

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش الکترونیک قدرت و ماشین های الکتریکی

مدل سازی و طراحی و ساخت یک ماشین الکتروستاتیک برای کاربرد اندازه گیری سرعت

نگارنده

محمد مهدی صادقی

استاد راهنما

دکتر احمد دارابی

اسفندماه ۱۴۰۰

در این صفحه صورت جلسه دفاع را قرار دهید. لازم است پس از صحافی این صفحه مجدداً توسط دانشکده مهر گردد و استاد راهنما با امضای خود اصلاحات پایان نامه را تایید کند.

تقديم به

زنده ياد محمدرضا صادقي، پدر عزيزتر از جانم...

تقدیر و تشکر

از پدر، مادر و برادر عزیزم که در تمام مراحل زندگی پشتیبان اینجانب بودند و هستند.

از پروفسور احمد دارابی استاد گرانقدر که در طول این مدت با تمام کاستی‌های اینجانب،

همراه و پشتیبان این پروژه بودند.

از جناب آقای پورمیرزایی که در تمام این مدت زحمات فراوانی برای ایشان داشتم.

از جناب آقای مهندس بابک نیا و مجموعه محترم آریانا رسانه که برادرانه همراه اینجانب

بودند.

از جناب آقای رضازاده که در طی این مدت و برای انجام تست‌های نهایی زحمات فراوانی را

برای ایشان و مجموعه محترمشان داشتم.

تعهد نامه

اینجانب **محمد مهدی صادقی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی برق** دانشکده برق دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **مدل سازی و طراحی و ساخت یک ماشین الکتروستاتیک برای کاربرد اندازه گیری سرعت تحت راهنمایی جناب آقای دکتر دارابی** متعهد می شوم.

• تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.

در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .

مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .

کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .

حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.

در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .

در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در این پایان نامه با استفاده از یک روش تحلیلی، مدلی برای طراحی و ساخت یک سیستم الکترواستاتیک گردان به عنوان یک حسگر برای کاربرد اندازه گیری سرعت ماشین های الکتریکی ارائه می شود. ابتدا مطالعات سیستم های الکترواستاتیک انجام شده، ساختارهای مختلف سیستم های الکترواستاتیکی گردان برای دستیابی به نتیجه مورد بررسی قرار گرفته و یک مدل پیشنهاد می شود. به کمک نرم افزار اجزاء محدود^۱ و محاسبه عناصر ماتریس کاپاسیتانس، متغیرهای مختلف مشخص شده و با استفاده از آزمون و خطا حالت بهینه برای طراحی و ساخت یک نسخه عملی از دستگاه الکترواستاتیک اندازه گیر سرعت بدست می آید. کارایی مدل بدست آمده با استفاده از شبیه سازی سیمولینک در نرم افزار متلب^۲ مورد بررسی قرار گرفته و در قدم بعد با ساخت یک مدل آزمایشگاهی تئوری و نتایج بدست آمده از نرم افزارهای محاسباتی بررسی می شود. نمونه اولیه با پاسخ به سوالات اساسی طراحی این دستگاه شامل تعداد قطب، ابعاد و مقدار ولتاژ تحریک با استفاده از بردهای مدار چاپی طراحی و ساخته شد. تست های تعیین تحریک استاتور به کمک ولتاژ متناوب و مستقیم انجام می شود. نتایج بدست آمده در آزمایشات عملی حاکی از آن است که با چرخش روتور دستگاه اندازه گیری سرعت و با اعمال تحریک روی یکی از استاتورها، سیگنال ولتاژ مشاهده شده روی استاتور دیگر کاملاً تحت تاثیر سرعت چرخش روتور دستگاه بوده که خود این روتور با استفاده از کوپلینگ های خاص به روتور موتور الکتریکی دیگر که نیاز به خواندن سرعت آن داریم وصل شده است. این امر به کمک شبیه سازی های نرم افزاری نیز تایید شده است. ماشین های الکترواستاتیک جریان الکتریکی و تلفات بسیار کمی دارند در نتیجه پاسخ الکتریکی در ماشین های الکترواستاتیک معمولاً سریع بوده و بازده الکتریکی بالایی دارند.

کلمات کلیدی : سنسور، حسگر، ماشین الکترواستاتیک، تحلیل اجزا محدود، شبیه سازی، ماشین الکترومغناطیس، ماتریس کاپاسیتانس

^۱ Finite Element

^۲ Matlab

فهرست مطالب

د	فهرست جداول
ه	فهرست اشکال
۱	فصل ۱ : مقدمه
۲	۱-۱ نیروی الکترومکانیکی
۴	۲-۱ سیستم های الکتروستاتیک گردان
۵	۳-۱ تاریخچه و مطالعات اخیر
۱۱	۴-۱ اهداف این پایان نامه
۱۲	۵-۱ ساختار پایان نامه
۱۳	فصل ۲ بررسی سنسور ها و ماشین های الکتروستاتیک
۱۴	۱-۲ مقدمه
۱۴	۲-۲ مقایسه ساختار ماشین الکتروستاتیک و الکترومغناطیس
۱۶	۳-۲ انواع ماشین الکتروستاتیک
۱۷	۱-۳-۲ ماشین الکتروستاتیک القایی
۲۱	۲-۳-۲ ماشین الکتروستاتیک سنکرون
۲۶	۳-۳-۲ ماشین های الکتروستاتیک خازن متغیر
۲۹	۴-۲ سنسور
۳۱	۱-۴-۲ سنسور سرعت سنج
۳۲	۵-۲ سنسور الکترواستاتیک

فصل ۳: مدل سازی تحلیلی ماشین الکترواستاتیک بعنوان یک سنسور سرعت سنج ۳۷

۳-۱ مقدمه ۳۸

۳-۲ محاسبه عناصر ماتریس خازنی ۳۸

۳-۲-۱ ظرفیت های خودی ۴۰

۳-۲-۲ ظرفیت های متقابل بین استاتور ۴۲

۳-۲-۳ ظرفیت های بین روتور و استاتور ۴۳

۳-۴ محاسبات مدار معادل ساختار پیشنهادی ۴۴

فصل ۴ طراحی، شبیه سازی و ساخت یک نمونه ماشین الکترواستاتیک برای کاربرد اندازه گیری سرعت ۴۹

۴-۱ مقدمه ۵۰

۴-۲ تئوری طراحی دستگاه اندازه گیری ۵۰

۴-۳ ساختار کلی ۵۱

۴-۴ طراحی ابعاد، متغیرها، مقادیر پیشنهادی و ملاحظات ۵۳

۴-۴-۱ تعداد قطب ۵۳

۴-۴-۲ ابعاد ۵۹

۴-۴-۳ ولتاژ تحریک ۶۰

۴-۴-۴ مواد اولیه مصرفی ۶۱

۴-۵ شبیه سازی اولیه و نهایی، ماتریس خازنی ۶۲

۴-۶ شبیه سازی نهایی و مشاهده سیگنال خروجی ۷۷

۴-۷ طراحی و ساخت نمونه عملی ۸۸

۴-۷-۱ خرید مواد اولیه مورد نیاز ۸۸

۴-۷-۲ ساخت قطب های روتور و استاتور ۸۸

۳-۷-۴ اتصال استاتور ها و روتور به عامل محرک خارجی..... ۸۹

۴-۷-۴ اتصالات سیم..... ۹۱

۵-۷-۴ تحریک..... ۹۲

۶-۷-۴ شرایط تست..... ۹۳

فصل ۵: جمع بندی و نتیجه گیری ۱۰۱

۱-۵ مقدمه..... ۱۰۲

۲-۵ جمع بندی..... ۱۰۲

۳-۵ نتیجه گیری..... ۱۰۳

۴-۵ پیشنهاد تحقیق..... ۱۰۴

فهرست مراجع ۱۰۴

فهرست جداول

- جدول ۱—۲ ابعاد موتور الکتروستاتیک تست شده ۲۰
- جدول ۲—۲ انواع سنسورهای الکتریکی ۳۰
- جدول ۱—۴ مشخصات ابعادی دستگاه شبیه سازی شده ۶۰
- جدول ۲—۴ - ماتریس خازنی خروجی ۴ در ۴ شبیه سازی اجزا محدود ۶۶
- جدول ۳—۴ ماتریس ظرفیت کاهش یافته ۶۸

فهرست اشکال

شکل ۱-۱	مقایسه الکتروستاتیک و الکترومغناطیس	۳
شکل ۱-۲	جدول تناوبی عناصر و مقایسه مقدار مصرف آن ها در ساختار ماشین های الکتریکی	۱۶
شکل ۲-۲	یک جفت الکتروود	۱۷
شکل ۳-۲	ماشین الکتروستاتیک القایی ^۱	۱۸
شکل ۴-۲	مدار معادل یک ماشین الکتروستاتیک	۱۸
شکل ۵-۲	یک ماشین الکتروستاتیک القایی کوچک مقیاس	۱۹
شکل ۶-۲	سرعت موتور بصورت تابعی از فرکانس	۲۱
شکل ۷-۲	شماتیک قطب های ماشین الکتروستاتیک سنکرون	۲۳
شکل ۸-۲	طبقه بندی روتور و استاتور	۲۳
شکل ۹-۲	تفاوت ماشین سنکرون و القایی	۲۴
شکل ۱۰-۲	اتصالات خازنی بین پایانه های ماشین	۲۵
شکل ۱۱-۲	ساختار کلی یک ماشین الکتروستاتیک سنکرون	۲۶
شکل ۱۲-۲	ماشین الکتروستاتیک ۶/۸	۲۷
شکل ۱۳-۲	نمودار تغییرات خازنی و گشتاور	۲۸
شکل ۱۴-۲	پخش میدان در یک ماشین الکتروستاتیک کوچک مقیاس	۲۹
شکل ۱۵-۲	ساختار عملکردی یک سنسور الکتروستاتیک	۳۵
شکل ۱-۳	ساختار ساده شده دو قطبی ماشین الکتروستاتیک شار شعاعی (الف) و شار محوری (ب)	۳۹
شکل ۲-۳	توزیع الکترودها	۴۰
شکل ۳-۳	مدار معادل دستگاه اندازه گیری سرعت	۴۶
شکل ۱-۴	ساختار کلی دستگاه	۵۱
شکل ۲-۴	نمای نزدیک قطب های استاتور و روتور	۵۲
شکل ۳-۴	ابعاد صفحات و قطب ها	۵۲
شکل ۴-۴	اتصال قطب ها در دو طرف صفحات	۵۳
شکل ۵-۴	استاتورها و روتور مشابه هم و ۷۰ درجه	۵۴
شکل ۶-۴	نمودار ظرفیت خازنی در حالت ۷۰ درجه	۵۵
شکل ۷-۴	استاتورها و روتور مشابه هم و ۱۲۰ درجه	۵۵
شکل ۸-۴	نمودار ظرفیت خازنی در حالت ۱۲۰ درجه	۵۶
شکل ۹-۴	استاتورها ۱۲۰ درجه و روتور ۹۰ درجه	۵۶
شکل ۱۰-۴	نمودار ظرفیت خازنی در حالت استاتور ۱۲۰ و روتور ۹۰ درجه	۵۷
شکل ۱۱-۴	استاتورها و روتور ۹۰ درجه	۵۸
شکل ۱۲-۴	نمودار ظرفیت خازنی در حالت استاتورها و روتور ۹۰ درجه	۵۹

شکل ۴-۱۳	فیبر استخوانی با روکش مس	۶۱
شکل ۴-۱۴	شبیه سازی اولیه	۶۵
شکل ۴-۱۵	شکل شبیه سازی نهایی	۶۵
شکل ۴-۱۶	نمودار تغییرات ماتریس خازنی	۷۰
شکل ۴-۱۷	بار سطح استاتور بالا در همپوشانی ۱۰۰ درصد	۷۰
شکل ۴-۱۸	بار سطح روتور در همپوشانی ۱۰۰ درصد	۷۱
شکل ۴-۱۹	بار سطح استاتور پایین در همپوشانی ۱۰۰ درصد	۷۱
شکل ۴-۲۰	بار سطح استاتور بالا در همپوشانی ۰ درصد	۷۲
شکل ۴-۲۱	بار سطح روتور در همپوشانی ۰ درصد	۷۲
شکل ۴-۲۲	بار سطح استاتور پایین در همپوشانی ۰ درصد	۷۲
شکل ۴-۲۳	میدان الکتریکی بین استاتور پایین و روتور در وضعیت همپوشانی ۱۰۰ درصد	۷۳
شکل ۴-۲۴	میدان الکتریکی بین استاتور بالا و روتور در وضعیت همپوشانی ۱۰۰ درصد	۷۳
شکل ۴-۲۵	میدان الکتریکی بین استاتور پایین و روتور در وضعیت همپوشانی ۰ درصد	۷۴
شکل ۴-۲۶	میدان الکتریکی بین استاتور بالا و روتور در وضعیت همپوشانی ۰ درصد	۷۴
شکل ۴-۲۷	پخش ولتاژ در محیط محل تست در وضعیت همپوشانی ۰ درصدی بین صفحات روتور و استاتور	۷۵
شکل ۴-۲۸	ولتاژ روی سطح استاتور پایین	۷۵
شکل ۴-۲۹	نمودار افراز شده بر ظرفیت استاتور بالا	۷۶
شکل ۴-۳۰	نمودار افراز شده بر ظرفیت استاتور پایین	۷۶
شکل ۴-۳۱	نمودار ظرفیت بین استاتورهای بالا و پایین	۷۷
شکل ۴-۳۲	شبیه سازی سیمولینک	۷۸
شکل ۴-۳۳	سیگنال ولتاژ خروجی به ازای ورودی ۳۰۰۰ دور در دقیقه	۷۸
شکل ۴-۳۴	سیگنال ولتاژ خروجی به ازای ورودی ۱۵۰۰ دور در دقیقه	۷۹
شکل ۴-۳۵	حالت سوم ورودی دوزنقه‌ای	۷۹
شکل ۴-۳۶	سیگنال ولتاژ خروجی به ازای سیگنال ورودی حالت سوم	۸۰
شکل ۴-۳۷	فرکانس در حالت سیگنال ورودی حالت سوم	۸۰
شکل ۴-۳۸	سیگنال ورودی نمایی	۸۱
شکل ۴-۳۹	سیگنال خروجی به ازای ورودی نمایی	۸۲
شکل ۴-۴۰	شکل سیگنال بار الکتریکی	۸۲
شکل ۴-۴۱	فرکانس در حالت نمایی	۸۳
شکل ۴-۴۲	ورودی مشابه حالت آزمایشگاهی	۸۴
شکل ۴-۴۳	سیگنال ولتاژ خروجی به ازای ورودی شبیه حالت آزمایشگاهی	۸۵
شکل ۴-۴۴	نمودار تغییر بار	۸۵
شکل ۴-۴۵	بلوک طیف سنج در نرم افزار سیمولینک متلب	۸۶

- شکل ۴-۴۶ زیرسیستم اندازه گیری فرکانس..... ۸۶
- شکل ۴-۴۷ نمودار فرکانس سیگنال خروجی به کمک زیرسیستم نشان دهنده فرکانس..... ۸۷
- شکل ۴-۴۸ سنجش فرکانس به کمک طیف سنج..... ۸۷
- شکل ۴-۴۹ پیچ پایه بلند، واشر و مهره..... ۸۹
- شکل ۴-۵۰ مونتاژ دستگاه ساخته شده..... ۹۰
- شکل ۴-۵۱ فاصله هوایی و نحوه اتصال موتور دیسی به صفحه استاتور بالا و روتور..... ۹۱
- شکل ۴-۵۲ دستگاه ساخته شده از زاویه بالا..... ۹۱
- شکل ۴-۵۳ دستگاه ساخته شده از زاویه پایین..... ۹۲
- شکل ۴-۵۴ تست در شرایط محیط آزمایشگاه..... ۹۳
- شکل ۴-۵۵ دامنه نویز..... ۹۴
- شکل ۴-۵۶ سیگنال خروجی هنگام چرخش روتور بدون اتصال تحریک..... ۹۴
- شکل ۴-۵۷ اتصال تحریک بدون چرخش..... ۹۵
- شکل ۴-۵۸ لحظه شروع چرخش روتور همراه با اتصال تحریک..... ۹۶
- شکل ۴-۵۹ لحظاتی پس از شروع چرخش روتور..... ۹۶
- شکل ۴-۶۰ زمان ۴ ثانیه پس از حالت گذرای شکل ۴-۵۹..... ۹۷
- شکل ۴-۶۱ زمان ۳ ثانیه پس از حالت شکل ۴-۶۰..... ۹۷
- شکل ۴-۶۲ سرعت روتور نزدیک به سرعت نهایی..... ۹۸
- شکل ۴-۶۳ دامنه و فرکانس در سرعت چرخش نهایی روتور..... ۹۸
- شکل ۴-۶۴ قطع تحریک روتور و کاهش سرعت واثر آن بر سیگنال خروجی..... ۹۹
- شکل ۴-۶۵ ادامه کاهش سرعت..... ۱۰۰
- شکل ۴-۶۶ لحظات پایانی کاهش سرعت..... ۱۰۰

فصل ۱ : مقدمه

۱-۱ نیروی الکترومکانیکی

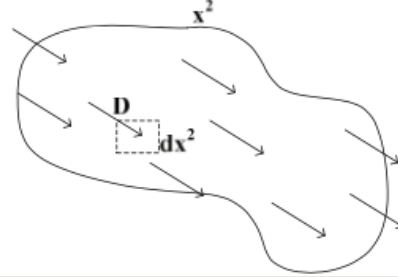
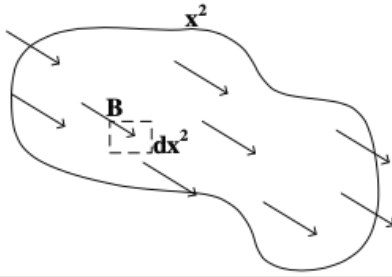
در تبدیل انرژی الکترومکانیکی بیشترین نیرویی که برای تبدیل انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد نیروی الکترومغناطیسی است چراکه مقدار نیروی الکتروستاتیکی آنقدر کوچک است که اکثراً نادیده گرفته می‌شود. ماشین‌هایی که با میدان مغناطیسی کار می‌کنند از نیروی مغناطیسی لورنتز (بخش مغناطیسی) بهره می‌برند درحالی‌که ماشین‌هایی که با نیروی الکتریکی کار می‌کنند از نیروی کولمب استفاده می‌کنند. همچنین از زمان تامسون، هلموتس و هوی ساید توضیح الاستانس الکتریکی وارد ادبیات علمی مطالعات الکتریکی گردید و در اصل بصورت معکوس کاپاسیتانس تعریف می‌شود. کاپاسیتانس دوگان رلوکتانس مغناطیسی است.

نیرو یا گشتاور الاستانسی از انرژی ذخیره شده در فاصله هوایی بین استاتور و روتور یک ماشین الکتروستاتیک بدست می‌آید. به بیان دیگر ظرفیت خازن بین روتور و استاتور تابعی از موقعیت روتور است.

شکل ۱-۱ خلاصه‌ای از شباهت‌ها، دوگانگی‌ها و تفاوت‌های بین الکترومغناطیس و الکتروستاتیک را نشان می‌دهد. شکل میدان، شار، انتگرال روی سطح بسته، انرژی ذخیره شده، شکل سطح مقطع مسیر شار، رلوکتانس یا الاستانس، شکل مدار معادل، نیروی محرک الکتریکی، نیرو و گشتاور در دو حالت الکتروستاتیک و الکترومغناطیس در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. به خوبی می‌توان دریافت که نیروی الکتروستاتیک و الکترومغناطیس دوگان یکدیگر هستند. [۱].

الكترومغناطيس

الكتروستاتيك



$$B = \mu H \quad \Phi_M = \int_{x^2} B \cdot dx^2$$

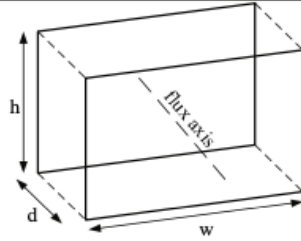
$$D = \epsilon E \quad \Phi_E = \int_{x^2} D \cdot dx^2$$

$$\oint_{x^2} B \cdot dx^2 = 0$$

$$\oint_{x^2} D \cdot dx^2 = Q_{enc}$$

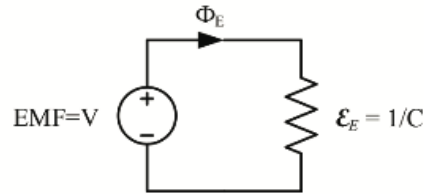
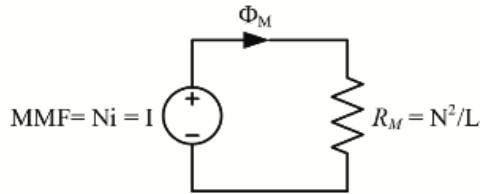
$$L = \frac{\Phi_M}{I}$$

$$C = \frac{\Phi_E}{V}$$



$$R_M = \frac{d}{\mu_o \mu_r w h} = \frac{N^2}{L}$$

$$\epsilon_E = \frac{d}{\epsilon_o \epsilon_r w h} = \frac{1}{C}$$



$$MMF = Ni = I = \Phi_M R_M$$

$$EMF = V = \Phi_E \epsilon_E$$

$$F_M = \frac{1}{2} i^2 \frac{d}{dx} L(x) = \frac{1}{2} i^2 \frac{d}{dx} \frac{N^2}{R_M(x)}$$

$$F_E = \frac{1}{2} V^2 \frac{d}{dx} C(x) = \frac{1}{2} V^2 \frac{d}{dx} \frac{1}{\epsilon_E(x)}$$

$$T_M \sim \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \propto i^2 \frac{L_{max} - L_{min}}{\Delta\theta}$$

$$T_E \sim \frac{1}{2} V^2 \frac{dC}{d\theta} \propto V^2 \frac{C_{max} - C_{min}}{\Delta\theta}$$

شكل ١-١ مقايسه الكتروستاتيك و الكترومغناطيس^١

^١ B. Ge, Student and D. C. Ludois, (٢٠١٥) "A ١-Phase ٤-Pole Axial Peg Style Electrostatic Rotating Machine Utilizing Variable Elastance" IEEE

۱-۲ سیستم های الکتروستاتیک گردان

از گذشته تا کنون اکثر سیستم های الکترومکانیکی مانند تجهیزاتی که در ربات های صنعتی استفاده می شوند از ماشین های الکترومغناطیسی نظیر سروموتور، موتور های DC و ... بهره می برند چراکه با توجه به کاربرد، این موتورها مزایای فراوانی از قبیل ساخت راحت تر، توان خروجی بالا و همچنین قابلیت کنترل پذیری خیلی خوبی را دارا هستند. با این حال این موتورها به این دلیل که اندازه کلی سیستم ها و مکانیسم آن ها کوچک تر و پیچیده شده منبع موثری برای تمام انرژی مکانیکی نیستند. سیستم های صنعتی جدید به عملگرهای فشرده و سبک نیاز دارند اما کاهش وزن و ابعاد موتورها الکترومغناطیس با کارایی مشابه دشوار است به این دلیل که به مواد مغناطیسی با چگالی بالا احتیاج پیدا می شود اما محرک های الکترواستاتیک برخلاف مولدهای الکترومغناطیس به مواد سنگین نیاز نداشته و به راحتی به ابعاد کوچک و سبک ساخته می شوند.

در گذشته اعتقاد بر این بود که محرک های الکتروستاتیک برخلاف الکترومغناطیس نمی توانند نیروی مورد نیاز را تامین کنند. در نتیجه از این ماشین ها به ندرت استفاده می شد. اما اخیراً یک محرک الکترواستاتیک با اندازه ۱ میلی متر و یا کوچک تر توانایی تولید نیرو و میدان بیشتری نسبت به یک ماشین الکترومغناطیس با همان ابعاد را دارد.^۱ در حال حاضر این گذاره مقایسه ای برای ماشین های بزرگ مقیاس صحیح نیست اما با پیشرفت روزافزون دی الکتریک های مایع، این اتفاق دور از ذهن نیست. تکنیک های این نوع از موتورها الکتروستاتیک را نه تنها در ماشین های ابعاد کوچک، بلکه در ماشین های ابعاد بزرگ هم می توان استفاده کرد. بدین صورت که تعداد زیادی از واحدهای محرک کوچک به هم متصل شده و نیروی خارجی آن ها باهم جمع می شود [۲].

^۱ High Power And High Efficiency Electrostatic Actuator

۳-۱ تاریخچه و مطالعات اخیر

ماشین‌های الکترواستاتیک را بسته به نحوه تولید شارژ می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: دسته اول ماشین‌های اصطکاکی است که با استفاده از اثر تریبوالکتریک کار می‌کنند. دسته دوم ماشین‌های نفوذی^۱ است که از القای الکتروستاتیک بهره می‌برند. شکل اولیه یک ماشین اصطکاکی در حدود سال ۱۶۶۳ میلادی توسط اوتو ون گیوریک^۲ با استفاده از یک کره گوگردی که با نیروی دست چرخانده شده و عمل مالش انجام می‌شد، اختراع شد. إسحاق نیوتون^۳ پیشنهاد استفاده از یک کره شیشه‌ای به جای گوگردی را مطرح کرد. در حدود سال ۱۷۰۶ فرانسیس هاوکسبی^۴ طرح اولیه این ماشین را بدین صورت که یک کره شیشه‌ای را در برابر پارچه پشمی می‌چرخاند بهبود بخشید. در ادامه این مسیر در سال ۱۷۳۰ پروفسور جورج متیوس بوس^۵، سال ۱۷۴۶ ویلیام واتسون^۶ و به همین ترتیب تا به امروز دانشمندان مختلفی طرح‌های خود را ارائه کردند تا روز به روز ساختار اولیه را پیشرفته‌تر و کاربردی‌تر کنند [۳].

در میانه قرن ۱۹ میلادی ماشین‌های الکترواستاتیک بر پایه نیروی تریبوالکتریک جای خود را به یک نوع جدیدی از ژنراتورهای ولتاژ بالا دادند. این دسته از ماشین‌ها ماشین‌های نفوذی نامیده می‌شوند. آگست توپلر^۷ در سال ۱۸۶۶ این نظریه را بیان کرد که راه مستقیم دستیابی به اثر الکتریکی ممکن است از طریق کار مکانیکی توسط ماشین‌های نفوذی تحقق یابد. اگرچه ماشین‌های نفوذی تا اوایل قرن ۱۹ در ولتاژهای بالا مورد توجه بودند، اما در طولانی مدت نمی‌توانستند با ژنراتورهای الکترومغناطیسی رقابت کنند [۴].

^۱ Friction Machines

^۲ Otto von Guericke

^۳ Issac Newton

^۴ Francis Hauksbee

^۵ Georg Matthias Bose

^۶ William Watson

^۷ August Toepler

در تمام مطالعات قبلی در حوزه ماشین‌های الکترواستاتیک سعی شده تا حد زیادی انواع ساختارها و راهکارهای بهبود عملکرد و طراحی ماشین‌های الکترواستاتیک مورد بررسی قرار گیرد. بررسی یک ماشین دوار الکترواستاتیکی با طراحی به سبک الکتروود محوری^۱ ۴۸ قطبی ۱ فاز با استفاده از الاستانس متغیر^۲ با بحث دوگانگی رلوکتانس مغناطیسی و الاستانس الکتریکی شروع شده و ویژگی‌های طراحی یک ماشین چرخان الکترواستاتیکی مورد بحث قرار می‌گیرد. با چرخش ماشین، قطب‌های آن که بصورت میخ طراحی شده بصورت شعاعی به هم وارد شده و خارج می‌شوند و این اتفاق باعث ایجاد خازن متغیر بین استاتور و روتور می‌شود. نمونه اولیه با حداکثر گشتاور ۰/۹ نیوتن‌متر و قدرت میدان شکاف ۱۴ کیلوولت بر میلی‌متر ساخته شد. چگالی گشتاور ویژه دستگاه ۰/۱۲۶ نیوتن‌متر بر کیلوگرم است. چگالی گشتاور ویژه دستگاه با پر کردن محیط دستگاه با یک سیال دی‌الکتریک با گذردهی نسبی ۷/۱ به جای خلاء بطور چشم‌گیری بالا می‌رود [۵].

بررسی یک دستگاه الکترواستاتیک الاستانس متغیر که با استفاده از پرینتر سه بعدی و با نقشه برداری منسجم بهینه شده و بوسیله سیال دی‌الکتریک پر شده^۳ نشان می‌دهد که اخیراً ماشین‌های الکترواستاتیکی پر شده از مایع دی‌الکتریک چگالی گشتاور حجمی بیشتری دارند. این موضوع نوید رقابت با ماشین‌های الکترومغناطیسی را در کاربردهای ویژه مطرح می‌کند. ماشین‌های الاستانس متغیر از دیدگاه الکترواستاتیک بهینه نشده بودند چراکه هندسه آن‌ها به دلیل قابلیت ساخت، بسیار محدود بود. تبدیل توان الکترومکانیکی با بازدهی بالاتر برای الکترواستاتیک نیاز به طراحی هندسی بهینه دارد. به کمک یک روش نیمه‌تحلیلی که شامل تکنیک‌های نگاشت هم‌شکل با آنالیز اجزاء محدود^۴ برای بهینه‌سازی یک ماشین الکترواستاتیک الاستانس متغیر است، عمل بهینه‌سازی در این دستگاه انجام شده است. یک نسخه از این ماشین الکترواستاتیک با هندسه بهینه‌سازی شده به کمک چاپ سه‌بعدی

^۱ Axial Peg Style

^۲ A ۱-Phase 48-Pole Axial Peg Style Electrostatic Rotating Machine Utilizing Variable Elastance

^۳ A 3D Printed Fluid Filled Variable Elastance Electrostatic Machine Optimized with Conformal Mapping

^۴ Finite Element Analysis

برای حل محدودیت‌های هندسی ساخته شد. با ساختن دستگاه از پلاستیک روکش شده با هادی، وزن کاهش و تراکم گشتاور بهبود یافت [۶].

اخيراً نوآوری‌های مایعات دی‌الکتریک پیشرفته و تولید مواد افزودنی دیگر ماشین‌های الکترواستاتیکی را در مقیاس کسری از اسب بخار فعال کرده‌اند که عملکرد رقابتی با همتایان الکترومغناطیسی معمولی خود را نشان می‌دهد. حداکثر گشتاور به ازای هر ولت و کنترل مبتنی بر شارژ با یک معادله گشتاور ارائه می‌شود که اصطلاحات آن به مکانیزم‌های میدان، کشش و گشتاور القایی وابسته است. تنظیم کننده‌های ولتاژ برداری، قلب کنترل‌های درایو را تشکیل می‌دهند. مدل با تجزیه و تحلیل اجزای محدود^۱ تایید شده است [۷].

یک ماشین الکترواستاتیک سوئیچ الاستاسی^۲ را می‌توان به طور کامل از مواد سبک وزن برای کاربردهای با محرک دوار ساخت. این مدل از ماشین الکترواستاتیک به جای نیروی مغناطیسی از نیروهای الکترواستاتیک استفاده می‌کند. از بردهای مدار چاپی، آلومینیومی و یا پلاستیکی استفاده می‌شود چراکه استفاده از آن‌ها کم هزینه بوده و در پایان عمر به راحتی بازیافت می‌شوند. این ماشین الکترواستاتیک از نوع شار محوری است که به‌نوعی دوگان یک ماشین سوئیچ رلوکتانس است. قطب‌ها که حین چرخش هم‌تراز و ناهماهنگ هستند، در یک مایع دی‌الکتریک با چگالی انرژی بالا غوطه‌ور می‌شوند تا گشتاور خروجی بالاتری را فراهم کنند. در حالی که در ۹ کیلوولت کار می‌کند ماشین گشتاور متوسط ۱/۹ نیوتن‌متر را ارائه می‌دهد که چگالی گشتاور ۰/۵ نیوتن‌متر بر کیلوگرم^۳ و ۱/۲ نیوتن‌متر بر لیتر^۴ را تشکیل می‌دهد. تلفات رسانایی کم و سطح داخلی بزرگ دستگاه تقریباً شرایط خوبی را بابت خنک شوندگی بوجود می‌آورد [۸].

استفاده از مایعات دی‌الکتریک پیشرفته و تکنیک‌های ساخت برای افزایش سطح در واحد حجم ماشین‌های الکترواستاتیک را قادر می‌سازد تا در مقیاس بزرگ با چگالی گشتاور بالا به رقابت با سایر ماشین‌های

^۱ Finite Element Method

^۲ A Switched Elastance Electrostatic Machine

^۳ N-m/kg

^۴ N-m/L

الکترومغناطیس بپردازد. افزایش میزان گشتاور این ماشین‌ها نیاز به مدل‌سازی مدار درایو را بیش از پیش روشن ساخت تا به کمک این طراحی بهینه و کنترل‌های درایو بتوان این ماشین‌ها را کنترل کرد. نمونه اولیه دستگاه الکترواستاتیک کاملاً از آلومینیوم و بردهای مدار چاپی ساخته شد [۹].

مدلسازی و تحلیل یک مبدل انرژی الکترومکانیکی خازن متغیر در ابعاد کوچک^۱ اثرات هندسه ماشین بر روی پروفیل‌های خازنی و گشتاور ماشین را نشان می‌دهد. اثر اجزای مماسی و شعاعی نیروهای الکترواستاتیک در فاصله هوایی دستگاه برای بررسی شار متقابل بررسی شده‌اند. این مطالعات با استفاده از مدل اجزاء محدود^۲ یک میکرو ماشین خازن متغیر^۳ چهار فاز ۶/۸ انجام شده است. مدل دینامیکی دستگاه در سیمولینک^۴ برای به حداکثر رساندن گشتاور بر ولت دستگاه بررسی شده است [۱۰].

موتور الکترواستاتیک خطی با روتور سبک وزن^۵ نوع جدیدی از موتور الکترواستاتیک خطی است که بر اساس اصل اثر میدان الکتریکی بر روی مواد دی‌الکتریک کار می‌کند. موتور پیشنهادی ساختار ساده‌ای دارد که فرآیند تولید را ساده‌تر می‌کند. علاوه بر این موتور با روتور بسیار سبک طراحی شده است که در نتیجه اصطکاک و تلفات توان موتور کاهش می‌یابد و تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی خارجی قرار نمی‌گیرد. علاوه بر این این موتور دارای گزینه‌های کنترل حرکت پیشرفته است که امکان کنترل دقیق پروفیل‌های سرعت و موقعیت را فراهم می‌کند. نتایج شبیه‌سازی موتور پیشنهادی در حالت‌های عملکرد مختلف ارائه و تحلیل می‌شود [۱۱].

توسعه یک کنترل‌کننده شامل تقویت‌کننده‌های صوتی استریو، ترانسفورماتورهای کوچک و یک ژنراتور سیگنال برای یک موتور الکترواستاتیک با قدرت بالا^۶ قابل تعمیم است. ژنراتور سیگنال سیگنال‌های کنترل‌شده‌ای را برای حالت‌های عملکردی دو فرکانس تولید می‌کند تا یک موتور بتواند نیروی رانش مورد نیاز را تولید کند [۱۲].

^۱ Modeling and Analysis of a Micro Variable Capacitance Electromechanical Energy Converter

^۲ Finite Element Model

^۳ Variable Capacitance Machine

^۴ Simulink

^۵ Novel Differential Linear Electrostatic Motor with Light Weight Rotor

^۶ Development of a Controller for a High-Power Electrostatic Motor

ویژگی های عملکردی درایوهای میکروموتور خازن متغیر^۱ با مطالعه ای از اصول الکترومکانیکی درگیر در یک میکروموتور خازنی متغیر^۲ گزارش می شود. همچنین تحلیل نیروی الکترواستاتیک با استفاده از روش های خاصی که می تواند برای تخمین چگالی نیرو در شکاف هوا مورد استفاده قرار گیرد بررسی می شود. یک اینورتر چند سطحی برای این ماشین طراحی و شبیه سازی شده که مقدار ولتاژ آن را تامین می کند. در موتور پیشنهادی در مقایسه با موتورهای الکترواستاتیک اندازه مشابه با استفاده از الکترودهای فعال در روتور و استاتور توان به طور قابل توجهی بهبود می یابد. علاوه بر این الکترودهای روتور به طور غیرمستقیم و از طریق الکترودهای القایی روی روتور و استاتور شارژ می شوند تا سیستم سیم کشی را از بین ببرند. این ویژگی ها قابل توجه در طراحی جدید از جمله سادگی، فشرده بودن و وزن سبک امکان ارائه روتور بدون تماس را فراهم می کند [۱۳].

عملکرد موتور الکترواستاتیک سنکرون با القا ولتاژ^۳ با استفاده از مدل سازی تحلیلی بررسی می شود. در مقایسه با موتورهای الکترواستاتیک اندازه مشابه موتور پیشنهادی با استفاده از الکترودهای روتور و استاتور توان به طور قابل توجهی بهبود می یابد. علاوه بر این الکترودهای روتور به طور غیرمستقیم و از طریق الکترودهای القایی موجود روی روتور و استاتور شارژ می شوند تا سیستم سیم کشی را از بین ببرند. به منظور بررسی عملکرد از روش ماتریس ظرفیت استفاده شده است که در آن ضرایب به صورت عددی و با استفاده از روش اجزای محدود محاسبه می شوند. علاوه بر این ولتاژهای القایی و معادله گشتاور موتور به صورت تحلیلی بدست آمده و با استفاده از نمونه اولیه ساخته شده و تنظیمات آزمایشگاهی تأیید شده است [۱۴].

موتور الکترواستاتیک ولتاژ بالا با استفاده از الکترودهای اریب^۴ نوع جدیدی از موتورهای الکترواستاتیک توان بالا است. درایو الکترواستاتیک چند فازی^۵ بهترین عملکرد را از نظر قدرت دارد. نسبت قدرت به

^۱ Operational characteristics of Variable Capacitance Micromotor Drives: A Preliminary Investigation

^۲ Variable Capacitance Machine

^۳ Voltage-induction synchronous electrostatic motor

^۴ A High-Power Electrostatic Motor Using Skewed Electrodes

^۵ DEMED

وزن تقریباً با پیشرفته‌ترین موتورهای الکترومغناطیسی معمولی یکسان است. با این حال ایراد درایو الکترواستاتیک چندفازی شامل کنترل‌پذیری کم، نویز زیاد و لرزش است. برای غلبه بر این معایب از تکنیک الکتروداریب برای درایو الکترواستاتیک چندفازی استفاده شده و اثرات انحراف الکترودها بررسی می‌شوند. تجزیه و تحلیل‌ها حاکی از آن است که انحراف مناسب الکترودها می‌تواند موج نیرو را به میزان قابل توجهی کاهش دهد [۱۵].

تنظیم الکتروداریب برای عملکرد موتورهای الکترواستاتیک ولتاژ القایی^۱ یک تئوری را برای ویژگی‌های موتورهای الکترواستاتیک ولتاژ القایی^۲ نشان می‌دهد. این موتورها یکی از موتورهای الکترواستاتیک در مقیاس بزرگ هستند که دارای الکترودهای چند فازی بر روی روتور و استاتورها هستند. موتور به دلیل استفاده از منبع تغذیه غیرمستقیم و با استفاده از القای الکترواستاتیک بدون اتصال سیم‌های تغذیه ولتاژ به روتور به طور همزمان حرکت می‌کند. در این حالت روتور و استاتور دارای الکترودهای فاز m و n با اعداد دلخواه هستند [۱۶].

محققین دو نوع محرک الکترواستاتیکی به هم پیوسته را توسعه داده‌اند که توسط سیگنال تحریک پالس هدایت می‌شوند. یکی از این عملگرها عملکرد عالی قابل مقایسه با موتورهای الکترومغناطیسی داشت. با این حال کارایی مدار محرک برای کاربردهای عملی کافی نبود. برای بهبود راندمان نوع جدیدی از عملگر الکترواستاتیکی که می‌تواند توسط تحریک جریان متناوب هدایت شود توسعه داده شد. محرک جدید یک محرک سطحی خطی با وزن ۷ گرم و متشکل از یک روتور نازک و یک استاتور است. هر عنصر دارای الکترودهای ۳ فاز با گام یکسان است و درایور متناوب^۳، ۳ فاز متصل به الکترودهای محرک را راه اندازی می‌کند. ساختار الکتروداریب جدید راندمان را با ضریب تقریباً چهار بهبود می‌بخشد. علاوه بر این عملکرد تولید نیرو بهبود می‌یابد. توان ۱/۶ وات و نیروی پیشرانیش ۴/۴ نیوتن تولید می‌شود. نسبت قدرت به وزن با ضریب حدود سه بهبود یافته است [۱۷].

^۱ Effects of Electrode Configuration for Performances of Voltage-Induction-Type Electrostatic Motors

^۲ VITEMs

^۳ AC

برای مدل سازی و تحلیل یک موتور القایی الکترواستاتیک خطی با در نظر گرفتن عدم تعادل خازنی^۱ از یک موتور آسنکرون که از استاتور و روتور خطی با الکترودهای سه فاز تشکیل شده است استفاده می شود که توسط ولتاژ سه فاز اعمال شده به استاتور هدایت می شود. الکترودهای لغزنده به سه سیم پیچ متصل می شوند که ولتاژ روتور را قادر می سازد نیروی رانش زیادی تولید کند. موتور به عدم تعادل ظرفیت خازنی بسیار حساس است. مدل نشان می دهد که عدم تعادل ظرفیت منجر به یک ولتاژ روتور نامتعادل با دو جزء فرکانس می شود و باعث موج نیروی رانش می شود [۱۸].

۱-۴ اهداف این پایان نامه

با توجه به مطالعات گذشتگان در خصوص ماشین های الکتروستاتیک و پیشرفت این مطالعات در خصوص بهینه سازی و گسترش کاربرد این ماشین ها و با وجود مشکلاتی اعم از هزینه ساخت و تعمیر و نگهداری، پیچیدگی ساختار، عیب یابی و تعمیر طولانی مدت در تجهیزات صنعتی فعلی حرکت به سمت استفاده از ساختار ماشین های الکتروستاتیک انگیزه اصلی نگارش این پایان نامه است. به طور دقیق تر، اهداف این پایان نامه به شرح زیر است :

۱- با توجه به محدود بودن منابع داخلی در خصوص این نوع خاص از ماشین ها و عدم آشنایی و شناخت محققین مهم ترین هدف از بررسی این موضوع و نگارش این پایان نامه بررسی ساختارهای مختلف ماشین های الکتروستاتیک و شناخت هرچه بیشتر این دسته خاص از ماشین های الکتریکی است.

۲- بررسی و جمع بندی در خصوص یک ساختار ساده اما در عین حال پر کاربرد در ساختار ماشین های الکتروستاتیک برای یک کاربرد خاص از دیگر اهداف این پایان نامه می باشد.

¹ Modeling and Analysis of a Linear Resonant Electrostatic Induction Motor Considering Capacitance Unbalance

۳- تلاش برای شبیه‌سازی و ساخت یک نمونه اولیه و آزمایشگاهی از ساختار کاربردی ماشین الکترواستاتیک با مواد اولیه ساده و در دسترس و انجام تست‌های آزمایشگاهی و حصول نتیجه در خصوص کاربرد مد نظر این پایان‌نامه نیز از دیگر اهداف انجام این پروژه می‌باشد.

۱-۵ ساختار پایان‌نامه

در فصل نخست مقدمه‌ای در خصوص ماشین‌های الکترواستاتیک ارائه شده و تفاوت‌های آن با ماشین‌های الکترومغناطیس مورد بررسی قرار می‌گیرد. نقطه شروع این ماشین‌ها مورد بررسی قرار گرفته و آخرین تحقیقات در راستای بهبود عملکرد آن‌ها بررسی می‌شود.

در فصل دوم به بررسی تحقیقات پیشینیان در مورد سیستم‌های الکترواستاتیک و سنسورهای مختلف پرداخته می‌شود.

در فصل سوم به تئوری محاسباتی ماشین‌های الکترواستاتیک پرداخته می‌شود. مقادیر خازن‌های یک ماشین الکترواستاتیک محاسبه شده و ماتریس خازنی پس از معرفی، محاسبه می‌شود.

در فصل چهارم روش تحقیق، طراحی، شبیه‌سازی و نتایج اولیه شبیه‌سازی‌ها بررسی شده و با استفاده از نتایج بدست آمده ساختار نهایی معرفی می‌شود. شبیه‌سازی‌های مربوط به این ساختار انجام شده و نتایج گزارش می‌شود. در نهایت ساختار مورد تایید از هر نظر بصورت یک نسخه آزمایشگاهی ساخته شده و نتایج عملی با تئوری مقایسه می‌گردد.

در فصل پنجم تاییده نظریه بررسی و جمع بندی می‌شود. پیشنهاد تحقیق برای ادامه این پایان‌نامه نیز بیان می‌شود.

فصل ۲ بررسی سنسورها و ماشین های الکتروستاتیک

۱-۲ مقدمه

ماشین‌های الکترواستاتیک دسته‌ای از انواع ماشین‌های الکتریکی به حساب می‌آیند که به نوعی دوگان ماشین‌های الکترومغناطیسی محسوب می‌شوند. امروزه تحقیقات زیادی درباره این ماشین‌ها انجام شده که حوزه‌های عملکردی مختلفی را در برمی‌گیرد. از جمله این تحقیقات می‌توان به ماشین‌های الکترومکانیکی ابعاد کوچک^۱، سنسورها و عملگرها و ... اشاره کرد. یکی از موضوعات جذاب در مورد این ماشین‌ها، نحوه عملکرد و کاربرد آن‌ها بجای سنسورهاست. همانطور که بیشتر بررسی خواهد شد، این نوع ماشین‌ها دارای ویژگی‌های منحصر به فردی هستند که استفاده از آن‌ها را در حوزه‌های مختلف منطقی می‌کند. یکی از این حوزه‌ها کاربرد دستگاه‌های الکترواستاتیک گردان بعنوان سنسور اندازه‌گیری دور موتور است.

۲-۲ مقایسه ساختار ماشین الکترواستاتیک و الکترومغناطیس

استفاده از آهنربای مغناطیسی دائمی^۲ فن‌آوری اولیه برای موتورهای خنک شونده با سرعت پایین است که از مواد شیمیایی کمیاب استفاده می‌کنند. این موضوع در مورد سایر ماشین‌های دوار و سیستم‌های تهویه مطبوع نیز صادق است. ماشین‌هایی که با استفاده از جریان هوا خنک می‌شوند عمدتاً از سه ماده فولاد، مس و آهنرباهای کمیاب خاک تشکیل شده‌اند. این مواد از نظر خواص مکانیکی برای کاربرد ماشینی مناسب بوده و دارای حداکثر کارایی در کاربردهای موتوری با سرعت نامی هستند. ماشین‌های محرک مستقیم^۳ از مقادیر زیادی آهنربای خاکی کمیاب به ویژه مواد شیمیایی مغناطیسی بر اساس نئودیمیوم و دیسپوزیم استفاده می‌کنند. منابع تلفات الکتریکی در این ماشین‌های با سرعت پایین عمدتاً بصورت گرمایش در سیم پیچ‌های مسی است.

^۱ MicroElectroMechanical Machines

^۲ Permanent Magnet

^۳ Direct Drive Machines

در ماشین‌های با سرعت کم مانند ژنراتورهای توربین بادی کمتر از ۱۰۰۰ دور در دقیقه مواد آهنربایی و مس به ترتیب تقریباً ۱۰٪ و ۲۰٪ از جرم ماشین را تشکیل می‌دهند. جرم کل ماشین‌های محرک مستقیم معمولاً ۳ تا ۵ برابر ماشین‌های با سرعت بیشتر است که با گیربکس جفت شده‌اند.

در دسترس بودن آینده مس، نئودیمیم و دیسپوزیم نامشخص است و مطالعات بازار نشان می‌دهد که قیمت این مواد بی‌ثبات است که در اثر تغییرات میزان تولید و تقاضا مشخص می‌شود. به موازات این انرژی مورد استفاده برای تولید مواد اولیه پیش از محصول را نیز باید در نظر گرفت.

انرژی مورد نیاز برای استخراج و آماده‌سازی خاک‌های کمیاب آنقدر زیاد است که با وجود اینکه تنها ۱۰٪ از جرم ماشین الکتریکی را در بر می‌گیرد، ۵۰٪ از کل انرژی مورد نیاز ساخت مواد اولیه را شامل می‌شود. مشاهدات دیگر جدول تناوبی نشان می‌دهد که مواد تشکیل‌دهنده ماشین‌های الکتریکی معمولی اساساً سنگین هستند و در ردیف ۴ یا پایین جدول تناوبی قرار دارند.

یک ماشین الکترواستاتیک نیاز فولاد، مس و خاک‌های کمیاب را به عنوان مواد اولیه به طور کلی دور می‌زند و در عوض از عناصری با رنگ سبز که روی جدول تناوبی زیر نشان داده شده است استفاده می‌کند که عمدتاً در ۳ ردیف اول جدول تناوبی قرار داشته و این عناصر فراوان، نسبتاً کم هزینه و سبک وزن هستند. ماشین‌های الکترواستاتیک را می‌توان با استفاده از سطوح رسانای بسیار نازک (به عنوان مثال آلومینیوم یا مس) که روی یک چارچوب دی‌الکتریک (به عنوان مثال صفحات پلاستیکی یا مدار چاپی) و یک شفت فولادی^۱ که همگی داخل یک محیط مایع دی‌الکتریک قرار دارند ساخت [۱۹].

^۱ Fe



۲-۳ انواع

ماشین الکتروستاتیک

در مقایسه نیروی الکترواستاتیک و الکترومغناطیس ماشین‌های الکترواستاتیک بصورت دوگان ماشین‌های الکترومغناطیس معرفی می‌شوند. همانطور که در ماشین‌های الکترومغناطیس مفاهیمی چون ولتاژ و شار مغناطیسی وجود دارد در این ماشین‌ها از معادل جریان و بار الکتریکی استفاده می‌شود. در این ماشین‌ها مولفه‌های کاپاسیتانس و الاستانس الکتریکی بصورت دوگان اندوکتانس و رلوکتانس مغناطیسی است. از شباهت‌ها و دوگانگی‌ها بین ماشین‌های الکترومغناطیس و الکتروستاتیک می‌توان این نتیجه را بدست آورد که اصول عملکردی دو ماشین نیز تا حدی به یکدیگر شباهت داشته باشد. در نتیجه این دسته از ماشین‌ها بر اساس یک تقسیم‌بندی به شرح ذیل قابل بیان است:

۱- ماشین الکتروستاتیک سنکرون^۱

۲- ماشین الکتروستاتیک القایی^۲

۳- ماشین‌های خازن متغیر^۳

^۱ Electrostatic Synchronous Machine

^۲ Electrostatic Induction Machine

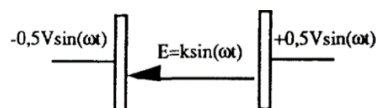
^۳ Variable Capacitance Machine

هر کدام از ساختارهای فوق بر مبنای پارامترهای نیرو، گشتاور و قابلیت بهینه‌سازی برای بهبود عملکرد در کاربردهای مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه به بررسی بیشتر هر کدام از این ماشین‌ها پرداخته خواهد شد.

۲-۳-۱ ماشین الکتروستاتیک القایی

۲-۳-۱-۱ مدل سازی موتور الکتروستاتیک القایی

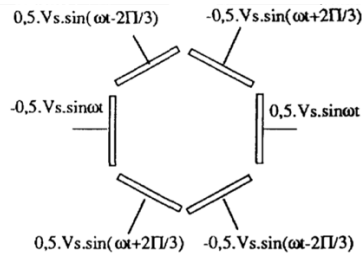
از نظر تئوری ماشین‌های الکتروستاتیک القایی شبیه به ماشین‌های الکترومغناطیس القایی است بدین صورت که ولتاژ و میدان الکتریکی معادل جریان و میدان مغناطیسی است. یک ماشین الکتروستاتیک القایی به یک میدان الکتریکی گردان در استاتور خود نیاز دارد. مشابه ماشین الکترومغناطیس القایی این اتفاق بوسیله منبع ولتاژ سه فاز که به الکترودهای در اطراف استاتور متصل شده است شکل می‌گیرد. به منظور ایجاد یک توزیع میدان الکتریکی متناوب، هر فاز از یک جفت الکتروود تشکیل شده که با ولتاژ سینوسی مخالف تغذیه می‌شوند.



شکل ۲-۲ یک جفت الکتروود^۱

شکل ۲-۳ ساختار نهایی استاتور سه فاز یک ماشین دو قطب را نشان می‌دهد.

^۱ J.F. Charpentier; Y. Lefevre; E. Sarraute; B. Trannoy, (۱۹۹۰) "Synthesis And Modelling of an Electrostatic Induction Motor" IEEE



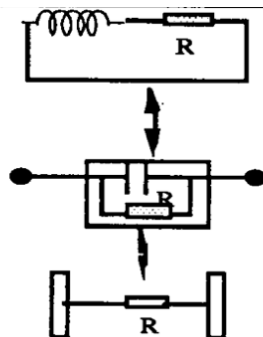
شکل ۲-۳ الکترود های یک ماشین الکتروستاتیک القایی^۱

در ماشین الکترومغناطیس القایی به دلیل قانون لنز و قانون اهم میدان مغناطیسی گردان باعث ایجاد ولتاژ و جریان در سیم پیچ‌های روتور می‌شود. طبق قانون لنز این جریان‌ها اثرات مغناطیسی ایجاد می‌کنند که تعادل شار را در سیم‌پیچ روتور معکوس می‌کند. در ماشین‌های با روتور قفسه‌ای سیم‌پیچ‌های روتور اتصال کوتاه است. رابطه بین شار و جریان در سیم‌پیچ‌ها به صورت زیر است که در آن e نیروی محرک مغناطیسی است.

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad \text{and} \quad Ir = \frac{e}{R}$$

معادله ۲-۱

یک پدیده القایی معادل را می‌توان با استفاده از القای الکتریکی به دست آورد. در یک ماشین الکتروستاتیک القایی میدان الکتریکی گردان باعث ایجاد ولتاژ و بار بر روی الکترودهای روتور می‌شود. با توجه به دوگانگی بین این دو موتور روتور یک ماشین الکتروستاتیک القایی می‌تواند از جفت الکترود جدا شده متصل به مقاومت تشکیل شود.



شکل ۲-۴ مدار معادل یک ماشین الکتروستاتیک^۱

^۱ J.F. Charpentier; Y. Lefevre; E. Sarraute; B. Trannoy, (۱۹۹۵) "Synthesis And Modelling of an Electrostatic Induction Motor"

رابطه بین شارژ الکتریکی و ولتاژ بین دو الکترود برای هر فاز برابر است با:

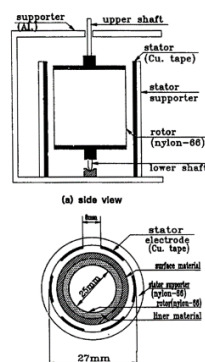
$$Ir = \frac{dQr}{dt} \quad \text{and} \quad Vr = -\frac{Rr}{Ir}$$

معادله ۲-۲

جریان روتور فعلی بین دو الکترود نقش نیروی محرکه مغناطیسی را در ماشین الکترومغناطیس القایی دارد و می‌توان آن را نیروی محرک فعلی نامید [۲۰].

۲-۱-۳-۲ ماشین الکتروستاتیک کوچک مقیاس

ماشین‌هایی که از نیروی الکتروستاتیک استفاده می‌کنند تاریخچه مفصلی دارند. حدوداً ۱۰۰ سال قبل از ساخته شدن موتور مغناطیسی آندرو گوردن در دهه ۱۸۵۰ یک موتور الکتروستاتیک را بوجود آورد. با وجود سابقه درخشان و طولانی اما موتورهای الکترواستاتیک به دلیل ولتاژهای بالا و دقت مکانیکی مورد نیاز برای ساخت کاربرد کمی پیدا کرده‌اند. اخیراً موتورهای الکترواستاتیک بدلیل مزایایی از قبیل سهولت کوچک کردن اندازه ماشین گشتاور بالاتر در مقایسه با اندازه آن‌ها کارکرد ملایم‌تر و تولید انبوه، بیشتر توسط محققین مورد مطالعه و توسعه قرار گرفته است.



شکل ۲-۵ یک ماشین الکتروستاتیک القایی کوچک مقیاس^۱

^۱ J.-D. Moon; D.-H. Lee, (۱۹۹۳) "A Miniature Size Electrostatic Induction Motor" Conference Record of the ۱۹۹۳ IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting

شکل ۲-۵ یک نمونه ماشین الکتروستاتیک القایی را نشان می‌دهد. قطر خارجی روتور ۲۵ میلی-متر، قطر داخلی ۲۳ میلی-متر و طول آن نیز ۵۰ میلی-متر است. روتور بوسیله یک پایه از جنس استیل ضدزنگ به قطر ۲ میلی-متر متصل شده است. وزن تقریبی این روتور حدودا ۱۰ گرم است.

استاتور نیز همانند روتور از جنس نایلون ۶۶^۱ با قطر داخلی ۲۷ میلی-متر و طول ۸۰ میلی-متر طراحی شده است. روی سطح داخلی استاتور، تعداد ۶ الکتروستاتیلی نازک از جنس مس با عرض ۷ میلی-متر و فاصله ۷ میلی-متری بین هر الکتروست که بصورت موازی با محور روتور برای هر سه فاز متصل به منبع ولتاژ متناوب است طراحی شده است. فاصله هوایی بین روتور و استاتور باید طوری تعیین شود تا بالاترین سرعت و بیشترین گشتاور را داشته باشیم اما فاصله هوایی کوچک مشکلاتی را برای ساخت مکانیکی نیز بوجود می‌آورد و فاصله هوایی بزرگتر باعث کاهش سرعت و گشتاور می‌شود. در این آزمایش فاصله هوایی ۱ میلی-متر در نظر گرفته شده است. سرعت این موتور با یک تاکومتر دیجیتال اندازه گرفته می‌شود. اطلاعات ابعادی آن در جدول ۲-۱ آورده شده است.

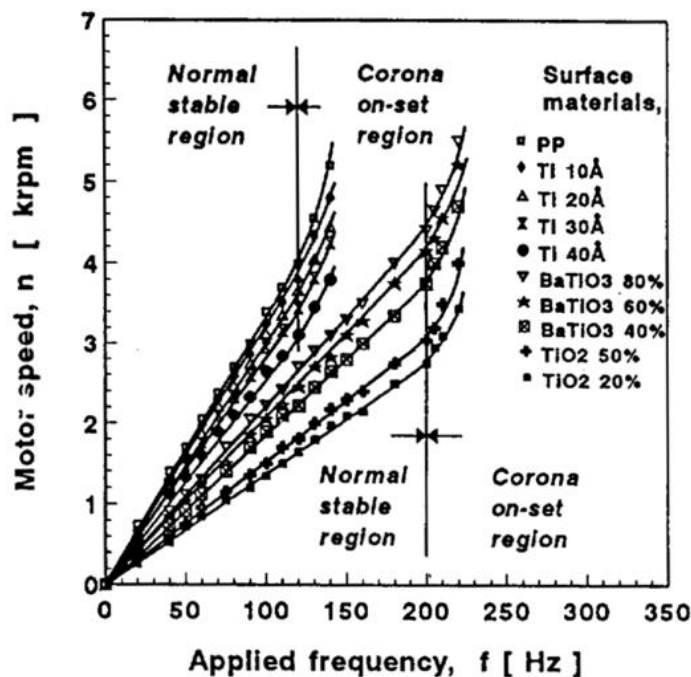
جدول ۲-۱ ابعاد موتور الکتروستاتیک تست شده

specifications of motor tested	
airgap, g	1.0 mm
outer diameter of rotor, d_{or}	25.0 mm
inner diameter of rotor, d_r	23.0 mm
length of rotor, l_r	50.0 mm
weight of rotor, m	10.0 g
surface area of rotor, s	$98.2 \times 10^3 \text{ mm}^2$
diameter of stator, d_s	27.0 mm
width of stator electrode, w	7.0 mm
interelectrode spacing between stator electrode, t	8.0 mm
number of pole, p	3
pole pitch, p_p	2
applied voltage to the motor tested, V	0 - 5100 V
applied frequency to the motor tested, f	0 - 300 Hz

نمودار شکل ۲-۶ سرعت موتور را بصورت تابعی از فرکانس برای ۳ فاز متناوب در وضعیت ۱۰ حالت مختلف برای مواد متفاوت سطح روتور در ولتاژ ثابت ۴/۵ کیلوولت جایی که سطح مواد روتور از مس پوشیده شده، نشان داده شده است. سرعت موتور بصورت خطی با افزایش فرکانس می‌یابد

¹ Nylon-66

اما بطور غیرطبیعی در فرکانس‌های بالا کاهش می‌یابد و می‌توان اثر کرونا را در فاصله هوایی بین روتور و استاتور مشاهده کرد. نتیجه این موضوع نشان می‌دهد سرعت یک موتور را می‌توان با تغییر فرکانس کنترل کرد [۲۱].



شکل ۲-۶ سرعت موتور بصورت تابعی از فرکانس^۱

۲-۳-۲ ماشین الکتروستاتیک سنکرون

۲-۳-۲-۱ ماشین الکتروستاتیک سنکرون با القای ولتاژ

در پاسخ به افزایش کاربرد میکروماشین‌ها در صنایع الکترونیک و مکترونیک و به دلیل تاثیر وزن و اندازه محرک‌های متحرک در روبات‌های کوچک بر رفتار پویای سیستم‌ها، طراحی و ساخت محرک-های کوچک و سبک مورد نیاز است.

عملگرهای الکترومغناطیسی نسبتاً سنگین و بزرگ هستند و استفاده از آن‌ها را در چنین کاربردهایی محدود می‌کند. علاوه بر این در برخی از کاربردها میدان الکترومغناطیسی بر عملکرد سایر دستگاه‌ها

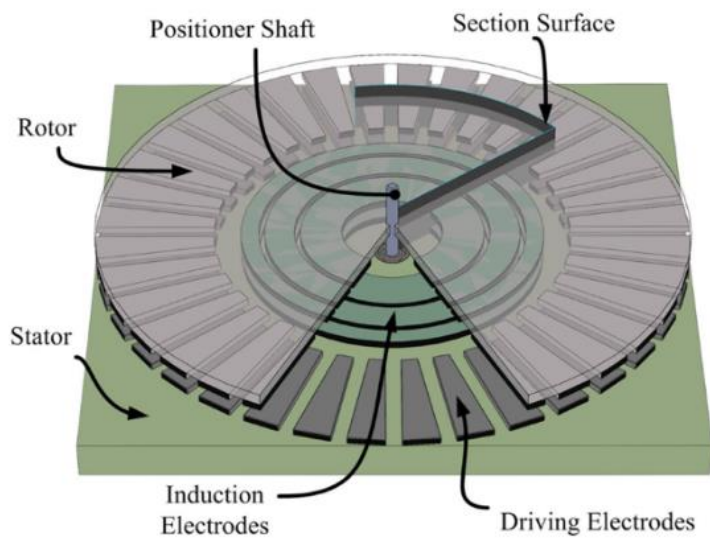
^۱ J.-D. Moon; D.-H. Lee, (۱۹۹۳) "A Miniature Size Electrostatic Induction Motor" Conference Record of the ۱۹۹۳ IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting

تأثیر می‌گذارد که منجر به نتایج نامطلوب می‌شود. برای غلبه بر این مسائل عملگرهای متعددی مانند عملگرهای پیزوالکتریک، عملگرهای آلیاژ حافظه شکل و عملگرهای الکترواستاتیک معرفی شده‌اند. عملگرهای پیزوالکتریک قدرت و سرعت بالایی تولید می‌کنند. با این حال به دلیل جابجایی کوچکی که می‌توانند ارائه دهند کاربرد آن‌ها محدود است. آلیاژ حافظه شکل نیز در برخی از سیستم‌ها به عنوان محرک استفاده شده است اما عملکرد آن‌ها محدود به حرکات کم‌توان و فرکانس پایین است. علاوه بر این همه این محرک‌ها به مواد خاصی با فرایندهای تولید خاص نیاز دارند که باعث گران شدن آن‌ها می‌شود.

موتورهای الکترواستاتیک به عنوان محرک‌های جدید برخلاف موتورهای الکترومغناطیسی که از نیروی مغناطیسی برای تولید گشتاور استفاده می‌کنند از نیروی الکترواستاتیک تولید شده بین بارهای الکتریکی مثبت و منفی بهره می‌برد.

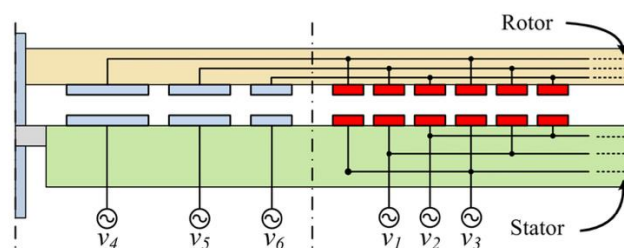
در مقیاس کوچک قدرت خروجی موتورهای الکترواستاتیک نسبت به سایر آن‌ها به طور قابل توجهی بیشتر از سایر انواع موتورها است که از آن در وسایل ریز و سیستم‌های الکترومکانیکی کوچک بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. سادگی در فرآیند ساخت به دلیل ساختار فشرده نیز یکی دیگر از ویژگی‌های این نوع موتورها است که آن‌ها را مورد توجه قرار می‌دهد.

اخیراً تحقیقات متعددی بر روی موتورهای الکترواستاتیک انجام شده تا مزایای آن‌ها از قبیل فشردگی، وزن سبک و سادگی را در مقیاس بزرگ گسترش یابد.



شکل ۲-۷ شماتیک قطب های ماشین الکتروستاتیک سنکرون^۱

شکل ۲-۷ شماتیک موتور را نشان می دهد. آرایش الکترودها و اتصالات بین الکترودها و سیگنال ها در شکل ۲-۸ که نمای مقطعی از شکل ۲-۷ است را نشان می دهد.



شکل ۲-۸ طبقه بندی روتور و استاتور^۱

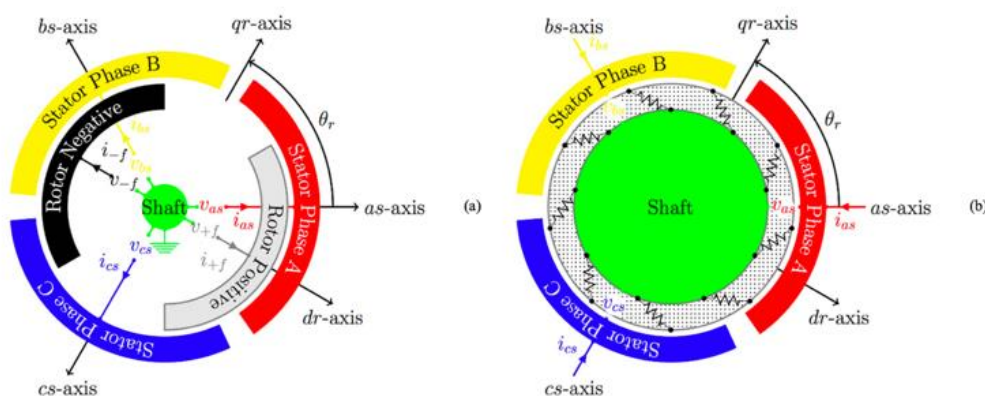
الکترودهای محرک که برای ایجاد گشتاور طراحی شده اند الکترودهای شعاعی با آرایش چرخشی هستند. هر سه الکترودها مجاور به یکی از فازهای سیگنال متناوب سه فاز متصل می شوند [۲۲].

^۱ A Miniature Size Electrostatic Induction Motor Article

۲-۳-۲ فریم dq برای ماشین های الکترواستاتیک سنکرون

نوآوری هایی نظیر مایعات دی الکتریک پیشرفته و همچنین ابزارهای طراحی و تولید دست به دست هم داده تا اخیراً ماشین های الکترواستاتیک را در مقیاس کسری از اسب بخار بتوان تولید کرد. این ماشین ها در مقایسه با نمونه های معمولی الکترومغناطیسی خود عملکرد رقابتی را نشان داده اند. رقابت قبلاً محدود به سیستم های میکروالکترومکانیکال^۱ بود.

مشابه یک ماشین الکترومغناطیسی سنتی یک ماشین الکترواستاتیک سنکرون سه فاز ولتاژ متناوب مجهز به تحریک میدان مستقیم^۲ و دمپر^۳ است که به صورت مجموعه ای از الکترودهای استاتور سه فاز، دو الکتروود روتور خارج از فاز و عایق های دمپر الکتریکی می باشد. این موضوع در شکل ۹-۲ (a) و (b) جداگانه نشان داده شده است.



شکل ۹-۲ تفاوت ماشین سنکرون و القایی^۳

شکل ۹-۲ (a) تصویر ماشین سنکرون قطب برجسته با تحریک جداگانه را نشان می دهد در حالی که (b) یک ماشین القایی است.

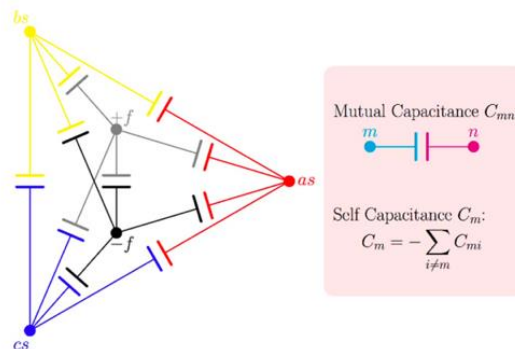
¹ MicroElectroMechanical Systems

² DC

³ A dq-Axis Framework for Electrostatic Synchronous Machines and Charge Oriented Control Article

بر اساس دوگانگی بین ماشین الکترومغناطیس یک ماشین الکترواستاتیک با ولتاژ کار می‌کند. دستگاه معادلات کلی ماشین دارای ۹ معادله پایانی است که شامل سه ترمینال استاتور، دو ترمینال میدانی، چهار ترمینال دمپر موجود است.

شکل ۲-۱۰ اتصالات خازنی بین پایانه ها را بدون در نظر گرفتن دمپر نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۰ اتصالات خازنی بین پایانه های ماشین^۱

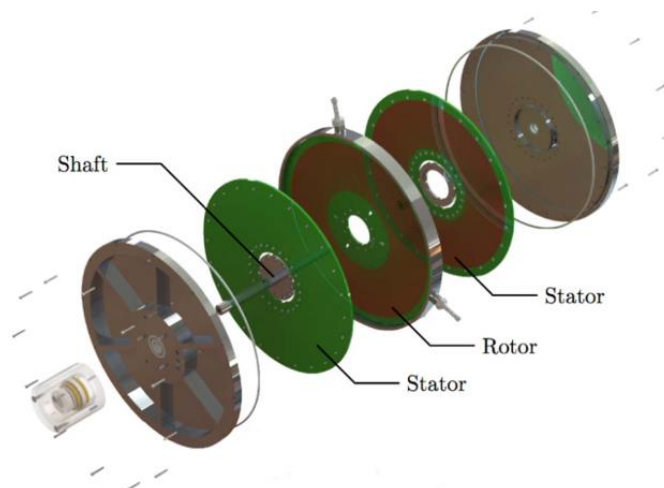
رابطه بین بارهای ساکن در هر ترمینال و ولتاژهای پایانه را می‌توان به صورت ماتریس زیر با استفاده از ظرفیت های اتصال در سمت راست شکل فوق بیان کرد.

$$\begin{bmatrix} Q_{as} \\ Q_{bs} \\ Q_{cs} \\ Q_{+f} \\ Q_{-f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{as} & C_{abs} & C_{acs} & C_{as+f} & C_{as-f} \\ C_{bas} & C_{bs} & C_{bcs} & C_{bs+f} & C_{bs-f} \\ C_{cas} & C_{cbs} & C_{cs} & C_{cs+f} & C_{cs-f} \\ C_{+fas} & C_{+fbs} & C_{+fcs} & C_{+f} & C_{+-f} \\ C_{-fas} & C_{-fbs} & C_{-fcs} & C_{-+f} & C_{-f} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \\ v_{+f} \\ v_{-f} \end{bmatrix}$$

معادله ۲-۳ - ماتریس خازن

ساختار کلی این ماشین به شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است [۲۳].

¹ A dq-Axis Framework for Electrostatic Synchronous Machines and Charge Oriented Control Article



شکل ۲-۱۱ ساختار کلی یک ماشین الکتروستاتیک سنکرون^۱

۳-۳-۲ ماشین های الکتروستاتیک خازن متغیر

۳-۳-۲-۱ مدل سازی یک مبدل انرژی الکترومکانیک خازن متغیر مقیاس کوچک

اخیرا فناوری سیستم های میکروالکترومکانیکی^۲ پیشرفت چشمگیری داشته است. ایجاد حسگرها و محرک ها برای کاربردهای مختلف مقیاس کوچک پیشرفت وسیعی را در این زمینه به ارمغان آورده است. همچنین تلاش قابل توجهی در کوچک سازی دستگاه های مختلف الکترومکانیکی صورت گرفته است. به طور معمول اندازه های کوچک سطح ایمنی سیستم را بهبود بخشیده، بهره وری را در دراز مدت افزایش می دهد و همچنین امکان راه اندازی مدولار کوچک تر را فراهم می کند که منجر به گزینه های بیشتر و انعطاف پذیری می شود.

علاوه بر این نسبت سطح به حجم سیستم کوچک سازی شده نیز به ساخت یک سیستم فشرده تر کمک می کند و امکان ادغام سیستم مکانیکی با وسایل الکترونیکی مورد نیاز برای کنترل حلقه بسته را فراهم می آورد. این ماشین ها به دلیل جدید بودن اغلب در اکثر ماشین های الکتریکی سیستم های الکترونیک قدرت و درایوها مورد بحث قرار نمی گیرند اما نشانه های امیدوار کننده ای از کاربردهای متعدد در آینده

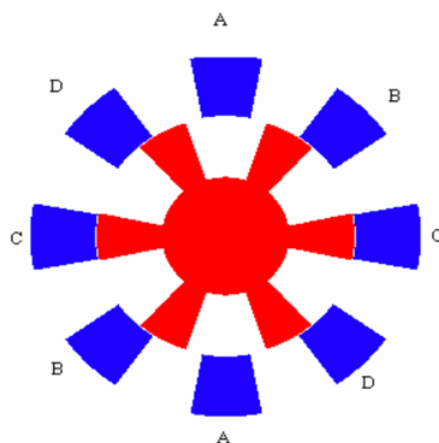
^۱ A dq-Axis Framework for Electrostatic Synchronous Machines and Charge Oriented Control Article

^۲ MicroElectroMechanical Systems

نزدیک از جمله کاربردهای زیست پزشکی مانند سیستم‌های تحویل دارو، ابزار جراحی و کاوشگرها به چشم می‌خورد.

در میان انواع میکروموتورهای دوار الکترواستاتیک که امروزه استفاده می‌شود میکرو موتور خازن متغیر^۱ ساده‌ترین ساختار مکانیکی را دارد. اخیراً تحقیقات زیادی برای بهبود درک قوانین طراحی و بهینه‌سازی فرآیند سیستم‌های الکترواستاتیک دوار انجام شده است.

طراحی مدل اجزای محدود میکرو ماشین خازن متغیر مشابه دستگاه مغناطیسی آن یعنی ماشین سوئیچ رلکتانسی است. شکل ۲-۱۲، یک میکرو ماشین خازن متغیر شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۲ ماشین الکتروستاتیک ۲۶/۸

از آنجا که خازن به‌طور مستقیم متناسب با سطح همپوشانی بین دو صفحه شارژ شده است خازن بین استاتور و روتور در این موقعیت بیشترین مقدار خود است. همانطور که در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده در این حالت گشتاور روی روتور تقریباً صفر است.

¹ Variable Capacitance Machine

² Modeling and Analysis of a Micro Variable Capacitance Electromechanical Energy Converter

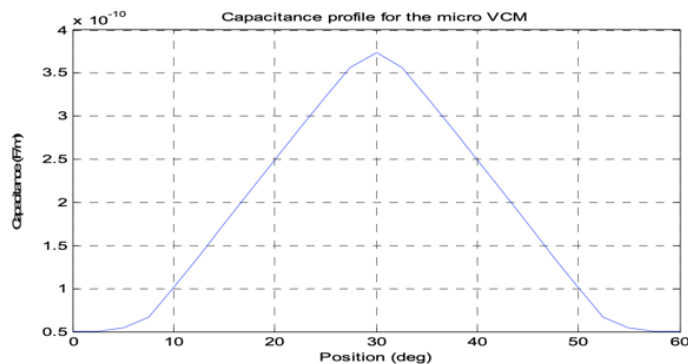
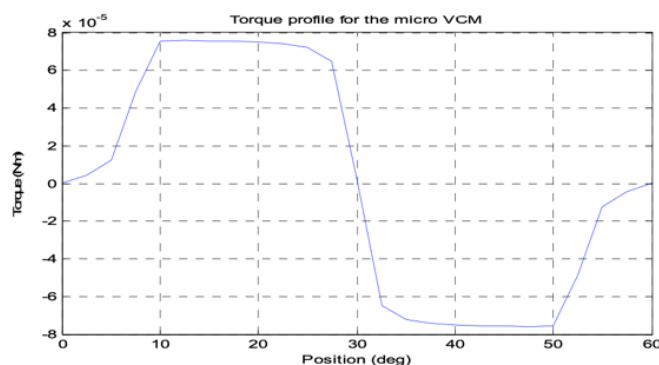


Fig. 2 Capacitance profile of micro VCM

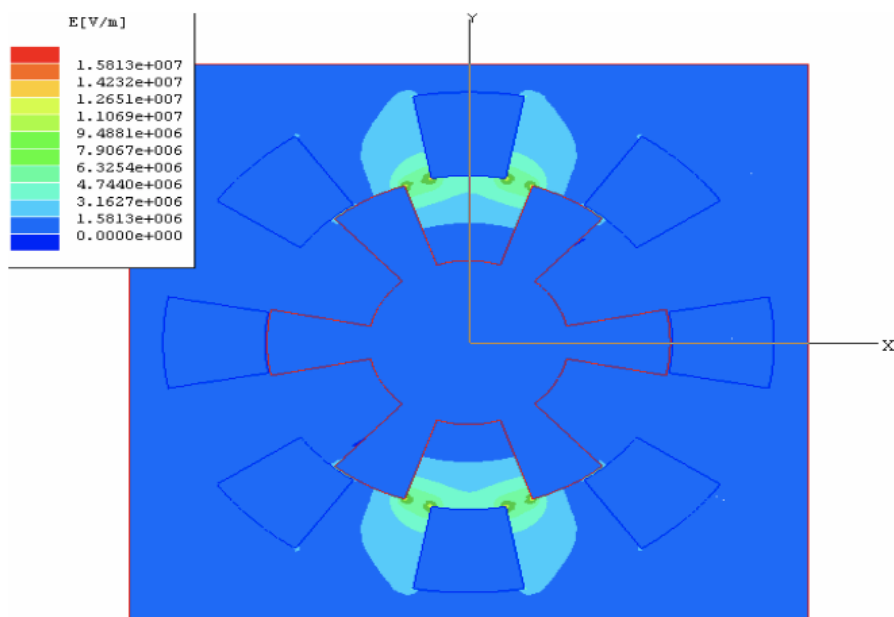


شکل ۲-۱۳ نمودار تغییرات خازنی و گشتاور^۱

طبق تعریف موتور مقیاس کوچک و یا میکروموتور دارای ابعادی کمتر از ۱ میلی‌متر در هر جهت است. بنابراین شعاع داخلی و خارجی استاتور و روتور با در نظر گرفتن این تعریف انتخاب شده‌اند. شعاع داخلی و خارجی استاتور به ترتیب ۰/۳ میلی‌متر و ۰/۴۵ میلی‌متر است. به طور مشابه شعاع داخلی و خارجی روتور به ترتیب ۰/۱۴۷ و ۰/۲۹۷ میلی‌متر است. طول فاصله هوا ۰/۰۳ میلی‌متر است. انتخاب قطب برای این ماشین کوچک شبیه به ماشین سوئیچ رلوکتانسی است. این مطالعه بر مبنای ۸/۶ یعنی ۸ قطب استاتور و ۶ قطب روتور متمرکز شده است که ترکیبی بسیار محبوبی برای ماشین‌های سوئیچ رلوکتانسی به حساب می‌آید. انتخاب زاویه استاتور و روتور بخش مهمی از روش طراحی را تشکیل می‌دهد.

شکل ۲-۱۴ توزیع میدان هندسی را برای یک موقعیت روتور شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد [۲۴].

¹ Modeling and Analysis of a Micro Variable Capacitance Electromechanical Energy Converter



شکل ۲-۱۴ پخش میدان در یک ماشین الکتروستاتیک کوچک مقیاس^۱

۴-۲ سنسور

سنسور یا حسگر دستگاهی است که انواع مختلف از سیگنال یعنی سیگنال فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی را دریافت می‌کند و به شکل یک سیگنال الکتریکی پاسخ می‌دهد. سیگنال‌های خروجی بصورت انواع سیگنال‌های الکتریکی مانند جریان یا ولتاژ است. اگر تغییر کمی در مقدار حس شده ایجاد شود تغییر کوچکی در خروجی الکتریکی ایجاد می‌کند که این تغییرات با قابلیت اندازه‌گیری سنسور تعریف می‌شود.

امروزه می‌توانیم بطور گسترده حسگرها را با کاربردهای مختلف در همه جا پیدا کنیم. با دقت بیشتر درمی‌یابیم که انواع مختلفی از سنسورها در دفاتر، باغ‌ها، مراکز خرید، خانه‌ها، ماشین‌ها، اسباب‌بازی‌ها و غیره وجود دارند که در کاربردهایی مانند روشن کردن چراغ، فن، تلویزیون، تنظیم خودکار دمای اتاق با تهویه مطبوع^۲، هشدار آتش، تشخیص موانع در حال چرخش خودرو و غیره به کار می‌روند.

^۱ Modeling and Analysis of a Micro Variable Capacitance Electromechanical Energy Converter

^۲ AC

حسگرها به دو دسته سنسور غیرفعال و سنسور فعال دسته‌بندی می‌شوند. یک سنسور غیرفعال به هیچ منبع انرژی اضافی نیاز ندارد و سیگنال الکتریکی مستقیماً در پاسخ به تحریک تولید می‌شود. این بدان معنی است که سنسور انرژی ورودی را به انرژی سیگنال خروجی تبدیل می‌کند. نمونه‌هایی از سنسورهای غیرفعال شامل عکاسی، حرارتی، سنجش میدان الکتریکی، شیمیایی، مادون قرمز و لرزه‌ای است. حسگرهای فعال برای پاسخ به سیگنال تحریک نیاز دارند. برای تولید سیگنال خروجی سنسورها تغییرات لازم را در این سیگنال‌های ورودی ایجاد می‌کنند. حسگرهای فعال نیز به دلیل ویژگی‌های خاص خود به عنوان سنسورهای پارامتریک شناخته می‌شوند که می‌توانند در پاسخ به یک اثر بیرونی تغییر کرده و سپس این تغییرات به سیگنال الکتریکی تبدیل شوند. حسگرهای فعال کاربردهای مختلفی در رابطه با هواشناسی و رصد سطح و جو زمین دارند.

خواص تشخیص سنسورها شامل الکتریکی، مغناطیسی، فیزیکی، شیمیایی و غیره است و مکانیسم تغییر شامل تغییر سیگنال ورودی به سیگنال خروجی است که نمونه‌های آن فوتوالکتریک، ترموالکتریک، الکتروشیمیایی، الکترومغناطیسی، الکتروستاتیکی و ... است. سیگنال‌های خروجی آنالوگ با توجه به مقدار اندازه‌گیری شده تولید می‌شوند اما یک سنسور دیجیتال برعکس سنسورهای آنالوگ است. سنسورها نیز براساس ویژگی‌های تشخیصی که در جدول ۲-۳ آورده شده است تقسیم می‌شوند [۲۵].

نوع	جزئیات
سنسور دمایی	دما، حرارت، جریان حرارت و ...
سنسور الکتریکی	مقاومت، جریان، ولتاژ، اندوکتانس
سنسور آهنربایی	چگالی شار آهنربا، گشتاور مغناطیسی و...
سنسور نوری	شدت نور، طول موج و ...
سنسور شیمیایی	ترکیب، PH، غلظت و ...
سنسور فشار	فشار، نیرو و ...
سنسور لرزش	جابجایی، شتاب، سرعت و ...
سنسور باران و رطوبت	آب، رطوبت و ...
سنسور شیب	زاویه تمایل و ...
سنسور سرعت	سرعت، مسافت و ...

۲-۴-۱ سنسور سرعت سنج

برای اندازه‌گیری سرعت چرخش از تعداد زیادی حسگر مختلف استفاده می‌شود که بر اساس اصول تبدیل مختلف از ساده‌ترین تماس گرفته تا حسگرهای گالوانومغناطیسی و فیبر نوری پیاده‌سازی شده‌اند. در ادبیات فنی چنین حسگرهایی را فرستنده سرعت، سنسور سرعت، سرعت‌سنج و سنسور سرعت چرخشی می‌نامند. مطابق با استاندارد ایالتی ۲۰۲-۸/۴۱۷، از اصطلاحات "سرعت چرخشی" و "حسگرهای سرعت چرخشی"^۱ استفاده می‌شود. به طور معمول یک سنسور سرعت شامل یک عنصر حسگر است که یک پالس شمارش مربوط به یک یا بخشی از سرعت شفت کنترل‌شده را تولید می‌کند و یک مبدل ثانویه که شمارش پالس را بر حسب واحد زمان اندازه گرفته و با تبدیل آن‌ها به دور در

¹ Rotational Speed Sensor

دقیقه سرعت را نشان می‌دهد. حسگرها به عنوان منابع اطلاعاتی سطح کیفی سیستم‌های اندازه‌گیری و کنترل اطلاعات تولیدی دستگاه‌های پیچیده و اشیاء فن‌آوری را به‌ویژه در حوزه‌های پیشرفته فناوری مانند انرژی، هوانوردی، فناوری موشکی و فضایی، سلاح‌ها و تجهیزات نظامی و غیره تعیین می‌کنند. حسگرها برای اندازه‌گیری ویژگی‌های دینامیکی بسته‌های قدرت محصولات موشکی و فضایی حلقه مهمی در حل مشکلات اتوماسیون سیستم‌های کنترل و نظارت بر اجسام پیچیده هستند.

علیرغم سرعت بالای توسعه علمی و فناوری مشکلات اندازه‌گیری مقادیر فیزیکی به دلیل شرایط عملیاتی سخت ابزارهای اندازه‌گیری (حسگرها) همچنان وجود دارد. سنسورهای سرعت دورانی کاربرد گسترده‌ای در سیستم‌های کنترل، مدیریت و حفاظت خودکار سیستم‌های پیشرفته برای فناوری موشک و هوانوردی پیدا کرده‌اند.

سنسورهای گالوانومغناطیسی القایی و اثر هال بیشترین کاربرد را در اندازه‌گیری این موضوع دارند. نقطه ضعف اصلی سنسورهای القایی وابستگی دامنه سیگنال خروجی به سرعت چرخش و در نتیجه بازه اندازه‌گیری محدود است. با استفاده از عناصر هال و دیودهای مغناطیسی و سنسور سرعت‌سنج، اندازه‌گیری مقادیر کوچک سرعت چرخش ممکن می‌شود. سنسورهای سرعت‌سنج فیبر نوری به دلیل عدم کارایی در محیط‌های بدون شفافیت نوری (وجود بخارات اجزای پیش‌ران، محتوای دود و غیره) کاربرد پیدا نکرده است [۲۶].

۲-۵ سنسور الکترواستاتیک

در سه دهه گذشته سنسورهای الکترواستاتیک برای نظارت و اندازه‌گیری مداوم طیف وسیعی از فرایندهای صنعتی سیستم‌های مکانیکی و محیط‌های بالینی پیشنهاد شده، توسعه یافته و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سنسورهای الکترواستاتیک با توجه به سادگی ساختار، مقرون به صرفه بودن و مناسب بودن برای طیف وسیعی از شرایط قابلیت استفاده و بهره‌برداری دارد. این سنسورها راه‌حل‌های منحصر

به فردی را برای برخی از چالش‌های اندازه‌گیری ارائه می‌دهند و همچنین گزینه‌های مقرون به صرفه‌تری را برای سنسورهایی مانند حسگرهای صوتی، خازنی، نوری و الکترومغناطیسی ارائه می‌دهند.

پدیده‌های الکترواستاتیک در همه جا وجود دارند. وقتی از روی یک سطح پلاستیکی عبور می‌کنید و دستگیره فلزی را لمس می‌کنید یک شوک الکتریکی کوچک را تجربه می‌کنید. گاهی اوقات هنگام برداشتن بلوز پشمی خود ممکن است یک جرقه برقی کوچک را نیز تجربه کرده باشید. کودکان اغلب بادکنکی را به لباس‌های خود می‌مالند تا به لباس بچسبند. ما می‌توانیم از چنین پدیده‌های رایجی نتیجه بگیریم که الکتریسیته ساکن یا بار الکتریکی از اصطکاک بین دو جسم مختلف سرچشمه می‌گیرد. در واقع هرگونه تماس فیزیکی نزدیک بین دو شی با وجود مالش الکتریسیته ساکن ایجاد می‌کند. چنین پدیده‌هایی در بسیاری از فرآیندهای صنعتی مانند جابجایی مواد اولیه جامد بصورت فله‌ای که بارهای الکترواستاتیک قابل توجهی در آن وجود دارد یا حتی خطرناک است به طور گسترده دیده می‌شود.

گاهی تماس نزدیک بین دو جسم مختلف و سپس جداسازی بدون اصطکاک فیزیکی نیز می‌تواند هر دو را از نظر الکترواستاتیک شارژ کند. بر اساس مکانیسم فیزیکی پشت این پدیده که همه مواد از اتم‌ها تشکیل شده‌اند. هر کدام دارای هسته‌ای مثبت هستند که تعدادی الکترون آن را احاطه کرده است. وقتی دو ماده مختلف در تماس فیزیکی نزدیک مانند مالش به هم نزدیک شوند ممکن است یکی از مواد الکترون‌ها را بیشتر از دیگری جذب کند، بنابراین برخی از الکترون‌ها از یک ماده به ماده دیگر کشیده می‌شوند. هنگامی که مواد از هم جدا می‌شوند یکی از آنها الکترون‌های بیشتری (بار منفی) به دست می‌آورد در حالی که دیگری مقداری (بار مثبت) بسته به عملکرد کار هر ماده از دست می‌دهد. چنین پدیده ای اغلب به عنوان تریبوالکتریک یا اثر تریبوالکتریک شناخته می‌شوند، جایی که پیشوند "تریبو" به معنی اصطکاک است.

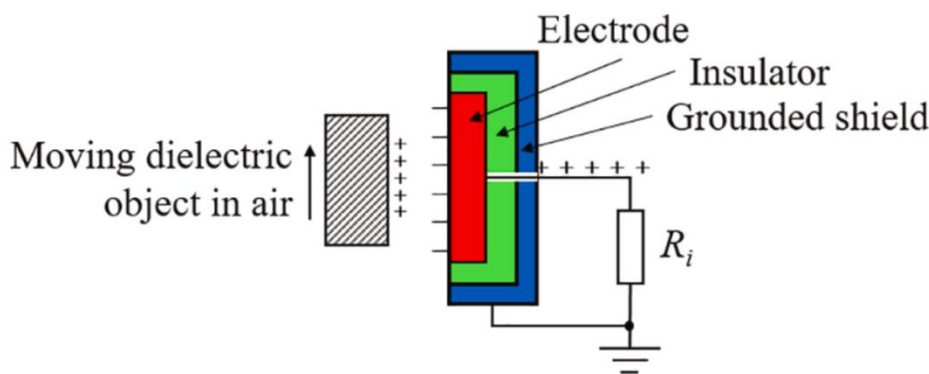
از آنجا که پدیده تریبوالکتریک به طور گسترده در زندگی روزمره یا فعالیت‌های صنعتی ما وجود دارد می‌توان از سنسورهای الکترواستاتیک برای تشخیص یا درک طیف وسیعی از فعالیت‌های انسانی، سیستم‌های مکانیکی یا فرایندهای صنعتی استفاده کرد. در مقایسه با تکنیک‌های حساسیت بیشتر

مانند تکنیک‌های مبتنی بر اصول آکوستیک، مقاومتی، خازنی، پیزوالکتریک، نوری و الکترومغناطیسی، سنسورهای الکترواستاتیک نسبتاً غیرمعمول هستند و کمتر درک می‌شوند.

با این حال سنسورهای الکترواستاتیک دارای مزایای آشکاری نسبت به سایر سنسورها هستند. از جمله مقرون به صرفه بودن، حساسیت بالا، سادگی در ساختار و نصب سیستم و مناسب بودن برای طیف گسترده‌ای از محیط‌های صنعتی.

بوجود آمدن بار الکترواستاتیک بر روی یک ماده در صورت تماس با ماده دیگر یا سطح جامد یا مایع مورد انتظار است. به عنوان مثال یک ماده جامد فله وقتی در فرآیند صنعتی از طریق مخلوط کردن، غربال کردن، ریختن، پودر شدن، حمل و نقل پنوماتیک و میکرونیزاسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد نیروی الکترواستاتیکی ایجاد می‌شود. میزان بار روی مواد جامد فله معمولاً غیرقابل پیش‌بینی است اما می‌توان آن را با الکتروود غربال شده و عایق و مدارهای سیگنال الکترونیکی تشخیص داد. سیگنال به دلیل نوسانات میدان الکتریکی ناشی از عبور ذرات باردار از مدار الکترونیکی گرفته می‌شود. اگر الکتروود در یک عایق جاسازی شده باشد یا تماس مستقیم بین الکتروود و ذرات وجود نداشته باشد فرایند سنجش از طریق القای الکترواستاتیک به دست می‌آید. برعکس اگر الکتروود در معرض جریان سیال قرار گیرد انتقال بار در اثر تماس فیزیکی بین الکتروود و ذرات رخ می‌دهد. در مواردی که از الکتروود در معرض تماس مستقیم استفاده می‌شود هم القای الکترواستاتیک و هم انتقال بار انجام می‌شود. شکل ۲-۱۵ اصول حس یک الکتروود در معرض را برای تشخیص یک جسم غیر رسانای متحرک در هوا از طریق القای الکترواستاتیک را نشان می‌دهد. برای توصیف پدیده شارژ الکتریکی از واژه "الکتروودینامیک" استفاده می‌شود. به این معنی که بار از حرکت یک ماده با اشاره به ماده دیگر ایجاد می‌شود و ارتباط کمی با مکانیسم‌های حسی واقعی یعنی القای الکترواستاتیک یا انتقال بار دارد. در واقع اثر الکتروودینامیکی مربوط به برهم کنش بین میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی است. یک سنسور الکترواستاتیک مستلزم این است که اصل حس الکترواستاتیک بصورت القایی یا از طریق انتقال بار باشد و قطعاً هیچ ارتباطی با اثر الکترومغناطیسی ندارد.

هنگامی که یک سنسور بر مبنای القای الکترواستاتیک کار می‌کند اصل حس ممکن است بر حسب یک سنسور خازنی معادل توضیح داده‌شود. به این دلیل است که جسم باردار می‌تواند به عنوان صفحه خازن مدل شود در حالی که الکتروود خود را به عنوان صفحه دیگر مدل می‌کند. به طور مشابه مقدار بار روی جسم ممکن است با گذشت زمان و در نتیجه ولتاژ روی صفحات تغییر کند.



شکل ۲-۱۵ ساختار عملکردی یک سنسور الکترواستاتیک

به همین دلیل است که القای الکترواستاتیک در بسیاری از منابع به عنوان اتصال خازنی نامیده می‌شود و بنابراین یک سنسور الکترواستاتیک در چنین موردی معادل یک سنسور خازنی است. در اصل هم سنسورهای الکترواستاتیک و هم سنسورهای خازنی بر اساس نوسان میدان الکتریکی در اطراف الکتروود حسگر کار می‌کنند. تفاوت اساسی بین آن‌ها در این است که نوسان میدان در یک سنسور الکترواستاتیک از حرکت یک جسم باردار نشأت می‌گیرد در حالی که میدان الکتریکی در یک سنسور خازنی از یک الکتروود فعال ناشی می‌شود که میدان الکتریکی را ایجاد می‌کند. این دو نوع حسگر بسته به کاربرد می‌توانند حساسیت‌های بسیار متفاوتی داشته‌باشند. به عنوان مثال سنسورهای الکترواستاتیک برای تشخیص مواد فله رقیق در یک سیستم تعلیق پنوماتیک بسیار مناسب هستند اما انواع خازنی به طور معمول برای جریان فازهای متراکم در یک مجرا قابل استفاده هستند [۲۷].

تکنیک‌های سنجش الکترواستاتیک به دلیل مزایای ساختار ساده، قابلیت اطمینان و هزینه کم توجه زیادی را در بسیاری از کاربردهای صنعتی به خود جلب کرده است. در سال‌های اخیر تلاش‌های بیشتری برای گسترش کاربرد تکنیک‌های سنجش الکترواستاتیک برای اندازه‌گیری سرعت چرخشی انجام شده است. یک روش جدید با استفاده از حسگرهای الکترواستاتیک و تبدیل هیلبرت - هوانگ برای اندازه‌گیری ارتعاش شعاعی پیشنهاد شده است. حساسیت فضایی و اثر فیلتر فضایی دو عامل مهمی هستند که در طراحی حسگر باید در نظر گرفته شوند. در همین حال پارامترهای هندسی الکتروود از جمله شکل و ابعاد، مستقیماً بر حساسیت مکانی، طیف فرکانس و پهنای باند سیگنال‌های حسگرهای الکترواستاتیک تأثیر می‌گذارند. اخیراً مقایسه‌های عملکردی سنسورهای الکترواستاتیک مختلف برای اندازه‌گیری جریان انجام شده است. با این حال الکتروودهای الکترواستاتیکی که برای اندازه‌گیری سرعت دورانی استفاده شده‌اند همگی به شکل نوار هستند. اگرچه مکانیسم سنجش الکتروود نواری به خوبی مورد مطالعه قرار گرفته اما عملکرد الکتروودهای شکل‌دار و مهم‌تر از آن نحوه بهینه‌سازی شکل الکتروود برای اندازه‌گیری سرعت چرخش یک شفت ناشناخته باقی مانده است. به منظور بهینه‌سازی طراحی سنسور برای اندازه‌گیری سرعت چرخشی و ارتعاش مطالعه ویژگی‌های حسگرهای با شکل‌های مختلف و ارزیابی عملکرد آنها ضروری است [۲۸].

فصل ۳ : مدل سازی تحلیلی

ماشین الکترواستاتیک بعنوان یک

سنسور سرعت سنج

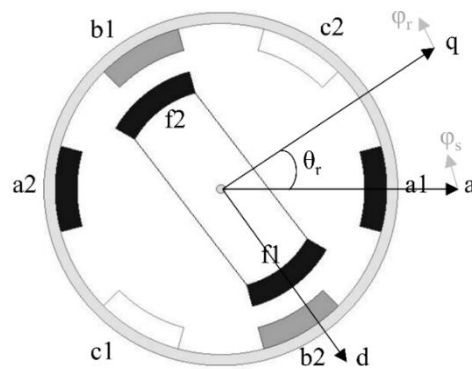
۳-۱ مقدمه

در این فصل با در نظر گرفتن تئوری محاسباتی ماشین‌های الکترواستاتیک به بررسی این دسته از ماشین‌ها پرداخته شده و دستگاه مورد نظر از نظر وضعیت خازنی تئوری‌های مربوط به ماشین‌های الکترواستاتیک بررسی می‌شود. با محاسبه ظرفیت خازنی و ماتریس خازنی که اساس بررسی‌های تحلیلی است ظرفیت‌های خودی و متقابل روتور و استاتور را بدست آورده و تاثیر ظرفیت روتور و استاتور بر روی یکدیگر را بصورت تئوری بررسی می‌کنیم. بر اساس معرفی یک ماشین خازن متغیر و انجام محاسبات مربوط به مدار معادل و بدست آوردن آن با اعمال تغییرات روی ساختار ماشین و رسیدن به ساختار مورد نظر در این پایان‌نامه مدار معادل ساختار مورد بررسی این پایان‌نامه نیز استخراج می‌شود.

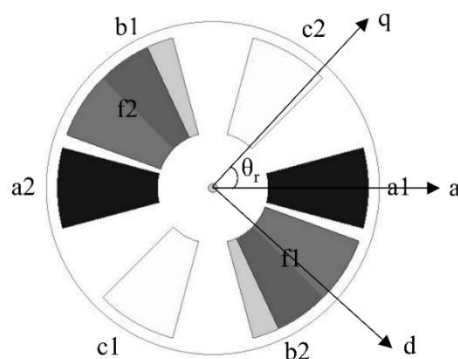
۳-۲ محاسبه عناصر ماتریس خازنی

یک ماشین دوقطبی خازن متغیر سنکرون^۱ سه فاز بصورت میدان شعاعی (شکل ۳-۱ الف)) و میدان محوری (شکل ۳-۱ ب)) نشان داده شده است. الکترودهای تحریک گروه F در فضای روتور با ولتاژ مستقیم تحریک شده و الکترودهای استاتور سه فاز در فازهای a ، b و c قرار دارند. a^1 ، b^1 ، c^1 و f^1 به ترمینال مثبت و a^2 ، b^2 ، c^2 و f^2 به ترمینال منفی منبع تغذیه متصل شده‌اند. محور الکتریکی تحریک به عنوان محور d ، محور عمود بر آن، محور q و زاویه بین محور الکتریکی فاز a استاتور و محور q به عنوان θ_r تعریف می‌شوند.

¹ VCSEM



(الف)



(ب)

شکل ۱-۳ ساختار ساده شده دو قطبی ماشین الکتروستاتیک شار شعاعی (الف) و شار محوری (ب)

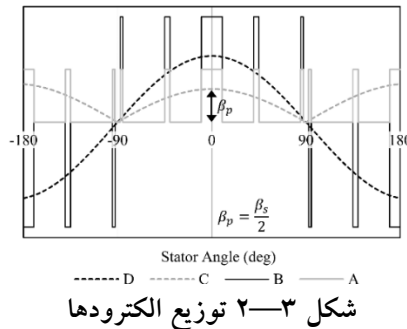
در مدل سازی ماشین های الکترومغناطیسی، معمولاً توزیع نیروی محرکه مغناطیسی^۱ را در فاصله هوایی به صورت سینوسی در نظر می گیرند. با توجه به دوگانی های موجود بین ماشین های الکترومغناطیسی و الکترواستاتیکی می توان این موضوع را برای مدل سازی تحلیلی ماشین های الکتروستاتیک، بسط داد. در نتیجه باید در طراحی های مربوط به ماشین های الکتروستاتیک، روندی را طی کرد که در آن، توزیع نیروی محرکه الکتریکی^۲ در فاصله هوایی بین استاتور و روتور، سینوسی شود.

برای بدست آوردن ماتریس کاپاسیتانس، در قدم اول باید نیروی محرکه الکتریکی را در فاصله بین استاتور و روتور به دست آورد. شکل ۳-۲، نمودار توزیع یکی از الکترودهای استاتور به همراه توزیع نیروی محرکه الکتریکی ناشی از آن را نمایش می دهد که در آن βp بیشترین زاویه هم پوشانی

¹ Magneto Motive Force

² Electro Motive Force

الکترودهای فاز a استاتور است. β_s عبارت است از کل زاویه معادل توزیع شده سینوسی یک فاز استاتور که می‌تواند به عنوان دوگانی برای تعداد دور معادل سیم پیچی یک فاز در ماشین‌های الکترومغناطیسی در نظر گرفته شود. نیروی محرکه الکتریکی ناشی از دیگر فازهای استاتور را می‌توان از طریق شیفت نمودار نیروی محرکه الکتریکی فاز a به اندازه 120° و 240° درجه الکتریکی به دست آورد.



۳-۲-۱ ظرفیت‌های خودی

در قدم اول برای محاسبه ظرفیت‌های خودی مربوط به فاز a استاتور، باید مقدار بار الکتریکی القا شده روی سطح الکترودهای فاز a را در حالی که تنها منبع ولتاژ v_a روشن است محاسبه کرد.

$$q_{aa} = c_{ls} v_a + \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} D_a \cdot r \cdot l \cdot (\gamma_a \cdot d\varphi_s)$$

$$= c_{ls} v_a + r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_s}{\gamma}\right)^2 \cdot \left(\frac{\pi}{\gamma}\right) \cdot v_a \cdot \left[\alpha_1 - \frac{\alpha_2}{\gamma} \cos 2(\theta_r)\right]$$

معادله ۳-۱

در نهایت مقدار کاپاسیتانس خودی فاز a از طریق تقسیم بار الکتریکی القایی بر ولتاژ فاز a

بدست می‌آید.

$$c_{aa} = c_{ls} + r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_s}{\gamma}\right)^2 \cdot \left(\frac{\pi}{\gamma}\right) \cdot \left[\alpha_1 - \frac{\alpha_2}{\gamma} \cos 2(\theta_r)\right]$$

معادله ۳-۲

C_{ls} کاپاسیتانس نشتی استاتور، r مقدار شعاع متوسط فاصله هوایی و l طول محوری فاصله

هوایی ماشین شار شعاعی است. به صورت مشابه ظرفیت‌های خودی فازهای b و c استاتور را می‌توان

به شرح زیر محاسبه کرد.

$$q_{bb} = c_{ls}v_b + \int_{\frac{2\pi}{3}-\frac{\pi}{2}}^{\frac{2\pi}{3}+\frac{\pi}{2}} D_b \cdot r \cdot l \cdot (\gamma_b \cdot d\varphi_s)$$

$$= c_{ls}v_b + r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_s}{r}\right)^r \cdot \left(\frac{\pi}{r}\right) \cdot v_b \cdot \left[\alpha_1 - \frac{\alpha_r}{r} \cos 2(\theta_r - 120^\circ)\right]$$

معادله ۳-۳

$$c_{bb} = c_{ls} + r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_s}{r}\right)^r \cdot \left(\frac{\pi}{r}\right) \cdot \left[\alpha_1 - \frac{\alpha_r}{r} \cos 2(\theta_r - 120^\circ)\right]$$

معادله ۴-۳

$$q_{cc} = c_{ls}v_c + \int_{\frac{4\pi}{3}-\frac{\pi}{2}}^{\frac{4\pi}{3}+\frac{\pi}{2}} D_c \cdot r \cdot l \cdot (\gamma_c \cdot d\varphi_s)$$

$$= c_{ls}v_c + r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_s}{r}\right)^r \cdot \left(\frac{\pi}{r}\right) \cdot v_c \cdot \left[\alpha_1 - \frac{\alpha_r}{r} \cos 2(\theta_r + 120^\circ)\right]$$

معادله ۵-۳

$$c_{cc} = c_{ls} + r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_s}{r}\right)^r \cdot \left(\frac{\pi}{r}\right) \cdot \left[\alpha_1 - \frac{\alpha_r}{r} \cos 2(\theta_r + 120^\circ)\right]$$

معادله ۶-۳

بار الکتریکی القا شده روی الکترودهای تحریک ناشی از اعمال V_f به الکترودهای روتور در

شرایطی که سایر منابع خاموش هستند و سپس مقدار ظرفیت خودی الکترودهای تحریک، به ترتیب از

طریق معادله ۷-۳ و ۸-۳ به دست می‌آیند.

$$q_{ff} = c_{lf}v_f + \int_{\pi}^{\pi+2\pi} D_f \cdot r \cdot l \cdot (\gamma_f \cdot d\varphi_r) = c_{lf}v_f + r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_f}{r}\right)^r \cdot \left(\frac{\pi}{r}\right) \cdot v_f \cdot \left[\alpha_1 + \frac{\alpha_r}{r}\right]$$

معادله ۷-۳

$$c_{ff} = c_{lf} + r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_f}{r}\right)^r \cdot \left(\frac{\pi}{r}\right) \cdot \left[\alpha_1 + \frac{\alpha_r}{r}\right]$$

معادله ۸-۳

C_{ff} ظرفیت نشتی الکترودهای روتور است. کاپاسیتانس خودی به دست آمده برای الکترودهای

روتور را می‌توان با استفاده از رابطه زیر به سمت استاتور انتقال داد که در آن C_{ff}' ظرفیت خودی روتور منتقل شده به سمت استاتور است.

$$c_{ff}' = \left(\frac{\beta_s}{\beta_f} \right)^2 \cdot c_{ff}$$

معادله ۳—۹

۳-۲-۲ ظرفیت های متقابل بین استاتور

برای محاسبه ظرفیت متقابل بین فازهای a و b استاتور ابتدا باید مقدار بار الکتریکی القا شده

روی الکترودهای فاز a ناشی از ولتاژ فاز b (v_b)، در حالی که سایر منابع تغذیه خاموش هستند و سپس از طریق تقسیم بار الکتریکی به دست آمده بر v_b ، ظرفیت متقابل بین فاز a و b را بدست آورد.

$$\begin{aligned} q_{ab} &= \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} D_b \cdot r \cdot l \cdot (\gamma_a \cdot d\varphi_s) \\ &= -r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_s}{\gamma} \right)^2 \cdot \left(\frac{\pi}{\epsilon} \right) \cdot v_b \cdot \left[\alpha_1 + \frac{\alpha_\gamma}{\gamma} \cos 2(\theta_r - \epsilon^\circ) \right] \end{aligned}$$

معادله ۳—۱۰

$$c_{ab} = -r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_s}{\gamma} \right)^2 \cdot \left(\frac{\pi}{\epsilon} \right) \cdot \left[\alpha_1 + \frac{\alpha_\gamma}{\gamma} \cos 2(\theta_r - \epsilon^\circ) \right]$$

معادله ۳—۱۱

به طریق مشابه، ظرفیت‌های متقابل بین الکترودهای فازهای دیگر استاتور بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} q_{ac} &= \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} D_c \cdot r \cdot l \cdot (\gamma_a \cdot d\varphi_s) \\ &= -r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_s}{\gamma} \right)^2 \cdot \left(\frac{\pi}{\epsilon} \right) \cdot v_c \cdot \left[\alpha_1 + \frac{\alpha_\gamma}{\gamma} \cos 2(\theta_r + \epsilon^\circ) \right] \end{aligned}$$

معادله ۳—۱۲

$$c_{ac} = -r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_s}{\gamma} \right)^2 \cdot \left(\frac{\pi}{\epsilon} \right) \cdot \left[\alpha_1 + \frac{\alpha_\gamma}{\gamma} \cos 2(\theta_r + \epsilon^\circ) \right]$$

معادله ۳—۱۳

$$q_{bc} = \int_{\frac{2\pi}{3}-\frac{\pi}{2}}^{\frac{2\pi}{3}+\frac{\pi}{2}} D_c \cdot r \cdot l \cdot (\gamma_b \cdot d\varphi_s)$$

$$= -r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_s}{\gamma}\right)^{\gamma} \cdot \left(\frac{\pi}{\gamma}\right) \cdot v_c \cdot \left[\alpha_1 + \frac{\alpha_{\gamma}}{\gamma} \cos \gamma(\theta_r + 180^\circ)\right]$$

معادله ۳-۱۴

$$c_{bc} = -r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_s}{\gamma}\right)^{\gamma} \cdot \left(\frac{\pi}{\gamma}\right) \cdot \left[\alpha_1 + \frac{\alpha_{\gamma}}{\gamma} \cos \gamma(\theta_r + 180^\circ)\right]$$

معادله ۳-۱۵

۳-۲-۳ ظرفیت های بین روتور و استاتور

به منظور محاسبه ظرفیت متقابل بین فازهای a و f (تحریک) ابتدا بار الکتریکی القا شده روی الکترودهای فاز a در حالی که تنها منبع تغذیه تحریک (V_f) روشن است محاسبه شده و سپس با تقسیم بار الکتریکی بر V_f، مقدار ظرفیت متقابل بین فازهای a و f به شرح زیر به دست می آید.

$$q_{af} = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} D_f \cdot r \cdot l \cdot (\gamma_a \cdot d\varphi_s)$$

$$= -r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_s}{\gamma}\right) \left(\frac{\beta_f}{\gamma}\right) \cdot \left(\frac{\pi}{\gamma}\right) \cdot v_f \cdot \left[\alpha_1 + \frac{\alpha_{\gamma}}{\gamma}\right] \sin(\theta_r)$$

معادله ۳-۱۶

$$c_{af} = -r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_s}{\gamma}\right) \left(\frac{\beta_f}{\gamma}\right) \cdot \left(\frac{\pi}{\gamma}\right) \cdot \left[\alpha_1 + \frac{\alpha_{\gamma}}{\gamma}\right] \sin(\theta_r)$$

معادله ۳-۱۷

به صورت مشابه ظرفیت های متقابل بین الکترودهای سایر فازهای استاتور و الکترودهای تحریک روتور را می توان به شرح زیر به دست آورد.

$$q_{bf} = \int_{\frac{2\pi}{3}-\frac{\pi}{2}}^{\frac{2\pi}{3}+\frac{\pi}{2}} D_f \cdot r \cdot l \cdot (\gamma_b \cdot d\varphi_s)$$

$$= -r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_s}{\gamma}\right) \left(\frac{\beta_f}{\gamma}\right) \cdot \left(\frac{\pi}{\gamma}\right) \cdot v_f \cdot \left[\alpha_1 + \frac{\alpha_2}{\gamma}\right] \sin(\theta_r - 120^\circ)$$

معادله ۱۸—۳

$$c_{bf} = -r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_s}{\gamma}\right) \left(\frac{\beta_f}{\gamma}\right) \cdot \left(\frac{\pi}{\gamma}\right) \cdot \left[\alpha_1 + \frac{\alpha_2}{\gamma}\right] \sin(\theta_r - 120^\circ)$$

معادله ۱۹—۳

$$q_{cf} = \int_{\frac{4\pi}{3}-\frac{\pi}{2}}^{\frac{4\pi}{3}+\frac{\pi}{2}} D_f \cdot r \cdot l \cdot (\gamma_c \cdot d\varphi_s)$$

$$= -r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_s}{\gamma}\right) \left(\frac{\beta_f}{\gamma}\right) \cdot \left(\frac{\pi}{\gamma}\right) \cdot v_f \cdot \left[\alpha_1 + \frac{\alpha_2}{\gamma}\right] \sin(\theta_r + 120^\circ)$$

معادله ۲۰—۳

$$c_{cf} = -r \cdot l \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{\beta_s}{\gamma}\right) \left(\frac{\beta_f}{\gamma}\right) \cdot \left(\frac{\pi}{\gamma}\right) \cdot \left[\alpha_1 + \frac{\alpha_2}{\gamma}\right] \sin(\theta_r + 120^\circ)$$

معادله ۲۱—۳

ظرفیت‌های متقابل به دست آمده بین الکترودهای استاتور و روتور را می‌توان با استفاده از رابطه روابط زیر به سمت استاتور انتقال داد که در آن C_{af}' ، C_{bf}' و C_{cf}' ، ظرفیت‌های منتقل شده به سمت استاتور هستند.

$$\begin{bmatrix} c_{af}' \\ c_{bf}' \\ c_{cf}' \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_s \\ \beta_f \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_{af} \\ c_{bf} \\ c_{cf} \end{bmatrix}$$

معادله ۲۲—۳

$$C = \begin{bmatrix} c_{aa} & c_{ab} & c_{ac} & c_{af} \\ c_{ab} & c_{bb} & c_{bc} & c_{bf} \\ c_{ac} & c_{bc} & c_{cc} & c_{cf} \\ c_{af} & c_{bf} & c_{cf} & c_{ff} \end{bmatrix}$$

معادله ۲۳—۳

۳-۴ محاسبات مدار معادل ساختار پیشنهادی

برای آنکه بتوانیم وضعیت خازن‌های ساختار مورد نظر در این پایان‌نامه را با یک ماشین پایه الکتروستاتیک مقایسه کنیم نیاز است تا ساختار مورد بحث را شکافته و وضعیت خازن‌های آن را بررسی

کنیم. ساختار دستگاه الکترواستاتیک گردان برای اندازه گیری سرعت شامل دو استاتور و یک روتور است. هر کدام از این صفحات شامل دو قطب با زاویه قطب ۹۰ درجه است که از جنس مس بوده و مابقی صفحه استاتورها و روتور از جنس عایق می باشد. دستگاه شامل استاتور ۱ یا استاتور بالا، استاتور ۲ یا استاتور پایین و روتور در بین دو استاتور است. با یک بررسی می توان دریافت که قطب های هر صفحه استاتور ۱ و ۲ و روتور دارای ظرفیت خودی است. در نتیجه روی هر صفحه قطب ها با یکدیگر یک خازن بوجود می آورند. همچنین بین قطب های هر صفحه نیز یک خازن بوجود می آید. بدین ترتیب با بررسی استاتور ۱ می توان دریافت بین قطب اول استاتور ۱ با قطب های روتور و استاتور ۲، قطب دوم استاتور ۱ با قطب های روتور و استاتور ۲ و بین قطب اول و دوم استاتور ۱ ظرفیت های خودی و متقابل بوجود می آید. به همین ترتیب این ظرفیت های خودی و متقابل برای روتور و استاتور ۲ نیز صادق است. در ادامه محاسبات ظرفیت های خازنی یک ماشین الکترواستاتیک به بررسی معادلات جریانی، معادله گشتاور و نیرو پرداخته می شود که در تمام مراحل محاسبه جریان و گشتاور اثر تک تک خازن ها حائز اهمیت است چراکه باعث تغییر در مقدار جریان و گشتاور خواهد شد. اما در وضعیت فعلی و با توجه به کاربردی که از یک ساختار ماشین الکتروستاتیک در جهت اندازه گیری سرعت یک ماشین دیگر و به عبارت دیگر بعنوان سنسور خواهیم داشت اثر تک تک خازن ها همانند وضعیت کارکرد موتوری برای ما دارای اهمیت نبوده و می توان خازن های موجود را محدودتر کرد چراکه اثر تغییرات یک جفت خازنی برای ما دارای اهمیت بوده و بر مبنای تغییرات آن و نوساناتی که در اثر تغییر وضعیت مکانی روتور بوجود می آید، در نتیجه در بررسی های تئوری، ماتریس خازنی را ساده تر کرده و تنها تغییرات ظرفیت های خودی و متقابل بین استاتور ۱ و استاتور ۲ که متناسب با وضعیت قرارگیری روتور است مورد بررسی قرار می گیرد.

$$C = \begin{bmatrix} C_{S11P11} & C_{S11P21} & C_{S21P12} & C_{S21P21} \\ C_{S11P12} & C_{S11P22} & C_{S21P12} & C_{S21P22} \\ C_{S12P11} & C_{S12P21} & C_{S22P11} & C_{S22P21} \\ C_{S12P12} & C_{S12P22} & C_{S22P12} & C_{S22P22} \end{bmatrix}$$

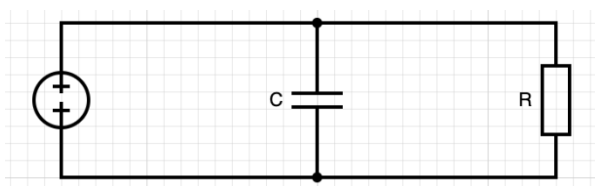
معادله ۳-۲۴

ماتریس خازنی معادله ۳-۲۴ مربوط به ظرفیت‌های خودی و متقابل بین قطب‌های استاتور ۱ و ۲ است که در آن S نشانگر استاتور و P نشان دهنده قطب‌های آن می‌باشد. زیروند ۱ و ۲ S مربوط به استاتور ۱ و استاتور ۲ و همچنین زیروند ۱ و ۲ P مربوط به قطب‌های ۱ و ۲ هر استاتور است.

برای سهولت در محاسبات و همچنین شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزاری، ماتریس فوق را کاهش مرتبه می‌دهیم. به این صورت که یک ماتریس تنها شامل ظرفیت‌های خودی و متقابل وجود داشته و در نهایت یک ماتریس ۲ در ۲ بدست می‌آید که پایه استفاده در سیمولینک متلب بوده و به بررسی وضعیت عملکردی دستگاه کمک می‌کند.

ماتریس خازنی بدست آمده، متغیر با زمان است. به عبارت دیگر در موقعیت‌های مختلف روتور مقدار این ماتریس خازنی متغیر خواهد بود.

در حالت کلی اگر بخواهیم بصورت تئوری این دستگاه را مورد بررسی قرار دهیم به یک مدار معادل ساده شده شامل یک منبع تغذیه، یک خازن و یک مقاومت می‌رسیم که این خازن متغیر با زمان است.



شکل ۳-۳ مدار معادل دستگاه اندازه گیری سرعت

معادلات مربوط به مدار فوق به شرح زیر قابل نوشتن است.

$$V = Ri + V_C$$

معادله ۳-۲۵

$$q_c(t) = C(t).V_c(t) \rightarrow V_c(t) = \frac{q_c(t)}{C(t)}$$

معادله ۳-۲۶

معادله ۲۶-۳ مقدار ولتاژ خازن را نشان می‌دهد. نسبت صورت به مخرج در معادله ۲۶-۳ ثابت است در نتیجه از نظر تئوری ولتاژ خازن ثابت بوده و سیگنال خروجی دستگاه، یک سیگنال ولتاژی با دامنه ثابت و فرکانس متغیر خواهد بود. اما در معادله ۲۶-۳، یک عامل متغیر داریم که در ادامه به بررسی آن می‌پردازیم.

$$\frac{dq_c}{dt} = i(t)$$

معادله ۲۷-۳

$$\begin{bmatrix} q_{11} \\ q_{12} \\ q_{21} \\ q_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{S11P11} & C_{S11P21} & C_{S21P12} & C_{S21P21} \\ C_{S11P12} & C_{S11P22} & C_{S21P12} & C_{S21P22} \\ C_{S12P11} & C_{S12P21} & C_{S22P11} & C_{S22P21} \\ C_{S12P12} & C_{S12P22} & C_{S22P12} & C_{S22P22} \end{bmatrix} \times [V_{11} \quad V_{12} \quad V_{21} \quad V_{22}]$$

معادله ۲۸-۳

با توجه به معادله ۲۸-۳، این موضوع نشان داده می‌شود که مقدار بار الکتریکی وابسته به ماتریس خازنی است و ماتریس ولتاژ نیز مربوط به ولتاژهایی است که به ترمینال‌ها اعمال شده و از آن خوانده می‌شود. ترمینال‌هایی که دارای تحریک ولتاژی هستند، ترمینال‌های استاتور ۲ است که به یک قطب یک مقدار ثابت و به قطب دیگر ۰ ولت داده می‌شود. تعریف ترمینال برای استاتور ۱ نیز بدین جهت است که با استفاده از نرم افزارهای شبیه‌سازی بتوان مقدار ماتریس خازنی را به‌درستی بدست آورد. این‌که مقدار بار الکتریکی بر اساس معادله ۲۸-۳ متغیر با زمان است در نتیجه معادله ۲۷-۳، جریان نیز متغیر با زمان خواهد بود. متغیر با زمان بودن جریان از نظر تئوری تبعاتی را بدنبال دارد که در ادامه به بررسی آن نیز می‌پردازیم.

$$V = Ri(t) + V_C(t)$$

معادله ۲۹-۳

معادله ۲۹-۳ نشان می‌دهد که مقدار ولتاژ خازن و یا به عبارت دیگر ولتاژ خروجی دستگاه وابسته به مقدار ولتاژ خازن و ولتاژ حاصل از ضرب جریان متغیر با زمان و مقدار مقاومت است. با توجه به معادله ۲۵-۳ که ولتاژ خازن را ثابت نشان می‌داد اما در معادله ۲۹-۳ یک عامل متغیر با زمان در ولتاژ خروجی وجود دارد که خود همین عامل باعث بوجود آمدن تغییر در دامنه ولتاژ خروجی می‌شود. بدین

ترتیب برخلاف نتایج مورد انتظار در معادلات پیشین در خصوص ثابت بودن دامنه ولتاژ خروجی، عامل جریان که به مقدار بار روی صفحات بستگی دارد باعث به وجود آمدن تغییرات علاوه بر فرکانس ولتاژ خروجی بر روی دامنه آن نیز می شود.

انتظار می رود پس از انجام تست های نهایی علاوه بر فرکانس دامنه سیگنال خروجی نیز دستخوش تغییرات شود. لازم به ذکر است بدلیل آنکه در شرایط تست های نرم افزاری صفحات بصورت کاملاً ایده آل در نظر گرفته می شوند عامل مقاومت حذف شده و صرفاً نظریه تغییر فرکانس سیگنال خروجی مورد تحقیق و بررسی قرار می گیرد.

**فصل ۴ طراحی، شبیه سازی و
ساخت یک نمونه ماشین
الکترواستاتیک برای کاربرد
اندازه گیری سرعت**

۴-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا ساختار دستگاه الکتروستاتیک گردان برای کاربرد اندازه‌گیری سرعت بیشتر مورد بررسی می‌گیرد و تئوری انتخاب این ساختار، روش تحقیق و حصول اطمینان از تئوری پیشنهاد شده مورد بحث قرار می‌گیرد. پس از تایید تئوری ساختار و ساختمان این دستگاه به بررسی دقیق‌تر آن در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی اجزا محدود^۱ با ابعاد واقعی ساخته‌شده پرداخته می‌شود و نتیجه نرم‌افزار اجزا محدود که بصورت یک ماتریس پروفیل خازنی بدست می‌آید در نرم افزار متلب مورد تحقیق و بررسی قرار می‌گیرد. نمونه واقعی با استفاده از مواد اولیه ساده نظیر فیبر مدار چاپی استخوانی ساخته شده و روتور به شفت یک موتور dc کوچک به‌عنوان محرک چفت می‌شود. از یک موتور دی‌سی کوپل شده با روتور دستگاه به‌عنوان یک نمونه برای اندازه‌گیری سرعت نیز استفاده می‌شود. پس از تست‌های اولیه آزمایشگاهی و تایید تئوری تست‌های نهایی انجام می‌شود. هدف تست نهایی مقایسه سرعت چرخش موتور dc کوپل شده با دستگاه و فرکانس خروجی بدست آمده از این سنسور است.

۴-۲ تئوری طراحی دستگاه اندازه‌گیری

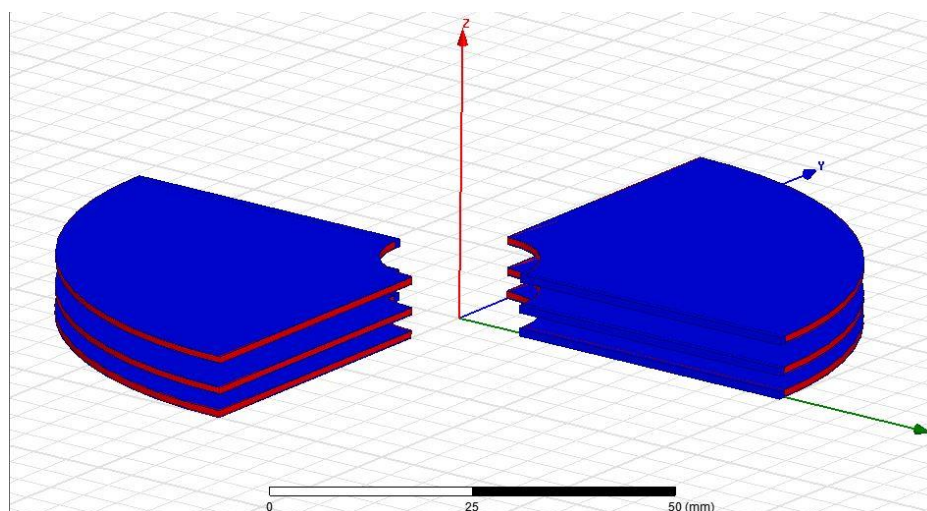
هنگامی که تئوری استفاده از ساختار یک ماشین الکتروستاتیک به‌عنوان یک سنسور مطرح شد چالش اول چگونگی تحریک و چگونگی بدست آوردن فرکانس و سرعت خروجی از این ساختار بود. راهکارهای مختلفی برای حل این چالش مورد نقد و بررسی قرار گرفت اما در نهایت یک ساختار که بعدها بصورت تحلیل نرم‌افزاری مورد تایید قرار گرفت تمام خواسته‌های این پژوهش را برآورده می‌کرد. ساختار پیشنهادی بدین صورت عملکرد دارد که با اعمال تحریک dc به یک استاتور از دیدگاه روتور یک سیگنال dc دیده شده و بر روی روتور القا می‌شود. استاتور دومی در ادامه قرار خواهد داشت که این استاتور در اثر القا ولتاژ از استاتور اول بر روی روتور ولتاژی روی آن القا می‌شود. ولتاژ القا شده بر

¹ Finite Element

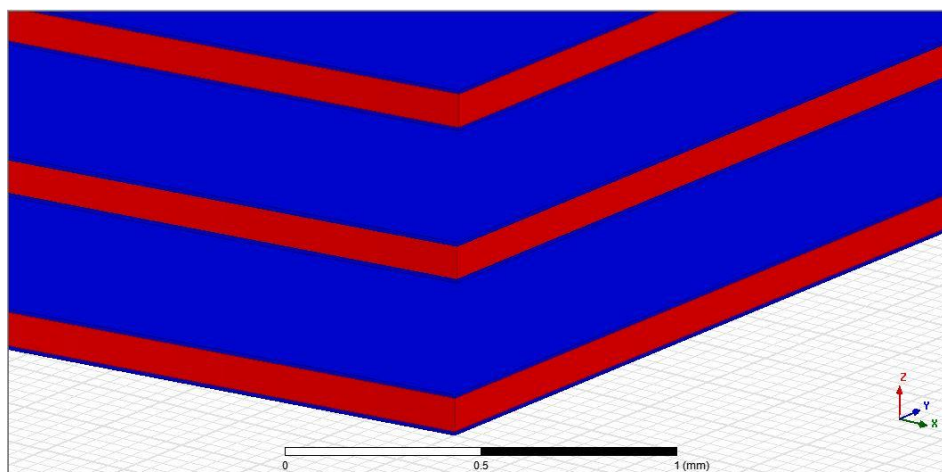
روی استاتور دوم یک ولتاژ متناوب با مکان روتور خواهد بود. بدین شکل با تغییر سرعت روتور فرکانس سیگنالی که از استاتور دوم خوانده می‌شود متفاوت خواهد شد و در نتیجه تغییرات فرکانس این سیگنال بصورت تابعی از سرعت چرخش روتور بوده و بدین طریق این ساختار می‌تواند سرعت چرخش هر موتور دواری که با روتور این دستگاه کوپل شود را اندازه‌گیری کند.

۳-۴ ساختار کلی

همانطور که در شکل ۴-۱ مشخص است ساختار کلی شبیه‌سازی شامل چند بخش است. استاتور پایین یا استاتور ۱، استاتور بالا یا استاتور ۲ و روتور.



شکل ۴-۱ ساختار کلی دستگاه



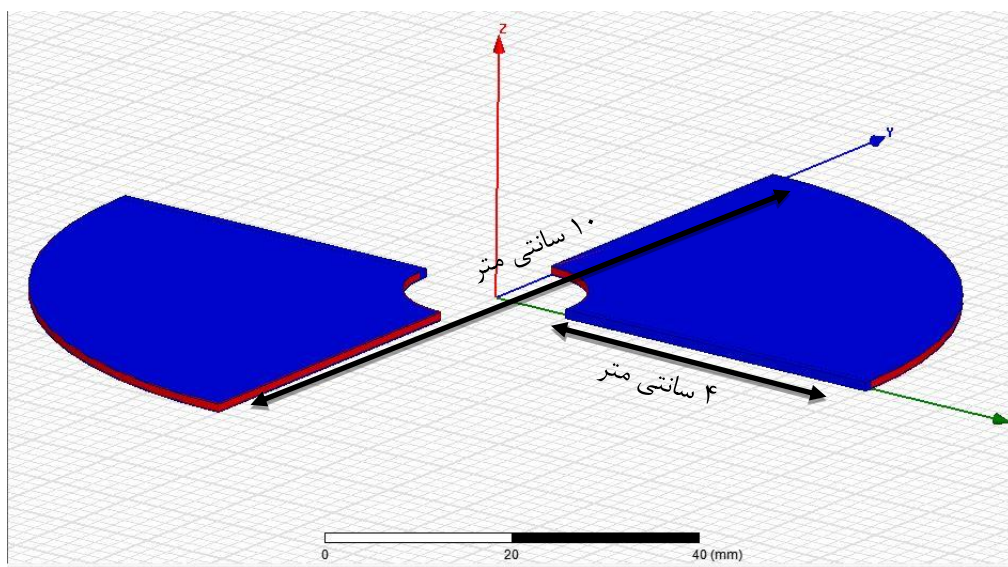
شکل ۴-۲ نمای نزدیک قطب های استاتور و روتور

ابعاد برد مدار چاپی : ۱۰ در ۱۰ سانتی متر

ابعاد هر قطب بین دو کمان : ۴ سانتی متر

تعداد قطب ها : ۲ قطب

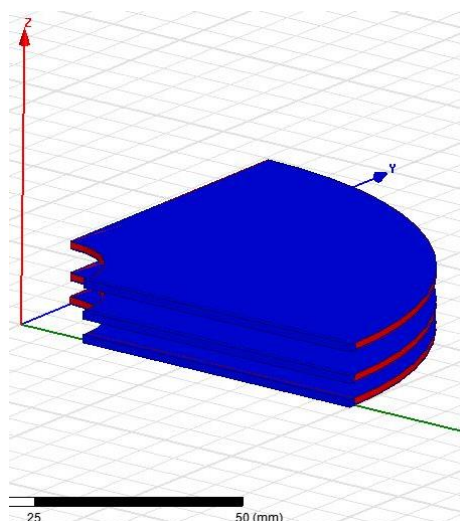
زاویه قطب : ۹۰ درجه



شکل ۴-۳ ابعاد صفحات و قطب ها

قطب ۱ و ۲ بالا و پایین برد با استفاده از یک نوار پیوسته در یک سمت برد به هم متصل شده

است.



شکل ۴-۴ اتصال قطب ها در دو طرف صفحات

تحریک : به قطب ۱ استاتور ۱ ، ۱۰۰ ولت دی سی ، به قطب ۲ استاتور ۱ ، ۰ ولت

۴-۴ طراحی ابعاد، متغیرها، مقادیر پیشنهادی و ملاحظات

مهم ترین سوالاتی که باید در بخش طراحی به آن ها پاسخ داده می شد به شرح زیر است.

(الف) تعداد قطب ها چقدر باشد؟

(ب) پیشنهاد ابعاد مناسب به چه صورت است؟

(ج) ولتاژ تحریک به چه صورت تعیین شود؟

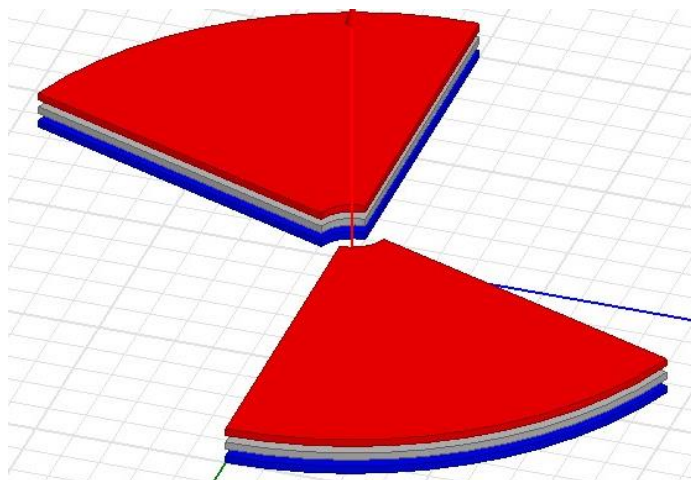
(د) جنس مواد اولیه مصرفی

۴-۴-۱ تعداد قطب

در مورد انتخاب تعداد قطب می توان گفت که هر چه تعداد قطب بیشتر باشد تعداد نمونه ها بیشتر و دقت اندازه گیری افزایش پیدا می کند اما در عین حال سیستم گران و پیچیده می شود. همچنین فاصله دو قطب بر روی یک صفحه از یک مقدار مشخصی نمی تواند کوچکتر باشد. بر اساس محاسبات تجربی اگر فاصله دو الکتروود روی یک صفحه ۰/۳۳ میلی متر باشد میتوان تا ۱۰۰۰ ولت روی هر کدام از قطب ها اعمال کرد تا مشکل تخلیه الکتریکی بوجود نیاید. همچنین از نظر ساخت نیز نهایتا تا ۳۰۰ قطب بر

روی یک صفحه با استفاده از دستگاه برش دقیق^۱ می‌توان بدست آورد. اما هدف ساخت یک دستگاه اندازه‌گیری سرعت تا حد امکان با ساختار ساده و همچنین با کمترین هزینه ممکن است. در نتیجه به ۳۰۰ قطب به هیچ عنوان نیازی نبوده و با استفاده از تعداد قطب خیلی کمتر می‌توان به یک ساختار قابل قبول رسید. همچنین به دلیل اینکه سطح ولتاژی که با آن خروجی قابل قبولی رویت می‌شود در حدود ۱۰۰ ولت مستقیم^۲ می‌باشد لذا مشکلی بابت زاویه قطب و اندازه آن نخواهیم داشت. الگوریتم طراحی قابل قبول برای قرارگیری قطب‌ها بصورت تجربی و با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه سازی اجزا محدود^۳ بدست آمده است. با ترسیم شکل مورد نظر برای ساختار دستگاه و بدست آوردن ماتریس خازنی و ترسیم آن به نتایج زیر دست یافته شد.

۴-۱-۱ قطب های استاتور و روتور مشابه هم - زاویه ۷۰ درجه



شکل ۴-۵ استاتورها و روتور مشابه هم و ۷۰ درجه

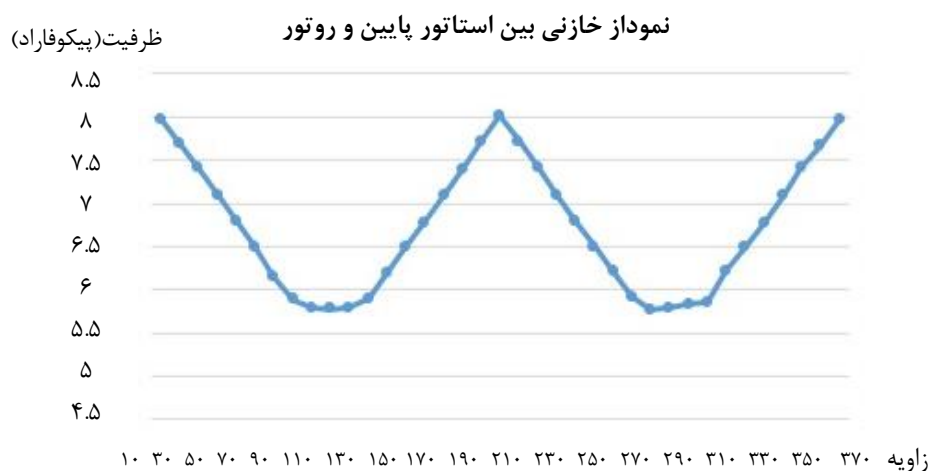
در این حالت و همانطور که در شکل ۴-۵ دیده می‌شود قطب‌های روتور و استاتور مشابه هم بوده و زاویه قطب ۷۰ درجه در نظر گرفته می‌شود. در حالتی که زاویه قطب‌ها ۹۰ درجه باشد درصد

^۱ CNC

^۲ DC

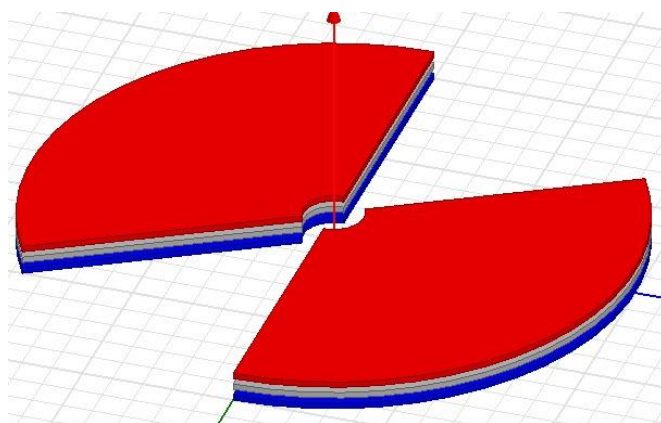
^۳ FEM Software – Ansys maxwell

همپوشانی قطب‌ها با یکدیگر از ۰ درصد شروع و نهایتاً به ۱۰۰ درصد همپوشانی ختم شده و مجدد به ۰ درصد کاهش می‌باید. هدف از انتخاب ۷۰ درجه به‌عنوان زاویه قطب این است که اگر در یک بازه زمانی هیچ همپوشانی بین قطب‌های روتور و استاتور وجود نداشته باشد وضعیت نمودار پروفیل خازنی به چه صورت خواهد شد. پس از انجام شبیه‌سازی نمودار تغییرات خازنی استاتور پایین و روتور بصورت شکل ۴-۶ قابل مشاهده است. نمودار پروفیل خازنی بین استاتور بالا و روتور نیز مشابه است.



شکل ۴-۶ نمودار ظرفیت خازنی در حالت ۷۰ درجه

۴-۱-۲ قطب های استاتور و روتور مشابه هم - زاویه ۱۲۰ درجه

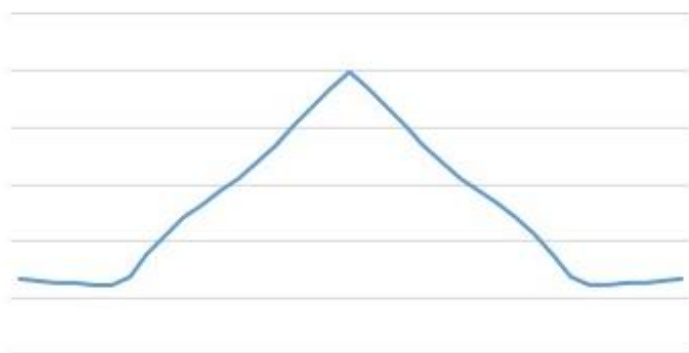


شکل ۴-۷ استاتورها و روتور مشابه هم و ۱۲۰ درجه

در این حالت و همانطور که در شکل ۴-۷ دیده می‌شود قطب‌های روتور و استاتورها مشابه هم بوده و زاویه قطب ۱۲۰ درجه در نظر گرفته شده است. بر خلاف حالت قبل که زاویه قطب‌ها ۷۰ درجه

بوده و یک بازه زمانی هیچ همپوشانی بین قطب‌ها دیده نمی‌شود در این حالت همواره همپوشانی بین قطب‌ها وجود داشته و هیچ لحظه یا بازه زمانی نیست که قطب‌های روتور و استاتورها با یکدیگر همپوشانی نداشته باشند. هدف از تست این وضعیت مشاهده نمودار خازنی در این حالت است که در شکل ۸-۴ دیده می‌شود. نمودار پروفیل خازنی بین استاتور بالا و روتور نیز مشابه است.

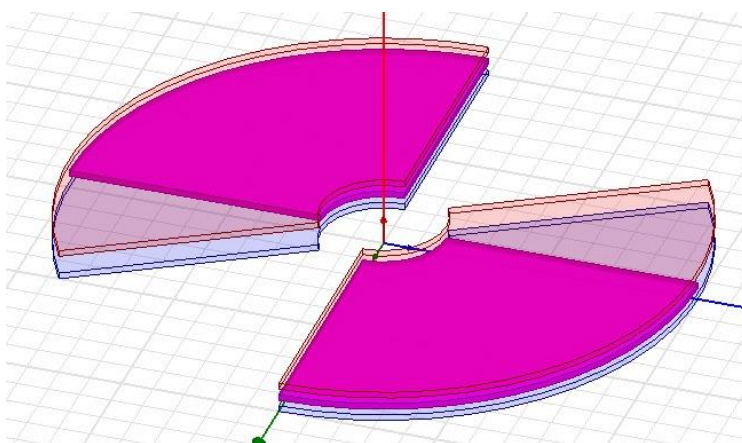
نمودار خازنی بین استاتور پایین و روتور



زاویه ۱۰ ۳۰ ۵۰ ۷۰ ۹۰ ۱۱۰ ۱۳۰ ۱۵۰ ۱۷۰ ۱۹۰ ۲۱۰ ۲۳۰ ۲۵۰ ۲۷۰ ۲۹۰ ۳۱۰ ۳۳۰ ۳۵۰ ۳۷۰

شکل ۸-۴ نمودار ظرفیت خازنی در حالت ۱۲۰ درجه

۳-۱-۴-۴ قطب‌های استاتور ۱۲۰ درجه و روتور ۹۰ درجه



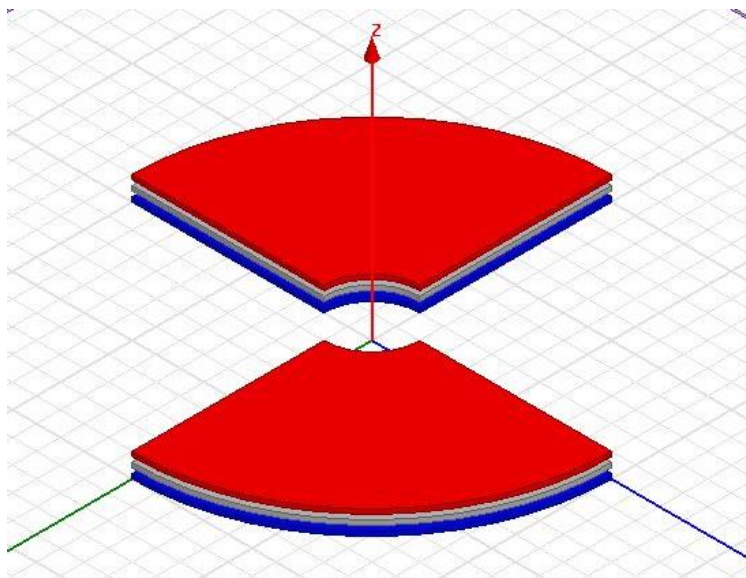
شکل ۹-۴ استاتورها ۱۲۰ درجه و روتور ۹۰ درجه

همانطور که در شکل ۴-۹ دیده می‌شود قطب‌های استاتورها با زاویه ۱۲۰ درجه و قطب‌های روتور با زاویه ۹۰ درجه رسم شده است. هدف از این ساختار بررسی وضعیتی است که شکل قطب صفحات روتور و استاتور مشابه هم نیست. در این وضعیت قطب‌های روتور همواره درصدی همپوشانی با قطب‌های استاتورها دارند و در یک بازه زمانی این همپوشانی ادامه پیدا می‌کند. در این حالت نیز بدلیل عدم تقارن همپوشانی قطب‌های استاتور و روتور انتظار می‌رود شکل خروجی نمودار خازنی از حالت سینوسی دور بوده و مناسب نباشد. نمودار خازنی بدست آمده بین روتور و استاتور پایین بصورت شکل ۴-۱۰ است. نمودار بدست آمده گواه این نکته است که این ساختار نیز برای استفاده در یک دستگاه الکتروستاتیک اندازه گیری سرعت مناسب نیست.



شکل ۴-۱۰ نمودار ظرفیت خازنی در حالت استاتور ۱۲۰ و روتور ۹۰ درجه

۴-۱-۴-۴ قطب های استاتور و روتور مشابه هم - زاویه ۹۰ درجه



شکل ۴-۱۱ استاتورها و روتور ۹۰ درجه

همانطور که در شکل ۴-۱۱ دیده می شود قطب های استاتور و روتور مشابه هم بوده و زاویه ای برابر ۹۰ درجه دارند. در این ساختار تنها در یک لحظه قطب های روتور و استاتور همپوشانی نداشته و همواره بصورت پیوسته و متقارن همپوشانی بین قطب های روتور و استاتور در حال افزایش و کاهش است. انتظار می رود که شکل نمودار خازنی مشابه وضعیتی که قطب های روتور و استاتور مشابه هم بوده و با زاویه ۷۰ درجه است باشد.

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

معادله ۴-۱

بر اساس معادله ۴-۱ هرچه سطح افزایش یابد مقدار ظرفیت خازن افزایش می یابد. در نتیجه در مقایسه با مقدار خازن بدست آمده در این حالت و حالتی که زاویه قطب ۷۰ درجه بود وضعیت مقدار ظرفیت در حالت شکل قطب ۹۰ درجه بزرگتر از حالت ۷۰ درجه است.

ظرفیت (پیکوفاراد)



شکل ۴-۱۲ نمودار ظرفیت خازنی در حالت استاتورها و روتور ۹۰ درجه

همانطور که مشاهده می‌شود حالت‌های مختلف قطب بر روی خروجی نمودار خازنی خروجی و در نتیجه سیگنال ولتاژ خروجی تاثیر مستقیم دارد. در نتیجه بررسی‌های انجام شده برای انتخاب شکل قطب مناسب و بر اساس نتایج بدست آمده حالتی که قطب‌های استاتورها و روتور مشابه هم بوده و دارای زاویه قطب ۹۰ درجه هستند بهترین خروجی را نسبت به حالت‌های مختلف خواهد داشت که خود این نکته باعث می‌شود شکل قطب نهایی ۹۰ درجه برای استاتورها و روتور انتخاب می‌شود. دلیل انتخاب دو قطب نیز بر این استدلال استوار است که در وهله اول ساخت آن بسیار ساده بوده و همچنین ساختار کلی دستگاه را تا حد ممکن ساده می‌کند. این نکته باعث ارزان بودن این ساختار می‌شود. بعلاوه محاسبات تئوری خازن‌ها و محاسبات سرعت را آسان‌تر می‌کند. در نتیجه با استفاده از این ساختار ساده‌ترین حالت ممکن قابل دستیابی است.

۴-۲-۴ ابعاد

در طراحی ابعاد یک ماشین الکتریکی مهم‌ترین نکته این است که تا حد امکان فاصله‌های هوایی را کوچک‌تر طراحی کرد. یکی از محدودیت‌های ساخت دستگاه الکتروستاتیک اندازه‌گیری سرعت محدودیت مکانیکی ساخت نسخه آزمایشگاهی آن است. در صورتی که فاصله‌هوایی از مقداری کمتر باشد استحکام کنار هم قرارگرفتن روتور و استاتور با مشکل روبرو خواهد شد. اگرچه قرار باشد تا در ابعاد صنعتی طراحی و ساخته شود بسیاری از این محدودیت‌ها برطرف شده و میتوان تا حد امکان

فاصله‌هوایی را کاهش داد. اما در نسخه اولیه که برای تایید نظریه و بصورت آزمایشگاهی ساخته می‌شود نمی‌توان از یک حدی فاصله هوایی را کمتر کرد. مشکلاتی که هنگام ساخت این دستگاه در نسخه آزمایشگاهی با آن روبرو خواهیم بود ارتعاش مکانیکی روتور هنگام چرخش با سرعت بالا، برخورد روتور و استاتورها در اثر لنگی و ایجاد اتصال کوتاه، اتصال روتور به شفت یک موتور الکتریکی بعنوان عامل محرکی که قصد اندازه‌گیری سرعت آن را داریم و در نهایت پیکربندی کلیت دستگاه می‌باشد. با توجه به موارد ذکر شده برای شبیه‌سازی در طرح اولیه مشخصات ابعادی بصورت جدول زیر است.

جدول ۴-۱ مشخصات ابعادی دستگاه شبیه سازی شده

مشخصات دستگاه شبیه سازی	
طول و عرض صفحات	۱۰۰ میلی‌متر
طول قطب	۴۰ میلی‌متر
طول فاصله هوایی استاتور بالا و پایین با روتور	۳ میلی‌متر
ضخامت صفحات	۱ میلی‌متر
ضخامت مس	۰.۱ میلی‌متر

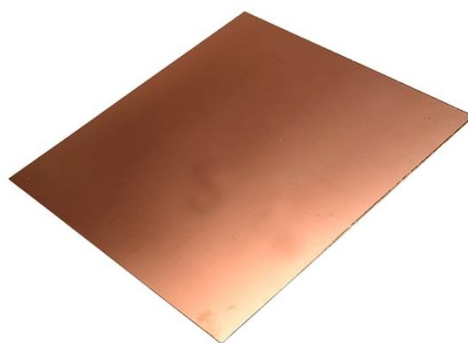
۴-۳-۴ ولتاژ تحریک

با توجه به تئوری ارائه شده مبنی بر اینکه نیاز به یک سیگنال متناوب برای خواندن خروجی داریم می‌توان از ولتاژ متناوب و ولتاژ مستقیم استفاده کرد. بصورت تئوری هر دو نوع ولتاژ خروجی متناوب خواهند داشت. در حالت ولتاژ متناوب سیگنال خروجی یک سیگنال متناوب با فرکانس ۵۰ هرتز پایه به اضافه فرکانس چرخش روتور خواهد بود که قابل شناسایی است. در حالت تحریک ولتاژ مستقیم نیز سیگنال خروجی یک سیگنال متناوب با مکان خواهد بود که فرکانس بدست آمده کاملاً متناسب با سرعت چرخش روتور است. نکته قابل اشاره دیگر اثر نویز محیطی بر سیگنال خروجی است و اگر تحریک اعمالی از یک مقدار کوچک‌تر باشد عملاً سیگنال غیرقابل شناسایی است. بطور آزمایشی

تحریک استاتور از ۲۵ ولت مستقیم آغاز شده و تا ۱۰۰ ولت افزایش می‌یابد و نتیجه خروجی بوسیله اوسیلوسکوپ مشاهده می‌شود. نکته قابل توجه دامنه نویز حدوداً برابر ۵۰ میلی‌ولت است. در نتیجه تحریک باید بقدری باشد که این مقدار نویز در برابر سیگنال اصلی محو شود. مشاهده شد هر چقدر دامنه ولتاژ تحریک افزایش می‌یابد شکل سیگنال خروجی منظم‌تر و قابل شناسایی‌تر است. حداقل ولتاژ قابل قبول که در آن کمترین میزان نویز تأثیرگذار بر سیگنال خروجی مشاهده شد ۱۰۰ ولت مستقیم بود. بر مبنای تئوری عملکرد ماشین‌های الکتروستاتیک هرچه سطح ولتاژ افزایش یابد میزان گشتاور نیز بیشتر می‌شود. همچنین هرچه ولتاژ تحریک افزایش یابد خروجی با دامنه بیشتر و نویز کمتر بدست می‌آید که حالت مطلوب‌تر است. همچنین با توجه به ساختار دوقطبی محدودیتی درخصوص حداکثر ولتاژ قابل اعمال که در آن ولتاژ اتصال کوتاه بین صفحات رخ ندهد نداریم. اما باید به این نکته توجه داشت که هرچه سطح ولتاژ را بالا ببریم ساختار تحریک دستگاه پیچیده‌تر می‌شود در نتیجه از ایده اصلی که در تلاش است تا ساختار ارزان و ساده باشد دور می‌شویم.

۴-۴-۴ مواد اولیه مصرفی

یکی از ساده‌ترین و ارزان‌ترین بخش دستگاه اندازه‌گیری سرعت ساخت آن است.



شکل ۴-۱۳ فیبر استخوانی با روکش مس

به کمک فیبرهای استخوانی دوطرفه مس و با در دست داشتن نقشه قطب‌های طراحی شده و یا به کمک اسید و مازیک قطب‌ها را رسم و مابقی مس را پاک نموده و می‌توان به کمک شرکت‌های طراحی و ساخت فیبر مدارچاپی شکل قطب مورد نظر را رسم و ساختار دستگاه را سرهم کرد.

۴-۵ شبیه سازی اولیه و نهایی، ماتریس خازنی

سه صفحه موازی هر صفحه شامل ۲ قطب با قطر ۱ میلی متر و شعاع خارجی ۵ سانتی متر و

داخلی ۱ سانتی متر به ترتیب روی صفحات ABC

صفحه A: استاتور اولیه – تحریک به استاتور اول اعمال می شود. صفحه A بصورت ثابت و غیرمتحرک روی شفت موتور سوار می شود. یک ولتاژ مستقیم اعمال می کنیم. قطب اول استاتور ۲۰۰ ولت و قطب دوم ۰ ولت.

صفحه B: روتور – روی شفت موتور سوار شده و با حرکت دوار روتور می چرخد. از دید روتور یک میدان ثابت مستقیم از استاتور اول دیده می شود. ساختار روتور مشابه استاتور اولیه است.

صفحه C: استاتور ثانویه – از دید استاتور ثانویه، یک میدان مستقیم متغیر با مکان دیده می شود که عملاً یک سیگنال متناوب است. این سیگنال دارای اندازه و فرکانس خاصی است که این فرکانس مستقیماً با سرعت چرخش روتور ارتباط دارد. با مطالعه این سیگنال در استاتور ثانویه می توان سرعت چرخش روتور را بدست آورد. ساختار استاتور ثانویه دقیقاً مشابه استاتور اولیه می باشد.

پس از رسم ساختار فوق در نرم افزار تحلیل انسیس مکسول^۱ تنظیمات مربوط به نرم افزار انجام شده و مش بندی تنظیم می گردد.

طراحی مدل برحسب نیاز می تواند بصورت دوبعدی یا سه بعدی انجام شود. هر کدام از مدل های دوبعدی یا سه بعدی برای رسم طرح مورد نظر دارای یک سری ابزار رسم شکل می باشند. با توجه به ساختار مورد نظر از طراحی سه بعدی و به کمک ابزارهای رسم شکل مورد نظر را رسم می کنیم.

در قدم بعد و برای انتخاب مواد جنس هر جز از بخش های مختلفی که مورد تحلیل قرار می گیرد باید مشخص شود. با استفاده از پنجره مربوطه جنس ماده مورد نظر را برای هر بخش را انتخاب می کنیم.

¹ Ansys Maxwell

همچنین محیط خارج از روتور و استاتور را خالی در نظر می گیریم. همچنین می توان در صورت نیاز آستانه مواد، هادی و عایق را تغییر داد.

در قدم بعد محدوده ای برای تحلیل اجزا محدود انتخاب می کنیم. انتخاب محدوده باید بگونه ای باشد که نه آنچنان بزرگ باشد که محاسبات اضافی انجام شود و تحلیل طولانی تر شود و نه آنچنان کوچک باشد که محاسبات اجزا محدود اشتباه شود. تحریک هر تحلیل الکترومغناطیسی یا الکتروستاتیکی روی مدل طراحی شده مستلزم اعمال تحریک مناسب جهت تولید میدان مغناطیسی یا میدان الکتریکی می باشد. اعمال تحریک به هر بخش از مدل طراحی شده می تواند بصورت چگالی جریان، ولتاژ، بار و یا شار باشد که برحسب نیاز یکی از این موارد اعمال می شود.

در روش اجزا محدود فضای حل مساله به نواحی کوچکی به نام جزء محدود تقسیم بندی می شود. در کاربردهای دوبعدی، محیط می تواند به اجزا به هم پیوسته ای مثل مثلث تقسیم شود. نقاط تعریف کننده مثلث ها، گره ها یا درجه آزادی هستند حال آنکه خود مثلث جزء می باشد. به مجموعه اجزاء مش گفته می شود. نرم افزار اجزاء محدود Maxwell ANSYS از دو منطق برای مش بندی استفاده می کند منطق اول بدین صورت است که با توجه به اینکه در هر مرحله از تحلیل وضعیت شکل و موقعیت آن به چه صورت است، بخش هایی که مورد تحلیل و محاسبات قرار می گیرند دارای مش های ریزتری نسبت به سایر نقاط هستند و در نتیجه برای انجام محاسبات وضعیت بهینه تری خواهیم داشت و سرعت انجام محاسبات با توجه به اینکه مش بندی بهینه انجام شده بیشتر می شود. اما منطق دوم بدین صورت است که هرچه به لبه شکل نزدیک می شویم مش ها ریزتر و هرچه به مرکز شکل نزدیک می شویم مش ها رفته رفته بصورت متقارن شروع به درشت شدن می کنند. در این وضعیت یک مش یک دست در تمام نقاط شکل خواهیم داشت. در این حالت نسبت به وضعیت قبل محاسبات بیشتر شده و در نتیجه مدت زمان تحلیل بیشتر خواهد شد.

تعریف پارامترهای خروجی هر مولفه ای که نیاز داریم تا پس از تحلیل بدست آوریم، با توجه به نوع تحلیل می توان در این قسمت تعریف کرد. بعنوان مثال در این شبیه سازی بدنبال بدست آوردن پروفایل

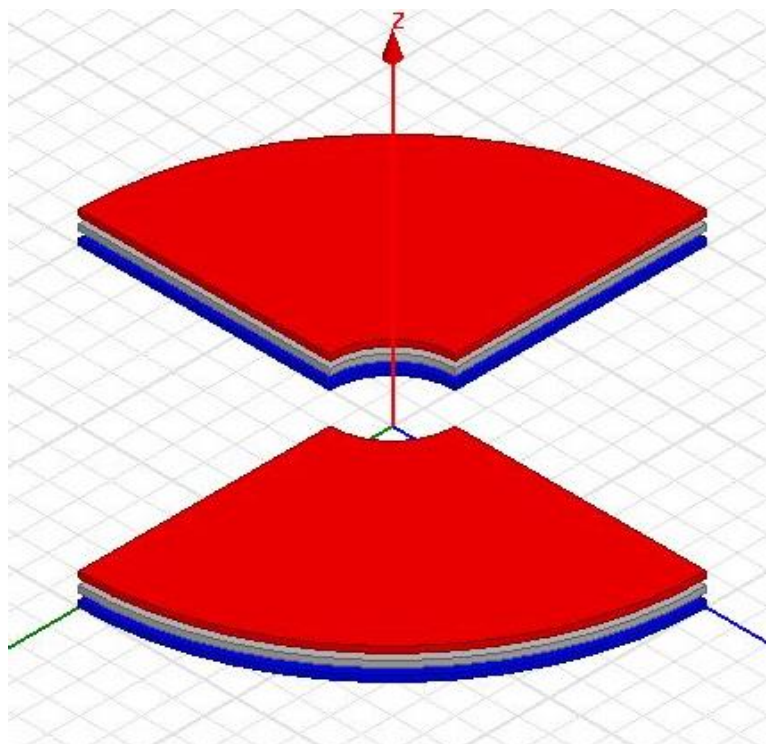
خازن در موقعیت های مختلف قرارگیری روتور در برابر قطب های روشن استاتور هستیم. همچنین گشتاور را در هر مرحله بدست می آوریم.

مشاهده میدان ولتاژ، میدان الکتریکی یا میدان مغناطیسی، چگالی جریان، انرژی و سایر پارامترهایی که می توان از یک تحلیل اجزاء محدود بدست آورد از طریق ابزارهای مربوطه امکان پذیر است. با توجه به نیاز هرکدام از آن هارا تعریف می کنیم و پس از اجرای تحلیل می توان بصورت خطوط و یا طیف رنگی هرکدام را مشاهده می کنیم.

نرم افزار فوق قابلیت تنظیم چرخش خودکار روتور را در حالت الکترواستاتیک ندارد. در نتیجه برای بدست آوردن وضعیت عملکرد ماشین طراحی شده و محاسبه ماتریس خازنی بصورت دستی و مرحله به مرحله با قدم های ۱۰ درجه یک چرخش کامل ایجاد کرده و در ۳۶ نقطه ماتریس خازنی بدست می آید. ۴ ترمینال برای محاسبه ماتریس تعریف می کنیم.

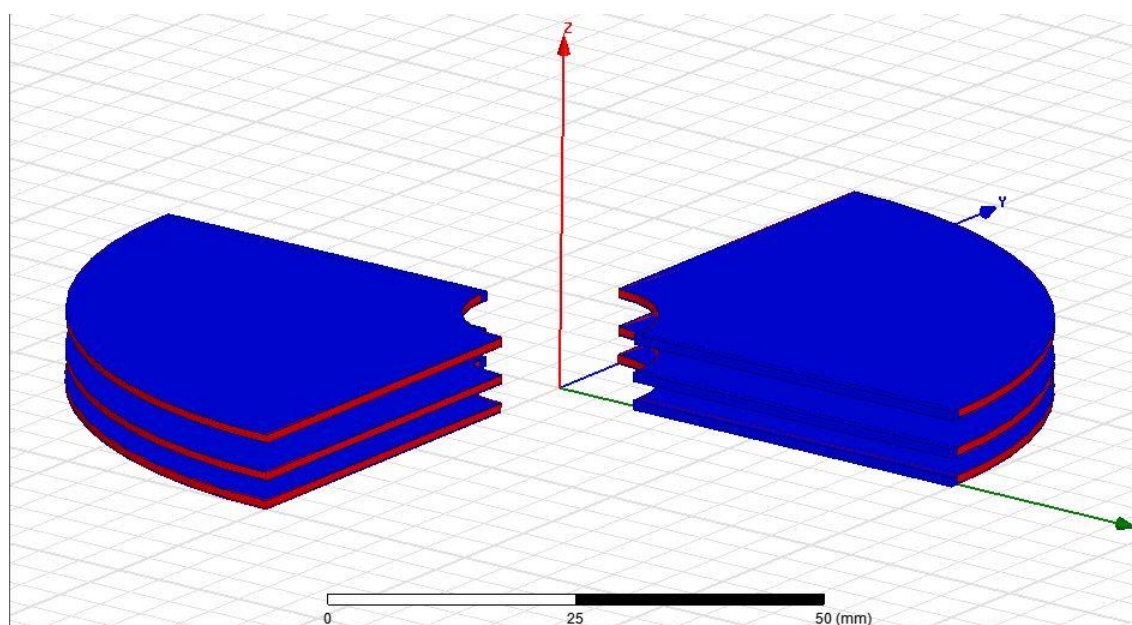
ترمینال یک و دو به ترتیب قطب های روتور و ترمینال ۳ و ۴ به ترتیب قطب های استاتور ثانویه یا استاتور C است.

ماتریس بدست آمده در مرحله اول یک ماتریس ۴ در ۴ است که شامل ظرفیت های خودی و متقابل ترمینال های بین استاتور و روتور است. ماتریس فوق را بصورت یک ماتریس ۲ در ۲ کاهش مرتبه داده و نمودار ماتریس خازنی برای ۳۶ نقطه رسم می شود. مشاهده می شود که در نمودار بدست آمده، تغییرات پروفیل خازنی بصورت یک نمودار تقریباً سینوسی است.



شکل ۴-۱۴ شبیه سازی اولیه

مشابه روند فوق برای شبیه سازی اولیه همین مراحل را با شکل نهایی که بر اساس آن ساخت نمونه آزمایشگاهی انجام شده طی می کنیم.



شکل ۴-۱۵ شبیه سازی نهایی

در نهایت ماتریس خازنی ۴ در ۴ بصورت جدول زیر قابل ارائه است.

جدول ۴-۲ - ماتریس خازنی خروجی ۴ در ۴ شبیه سازی اجزا محدود

Position					Position				
ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²	ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²
Stator_Up_1	۹۵۶۱,۲	-۸۲,۷۷۶	-۹۳۹۷,۳	-۸۱,۰۷۷	Stator_Up_1	۹۳۹۸,۴	-۸۸,۹۶	-۹۲۲۱,۹	-۸۷,۵۱۳
Stator_Up_2	-۸۲,۷۷۶	۹۵۰۷,۴	-۸۱,۲۱۹	-۹۴۹۳,۴	Stator_Up_2	-۸۸,۹۶	۹۴۴۰	-۸۶,۸۵۲	-۹۲۶۴,۶
Stator_Down_1	-۹۳۹۷,۳	-۸۱,۲۱۹	۹۵۶۱,۱	-۸۲,۵۱۹	Stator_Down_1	-۹۲۲۱,۹	-۸۶,۸۵۲	۹۳۹۷,۲	-۸۸,۴۱۸
Stator_Down_2	-۸۱,۰۷۷	-۹۴۹۳,۴	-۸۲,۵۱۹	۹۵۰۷	Stator_Down_2	-۸۷,۵۱۳	-۹۲۶۴	-۸۸,۴۱۸	۹۴۴۰,۵
Position					Position				
ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²	ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²
Stator_Up_1	۹۰۹۷	-۹۷,۷۹۷	-۸۹۰۲,۵	-۹۶,۶۹۴	Stator_Up_1	۸۸۰۶,۳	-۱۰۹,۸۹	-۸۵۸۷,۳	-۱۰۹,۱۱
Stator_Up_2	-۹۷,۷۹۷	۹۰۹۸,۵	-۹۵,۸۵۹	-۸۹۰۴,۸	Stator_Up_2	-۱۰۹,۸۹	۸۸۳۱,۶	-۱۰۷,۸۶	-۸۶۱۳,۹
Stator_Down_1	-۸۹۰۲,۵	-۹۵,۸۵۹	۹۰۹۶,۱	-۹۷,۷۹۶	Stator_Down_1	-۸۵۸۷,۳	-۱۰۷,۸۶	۸۸۰۵,۳	-۱۱۰,۱۳
Stator_Down_2	-۸۹۰۴,۸	-۸۹۰۴,۸	-۹۷,۷۹۶	۹۰۹۹,۳	Stator_Down_2	-۱۰۹,۱۱	-۸۶۱۳,۹	-۱۱۰,۱۳	۸۸۳۱,۱
Position					Position				
ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²	ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²
Stator_Up_1	۸۴۷۴,۳	-۱۲۵,۱۹	-۸۲۲۴,۶	-۱۲۵,۵۱	Stator_Up_1	۸۱۹۶,۷	-۱۴۴,۸۳	-۷۹۰۷,۸	-۱۴۴,۱
Stator_Up_2	-۱۲۵,۱۹	۸۴۸۳,۳	-۱۲۳,۱۴	-۸۲۳۵	Stator_Up_2	-۱۴۴,۸۳	۸۲۱۷,۲	-۱۴۳,۸۷	-۷۹۲۸,۵
Stator_Down_1	-۸۲۲۴,۶	-۱۲۳,۱۴	۸۴۷۳,۲	-۱۲۵,۴۷	Stator_Down_1	-۷۹۰۷,۸	-۱۴۳,۸۷	۸۱۹۷,۷	-۱۴۶,۰۴
Stator_Down_2	-۱۲۴,۵۱	-۸۲۳۵	-۱۲۵,۴۷	۸۴۸۴,۹	Stator_Down_2	-۱۴۴,۱	-۷۹۲۸,۵	-۱۴۶,۰۴	۸۲۱۸,۶
Position					Position				
ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²	ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²
Stator_Up_1	۷۹۱۵,۹	-۱۷۶,۳	-۷۵۶۴,۲	-۱۷۵,۴	Stator_Up_1	۷۶۳۴,۱	-۲۲۵,۶۱	-۷۱۸۲,۹	-۲۲۵,۶۱
Stator_Up_2	-۱۷۶,۳	۷۹۳۷,۲	-۱۷۳,۱۴	-۷۵۸۷,۷	Stator_Up_2	-۲۲۵,۶۱	۷۶۵۷,۴	-۷۲۳,۲۵	-۷۱۸۲,۹
Stator_Down_1	-۷۵۶۴,۲	-۱۷۳,۱۴	۷۹۱۲,۳	-۱۷۵,۰۱	Stator_Down_1	-۷۱۸۲,۹	-۷۲۳,۲۵	۷۶۳۲,۱	-۲۲۵,۹۸
Stator_Down_2	-۱۷۵,۴	-۷۵۸۷,۷	-۱۷۵,۰۱	۷۹۳۸,۱	Stator_Down_2	-۲۲۵,۶۱	-۷۲۰۸,۶	-۲۲۵,۹۸	۷۱۶۰,۲
Position					Position				
ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²	ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²
Stator_Up_1	۷۳۰۶	-۲۱۹,۸	-۶۷۱۵,۴	-۲۲۱,۱۹	Stator_Up_1	۷۳۷۶,۱	-۵۲۶,۵۳	-۶۲۹۴,۶	-۵۵۴,۹۳
Stator_Up_2	-۲۱۹,۸	۷۳۸۹,۴	-۲۱۶,۸۳	-۶۷۵۲,۸	Stator_Up_2	-۵۲۶,۵۳	۷۳۷۵,۷	-۵۰۸,۵۵	-۶۲۴۰,۶
Stator_Down_1	-۶۷۱۵,۴	-۲۱۶,۸۳	۷۳۵۳	-۲۲۰,۷۸	Stator_Down_1	-۶۲۹۴,۶	-۵۰۸,۵۵	۷۳۴۱,۷	-۵۲۸,۵۷
Stator_Down_2	-۲۲۱,۱۹	-۶۷۵۲,۸	-۲۲۰,۷۸	۷۳۹۴,۷	Stator_Down_2	-۵۵۴,۹۳	-۶۲۴۰,۶	-۵۲۸,۵۷	۷۳۴۱,۱
Position					Position				
ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²	ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²
Stator_Up_1	۷۳۷۰,۳	-۲۱۹,۴۷	-۶۷۲۹	-۲۲۱,۷۸	Stator_Up_1	۷۶۳۷,۹	-۲۲۴,۷۸	-۷۱۸۹,۶	-۲۲۳,۵۶
Stator_Up_2	-۲۱۹,۴۷	۷۴۲۰,۸	-۲۱۷,۵۲	-۶۷۸۳,۸	Stator_Up_2	-۲۲۴,۷۸	۷۶۶۰,۱	-۲۲۴,۴۷	-۷۲۱,۰۹
Stator_Down_1	-۶۷۲۹	-۲۱۷,۵۲	۷۳۶۹	-۲۲۲,۴۳	Stator_Down_1	-۷۱۸۹,۶	-۲۲۴,۴۷	۷۶۶۰,۱	-۲۲۴,۰۱
Stator_Down_2	-۲۲۱,۷۸	-۶۷۸۳,۸	-۲۲۲,۴۳	۷۴۲۸	Stator_Down_2	-۲۲۳,۵۶	-۷۲۱,۰۹	-۲۲۶,۰۱	۷۶۶۰,۴
Position					Position				
ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²	ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²
Stator_Up_1	۷۹۱۰	-۱۷۶,۰۲	-۷۵۵۸,۴	-۱۷۵,۵۶	Stator_Up_1	۸۱۶۶	-۱۴۵,۳۶	-۷۸۷۱,۷	-۱۴۴,۹
Stator_Up_2	-۱۷۶,۰۲	۷۹۱۹,۵	-۱۷۲,۹۲	-۷۵۷۰,۵	Stator_Up_2	-۱۴۵,۳۶	۸۱۹۹	-۱۴۳,۸۱	-۷۹۰,۹۹
Stator_Down_1	-۷۵۵۸,۴	-۱۷۲,۹۲	۷۹۰۶,۶	-۱۷۵,۲۷	Stator_Down_1	-۷۸۷۱,۷	-۱۴۳,۸۱	۸۱۶۵,۷	-۱۴۵,۱۷
Stator_Down_2	-۱۷۵,۵۶	-۷۵۷۰,۵	-۱۷۵,۲۷	۷۹۲۱,۴	Stator_Down_2	-۱۴۳,۹	-۷۹۰,۹۹	-۱۴۵,۱۷	۸۱۹۹
Position					Position				
ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²	ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²
Stator_Up_1	۸۴۶۷,۹	-۱۲۵,۵۴	-۸۲۱۸,۲	-۱۲۴,۱۱	Stator_Up_1	۸۷۳۰,۲	-۱۰۸,۶۵	-۸۵۱۳,۴	-۱۰۸,۲۲
Stator_Up_2	-۱۲۵,۵۴	۸۵۲۳,۷	-۱۲۴	-۸۲۷۴,۱	Stator_Up_2	-۱۰۸,۶۵	۸۷۸۳,۴	-۱۰۷,۲۳	-۸۵۶۷,۵
Stator_Down_1	-۸۲۱۸,۲	-۱۲۴	۸۴۶۷,۷	-۱۲۵,۵۲	Stator_Down_1	-۸۵۱۳,۴	-۱۰۷,۲۳	۸۷۳۰,۳	-۱۰۹,۶۵
Stator_Down_2	-۱۲۴,۱۱	-۸۲۷۴,۱	-۱۲۵,۵۲	۸۵۲۳	Stator_Down_2	-۱۰۸,۲۲	-۸۵۶۷,۵	-۱۰۹,۶۵	۸۷۸۵,۴
Position					Position				
ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²	ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²
Stator_Up_1	۹۱۳۲,۲	-۹۸,۱۸۹	-۸۹۲۷,۹	-۹۷,۱۰۵	Stator_Up_1	۹۳۷۷,۴	-۸۸,۸۰۶	-۹۲۰,۱۲	-۸۷,۲۸۶
Stator_Up_2	-۹۸,۱۸۹	۹۱۲۱,۴	-۹۵,۶۸۹	-۸۹۲۷,۵	Stator_Up_2	-۸۸,۸۰۶	۹۴۱۲,۵	-۸۶,۷۶۷	-۹۲۳۶,۹
Stator_Down_1	-۸۹۲۷,۹	-۹۵,۶۸۹	۹۱۲۱,۳	-۹۷,۷	Stator_Down_1	-۹۲۰,۱۲	-۸۶,۷۶۷	۹۳۷۶,۴	-۸۸,۴۵۵
Stator_Down_2	-۹۷,۱۰۵	-۸۹۲۷,۵	-۹۷,۷	۹۱۲۲,۳	Stator_Down_2	-۸۷,۲۸۶	-۹۲۳۶,۹	-۸۸,۴۵۵	۹۴۱۲,۷
Position					Position				
ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²	ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²
Stator_Up_1	۹۶۳۴,۴	-۸۲,۸۰۴	-۹۴۶۹,۶	-۸۲,۰۲۶	Stator_Up_1	۹۳۷۲,۲	-۸۹,۶۳۳	-۹۱۹۵	-۸۷,۵۴۶
Stator_Up_2	-۸۲,۸۰۴	۹۶۷۷,۱	-۸۰,۶۳۲	-۹۵۱۳,۷	Stator_Up_2	-۸۹,۶۳۳	۹۴۳۱,۱	-۸۶,۸۷۹	-۹۲۵۴,۶
Stator_Down_1	-۹۴۶۹,۶	-۸۰,۶۳۲	۹۶۳۳,۲	-۸۲,۹۸۲	Stator_Down_1	-۹۱۹۵	-۸۶,۸۷۹	۹۳۶۹,۸	-۸۷,۸۵۳
Stator_Down_2	-۸۲,۰۲۶	-۹۵۱۳,۷	-۸۲,۹۸۲	۹۶۷۸,۷	Stator_Down_2	-۸۷,۵۴۶	-۹۲۵۴,۶	-۸۷,۸۵۳	۹۴۳۰
Position					Position				
ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²	ff	SU ¹	SU ²	SD ¹	SD ²
Stator_Up_1	۹۰۵۵,۴	-۹۷,۶۱۶	-۸۸۶۰,۶	-۹۷,۱۷۶	Stator_Up_1	۸۷۹۵,۵	-۱۰۹,۸	-۸۵۷۷,۱	-۱۰۸,۶۵
Stator_Up_2	-۹۷,۶۱۶	۹۱۰۶,۶	-۹۵,۵۲۲	-۸۹۱۳,۴	Stator_Up_2	-۱۰۹,۸	۸۸۳۸,۲	-۱۰۷,۷۸	-۸۶۲۰,۷
Stator_Down_1	-۸۸۶۰,۶	-۹۵,۵۲۲	۹۰۵۵	-۹۸,۱۰۸	Stator_Down_1	-۸۵۷۷,۱	-۱۰۷,۷۸	۸۷۹۴,۵	-۱۰۹,۶۵
Stator_Down_2	-۹۷,۱۷۶	-۸۹۱۳,۴	-۹۸,۱۰۸	۹۱۰۸,۷	Stator_Down_2	-۱۰۸,۶۵	-۸۶۲۰,۷	-۱۰۹,۶۵	۸۸۲۹

Position		۲۲۰				Position		۲۳۰			
ff	SU۱	SU۲	SD۱	SD۲	ff	SU۱	SU۲	SD۱	SD۲		
Stator_Up_۱	۸۴۹۴,۶	-۱۲۴,۷۳	-۸۲۴۴,۳	-۱۲۴,۵۶	Stator_Up_۱	۸۱۸۷,۴	-۱۴۵,۷۴	-۷۸۹۷,۱	-۱۴۴,۵۶		
Stator_Up_۲	-۱۲۵,۷۳	۸۵۰,۵۰	-۱۲۳,۵۴	-۸۲۵,۳	Stator_Up_۲	-۱۴۵,۷۴	۸۲۴,۰,۵	-۱۴۳,۷۷	-۷۹۵۱		
Stator_Down_۱	-۸۲۴۴,۳	-۱۲۳,۵۴	۸۴۹۳,۱	-۱۲۵,۲۹	Stator_Down_۱	-۷۸۹۷,۱	-۱۴۳,۷۷	۸۱۸۶,۱	-۱۴۵,۳۲		
Stator_Down_۲	-۱۲۴,۵۶	-۸۲۵,۳	-۱۲۵,۲۹	۸۵۰,۳,۱	Stator_Down_۲	-۱۴۴,۵۶	-۷۹۵۱	-۱۴۵,۳۲	۸۲۴,۰,۹		
Position		۲۴۰				Position		۲۵۰			
ff	SU۱	SU۲	SD۱	SD۲	ff	SU۱	SU۲	SD۱	SD۲		
Stator_Up_۱	۷۹۰,۰,۸	-۱۷۶,۱۹	-۷۵۴۹,۱	-۱۷۵,۵۱	Stator_Up_۱	۷۶۴۴,۱	-۲۲۴,۲۷	-۷۱۹۴,۳	-۲۲۵,۵۶		
Stator_Up_۲	-۱۷۶,۱۹	۷۹۶۲,۹	-۱۷۳,۷۶	-۷۶۱۲,۹	Stator_Up_۲	-۲۲۴,۲۷	۷۶۵,۰,۶	-۲۲۴,۰,۴	-۷۲۰,۲,۳		
Stator_Down_۱	-۷۵۴۹,۱	-۱۷۳,۷۶	۷۸۹۸,۷	-۱۷۵,۸۹	Stator_Down_۱	-۷۱۹۴,۳	-۲۲۴,۰,۴	۷۶۴,۶,۴	-۲۲۸,۱,۱		
Stator_Down_۲	-۱۷۵,۵۱	-۷۶۱۲,۹	-۱۷۵,۸۹	۷۹۶۴,۳	Stator_Down_۲	-۲۲۵,۵۶	-۷۲۰,۲,۳	-۲۲۸,۱,۱	۷۶۵۶		
Position		۲۶۰				Position		۲۷۰			
ff	SU۱	SU۲	SD۱	SD۲	ff	SU۱	SU۲	SD۱	SD۲		
Stator_Up_۱	۷۳۶۷,۸	-۳۲۰,۱۷	-۶۷۲۵,۵	-۳۲۲,۱	Stator_Up_۱	۷۳۷,۰,۹	-۵۳۱,۶۸	-۶۲۸۴,۸	-۵۵۴,۳۷		
Stator_Up_۲	-۳۲۰,۱۷	۷۳۹۳,۲	-۳۱۵,۷۸	-۶۷۵۷,۲	Stator_Up_۲	-۵۳۱,۶۸	۷۳۷۷,۹	-۵۰۵,۴۷	-۶۴۴,۰,۷		
Stator_Down_۱	-۶۷۲۵,۵	-۳۱۵,۷۸	۷۳۶۱,۶	-۳۲۰,۲۶	Stator_Down_۱	-۶۲۸۴,۸	-۵۰۵,۴۷	۷۳۱۹,۹	-۵۲۹,۶۴		
Stator_Down_۲	-۳۲۲,۱	-۶۷۵۷,۲	-۳۲۰,۲۶	۷۳۹۹,۶	Stator_Down_۲	-۵۵۴,۳۷	-۶۳۴,۰,۷	-۵۲۹,۶۴	۷۴۲۴,۷		
Position		۲۸۰				Position		۲۹۰			
ff	SU۱	SU۲	SD۱	SD۲	ff	SU۱	SU۲	SD۱	SD۲		
Stator_Up_۱	۷۴۲,۰,۵	-۳۲۳,۲۹	-۶۷۷۱,۱	-۳۲۶,۰,۷	Stator_Up_۱	۷۶۴۱,۴	-۲۲۵,۰,۸	-۷۱۹۱,۴	-۲۲۴,۸۸		
Stator_Up_۲	-۳۲۳,۲۹	۷۴۴,۰,۱	-۳۱۶,۴۹	-۶۸۰,۰,۳	Stator_Up_۲	-۲۲۵,۰,۸	۷۶۸۰,۳	-۲۲۲,۸۹	-۷۲۲۲,۴		
Stator_Down_۱	-۶۷۷۱,۱	-۳۱۶,۴۹	۷۴۰,۹,۵	-۳۲۱,۹	Stator_Down_۱	-۷۱۹۱,۴	-۲۲۲,۸۹	۷۶۳۹,۷	-۲۲۵,۴۱		
Stator_Down_۲	-۳۲۶,۰,۷	-۶۸۰,۰,۳	-۳۲۱,۹	۷۴۴۸,۳	Stator_Down_۲	-۲۲۴,۸۸	-۷۲۲۲,۴	-۲۲۵,۴۱	۷۱۸۲,۷		
Position		۳۰۰				Position		۳۱۰			
ff	SU۱	SU۲	SD۱	SD۲	ff	SU۱	SU۲	SD۱	SD۲		
Stator_Up_۱	۷۹۰,۶,۱	-۱۷۶,۲۱	-۷۵۵۴,۴	-۱۷۵,۵۶	Stator_Up_۱	۸۱۸۷,۱	-۱۴۶,۲۲	-۷۸۹۶,۲	-۱۴۴,۷۱		
Stator_Up_۲	-۱۷۶,۲۱	۷۹۲۳	-۱۷۳,۴۸	-۷۵۷۳,۳	Stator_Up_۲	-۱۴۶,۲۲	۸۲۲۲	-۱۴۴,۵۵	-۷۹۳۱,۳		
Stator_Down_۱	-۷۵۵۴,۴	-۱۷۳,۴۸	۷۹۰,۳	-۱۷۵,۵۷	Stator_Down_۱	-۷۸۹۶,۲	-۱۴۴,۵۵	۸۱۸۶,۷	-۱۴۵,۹۷		
Stator_Down_۲	-۱۷۵,۵۶	-۷۵۷۳,۳	-۱۷۵,۵۷	۷۹۲۴,۵	Stator_Down_۲	-۱۴۴,۷۱	-۷۹۳۱,۳	-۱۴۵,۹۷	۸۲۲۱,۹		
Position		۳۲۰				Position		۳۳۰			
ff	SU۱	SU۲	SD۱	SD۲	ff	SU۱	SU۲	SD۱	SD۲		
Stator_Up_۱	۸۴۷۹,۲	-۱۲۵,۱۲	-۸۲۲۹,۳	-۱۲۴,۸۴	Stator_Up_۱	۸۷۸۳	-۱۰۸,۷۹	-۸۵۶۶,۲	-۱۰۸,۰,۱		
Stator_Up_۲	-۱۲۵,۱۲	۸۵۰,۴,۸	-۱۲۲,۳	-۸۲۵۷,۴	Stator_Up_۲	-۱۰۸,۷۹	۸۸۵۰,۷	-۱۰۷,۷۱	-۸۶۳,۲		
Stator_Down_۱	-۸۲۲۹,۳	-۱۲۲,۳	۸۴۷۶,۴	-۱۲۴,۸۶	Stator_Down_۱	-۸۵۶۶,۲	-۱۰۷,۷۱	۸۷۸۳,۸	-۱۰۹,۸۵		
Stator_Down_۲	-۱۲۴,۸۴	-۸۲۵۷,۴	-۱۲۴,۸۶	۸۵۰,۷,۱	Stator_Down_۲	-۱۰۸,۰,۱	-۸۶۳,۲	-۱۰۹,۸۵	۸۹۵۲,۱		
Position		۳۴۰				Position		۳۵۰			
ff	SU۱	SU۲	SD۱	SD۲	ff	SU۱	SU۲	SD۱	SD۲		
Stator_Up_۱	۹۱۰,۱,۱	-۹۸,۱۵۳	-۸۹۰,۶	-۹۶,۸۷۴	Stator_Up_۱	۹۳۸۱,۵	-۸۸,۷۶۹	-۹۲۰,۵	-۸۷,۷۳۷		
Stator_Up_۲	-۹۸,۱۵۳	۹۱۳,۶,۶	-۹۵,۶۶	-۸۹۴۲,۸	Stator_Up_۲	-۸۸,۷۶۹	۹۳۹۴,۲	-۸۶,۸۰۳	-۹۲۱,۸,۷		
Stator_Down_۱	-۸۹۰,۶	-۹۵,۶۶	۹۰۹۹	-۹۷,۲۹	Stator_Down_۱	-۹۲۰,۵	-۸۶,۸۰۳	۹۳۸۰,۷	-۸۸,۹۱۹		
Stator_Down_۲	-۹۶,۸۷۴	-۸۹۴۲,۸	-۹۷,۲۹	۹۱۳,۶,۹	Stator_Down_۲	-۸۷,۷۳۷	-۹۲۱,۸,۷	-۸۸,۹۱۹	۹۳۹۵,۳		
Position		۳۶۰				Position		۳۷۰			
ff	SU۱	SU۲	SD۱	SD۲	ff	SU۱	SU۲	SD۱	SD۲		
Stator_Up_۱	۹۶۴۸,۸	-۸۳,۲۴۵	-۹۴۸۴	-۸۱,۵۵۵	Stator_Up_۱	۹۶۴۸,۸	-۸۳,۲۴۵	-۹۴۸۴	-۸۱,۵۵۵		
Stator_Up_۲	-۸۳,۲۴۵	۹۷۱۶,۵	-۸۱,۳۱۲	-۹۵۵۱,۹	Stator_Up_۲	-۸۳,۲۴۵	۹۷۱۶,۵	-۸۱,۳۱۲	-۹۵۵۱,۹		
Stator_Down_۱	-۹۴۸۴	-۸۱,۳۱۲	۹۶۴۸	-۸۲,۶۶۲	Stator_Down_۱	-۹۴۸۴	-۸۱,۳۱۲	۹۶۴۸	-۸۲,۶۶۲		
Stator_Down_۲	-۸۱,۵۵۵	-۹۵۵۱,۹	-۸۲,۶۶۲	۹۷۱۶,۲	Stator_Down_۲	-۸۱,۵۵۵	-۹۵۵۱,۹	-۸۲,۶۶۲	۹۷۱۶,۲		

حال ماتریس فوق را کاهش مرتبه داده و یک ماتریس ۲ در ۲ بدست می‌آوریم. محاسبه ماتریس کاهش مرتبه یافته به شرح زیر است. ظرفیت‌های ماتریس فوق بر مبنای فمتوفاراد است. با استفاده از ماتریس معادل معادله ۴-۲ می‌توان ماتریس اصلی را کاهش مرتبه داد. در این ماتریس جدید ظرفیت‌های خودی و متقابل استاتورها برای استاتور بالا و پایین از هم کم شده و در سطر مربوطه نوشته می‌شوند. در این ماتریس تنها ظرفیت‌های خودی استاتورهای بالا و پایین و ظرفیت متقابل بین استاتور بالا و پایین وجود داشته که اساس استفاده در شبیه‌سازی مرحله بعدی است.

$$\begin{array}{lcl}
 \text{Stator}_{Up} & \text{Stator}_{Up} & \text{Stator}_{Down} \\
 SU1 - SU2 & SU1 - SU2 & SD1 - SD2 \\
 \text{Stator}_{Down} & SU1 - SU2 & SD1 - SD2
 \end{array}$$

معادله ۴—۲ کاهش مرتبه ماتریس خازنی

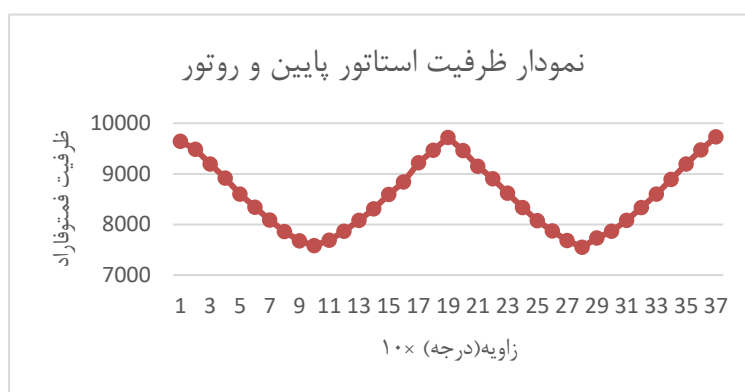
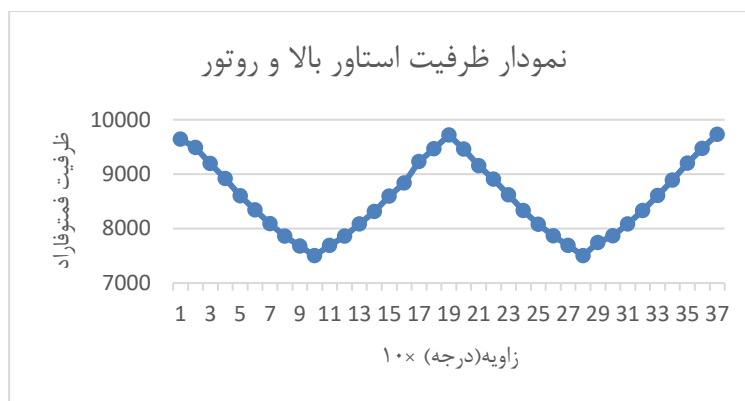
ماتریس جدید بدست آمده بصورت جدول زیر است. ظرفیت ها برحسب فمتوفاراد است.

جدول ۴—۳ ماتریس ظرفیت کاهش یافته

۲*۲ Matrix		Position
۹۶۴۳,۹۷۶	-۹۳۱۶,۲۲۳	۰
-۹۳۱۶,۰۸۱	۹۶۴۳,۶۱۹	
۹۴۸۷,۳۶	-۹۱۳۴,۳۸۷	۱۰
-۹۱۳۵,۰۴۸	۹۴۸۵,۶۱۸	
۹۱۹۴,۷۹۷	-۸۸۰۵,۸۰۶	۲۰
-۸۸۰۶,۶۴۱	۹۱۹۳,۸۴۶	
۸۹۱۶,۱۹	-۸۴۷۸,۱۹	۳۰
-۸۴۷۹,۴۴	۸۹۱۵,۴۳	
۸۵۹۹,۴۹	-۸۰۹۹,۰۹	۴۰
-۸۱۰۱,۴۶	۸۵۹۸,۶۷	
۸۳۴۱,۵۳	-۷۷۶۳,۷	۵۰
-۷۷۶۳,۹۳	۸۳۴۳,۷۴	
۸۰۹۲,۲	-۷۳۸۸,۸	۶۰
-۷۳۹۱,۰۶	۸۰۸۷,۳۱	
۷۸۵۹,۷۱	-۶۹۵۷,۲۹	۷۰
-۶۹۶۶,۶۵	۷۸۵۸,۰۸	
۷۶۷۵,۸	-۶۳۹۴,۲۱	۸۰
-۶۳۹۸,۵۷	۷۶۷۳,۷۸	
۷۵۰۲,۶۳	-۵۷۳۹,۶۷	۹۰
-۵۷۸۶,۰۵	۷۵۸۰,۲۷	
۷۶۸۹,۷۷	-۶۴۰۷,۲۲	۱۰۰
-۶۴۱۱,۴۸	۷۶۹۱,۴۳	
۷۸۶۲,۶۸	-۶۹۶۶,۰۴	۱۱۰
-۶۹۶۶,۱۳	۷۸۶۶,۱۱	
۸۰۸۶,۰۲	-۷۳۸۲,۸۴	۱۲۰
-۷۳۸۵,۴۸	۸۰۸۱,۸۷	
۸۳۱۱,۳۶	-۷۷۳۲,۸	۱۳۰
-۷۷۳۲,۸۹	۸۳۱۰,۸۷	
۸۵۹۳,۴۴	-۸۰۹۴,۰۹	۱۴۰
-۸۰۹۴,۲	۸۵۹۳,۲۲	
۸۸۳۸,۸۵	-۸۴۰۵,۱۸	۱۵۰
-۸۴۰۶,۱۷	۸۸۳۹,۹۵	
۹۲۳۰,۳۸۹	-۸۸۳۰,۷۹۵	۱۶۰
-۸۸۳۲,۲۱۶	۹۲۱۹	
۹۴۶۶,۲۰۶	-۹۱۱۳,۹۱۴	۱۷۰
-۹۱۱۴,۴۳۳	۹۴۶۴,۸۵۵	
۹۷۱۷,۲۰۴	-۹۳۸۷,۵۷۴	۱۸۰
-۹۳۸۸,۹۶۸	۹۷۱۶,۱۸۲	
۹۴۶۱,۸۳۳	-۹۱۰۷,۴۵۴	۱۹۰
-۹۱۰۸,۱۲۱	۹۴۵۷,۶۵۳	
۹۱۵۳,۰۱۶	-۸۷۶۳,۴۲۴	۲۰۰
-۸۷۶۵,۰۷۸	۹۱۵۲,۱۰۸	
۸۹۰۵,۳	-۸۴۶۸,۴۵	۲۱۰
-۸۴۶۹,۳۲	۸۹۰۴,۱۵	

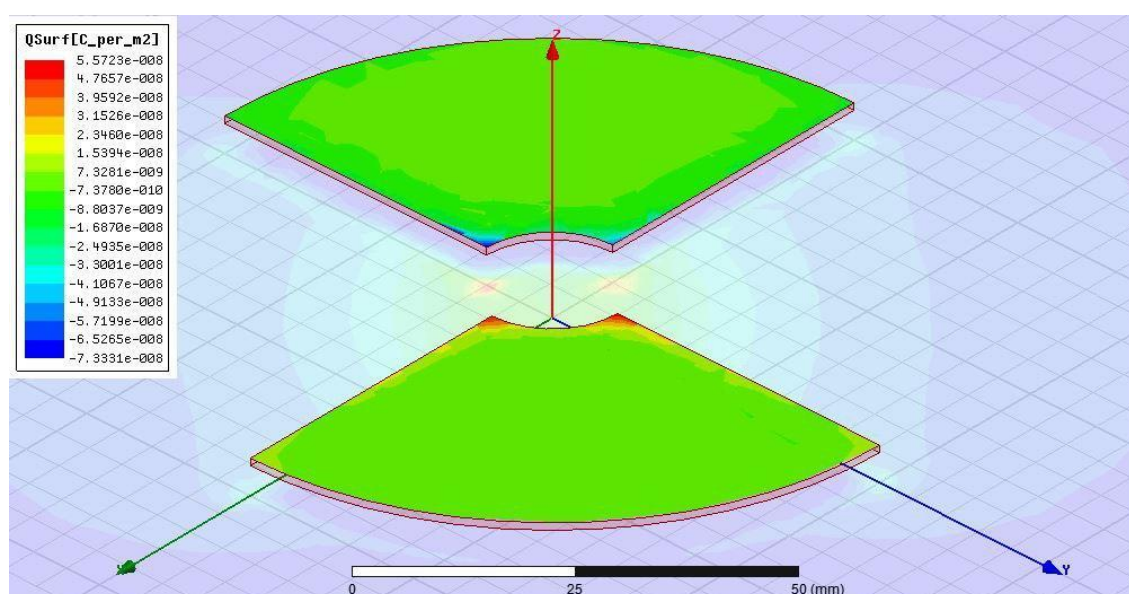
۸۱۱۹,۳۳	-۸۱۱۹,۷۴	۲۲.
-۸۱۲۰,۷۶	۸۱۱۸,۳۹	
۸۳۳۳,۱۴	-۷۷۵۲,۵۴	۲۳.
-۷۷۵۳,۴۳	۸۳۳۱,۴۲	
۸۰۷۶,۹۹	-۷۳۷۳,۵۹	۲۴.
-۷۳۷۵,۳۴	۸۰۷۴,۵۹	
۷۸۶۸,۳۷	-۶۹۶۸,۷۴	۲۵.
-۶۹۷۰,۲۶	۷۸۷۴,۵۱	
۷۶۸۷,۹۷	-۶۴۰۳,۴	۲۶.
-۶۴۰۹,۷۲	۷۶۸۱,۸۶	
۷۵۰۲,۵۸	-۵۷۲۰,۴۳	۲۷.
-۵۷۷۹,۳۳	۷۵۴۹,۵۴	
۷۷۴۳,۷۹	-۶۴۴۵,۰۳	۲۸.
-۶۴۵۴,۶۱	۷۷۳۱,۴	
۷۸۶۶,۴۸	-۶۹۶۶,۵۲	۲۹.
-۶۹۶۸,۵۱	۷۸۶۵,۱۱	
۸۰۸۲,۳۱	-۷۳۷۸,۸۴	۳۰.
-۷۳۸۰,۹۲	۸۰۷۸,۵۷	
۸۳۳۳,۳۲	-۷۷۵۱,۴۹	۳۱.
-۷۷۵۱,۶۵	۸۳۳۲,۶۷	
۸۶۰۴,۳۲	-۸۱۰۴,۴۶	۳۲.
-۸۱۰۷	۸۶۰۱,۲۶	
۸۸۹۱,۷۹	-۸۴۵۸,۱۹	۳۳.
-۸۴۵۸,۴۹	۸۸۹۳,۶۵	
۹۱۹۹,۲۵۳	-۸۸۰۹,۱۲۶	۳۴.
-۸۸۱۰,۳۴	۹۱۹۶,۲۹	
۹۴۷۰,۲۶۹	-۹۱۱۷,۲۶۳	۳۵.
-۹۱۱۸,۱۹۷	۹۴۶۹,۶۱۹	
۹۷۳۲,۰۴۵	-۹۴۰۲,۴۴۵	۳۶.
-۹۴۰۲,۶۸۸	۹۷۳۰,۶۶۲	

اگر درایه‌های ظرفیت خودی ماتریس خازنی فوق را برای استاتور بالا و پایین رسم کنیم بصورت شکل‌های زیر خواهد بود. شکل بدست آمده تغییرات متناوب و شبیه سینوسی برای ماتریس ظرفیت خازنی در موقعیت چرخش ۰ تا ۳۶۰ درجه روتور را نشان می‌دهد. نقاط قله مربوط به همپوشانی ۱۰۰ درصدی روتور و استاتورها و نقاط قعر نیز معرف همپوشانی ۰ روتور و استاتورهاست.

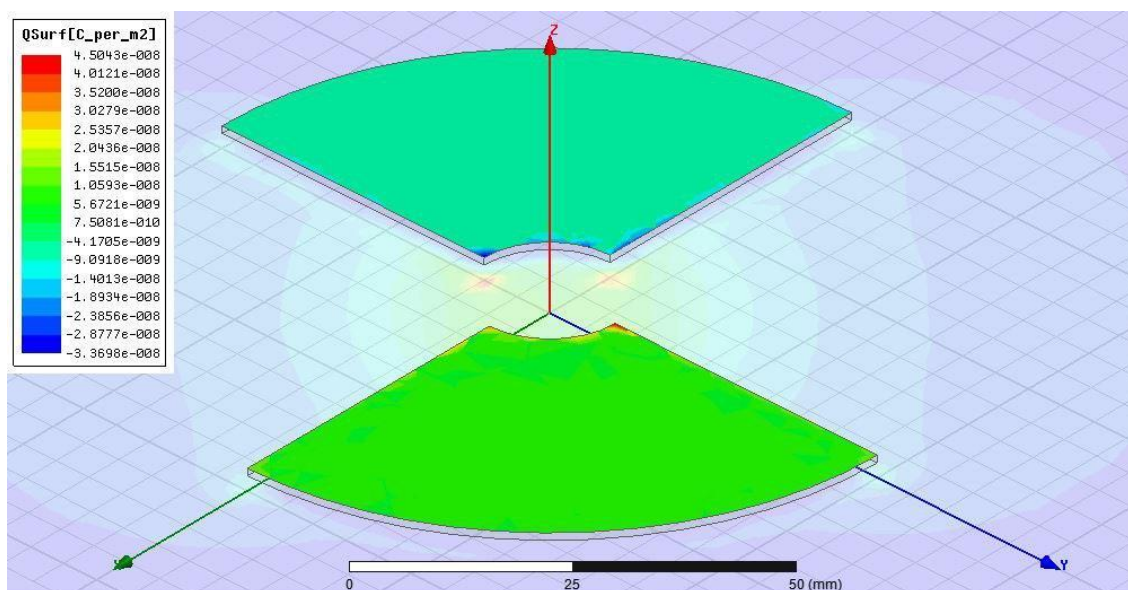


شکل ۴—۱۶ نمودار تغییرات ماتریس خازنی

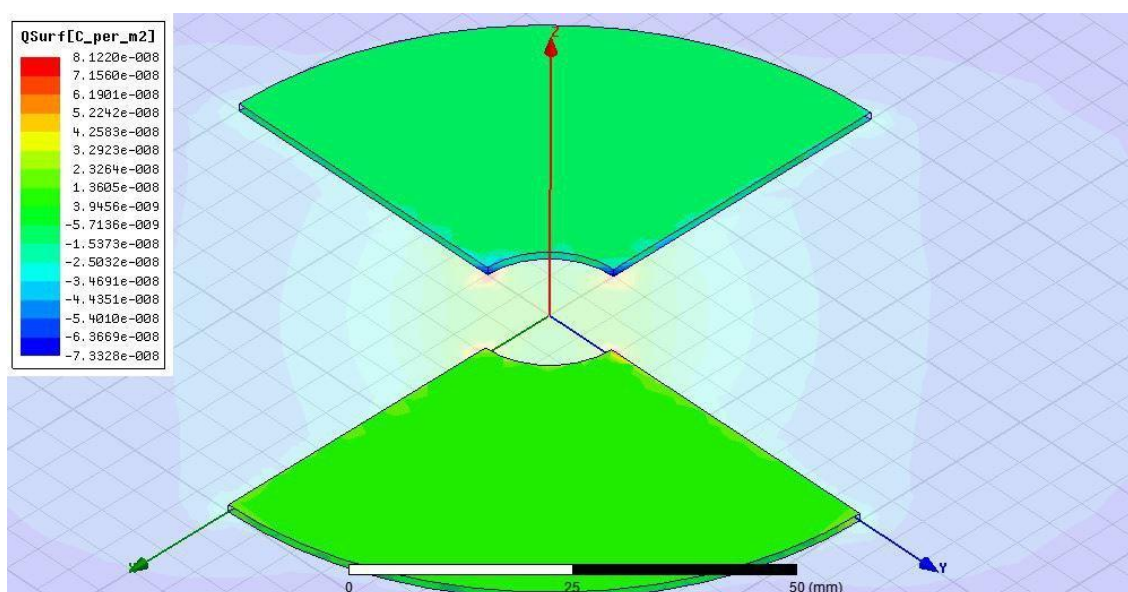
بار سطح قطب‌های روتور و استاتور در حالتی که همپوشانی صد درصدی بین قطب‌های استاتور و روتور وجود دارد بصورت زیر است.



شکل ۴—۱۷ بار سطح استاتور بالا در همپوشانی ۱۰۰ درصد

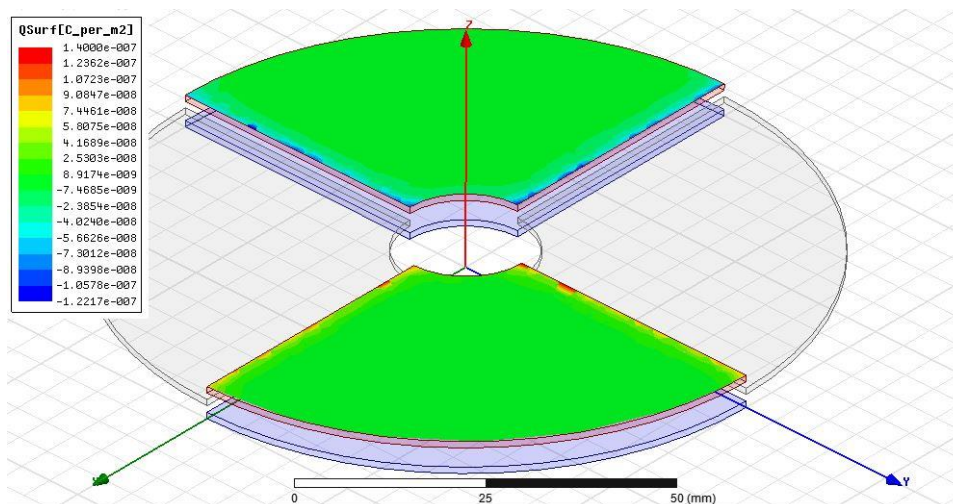


شکل ۴—۱۸ بار سطح روتور در همپوشانی ۱۰۰ درصد

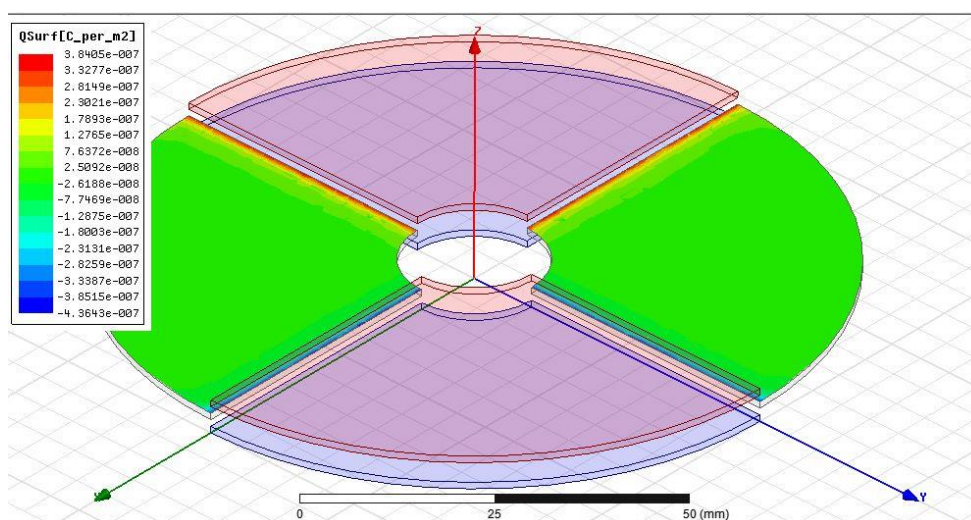


شکل ۴—۱۹ بار سطح استاتور پایین در همپوشانی ۱۰۰ درصد

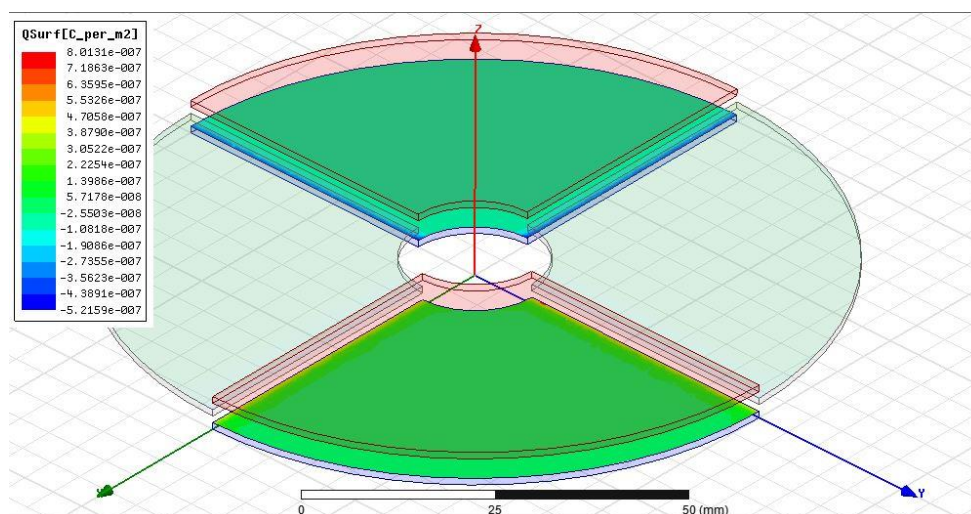
همچنین بار سطح قطب‌های روتور و استاتور در حالتی که همپوشانی ۰ درصدی بین قطب‌های استاتور و روتور وجود دارد بصورت زیر است.



شکل ۴—۲۰ بار سطح استاتور بالا در همپوشانی ۰ درصد

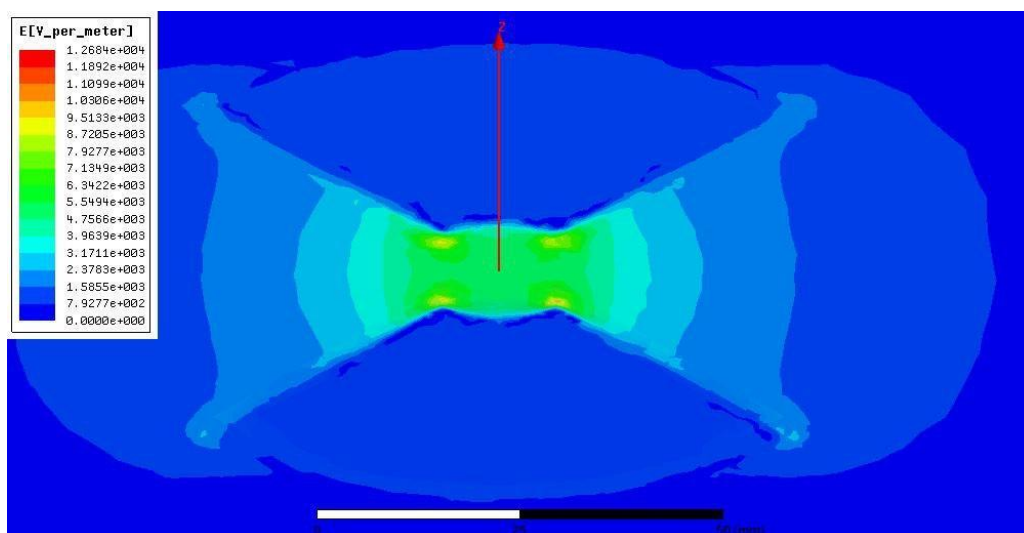


شکل ۴—۲۱ بار سطح روتور در همپوشانی ۰ درصد

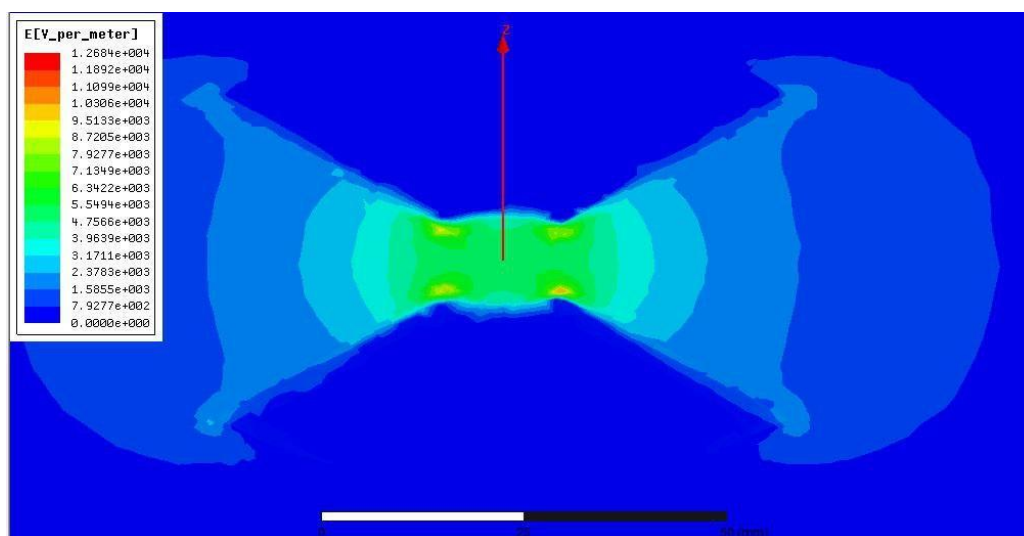


شکل ۴—۲۲ بار سطح استاتور پایین در همپوشانی ۰ درصد

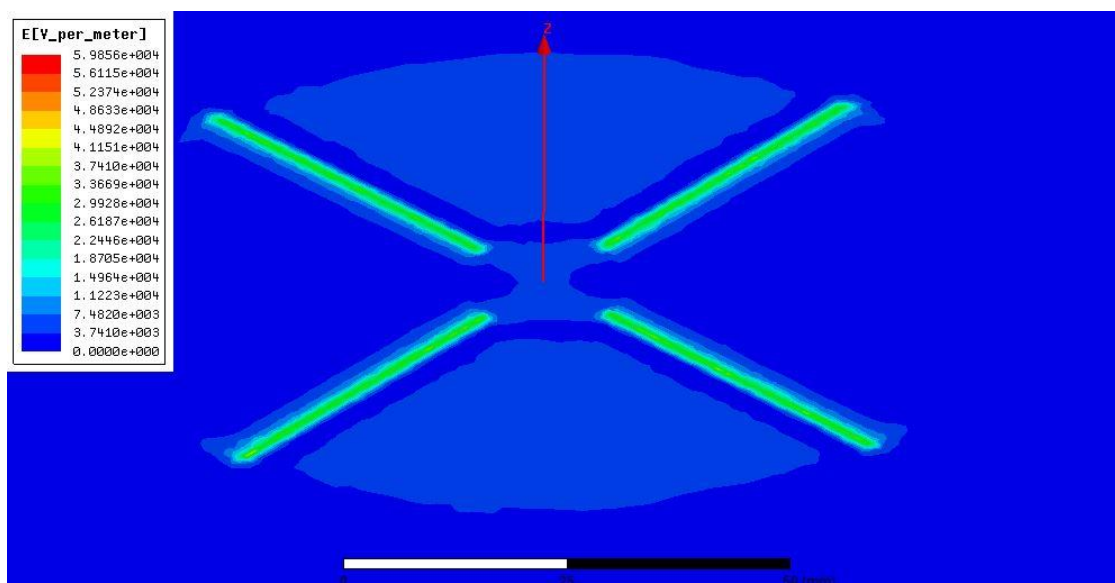
همچنین میدان الکتریکی در فاصله هوایی بین استاتور پایین با روتور و استاتور بالا با روتور در حالت همپوشانی ۱۰۰ درصد و ۰ درصد بصورت زیر قابل مشاهده است. واحد میدان الکتریکی ولت بر متر است. همانطور که مشاهده می شود در فاصله بین دو صفحه این مقدار بیشترین حالت خود است چراکه بار روی سطح باقی نمی ماند.



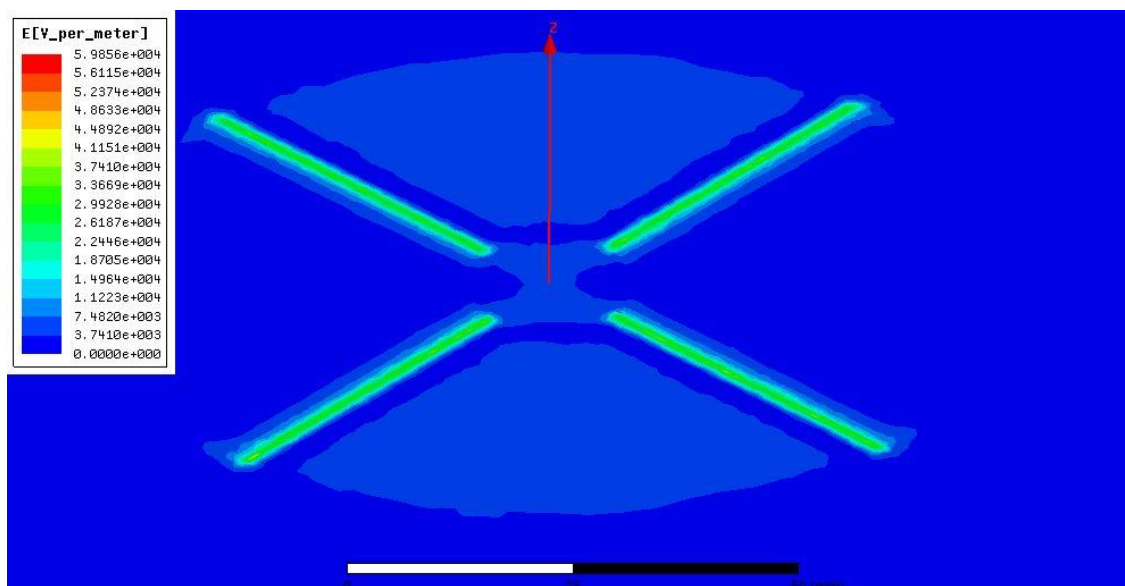
شکل ۴—۲۳ میدان الکتریکی بین استاتور پایین و روتور در وضعیت همپوشانی ۱۰۰ درصد



شکل ۴—۲۴ میدان الکتریکی بین استاتور بالا و روتور در وضعیت همپوشانی ۱۰۰ درصد

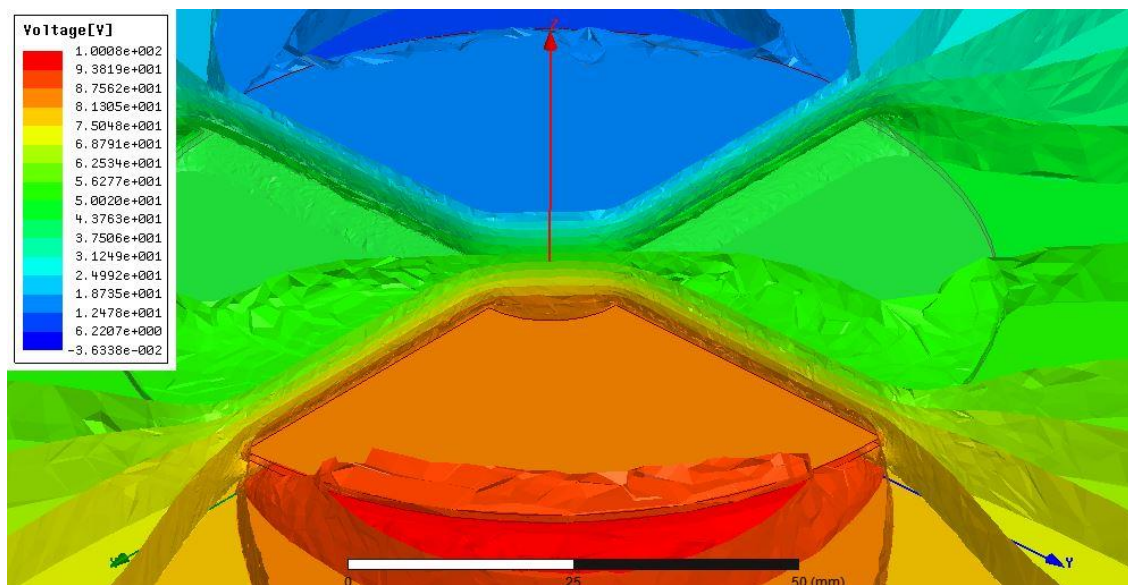


شکل ۴—۲۵ میدان الکتریکی بین استاتور پایین و روتور در وضعیت همپوشانی ۰ درصد



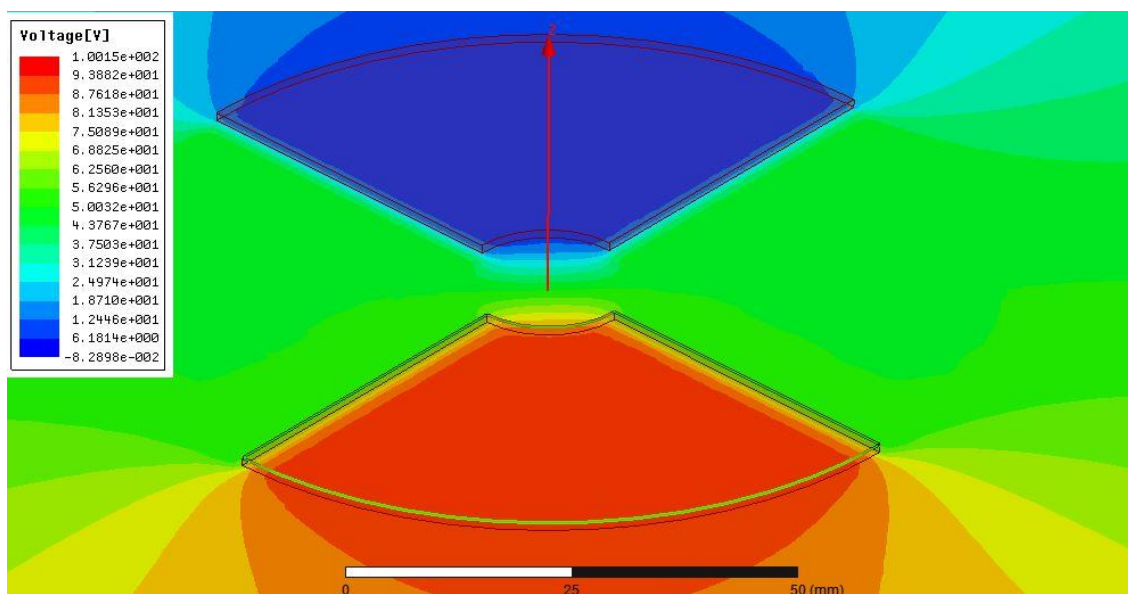
شکل ۴—۲۶ میدان الکتریکی بین استاتور بالا و روتور در وضعیت همپوشانی ۰ درصد

همچنین با اعمال ولتاژ ۱۰۰ ولت به یکی از صفحات استاتور پایین و ۰ ولت به دیگر صفحه پخش ولتاژ در فضای دستگاه بصورت زیر است. این پخش ولتاژ در وضعیت همپوشانی ۰ درصد گزارش شده است.



شکل ۴—۲۷ پخش ولتاژ در محیط محل تست در وضعیت همپوشانی ۰ درصدی بین صفحات روتور و استاتور

اگر پخش ولتاژ را روی سطح استاتور پایین در حالت همپوشانی ۰ درصد بررسی کنیم بصورت زیر است. صفحه‌ای که در تصویر زیر دیده می‌شود روتور است.



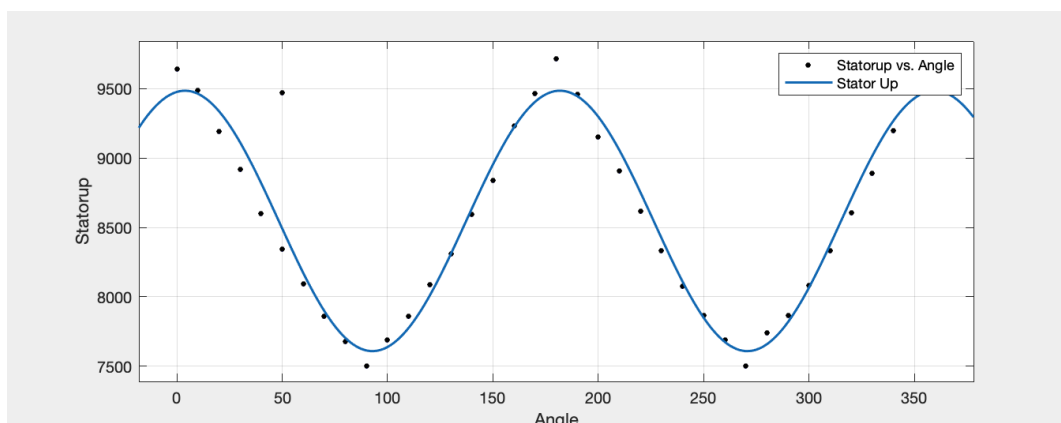
شکل ۴—۲۸ ولتاژ روی سطح استاتور پایین

نتیجه شبیه‌سازی فوق در نرم‌افزار اجزا محدود را با استفاده از سیمولینک متلب شبیه‌سازی می‌کنیم. همچنین سیگنال ولتاژ خروجی که به کمک آن فرکانس را بدست می‌آوریم مشاهده می‌شود.

به کمک ابزار افراز معادله^۱ به کمک شکل موج در نرم افزار متلب ماتریس خازنی فوق و نمودار بدست آمده را با یک معادله سری فوریه تطابق می‌دهیم تا نزدیک‌ترین معادله ریاضی به شکل نمودار تغییرات خازنی بدست آید. ساختار استاندارد این معادله به شرح زیر است.

$$F = a. + a_1 \cos(x. w) + b_1 \sin (x. w)$$

معادله ۳—۴ شکل استاندارد سری فوریه

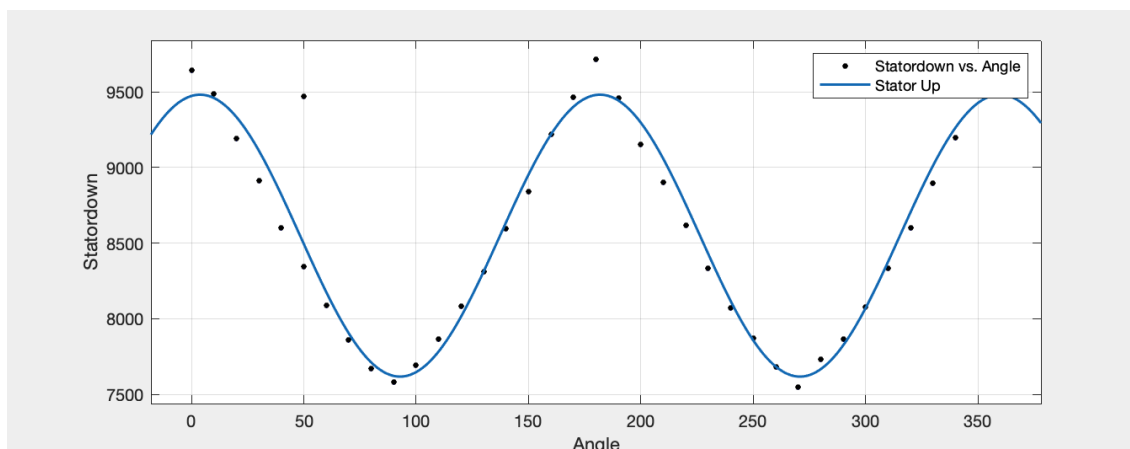


شکل ۴—۲۹ نمودار افراز شده بر ظرفیت استاتور بالا

معادله ای که بر نمودار ظرفیت خازنی استاتور بالا افراز می‌شود بصورت شکل فوق بوده و معادله آن برابر است با:

$$F(Stator Up) = 8547 + 929.3 \cos(0.35x) + 128.8 \sin (0.35x)$$

معادله ۴—۴ معادله ظرفیت استاتور بالا



شکل ۴—۳۰ نمودار افراز شده بر ظرفیت استاتور پایین

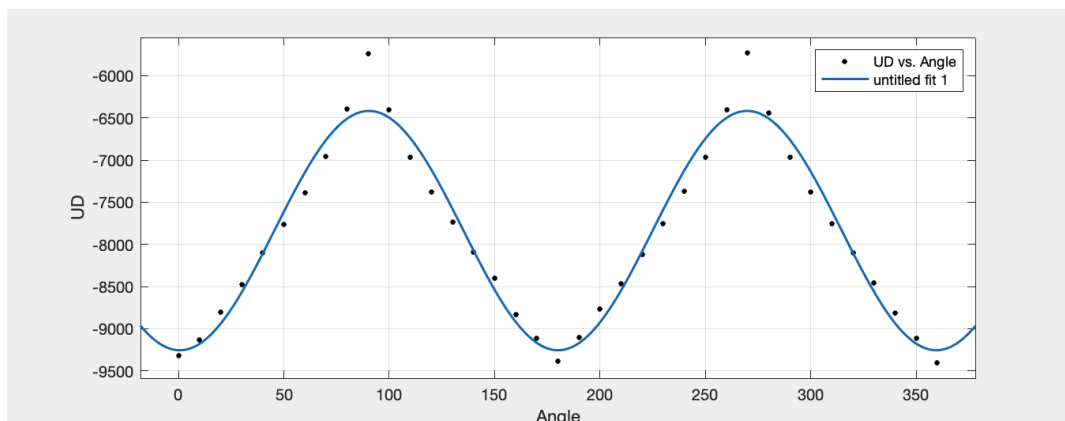
¹ Curve Fitting

معادله ای که بر نمودار ظرفیت خازنی پایین بالا افزای می شود بصورت شکل فوق بوده و معادله آن برابر است با:

$$F(\text{Stator Down}) = 8550 + 922 \cos(0.035x) + 126 \sin(0.035x)$$

معادله ۴—۵ معادله ظرفیت استاتور بالا

همچنین برای ظرفیت متقابل بین استاتور های بالا و پایین نیز می توان همین روابط و معادلات را بدست آورد که به شرح زیر است.



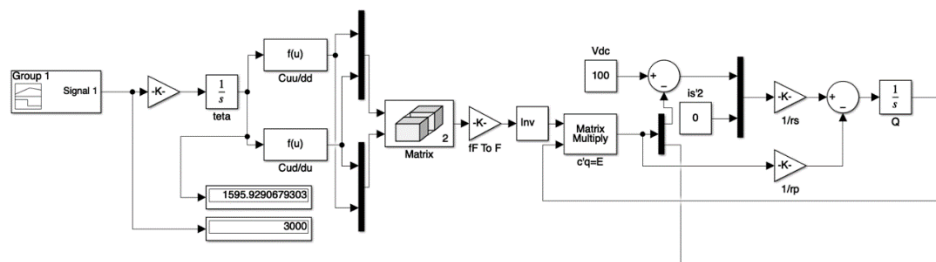
شکل ۴—۳۱ نمودار ظرفیت بین استاتورهای بالا و پایین

$$F(\text{Stator Up \& Down}) = -7836 - 1418 \cos(0.035x) - 31.37 \sin(0.035x)$$

معادله ۴—۶ - رابطه ظرفیت های متقابل

۴-۶ شبیه سازی نهایی و مشاهده سیگنال خروجی

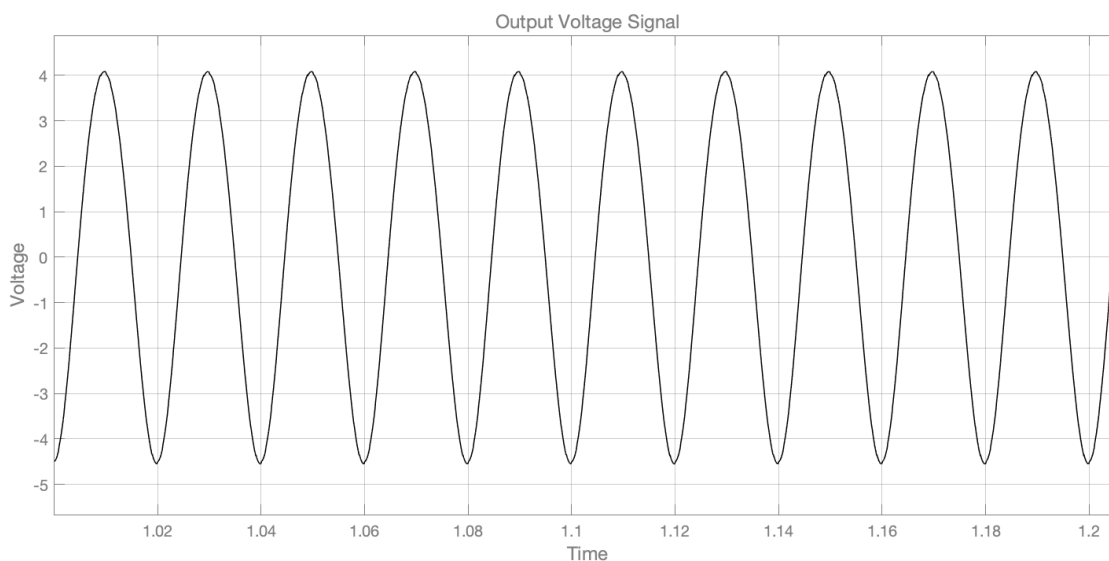
ماتریس خازنی بدست آمده به کمک شبیه سازی در نرم افزار اجزای محدود در این مرحله و به کمک سیمولینک و با استفاده از روابط ریاضی که از قبل مورد بررسی قرار دادیم شبیه سازی می شود.



شکل ۴-۳۲ شبیه سازی سیمولینک

توابع Cud/dd و Cuu/dd به ترتیب نشان دهنده معادلات مربوط به ظرفیت خودی و متقابل می باشد. سیگنال ورودی هرمدل سیگنالی می تواند باشد. به کمک استفاده از این ابزار اشکال مختلف ورودی به ماتریس خازنی اعمال می شود. با عبور سیگنال از یک ضریب و همچنین انتگرال گیری از آن سیگنال مناسب ورودی به ماتریس خازنی اعمال می شود. خروجی ماتریس که بر حسب فمتوفاراد است در مرحله بعد به فاراد تبدیل می شود. به کمک سایر ضرایب در نهایت سیگنال ولتاژ خروجی بدست می آید. سیگنال ولتاژ خروجی یک سیگنال متناوب است. با اعمال ورودی های مختلف در حالت پایدار و همچنین حالت گذرای سیگنال خروجی مشاهده می شود. ورودی ۱۰۰ ولت اعمال شده و دامنه خروجی ۴ ولت است.

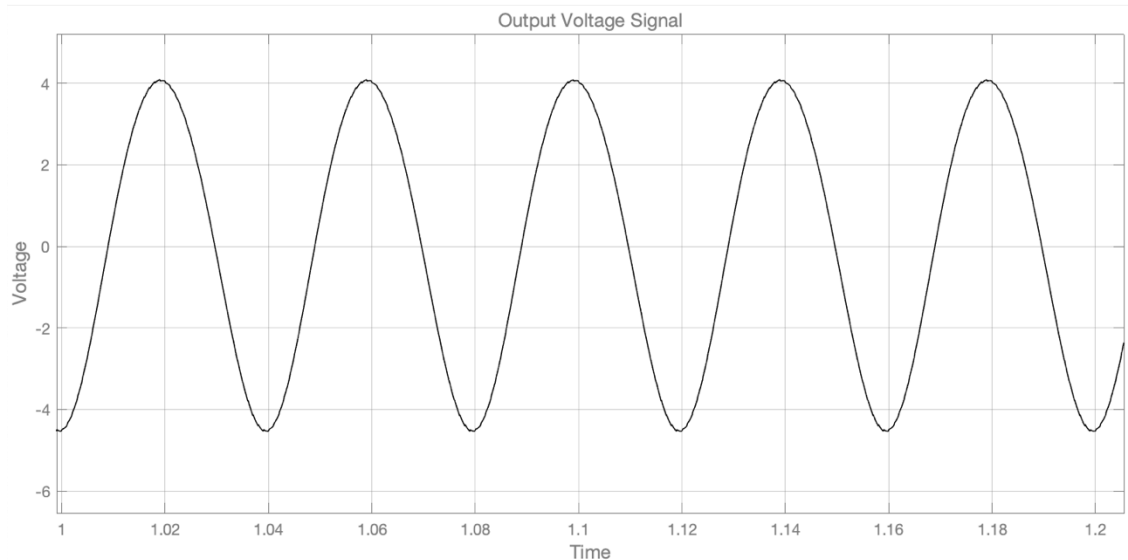
حالت اول : ورودی سرعت ثابت ۳۰۰۰ دور در دقیقه



شکل ۴-۳۳ سیگنال ولتاژ خروجی به ازای ورودی ۳۰۰۰ دور در دقیقه

همانطور که از شکل سیگنال ولتاژ خروجی مشخص است، قله به قله شکل ۴-۳۳ برابر ۰.۰۲ ثانیه است که معادل فرکانس ۵۰ هرتز است.

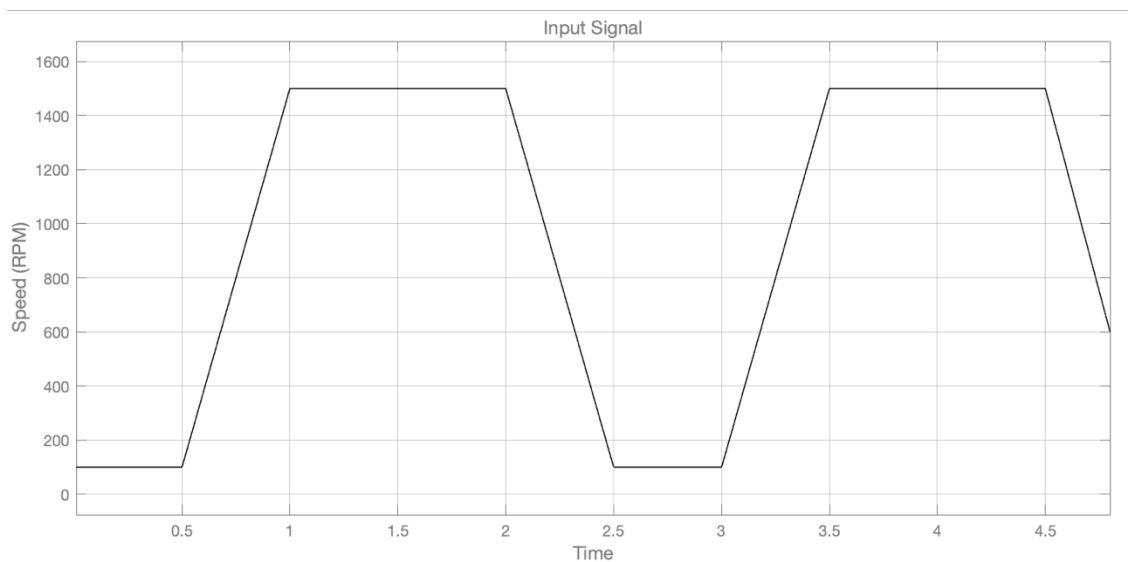
حالت دوم : ورودی سرعت ثابت ۱۵۰۰ دور در دقیقه



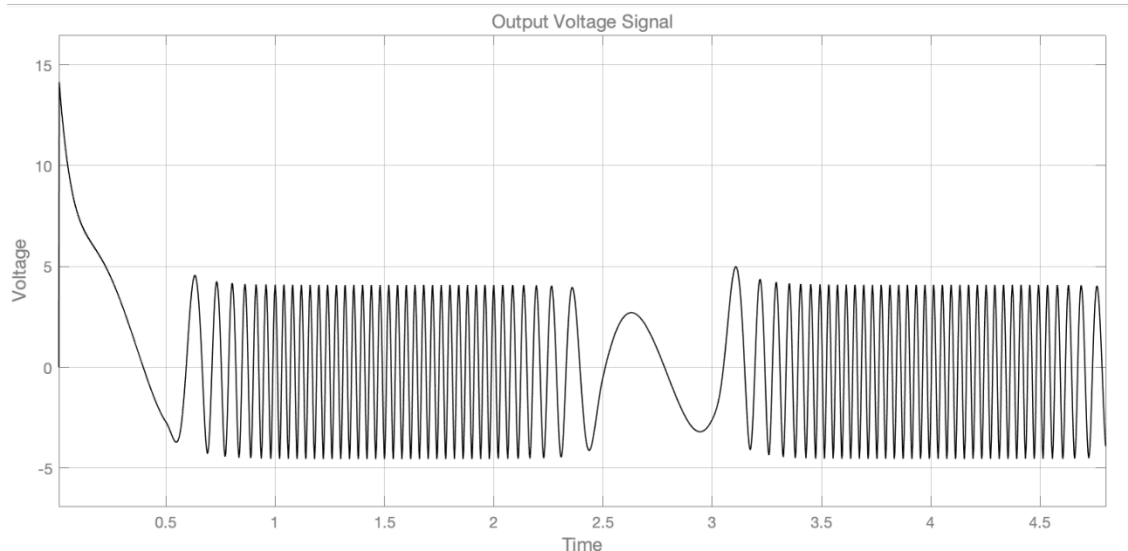
شکل ۴-۳۴ سیگنال ولتاژ خروجی به ازای ورودی ۱۵۰۰ دور در دقیقه

همانطور که از شکل سیگنال ولتاژ خروجی مشخص است، قله به قله شکل ۴-۳۴ برابر ۰.۰۴ ثانیه است که معادل فرکانس ۲۵ هرتز است.

حالت سوم : ورودی بصورت دوزنقه‌ای شکل از ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ دور در دقیقه و برعکس و تکرار آن در دو مرحله

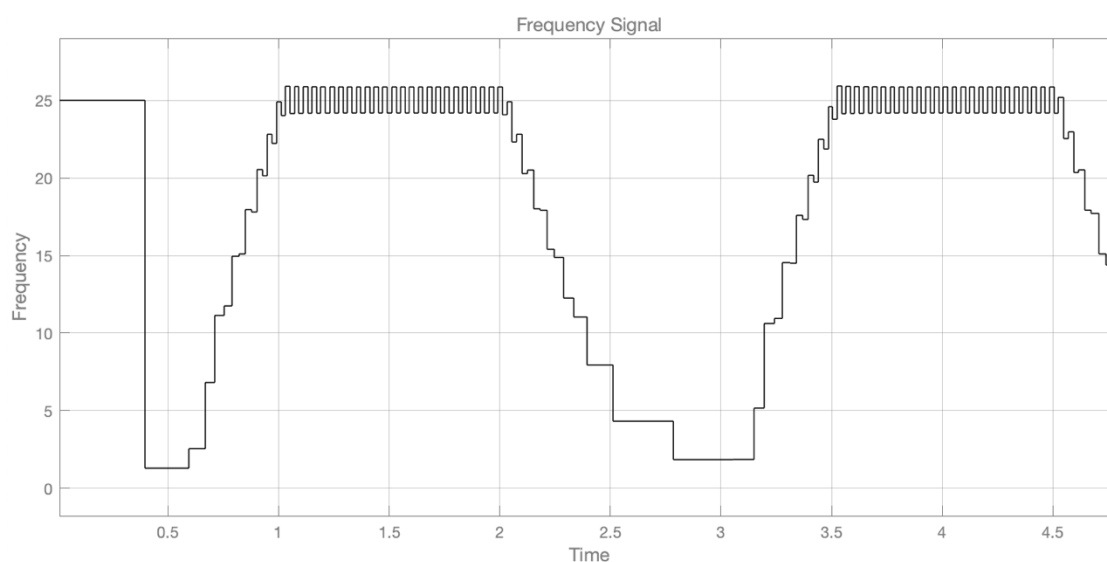


شکل ۴-۳۵ حالت سوم ورودی دوزنقه‌ای



شکل ۴-۳۶ - سیگنال ولتاژ خروجی به ازای سیگنال ورودی حالت سوم

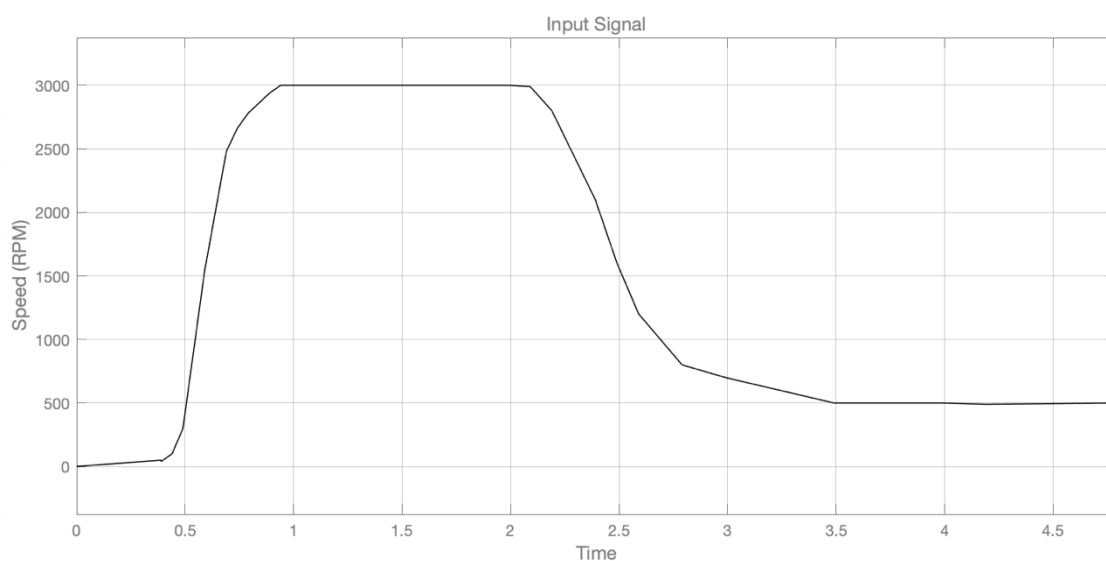
۰/۲ ثانیه اول تاخیر سیستم است. پس از آن و بر اساس ورودی که تا لحظه ۰/۵ ثانیه روی ۱۰۰ دور در دقیقه است. خروجی نیز یک سیگنال نوسانی با فرکانس حدود ۲ هرتز تولید می‌کند که نیازمند ۰/۵ ثانیه است اما از لحظه ۰/۵ تا ۱ سرعت از ۱۰۰ به ۱۵۰۰ افزایش می‌یابد. تا لحظه ۲ ثانیه سرعت روی ۱۵۰۰ ثابت بوده و از ۲ تا ۲/۵ ثانیه مجدد به ۱۰۰ بازمی‌گردد. همین روند برای ۲/۵ تا ۵ ثانیه تکرار می‌شود.



شکل ۴-۳۷ فرکانس در حالت سیگنال ورودی حالت سوم

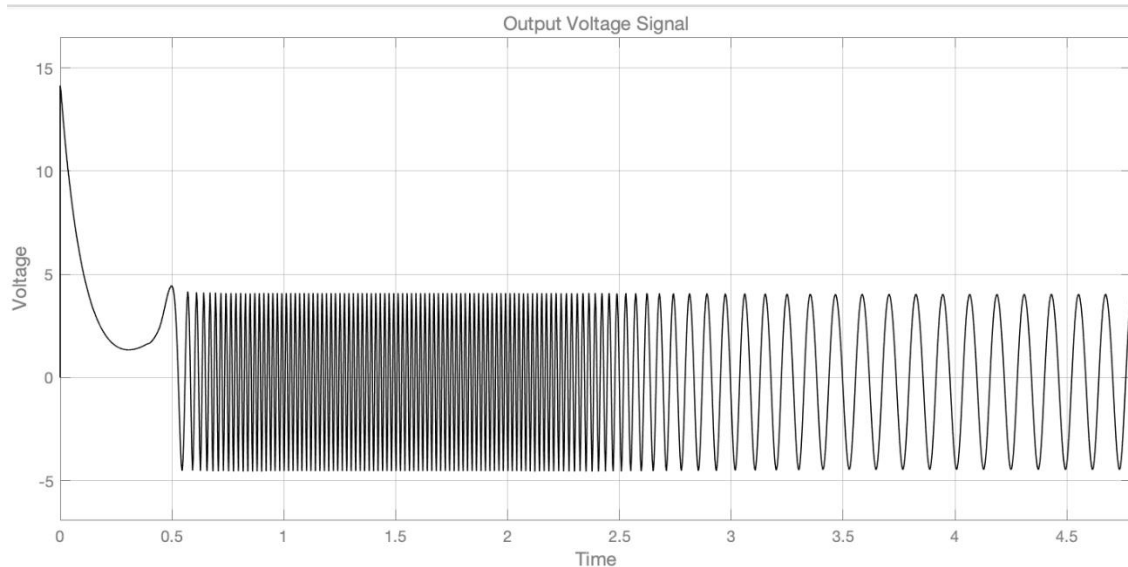
بر اساس تغییرات سیگنال ولتاژ خروجی، فرکانس خروجی بعد از $0/2$ ثانیه از ۲ هرتز تا ۲۵ هرتز معادل ۱۵۰۰ دور در دقیقه افزایش یافته، به مدت ۱ ثانیه روی این سرعت ثابت بوده و مجدد در $0/5$ ثانیه بعدی تا ۲ هرتز کاهش می‌یابد و این روند مجدداً تکرار می‌شود

حالت چهارم : افزایش سرعت بصورت نمایی از ۰ تا ۳۰۰۰ دور در دقیقه، از $0/5$ تا ۱ ثانیه، ثابت شدن سرعت به مدت $1/2$ ثانیه و سپس کاهش نمایی سرعت تا ۵۰۰ دور در دقیقه



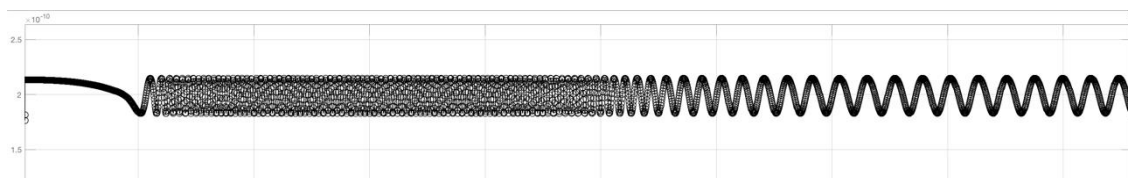
شکل ۴—۳۸ سیگنال ورودی نمایی

همانطور که مشاهده می‌شود، در بازه زمانی $0/4$ ثانیه تا ۱ ثانیه، سیگنال ورودی بصورت نمایی افزایش پیدا می‌کند و پس از $1/2$ ثانیه ثابت بودن در حداکثر سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه، از $2/2$ تا ۵ ثانیه شروع به کاهش می‌کند. انتظار می‌رود مشابه حالت های قبل، سیگنال خروجی، ورودی را به خوبی دنبال کند. نتیجه را مشاهده می‌کنیم.

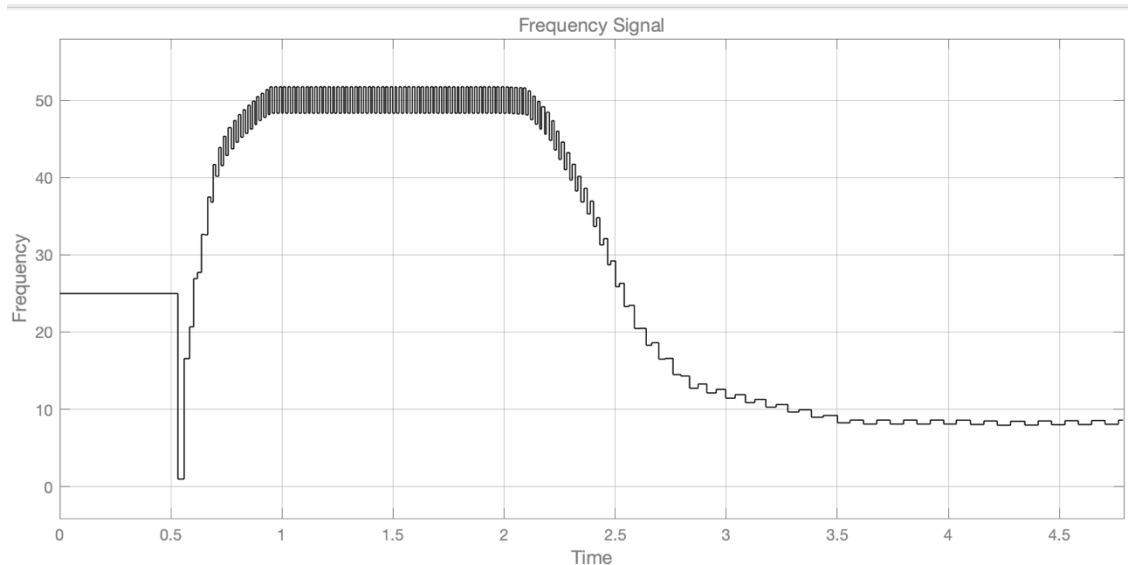


شکل ۴—۳۹ سیگنال خروجی به ازای ورودی نمایی

همانطور که انتظار می‌رفت، سیگنال خروجی به خوبی تغییرات سیگنال ورودی را دنبال کرده است. اگر بخواهیم نمودار تغییرات بار را در همین وضعیت سیگنال ورودی مشاهده کنیم، سیگنال تغییرات بار بصورت شکل زیر است. همانطور که می‌دانیم، بار و ولتاژ باهم رابطه معکوس دارند در نتیجه شکل سیگنال ولتاژ خروجی و بار نسبت به هم معکوس هستند.



شکل ۴—۴۰ سیگنال بار الکتریکی



شکل ۴-۴۱ فرکانس در حالت نمایی

با استفاده از ساختار و معادلات یک دستگاه الکتروستاتیک گردان به عنوان یک سنسور سرعت- سنج و مشاهدات فوق از شبیه سازی انجام شده در محیط سیمولینک می توان دریافت به ازای اعمال سرعت های مختلف به عنوان سیگنال ورودی سیگنال خروجی مشاهده شده تغییرات سیگنال ورودی را دنبال می کند. بجز لحظات گذرایی تاخیر بسیار کمی داشته و ورودی را با دقت بسیار خوبی دنبال می کند.

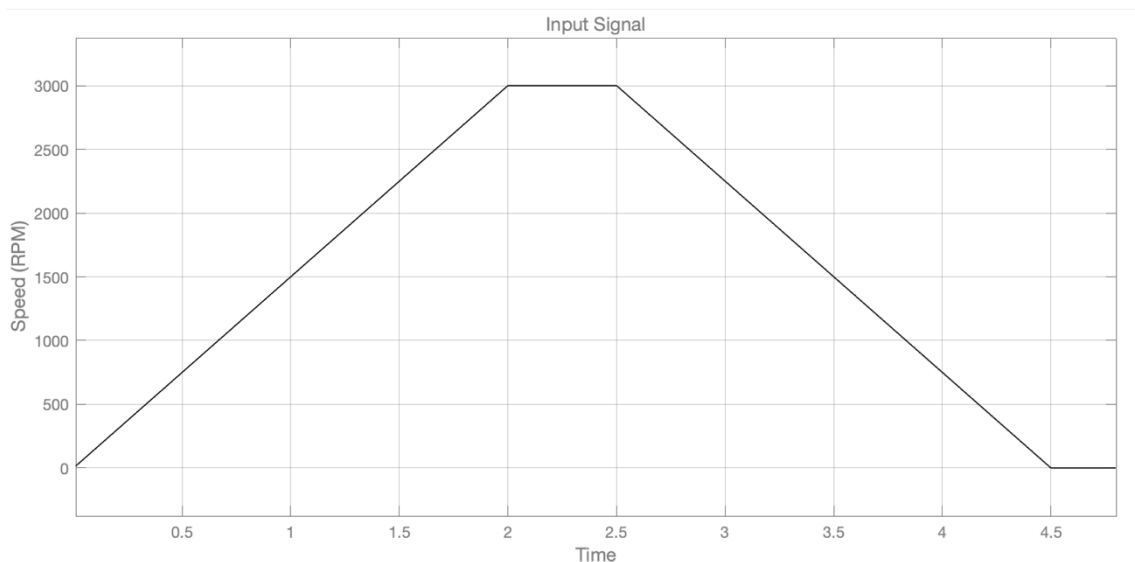
به کمک نتایج فوق شبیه سازی را بوسیله یک سیگنال ورودی که شباهت بسیار زیادی به وضعیت تست آزمایشگاهی داشته تکرار می کنیم و سیگنال خروجی را بدست می آوریم. سیگنال ورودی از مقدار ثابت ۰ دور در دقیقه شروع شده و تا ۲ ثانیه به سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه^۱ می رسد. ۰/۵ ثانیه در این سرعت ثابت بوده و تا لحظه ۴/۵ ثانیه به ۰ باز می گردد.

طیف سنج سیگنال، به خوبی تغییرات سیگنال خروجی را در فرکانس های مختلف نشان می دهد. همچنین تفاوت فرکانس در دو حالت سیگنال ورودی برای سرعت های مختلف قابل مشاهده است. مشاهدات فوق از شبیه سازی انجام شده در محیط سیمولینک نشان می دهد به ازای اعمال سرعت های مختلف به عنوان سیگنال ورودی سیگنال خروجی مشاهده شده نشان می دهد استفاده از ساختار و

¹ RPM

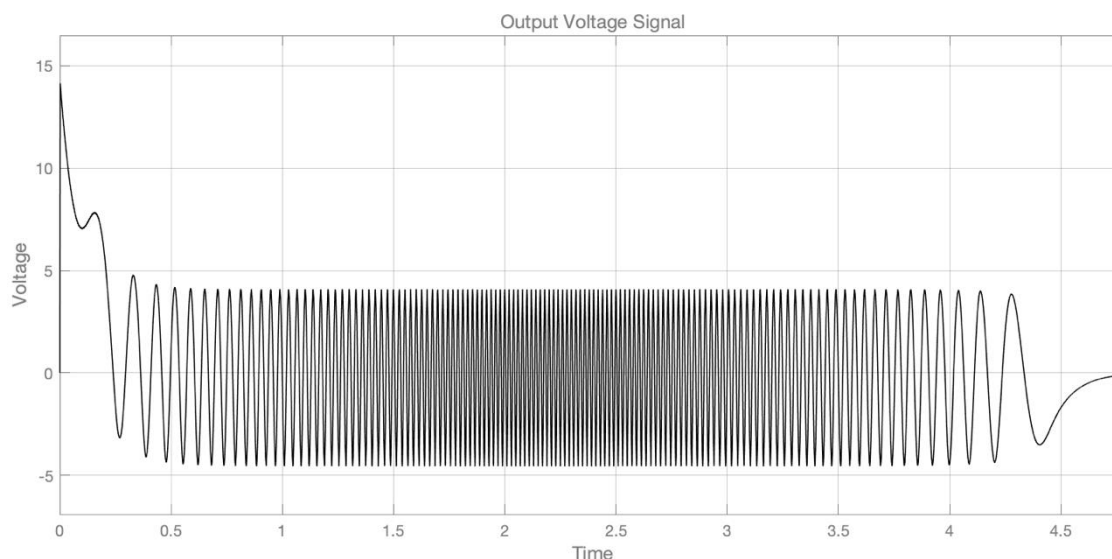
معادلات یک دستگاه الکتروستاتیک گردان به عنوان یک سنسور سرعت سنج بدرستی عمل کرده و تغییرات سیگنال ورودی را به خوبی دنبال می کند. بجز لحظات گذرای شدید از ۰ تاخیر بسیار کمی داشته و ورودی را با دقت بسیار خوبی دنبال می کند.

به کمک نتایج فوق شبیه سازی را بوسیله یک سیگنال ورودی که شباهت بسیار زیادی به وضعیت تست آزمایشگاهی داشته امتحان می کنیم و سیگنال خروجی را بدست می آوریم. سیگنال ورودی از مقدار ثابت ۰ دور در دقیقه شروع شده و تا ۲ ثانیه به سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه^۱ می رسد. ۰/۵ ثانیه در این سرعت ثابت بوده و تا لحظه ۴/۵ ثانیه به ۰ باز می گردد. سیگنال خروجی و سیگنال بار را در این شرایط مشاهده می کنیم.

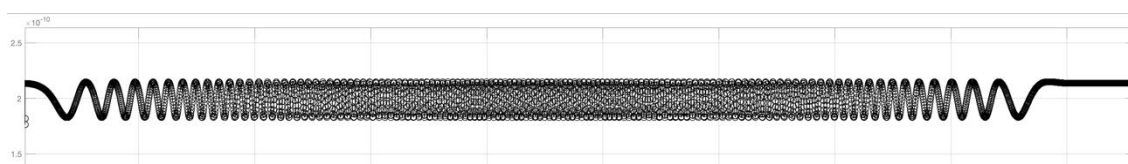


شکل ۴-۴۲ ورودی مشابه حالت آزمایشگاهی

¹ RPM



شکل ۴-۴۳ سیگنال ولتاژ خروجی به ازای ورودی شبیه حالت آزمایشگاهی

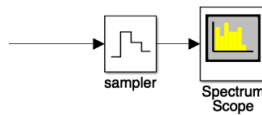


شکل ۴-۴۴ نمودار تغییر بار

به دو طریق فرکانس خروجی را می‌توان مشاهده کرد. حالت اول به کمک بلوک طیف‌سنج^۱ سیمولینک که سیگنال خروجی را مطالعه کرده و یک نمودار بصورت طیف رنگی به‌عنوان خروجی نشان می‌دهد. این طیف خروجی تغییرات فرکانس و هارمونیک‌های مختلف مربوط به سیگنال خروجی را نشان می‌دهد. با دنبال کردن طیف سیگنال خروجی انتظار می‌رود تغییرات سیگنال مشابه با تغییرات سیگنال ورودی باشد. برای استفاده از این بلوک، از یک بلوک کمکی نمونه‌گیر^۲ برای نمونه‌گیری از سیگنال و تبدیل آن به یک سیگنال قابل فهم برای طیف‌سنج استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که به کمک این طیف‌سنج هارمونیک‌های سیگنال خروجی نیز قابل مشاهده است.

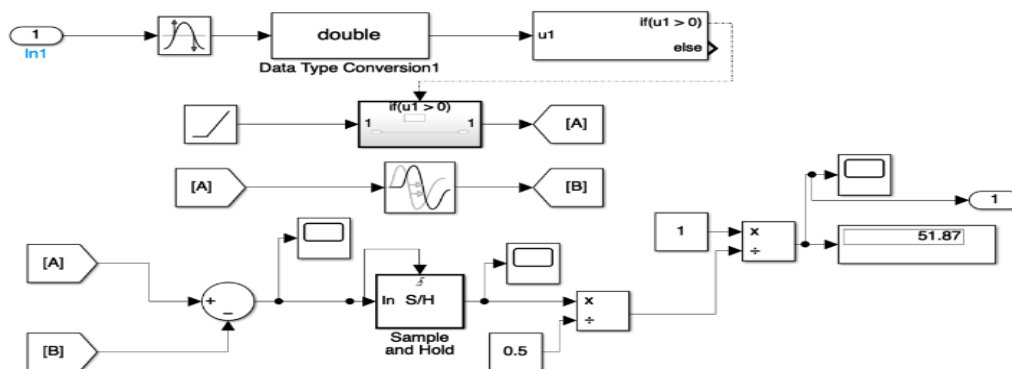
¹ Spectrum Scope

² Sampler



شکل ۴-۴۵ بلوک طیف سنج در نرم افزار سیمولینک متلب

حالت دوم به کمک یک زیرسیستم^۱ است که با استفاده از بلوک‌های موجود در این زیر سیستم نمودار فرکانس و تغییرات آن مشاهده می‌شود. اجزاء این زیر سیستم بدین صورت عمل می‌کنند که به کمک بلوک عبوری^۲ سیگنال ورودی به این زیر سیستم را تفکیک کرده و صعود و نزول آن را مشاهده می‌کند. قله، قعر و یا عبور از صفر باعث تولید یک سیگنال در خروجی این بلوک می‌شود. به کمک یک بلوک شرطی این سیگنال تفکیک می‌شود و به کمک یک بلوک شرطی دیگر با جابجایی سیگنال به کمک بلوک جابجایی تاخیر^۳، سیگنال فعلی را با لحظه قبل آن مقایسه و از هم کسر می‌کنیم. با ذخیره سیگنال خروجی در دو لحظه و استفاده از بلوک های جمع و تفریق سیگنالی که در نهایت بدست می آید نشان دهنده فرکانس است.



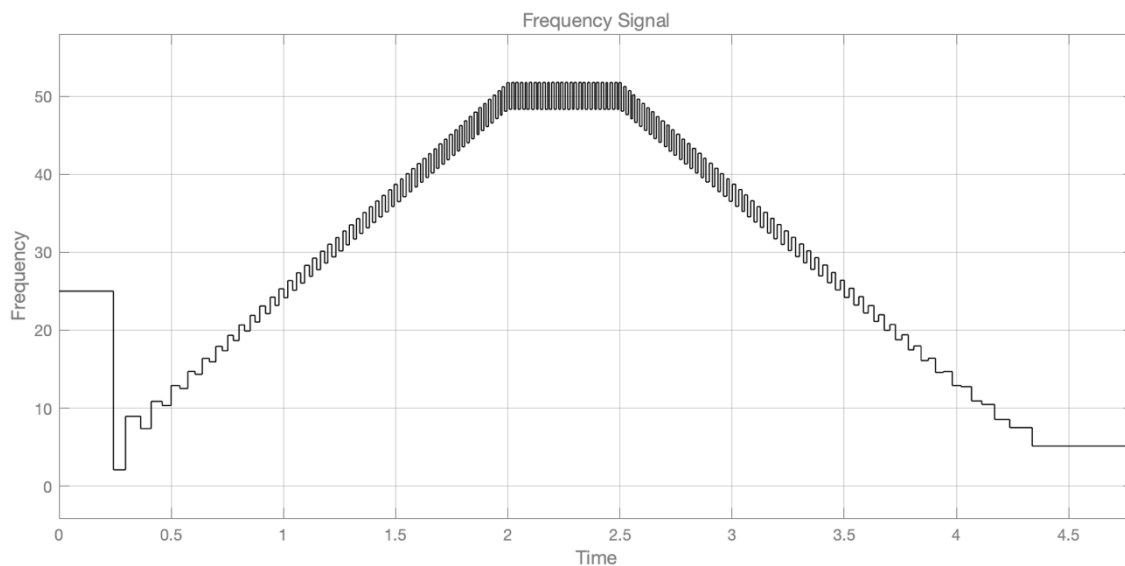
شکل ۴-۴۶ زیرسیستم اندازه گیری فرکانس

به کمک دو روش فوق سیگنال خروجی از شبیه سازی تحلیل شده و فرکانس مشاهده می‌شود. شبیه سازی را در حالت نرمال و با زمان ۵ ثانیه اجرا می‌شود.

¹ Sub System

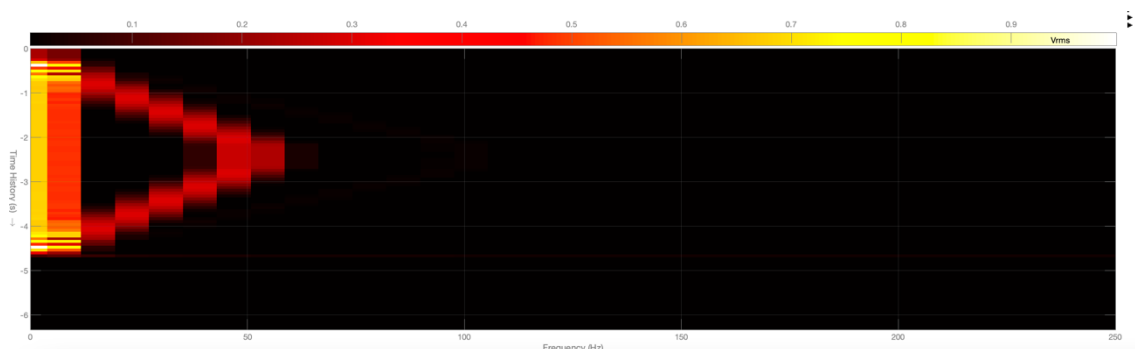
² Hit Crossing

³ Transparent Delay



شکل ۴—۴۷ نمودار فرکانس سیگنال خروجی به کمک زیرسیستم نشان دهنده فرکانس

همانطور که مشاهده می‌شود از لحظه اول سرعت شروع به افزایش کرده و از ۰ هرتز به ۵۰ هرتز می‌رسد. برای بازه زمانی ۲ تا ۲/۵ ثانیه فرکانس ۵۰ هرتز باقی مانده و پس از آن و متناسب با سیگنال ورودی فرکانس کاهش یافته تا به ۰ برسد.



شکل ۴—۴۸ سنجش فرکانس به کمک طیف سنج

همچنین به توجه به شکل ۴—۴۸ سنجش فرکانس به کمک طیف سنج نشان می‌دهد که سیگنال خروجی با دقت بسیاری خوبی تغییرات سیگنال ورودی را دنبال می‌کند که خود همین نکته نشان دهنده درست بودن نظریه پیشنهادی برای استفاده از یک دستگاه الکتروستاتیک گردان برای اندازه‌گیری سرعت است.

۷-۴ طراحی و ساخت نمونه عملی

بر اساس مواردی که پیش از این مورد بررسی قرار گرفت نسخه آزمایشگاهی یک دستگاه اندازه-گیری سرعت ماشین‌های الکتریکی بر مبنای ساختمان دستگاه‌های الکتروستاتیک گردان ساخته می-شود.

۱-۷-۴ خرید مواد اولیه مورد نیاز

قدم اول خرید مواد اولیه مورد نیاز است. در این مرحله فیبر استخوانی دوطرفه مس، اسید مس‌بر، ماژیک ضد آب، پیچ‌های پایه بلند، مهره و واشر برای مونتاژ استاتورها و روتور و فیکس کردن این صفحات و یک آرمیچر اسباب بازی به جهت تحریک روتور تهیه می‌شود. از ترکیب پیچ‌های پایه بلند، واشر و مهره برای کنترل فاصله هوایی نیز استفاده می‌شود.

۲-۷-۴ ساخت قطب‌های روتور و استاتور

شکل نهایی قطب را با استفاده از خط کش و پرگار هر دو طرف صفحه مسی رسم می‌کنیم. با استفاده از ماژیک ضد آب تمام سطح مسی که قرار است قطب‌ها را تشکیل دهد رنگ می‌کنیم. صفحاتی را که طرح قطب‌ها روی آن رسم شده به اندازه‌ای در اسید مخصوص قرار می‌دهیم که تمام سطوح مسی دو سمت فیبر بجز بخش‌هایی که با ماژیک پوشیده شده، خورده شود. صفحات را از اسید خارج کرده و با استفاده از آب می‌شوریم. در تمام مراحل کار با اسید باید به این نکته توجه ویژه‌ای داشت که از تماس آن با پوست انسان جلوگیری شود زیرا خاصیت خوردگی دارد. سطح قطب‌ها که بوسیله ماژیک ضد آب پوشیده شده را به کمک حلال رنگ از جمله الکل یا تینر پاک کرده و نتیجه نهایی یک صفحه استاتور یا روتور با طرح قطب دلخواه رسم شده است. با توجه به اینکه مس دو طرف صفحه از داخل فیبر بهم متصل نیستند به کمک یک تکه سیم و لحیم‌کاری قطب‌های متناظر دو طرف فیبر استخوانی را بهم متصل می‌کنیم.

شکل نهایی صفحات استاتور مستطیل شکل است. بدلیل اینکه از همین صفحات مستطیلی بعنوان پایه استفاده می شود، صفحه روتور باید بصورت دایره شکل باشد تا مشکلی از بابت سرهم کردن صفحات پیش نیاید. به کمک اره و سوهان، شکل صفحه روتور را بصورت دایره ای تبدیل می کنیم.

۴-۷-۳ اتصال استاتور ها و روتور به عامل محرک خارجی

در این مرحله با توجه به اینکه صفحات روتور و استاتور از قبل آماده شده است سوراخ کاری بر روی صفحات با دو هدف انجام می شود. هدف اول به جهت سرهم بندی سیستم و ایجاد پایداری قابل قبول و هدف دوم اتصال روتور به عامل محرک. سوراخ های مربوط به سرهم بندی صفحات چهارگوشه صفحات استاتورها زده می شود. سوراخ کاری مربوط به اتصال روتور به عامل محرک وسط استاتور بالا و روتور زده می شود. سوراخ کاری روتور باید به نحوی باشد که شفت عامل محرک به سختی وارد آن شود تا کمترین لقی وجود داشته باشد.

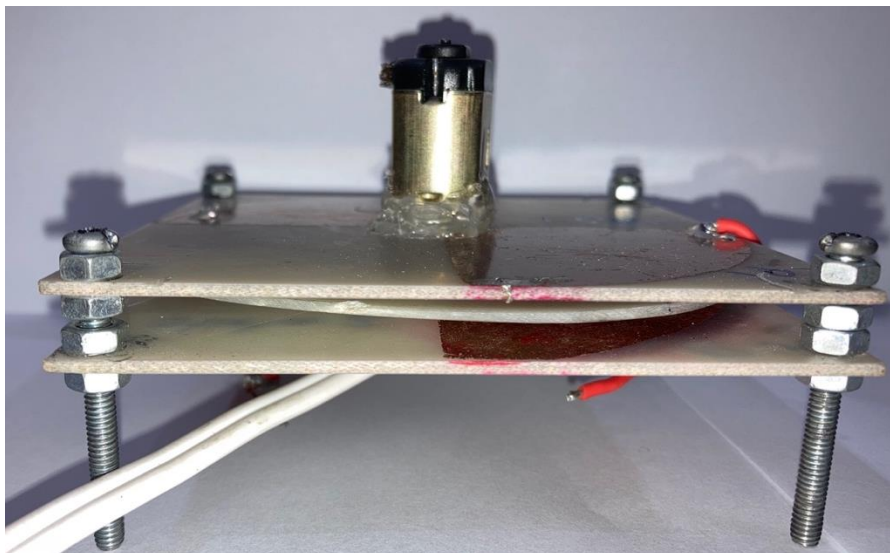
همانطور که در شکل ۴-۴۹ دیده می شود به کمک پیچ های پایه بلند، واشر و مهره، صفحه استاتور اول فیکس می شود.



شکل ۴-۴۹ پیچ پایه بلند، واشر و مهره

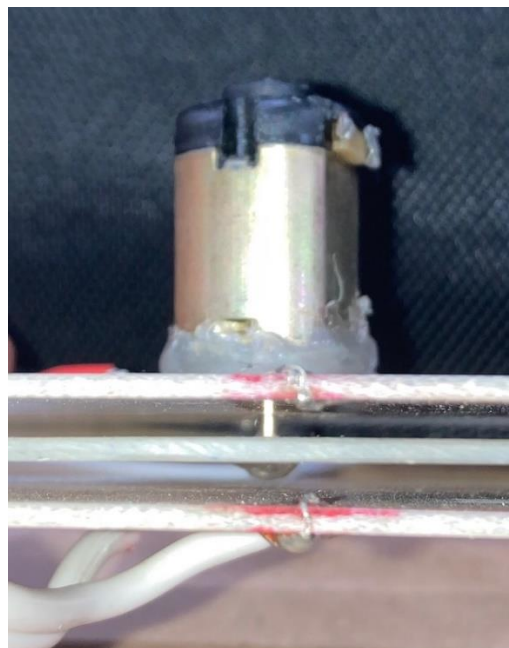
قدم بعدی اتصال عامل محرک روی روتور است. عامل محرک بر روی صفحه استاتور بالا قرار گرفته و شفت آن از میان سوراخ صفحه استاتور بالا رد شده و داخل سوراخ وسط روتور می شود. به کمک چسب های صنعتی که استحکام بالایی دارند شفت عامل محرک بر روی روتور فیکس می شود.

عامل محرک که بر روی استاتور بالا قرار دارد روی صفحه استاتور به کمک چسب حرارتی متصل شده و برای استحکام بالاتر به کمک چسب صنعتی تقویت می‌شود.



شکل ۴—۵۰ مونتاژ دستگاه ساخته شده

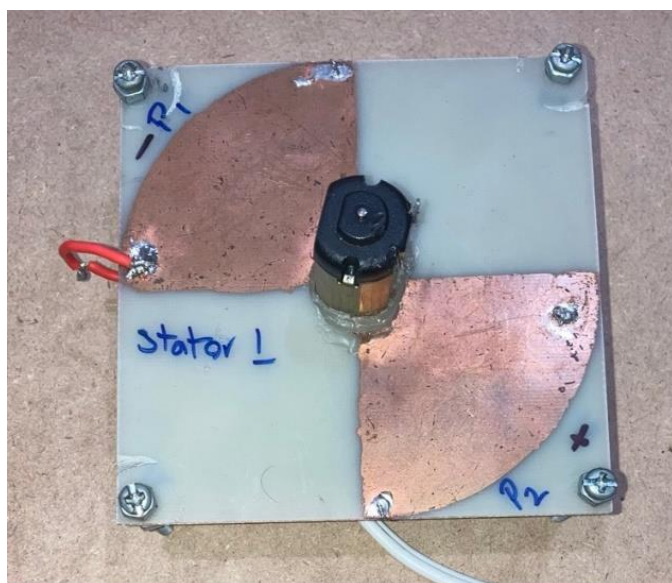
موتور دی‌سی بعنوان عامل محرک روتور با استفاده از چسب به استاتور ۲ متصل شده است. شفت موتور دی‌سی محرک، با استفاده از چسب‌های صنعتی و قوی به روتور فیکس شده است. صفحات روتور و استاتور با استفاده از پیچ‌های بلند و ۴ مهره، روی هر پیچ برای استحکام صفحات و همچنین تنظیم فاصله هوایی و پایه این دستگاه به هم متصل شده‌اند.



شکل ۴-۵۱ فاصله هوایی و نحوه اتصال موتور دی سی به صفحه استاتور بالا و روتور

۴-۷-۴ اتصالات سیم

همانطور که قبلاً اشاره شد دو طرف صفحات استاتور و روتور قطب‌ها بوسیله سیم کوچکی به هم متصل می‌شوند. به قطب‌های استاتور پایین نیز یک سیم متصل شده که هدف از این سیم سهولت تحریک قطب‌های استاتور پایین است.



شکل ۴-۵۲ دستگاه ساخته شده از زاویه بالا

همچنین سیم‌هایی به استاتور بالا نیز متصل می‌شوند تا برای مشاهده سیگنال خروجی بوسیله اوسیلوسکوپ اتصالات پروب‌ها براحتی انجام شود. نکته بعدی ایجاد اتصال مشترک بین یکی از قطب‌های استاتور هاست. بر اساس تست‌های تجربی که در محیط آزمایشگاهی با استفاده از یک تحریک ۱۰۰ ولت مستقیم انجام شد، مشاهده شد هنگامی که یک اتصال مشترک بین استاتورها وجود دارد سیگنال خروجی نویز کمتری داشته و خروجی بدست آمده مطلوب‌تر است. به همین دلیل و بر اساس مشاهدات تجربی این موضوع لحاظ شده است و بوسیله یک قطعه سیم قطب‌های ۱ استاتورهای بالا و پایین وصل شده‌اند.



شکل ۴-۵۳ دستگاه ساخته شده از زاویه پایین

۴-۷-۵ تحریک

بصورت تجربی و با تست در محیط آزمایشگاهی با توجه به اینکه دامنه سیگنال خروجی در حدود ۲۰۰ میلی‌ولت است ولتاژ تحریک کمتر از ۱۰۰ ولت باعث افزایش شدید نویز بر روی سیگنال خروجی شده و عملاً سیگنال خروجی غیرقابل اندازه‌گیری می‌شود. در نتیجه حداقل ولتاژ اعمالی به استاتور ۱ باید ۱۰۰ ولت مستقیم باشد. همچنین تحریک آرمچر عامل محرک روتور بوسیله باتری ۶ ولتی انجام می‌شود.

۴-۷-۶ شرایط تست

در یک محیط آزمایشگاهی و به کمک یک منبع ولتاژ ۱۰۰ ولت مستقیم و با استفاده از اوسیلوسکوپ نتایج تست‌های مختلف مشاهده شد. همانطور که در شکل ۴-۵۴ مشاهده می‌شود منبع ولتاژ ۱۰۰ ولت بوسیله باتری تشکیل شده و تست‌ها انجام می‌شوند. در ادامه حالت‌های مختلف تست و در وضعیت‌های مختلف گزارش می‌شود.



شکل ۴-۵۴ تست در شرایط محیط آزمایشگاه

۴-۷-۶-۱ قبل از اتصال تحریک - بدون چرخش روتور

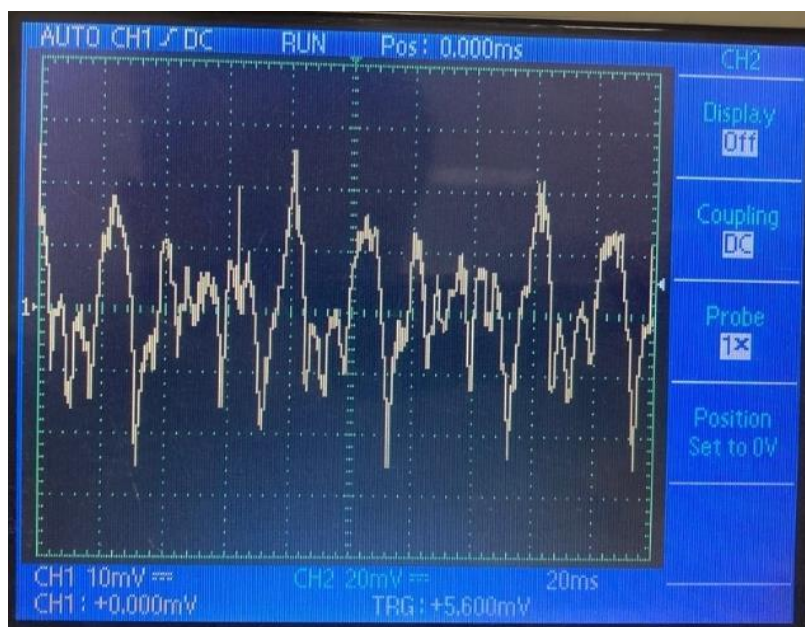
در این حالت وقتی اوسیلوسکوپ به استاتور بالا متصل می‌شود یک سیگنال نویز مشاهده می‌شود. این نویز خطای اندازه‌گیری است. این خطا شامل اوسیلوسکوپ، نویز برق شبکه و اثر تجهیزات الکترومغناطیسی موجود در محیط آزمایشگاه بر دستگاه است. دامنه این نویز در حالت سکون به اندازه ۵ میلی‌ولت است.



شکل ۴-۵۵ دامنه نویز

۴-۶-۷-۲ قبل از اتصال تحریک، چرخش روتور

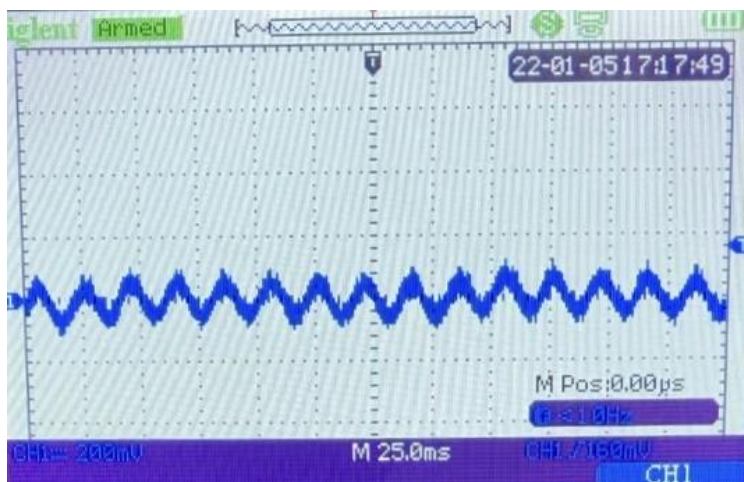
در این حالت مقدار نویز تقویت شده و تا ۱۵ میلی‌ولت افزایش می‌یابد. علت این افزایش مقدار ولتاژ در فصل سه مورد بررسی قرار گرفت. سیگنالی که در این حالت دیده می‌شود به شدت اعوجاجی بوده و قابل خواندن نیست.



شکل ۴-۵۶ سیگنال خروجی هنگام چرخش روتور بدون اتصال تحریک

۴-۷-۶ اتصال تحریک - بدون چرخش روتور

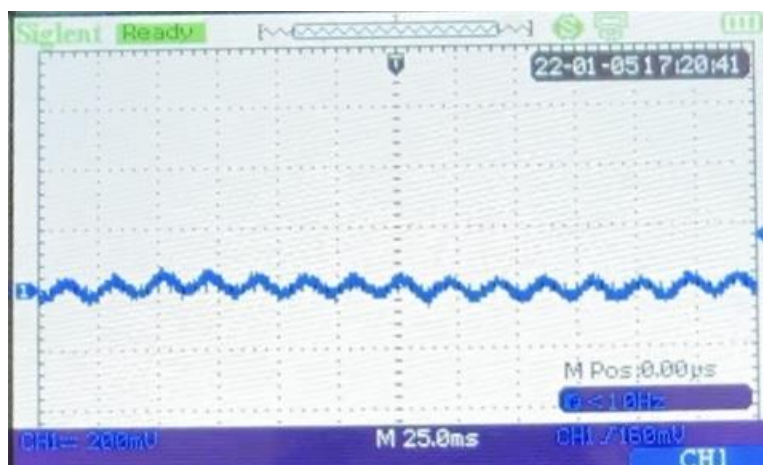
در این حالت دامنه سیگنال نسبت به حالتی که تحریک به دستگاه متصل نیست افزایش می‌یابد. این مقدار در حد ۸۰ میلی‌ولت است.



شکل ۴-۵۷ اتصال تحریک بدون چرخش

۴-۷-۶ اتصال تحریک - چرخش روتور

در این حالت تحریک به استاتور پایین متصل بوده و از استاتور بالا سیگنال خروجی خوانده می‌شود. از زمانی که چرخش روتور شروع می‌شود دامنه و فرکانس سیگنال خروجی افزایش می‌یابد. این سیگنال را در چند وضعیت مشاهده می‌کنیم. همانطور که در شکل‌های ۴-۵۸ تا ۴-۶۴ دیده می‌شود، دامنه و فرکانس سیگنال متناسب با افزایش سرعت روتور در ابتدا افزایش یافته و پس از قطع تحریک عامل محرک همزمان با کاهش سرعت روتور دامنه و فرکانس کاهش می‌یابد.



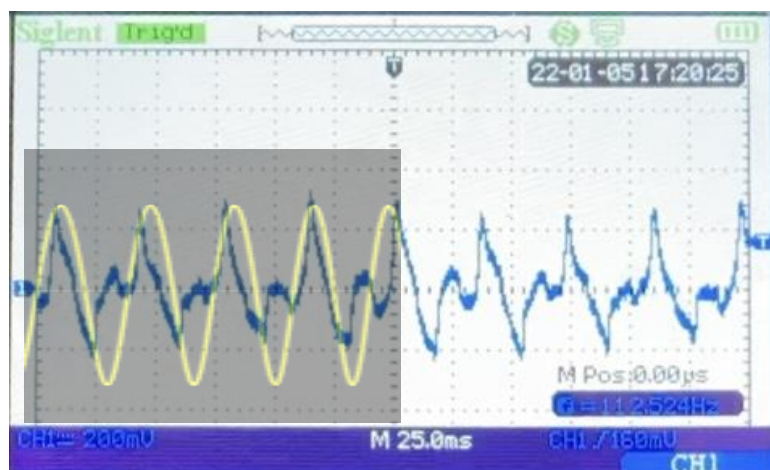
شکل ۴—۵۸ لحظه شروع چرخش روتور همراه با اتصال تحریک

در وضعیت لحظه شروع چرخش روتور با توجه به شکل ۴—۵۸ همانطور که قبلا مشاهده شد دامنه ولتاژ در حدود ۸۰ میلی‌ولت است. همچنین فرکانسی که در این لحظه دیده می‌شود حاصل نویز جذب شده توسط دستگاه از محیط است.



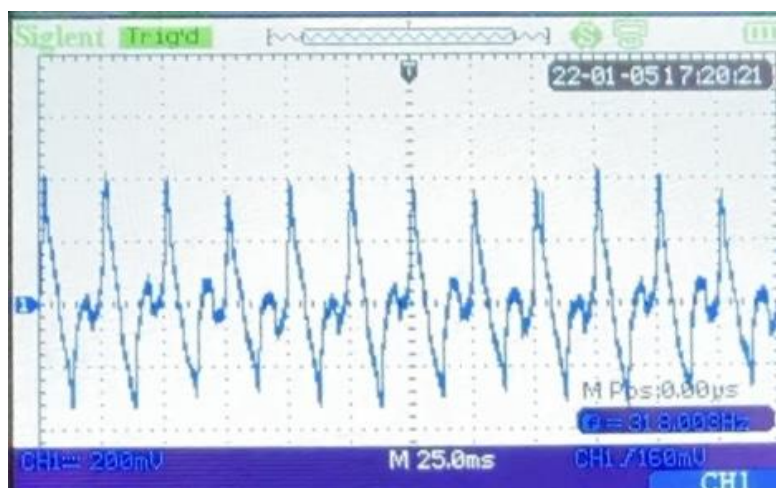
شکل ۴—۵۹ لحظاتی پس از شروع چرخش روتور

در وضعیت لحظاتی پس از شروع چرخش روتور با توجه به شکل ۴—۵۹ دامنه ولتاژ افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه لحظه شروع چرخش روتور لحظه گذرایی است سیگنال متناوب خروجی نوسانات زیادی دارد.



شکل ۴—۶۰ زمان ۴ ثانیه پس از حالت گذرای شکل ۴-۵۹

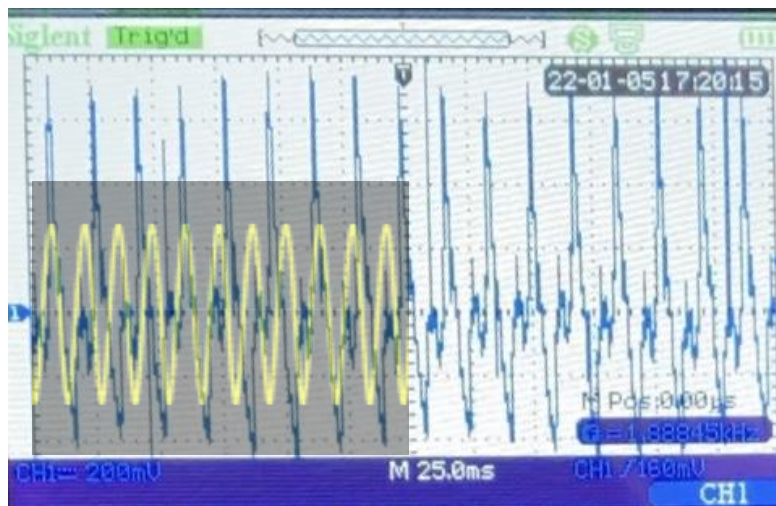
در وضعیت شکل ۴-۶۰، روتور از حالت گذرای عبور کرده و در حال افزایش سرعت پیوسته است. همانطور که مشاهده می‌شود سیگنال خروجی یک سیگنال متناوب در حال افزایش دامنه و فرکانس خروجی است که این تغییرات مستقیماً وابسته به سرعت چرخش روتور است. دامنه ولتاژ در این حالت برابر حداکثر ۲۴۰ میلی‌ولت و با دامنه زمانی قله به قله ۳۷ میلی‌ثانیه است. همچنین همپوشانی شکل شبیه‌سازی شده با شکل موج بدست آمده از تست آزمایشگاهی قابل توجه است.



شکل ۴-۶۱ زمان ۳ ثانیه پس از حالت شکل ۴-۶۰

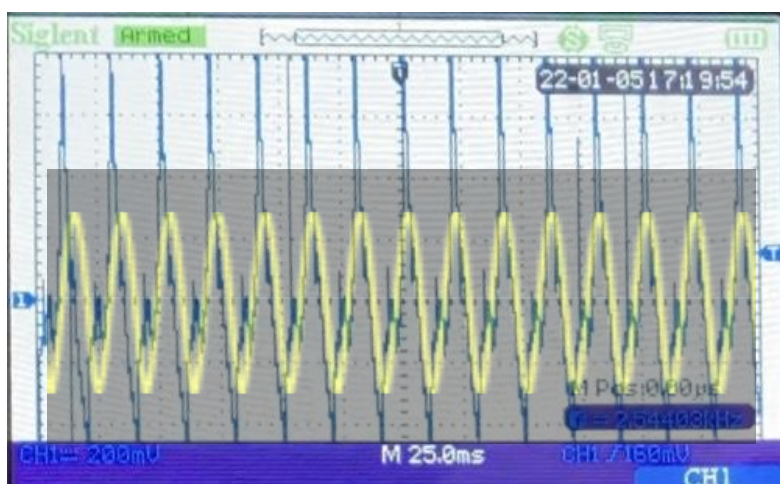
در وضعیت شکل ۴-۶۱ در مقایسه با شکل ۴-۶۰، با توجه به افزایش پیوسته سرعت روتور، دامنه و فرکانس در حال افزایش بوده و در این مرحله حداکثر دامنه برابر ۴۰۰ میلی‌ولت و دامنه زمانی قله به

قله برابر ۲۵ میلی ثانیه می باشد. همانطور که مشاهده می شود، سیگنال خروجی یک سیگنال متناوب در حال افزایش دامنه و فرکانس خروجی است که این تغییرات مستقیماً وابسته به سرعت چرخش روتور است.



شکل ۴-۶۲ - سرعت روتور نزدیک به سرعت نهایی

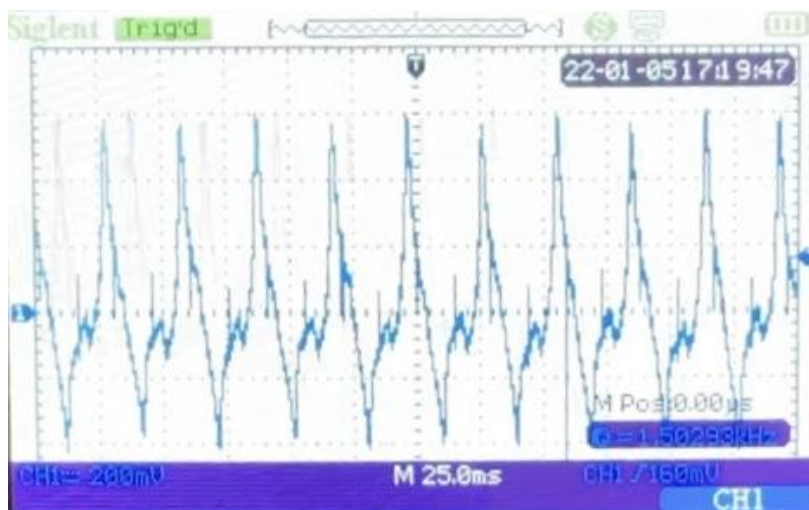
در وضعیت ۴-۶۲ سرعت چرخش روتور نزدیک به سرعت نهایی است. همانطور که بر اساس شکل های قبل مشاهده می شود همواره دامنه و فرکانس در حال افزایش است تا به سرعت نهایی چرخش روتور برسیم. در این مرحله حداکثر دامنه ولتاژ برابر ۸۵۰ میلی ولت بوده و دامنه زمانی قله به قله برابر ۲۳ میلی ثانیه است.



شکل ۴-۶۳ دامنه و فرکانس در سرعت چرخش نهایی روتور

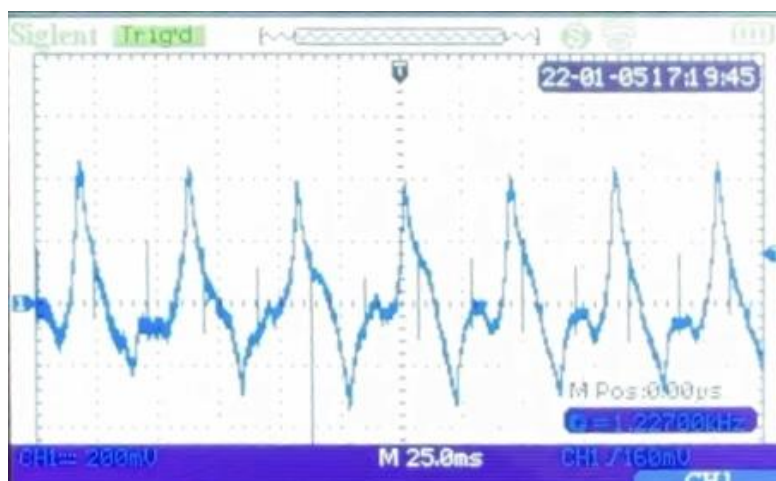
همانطور که در شکل ۴-۶۳ دیده می‌شود زمانی که سرعت چرخش روتور که با استفاده از تاکومتر خوانده شده و برابر با ۳۰۰۰ دور در دقیقه بود دامنه سیگنال خروجی حداکثر برابر ۱ ولت و دامنه زمانی قله به قله آن نیز برابر ۲۰ میلی‌ثانیه مشاهده می‌شود. همانطور که از همپوشانی نتایج شبیه سازی و تست آزمایشگاهی دیده می‌شود کلیات شکل موج‌ها در لحظه ای که سرعت برابر ۳۰۰۰ دور در دقیقه است بر هم منطبق است.

در این حالت روتور به حداکثر سرعت خود می‌رسد. پس از این تحریک موتور دی‌سی کوپل شده با روتور را قطع می‌کنیم تا روند کاهش سرعت با کاهش دامنه و فرکانس را دنبال کنیم.



شکل ۴-۶۴ قطع تحریک روتور و کاهش سرعت و اثر آن بر سیگنال خروجی

همانطور که مشاهده می‌شود، دامنه و ولتاژ نسبت به حالتی که سرعت روتور در ماکسیمم مقدار خود قرار داشت در حال کاهش است.



شکل ۴—۶۵ ادامه کاهش سرعت

همچنان سرعت روتور در حال کاهش است و در نتیجه آن در مقایسه با شکل ۴-۶۵، دامنه و فرکانس سیگنال خروجی کاهش یافته است.



شکل ۴—۶۶ لحظات پایانی کاهش سرعت

سرعت روتور در حال نزدیک شدن به ۰ است. در این وضعیت تنها سیگنال نویز دیده می‌شود که با اتصال منبع تحریک به استاتور تقویت شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، سیگنال اصلی بر سیگنال نویز سوار شده و تغییرات شبه سینوسی دارد. با حذف نویز از سیگنال، انتظار می‌رود یک سیگنال سینوسی یکدست بدست آید که به مقدار خروجی شبه سازی تا حد بسیار زیادی شبیه است.

فصل ۵ : جمع بندی و نتیجه

گیری

۵-۱ مقدمه

از ابتدای مطرح شدن ایده استفاده از دستگاه های الکتروستاتیک گردان بعنوان سنسور تا آخرین مرحله تست نهایی و مشاهده خروجی های بدست آمده، قدم های مختلفی برداشته شد و مراحل مختلفی طی گردید. همه این مراحل و قدم ها در وهله اول آشنایی بیشتر با دنیای بی انتهای ماشین ها و دستگاه های الکتروستاتیک بود. امروزه سیستم های الکتروستاتیک در رشته های مختلف و صنایع نقش پررنگ تری پیدا کرده اند. قدم بعدی مطالعه سیستم های الکتروستاتیک در جهت دستیابی به یک ساختار قابل قبول برای ارتقا تجهیزات کاربردی در صنعت است که مهم ترین این سیستم ها، تجهیزات ابزار دقیق بودند. سنسورها به عنوان چشم صنعت همواره مشغول به انجام وظایف خود بصورت دقیق بوده اند اما استفاده پیوسته از این ابزار، همواره هزینه های نگهداری و ارتقا خود را داشته که می تواند به عنوان یکی از چالش های صنعت به آن نگاه کرد. هرچقدر بتوان هزینه های تولید محصولات در صنایع و همچنین هزینه های سرمایه گذاری اولیه را کاهش داد، هزینه تمام شده محصول تولیدی نیز کاهش می یابد و سرمایه گذاران بیشتری توانایی شروع چرخه تولید در کشور را خواهند داشت. ازین رو مطالعه ارتقا سطح عملکردی سنسورها با تغییر در ساختمان آن ها می تواند نوید بخش این نکته باشد که با گسترش هرچه بیشتر این مطالعات و پژوهشگران و ارتباط نزدیک تر صنعت و دانشگاه، بتوان نقش موثری در صنایع ایجاد کرد که منجر به بهینه سازی فرآیندهای تولید شود.

۵-۲ جمع بندی

همانطور که در فصول قبل، موضوعات مختلف مورد بررسی قرار گرفت، در قدم اول با مطالعات بیشتر در حوزه ماشین ها و سیستم های الکتروستاتیک، سطح دانش در این زمینه بالا رفته و ارتقا یافت. افزایش اطلاعات در مورد این نوع سیستم ها، ما را به فکر واداشته تا با استفاده از این پتانسیل قوی، کاربردی از آن استخراج شود که تا پیش از این به آن کمتر پرداخته شده و این کاربرد بتواند اندکی از مشکلات صنایع را کاهش دهد. با شکل گیری این تفکر، موضوع اصلی پایان نامه با عنوان

طراحی، شبیه سازی و ساخت یک ماشین الکتروستاتیک با کاربرد اندازه گیری سرعت شکل گرفت. با مطالعه تئوری محاسبات مربوط به سیستم های الکترواستاتیکی از جمله محاسبه ظرفیت های خودی و متقابل و همچنین تعریف یک مدار معادل و بررسی وضعیت رفتاری سیگنال خروجی، شبیه سازی های اولیه انجام شد. سوالاتی که هنگام شروع شبیه سازی بعنوان اساس به سرانجام رسیدن این تحقیق مطرح شد، بصورت آزمون و خطا و بر اساس هدفی که به دنبال آن بودیم، پاسخ داده شد و در نهایت، ساختار نهایی مورد نظر انتخاب شده و نتایج اولیه حاصل از شبیه سازی، تئوری های قبلی را تایید کرد. در مرحله بعدی، شبیه سازی نهایی با در نظر گرفتن دقیق ترین حالت به نمونه عملی که قصد ساخت آن را داشتیم انجام شده و نتایج بدست آمده به کمک سیمولینک متلب نیز تحقیق شد. نمونه آزمایشگاهی با توجه به شبیه سازی نهایی به کمک ساده ترین متریال ساخته شد. از مزیت های اصلی استفاده از ساختارهای الکتروستاتیک این است که برخلاف ساختارهای الکترومغناطیس، دارای ساختمان بسیار ساده ای هستند.

نسخه آزمایشگاهی ساخته شده، مورد تست قرار گرفت و نتایج خروجی بدست آمده حاکی از تایید تمام مراحل قبلی تحقیق اعم از مطالعات تئوری، انتخاب ساختار و شبیه سازی بود. بدین ترتیب با استفاده از ساختار یک دستگاه الکتروستاتیک چرخان، یک سنسور برای محاسبه سرعت چرخش روتور بدست آمد.

۵-۳ نتیجه گیری

دنیای الکتروستاتیک، دنیای گسترده ای بوده و همواره راه برای تحقیق و بررسی پدیده های مختلف در آن باز است. یکی از گوشه های کوچک این دنیای گسترده توسط نگارنده این گزارش مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و با کمک استاد گرانقدر و محترم، پروفسور احمد دارابی، نتایج نهایی بدست آمد که حاکی از تایید تئوری های مورد بررسی در این پژوهش بود.

۴-۵ پیشنهاد تحقیق

- به جهت ادامه راه این پژوهش توسط سایر پژوهشگران، پیشنهاد می‌شود پس از مطالعه کامل این گزارش و بررسی سایر پژوهش‌های مربوط به این حوزه، می‌توانند به سوالات زیر پاسخ دهند.
- ۱- بررسی دلایل نویزی که روی دستگاه دیده می‌شود و مشخص کردن منابع آن.
 - ۲- هرگونه بهینه‌سازی پیشنهادی در راستای افزایش دقت دستگاه با هدف حفظ سادگی ساختار و ارزان بودن ساخت آن.
 - ۳- مطالعه و تبدیل سیگنال خروجی به یک سیگنال صرفاً فرکانسی و مشاهده فرکانس به کمک یک نمایشگر.
 - ۴- اثر اتصال روتور با هوا و چرخش روتور با میزان بار تولیدی در اثر مالش صفحه مسی با هوا.

فهرست مراجع

- 1- B. Ge, Student and D. C. Ludois, (2015) "A 1-Phase 48-Pole Axial Peg Style Electrostatic Rotating Machine Utilizing Variable Elastance "
- 2- Toshiki NIINOt, Saku EGAWA, and Toshiro HIGUCHI, (1993) "High-Power And High-Efficiency Electrostatic Actuator"
- 3- Hauksbee, Francis (1709). Psicho-Mechanical Experiments On Various Subjects. R. Brugis.
- 4- Wei Hua, Peng Su, Gan Zhang, Guishu Zhao, (2020) " The Fifty Percent Machines-A Short History of Influence Machines And Elementary Theory of Their Efficiency : An Attempt" IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering
- 5- B. Ge and D. C. Ludois, "A 1-phase 48-pole axial peg style electrostatic rotating machine utilizing variable elastance," Proc. - 2015 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2015, pp. 604–610, 2016.
- 6- B. Ge, D. C. Ludois, and A. N. Ghule, "A 3D printed fluid filled variable elastance electrostatic machine optimized with conformal mapping," ECCE 2016 - IEEE Energy Convers. Congr. Expo. Proc., no. ii, 2016.
- 7- B. Ge, A. N. Ghule, and D. C. Ludois, "A dq-axis framework for electrostatic synchronous machines and charge oriented control," 2017 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2017, vol. 2017-Janua, pp. 2396–2403, 2017
- 8- G. Reitz, B. Butrymowicz, J. Reed, B. Ge, and D. C. Ludois, "A switched elastance electrostatic machine constructed from sustainable elements for rotational actuators," 2017 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2017, vol. 2017-Janua, pp. 2389–2395, 2017.
- 9- B. Ge, A. N. Ghule, and D. C. Ludois, "High torque density macro-scale electrostatic rotating machines: Electrical design, generalized d-q framework, and demonstration," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 55, no. 2, pp. 1225–1238, 2019.
- 10-A. Jindal, M. Krishnamurthy, and B. Fahimi, "Modeling and analysis of a micro variable capacitance electromechanical energy converter," Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion, 2006. SPEEDAM 2006, vol. 2006, pp. 358–363, 2006
- 11-S. Tapuchi and D. Baimel, "Novel differential linear electrostatic motor with light weight rotor," 2014 IEEE 28th Conv. Electr. Electron. Eng. Isr. IEEEI 2014, no. 4, 2014.
- 12-A. Yamamoto, T. Niino, and T. Higuchi, "Development of a controller for a high-power electrostatic motor," Electr. Eng. Japan (English Transl. Denki Gakkai Ronbunshi), vol. 133, no. 4, pp. 91–99, 2000

- 13-A. Yamamoto, T. Niino, T. Ban, and T. Higuchi, "A high-power electrostatic motor using skewed electrodes," *Electr. Eng. Japan*, vol. 125, no. 3, pp. 50–58, 1999.
- 14-N. Yamashita, A. Yamamoto, and T. Higuchi, "Effects of electrode configuration for performances of voltage-induction- type electrostatic motors," *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.*, vol. 7, no. 3, pp. 333–347, 2013.
- 15-T. Hosobata, A. Yamamoto, and T. Higuchi, "Modeling and analysis of a linear resonant electrostatic induction motor considering capacitance imbalance," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 7, pp. 3439–3447, 2014.
- 16-K. Takei and A. Yamamoto, "Modeling of voltage induction of a resonant electrostatic induction motor using 2-phase slider and a single coil," *SII 2016 - 2016 IEEE/SICE Int. Symp. Syst. Integr.*, pp. 260–265, 2017.
- 17-M. Dadkhah, Y. Hojjat, J. U. Jeon, M. Ghodsi, and M. Modabberifar, "Voltage-induction synchronous electrostatic motor," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 77, no. 1–4, pp. 145–164, 2015.
- 18-M. Dadkhah, Y. Hojjat, J. U. Jeon, M. Ghodsi, and M. Modabberifar, "Voltage-induction synchronous electrostatic motor," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 77, no. 1–4, pp. 145–164, 2015.
- 19-Graham Reitz; Bill Butrymowicz; Justin Reed; Baoyun Ge; Daniel C. Ludois, (2017) "A Switched Elastance Electrostatic Machine Constructed from Sustainable Elements for Rotational Actuators" 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)
- 20-J.F. Charpentier; Y. Lefevre; E. Sarraute; B. Trannoy, (1995) "Synthesis And Modelling of an Electrostatic Induction Motor"
- 21-J.-D. Moon; D.-H. Lee, (1993) "A Miniature Size Electrostatic Induction Motor" Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting
- 22-Baoyun Ge; Aditya N. Ghule; Daniel C. Ludois, (2017) "A dq-Axis Framework for Electrostatic Synchronous Machines and Charge Oriented Control" 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)
- 23-A. Jindal, M. Krishnamurthy, B. Fahimi, (2006) "Modeling and Analysis of a Micro Variable Capacitance Electromechanical Energy Converter "
- 24-Bhagwati Charan Patel, G R Sinha and Naveen Goel, "Advances In Modern Sensors" Institute of Physics Publishing (November 16, 2020)
- 25-Alexey A. Trofimov; Nataliya S. Trifomova; Sergey A. Zdobnov; Dmitriy V. Popchenkov; Kirill I. Bastrygin; Alan K. ,(2018) "Construction of Rotational Speed Sensors Based on the Wiegand Module" 2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)

26-Yong Yan; Yonghui Hu ; Lijuan Wang ; Xiangchen Qian; Wenbiao Zhang ; Kamel Reda ; Jiali Wu; Ge Zheng ,(2021) "Electrostatic sensors – Their principles and application" Journal of the International Measurement Confederation (IMEKO)

27-Kamel Reda; Yong Yan; Lijuan Wang, (2021) "Sensors : A Comparative Study of Different Shaped Electrostatic Sensors for Rotational Speed Measurement" IEEE Sensors Journal

۲۸- پورمیرزایی ف، (۱۳۹۹)، پایان نامه ارشد : “ مدلسازی و بررسی عملکرد یک موتور الکترواستاتیک خازن متغیر سنکرون “ ، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی شاهرود

Abstract

In this dissertation, using an analytical method, a model for designing and constructing a rotating electrostatic system as a sensor for the application of measuring the speed of electric machines is presented. First, studies of electrostatic systems are performed, various structures of rotating electrostatic systems are examined to achieve the result, and a model is proposed. With the help of finite element software and capacitance matrix elements, various variations are identified and accelerated using trial and error to design and build a practical version of an electrostatic device. The efficiency of modeling is examined using Simulink simulation in MATLAB software and a few steps later the theory and results obtained from computational software are tested by building a laboratory. The sample is made by answering the basic design questions of this device, the number of poles, the design and the amount of drive voltage using printed circuit boards. Stator device tests are performed with the help of alternating and direct voltage. The results obtained in practical experiments show that by rotating the rotor of the speed measuring device and by applying zinc motion from the stators, the voltage signal observed on the other stator was completely affected by the rotation of the device rotor, which itself used couplings. It is specially connected to the rotor of another electric motor that we need to read. This has been confirmed with the help of software simulations. Electronic machines have very low current flow and losses. Electronic currents in electronic machines are usually fast and have high efficiency.

Keywords: Sensor, sensor, electrostatic machine, finite element analysis, simulation, electromagnetic machine, capacitance matrix



Shahrood University of
Technology

Faculty of Power Electronic

Thesis in Ms.c.

Modeling and Design and Manufacture of an Electrostatic Machine for Speed Measuring Application

By: MohammadMahdi Sadeghi

Supervisor:
Dr. Ahmad Darabi

Mar,22