارم - پیاده‌سازی روش طراحی ارائه شده برای یک موتور نمونه ۵۰

۱-۴ به دست آوردن یک طراحی بهینه اولیه توسط الگوریتم بهینه‌سازی PSO	۵۱
۲-۴ موتور شیار کسری	۵۹

۶۵.....	۳-۴ نقش مورب سازی شیارها
۶۸.....	۴-۴ نقش قوس آهنربا (embrace)
۷۱.....	۵-۴ نقش آفست
۷۳.....	۶-۴ نقش فاکتور سیم پیچی

فصل پنجم - نتیجه گیری و پیشنهادات ۸۱

۸۲.....	۱-۵ نتیجه گیری
۸۲.....	۲-۵ پیشنهادات

مراجع ۸۴

فهرست جدولها

عنوان	صفحه
-------	------

فصل دوم : اصول اساسی موتورهای DC بدون جاروبک

۱۹.....	جدول (۱-۲). ثوابت و پارامترهای موتور DC بدون جاروبک
---------	---

فصل سوم : ارائه روشی برای طراحی و بهینه سازی موتور DC بدون جاروبک با ضربان گشتاور و گشتاور دندانه ای مینیمم

۳۵.....	جدول (۱-۳). مقادیر ثوابت و پارامترهای مختلف در طراحی موتور DC بدون جاروبک
---------	---

فصل چهارم : پیاده سازی روش طراحی ارائه شده برای یک موتور نمونه

۵۱.....	جدول (۱-۴). مقادیر ثوابت و پارامترهای مختلف موتور DC بدون جاروبک جهت انجام بهینه سازی
۵۴.....	جدول (۲-۴). مقادیر بهینه شده پارامترهای آزاد توسط الگوریتم PSO
۵۴.....	جدول (۳-۴). مقادیر باقی پارامترهای مورد نیاز برای شبیه سازی موتور در نرم افزار Maxwell
۶۰.....	جدول (۴-۴). پارامترهای مهم طراحی در حالت ۱۵ شیار و ۴ قطب با embrace برابر ۱ و skew و offset برابر صفر
۶۶.....	جدول (۵-۴). ضربان گشتاور و گشتاور دندانه ای بازای skew های مختلف در حالت ۱۵ شیار و ۴ قطب با embrace برابر ۱ و offset برابر ۰
۶۹.....	جدول (۶-۴). موتور ۱۵ شیار، ۴ قطب، با skew برابر ۰.۵ و offset برابر ۰ و embrace های مختلف

جدول (۴-۷). موتور ۱۵ شیار و ۴ قطب با $embrace$ برابر ۰.۹، $skew$ برابر ۰.۵ بازای $offset$ های مختلف ۷۲

جدول (۴-۸). موتور ۱۵ شیار ۴ قطب با $skew=0.5$ ، $embrace=0.9$ و $offset$ های مختلف با گام سیم پیچی ۷۴

جدول (۴-۹). خلاصه نتایج در مرجع [۹] ۷۴

جدول (۴-۱۰). چگالی شار در نواحی مختلف موتور ۷۸

جدول (۴-۱۱). پارامتر های نهایی موتور طراحی شده بهینه ۷۹

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
-------	------

فصل دوم : اصول اساسی موتورهای DC بدون جاروبک

شکل (۲-۱). یک نمونه از ساختار موتور DC بدون جاروبک ۸

شکل (۲-۲). نیروی ضد محرکه الکتریکی سینوسی ۱۰

شکل (۲-۳). نیروی ضد محرکه الکتریکی دوزنقه‌ای ۱۱

شکل (۲-۴). دو نمای مختلف موتور RFPM ۱۲

شکل (۲-۵). سطح مقطع یک موتور SMPM با رتور داخلی (یک جفت قطب) ۱۳

شکل (۲-۶). حالت های مختلف رتور موتور SMPM رتور داخلی ۱۳

شکل (۲-۷). سطح مقطع یک موتور SMPM با رتور خارجی (یک جفت قطب) ۱۴

شکل (۲-۸). سطح مقطع یک موتور IPM با آهنربای V شکل (یک جفت قطب) ۱۵

شکل (۲-۹). سطح مقطع موتور IPM با آهنربای دائمی مماسی (یک جفت قطب) ۱۶

شکل (۲-۱۰). ماشین AFPM با جهت شار و جریان ۱۶

شکل (۲-۱۱). ماشین Torus ۱۷

شکل (۲-۱۲). سطح مقطع موتور DC بدون جاروبک به همراه نمایش مسیر بسته شدن شار ۲۱

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل (۲-۱۳). مدار معادل مغناطیسی ربع سمت راست شکل (۲-۱۲).....	۲۲
شکل (۲-۱۴). مراحل مختلف ساده سازی مدار معادل مغناطیسی یک جفت قطب موتور DC بدون جاروبک.....	۲۳
شکل (۲-۱۵). سطح مقطع موتور DC بدون جاروبک با یک سیم پیچ گام کامل در استاتور.....	۲۵
شکل (۲-۱۶). رتور در ۹۰ درجه الکتریکی قرار دارد.....	۲۶
شکل (۲-۱۷). رتور در ۱۸۰ درجه الکتریکی قرار دارد.....	۲۷
شکل (۲-۱۸). (a). شکل موج شاور پیوندی ناشی از یک سیم پیچ. (b). شکل موج ولتاژ القایی استاتور ناشی از یک سیم پیچ.....	۲۷
شکل (۲-۱۹). شار پیوندی و ولتاژ القایی یک سیم پیچ استاتور با گام کسری با $\alpha_c = 2/3$	۲۹
شکل (۲-۲۰). سطح مقطع یک موتور بدون جاروبک رتور داخلی.....	۳۰

فصل سوم : ارائه روشی برای طراحی و بهینه‌سازی موتور DC بدون جاروبک با ضربان گشتاور و گشتاور دندانه‌ای مینیمم

شکل (۳-۱). پارامترهای مختلف شیار استاتور.....	۳۵
شکل (۳-۲). فلوجارت الگوریتم بهینه سازی PSO برای بهینه کردن پارامترهای آزاد.....	۴۰
شکل (۳-۳). نمایش embrace.....	۴۲
شکل (۳-۴). نمایش offset.....	۴۳
شکل (۳-۵). سطح مقطع رتور به ازای offset های مختلف. (۱). آفست صفر، (۲). آفست ۳، (۳). آفست ۵، (۴). آفست ۷.۳ میلی‌متر.....	۴۴
شکل (۳-۶). چگونگی قرار گرفتن ذره i ام در موقعیت جدید در الگوریتم بهینه‌سازی PSO.....	۴۶
شکل (۳-۷). فلوجارت الگوریتم بهینه سازی PSO.....	۴۸

فصل چهارم : پیاده‌سازی روش طراحی ارائه شده برای یک موتور نمونه

- شکل (۱-۴). منحنی B-H هسته استاتور و رتور ۵۲
- شکل (۲-۴). مینیمم سازی ثابت موتور توسط الگوریتم PSO ۵۳
- شکل (۳-۴). طرح سیم پیچی موتور ، ب. سطح مقطع موتور ۵۵
- شکل (۴-۴). مش بندی سطح مقطع موتور برای تحلیل اجزا محدود ۵۶
- شکل (۵-۴). خطوط شار در نواحی مختلف سطح مقطع موتور..... ۵۷
- شکل (۶-۴). چگالی شار در نواحی مختلف سطح مقطع موتور ۵۷
- شکل (۷-۴). شکل موج گشتاور موتور ۱۲ شیار، ۴ قطب با skew و offset برابر صفر و embrace برابر ۱ ۵۸
- شکل (۸-۴). شکل موج جریان موتور ۱۲ شیار، ۴ قطب با skew و offset برابر صفر و embrace برابر ۱ ۵۸
- شکل (۹-۴). شکل موج ولتاژ یک فاز موتور ۱۲ شیار، ۴ قطب با skew و offset برابر صفر و embrace برابر ۱ ۵۹
- شکل (۱۰-۴). شکل موج چگالی شار فاصله هوایی موتور ۱۲ شیار، ۴ قطب با skew و offset برابر صفر و embrace برابر ۱ ۵۹
- شکل (۱۱-۴). الف. طرح سیم پیچی، ب. سطح مقطع موتور در حالت ۱۵ شیار و ۴ قطب ۶۱
- شکل (۱۲-۴). خطوط شار در نواحی مختلف موتور در حالت ۱۵ شیار و ۴ قطب ۶۱
- شکل (۱۳-۴). چگالی شار در نواحی مختلف موتور در حالت ۱۵ شیار و ۴ قطب ۶۲
- شکل (۱۴-۴). شکل موج گشتاور موتور طراحی شده در حالت ۱۵ شیار و ۴ قطب ۶۲
- شکل (۱۵-۴). شکل موج گشتاور دندانه‌ای برای موتور ۱۲ شیار ۴ قطب (طراحی اولیه) ۶۳
- شکل (۱۶-۴). شکل موج گشتاور دندانه‌ای برای موتور شیار کسری ۱۵ شیار ۴ قطب ۶۳
- شکل (۱۷-۴). شکل موج جریان موتور ۱۵ شیار، ۴ قطب با skew و offset برابر صفر و embrace برابر ۱ ۶۴
- شکل (۱۸-۴). شکل موج ولتاژ موتور ۱۵ شیار، ۴ قطب با skew و offset برابر صفر و embrace برابر ۱ ۶۴

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل (۴-۱۹). شکل موج چگالی شار فاصله هوایی موتور ۱۵ شیار، ۴ قطب با skew و offset برابر صفر و embrace برابر ۱	۶۵
شکل (۴-۲۰). شکل موج گشتاور در موتور ۱۵ شیار و ۴ قطب به ازای skew برابر ۰.۵	۶۷
شکل (۴-۲۱). شکل جریان در موتور ۱۵ شیار و ۴ قطب به ازای skew برابر ۰.۵	۶۷
شکل (۴-۲۲). شکل موج ولتاژ القایی استاتور در موتور ۱۵ شیار و ۴ قطب به ازای skew برابر ۰.۵	۶۸
شکل (۴-۲۳). شکل موج گشتاور موتور ۱۵ شیار و ۴ قطب با skew برابر ۰.۵، offset برابر ۰ و embrace برابر ۰.۹	۷۰
شکل (۴-۲۴). شکل موج جریان موتور ۱۵ شیار و ۴ قطب با skew برابر ۰.۵، offset برابر ۰ و embrace برابر ۰.۹	۷۰
شکل (۴-۲۵). شکل موج ولتاژ القایی برای موتور ۱۵ شیار و ۴ قطب با skew برابر ۰.۵، offset برابر ۰ و embrace برابر ۰.۹	۷۱
شکل (۴-۲۶). شکل موج چگالی شار فاصله هوایی برای موتور ۱۵ شیار و ۴ قطب با skew برابر ۰.۵، offset برابر ۰ و embrace برابر ۰.۹	۷۱
شکل (۴-۲۷). شکل موج گشتاور موتور ۱۵ شیار و ۴ قطب با embrace برابر ۰.۹، skew برابر نیم و offset برابر ۰.۳	۷۲
شکل (۴-۲۸). طرح سیم پیچی موتور ۱۵ شیار و ۴ قطب با گام سیم پیچی ۴	۷۳
شکل (۴-۲۹). خطوط شار در سطح مقطع موتور ۱۵ شیار و ۴ قطب با گام سیم پیچی ۴ و offset برابر ۰.۳	۷۵
شکل (۴-۳۰). چگالی شار در سطح مقطع موتور ۱۵ شیار و ۴ قطب با گام سیم پیچی ۴ و offset برابر ۰.۳	۷۵
شکل (۴-۳۱). شکل موج گشتاور موتور ۱۵ شیار و ۴ قطب با offset برابر ۰.۳ و گام سیم پیچی برابر ۴	۷۶
شکل (۴-۳۲). شکل موج جریان موتور ۱۵ شیار و ۴ قطب با offset برابر ۰.۳ و گام سیم پیچی برابر ۴	۷۶
شکل (۴-۳۳). شکل موج ولتاژ موتور ۱۵ شیار و ۴ قطب با offset برابر ۰.۳ و گام سیم پیچی برابر ۴	۷۷
شکل (۴-۳۴). شکل موج چگالی شار فاصله هوایی موتور ۱۵ شیار و ۴ قطب با offset برابر ۰.۳ و گام سیم پیچی برابر ۴	۷۷
شکل (۴-۳۵). سطح مقطع موتور بهینه شده نهایی	۷۸

فصل اول

مقدمه

۱-۱- معرفی موتور DC بدون جاروبک (BLDC)^۱

موتورهای DC از سال ۱۸۸۶ در کارهای تجاری مورد استفاده قرار گرفتند. موتورهای DC دارای بازده نسبتاً بالایی می-باشند. خواص آنها باعث شده که به عنوان سروموتورها به کار گرفته شوند، اما مهمترین مشکل این موتورها وجود کموتاتور و جاروبک می-باشد که این خود باعث فرسودگی و تعمیرات دوره‌ای خواهد شد. با جایگزینی کلیدهای استاتیکی به جای کموتاتور و جاروبک، موتورهای جدیدی وارد بازار شدند که دیگر نیازی به این گونه تعمیرات نداشتند. به این دسته از موتورها، موتورهای DC بدون جاروبک گفته می-شود. امروزه از موتورهای DC بدون جاروبک در کاربردهای فراوانی استفاده می-شود. این موتورها با وجود داشتن مزایایی نظیر بازده مناسب و نسبت گشتاور به وزن بالا و همچنین حذف نقش جاروبک بسیار مورد توجه هستند. در موتور DC معمولی، جاروبک‌ها پس از مدتی مستهلک شده و باید تعویض گردند که موجب افزایش هزینه نگهداری می-شود. همچنین بدلیل تماس فیزیکی جاروبک‌ها، نویز صوتی از دیگر معایب موتور DC است. نقش جاروبک‌ها در موتور DC بدون جاروبک با درایو جایگزین شده است. این موتور از نظر ساختار یک موتور سنکرون است که به لطف سیستم کموتاسیون استاتیک قادر است با تغذیه DC کار کند. همچنین در این موتور به جای سیم‌پیچی در رتور، از آهنربای مغناطیس دائم استفاده شده است. این موتورها چون توانایی کار با تغذیه DC را دارا هستند، بطور گسترده در مکان‌هایی که امکان استفاده از تغذیه AC در آنها فراهم نیست استفاده می-شوند. از جمله کاربردهای این موتور می‌توان به استفاده آنها در موتور ربات‌ها، فن کامپیوترها، هواسازها و در صنایع نظامی نظیر پهپادها و زیردریایی‌ها اشاره کرد. اگرچه این موتورها دارای مزایای قابل توجهی هستند، اما همچنان برخی از ویژگی‌های این موتور نیازمند بهبود است. لرزش و نویز صوتی، دو مشکل مهم این موتور هستند که از ضربان در گشتاور خروجی این موتور ناشی می-شوند. مشکل ضربان گشتاور^۲ در تمام موتورها وجود دارد و مخصوص این موتور نیست، اما با توجه به موارد کاربرد این موتور بخصوص در صنایع نظامی نظیر پهپادها (UAV)^۳ و زیردریایی‌ها^۴ و اینکه نویز صوتی از عوامل شناسایی این وسایل است، کاهش ضربان گشتاور برای این موتور در درجه بالایی از اهمیت قرار دارد. ضربان گشتاور، برآیند دو نوع مختلف از گشتاور است. گشتاور دندان‌های^۵ و ریپل گشتاور^۱. ریپل گشتاور از تقابل سیم‌پیچ‌های استاتور و شار پیوندی آهنربا حاصل می‌شود [۱]. گشتاور دندان‌های

1 . Brushless DC
 2 . Torque Pulsation
 3 . Unmanned aerial vehicle
 4 . Submarine
 5 . cogging torque

نیز از تقابل شار مغناطیسی رتور و تغییر رلوکتانس مغناطیسی استاتور به وجود می‌آید و ارتباطی به جریان موتور ندارد [۲و۱]. در واقع گشتاور دندانه‌ای حاصل تغییر رلوکتانس مغناطیسی دیده شده توسط آهنرباهای رتور هنگام چرخش آن است. دلیل این تفاوت، وجود دهانه شیار استاتور است که موجب غیر یکنواخت شدن فاصله هوایی می‌شود. به عبارت دیگر، ریپل گشتاور از گشتاور مشترک^۲ ناشی می‌شود، در حالیکه گشتاور دندانه‌ای ناشی از گشتاور رلوکتانسی^۳ است [۱]. گشتاور دندانه‌ای نقش مهمی در ایجاد نویز صوتی و لرزش در موتور DC بدون جاروبک دارد. بنابراین باید تا جای ممکن آن را کاهش داد. تعداد شیارهای استاتور و تعداد قطب‌های مغناطیسی بر گشتاور دندانه‌ای تاثیرگذار است، چون گشتاور دندانه‌ای از عبور آهنرباهای رتور از مقابل شیارهای استاتور به وجود می‌آید. بطور دقیق‌تر، فرکانس گشتاور دندانه‌ای برابر کوچکترین مضرب مشترک تعداد قطب‌ها و تعداد شیارها است. با افزایش فرکانس گشتاور دندانه‌ای، دامنه آن نیز کاهش می‌یابد [۲و۱]. افزایش تعداد فازها نقش مهمی در کاهش ضربان گشتاور دارد. با افزایش تعداد فازها، فرکانس ضربان گشتاور افزایش و به طور هم‌زمان دامنه آن کاهش می‌یابد. یکی از روش‌های اساسی در کاهش گشتاور دندانه‌ای، مورب‌سازی یا skew است. این مورب‌سازی می‌تواند در شیارهای استاتور و یا در آهنرباهای رتور باشد. مورب‌سازی هم‌زمان شیارها و آهنربا تاثیری بر گشتاور دندانه‌ای ندارد. به وسیله مورب‌سازی، تغییرات رلوکتانس مشاهده شده توسط آهنرباهای رتور کاهش می‌یابد. بدون مورب‌سازی، گشتاور دندانه‌ای حداکثر است و با مورب‌سازی به اندازه گام یک شیار، گشتاور دندانه‌ای حذف خواهد شد [۲و۱]. تغییر جهت مغناطیس‌شدگی آهنربا هم بر گشتاور دندانه‌ای تاثیرگذار است [۱].

۲-۱- مروری بر تحقیقات انجام شده

روش‌های زیادی برای مینیمم کردن ضربان گشتاور ارائه شده است. این روش‌ها به دو دسته کلی طبقه‌بندی می‌شوند. دسته اول شامل تکنیک‌هایی برای اصلاح جریان تحریک است که به کاهش ریپل گشتاور می‌انجامد [۳-۴]. جریان تحریک هیچ ارتباطی با گشتاور دندانه‌ای ندارد. دسته دوم شامل تکنیک‌هایی برای طراحی مناسب موتور است، طوری که تا جای ممکن موتور را به مشخصه ایده‌آل خود نزدیک کند و در نتیجه گشتاور یکنواخت‌تری ایجاد شود [۵-۸]. طراحی مناسب موتور هم بر ریپل گشتاور و هم بر گشتاور دندانه‌ای تاثیرگذار است. تاثیر افزایش تعداد فازها بر ضربان گشتاور در [۱] بررسی شده است. تاثیر تغییر جهت مغناطیس‌شدگی آهنربا، مورب‌سازی، توزیع سیم‌پیچی استاتور و تعداد شیارهای استاتور بر ضربان گشتاور در [۹] بررسی شده است. در [۱۰]، شکل بهینه قطب برای کاهش گشتاور دندانه‌ای به روش استراتژی تکامل بررسی شده است. بهینه‌سازی شکل

¹. Ripple Torque

². Mutual Torque

³. Reluctance Torque

هسته برای کاهش گشتاور دندانه‌ای در [۱۱] بررسی شده است. در [۱۲] چندین طرح مختلف موتور با روش اجزاء محدود مورد تحلیل قرار گرفتند و بهترین طرح به گونه‌ای انتخاب شد که پدیده‌ی بی‌مغناطیسی شدن جزئی آهنربا در آن حداقل شود. در [۱۳] یک موتور DC بدون جاروبک با مشخصات ۱۲ kw، ۱۱۰۰ rpm و ۷۲ v مورد مطالعه قرار گرفت. با تغییر ابعاد و نوع ماده‌ی مغناطیسی مورد استفاده در روتور، عملکرد موتور مورد بررسی قرار گرفت تا حجم را به عنوان تابع هدف مینیمم‌سازی کند. سپس آنالیز اجزا محدود برای ارزیابی عملکرد موتور مورد استفاده قرار گرفت. در [۱۴] یک موتور سنکرون مغناطیس دائم با ساختار ۶ شیار- ۴ قطب که در کمپرسور هواساز کاربرد دارد مورد مطالعه قرار گرفت و شکل قطب‌ها از جهت شاخصه‌های MPem^۱، MPB^۲ و MPEC^۳ بررسی شد. تأثیر تغییرات این سه پارامتر، در محدوده‌های مشخص، بر روی گشتاور متوسط و ریبیل گشتاور به کمک روش اجزا محدود مورد مطالعه قرار گرفت و بهترین حالت از جداول به دست آمده انتخاب شد. انتخاب نسبت مناسب پهنای قطب به گام قطب برای کاهش ضربان گشتاور در [۱۵] بررسی شده است. هر چند که همه این روش‌ها در کاهش گشتاور دندانه‌ای موثرند، اما توفیق چندانی در کاهش ضربان گشتاور موتور ندارند. به این منظور، در این پروژه پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر ضربان گشتاور موتور دارند، انتخاب می‌شوند و تأثیر تغییر آنها بر ضربان گشتاور از طریق تحلیل اجزا محدود بررسی می‌شود. این پارامترها در ادامه معرفی می‌شوند.

۱-۳- اهداف و محتوای پایان نامه

در این پایان نامه، یک روند مناسب برای طراحی موتور DC بدون جاروبک و بهینه‌سازی ساختار آن، جهت مینیمم کردن گشتاور دندانه‌ای و ضربان گشتاور به کمک الگوریتم بهینه‌سازی PSO^۴ و آنالیز اجزا محدود^۵ ارائه شده است. سپس به عنوان نمونه، یک موتور ۳ فاز، ۲۴ ولت، ۸۰۰ وات و دارای سرعت ۷۰۰۰ دور بر دقیقه طراحی و بهینه‌سازی می‌شود. در ابتدا به کمک الگوریتم بهینه‌سازی PSO، یک طراحی اولیه بهینه شده از موتور بدست می‌آید. به این صورت که با انتخاب یک تابع هدف مناسب و به کمک روابط طراحی کلاسیک موتور، ابعاد موتور توسط الگوریتم PSO بهینه می‌شود و یک طرح اولیه بهینه شده از موتور بدست می‌آید. سپس روش‌های مختلف جهت کاهش گشتاور دندانه‌ای و ضربان گشتاور روی طرح اولیه، به کمک روابط تحلیلی و همچنین آنالیز اجزا محدود بررسی می‌شود. برای بررسی این پارامترها به روش اجزا محدود از نرم‌افزار Maxwell

1. Magnetic Pole Embrace

2. Magnetic Pole Bridge

3. Magnetic Pole Eccentricity

4. Particle Swarm Optimization

5. Finite Element Method

که یک نرم‌افزار آنالیز اجزا محدود است، استفاده می‌شود. کمیت‌هایی که برای کاهش ضربان گشتاور و گشتاور دندانه‌ای بررسی می‌شوند عبارتند از:

۱. تعیین تعداد مناسب قطب و شیار

۲. تعیین میزان مناسب مورب‌سازی شیار (skew)

۳. تعیین میزان مناسب قوس آهنربا^۱

۴. تعیین میزان مناسب offset آهنربا

۵. تعیین میزان مناسب گام سیم‌پیچی

در هر مرحله، مقادیر مختلف کمیت‌های فوق به روش اجزا محدود شبیه‌سازی می‌شوند و آن مقدار که بهترین نتیجه را از نظر گشتاور دندانه‌ای و ضربان گشتاور داشته باشد برگزیده می‌شود.

۴-۱- ساختار پایان‌نامه

به طور اجمالی می‌توان ساختار پایان‌نامه را چنین بیان کرد:

در فصل دوم به مطالعه ساختار اساسی موتورهای DC بدون جاروبک پرداخته می‌شود که شامل ساختار موتور و روابط کلاسیک آن می‌باشد. در فصل سوم، یک روند کلی برای طراحی و بهینه‌سازی موتور DC بدون جاروبک از نظر مینیمم کردن ضربان گشتاور و گشتاور دندانه‌ای ارائه می‌شود. ابتدا چگونگی بدست آوردن یک طرح بهینه اولیه برای موتور DC بدون جاروبک به کمک الگوریتم بهینه‌سازی PSO بیان می‌شود. در قسمت بعد، کمیت‌های تاثیرگذار بر ضربان گشتاور و گشتاور دندانه‌ای که در قسمت قبل نام برده شدند، به لحاظ تئوری بررسی می‌شوند. در انتهای این بخش نیز الگوریتم بهینه‌سازی PSO تشریح می‌شود. در فصل چهارم، یک موتور نمونه بر اساس روند طراحی بیان شده در فصل سوم، طراحی و بهینه‌سازی می‌شود. در بررسی هر کمیت از آنالیز اجزا محدود استفاده می‌شود تا هم صحت روابط تحلیلی بررسی شود و هم تاثیر دقیق این کمیت‌ها بر گشتاور دندانه‌ای و ضربان گشتاور بدست آید. در فصل پنجم نتایج و پیشنهادات ارائه شده است.

¹ . Embrace

فصل دوم

اصول اساسی موتورهای DC بدون جاروبک

۲-۱- مقدمه

این فصل شامل دو بخش زیر می‌باشد:

۱- معرفی موتور DC بدون جاروبک

۲- روابط ساختاری و روند طراحی کلاسیک موتور DC بدون جاروبک

در این فصل به معرفی موتور DC بدون جاروبک پرداخته شده و نحوه عملکرد آن، مزایا و معایب موتور، ساختار استاتور و روتور، نوع ماده مغناطیسی استفاده شده در روتور، مورد بررسی قرار گرفته است و در ادامه معادلاتی که در طراحی این نوع موتورها لازم است به صورت مختصر آورده شده است.

۲-۲- ساختار موتور DC بدون جاروبک (BLDC):

موتور DC بدون جاروبک در مراجع مختلف دارای تعاریف متفاوتی می‌باشد. استاندارد انجمن ملی سازندگان

تجهیزات الکتریکی (NEMA)، موتور DC بدون جاروبک را این گونه تعریف می‌کند:

"یک موتور بدون جاروبک، ماشین دوار خودسنکرونی است که دارای روتور مغناطیسی دائم بوده و از موقعیتهای مشخصی از شفت دوار روتور، جهت کموتاسیون الکترونیکی استفاده می‌شود. این موتور می‌تواند به همراه درایوهای الکترونیک مربوطه به صورت مجتمع باشد یا اینکه موتور از درایو مربوطه جدا باشد."

ساختار موتور DC بدون جاروبک مشابه موتورهای جریان متناوب یا موتورهای سنکرون مغناطیس‌دائم است (PMSM)^۱، در صورتی که در موتور DC، رتور به عنوان آرمیچر است و تحریک روی استاتور قرار دارد و با چنین ساختارمانی، ساخت یک موتور DC بدون جاروبک بسیار مشکل خواهد بود. یک نمونه از ساختار موتور DC بدون جاروبک در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.

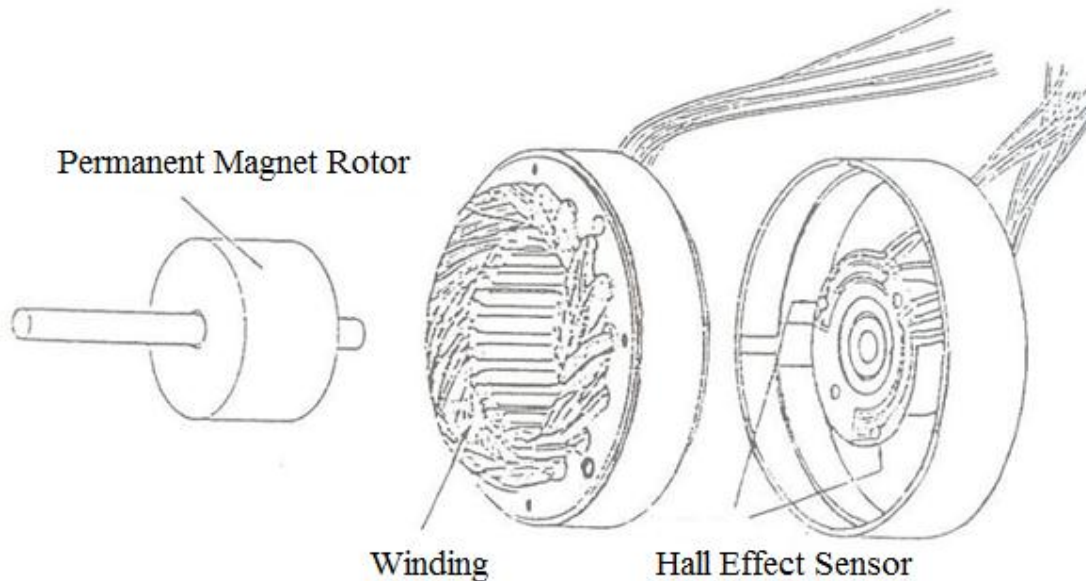
موتورهای DC بدون جاروبک یک نوع خاص از موتورهای سنکرون هستند، اما این موتورها فاقد پارامتری بنام لغزش^۲، مشابه آنچه در موتورهای القایی مشاهده می‌شود هستند. موتورهای DC بدون جاروبک در ساختارهای تکفاز، دوفاز، سه‌فاز، پنج‌فاز و همچنین تعداد فاز بالاتر وجود دارند. متناظر با هر یک از انواع مذکور، استاتور نیز به همان تعداد دارای سیم‌پیچ است. اما نوعی که

^۱ . National Electrical Manufacturers Associations

^۲ . Permanent Magnet Synchronous Motor

^۳ . Slip

فراگیر بوده و بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد، سه‌فاز می‌باشد. از نظر عملکرد، موتور DC بدون جاروبک عملکردی نزدیک به موتور DC سنت دارد. با این تفاوت که نقش جاروبک‌ها در موتور DC بدون جاروبک با درایو جایگزین شده است. با اینکه این مو-



شکل (۱-۲). یک نمونه از ساختار موتور DC بدون جاروبک

تور از نظر ساختار یک موتور سنکرون است، اما به لطف سیستم کموتاسیون استاتیک قادر است با تغذیه DC کار کند. همچنین در این موتور سیم‌پیچی رتور حذف شده و بجای آن از آهنربای مغناطیس دائم استفاده شده است.

۲-۳- مزایا، معایب و کاربردهای موتور DC بدون جاروبک [۱۶]:

استفاده از موتورهای DC در صنعت بدلیل مشخصات برجسته‌ای چون کنترل گسترده سرعت، راندمان زیاد و ... رواج زیادی دارد. تنها عیب این موتور نیاز به کموتاتور و جاروبک است چرا که این اجزا دائم در حال فرسایش می‌باشند و به همین دلیل نیاز موتور را به تعمیر و نگهداری افزایش می‌دهند. موتورهای DC بدون جاروبک این مشکل را بر طرف کرده اند. بدین صورت که وظیفه کموتاتور و جاروبکها^۱ در این موتور به عهده مدارات الکترونیکی گذاشته شده است. تاریخچه موتورهای DC بدون جاروبک به بیش از نیم قرن پیش باز می‌گردد، اما تنها در طول دو دهه است که به سیستم‌های عملی موثر و ارزشمندی تبدیل شده‌اند. از مهمترین عواملی که به افزایش محبوبیت این نوع محرک منجر گردیده، مربوط به بهبودهایی است که در زمینه مواد آهنربایی، کاهش قیمت مدارهای مجتمع و ساخت کلیدهای الکترونیک قدرت توان بالا ایجاد شده است. این موتور به عنوان یک موتور کم

^۱ . Brush