http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک مدرس
دوره ۱۲ شماره ۳ شهریور ۱۳۹۱ ص‌ص ۱۳۴-۱۴۶

تاریخچه مقاله:
دریافت ۹۰/۹/۲۱
پذیرش ۹۱/۲/۱۸
ارائه در سایت ۹۱/۵/۳۰

مدل‌سازی و بهینه‌سازی یک موتور الکترواستاتیکی القایی

محمد دادخواه تهرانی[۱]، یوسف حجت[۲*]، مجتبی قدسی[۳]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- دانشیار گروه ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳- استادیار گروه ساخت و تولید، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۴۱۱۵-۱۴۳، yhojjat@modares.ac.ir

چکیده- موتورهای الکترواستاتیکی نسبت به موتورهای الکترومغناطیسی ساده‌تر و سبک‌ترهستند و پیچیدگی کمتری دارند، به همین علت برای ساخت در ابعاد کوچک و کاربرد در میکروماشین‌ها بسیار مناسب‌ترند. اما بعضی از ویژگی‌های منفی به خصوص گشتاور پایین، مانع گسترش آنها شده است. به همین علت برای کاربردی شدن آنها در صنایع، پژوهش‌های زیادی در حال انجام است. در این مقاله یک طرح جدید برای افزایش گشتاور این موتورها ارائه و از نظر تئوری و آزمایشگاهی بررسی شده است. در این طرح، الکترودهای روتور از طریق القایی باردار شده و گشتاور موتور افزایش می یابد. برای شناخت پارامترهای موثر بر عملکرد موتور، ابتدا مدل‌سازی انجام شده و سپس با استفاده از نتایج مدل‌سازی و با کمک روش‌های عددی، مشخصات موتور برای دستیابی به قابلیت‌های بالاتر بهینه‌سازی شده است. پارامترهای مورد نظر "نسبت پهنا به فاصله بین الکترودهای محرک" و "نسبت سطح الکترودهای القایی به سطح کل" هستند که بهینه‌سازی آنها باعث افزایش گشتاور خروجی و کاهش ریپل می‌شود. در نهایت با ساخت یک نمونهٔ آزمایشگاهی و انجام تست بر روی آن، کاربردی بودن، افزایش گشتاور و نتایج بهینه‌سازی مورد تأیید قرار گرفته است.

کلیدواژگان: محرک الکترواستاتیکی، روش تحلیل، روش عددی، گشتاور، ریپل.

Modeling and optimization of a voltage-induction electrostatic motor

M. Dadkhah[1], Y. Hojjat[2*], M. Ghodsi[3]

1- PhD Student of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
2- Assoc. Prof. of Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
3- Assist. Prof. of Mechanical Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran. yhojjat@modares.ac.ir

Abstract- Electrostatic motors are presented special advantages compare to electromagnetic motors such as light-weight, compactness and simple to fabricating. Due to these capabilities, recently, many researchers are working on electrostatic motors to make them applicable in industries. Accordingly, in this paper a new design idea for these motors is investigated theoretically and experimentally. This motor has driving electrodes on both rotor and stator, however, no wire is attached to rotor and signals are transferred to rotor using the induction electrodes. Modeling is implemented to study the effective parameters on performance. Then, using the modeling results, the design parameters are optimized using numerical method to improve the torque and minimize the ripple. Optimization findings are identified an optimum value for ratio of width to gap for driving electrodes and an optimum value for ratio of induction electrodes surface to total surface. Finally, the motor performance is evaluated using experimental setup and several experiments.

Keywords: Electrostatic Actuator, Analytical Method, Numerical method, Torque, Ripple.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.3.1.0]

۱- مقدمه

با گسترش میکروماشین‌ها، نیاز به محرک‌های کوچک و سبک در حال افزایش است. این موضوع در مورد سامانه‌های ویژه مکاترونیکی مانند روبات‌های کوچک به خوبی نمایان است. در این سامانه‌ها، بعضی از محرک‌ها بر روی قسمت‌های متحرک نصب می‌شوند و باید توسط محرک‌های دیگر به حرکت درآیند. از این رو وزن و ابعاد آنها تأثیر زیادی بر روی معادلات دینامیکی محرک دارد. با توجه به این شرایط، استفاده از موتورهای الکترومغناطیسی به دلیل وزن و حجم زیاد در اولویت قرار نمی‌گیرد. از سوی دیگر، در بسیاری موارد، میدان مغناطیسی ایجاد شده هنگام استفاده از این محرک‌ها منجر به ایجاد مشکل برای قسمت های دیگر می‌شود، که نمونهٔ آن را می‌توان در اتاق‌های ام-آر-آی [1] مشاهده کرد.

برای رفع این مشکلات محرک‌های جدیدی معرفی شده‌است. محرک‌های پیزوالکتریکی دارای توان و سرعت بالایی هستند، ولی به علت جابه‌جایی بسیار کم، کاربردشان محدود است [۱]. آلیاژهای هوشمند نیز در برخی موارد مورد استفاده قرار می‌گیرند ولی به دلیل توان پایین کاربرد گسترده‌ای پیدا نکرده‌اند [۲]. از سوی دیگر تمامی این محرک‌ها نیازمند استفاده از مواد و تکنولوژی تولید خاص هستند که تولید آنها را مشکل و قیمت آنها را گران می‌کند؛ به همین دلیل جایگزین‌های مناسبی برای محرک‌های الکترومغناطیسی نیستند.

محرک‌های الکترواستاتیکی محرک‌های بسیار ساده و بدون پیچیدگی در تولید هستند که در قرن ۱۸ توسط فارادی ابداع شدند، اما با توجه به این‌که توان زیادی نداشتند مورد توجه قرار نگرفتند. در سال‌های اخیر با توجه به پیشرفت فناوری و نیاز به محرک‌های میکرونی، محرک‌های الکترواستاتیکی دیگر بار مورد توجه قرار گرفته و استفاده از آنها در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی [2] فراگیر شده است. محرک‌های شانه‌ای [3] از متداول‌ترین محرک‌های الکترواستاتیکی هستند و در شتاب‌سنج‌های میکرونی به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در دهه ۹۰ میلادی در دانشگاه توکیو ژاپن برای اولین بار این ایده مطرح شد که می‌توان از این موتورها در ابعاد بزرگتر از میکرون نیز استفاده کرد [۳]. آنها با استفاده از بردهای لایه‌ای و استفاده از لایه‌های متعدد، در ضمن پایین نگه داشتن وزن و حجم موتور، توان بالایی را ایجاد کردند و توانستند موتوری خطی با توان (w/kg)۲۳۰ تولید کنند که قابل رقابت با موتور الکترومغناطیسی هم سایز خود بود [۴]. پس از این موفقیت، کار بر روی این موتورها مورد توجه قرار گرفت. جئون [4] در سال ۱۹۹۷ موتور الکترواستاتیکی با روتور معلق را طراحی کرد و ساخت [۶،۵]. در سال ۲۰۰۲ موزر [5] موتوری با روتور شیشه‌ای را ابداع کرد و توانست آن را به صورت دقیق کنترل کند [۸،۷]. در سال ۲۰۰۶ یاماموتو [6] موتور خطی با نام "موتور الکترواستاتیکی با تحریک دوگانه‌ی چندفاز" [7] را مدل‌سازی کرد و طرحی برای کاهش ریپل [8] (تغییرات ناخواسته در گشتاور که منجر به ایجاد ارتعاش در حرکت می‌شود) ارائه داد [۹]. در سال ۲۰۰۹ دادخواه و همکارانش در دانشگاه تربیت مدرس موتور الکترواستاتیکی با روتوری از جنس پلکسی‌گلاس [9] ساختند و پارامترهای مؤثر بر عملکرد موتور را بررسی نموده و سپس این موتور را به صورت دقیق کنترل کردند [۱۱،۱۰].

یکی از ویژگی‌های موتور خطی الکترواستاتیکی معرفی شده توسط یاماموتو، اتصال سیم به اسلایدر [10] و انتقال سیگنال‌ها به صورت مستقیم به الکترودهای روی آن است. او با این کار اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین استاتور و اسلایدر را بیشتر کرد و باعث افزایش قدرت موتور شد. ولی در مورد موتورهای دورانی، انتقال مستقیم سیگنال‌ها به روتور با مشکل روبروست، زیرا به علت دوران روتور امکان اتصال مستقیم سیم به الکترودهای روتور وجود ندارد. بنابراین باید از روش‌های دیگری استفاده کرد.

ساده‌ترین روش استفاده از جاروبک برای انتقال سیگنال است [۱۲]، ولی این روش باعث کاهش گشتاور موتور می‌شود و همچنین با توجه به استهلاک، جاروبک نیاز به تعویض دارد. از سوی دیگر با توجه به استفاده از ولتاژهای بالا در این نوع موتورها، احتمال ایجاد جرقه‌های زیادی در جاروبک وجود دارد. روش دیگر استفاده از الکترودهای القایی [11] برای انتقال

1. MRI
2. Micro Electro Mechanical Systems(MEMS)
3. Combo Drives

4. Jeon
5. Moser
6. Yamamoto
7. Dual Excitation Multiphase Electrostatic Motor
8. Ripple
9. Plexiglas
10. Slider
11. Induction Electrodes

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.3.1.0]

سیگنال‌ها است که در این مقاله معرفی شده است. در این روش روتور بدون هیچ‌گونه اتصال مستقیم، سیگنال‌ها را به صورت غیرتماسی دریافت کرده و به صورت غیر تماسی دوران می‌کند.

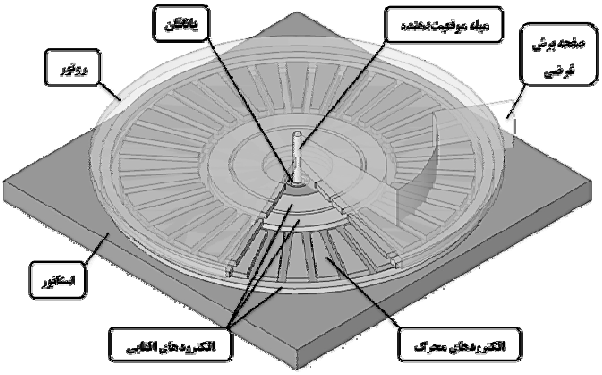
با توجه به اینکه موتور الکترواستاتیکی با روتور دی‌الکتریک گشتاور پایینی دارد، در این مقاله، برای اولین بار طرح موتور الکترواستاتیکی دورانی با روتور فعال القایی ارائه شده است. در این طرح، روتور نیز دارای الکترودهای فعالی است که از طریق القایی شارژ می‌شوند. برای اثبات کاربردی بودن آن، موتور مورد نظر مدل‌سازی شده و با استفاده از روش‌های عددی شکل و ابعاد الکترودها و نحوه چینش آنها بهینه‌سازی شده است. در نهایت با ساخت موتور بر اساس طرح بهینه شده و انجام آزمایش‌های لازم، عملکرد موتور مورد بررسی و تایید قرار گرفته است.

۲- معرفی ایده موتور

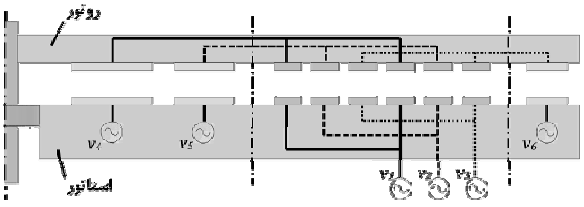
طرحواره موتور در شکل ۱ نشان داده شده است. برای درک بهتر، برشی از شکل ۱ در شکل ۲ آورده شده که در آن علاوه بر نشان دادن مکان الکترودها، نحوه اتصال الکترودها به سیگنال‌ها نیز مشخص شده‌است. صفحه برش فرضی مورد نیاز برای شکل ۲ در شکل ۱ نشان داده شده است.

همانگونه که در شکل ۱ دیده می‌شود الکترودهای محرک[1]، محرک[1]، الکترودهایی به صورت شعاعی و با چینش دورانی بر روی روتور و استاتور هستند. این الکترودها به صورت دو در میان به صورت متوالی به یکدیگر متصل هستند. به صورتی که هر سه الکترود متوالی یک مجموعه الکترود با ولتاژهای متفاوت را تشکیل می‌دهند (شکل ۲). وظیفه این الکترودها ایجاد گشتاور است و به این دلیل به آنها الکترودهای محرک گفته می‌شود. الکترودهای القایی نیز به صورت حلقه‌ای شکل روی روتور و استاتور قرار گرفته‌اند و کاملاً قرینهٔ هم هستند. وظیفه این الکترودها انتقال سیگنال به روتور است. الکترودهای القایی همانند خازن‌های صفحه‌ای عمل می‌کنند و در واقع هرکدام از الکترودها به همراه قرینه‌اش یک خازن مجزا را تشکیل می‌دهد. این تعریف به این جهت قابل تصور است که ابعاد سطح الکترودها نسبت به فاصله بین الکترودها بسیار بزرگ‌تر است. در نتیجه در این روش، سیگنال‌ها با واسطه خازن به الکترودهای روتور منتقل می‌شوند. مقدار ولتاژ القایی روی الکترودهای القایی روتور بستگی به ولتاژ الکترودهای القایی روی استاتور و ظرفیت خازن‌ها دارد که در بخش بعد به صورت تحلیلی محاسبه خواهد شد. در طراحی الکترودهای القایی شعاع دایره‌های درونی و بیرونی هرکدام از الکترودها به گونه‌ای انتخاب شده است که مساحت الکترودها برابر باشد و در نتیجه ظرفیت خازنی بین آنها نیز تقریبا برابر باشد. الکترودهای القایی روی روتور به صورت متناظر به الکترودهای محرک روی روتور متصل هستند و باعث انتقال سیگنال‌ها به آنها می‌شوند (شکل ۲).

ولتاژ ۳ فاز اعمالی به الکترودهای محرک استاتور منجر به ایجاد یک موج پتانسیل متغیر و متحرک بر روی سطح الکترودها می‌شود. سرعت دوران موج نسبت مستقیمی با فرکانس ولتاژ اعمالی دارد. سیگنال‌های اعمالی به الکترودهای القایی استاتور نیز با واسطه یک خازن به الکترودهای محرک روی روتور منتقل می‌شوند و باعث ایجاد یک موج الکتریکی متغیر و متحرک بر روی سطح روتور می‌شوند. برهم‌کنش این دو میدان مواج باعث ایجاد حرکت دورانی روتور می‌شود.



شکل ۱ نمای سه‌بعدی از طرح معرفی‌شده



شکل ۲ نمای برش خورده از موتور در محل صفحه برش فرضی

شکل ۳ چگونگی موج‌های تشکیل شده بر روی روتور و استاتور و برهم‌کنش آنها را نشان می‌دهد. برای به‌دست آوردن

1. Driving Electrodes

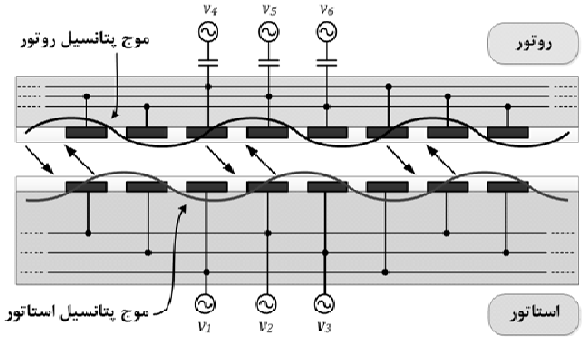
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.3.1.0]

ویژگی‌های حرکتی مانند سرعت و گشتاور موتور، مدل‌سازی محرک مورد نیاز است که در بخش بعد انجام خواهد شد.

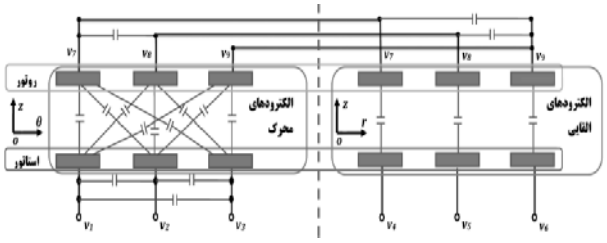
۳- مدل‌سازی و تحلیل

مدل مورد نظر برای بررسی این محرک در شکل ۴ آورده شده است. در این شکل الکترودها بر اساس محل قرارگیری دسته‌بندی شده‌اند. در حقیقت الکترودها در ۴ دستهٔ مختلف قرار دارند. ولی در روی روتور الکترودهای القایی و محرک به طور متناظر به یکدیگر متصل و در حقیقت هم ولتاژ هستند. در نتیجه در تحلیل، این الکترودها در یک دسته قرار می‌گیرند. برای تحلیل این محرک از روش ماتریس خازنی استفاده می‌شود [۹] که در این مقاله از یک ماتریس ۹×۹ استفاده خواهد شد. سیگنال‌های اعمالی به الکترودهای محرک روی استاتور، سیگنال‌های سه‌فاز با فرکانس یکسان ω_{sd} و دامنه v_{sd} هستند که بین سیگنال‌ها اختلاف فاز به اندازه $2\pi/3$ وجود دارد. این سیگنال‌ها که به طور مستقیم با سیم به الکترودها منتقل می‌شوند به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$V_{sd} = [v_1, v_2, v_3] = v_{sd}\left[\sin(\omega_{sd}t), \sin\left(\omega_{sd}t + \frac{2\pi}{3}\right), \sin\left(\omega_{sd}t - \frac{2\pi}{3}\right)\right]^T \quad (۱)$$



شکل ۳ نحوه ایجاد موج پتانسیل



شکل ۴ مدل در نظر گرفته شده برای تحلیل محرک

الکترودهای القایی روی استاتور با سیگنال‌هایی مشابه سیگنال‌های محرک ولی با فرکانس متفاوت ω_{si} و دامنه متفاوت v_{si} تغذیه می‌شوند. این سیگنال‌ها به صورت معادله (۲) نوشته می‌شوند:

$$V_{si} = [v_4, v_5, v_6] = v_{si}\left[\sin(\omega_{si}t), \sin\left(\omega_{si}t + \frac{2\pi}{3}\right), \sin\left(\omega_{si}t - \frac{2\pi}{3}\right)\right]^T \quad (۲)$$

الکترودهای روی روتور به وسیله القای الکتریکی باردار می‌شوند. به این سبب ولتاژ آنها مشخص نیست و باید با کمک معادلات محاسبه شود. ولتاژ این الکترودها به صورت زیر بیان می‌شود:

$$V_r = [v_7, v_8, v_9]^T \quad (۳)$$

به این ترتیب در این مدل ۴ سری الکترود مختلف با ۹ ولتاژ متفاوت وجود دارد. این ولتاژها می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\mathrm{V}=[\mathrm{v}_1,\mathrm{v}_2,\mathrm{v}_3,\mathrm{v}_4,\mathrm{v}_5,\mathrm{v}_6,\mathrm{v}_7,\mathrm{v}_8,\mathrm{v}_9]^{\mathrm{T}} \quad (۴)$$

در نتیجه این مدل شامل یک مدل خازنی با ۹ ترمینال مجزا است. برای بیان ماتریس خازنی این مدل، یک ماتریس ۹×۹ در نظر گرفته شده است. این ماتریس بیان‌کننده رابطه بین ترمینال‌های مختلف است. به‌گونه‌ای که المان موجود در سطر i و ستون j (C_{ij}) بیان کننده رابطه بین الکترودهای شماره i و j است. با توجه به تعریف ماتریس خازنی، این ماتریس قرینه است و اگر از اثر خازنی زمین صرف‌نظر شود و سیستم به صورت ایزوله در نظر گرفته شود، جمع درایه‌های هر سطر و ستون باید برابر صفر شود. بنابراین تعریف، درایه‌های روی قطر ماتریس مثبت و درایه‌های دیگر منفی هستند. با توجه به ظاهر و مشخصات موتور، ماتریس خازنی به صورت ۹ ماتریس ۳×۳ مجزا تعریف می‌شود:

$$C = \begin{bmatrix} C_{sd} & o & C_p \\ o & C_{si} & C_n \\ {C_p}^T & C_n & C_r \end{bmatrix} \quad (۵)$$

با توجه به حالت الکترودها و اندازه‌گیری‌های انجام شده، المآنهای بین الکترودهای محرک و القایی روی استاتور صفر درنظر گرفته می‌شوند که با توجه به ثابت و ناچیز بودن مقدار واقعی آنها، تأثیر زیادی بر نتایج مدل‌سازی نخواهند داشت. این ماتریس‌های ۳×۳ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.3.1.0]

$$C_{sd}=\begin{bmatrix} c_{sd}(\theta_p) & c_d(\theta_p) & c_d(\theta_p) \\ c_d(\theta_p) & c_{sd}(\theta_p) & c_d(\theta_p) \\ c_d(\theta_p) & c_d(\theta_p) & c_{sd}(\theta_p) \end{bmatrix} \quad (۶)$$

$$C_{si}=\begin{bmatrix} c_{si} & 0 & 0 \\ 0 & c_{si} & 0 \\ 0 & 0 & c_{si} \end{bmatrix} \quad (۷)$$

$$C_r=\begin{bmatrix} c_{ri}(\theta_p) & -c_r & -c_r \\ -c_r & c_{ri}(\theta_p) & -c_r \\ -c_r & -c_r & c_{ri}(\theta_p) \end{bmatrix} \quad (۸)$$

$$C_p=\begin{bmatrix} c_p(\theta_p) & c_p\left(\theta_p+\frac{2\pi}{3}\right) & c_p\left(\theta_p-\frac{2\pi}{3}\right) \\ c_p\left(\theta_p-\frac{2\pi}{3}\right) & c_p(\theta_p) & c_p\left(\theta_p+\frac{2\pi}{3}\right) \\ c_p\left(\theta_p+\frac{2\pi}{3}\right) & c_p\left(\theta_p-\frac{2\pi}{3}\right) & c_p(\theta_p) \end{bmatrix} \quad (۹)$$

$$C_n=\begin{bmatrix} -c_n & 0 & 0 \\ 0 & -c_n & 0 \\ 0 & 0 & -c_n \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

پارامترهای به‌کار رفته در این ماتریس‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} c_p(\varphi) &= -c_{p0}-c_{p1}\cos(\varphi) \\ &\quad -c_{p2}\cos(2\varphi)-c_{p3}\cos(3\varphi)\,c_{sd}(\varphi) \\ &= c_{sd0}+c_{sd1}\cos(3\varphi)\,c_d(\varphi) \\ &= -c_{d0}-c_{d1}\cos(3\varphi)\,c_{ri}(\varphi) \\ &= -c_{ri0}-c_{ri1}\cos(3\varphi)\;\theta_p=\frac{n}{p}\theta \end{aligned} \quad (۱۱)$$

که در آن $c_{sd0}, c_{sd1}, c_{si}, c_{ri0}, c_{ri1}, c_r, c_{d0}, c_{d1}, c_n, c_{p0}, c_{p1}, c_{p2}$ و c_{p3} ضرایبی مثبت، θ زاویه دوران نسبی بین روتور و استاتور، n تعداد الکترودهای محرک بر روی روتور یا استاتور و p تعداد فازهای موتور می‌باشد. ضرایب خازنی موجود از طرق مختلف مانند اندازه‌گیری، تحلیل و یا روش‌های عددی قابل محاسبه هستند. با توجه به تعریف ماتریس خازنی، این ماتریس باید معادله زیر را ارضا کند:

$$Q=CV \quad (۱۲)$$

که در آن Q بردار بارهای الکتریکی است. هنگامی که ماتریس خازنی ۹×۹ است، بار الکتریکی و ولتاژ دو بردار ۱×۹ هستند. بردار ولتاژ در معادله (۳) معرفی شد. بردار بار الکتریکی نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q=[q_1,q_2,q_3,q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9]^T \quad (۱۳)$$

که در آن q_1 تا q_9 بیان کننده بار شارژ شده به‌ترتیب بر روی پایانه‌های ۱ تا ۹ می‌باشد. با توجه به این‌که الکترودهای قرار گرفته روی روتور (۷، ۸ و ۹) به منبع الکتریکی خارجی متصل نیستند، مقدار q_7، q_8 و q_9 باید برابر صفر باشد. با جایگزین کردن بردارهای Q و V و ماتریس C در معادله (۱۲)، ۹ معادله جدید به دست می‌آید. با کمک سه معادله آخر، می‌توان ولتاژهای مجهول را محاسبه کرد:

$$\begin{aligned} v_7 &= \frac{1}{K}3v_{sd} \\ &\left(c_{p1}\sin(\theta_p+\omega_{sd}t)+c_{p2}\sin(-2\theta_p+\omega_{sd}t)\right)+ \\ &2v_{si}c_n\sin(\omega_{si}t) \end{aligned} \quad (۱۴)$$

$$\begin{aligned} v_8 &= \frac{1}{K}3v_{sd}\left(c_{p1}\sin\left(\theta_p+\omega_{sd}t+\frac{2\pi}{3}\right)+\right. \\ &\left. c_{p2}\sin\left(-2\theta_p+\omega_{sd}t+\frac{2\pi}{3}\right)\right)+ \\ &2v_{si}c_n\sin\left(\omega_{si}t+\frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (۱۵)$$

$$\begin{aligned} v_9 &= \frac{1}{K}3v_{sd}\ \left(c_{p1}\sin\left(\theta_p+\omega_{sd}t-\frac{2\pi}{3}\right)+\right. \\ &\left. c_{p2}\sin\left(-2\theta_p+\omega_{sd}t-\frac{2\pi}{3}\right)\right)+2v_{si}c_n\sin\left(\omega_{si}t-\frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (۱۶)$$

که در آنها ضریب K به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K=2\left(c_r+c_{ri0}+c_{ri1}\cos(3\theta_p)\right) \quad (۱۷)$$

برای محاسبه مقدار گشتاور موتور، از قانون کار مجازی استفاده می‌شود. انرژی الکترواستاتیکی ذخیره شده در شبکه خازنی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$U=\frac{1}{2}V^TCV \quad (۱۸)$$

با توجه به معادله (۱۸)، گشتاور می‌تواند با کمک مشتق انرژی الکترواستاتیکی نسبت به دوران (θ) به‌دست آید که به این صورت بیان می‌شود:

$$\tau=\frac{\partial U}{\partial\theta}=\frac{1}{2}V^T\frac{\partial C}{\partial\theta}V+V^TC\frac{\partial V}{\partial\theta} \quad (۱۹)$$

با جایگذاری مقادیر V و C در معادله (۱۹)، گشتاور محرک قابل محاسبه است.

$$\begin{aligned} \tau=\frac{n}{(4pK^2)}&(18v_{si}v_{sd}c_n(((5c_{ri1}c_{p2}-2c_{p1}A)\\ &\sin(\alpha-\theta_p)-4(c_{ri1}c_{p1}-c_{p2}A)\sin(\alpha+2\theta_p)\\ &+2c_{ri1}c_{p1}\sin(\alpha-4\theta_p)-c_{ri1}c_{p2}\sin(\alpha+5\theta_p))\\ &+((-9Bc_{ri1}^2-81(c_{p1}^2+c_{p2}^2)c_{ri1}-36A^2B\\ &+162Ac_{p1}c_{p2})v_{sd}^2-36c_n^2v_{si}^2c_{ri1})\sin(3\theta_p)\\ &-9c_{ri1}v_{sd}^2B(4A\sin(6\theta_p)+c_{ri1}\sin(9\theta_p))) \end{aligned} \quad (۲۰)$$

که متغیرهای استفاده شده در آن به صورت (۲۱) تعریف می‌شوند.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.3.1.0]

$$\alpha = (\omega_{si} - \omega_{sd})t,$$
$$A = (c_{ri0} + c_r), B = (c_{d1} + c_{sd1}) \quad (۲۱)$$

۴- بهینه‌سازی

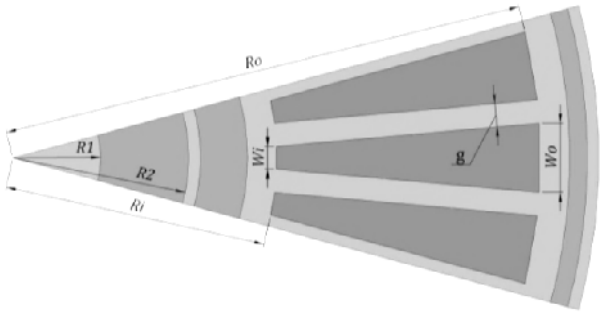
همانگونه که در معادله گشتاور محرک مشاهده می‌شود، ضرایب ماتریس خازنی تأثیر زیادی بر میزان گشتاور و مقدار ریپل دارند. این ضرایب کاملاً به شکل و اندازه الکترودهای روی روتور و استاتور وابسته‌اند. ولی این وابستگی بسیار پیچیده است. با توجه به این مسئله، به‌نظر می‌رسد که می‌توان طراحی الکترودها را بهینه کرد. دراین بخش بهینه‌سازی در دو مرحله انجام می‌شود.

ابتدا با ثابت نگه‌داشتن ابعاد الکترودهای القایی، الکترودهای محرک بهینه‌سازی شده، سپس باتوجه به نتایج بدست آمده، بهینه‌سازی الکترودهای القایی انجام می‌شود.

۴-۱- بهینه‌سازی الکترودهای محرک

پارامترهای طراحی الکترودها درشکل ۵ مشخص شده است که در آن g فاصله بین الکترودهای محرک[1] و همواره ثابت است. R_i شعاع داخلی، R_o شعاع خارجی الکترودهای محرک، w_o پهنای الکترودها در شعاع خارجی و w_i پهنای الکترودها در شعاع داخلی است. پارامتر اصلی و متغیر دیگر درطراحی، تعداد دسته الکترودهای محرک (n_r) است که مقدار آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$n_r=n/p \quad (۲۲)$$



شکل ۵ پارامترهای طراحی الکترودها در قطاعی از بردها که نشان‌دهنده یک دسته الکترود محرک است.

با توجه به این‌که در این مقاله تعداد فازها (p) همواره ۳ است، بنابراین مقدار دسته الکترودها همواره ثلث تعداد الکترودهای کل (n) است. پارامترهای طراحی تعریف‌شده به یکدیگر وابسته می‌باشند. از این رو برای بهینه‌سازی، پارامترهای تعداد دسته‌ها و فاصله بین الکترودها به عنوان متغیرهای مستقل طراحی و پهنای الکترودها به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته می‌شود. هرچند که شعاع داخلی و خارجی الکترود نیز بر روی پارامترها تأثیرگذار است ولی دراین قسمت با ثابت نگهداشتن این شعاع‌ها تنها بر روی دو پارامتر دیگر تمرکز می‌شود. زیرا این شعاع‌ها به شعاع الکترودهای القایی وابسته است و باید همزمان با آنها بررسی شود. به همین علت در این قسمت با ثابت در نظر گرفت نشعاع بیرونی و داخلی الکترودهای محرک و تغییر فاصله بین الکترودها و تعداد دسته الکترودها، ضرایب خازنی و سپس تأثیر آنها بر روی گشتاور و ریپل بررسی خواهد شد.

برای شبیه‌سازی و بدست آوردن ضرایب ماتریس خازنی از شبیه‌سازی عددی استفاده می‌شود. برای این منظور در هر مرحله مدل به‌صورت سه بعدی در نرم‌افزار انسیس[2] ایجاد می‌شود و سپس با کمک روش انرژی ذخیره شده[3] ماتریس خازنی محاسبه می‌شود. با استفاده از ضرایب ماتریس خازنی بدست آمده ازشبیه‌سازی و جایگزینی آنها درمعادله گشتاور موتور می‌توان ویژگی‌های مورد نظر را محاسبه کرد.

برای الکترودهای ذوزنقه‌ای و فاصله الکترودهای مستطیلی، پهنای الکترودها به صورت متغیر خواهد بود. به همین دلیل یک پهنای متوسط برای الکترودها (w) تعریف می‌شود:

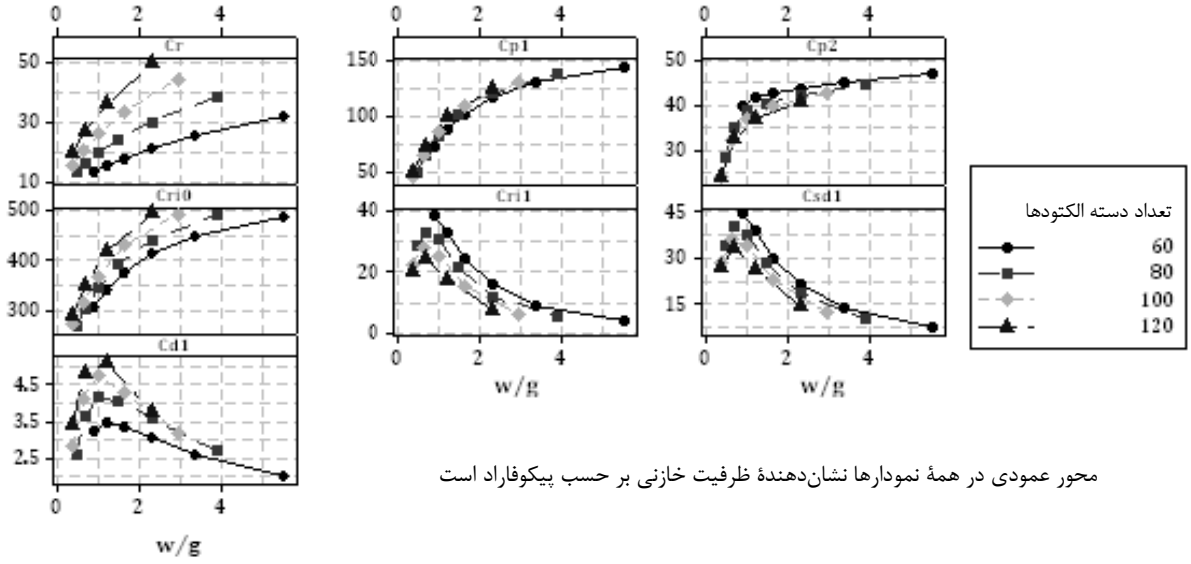
$$w = \frac{w_i + w_o}{2} \quad (۲۳)$$

با این تعریف می‌توان نسبت w/g را به عنوان یک معیار جهت طراحی در نظر گرفت. جدول ۱ مقادیر در نظر گرفته شده برای g و n_r در حالات مختلف را نشان می‌دهد. برای هرکدام از حالات، مقادیر محاسبه شدهٔ w و w/g نیز برای مقایسه آورده شده است. با توجه به قطر داخلی و خارجی در نظر گرفته شده برای الکترودها، برخی از این حالات غیرممکن بوده است که با علامت NP نشان داده شده است. به این ترتیب ۲۱ حالت مختلف برای الکترودها در نظر گرفته شد و ضرایب خازنی محاسبه شد. با توجه به این‌که در این مرحله تنها الکترودهای محرک تغییر کرده‌اند، ضرایب مربوط به الکترودهای القایی بدون تغییر مانده‌اند که نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی نیز این قضیه را ثابت می‌کند. شکل ۶ نحوه تغییر دیگر ضرایب را بر حسب متغیرهای طراحی نشان می‌دهد.

1. Gap

2. ANSYS
3. Stored Energy Method

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.3.1.0]

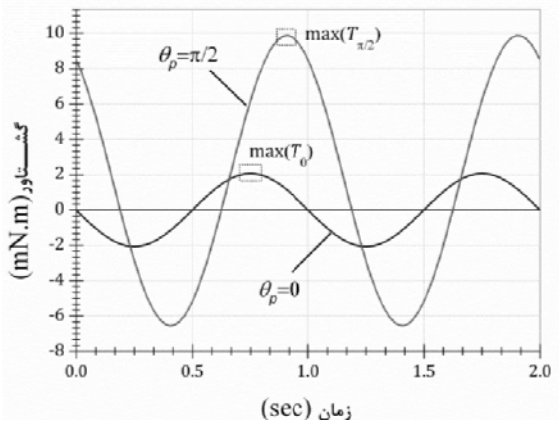


محور عمودی در همهٔ نمودارها نشان‌دهندهٔ ظرفیت خازنی بر حسب پیکوفاراد است

شکل ۶ نحوه تغییر ضرایب ماتریس خازنی بر حسب متغیرهای طراحی

جدول ۱ حالات مختلف برای بهینه‌سازی الکترودهای محرک

تعداد دسته الکترودها (n_r)								
۱۲۰		۱۰۰		۸۰		۶۰		
$\frac{w}{g}$	w μm	$\frac{w}{g}$	w μm	$\frac{w}{g}$	w μm	$\frac{w}{g}$	w μm	g μm
۲/۲۸	۴۵۴	۲/۹۳	۵۸۵	۳/۹۱	۷۸۱	۵/۵۴	۱۱۰۹	۲۰۰
۱/۱۹	۳۵۴	۱/۶۲	۴۸۵	۲/۲۷	۶۸۱	۳/۳۶	۱۰۰۹	۳۰۰
۰/۶۴	۲۵۴	۰/۹۶	۳۸۵	۱/۴۵	۵۸۱	۲/۲۷	۹۰۹	۴۰۰
۰/۳۱	۱۵۴	۰/۵۷	۲۸۵	۰/۹۶	۴۸۱	۱/۶۲	۸۰۹	۵۰۰
NP		۰/۳۱	۱۸۵	۰/۶۴	۳۸۱	۱/۱۸	۷۰۹	۶۰۰
NP		NP		۰/۴۰	۲۸۱	۰/۸۷	۶۰۹	۷۰۰



شکل ۷ نمودار تغییرات گشتاور برای مکان ثابت $\theta_p = 0, \frac{\pi}{2}$

پارامترهای عملکردی یک موتور الکترواستاتیکی خطی پیش از این تعریف شده‌اند و بر مبنای آنها عملکرد موتور بررسی شده‌است [۹]. بر اساس این تعریف‌ها، این مقاله پارامترهایی را برای عملکرد موتور الکترواستاتیکی دورانی تعریف می‌کند.

در نمودار تغییرات گشتاور برای یک مکان ثابت (θ_p) آن چنان که در شکل ۷ دیده می‌شود، ماکزیمم گشتاور قابل تشخیص است ($max\ [T_{\theta_p}]$). ولی این ماکزیمم با تغییر θ_p تغییر می‌کند که دلیل آن وجود ریپل است. مقدار بیشینه تمام $max\ [T_{\theta_p}]$ ها را به ازای تمام $0 \le \theta_p \le 2\pi$ را گشتاور بیشینه T_{max} و مقدار کمینه تمام $max\ [T_{\theta_p}]$ها را گشتاور کمینه T_{min} می‌نامیم. میانگین تمام $max\ [T_{\theta_p}]$ها را نیز گشتاور میانگین T_{ave} می‌نامیم. سپس مقدار ریپل به صورت رابطهٔ (۲۴) تعریف می‌شود:

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.3.1.0]

$$r=(T_{max}-T_{min})/T_{ave} \quad (۲۴)$$

نحوهٔ تغییر پارامترهای عملکردی بر حسب حالات مختلف متغیرهای طراحی در شکل ۸ آمده است. این شکل بیان کننده آن است که می‌توان مقدار بهینه‌ای برای نسبت $\frac{w}{g}$ در نظر گرفت. با توجه به این‌که برای عملکرد بهتر موتور نیاز به گشتاور میانگین بیشتر و ریپل کمتر است، نسبت $\frac{T_{ave}}{r}$ می‌تواند دید مناسبی در طراحی ایجاد کند. از این رو در شکل ۹ مقدار این نسبت بر حسب متغیرهای طراحی آورده شده است. نتیجه‌ای که از نمودارهای شکل ۹ حاصل می‌شود این است که در طراحی موتور، هرچه مقدار فاصله بین الکترودهای محرک کمتر باشد به شرط رعایت نسبت بهینه برای $\frac{w}{g}$ که حدود ۱/۲۵ بدست آمده است، گشتاور میانگین بالاتر و ریپل کمتر می‌شود.

۴-۲- بهینه‌سازی الکترودهای القایی

همانگونه که از معادله گشتاور مشخص است، ابعاد الکترودهای القایی تأثیر زیادی بر روی گشتاور موتور دارند. با افزایش سطح الکترودهای القایی ضریب خازنی c_n افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه گشتاور بیشتر خواهد شد. ولی افزایش سطح الکترودهای القایی به معنی کاهش سطح الکترودهای محرک است و این منجر به کاهش گشتاور خواهد شد. بنابراین مقدار بهینه‌ای برای نسبت سطح الکترودها به سطح کل وجود دارد. در این بخش این نسبت بهینه‌سازی می‌شود.

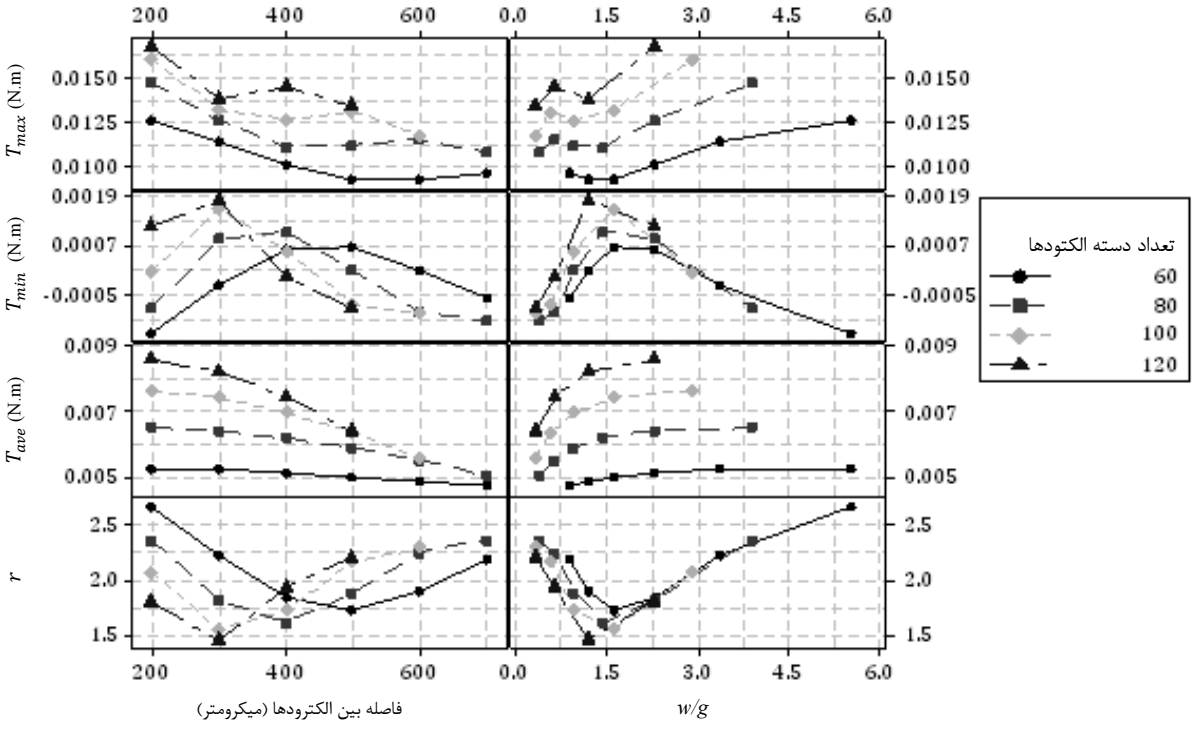
الکترودهای القایی سه حلقهٔ جداگانه هستند که به صورت متناظر بر روی روتور و استاتور قرار گرفته‌اند. فرض‌های لازم برای بهینه‌سازی این الکترودها به این شرح است:

۱- همواره مساحت هر سه الکترود با یکدیگر برابرند.

۲- شعاع داخلی درونی‌ترین الکترود (R_1) ثابت است (در اینجا ۷ میلی‌متر) با توجه به محدود بودن ابعاد استاتور و روتور، شعاع خارجی حلقه بیرونی نیز محدود می‌شود. (در اینجا ۴۶/۵ میلی‌متر). به عبارت دیگر سطح کل مورد استفاده ثابت است و باید به طور مناسب تقسیم شود.

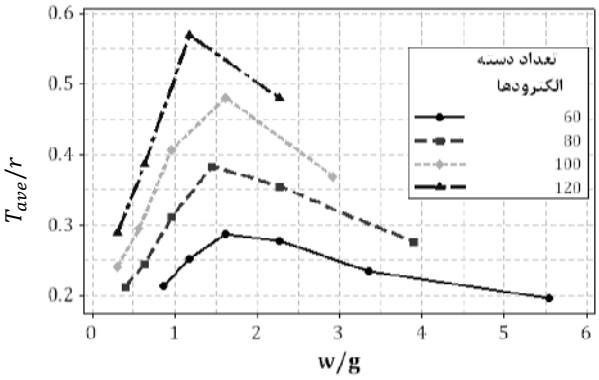
۳- فاصله بین الکترودهای القایی و فاصلهٔ بین آنها و الکترودهای محرک همواره عدد ثابتی است.

۴- فاصله بین الکترودهای محرک (g) برای همه طراحی‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود. با توجه به نتایج بخش قبل، هرچه این فاصله کمتر باشد گشتاور بیشتر است. از این رو در طراحی‌ها این مقدار مینیمم مقدار قابل ساخت (۲۰۰ میکرومتر) در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۸ نمودار تغییر پارامترهای عملکردی موتور بر حسب متغیرهای طراحی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.3.1.0]



شکل ۹ تغییر نسبت $\frac{T_{ave}}{r}$ بر حسب متغیرهای طراحی

برای تغییر الکترودها با توجه به فرض‌های انجام شده تنها کافی است شعاع خارجی درونی ترین حلقه (R_2) تغییر داده شود. با این تغییر دیگر شعاع‌ها با توجه به رابطه‌های بین آنها به دست می‌آیند. با توجه به این‌که طراحی الکترودهای محرک نیز وابسته به طراحی الکترودهای القایی است، برای هر بار طراحی الکترودهای القایی، الکترودهای محرک نیز باید تغییر کند. با توجه به ثابت فرض کردن فاصله بین الکترودهای محرک، با تغییر نسبت $\frac{w}{g}$ حالات مختلف طراحی برای الکترودها به دست می‌آید.

جدول ۲ مقادیر در نظر گرفته شده برای شعاع R_2 و نسبت (w/g) را نشان می‌دهد. برای هر حالت مقادیر نسبت مجموع سطح الکترودهای القایی به سطح کل ($\frac{S_i}{S}$) و تعداد الکترودهای محرک محاسبه شده برای هر طراحی آورده شده است. حالاتی که پهنای کمینه الکترودهای محرک (w_i) از مقدار قابل ساخت (۱۰۰ میکرومتر) کمتر شده است به عنوان حالات غیر قابل قبول در نظر گرفته شده است که با علامت NP مشخص شده است.

برای تمام حالات مجاز جدول ۲، مدل‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار ANSYS انجام شد و ضرایب ماتریس خازنی به‌دست آمد. با استفاده از این ضرایب همان‌گونه که در بخش قبل ذکرشد، پارامترهای عملکردی موتور محاسبه شد. نتایج این محاسبات در شکل ۱۰ آورده شده است.

۵- آزمایشات و نتایج

۵-۱- طراحی و ساخت برد بهینه

در بخش قبل ابعاد بهینه الکترودها تعیین شد. بر این اساس طراحی نهایی الکترودها انجام شد. گام اول طراحی، انتخاب مقدار بهینه برای نسبت پهنای میانگین به فاصله بین الکترودها و نسبت سطح الکترودهای القایی به سطح کل بود. سپس با توجه به محدودیت‌های ساخت، از جمله شعاع نهایی روتور و کمترین پهنا و گپ قابل ساخت، ابعاد الکترودها محاسبه شد. در جدول ۳ ابعاد الکترودهای طرح نهایی آورده شده است. همچنین شکل ۱۱ بردهای ساخته شده برای روتور و استاتور را نشان می‌دهد.

۵-۲- مجموعه آزمایشی

شکل ۱۲ مجموعه آزمایشی مورد استفاده را نشان می‌دهد. روتور از بردی با ضخامت ۲۰۰ میکرومتر که بر روی یک دیسک سیلیکونی به ضخامت یک میلی‌متر چسبانده شده و یک محور دوران آلومینیمی تشکیل شده است. دیسک مورد استفاده دیسک ثبت اطلاعات در هارد دیسک‌های کامپیوتر می‌باشد که با توجه به سطح یکنواخت آن برای ساخت روتور بسیار مناسب است. برد استاتور بر روی یک قطعه از جنس پلی‌کربنات و به کمک چهار عدد پیچ ثابت شده است. این مجموعه خود درون یک ظرف قرار می‌گیرد و به کمک دو عدد پیچ ثابت می‌شود.

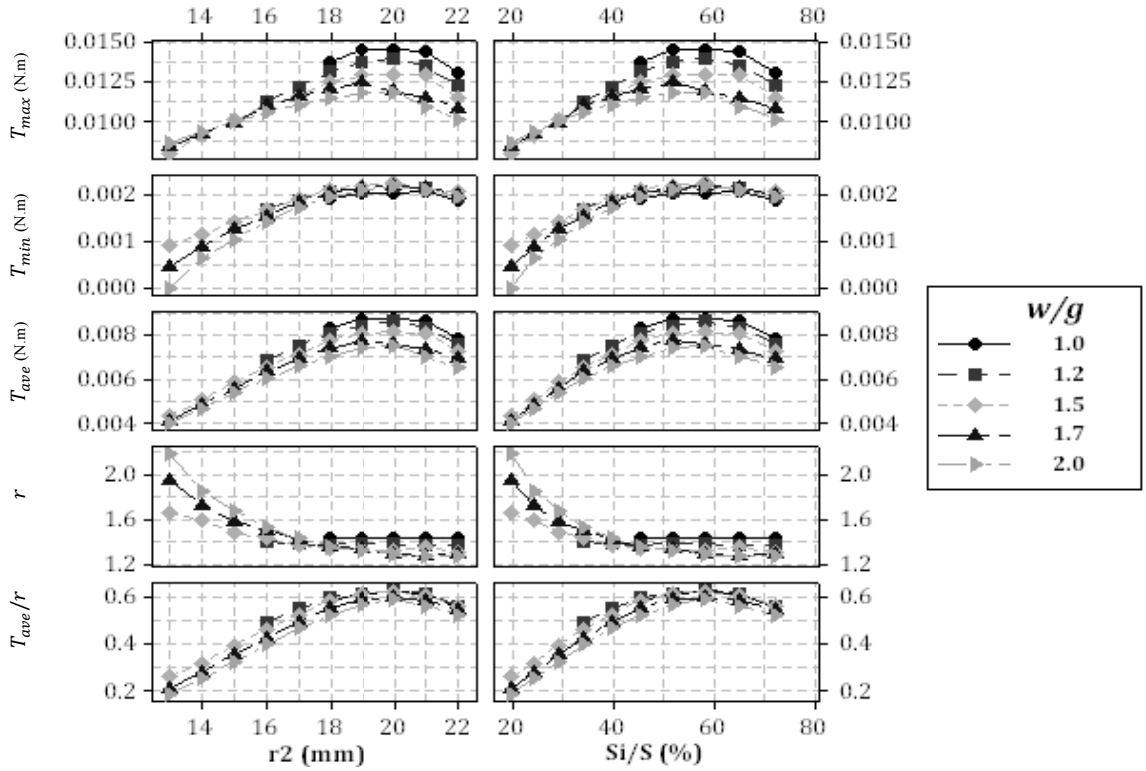
جدول ۲ حالات مختلف بهینه‌سازی الکترودهای القایی

w/g□	۱	۱/۲	۱/۵	۱/۷	۲	$\frac{S_i}{S}$(%)	R_2(mm)
	تعداد دسته الکترودها						
۱۳	NP	NP	۱۲۹	۱۱۵	۱۰۷	۱۹/۶۷	۱۳
۱۴	NP	NP	۱۳۱	۱۱۷	۱۰۹	۲۴/۱۴	۱۴
۱۵	NP	NP	۱۳۴	۱۱۹	۱۱۱	۲۸/۹۶	۱۵
۱۶	NP	۱۵۵	۱۳۶	۱۲۲	۱۱۳	۳۴/۱۲	۱۶
۱۷	NP	۱۵۷	۱۳۸	۱۲۴	۱۱۵	۳۹/۶۳	۱۷
۱۸	۱۷۶	۱۶۰	۱۴۱	۱۲۶	۱۱۷	۴۵/۴۸	۱۸
۱۹	۱۷۹	۱۶۲	۱۴۳	۱۲۸	۱۱۹	۵۱/۶۸	۱۹
۲۰	۱۸۱	۱۶۵	۱۴۵	۱۲۹	۱۲۱	۵۸/۲۳	۲۰
۲۱	۱۸۴	۱۶۷	۱۴۷	۱۳۱	۱۲۲	۶۵/۱۲	۲۱
۲۲	۱۸۶	۱۶۹	۱۴۹	۱۳۳	۱۲۴	۷۲/۳۶	۲۲

جدول ۳ ابعاد الکترودهای طراحی نهایی

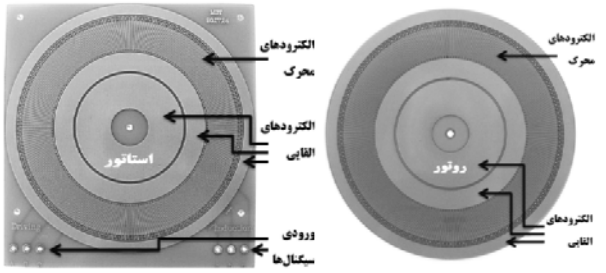
مشخصه	واحد	اندازه
فاصله بین الکترودها (g)	µm	۲۰۰
پهنای متوسط الکترودها (w)	µm	۲۴۰
تعداد دسته الکترودها	-	۱۶۵
شعاع داخلی الکترودهای محرک	mm	۲۹/۱۴
شعاع خارجی الکترودهای محرک	mm	۴۰/۱۹
شعاع R_1	mm	۷
شعاع R_2	mm	۲۰

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.3.1.0]



شکل ۱۰ نمودار تغییر پارامترهای عملکردی موتور بر حسب تغییر سطح الکترودهای القایی

با توجه به این‌که اختلاف پتانسیل بین روتور و استاتور بسیار بالاست و احتمال جرقه وجود دارد، مجموعه در زیر مایع دی‌الکتریک 3MNovec HFE-7100 قرار داده می‌شود. توانایی مقابله با تخلیه الکتریکی این مایع دی‌الکتریک تا ۴ برابر هوا است. همچنین برای ایجاد فاصله بین سطح روتور و استاتور و تسهیل کردن حرکت این دو نسبت به هم، گوی‌های شیشه‌ای[1] با قطر بین ۵۰ تا ۶۵ میکرومتر، بین آنها قرار داده شده است. مزیت استفاده از این گوی‌ها این است که با تغییر قطر این ذرات می‌توان به راحتی فاصله بین روتور و استاتور را تغییر داد.



شکل ۱۱ بردهای ساخته شده برای روتور و استاتور

در مقیاس صنعتی می‌توان با استفاده از یاتاقانهای دقیق و طراحی بدنه نگهدارنده، فاصله بین روتور و استاتور را به صورت دقیق تنظیم کرد و دیگر نیازی به استفاده از گوی‌های شیشه‌ای نمی‌باشد. برای موقعیت‌دهی و دوران بهتر روتور نسبت به استاتور، از یک یاتاقان[2] در مرکز استاتور استفاده شده است.

شکل ۱۲ مجموعه آزمایشی مورد استفاده

1. Glass Beads

2. Ball Bearing

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.3.1.0]

سیگنال‌های مورد نیاز برای تحریک موتور توسط سیم‌هایی به ترمینال‌های نصب شده بر روی استاتور منتقل می‌شوند. این سیگنال‌ها ابتدا با کمک یک دستگاه *DSP* (*dspace1103*) و کامپیوتر متصل به آن با دامنه کمتر از 2v ساخته می‌شوند و سپس با کمک سه دستگاه تقویت‌کننده ولتاژ[1] (*Trek-609E*) با ضریب ۱۰۰۰، تقویت می‌شوند. بیشینه ولتاژ خروجی این دستگاه‌ها $\pm$2Kv است. در تمام آزمایش‌های انجام شده، دامنه و فرکانس سیگنال‌های محرک و القایی همواره برابر یکدیگر بودند، در نتیجه داریم:

$$v_{sd} = v_{si} = v_0 \ , \ \omega_{sd} = -\omega_{si} = \omega_0 \qquad (۲۵)$$

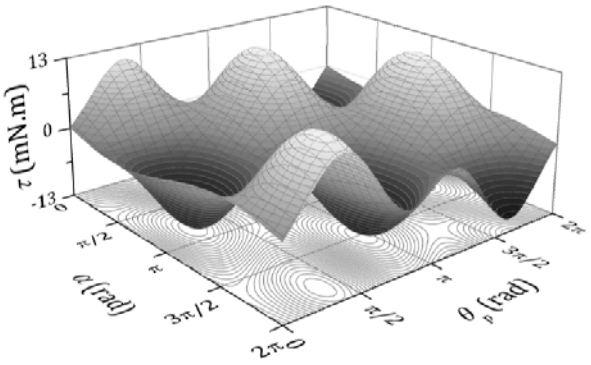
۵-۳- نتایج آزمایشها

برای بررسی عملکرد موتور طراحی شده آزمایشهای متعددی بر روی آن انجام شد که در این بخش به برخی از نتایج به دست آمده اشاره می‌شود.

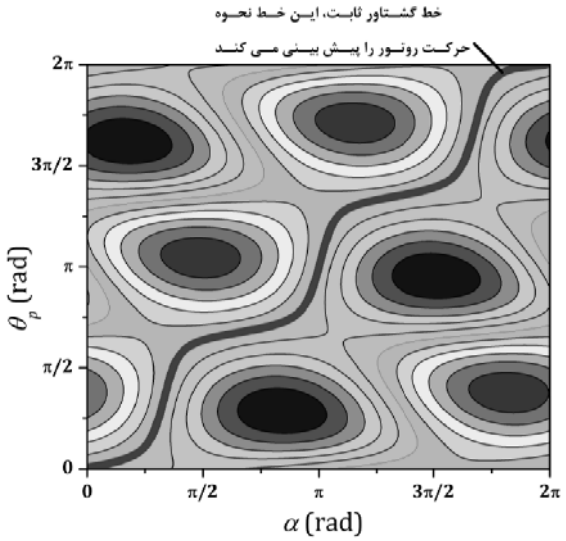
برای بررسی صحت معادله به‌دست آمده برای گشتاور موتور و بهینه‌سازی، نحوه حرکت موتور مورد بررسی قرارگرفت. در شکل ۱۳ نمودار سه‌بعدی گشتاور محاسبه شده با استفاده از معادله ۲۰ و با کمک ضرایب به‌دست آمده از مدل‌سازی موتور در انسیس رسم شده است. در اینجا مقدار v_0 برابر 1kV در نظر گرفته شده است.شکل ۱۴ نمودار ۲ بعدی کانتوری از همین معادله گشتاور را نشان می‌دهد که خطوط هم گشتاور در آن مشخص است. به عنوان مثال، خطی که برجسته شده مسیر حرکت روتور را در حالتی که گشتاور ثابت باشد پیش‌بینی می‌کند.

شکل ۱۵ نحوه حرکت واقعی روتور را نشان می‌دهد. این نمودار با کمک اتصال یک انکودر دورانی به روتور به دست آمده است. در هنگام آزمایش، به جز باری که از طرف انکودر بر روی روتور وارد می‌شود و همچنین اصطکاک‌های ناشی از اتصال آنها، بار خارجی دیگری بر روی روتور قرار نداشته است. تشابه این نمودار با حرکت پیش‌بینی شده در شکل ۱۴ ثابت می‌کند که معادله به دست آمده برای گشتاور، قابلیت محاسبه گشتاور را با دقت خوبی دارد. یکی دیگر از پارامترهای اندازه‌گیری شده سرعت دوران بیشینه موتور در ازای دامنه‌های مختلف سیگنال‌های ورودی است. شکل ۱۶ نتیجه به‌دست آمده را نشان می‌دهد. این نمودار بیان کننده دو حالت مختلف روتور است.

1. High Voltage Amplifier (HVA)



شکل ۱۳ نمودار سه بعدی گشتاور



شکل ۱۴ نمودار دوبعدی گشتاور همراه با خط پیش‌بینی کننده نحوه حرکت روتور در حالتی که گشتاور مقاوم بسیار کمی (در اینجا ۰/۱ میلی نیوتن متر) روی روتور باشد.

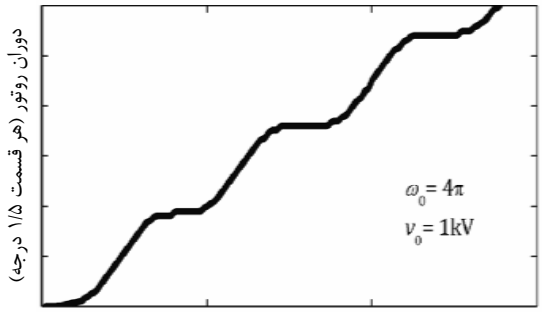
در حالت اول روتور همراه با دیسک است که پیش از این تشریح شد. در حالت دوم روتور تنها شامل برد بوده و سرعت دوران آورده شده، سرعت دوران این برد است. برای موقعیت‌دهی برد در مرکز استاتور از یک میله با قطر ۲ میلیمتر استفاده شده است. این میله در سوراخ مرکز روتور و سپس در یاتاقان مرکز استاتور قرار می‌گیرد تا دوران روتور بدون انحراف نسبت به استاتور انجام شود (شکل ۱).

این سرعت‌ها در شرایطی به‌دست آمده است که هیچ باری بر روی موتور نبوده است و روتور به صورت آزادانه حرکت کرده و فاصله بین روتور و استاتور حدود ۵۰ تا ۶۰ میکرومتر بوده است. البته باید توجه داشت که همواره اصطکاک بین سطح روتور و استاتور و ذرات شیشه وجود دارد که باعث ایجاد بار بر

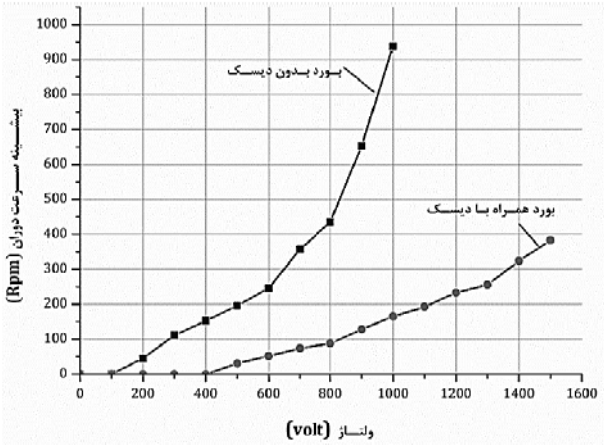
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.3.1.0]

روی روتور می‌شود. همچنین اصطکاک یاتاقان و نیروی لازم جهت حرکت مایع دی‌الکتریک و دیسک روتور نیز مانع از حرکت روتور به صورت آزادانه هستند.

در حالت اول حرکت از ولتاژ ۵۰۰ ولت آغاز شد، زیرا در ولتاژهای کمتر موتور توان لازم برای دوران را ندارد. ولی در حالت دوم از ولتاژ ۲۰۰ ولت حرکت انجام شد. دلیل این تفاوت آن است که در حالت اول روتور بسیار سنگین‌تر از حالت دوم است (به خاطر وجود دیسک و قطعه آلومینیمی) و برای دوران موتور به توان بالاتری نیاز است. با افزایش ولتاژ توان خروجی موتور نیز افزایش پیدا می‌کند. این افزایش توان را می‌توان با افزایش سرعت بیشینه در ولتاژهای بالاتر مشاهده کرد.



شکل ۱۵ نحوه حرکت واقعی موتور



شکل ۱۶ نمودار تغییرات سرعت بیشینه در ولتاژهای مختلف برای دو حالت متفاوت روتور

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی یک طراحی جدید برای موتورهای الکترواستاتیکی دورانی پرداخته شد است. در این طرح روتور به روش القایی فعال است. در این طرح، روتور دارای الکترود می‌باشد ولی این الکترودها بدون اتصال سیم و با کمک الکترودهای القایی شارژ می‌شوند. مدل‌سازی تئوری برای موتور انجام شد و به کمک ماتریس خازنی، معادله گشتاور خروجی روتور به دست آمد. برای جهت بهترشدن پارامترهای عملکردی موتور مانند گشتاور متوسط و ریپل، بهینه‌سازی در دو مرحله انجام شد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که مقداری بهینه برای نسبت پهنای الکترودهای محرک به فاصله آنها از یکدیگر وجود دارد و این عدد برای این موتور حدود ۱/۲۵ به دست آمد. همچنین نسبت بهینهٔ ۶۰ به ۴۰ درصد برای تقسیم سطح روتور و استاتور به‌ترتیب برای الکترودهای القایی و محرک به دست آمد. در نهایت با ساخت یک نمونه و انجام آزمایش‌هایی بر روی موتور، مدل ساخته شده مورد تأیید قرار گرفت. همچنین سرعت بیشینه برای دوحالت مختلف موتور و در ولتاژهای مختلف اندازه‌گیری شد و نشان داده شد که سرعت نهایی روتور به ولتاژ و بار اعمالی به موتور وابسته است.

۷- مراجع

[1] Hojjat Y. and Karafi M.R., "Introduction of roller interface ultrasonic motor (RIUSM)", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 163, 2010, PP. 304-310.

[2] Kim B., Lee M. G., Lee Y. P., Kim Y. and Lee G., "An earthworm-like micro robot using shape memory alloy actuator", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 125, 2006, pp. 429-437.

[3] Niino T., Higuchi T. and Egawa S., "Dual Excitation Multiphase Electrostatic Drive", *Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1995, pp. 1318-1325.

[4] Niino T., Egawa S. and Higuchi T., "High-power and high-efficiency electrostatic actuator", *Proceeding of IEEE MEMS*, 1993, pp. 236–241.

[5] Jeon J. U., Woo Sh. J. and Higuchi T., "Variable-capacitance motors with electrostatic suspension", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 75, 1999, pp. 289–297.

[6] Jeon J. U. and Higuchi T., "Induction motors with electrostatic suspension", *Journal of Electrostatic*, Vol. 451, 1998, pp. 57–73.

[7] Moser R. and Higuchi T., "Electrostatic rotation of glass disc", *Journal of Electrostatic*, Vol. 55, 2002, pp. 97-108.

[8] Moser R. and Higuchi T., "Precise positioning using electrostatic glass motor", *Precision Engineering*, Vol. 26, 2002, pp. 162–167.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.3.1.0]

[9] Yamamoto A., Niino T. and Higuchi T., "Modeling and identification of an electrostatic motor", *Precision Engineering*, Vol. 30, 2006, pp. 104–113.

[10] Dadkhah M., Hojjat Y., Modabberifar M. and Higuchi T., "Experimental investigation of parameters influencing electrostatic motor's performance with air bearing operation", International Journal of Advanced Manufacturing and Technology, Vol. 43, 2009, pp. 211-216.

[۱۱] دادخواه تهرانی محمد، حجت یوسف و رحمانی‌فرد محمد، "موقعیت‌دهی دقیق یک دیسک به کمک موتور الکترواستاتیکی"، *یازدهمین کنفرانس مهندسی ساخت وتولید ایران*، مهرماه ۱۳۸۹، تبریز.

[12] Hosobata T., Yamamoto A. and Higuchi T., "An electrostatic induction motor utilizing electrical resonance for torque enhancement" *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.173, 2012, pp. 180– 189

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1391.12.3.1.0]