

صلى الله عليه وسلم



مرکز آموزشهای الکترونیکی

گروه قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدلسازی، طراحی و ساخت موتور القایی قفس سنجابی شار محوری سه فاز با استاتور

بدون هسته

محمد علی طاهری پور

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

بهمن ۱۳۹۴

دانشگاه صنعتی شاهرود

مرکز آموزشهای الکترونیکی

گروه قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمد علی طاهری پور

تحت عنوان:

مدلسازی، طراحی و ساخت یک موتور القایی قفس سنجابی شار محوری سه فاز با

استاتور بدون هسته

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و

با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

| امضاء | اساتید مشاور | امضاء | اساتید راهنما    |
|-------|--------------|-------|------------------|
|       |              |       | دکتر احمد دارابی |

| امضاء | نماینده تحصیلات تکمیلی | امضاء | اساتید داور       |
|-------|------------------------|-------|-------------------|
|       |                        |       | دکتر امیرحسین نیا |
|       |                        |       | دکتر علیرضا الفی  |

## تقدیم به

پدر و مادر بزرگوارم که دعای خیرشان همواره بدرقه راهم بود؛  
همسر عزیزم که با همدلی‌اش، زندگی‌م را به وسعت عشق، معنا بخشید؛  
مهسا و مهدیار مهربانم که لبخندشان، نهایت آرامش من است.

## تشکر و قدردانی

سپاس خدایی را سزاست که تا صدایش می‌کنم پاسخم می‌گوید، اگر چه وقتی او مرا صدا می‌کند، من کاهلی می‌کنم؛

سپاس خدایی را سزاست، که هر چه از او می‌طلبم عطا می‌کند، اگر چه وقتی او درخواستی می‌کند من بخل می‌ورزم؛

سپاس خدایی را سزاست، که با من بردباری میکند انگار که من هیچ گناهی نکرده‌ام، به گونه ای در من می‌نگرد انگار که هیچ خطایی از من سر نزده است و با من طوری رفتار می‌کند انگار که هیچ لغزشی نداشته‌ام؛

این خدا، خدای من است و به راستی که ستایش برانگیز است.

وبعد از خدا معلم ستودنی است؛

بدینوسیله از استاد علم و اخلاق؛ جناب آقای دکتر احمد دارابی که با حسن خلق و فروتنی، همواره راهنمای من بودند و از نعمت مصاحبت با ایشان دانستم که هیچ نمیدانم، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین در ساخت این پروژه از توانمندیهای شرکت معظم توربوژنراتور شاهرود و مدیران شایسته آن مجموعه بهره فراوانی بردم، که با تجلیل از مقام بزرگمرد صنعت برق ایران، زنده یاد مهندس مهدی عامریان و قدردانی از تمامی بزرگواری که عمر خود را برای پیشرفت میهن اسلامی و خدمت به خلق سرمایه نمودند، از درگاه باریتعالی علو درجات را خواستارم.

## تعهدنامه

اینجانب محمد علی طاهری پور دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق قدرت آموزشهای الکترونیکی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدلسازی، طراحی و ساخت یک موتور القایی قفس سنجابی شار محوری سه فاز با استاتور بدون هسته تحت راهنمایی جناب آقای دکتر احمد دارابی متعهد می‌شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای 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 بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) 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 : ۱۳۹۴/۱۱/۲۸

امضاء : محمد علی طاهری پور

### مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها 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

انعطاف‌پذیری در ساختار ماشین شار محوری باعث می‌شود که قابلیت طراحی برای کاربردهای خاص و پاسخگویی به نیازهای مختلف را داشته باشد. در سال‌های اخیر، ماشین‌های شار محوری و دیسکی جدید در حال تبدیل شدن به سیستم محرکه در وسایل نقلیه الکتریکی می‌باشند. از آنجایی که ماشین‌های شار محوری با روتور و استاتور مسطح و فاصله هوایی قابل تنظیم، نسبت قدرت به وزن و قطر به طول بالاتری دارند، ساختار فشرده‌تر و بهره‌وری بالاتری را دارا هستند.

ماشین‌های شار محوری، قبل از ماشین‌های معمولی طراحی شدند و حتی در ماشین‌های با سرعت کم نیز از ماشین‌های شار محوری استقبال بیشتری گردیده است. ولی دلیل اصلی برای فراموش کردن ماشین‌های شار محوری مشکلات تولید هسته‌های مغناطیسی بخصوص هسته استاتور بود. حذف هسته استاتور علاوه بر رفع نگرانی ساخت هسته، باعث حذف تلفات هسته استاتور نیز خواهد شد.

در این پایان نامه به بررسی مکانیکی و الکترومغناطیسی و روش ساخت یک موتور القایی شار محوری بدون هسته پرداخته و اجزاء و روش مونتاژ آن به زیبایی نشان داده شده است. سپس یک نمونه موتور القایی قفس سنجابی شار محوری سه فاز با استاتور بدون هسته ساخته شده و نتایج تجربی با نتایج شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج نشان می‌دهد که موتور القایی شار محوری با استاتور بدون هسته نسبت به دیگر موتورهای شار محوری، دارای وزن و قیمت تمام شده پایین‌تر، ضریب قدرت بالاتر و تهنویه بهتری می‌باشند.

## کلمات کلیدی

موتور القایی شار محوری، استاتور بدون هسته، مدل‌سازی موتور شار محوری، روتور قفس سنجابی دو وجهی، مدار معادل موتور القایی شار محوری، موتور بدون هسته، روتور دیسکی، استاتور شار محوری.

## فهرست مطالب

| صفحه    | عنوان  |
|---------|--|
| ۱.....  | فصل اول.....   |
|         | مقدمه  |
| ۲.....  | ۱-۱- موتورهای الکتریکی القایی.....   |
| ۳.....  | ۱-۱-۱- اجزای تشکیل دهنده یک موتور القایی.....  |
| ۷.....  | ۱-۲- اساس کار موتورهای القایی.....   |
| ۱۱..... | ۱-۳- عوامل مؤثر در سرعت میدان دوار.....  |
| ۱۲..... | ۱-۴- سیم پیچی موتورهای القایی سه فاز.....  |
| ۱۲..... | ۱-۴-۱- سیم پیچی یک طبقه.....   |
| ۱۲..... | ۱-۴-۱-۲- سیم پیچی دو طبقه.....   |
| ۱۳..... | ۱-۴-۱-۳- سیم بندی گام کسری.....  |
| ۱۴..... | ۱-۵- مزایا و معایب موتورهای القایی.....  |
| ۱۵..... | ۲-۱- ماشین های شار محوری.....  |
| ۱۵..... | ۱-۲-۱- ساختار پایه ماشین های شار محوری.....  |
| ۱۹..... | ۲-۲-۱- انواع ساختار ماشین شار محوری.....   |
| ۲۲..... | ۳-۲-۱- کاربرد ماشین های شار محوری.....   |
| ۲۳..... | ۴-۲-۱- ماشین های القایی شار محوری با استاتور بدون هسته.....                            |
| ۲۴..... | ۵-۲-۱- مشکلات ماشین های شار محوری با استاتور بدون هسته.....                            |
| ۲۴..... | ۶-۲-۱- مزایای موتورهای القایی شار محوری با استاتور بدون هسته.....                      |
| ۲۵..... | ۳-۱- تحقیقات صورت پذیرفته در مورد ماشین های القایی شار محوری با استاتور بدون هسته..... |
| ۲۶..... | ۱-۳-۱- آینده نگری طرح موتورهای القایی شار محوری با استاتور بدون هسته.....              |
|         | فصل دوم  |
| ۲۹..... | طراحی موتور القایی شار محوری با استاتور بدون هسته.....                                 |
| ۳۰..... | ۱-۲- طراحی مکانیکی.....  |
| ۳۰..... | ۱-۱-۲- طرح ایده آل مکانیکی.....  |
| ۳۲..... | ۲-۱-۲- مشکلات اجرایی ساخت استاتور.....   |
| ۳۵..... | الف) ورق فایبر با نام تجاری ISOVAL 11.....   |



|    |       |               |       |   |
|----|-------|---------------|-------|---|
| ۳۶ | ..... | ISOVAL TM     | ..... | ب) ورق فایبر با نام تجاری                                       |
| ۴۲ | ..... | ۳-۱-۲         | ..... | رزینهای تثبیت کننده   |
| ۴۲ | ..... | DAMIVAL 13522 | ..... | الف) رزین   |
| ۴۴ | ..... | DAMIVAL 15182 | ..... | ب) رزین   |
| ۴۵ | ..... | ۴-۱-۲         | ..... | خنک کنندگی استاتور و روتور                                      |
| ۴۹ | ..... | ۵-۱-۲         | ..... | ساختار روتور و چگونگی استقرار روتور بارها                       |
| ۵۲ | ..... | ۶-۱-۲         | ..... | نحوه استحکام و ایجاد پایداری روتور در حین چرخش                  |
| ۵۳ | ..... | ۷-۱-۲         | ..... | یاتاقانها   |
| ۵۴ | ..... | ۲-۲           | ..... | طراحی الکترومغناطیسی  |
| ۵۴ | ..... | ۱-۲-۲         | ..... | الگوریتم طراحی  |
| ۵۵ | ..... | ۱-۱-۲-۲       | ..... | ابعاد هسته استاتور و روتور                                      |
| ۶۱ | ..... | ۲-۱-۲-۲       | ..... | مشخصات سیم پیچی استاتور و قفسه روتور                            |
| ۶۷ | ..... | ۳-۱-۲-۲       | ..... | محاسبه فاصله هوایی  |
| ۶۹ | ..... | ۴-۱-۲-۲       | ..... | محاسبه مدار معادل   |
| ۷۲ | ..... | ۵-۱-۲-۲       | ..... | محاسبه تلفات و راندمان  |
|    |       |               |       | فصل سوم   |
| ۷۵ | ..... |               | ..... | محاسبه یک موتور نمونه   |
| ۷۶ | ..... | ۱-۳           | ..... | طراحی موتور سه فاز ۳۰ وات، ۴۸ ولت با سرعت ۱۴۸۵ دور در دقیقه     |
| ۷۹ | ..... | ۲-۳           | ..... | دیاگرامها و نقشهها  |
| ۷۹ | ..... | ۱-۲-۳         | ..... | دیاگرام سیم بندی استاتور  |
| ۸۰ | ..... | ۲-۲-۳         | ..... | نقشه های مکانیکی استاتور  |
| ۸۱ | ..... | ۳-۲-۳         | ..... | نقشه های مکانیکی روتور  |
| ۸۲ | ..... | ۴-۲-۳         | ..... | نقشه های درب قالبها   |
| ۸۳ | ..... | ۵-۲-۳         | ..... | نقشه انفجاری مجموعه موتور القایی شار محوری با استاتور بدون هسته |
|    |       |               |       | فصل چهارم   |
| ۸۵ | ..... |               | ..... | آزمایشات و تعیین پارامترهای ماشین                               |
| ۸۶ | ..... | ۱-۴           | ..... | نتایج آزمایشات  |
| ۸۶ | ..... | ۱-۱-۴         | ..... | اندازه گیری مقاومت اهمی   |

|     |  |
|-----|--|
| ۸۶  | ..... اندازه‌گیری مقاومت عایقی                                   |
| ۸۸  | ..... آزمایش راه‌اندازی موتور                                    |
| ۸۹  | ..... تخمین پارامترهای مدار معادل                                |
| ۹۲  | ..... مقایسه پارامترهای مدار معادل حاصل از روش تحلیلی و آزمایشات |
| ۹۲  | ..... مشخصه‌های عملکردی ماشین                                    |
| ۹۳  | ..... مشخصه گشتاور - سرعت  |
| ۹۴  | ..... مشخصه توان - سرعت  |
| ۹۵  | ..... مشخصه جریان - سرعت   |
|     | فصل پنجم   |
| ۹۷  | ..... نتیجه‌گیری   |
| ۹۸  | ..... ۱-۵- مرور و نتیجه‌گیری                                     |
| ۹۹  | ..... ۲-۵- بررسی طرح و مزایا و معایب آن                          |
| ۹۹  | ..... ۳-۵- مقایسه با ماشین‌های ساخته شده مشابه                   |
| ۱۰۰ | ..... ۴-۵- پیشنهادات جهت بهینه‌سازی طرح ارائه شده                |
| ۱۰۱ | ..... پیوست‌ها   |
| ۱۰۲ | ..... پیوست ۱  |
| ۱۰۹ | ..... پیوست ۲  |
| ۱۱۲ | ..... پیوست ۳  |
| ۱۱۸ | ..... پیوست ۴  |
| ۱۱۹ | ..... پیوست ۵  |
| ۱۲۱ | ..... مراجع  |

## فهرست اشکال

| صفحه    | عنوان   |
|---------|---|
| ۳.....  | شکل ۱-۱- ساختمان موتور القایی .....                         |
| ۴.....  | شکل ۲-۱- هسته استاتور .....                                 |
| ۶.....  | شکل ۳-۱- روتور قفسه سنجابی .....                            |
| ۷.....  | شکل ۴-۱- روتور سیم‌پیچی شده .....                           |
| ۸.....  | شکل ۵-۱- سیم‌بندی سه فازه ماشین دو قطبی ساده .....          |
| ۹.....  | شکل ۶-۱- میدان دوار استاتور در یک دوره تناوب .....          |
| ۱۰..... | شکل ۷-۱- جهت جریان سیم پیچ‌های استاتور .....                |
| ۱۷..... | شکل ۸-۱- استاتورهای شارشعاعی و شار محوری .....              |
| ۱۸..... | شکل ۹-۱- روتور شار محوری .....                              |
| ۲۰..... | شکل ۱۰-۱- نمایش فوران در موتور دو وجهی و یک وجهی .....      |
| ۳۳..... | شکل ۱-۲- پیچک با سیم تخت .....                              |
| ۳۹..... | شکل ۲-۲- نمایش نشیمنگاه استاتور بین درب قالباق‌ها .....     |
| ۴۰..... | شکل ۳-۲- نحوه ایجاد شکاف در استاتور .....                   |
| ۴۱..... | شکل ۴-۲- استاتور سه فاز شار محوری با هسته هوا .....         |
| ۵۰..... | شکل ۵-۲- هسته روتور خورشیدی شار محوری .....                 |
| ۵۱..... | شکل ۶-۲- روتور بارها .....                                  |
| ۵۳..... | شکل ۷-۲- فلانچ .....  |
| ۶۹..... | شکل ۸-۲- مدار معادل ماشین القایی با استاتور بدون هسته ..... |
| ۷۸..... | شکل ۱-۳- مدار معادل موتور .....                             |
| ۷۹..... | شکل ۲-۳- موتور القایی شار محوری با استاتور بدون هسته .....  |
| ۸۰..... | شکل ۳-۳- دیاگرام سیم‌بندی .....                             |
| ۹۱..... | شکل ۱-۴- مدار معادل جهت شبیه‌سازی موتور ساخته شده .....     |

- شکل ۲-۴- منحنی ولتاژ و جریان ..... ۹۱
- شکل ۳-۴- منحنی گشتاور لغزش ..... ۹۳
- شکل ۴-۴- منحنی توان سرعت موتور ساخته شده ..... ۹۴
- شکل ۵-۴- منحنی مشخصه جریان سرعت موتور ساخته شده ..... ۹۵

## فهرست جداول

| صفحه | عنوان  |
|------|--|
| ۳۶   | جدول ۱-۲- اطلاعات فنی ورق ISOVAL 11                                  |
| ۳۷   | جدول ۲-۲- اطلاعات فنی ورق ISOVAL TM                                  |
| ۴۳   | جدول ۳-۲- مشخصات رزین DAMIVAL13522                                   |
| ۴۴   | جدول ۴-۲- دما و زمان پخت رزین ۱۵۱۸۲                                  |
| ۴۵   | جدول ۵-۲- مشخصات رزین DAMIVAL15182                                   |
| ۴۶   | جدول ۶-۲- مقادیر IP  |
| ۶۳   | جدول ۷-۲- نمونه جدول سیم‌بندی  |
| ۷۱   | جدول ۶-۲- جدول کلاس عایقی  |
| ۸۶   | جدول ۱-۴- نتایج اندازه‌گیری مقاومت اهمی                              |
| ۸۷   | جدول ۲-۴- نتایج مقاومت عایقی   |
| ۸۸   | جدول ۳-۴- مقاومت PT-100 در دماهای مختلف                              |
| ۸۹   | جدول ۴-۴- نتایج راه‌اندازی موتور نمونه                               |
| ۹۰   | جدول ۵-۴- پارامترهای مدار معادل حاصل از آزمایش                       |
| ۹۲   | جدول ۶-۴- مقایسه پارامترهای مدار معادل حاصل از روش تحلیلی و آزمایشات |

## علائم و اختصارات

|   |            |
|---|------------|
| فرکانس                                      | $f$        |
| فاصله هوایی کل در موتور شار محوری بدون هسته | $l_g$      |
| مقدار لقی یا تاقان                          | $\zeta$    |
| سرعت روتور بر حسب متر بر ثانیه              | $v$        |
| ضخامت هسته استاتور                          | $d_c$      |
| ضخامت سیم پیچ استاتور                       | $d_w$      |
| حداقل قطر داخلی استاتور                     | $d_{mi,i}$ |
| توان دریافتی                                | $S$        |
| بازده                                       | $\eta$     |
| دوره تناوب                                  | $T$        |
| تلفات هیستریزیس                             | $p_h$      |
| تلفات فوکو                                  | $p_f$      |
| تلفات آهنی                                  | $P_{fe}$   |
| تعداد فازهای ماشین                          | $m$        |
| اندیس پلاریزاسیون                           | $PI$       |
| تعداد شیار استاتور                          | $S_s$      |
| ضریب هیستریزیس                              | $k_h$      |
| ضریب فوکو                                   | $k_f$      |
| متوسط چگالی شار                             | $B_{avg}$  |
| حداکثر چگالی شار در فاصله هوایی             | $B_{mg}$   |

|                                |                  |
|--------------------------------|------------------|
| فوران                          | $\varphi$        |
| زاویه الکتریکی شیار            | $\gamma$         |
| تعداد کل پیچک‌های موتور        | $n_{coil}$       |
| تعداد دور هر فاز               | $N_{ph}$         |
| تعداد دور هر پیچک              | $N_{coil}$       |
| شار تولیدی هر قطب              | $\varphi_{pole}$ |
| سطح مقطع شار عبوری هر قطب      | $A_{pole}$       |
| تعداد قطب‌های ماشین            | $P$              |
| قطر داخلی استاتور              | $D_i$            |
| قطر خارجی استاتور              | $D_o$            |
| مقاومت مخصوص الکتریکی          | $\rho$           |
| طول فاصله هوایی                | $g$              |
| سطح مقطع هادی استاتور          | $a_s$            |
| نسبت قطر داخلی به قطر خارجی    | $k_d$            |
| تعداد روتور بارها              | $n_b$            |
| مقاومت هر فاز استاتور          | $R_1$            |
| مقاومت هر فاز روتور            | $R_2'$           |
| بارگذاری الکتریکی ویژه استاتور | $AC$             |
| سطح مقطع روتور بار             | $a_b$            |
| سطح مقطع رینگ‌های روتور        | $a_e$            |
| فرکانس استاتور                 | $f_s$            |
| فرکانس روتور                   | $f_r$            |

|                              |         |
|------------------------------|---------|
| ضریب توزیع سیم پیچی استاتور  | $k_d$   |
| ضریب گام کلاف                | $k_e$   |
| ضریب سیم پیچی                | $k_w$   |
| چگالی جریان استاتور          | $j_s$   |
| راکتانس نشتی هر فاز استاتور  | $X_1$   |
| راکتانس نشتی هر فاز روتور    | $X_2'$  |
| راکتانس مغناطیس کنندگی       | $X_m$   |
| ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی هوا | $\mu_0$ |



# فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱- موتورهای الکتریکی القایی

موتور القایی نوعی از موتور جریان متناوب موتور AC آسنکرون (غیرهمزمان) است که توان مورد نیاز در قسمت متحرک آن از طریق القای الکترومغناطیسی تامین می‌شود. موتورهای القایی AC پرکاربردترین موتورهایی هستند که در سامانه‌های کنترل حرکت صنعتی و همچنین خانگی بکار گرفته می‌شوند.

طراحی ساده و پایدار، بهای ارزان، هزینه نگهداری پایین و اتصال آسان و کامل به یک منبع انرژی AC برتری‌های بنیادی موتورهای القایی AC هستند.

انواع گوناگونی از موتورهای القایی AC در بازار موجود می‌باشد.

موتورهای گوناگون برای کارهای گوناگونی شایسته‌اند. با اینکه ساختمان موتورهای القایی سه فاز به مراتب ساده‌تر از موتورهای DC است، ولی مکانیزم عملکرد، کنترل سرعت و گشتاور در این نوع موتورها نیازمند درک عمیق‌تری از مفاهیم الکتریسیته و مغناطیس می‌باشد.

اولین موتور القایی در سال ۱۸۸۲ توسط نیکولا تسلا در فرانسه اختراع شد، اما در سال ۱۸۸۸ و پس از نقل مکان تسلا به ایالات متحده به طور رسمی ثبت گردید. پیشرفت‌های تکنیکی در زمینه تولید این موتورها تا جایی ادامه یافت که در سال ۱۹۷۶ موتوری القایی با قدرت خروجی ۱۰۰ اسب بخار با حجمی برابر با حجم موتور ۷/۵ اسب بخاری سال ۱۸۹۷ ساخته شد.

یک موتور الکتریکی در روتور خود انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. برای تامین توان مورد نیاز روتور راه‌های مختلفی وجود دارد. در یک موتور DC توان آرمیچر مستقیماً بوسیله یک منبع جریان مستقیم تامین می‌شود، در حالی که در یک موتور القایی این توان توسط استاتور و از طریق فاصله هوایی در روتور القا می‌شود. موتورهای القایی را به علت شباهت بسیار زیاد به ترانسفورماتور،

ترانسفورماتور دوار نیز می‌نامند، زیرا استاتور این موتورها از نظر عملکرد به سیم‌پیچ اولیه و روتور آنها به سیم‌پیچ ثانویه ترانس شباهت زیادی دارد.

به منظور القای جریان در روتور، اختلاف سرعتی بین میدان دوار و سرعت گردش روتور بوجود می‌آید. در غیر این صورت میدان دوار نسبت به روتور، امکان حرکت نخواهد داشت و هادی‌های روتور میدان تولید شده توسط استاتور را قطع نکرده و در نتیجه ولتاژی در روتور القا نخواهد شد.

این اختلاف سرعت بین سرعت میدان دوار و سرعت حرکت روتور در اصطلاح لغزش نامیده می‌شود. لغزش یک مؤلفه بدون واحد است. از آنجا که در موتورهای القایی اختلاف سرعت شرط و ضرورت عملکرد آنهاست به این موتورها، موتورهای غیرهمزمان یا آسنکرون می‌گویند.

از موتورهای القایی به ویژه موتورهای القایی سه فاز بطور گسترده‌ای در صنعت استفاده می‌شود.

### ۱-۱-۱- اجزای تشکیل‌دهنده یک موتور القایی

به طور کلی هر ماشین القایی (موتور یا مولد القایی) از سه بخش استاتور، روتور و درب قالب‌ها تشکیل شده است. شکل ۱-۱ ساختمان ماشین القایی نشان داده شده است.



شکل ۱-۱- ساختمان موتور القایی

الف) استاتور

استاتور ماشین القایی، شامل بدنه، هسته مغناطیسی، سیم پیچ‌ها و یاتاقان‌ها می‌باشد.

هسته استاتور، مجموعه‌ای از ورق‌های فولادی است، که دارای شیار در سطح داخلی آن مطابق شکل ۱-۲ می‌باشد که پس از قرار گرفتن در کنار هم تشکیل یک حجم استوانه‌ای توخالی را می‌دهد.



شکل ۱-۲- هسته استاتور

سیم پیچ‌های سه فاز ماشین القایی در داخل همین شیارها قرار می‌گیرند.

در ماشین‌های القایی به دلیل تلفات هیستریزیس، جنس هسته باید از فولاد الکتریکی با پسماند کم انتخاب شود تا تلفات هیستریزیس ماشین به حداقل ممکن برسد. همچنین برای کاهش تلفات فوکو نیز از مورق کردن هسته بهره می‌گیرند.

ابعاد هسته استاتور بگونه‌ای است که به راحتی در بدنه فولادی، چدنی یا آلومینیومی استاتور محکم می‌شود.

این بدنه به صورت پره‌دار ساخته شده تا برای تهویه بهتر، سطح تماس بیشتری با هوای محیط خود (سطح بیرونی) داشته باشد.

بدنه، پوشش نهایی ماشین القایی می‌باشد که هسته و سیم‌پیچ‌ها را در خود جای داده است و ضمن محافظت ماشین در برابر ورود اجسام خارجی امکان نصب ماشین را فراهم می‌کند.

همچنین جعبه ترمینال ماشین برای اتصال ولتاژ ورودی به سیم‌پیچ‌ها روی بدنه قرار می‌گیرد.

بعلاوه دو درپوش و یاتاقان‌های طرفین ماشین به گونه‌ای طراحی می‌شوند که قسمت متحرک ماشین (روتور) به راحتی در داخل استاتور بچرخند و تکیه‌گاه مکانیکی مناسبی برای روتور فراهم شود. این بخش در ساختار الکتریکی ماشین نقشی ندارد و جزو تجهیزات مکانیکی ماشین به حساب می‌آید.

در موتورهای سنگین که جابجایی آن برای افراد میسر نیست، یک قلاب در بالای بدنه ماشین پیش‌بینی می‌شود که بتوان با جرثقیل آن را جابجا نمود.

در عمل سیم‌پیچ‌های سه فاز استاتور ماشین القایی احتیاج به حداقل ۶ شیار دارند. سیم‌پیچ‌ها به گونه‌ای جاسازی می‌شوند که هر سیم‌پیچ با دیگری ۱۲۰ درجه اختلاف فاز مکانی داشته باشد.

در ماشین‌های القایی صنعتی شیپارهای استاتور بیشتر از این تعداد می‌باشند.

ب) روتور

روتور که قسمت چرخنده موتور می‌باشد، شامل سه دسته سیم‌پیچی و یا یک قفسه از هادی‌های مسی و یا آلومینیومی تشکیل شده است. نیروی وارده از طریق القای گشتاور الکترومغناطیسی در فاصله هوایی به روتور اعمال می‌شود.

شفت، هسته و فن‌های خنک‌کننده از جمله متعلقات روتور می‌باشند.

روتور ماشین‌های القایی بر دو نوع است: روتور قفسی و روتور سیم‌پیچی شده

هسته هر دو نوع روتور از ورق‌های مغناطیسی دایره‌ای شکلی تشکیل شده‌اند که از مرکز آن محور فولادی روتور(شفت) عبور کرده است. محور فولادی روتور بایستی از نظر مکانیکی از استحکام کافی برخوردار بوده، ولی از نظر خاصیت مغناطیسی ضعیف باشد.

برای ساختن روتور قفسی ابتدا ورق‌های هسته را کنار یکدیگر قرار می‌دهند تا هسته یکپارچه روتور تشکیل شود. سپس آلومینیوم مذاب و یا گاهی مس ذوب شده را به داخل شیارهای هسته روتور جاری کرده، پس از سرد شدن به شکل مفتول‌هایی درمی‌آیند که در داخل هسته قالب‌گیری شده‌اند. لذا این هادی‌ها نسبت به هسته عایق نیستند.

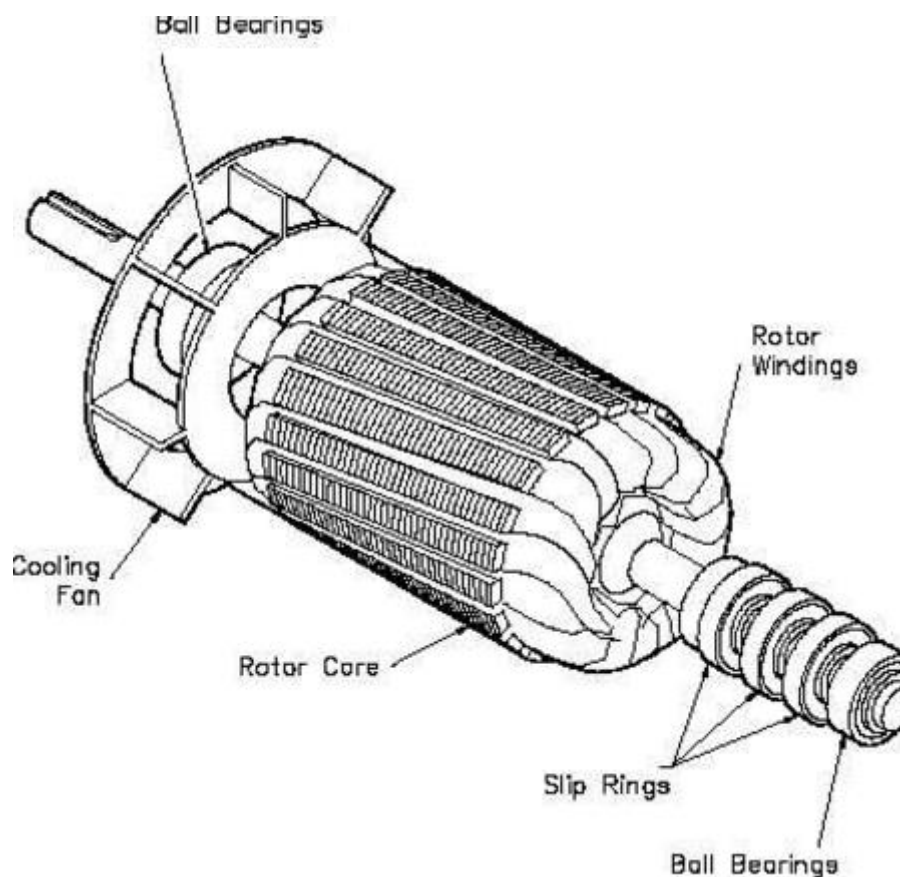
سپس سر و ته مفتول‌ها را با دو حلقه اتصال کوتاه متصل می‌کنند.

ماشین‌های القایی که ساختمان روتور آنها اینگونه است را قفس سنجابی نیز می‌گویند.



شکل ۱-۳- روتور قفسه سنجابی

در روتورهای سیم‌پیچی، سه دسته سیم پیچ با اختلاف مکانی ۱۲۰ درجه مانند استاتور ماشین القایی سه فاز با همان تعداد قطب پیچیده می‌شوند. این سیم‌پیچ‌ها نسبت به بدنه روتور عایق شده‌اند. نمایی از این نوع روتور در شکل ۴-۱ دیده می‌شود.



شکل ۴-۱- روتور سیم پیچی شده

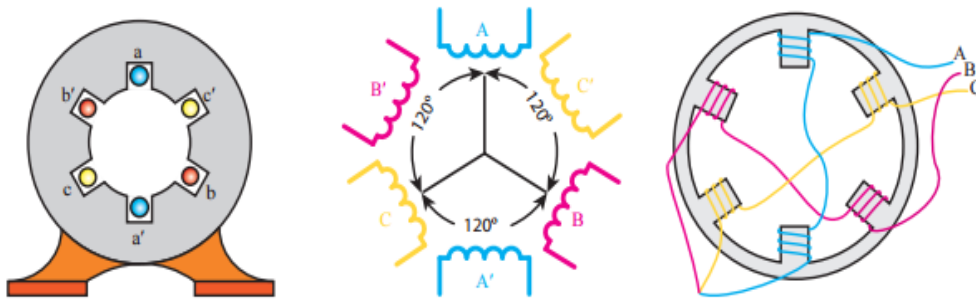
### ۱-۱-۲- اساس کار موتورهای القایی

اساس کار موتورهای القایی مانند یک ترانسفورماتور سه فاز است. در واقع هر دو از اثر القای نیروی محرکه در سیم‌پیچ طرف دیگر استفاده می‌کنند. به همین جهت به این موتورها، موتورهای القایی گفته می‌شود.

البته در ساختار موتور القایی بین سیم‌پیچ استاتور و روتور علاوه بر هسته مغناطیسی، فاصله هوایی نیز وجود دارد و از آنجا که در قدرت‌های یکسان، نیروی محرکه مغناطیسی بیشتری جهت غلبه بر تلفات مکانیکی روتور و مقاومت مغناطیسی ناشی از فاصله هوایی بین استاتور و روتور مورد نیاز است، بنابراین در قدرت یکسان جریان بی‌باری موتورهای القایی نسبت به ترانسفورماتورها بیشتر می‌باشد.

در این بخش پس از معرفی ساختار ماشین القایی سه فاز، ثابت می‌شود که چگونگی ایجاد میدان دوار با عبور جریان سه فاز از سه سیم‌پیچ استاتور در ماشین القایی بررسی می‌شود، بطوری که این میدان پیرامون هسته استاتور گردش نموده و بدین ترتیب شرایط لازم برای چرخش روتور را فراهم کند.

شکل ۱-۵ سیم‌بندی سه فاز ماشین القایی دو قطبی ساده را نشان می‌دهد.



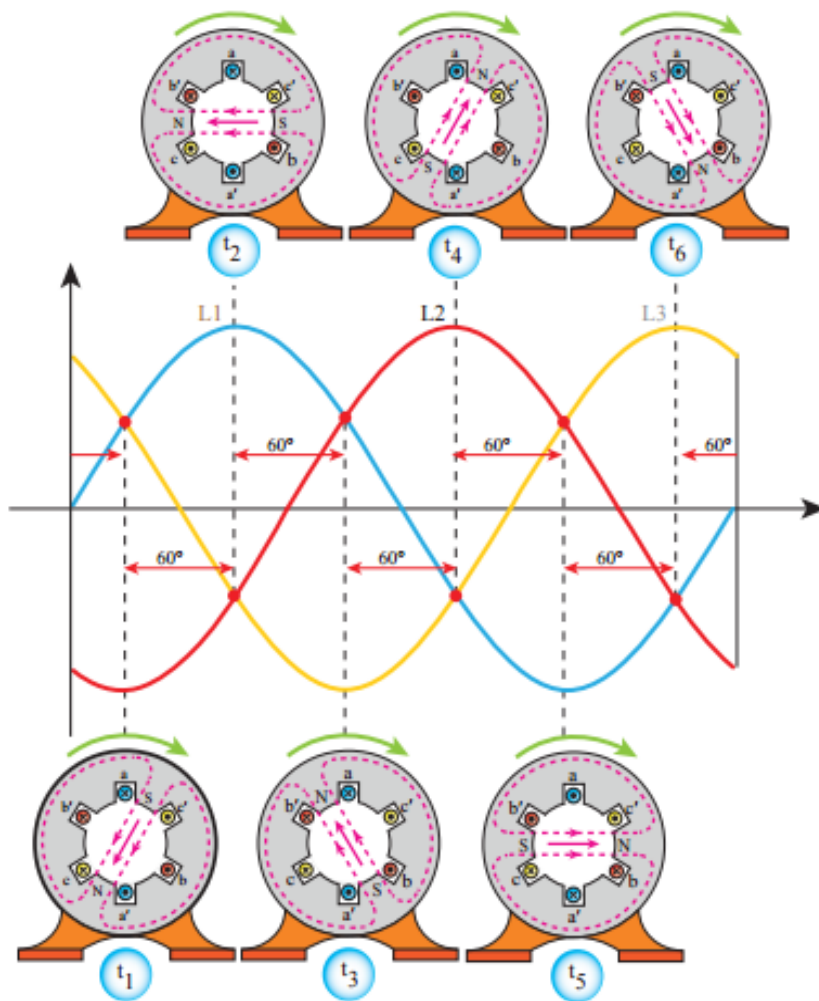
شکل ۱-۵- سیم بندی سه فاز ماشین دو قطبی ساده

با توجه به شکل بالا سیم‌پیچ‌های سه فاز  $a, b, c$  در بدنه استاتور، با اختلاف  $120^\circ$  درجه مکانی نسبت به یکدیگر جاسازی شده‌اند. در این ماشین بازوی برگشت سیم‌پیچ‌های هر فاز استاتور، ماشین را به دو نیمه تبدیل نموده است، یعنی بازوی رفت سیم پیچ  $a$  با بازوی برگشت آن یعنی  $a'$ ،  $180^\circ$  درجه اختلاف مکانی دارد، بنابراین در این ماشین القایی میدان دو قطبی ایجاد می‌شود.

برای شروع انتهای سیم‌پیچ‌های سه فاز استاتور را با اتصال ستاره به هم متصل کرده و ابتدای آنها را به منبع ولتاژ سه فاز با ولتاژ مناسب، وصل می‌کنند.



بلافاصله پس از اتصال برق سه فاز به سیم پیچ‌های استاتور، جریان الکتریکی در آن جاری می‌شود و سپس در هادی‌های هر سیم پیچ متناسب با جهت جریان عبوری از آن میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. برای تحلیل آسان‌تر میدان دوار، اندازه و جهت جریان‌های سه فازه شکل ۶-۱ در زمانهای  $t_1$  تا  $t_6$  در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه فاصله هر یک از نمونه‌های زمانی  $60^\circ$  درجه از یکدیگر می‌باشد. بنابراین با تحلیل این ۶ نقطه می‌توان گردش کامل میدان دوار را در مسیر دایره‌ای بررسی نمود.



شکل ۶-۱- میدان دوار استاتور در یک دوره تناوب

شکل ۷-۱ تحلیل جهت جریان هریک از سیم‌پیچ‌ها را در یک دوره تناوب موج سه فاز نشان می‌دهد. جهت جریان هادی‌های هر شیار و وضعیت میدان‌های مغناطیسی استاتور در هر یک از زمان‌های  $t_1$

تا  $t_6$  به کمک شکل ۷-۱ بدست می‌آید. از آنجا که شیارهای استاتور، هادی‌های هر فاز را در خود جای داده‌اند و جهت جریان هادی‌های هر شیار در هر لحظه با توجه به فرض فوق قابل علامتگذاری هستند. لذا می‌توان شکل ۷-۱ را کامل نمود. بنابراین با توجه به میدان مغناطیسی اطراف هادی‌های هم‌جوار، جهت میدان مغناطیسی ایجاد شده در هر لحظه به دست می‌آید.

|       | علامت جریان هر فاز |       |       | جهت جریان در مقاطع سیم پیچ |    |   |    |   |    |  |
|-------|--------------------|-------|-------|----------------------------|----|---|----|---|----|--|
|       | $I_a$              | $I_b$ | $I_c$ | a                          | c' | b | a' | c | b' |  |
| $t_1$ | +                  | -     | +     | ⊗                          | ⊙  | ⊗ | ⊙  | ⊗ | ⊗  |  |
| $t_2$ | +                  | -     | -     | ⊗                          | ⊗  | ⊗ | ⊙  | ⊙ | ⊗  |  |
| $t_3$ | +                  | +     | -     | ⊗                          | ⊗  | ⊗ | ⊙  | ⊙ | ⊗  |  |
| $t_4$ | -                  | +     | -     | ⊙                          | ⊗  | ⊗ | ⊗  | ⊙ | ⊗  |  |
| $t_5$ | -                  | +     | +     | ⊙                          | ⊙  | ⊗ | ⊗  | ⊗ | ⊗  |  |
| $t_6$ | -                  | -     | +     | ⊙                          | ⊙  | ⊗ | ⊗  | ⊗ | ⊗  |  |

شکل ۷-۱- جهت جریان سیم پیچهای استاتور

با در نظر گرفتن جهت میدان مغناطیسی ایجاد شده از زمان  $t_1$  تا  $t_6$  می توان نتیجه گرفت که میدان مغناطیسی در هسته استاتور می چرخد. این میدان در حال گردش را میدان دوار می گویند.

### ۱-۱-۳- عوامل مؤثر در سرعت میدان دوار

سرعت میدان دوار ماشین القایی را با  $n_s$  نمایش می دهند و آن را سرعت سنکرون می نامند.

یکی از کمیت های شبکه برق متناوب، فرکانس  $f$  است که با دوره تناوب  $T$  نسبت عکس دارد. هر چه دوره تناوب سرعت چرخشی میدان در زمان کوتاه تری تکرار گردد مسلماً سرعت میدان دوار نیز بیشتر خواهد شد و بالعکس با افزایش زمان دوره تناوب سرعت میدان دوار کندتر می شود.

پس می توان نتیجه گرفت یکی از عوامل مؤثر بر سرعت میدان دوار، فرکانس شبکه برق می باشد ولی از آنجا که فرکانس متناسب با عکس زمان تناوب است، بنابراین با کاهش فرکانس، سرعت چرخش میدان دوار، کم می شود و با افزایش فرکانس، سرعت چرخش میدان دوار زیاد می شود.

از آنجا که جریان عبوری از سیم پیچ ها در یک دوره تناوب فقط یکبار تغییر جهت می دهند، می توان نتیجه گرفت که قطب های  $S$  و  $N$  میدان دوار در این مدت فقط یکبار عوض می شود. بنابراین در یک ماشین دو قطبی که قطب ها  $360^\circ$  درجه محیط استاتور را اشغال کرده اند، در یک دوره تناوب، میدان دوار یک دور محیط استاتور را طی می کند، در حالی که در یک ماشین چهارقطبی که هر دو قطب آن  $180^\circ$  درجه محیط استاتور را اشغال کرده است در یک دوره تناوب، میدان دوار تنها نیم دور محیط استاتور را طی می کند.

پس می توان نتیجه گرفت، افزایش تعداد قطب های استاتور باعث کم شدن سرعت میدان دوار می شود. بنابراین عامل دیگر تعیین کننده سرعت میدان دوار، تعداد قطب های سیم بندی ماشین القایی می باشد.

رابطه سرعت میدان دوار با در نظر گرفتن هر دو عامل فرکانس و تعداد قطب‌های سیم‌پیچی به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$n_s = 120f/p$$

(۱-۱)

### ۱-۱-۴- سیم‌پیچی موتورهای القایی سه فاز

سیم‌پیچی موتورهای الکتریکی جریان متناوب، به صورت‌های مختلف امکان‌پذیر می‌باشد. بطوری که می‌توان این موتورها را با کلاف‌های یک اندازه و یا در اندازه‌های مختلف و به صورت یک طبقه یا دو طبقه سیم‌پیچی نمود.

#### ۱-۱-۴-۱- سیم‌پیچی یک طبقه

در سیم‌پیچی یک طبقه در هر شیار تنها یک بازوی کلاف قرار گرفته و معمولاً گام سیم‌بندی برابر با گام قطبی در نظر گرفته می‌شود.

در اجرای این سیم‌پیچی با توجه به اینکه فاز دوم و سوم روی فاز اول قرار می‌گیرند، طول بیشتری داشته و بالتبع مقاومت و اندوکتانس بالاتری نیز خواهند داشت. همچنین حضور هارمونیک‌های فرد ناشی از گام کامل باعث ایجاد تلفات اضافی در ماشین می‌شوند.

#### ۱-۱-۴-۲- سیم‌پیچی دو طبقه

با توجه به اشکالات سیم‌پیچی یک طبقه، معمولاً در موتورهای سه فاز از سیم‌پیچی دو طبقه استفاده می‌شود. در سیم‌پیچی دو طبقه در هر شیار دو بازوی کلاف قرار می‌گیرد. چنانچه گام سیم‌پیچی، کامل باشد در این صورت دو بازوی واقع در یک شیار استاتور مربوط به یک فاز خواهد بود و چنانچه گام سیم‌پیچی کوتاه‌تر از گام کامل باشد، در هر شیار استاتور دو بازو از دو فاز جداگانه قرار می‌گیرد.

از ویژگی‌های سیم‌بندی دو طبقه موتورهای سه فاز می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱- تعداد کلاف‌ها در سیم‌بندی دو طبقه دو برابر تعداد کلاف‌ها در سیم‌بندی یک طبقه می‌باشد اما تعداد حلقه‌های هر کلاف، نصف تعداد حلقه‌های هر کلاف در سیم‌بندی یک طبقه می‌باشد.
  - ۲- تعداد گروه کلاف‌ها در سیم‌بندی دو طبقه، سه برابر تعداد قطب‌ها می‌باشد.
  - ۳- در سیم‌پیچی دو طبقه (شیار کامل) می‌توان کلاف‌های سیم‌پیچی را به تعداد جفت قطب‌ها با یکدیگر موازی نمود. این امر باعث می‌شود در موتورهای پر قدرت که به سیم‌هایی با مقطع بزرگ نیاز است و این سیم‌ها در دسترس نمی‌باشند، بتوان سطح مقاطع مورد نظر را ساخت و همچنین فرم دادن کلاف‌هایی که دارای سیم‌های با مقطع کم می‌باشند، راحت‌تر است.
  - ۴- در سیم‌پیچی دو طبقه، کلاف‌های موتور در داخل شیارها به گونه‌ای جا زده می‌شوند که یک بازوی کلاف در زیر یا در کف شیار و بازوی دیگر در بالای شیار دیگر قرار می‌گیرد.
- به این ترتیب سیم‌پیچی دو طبقه بهتر از سیم‌پیچی یک طبقه به وسیله فن نصب شده بر روی روتور خنک شده، توان موتور افزایش می‌یابد.

#### ۱-۴-۳- سیم‌بندی گام کسری

سیم‌بندی دو طبقه در بیشتر موتورها به صورت گام کسری (کوتاه شده) اجرا می‌شود. استفاده از سیم‌بندی با گام کسری مزیت‌هایی به دنبال خواهد داشت که برخی از آنها در زیر آورده می‌شود:

- ۱- کوتاه شدن گام سیم‌بندی، پیشانی کلاف‌ها کوتاه‌تر شده در مصرف سیم صرفه‌جویی می‌شود.

مقدار کوتاهی گام به محاسبات حذف هارمونیک‌ها بستگی دارد.

- ۲- با کسری کردن گام، مؤلفه‌های فرکانس بالای ولتاژ که به هارمونیک‌ها معروفند، تضعیف می‌شوند. شار در صورتی در فاصله هوایی بین روتور و استاتور توزیعی سینوسی خواهد داشت که تعداد زیادی

شیار در محیط استاتور وجود داشته باشد و در ضمن سیم‌پیچ‌های موتور به صورت سینوسی در این شیارها توزیع شوند، اما از آنجا که این امر به سختی امکان‌پذیر می‌باشد، شار و در نتیجه ولتاژ القا شده از فرم سینوسی خارج خواهد شد.

چنانچه شکل موج ولتاژ را تجزیه کنیم، علاوه بر مؤلفه‌های اصلی و سینوسی ولتاژ، مؤلفه‌های دیگری نیز ظاهر خواهد شد که دارای فرکانسی چندین برابر فرکانس مؤلفه اصلی ولتاژ می‌باشند.

این مؤلفه‌ها، هارمونیک‌های ولتاژ نامیده می‌شود.

استفاده از سیم‌پیچی با گام کسری، راه‌حل تضعیف هارمونیک‌ها و کاهش تلفات در یک موتور سه فاز می‌باشد و به این ترتیب در موتورهایی که از سیم‌بندی دو طبقه با گام کسری بهره می‌گیرند، قدرت تقریباً ۱۰ درصد از موتورهای با سیم‌پیچی یک طبقه بیشتر است.

در سیم‌بندی دو طبقه و در بین هر دو قطب، در برخی از شیارها، جهت جریان لحظه‌ای بازوهای واقع در هر شیار برعکس یکدیگر می‌باشد. این موضوع باعث می‌شود، جریان بی‌باری موتور افزایش یابد که برای رفع آن باید تعداد دور سیم‌پیچی را افزایش داد. به این شیارها، شیارهای خنثی گفته می‌شود. تعداد شیارهای خنثی به مقدار گوتاهی گام بستگی دارد.

### ۱-۱-۵- مزایا و معایب موتورهای القایی

این موتورها با توجه به اینکه ساختمان نسبتاً ساده‌ای دارند، ارزان قیمت بوده و نیاز به تعمیرات دوره‌ای و نگهداری خاصی ندارند. همچنین فاکتور خود راه‌اندازی آنان به دیگر ویژگی‌های این موتور افزوده و با ساختمان محکمی که دارند آنها را در اولویت کاربرد در صنایع قرار داده است.

اما مواردی از قبیل جریان راه‌اندازی بالا در موتورهای روتور قفسی و نداشتن سرعت ثابت در بارهای مختلف و همچنین ضریب قدرت پایین جزو معایب آن بشمار می‌آید.

## ۱-۲- ماشین‌های شار محوری

برای ماشین‌های شار شعاعی، ابعاد اصلی قطر استاتور و طول هسته می‌باشد، در حالی که در ماشین‌های شار محوری قطر داخلی و قطر خارجی استاتور اصلی‌ترین ابعاد به حساب می‌آید [۱].

ماشین‌های شار محوری، قبل از ماشین‌های معمولی طراحی شدند و حتی در ماشین‌های با سرعت کم نیز از ماشین‌های شارمحوری استقبال بیشتری گردیده است. ولی دلیل اصلی برای فراموش کردن ماشین‌های شار محوری مشکلات تولید هسته‌های مغناطیسی بخصوص هسته استاتور بود.

علاوه بر این ساخت روتور آن نیز به قدری ضعیف صورت می‌گرفت که تحمل سرعت چرخشی بالا را نداشت. البته روش‌های متفاوت ساخت بزودی بر این مشکل غلبه کرد و استفاده از مواد جدید و همچنین استفاده از یاتاقان‌های مناسب ضعف‌های ماشین شار محوری را پوشش داد.

طول محوری کوتاه این ماشین در کاربردهایی که طول کوتاه ماشین مد نظر است یک مزیت ویژه محسوب می‌گردد.

## ۱-۲-۱- ساختار پایه ماشین‌های شار محوری

ماشین‌های شار محوری با ماشین‌های رایج شار شعاعی متفاوت هستند. در ماشین‌های شار شعاعی شار فاصله هوایی بصورت شعاعی هستند در حالیکه در ماشین‌های شار محوری، هادی‌های مؤثر، شعاعی قرار گرفته‌اند و روتور و استاتور بصورت دیسکی ساخته شده‌اند.

در موتورهای شار شعاعی مهم‌ترین ابعاد، قطر، فاصله هوایی و طول مغناطیسی فعال است. اما در موتورهای شار محوری مهم‌ترین ابعاد قطر داخلی و قطر خارجی استاتور می‌باشد.

ساختمان موتور القایی شار محوری همانند موتورهای القایی شار شعاعی از قسمت‌های زیر تشکیل شده است: استاتور، روتور و درب قالباق‌ها

الف) استاتور: در موتورهای القایی شار محوری هسته استاتور از ورق‌های فولاد سیلیس‌دار با ضخامت ۰/۵ میلیمتر و یا در موارد خاص با ضخامت کمتر در کنار هم چیده شده تا به طول مورد نظر برسند. این ورق‌ها در محل شیارها با توجه به مقادیر بدست آمده در طراحی الکترومغناطیسی به اندازه و تعداد مشخص برش داده می‌شوند.

هسته استاتور دو وظیفه مهم را بر عهده دارد:

(\*) مکانی برای استقرار سیم‌پیچ‌های استاتور و جلوگیری از لرزش یا بهم‌ریختگی هادی‌ها در هنگام اعمال نیروی الکترومغناطیسی و همچنین ایجاد جسمی صلب برای اتصال درب قالب‌ها در محور ماشین (\*\*\*) ایجاد مسیری مناسب برای عبور شار مغناطیسی با مقاومت مغناطیسی پایین

با وجود وظایف مهمی که هسته استاتور آنها را بخوبی انجام می‌دهد، وجود هسته آهنی حتی بصورت مورق و با ضریب نفوذپذیری مغناطیسی بالا عیب عمده‌ای در ماشین القایی ایجاد می‌کند. تلفات آهنی که در موتور شامل تلفات هیستریزیس و تلفات فوکو می‌باشد تنها و تنها بخاطر حضور هسته آهنی مخصوصا در استاتور می‌باشد.

تلفات هیستریزیس با توان اول فرکانس و تلفات فوکو با مجذور فرکانس رابطه مستقیم دارد.

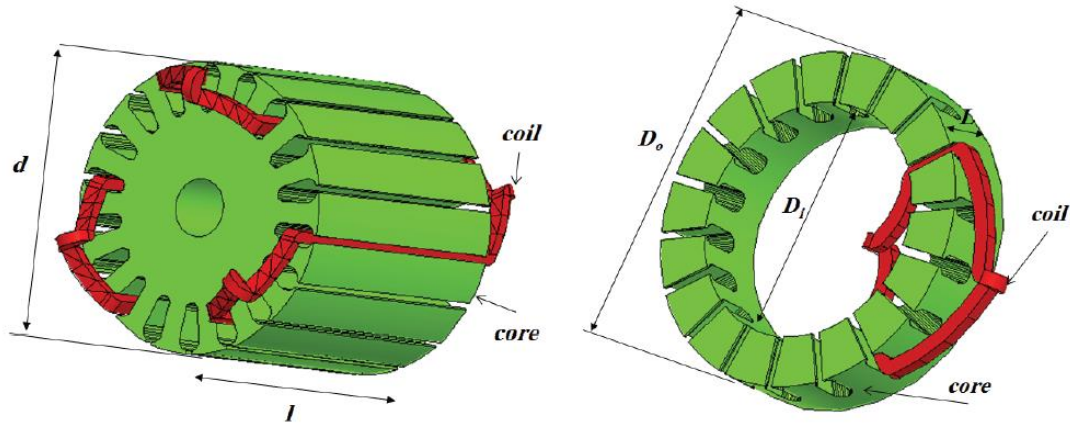
$$P_h = K_h * B_{max}^n * f \quad n = 1.5 \sim 2.5 \quad (2-1)$$

$$P_F = K_F * B_{max}^2 * f^2 \quad (3-1)$$

$$P_{fe} = P_h + P_F \quad (4-1)$$

شکل ۱-۸ استاتورهای شار شعاعی و شار محوری را با هم مقایسه نموده است.





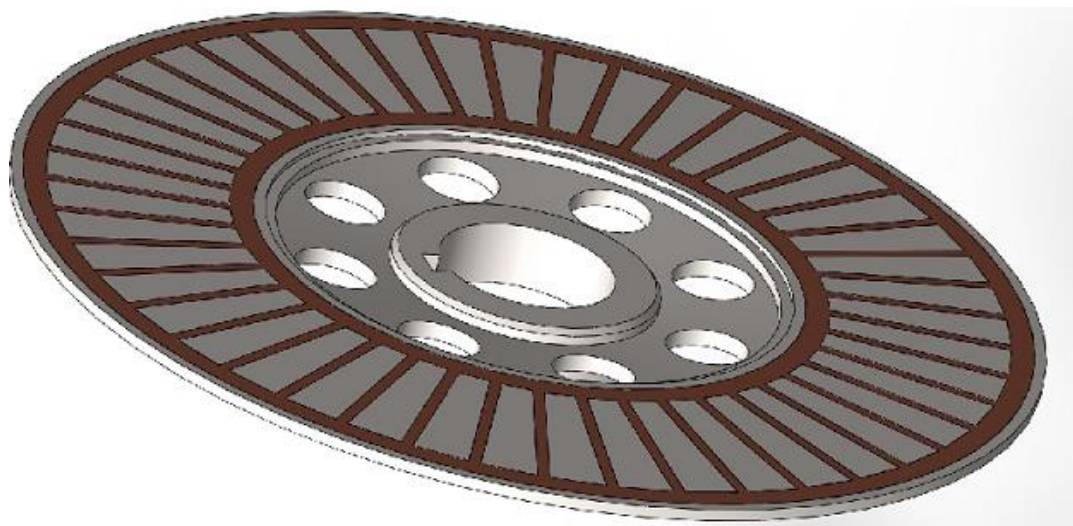
شکل ۱-۸- استاتورهای شارشعاعی و شار محوری [۲]

ب) روتور: بزرگترین مشکل ماشین‌های شار محوری ثابت نگه داشتن فاصله هوایی ماشین در حین کارکرد در سرعت‌های مختلف و بارهای متفاوت می‌باشد.

در اینگونه ماشین‌ها با توجه به اینکه تنها نقطه تکیه‌گاه و نگهدارنده روتور در مرکز آن بوده و خلاف موتورهای شار شعاعی که یاتاقان روتور را در مرکز نگه می‌دارند، تنها می‌بایست یک یاتاقان وظیفه هم‌محور نگه داشتن روتور با استاتور و تنظیم فاصله هوایی را ایفا نماید. بدین جهت می‌بایست تا حد امکان سطح تماس روتور با فلانچ و یاتاقان افزایش یابد تا با افزایش تکیه‌گاه خطای لنگ شدن و غیر یکنواختی فاصله هوایی کاهش یابد.

از طرفی هرگونه افزایش وزن روتور و متعلقات اعم از قفسه روتور، هسته روتور، رابط و شافت باعث ایجاد بار مضاعف و افزایش تلفات می‌گردد.

استفاده از هسته آهنی با چگالی ماده یکنواخت در تمام نقاط، بالانس روتور و متعلقات، استفاده از شافت با چگالی همسان و عدم لنگی دیسک روتور، همگی از مهمترین مواردی هستند که می‌بایست در فرایند انتخاب قطعات و پروسه ساخت روتور به آنها دقت کرد.



شکل ۱-۹- روتور شار محوری

ج) درب قالباق‌ها: وظیفه هم‌محور نگه داشتن روتورها و استاتور به عهده درب قالباق‌ها می‌باشد. علاوه بر این‌ها محافظت از سیم‌پیچی استاتور و روتور، ایجاد حفاظت و تعبیه پایه فنداسیون جهت نصب و بهره‌برداری موتور به عهده درب قالباق‌هاست.

جنس درب قالباق‌ها از لحاظ سختی و چگالی مواد بایستی به نحوی باشد که ارتعاشات ناشی از چرخش موتور را تحمل کرده، همچنین با تبادل حرارتی مناسب بین داخل موتور و بیرون، تهویه مناسبی ایجاد نماید. در صورتی که درجه حفاظت موتور اجازه دهد، پیش‌بینی چندین دریچه ورود و خروج هوا روش ساده و مناسبی برای تهویه هوا می‌باشد.

یاتاقان‌های موتور می‌تواند از نوع لغزشی و یا چرخشی باشند، که بنا به وزن روتور و سرعت چرخش روتور انتخاب می‌گردند.

با توجه به اینکه پیش‌بینی سرعت موتورهای شار محوری بعضاً در سرعت‌های خیلی بالا می‌باشد، لقی بین محفظه‌های بیرینگ‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

همانطور که ملاحظه گردید در موتورهای القایی معمولی (شار شعاعی) تمامی قطعات استاتور و روتور هم‌مرکز بوده و شار ایجاد شده به صورت شعاعی مسیر روتور و استاتور را طی کرده تا گشتاور

الکترومغناطیسی ایجاد نماید، لیکن در موتورهای القایی شار محوری استاتور و روتور هم محور بوده شار مغناطیسی در امتداد محور ایجاد می‌گردد.

### ۱-۲-۲- انواع ساختار ماشین شار محوری

انعطاف‌پذیری در ساختار ماشین شار محوری باعث می‌شود که این قابلیت را داشته باشند که برای کاربردی خاص طراحی شده و پاسخگوی نیازهای مختلف باشد. ساختار دیسکی مانند استاتور و روتور میدان مغناطیسی بصورت غیریکنواخت را بین حجم موتور توزیع می‌کند که به این خاطر جهت تحلیل به محاسبات سه بعدی میدان مغناطیسی نیاز است [۳].

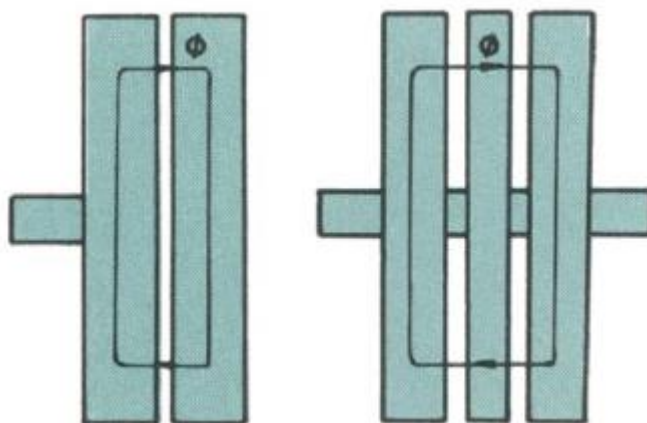
ساختار موتورهای القایی شار محوری را می‌توان در قالب‌های زیر بررسی کرد.

#### ۱) ساختار استاتور و روتور

الف) موتور با یک فاصله هوایی؛ این ساده‌ترین و قدیمی‌ترین ساختار موتور شار محوری بوده و به موتورهای یک‌وجهی معروف هستند. این گزینه برای ماشین‌های با گشتاور کم مناسب می‌باشد.

طول عمر این موتور طولانی بوده و به بارگذاری مکانیکی بستگی زیادی دارد [۴].

ب) موتور با دو فاصله هوایی؛ این موتورها با داشتن دو فاصله هوایی، دارای چگالی گشتاور بالا و نیروهای مغناطیسی متعادل، ماشین‌های ارزشمندی هستند.



شکل ۱-۱-۱- نمایش فوران در موتور دووجهی و یکوجهی [۵]

فاصله هوایی بیان شده می‌توانند توسط دو استاتور و یک روتور و یا دو روتور و یک استاتور ایجاد شوند. ساخت دو استاتور هزینه بالایی دارد و بدین جهت در مواردی که محدودیت طراحی نداریم، ساخت دو روتور و یک استاتور بر دیگری برتری دارد.

ج) موتور با چند فاصله هوایی؛ با توجه به توضیحات ارائه شده در موتورهای با دو فاصله هوایی جهت ساخت موتورهایی با راندمان و توان بالاتر، استفاده از موتورهای چند طبقه شار محوری بهترین گزینه خواهند بود.

در این روش هنگامی که نیاز به اخذ درصدی از توان نامی موتور باشیم می‌توانیم با تغذیه تنها چند طبقه از موتور، توان مورد نیاز دریافت شود. بدین ترتیب راندمان دریافتی موتور در بارهای کمتر از بار نامی مناسب می‌باشد.

## ۲) مواد مورد استفاده در هسته موتور

آهن، پودر مغناطیسی و ابررسانا موادی هستند که علاوه بر مواد معمول و استفاده شده در قسمت‌های مختلف موتور نقش بسزایی در تامین راندمان مورد نیاز دارند.

### ۳) شیارهای استاتور

در موتورهای القایی شار محوری طراحی دو نوع شیار در استاتورها امکان پذیر است. یک نوع تعبیه شیارهایی مانند شیارهای معمولی در بدنه استاتور و بصورت شعاعی و نوع دیگر استاتور بدون شیار می باشد. در استاتورهای بدون شیار، پیچک به دور ورق های هسته پیچیده می شوند و یا از فیبرهای چابی بجای سیم پیچ بهره برداری می گردد [۶].

### ۴) هسته مغناطیسی

هسته استاتور مانند موتورهای شار شعاعی بایستی بصورت مورق و از جنس ورق سیلیس دار باشد. هر چه ضخامت ورق کمتر باشد تلفات آهنی کمتر خواهد بود.

### ۵) منع تغذیه موتور

این موتورها با توجه به طراحی می توانند بصورت ولتاژ مستقیم یا متناوب تک فاز یا سه فاز تغذیه شوند. همچنین در طراحی های خاص تغذیه موتور بصورت شش فاز یا بیشتر نیز امکان پذیر است.

### ۶) تعداد فازها

هر موتور القایی شار محوری این قابلیت را دارد که بصورت تک فاز، سه فاز و یا بیشتر طراحی و ساخته شود.

### ۷) روتور

روتور این ماشین ها می توانند بصورت یکپارچه و یا مورق ساخته شوند. اگر روتور این موتورها بصورت مورق با ورق های سیلیس ساخته شود، مسیر عبور میدان دارای مقاومت مغناطیسی کمتری بوده و تلفات فوکو به مراتب کاهش خواهد یافت ولی در موتورهایی با سرعت بالا و همچنین با توجه به اینکه

فرکانس میدان روتور در موتور القایی درصد بسیار پائینی از فرکانس استاتور خواهد بود، پیشنهاد می‌گردد که روتور بصورت صلب و یکپارچه ساخته شود.

#### ۸) سیم‌بندی استاتور

سیم‌بندی استاتور موتور القایی شار محوری مانند موتورهای شار شعاعی یک طبقه یا دو طبقه و بصورت گام کسری یا گام کامل قابل اجرا هستند.

### ۱-۲-۳- کاربرد ماشین‌های شار محوری

در سال‌های اخیر، ماشین‌های شار محوری و دیسکی جدید در حال تبدیل شدن به سیستم محرکه در وسایل نقلیه الکتریکی می‌باشند [۷].

از آنجایی که ماشین‌های شار محوری با روتور و استاتور مسطح و فاصله هوایی قابل تنظیم، نسبت قدرت به وزن و قطر به طول بالاتری دارند، تهویه و خنک‌کنندگی بهتری را دارا هستند [۸]. به این جهت امکان استفاده از بارگذاری الکتریکی بیشتر در موتور فراهم می‌شود و یا اینکه با بارگذاری یکسان نسبت به موتور مشابه شار شعاعی ابعاد را می‌توان کاهش داد.

لذا در پروژه‌هایی که امکان استفاده از طول محور بزرگ امکان‌پذیر نیست، ماشین‌های شارمحوری به شدت مورد استقبال قرار می‌گیرند.

ماشین‌های شار محوری برای سرعت‌های پایین مناسب هستند، چون رفتار آنها نسبت به تعداد قطب بالا انعطاف‌پذیرتر است [۹، ۱۰].

تراکم گشتاور زیاد، بهره‌وری بالا و گسترده بودن محدوده سرعت، همگی عواملی هستند که کاربرد این موتورها را در تجهیزات با فضای کمتر مورد استقبال قرار داده‌اند.

بهره‌برداری این دستگاه برای پروژه‌هایی که از درایوها جهت افزایش سرعت استفاده می‌کنند و یا برای استفاده در طیف وسیع سرعت نیاز به حذف گیربکس‌ها دارند، بسیار مناسب است.

یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد موتور شار محوری بدون هسته، استفاده از آن در قدرت‌های زیاد می‌باشد به نحوی که می‌توان در یک موتور القایی شار محوری قدرت بالا در زمان‌های مورد نیاز تنها درصدی از قدرت نامی از ماشین اخذ گردد، بطوری که راندمان آن کاهش پیدا نکند.

این کار با ساخت یک ماشین چند طبقه با استفاده از ساختار دو وجهی امکان‌پذیر می‌باشد.

### ۱-۲-۴- ماشین‌های القایی شار محوری با استاتور بدون هسته

ماشین‌های شار محوری بدون هسته می‌توانند با گشتاور راه‌اندازی پائین شروع به کار کرده و راندمان بالایی داشته باشند. این ماشین‌ها چون فاصله هوایی بزرگی دارند هیچگونه اشباعی در یوغ آنها بوجود نمی‌آید. همچنین مقدار اندوکتانس استاتور آنها کم می‌باشد.

عدم وجود هسته آهنی استاتور باعث از بین رفتن تلفات ناشی از جریان‌های فوکو بوده و در نتیجه افزایش راندمان را در پی خواهد داشت. از طرفی دیگر حذف تلفات آهنی در ماشین بدون هسته موجب می‌شود تا ماشین بهتر تهویه شده و خنک‌تر بوده و در نتیجه می‌توان برای ماشین بارگذاری الکتریکی بالاتری را در نظر گرفت.

در ماشین‌های دارای هسته کویل‌ها در شیارها جایگذاری می‌شوند و ساختار کویل‌ها به شکل شیارها محدود می‌شود. در این ماشین‌ها، ضریب سیم‌بندی با استفاده از گام کویل، برداشت شده و به راحتی قابل محاسبه است. اما در ماشین‌های بدون هسته هوا، هر چند در طراحی آزادی عمل بیشتری وجود دارد و بدون هرگونه محدودیت در شیار استاتور، سیم‌پیچی قابل اجراست، ولی محاسبه ضریب سیم‌بندی نسبت به ماشین‌های معمولی پیچیده‌تر است.

در ماشین‌های القایی شار محوری بدون هسته، چون کوپل‌ها در فاصله هوایی جایگذاری می‌شوند و توزیع چگالی میدان بصورت سینوسی است، لذا نیروی محرکه الکتریکی هر هادی متفاوت از هادی‌های همان کوپل می‌باشد.

### ۱-۲-۵- مشکلات ماشین‌های شار محوری با استاتور بدون هسته

علاوه بر تمام مشکلاتی که در مسیر ساخت موتورهای شار محوری وجود دارد، مهار روتور تنها از محیط داخلی، انجام سیم‌پیچی بدون حضور هسته و مهار استاتور از محیط خارجی از دیگر پیچیدگی‌های ساخت موتور القایی شار محوری با استاتور بدون هسته می‌باشد.

### ۱-۲-۶- مزایای موتورهای القایی شار محوری با استاتور بدون هسته

تراکم گشتاور نسبت به موتورهای شار شعاعی و پایداری مکانیکی بهتر در سرعت‌های بالا از مزایای ویژه این موتورها می‌باشد [۱۱].

بطور کلی در مقایسه با اندازه موتورهای مشابه، ابعاد کوچک و کوپل مغناطیسی بهتر بین روتور و استاتور جهت بهبود عملکرد موتور از جمله مزایای موتورهای شار محوری ذکر می‌گردد.

همچنین این موتورها نیاز به ۱۴~۱۳ درصد مس کمتر  $۳۲/۵ \sim ۲۱/۵$  درصد آهن کمتر دارند [۱۲].

در موتورهای شیاردار هنگام چرخش، دندانه‌های شیار بطور مرتب از زیر میدان عبور کرده و راکتانس متغیر ایجاد کرده که همین مساله دلیل لرزش در این نوع موتورهاست.

اما در موتورهایی که فاقد هسته و دندانه‌های شیار می‌باشند تغییرات رلوکتانس وجود نداشته و سرعت نرم و بدون لرزش است.



یکی از سخت‌ترین و پرهزینه‌ترین قسمت‌های ساخت یک موتور که نیاز به ساخت قالب‌های پانچ و یا برش توسط دستگاه‌های CNC دارد، ساخت هسته استاتور می‌باشد.

در موتورهای القایی شار محوری با استاتور بدون هسته، به جهت حذف هسته هزینه ساخت به شدت کاهش پیدا کرده و از نظر اقتصادی دارای توجیه‌پذیری بالایی می‌باشند. همچنین کاهش وزن ناشی از آن نیز به دیگر مزایای آن می‌افزاید.

از دیگر ویژگی‌های این نوع موتور می‌توان به اینرسی نسبتاً کم آن اشاره کرد، که می‌تواند با زمان کمی به سرعت‌های بالا دسترسی داشت و این مشخصه برای ماشین‌های شار محوری متناسب هست. اینرسی کوچک موتورهای شار محوری، آن را برای سروموتورها و موتورهای سرعت بالا مناسب ساخته است [۱۳].  
عدم حضور هسته و حذف تلفات هسته استاتور نیز به افزایش راندمان کمک شایانی می‌کند.

### ۱-۳- تحقیقات صورت پذیرفته در مورد ماشین‌های القایی شار محوری با استاتور بدون هسته

ماشین‌های شار محوری به دلیل دارا بودن مزایای ذکر شده در بسیاری از کاربردها در رنج وسیع سرعت بویژه در سرعت‌های بسیار بالا در جایی که بهره انرژی بسیار مهم است، توجه محققین زیادی را به خود جلب کرده است.

ماشین القایی شار محوری با استاتور بدون هسته بدلیل داشتن گشتاور راه‌اندازی خوب و ساختمانی ساده (در مقایسه با ماشین‌های سنکرون)، از جذابیت دو چندان بخصوص در سرعت‌های بالا و بسیار بالا برخوردار است.

طراحی و ساخت ماشین‌های القایی شار محوری با استاتور بدون هسته به دلیل حذف تلفات هسته استاتور که بخش عمده‌ای از کل تلفات در ماشین‌های الکتریکی می‌باشد، می‌تواند دگرگونی بزرگی در حوزه کاربرد ماشین‌های الکتریکی بویژه برای ماشین‌های کوچک سرعت بالا بوجود آورد.

قابل توجه اینکه طراحی و ساخت استاتور بدون هسته و تثبیت دقیق آن در یک بدنه، با مشکلات الکترومغناطیسی و مکانیکی زیادی بصورت همزمان مواجه است. همچنین ساخت روتور قفسه سنجابی تخت نیز کاملاً با روتور قفسه سنجابی استوانه‌ای متفاوت بوده و حفظ فاصله هوایی یکنواخت در این موتور بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

تحقیقات بسیار زیادی در مورد ماشین‌های شار محوری انجام پذیرفته و نمونه‌های قابل قبولی نیز ساخته شده‌است. ساخت ماشین‌های AFPM با احتساب مزایای بسیار، بخاطر نیاز به آهنرباهای قوی دچار ضعف خواهد بود [۱۴].

همچنین ساخت موتورهای شار محوری با روتورهای یکپارچه از نظر اقتصادی بصره‌تر و دارای چگالی قدرت مطلوب‌تر هستند [۱۵].

### ۱-۳-۱- آینده‌نگری طرح موتورهای القایی شار محوری با استاتور بدون

#### هسته

تجهیزات بسیار زیادی در صنایع وجود دارند که نیاز به موتورهای القایی با سرعت‌های بالا می‌باشند. تامین سرعت بالا با افزایش فرکانس میسر بوده و این مسئله نیز باعث افزایش بسیار زیاد تلفات فوکو می‌گردد.

با توجه به اینکه بعضاً چنین موتورهایی با توان کوچک مورد نیاز هستند، نسبت تلفات فوکو به توان موتور تقریباً قابل ملاحظه بوده و حذف آن نیز ویژگی منحصر بفردی را برای موتور ایجاد می‌کند.

امید است با انجام موفق این طرح که شامل مدلسازی، طراحی و ساخت یک نمونه از این نوع موتورها می‌باشد، انگیزه‌های لازم برای استفاده از آن در بسیاری از صنایع و تجهیزات پیشرفته بوجود آید.



## فصل دوم

طراحی موتور القایی شار محوری با  
استاتور بدون هسته

## ۲-۱- طراحی مکانیکی

به استناد آمار پروژه‌های ورودی یک شرکت تعمیرات ماشین‌های الکتریکی، بیش از هشتاد درصد موتورهای الکتریکی، بخاطر بروز عیوب مکانیکی از چرخه بهره‌برداری خارج شده‌اند و یا عامل ایجاد مشکلات الکتریکی آنها نشات گرفته از موارد مکانیکی بوده است.

لذا طراحی مکانیکی مطلوب یک موتور الکتریکی، باعث افزایش قابلیت اطمینان موتور و کاهش تعمیرات آن می‌شود.

### ۲-۱-۱- طرح ایده‌ال مکانیکی

آنچه که در طراحی یک موتور القایی شار محوری روتور قفسی با استاتور بدون هسته هدف واقع شده است داشتن یک موتور با مشخصات ذیل‌الذکر می‌باشد.

الف) تولید نیروی الکترومغناطیسی حداکثری توسط استاتور با استفاده از تعداد دور بالا و یا سطح مقطع بالای هادی‌ها

ب) حفظ ثبات سیم‌پیچی‌های استاتور با توجه به عدم حضور هسته مغناطیسی

ج) وجود فاصله هوایی یکنواخت در کمترین مقدار ممکن

د) کاهش وزن روتور جهت داشتن ممان اینرسی پائین و رسیدن به دور نامی در زمان کوتاه

ه) تهویه و خنک‌کنندگی بالا

بدیهی است با رسیدن به موارد فوق‌الذکر دسترسی به موتوری نزدیک به ایده‌آل بسیار آسان خواهد بود.

کاهش فاصله هوایی موجب افزایش ضریب قدرت ماشین شده و با حذف تلفات آهنی هسته استاتور و کاهش تلفات مکانیکی، به راندمان بالایی دسترسی خواهیم داشت. در این موتورها نظر به اینکه از روتور دو وجهی استفاده گردیده و در استاتور نیز هیچگونه دندانه‌ای وجود ندارد، کاهش پراکندگی شار به شدت محسوس می‌باشد.

فرکانس جریان در هادی‌های روتور و بالتبع آن فرکانس شار اعمالی در روتور ضریب بسیار کمی از فرکانس استاتور می‌باشد، که تقریباً تلفات فوکو در روتور را می‌توان نادیده گرفت. ولی برای رسیدن به یک طرح ایده‌آل بهتر است هسته روتور را نیز مورق کرد.

ساخت هسته روتور مورق نیازمند قالبی است که بتوان پس از جمع کردن آن شیارهای شعاعی و محل تعبیه رینگ‌های اتصال کوتاه را ایجاد کرد. همچنین نظر به ضخامت بسیار پایین یوغ هسته روتور و ساختار شعاعی شیارها تعبیه محل گوه برای روتوربارها کاری بسیار دشوار بوده و نیازمند ساخت ابزار خاصی می‌باشد.

لذا ساخت روتور یک موتور القایی شار محوری نیازمند دانش فنی و تکنولوژی بالایی می‌باشد.

پیش‌بینی تهویه خوب و یا داشتن کولینگ مناسب موجب می‌شود بارگذاری الکتریکی بالاتری را بتوان در طراحی پیش‌بینی نمود و یا به عبارت دیگر در توان ثابت، با کولینگ بهتر می‌توان موتور را با حجم کمتری ساخت.

علاوه بر موارد فوق‌الذکر موتور ایده‌آل موتوری است که در حین کارکرد کمترین ارتعاشات را داشته باشد. با توجه به دیسکی بودن روتور و غیر مهار بودن محیط خارجی روتور، امکان بروز لنگی در روتور بسیار بالاست که این موضوع می‌بایست در پروسه ساخت کاملاً مرتفع گردد. همچنین لازم است دیسک از نظر مکانیکی کاملاً بالانس باشد.

یکسان بودن چگالی جرم هسته روتور و روتور بارها و رینگ‌های انتهایی روتور در داشتن بالانس دینامیکی بسیار مؤثر هستند.

## ۲-۱-۲- مشکلات اجرایی ساخت استاتور

چنانچه یک موتور شار محوری بخواهد برای سرعت‌های بسیار بالا طراحی و ساخته شود، بایستی یا تعداد قطب را کاهش و یا فرکانس را افزایش دهیم.

افزایش فرکانس برای حصول به سرعت‌های بسیار بالا تا ۶۰۰۰۰ دور در دقیقه و یا بیشتر، تلفات فوکو را به شدت افزایش می‌دهد به نحوی که ساخت آن ماشین را توجیه ناپذیر می‌کند. پیشنهاد ارائه شده برای حل این معضل بزرگ، حذف هسته استاتور می‌باشد.

با حذف هسته استاتور بدن محدودیت و نگرانی از افزایش تلفات هسته می‌توان به ساخت موتورها در سرعت‌های بالا اندیشید.

سیم‌پیچی استاتور در موتور القایی شارمحوری بدون هسته بایستی در ساختاری محکم قرار گیرد به نحوی که جنس آن از نظر ضریب نفوذپذیری مغناطیسی معادل هوا بوده و از نظر استحکام مکانیکی بتواند نیروی الکترومغناطیسی حاصله از بوبین‌ها را تحمل و بدون تغییر فرم به فاصله هوایی و سپس به روتور انتقال دهد. همچنین هسته انتخاب شده نباید در برابر حرارت تولید شده توسط سیم‌پیچی استاتور تغییر شکل دهد.

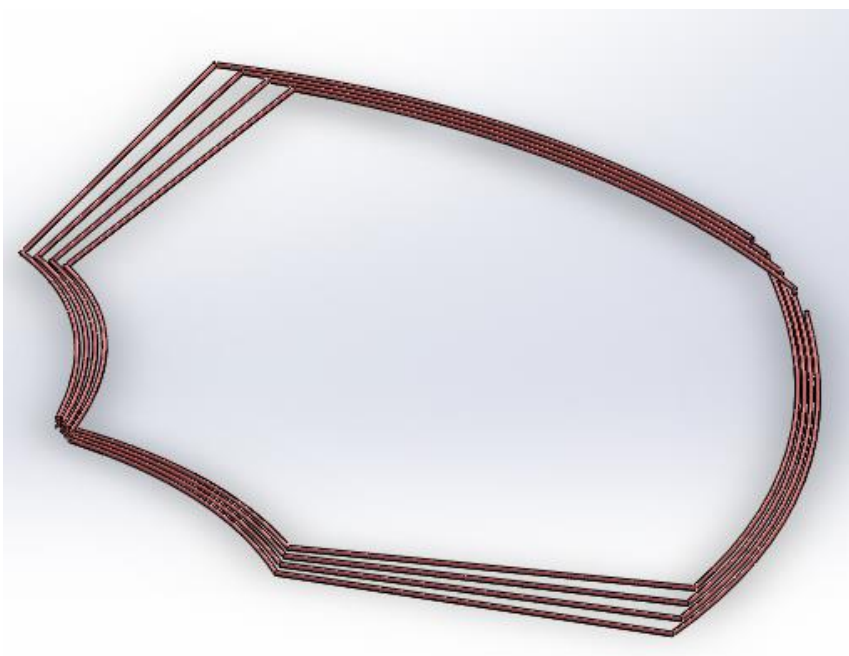
طرح‌های فراوانی در این زمینه ارائه گردیده است که شاید بررسی همه آنها نیاز به تحریر مقالات زیادی باشد، لیکن با تحقیق در ماشین‌های مشابه پیشنهادهای مطرح گردید که بهترین آنها جهت اجرایی شدن طرح، مبنای ساخت قرار داده شد.



اولین روش پیشنهادی این است که بوبین‌ها را به صورت کویل‌هایی از سیم تخت که قابلیت فرم‌گیری داشته باشد، در یک قالب مجزا و به تعداد مورد نیاز ساخته و پس از آن با سربندی آنها و جوشکاری با جوش نقره استحکام و پیوستگی بین تمام کویل‌ها را ایجاد نماییم. سپس ساختار فوق‌الذکر را در قالب پیش‌ساخته با اندازه‌های استاتور مورد نیاز قرار داده و رزین کاری کنیم. رزین استفاده شده باید به نحوی پس از اتمام فرآیند سخت شود که در مقابل انبساط ناشی از افزایش حرارت تا حد قابل قبولی مقاومت نموده و همچنین بتواند بوبین‌های استاتور را در حضور نیروهای مغناطیسی وارده ضمن جلوگیری از بروز دفرمگی، در مرکز استاتور تثبیت نماید.

این روش برای ماشین‌هایی با تعداد قطب زیاد و توان بالا که قطر زیاد ماشین، استفاده از کویل را امکان‌پذیر می‌سازد، مناسب است.

لیکن در اکثر موتورهای توان پایین جریان استاتور مقدار کمی است، لذا نیاز نیست پیچک‌ها از سیم تخت ساخته شود، به همین جهت در این ماشین‌ها، این روش قابل قبول نیست.



شکل ۲-۱- پیچک با سیم تخت

روش پیشنهادی بعدی استفاده از استاتورهای موقت از جنس یونولیت و یا گچ می‌باشد به نحوی که بعد از پیچیدن کوئل‌ها، اصل استاتور قابل تخریب باشد. در این روش ابتدا استاتور موقت طبق طراحی ساخته شده و بوبین‌های سیم‌گرد داخل آن جایگذاری می‌گردد. پس از اتمام پروسه جایگذاری و سربندی استاتور، کل مجموعه در محلولی که هسته استاتور مجازی در آن قابلیت حل شدن دارد قرار گرفته و بدین صورت تنها پیچک‌ها باقی می‌مانند. محلول مورد نظر برای هسته با جنس یونولیت بنزین و برای هسته گچی آب گرم پیشنهاد می‌گردد.

پس از انجام اتصالات سربندی، سیم‌پیچی بایستی توسط عملیات رزین‌کاری مطابق با آنچه در روش پیشنهادی اول ذکر شد بصورت یک دیسک صلب گردد.

استفاده از یک لایه ورق مسی مانند فیبرهای مدار چاپی با پوشش مسی دو طرفه و اتصال پیشانی کلاف‌ها توسط رابط‌های مسی انعطاف‌پذیر، پیشنهاد دیگری می‌باشد که تنها در موتورهای با توان پایین‌تر از ۵۰ وات پیشنهاد می‌گردد. توان پیشنهادی ۵۰ وات به جهت محاسبه حداکثر ضخامت هادی قابل نصب روی فیبرها ارائه گردیده است و در صورت وجود دانش فنی، ساخت موتور با توان بالاتر از این محدوده امکان‌پذیر می‌باشد.

چهارمین روش ارائه شده که از نظر نویسنده بر روش‌های دیگر برتری دارد، استفاده از هسته‌ای با ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مشابه هوا لیکن با استحکام مکانیکی بالا، قابلیت جذب رزین‌های مورد نظر به صورت ایده‌آل و قابلیت انجام عملیات مکانیکی از قبیل سوراخکاری و یا تراشکاری روی هسته می‌باشد.

این هسته نیاز به تخریب نداشته و حضور آن در ماشین نیز هیچگونه مغایرتی با دیگر فاکتورهای طراحی ندارد. جهت دستیابی به ماده‌ای با خصوصیات ذکر شده ۴ نمونه ورق عایقی از جنس طلق و فایبر با ضخامت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته شد.

ورق‌های انتخابی تقریباً همگی از لحاظ قیود بیان شده مورد تایید بودند، لیکن بعلت مقاومت حرارتی پایین ورق‌های طلّقی، استاتورهای ساخته شده با این جنس در حین عبور جریان‌های بالا بخاطر حرارت تولید شده بیش از اندازه، تغییر حالت داده و مخروطی شکل شدند. لذا نهایتاً استفاده از ۲ نوع ورق فایبرگلاس با مشخصات ذکر شده در ذیل محصول شرکت معظم ISOVOLTA مورد تایید واقع گردید.

### الف) ورق فایبر<sup>۱</sup> با نام تجاری ISOVAL 11

نوعی ورق اپوکسی<sup>۲</sup> و مقاوم در برابر دما و خواص مکانیکی و حرارتی بسیار بالا است، که در دماهای عملیاتی بالا نتایج قابل قبولی ارائه داده است. از این ورق می‌توان بعنوان یک ماده عایق الکتریکی بسیار خوب استفاده کرد. استحکام خمشی و فشاری بسیار خوب و استفاده از مواد شیشه در ترکیبات آن، این ماده را به عنوان یک هسته مناسب تبدیل کرده است. قابلیت ماشینکاری با حفظ استحکام خمشی نیز به دیگر مزایای این ورق افزوده است. برای ماشینکاری این نوع ورق استفاده از الماس کاربرد<sup>۳</sup> و ماشین‌آلات تراشکاری با سرعت بالا توصیه می‌شود [۱۶].

اطلاعات فنی این نوع ورق در جدول ۱-۲ ارائه گردیده است.

---

1) Fiber  
2) Epoxy  
3) Carbide

جدول ۲-۱- اطلاعات فنی ورق ISOVAL 11

| مقدار           | واحد      | استاندارد تست | خصوصیات   |
|-----------------|-----------|---------------|---|
| حدود ۲          | $g/cm^3$  | ISO 1183 / A  | تراکم   |
| ۱۰۰/۲۲۰/۳۲۰/۴۰۰ | MPa       | ISO 178       | استحکام خمشی در<br>۱۸۰/۱۲۰/۱۰۰/۲۳ درجه سلسیوس       |
| ۳۳              | $KJ/mm^2$ | ISO 179/3 C   | استقامت به ضربه                                     |
| ۲۴۰             | MPa       | ISO 527       | استحکام کششی  |
| ۳۵۰/۵۰۰         | MPa       | ISO 604       | مقاومت فشاری عمود بر لایه در<br>۱۸۰/۲۳۰ درجه سلسیوس |
| ۱۰              | $T\Omega$ | IEC 167       | مقاومت عایق پس از غوطه‌وری در آب                    |
| ۱۳              | $KV/mA$   | IEC 243       | قدرت الکتریکی                                       |
| ۴۰              | KV        | IEC 243       | ولتاژ شکست  |
| ۰/۵۵            | -         | IEC 250       | ضریب تلفات  |
| ۱۸۰             | T.I.      | IEC 216       | استقامت حرارتی                                      |
| ۲۰              | mg        | ISO 62/1      | جذب آب در ضخامت ۱۰ میلیمتر                          |
| ۰/۳             | $W/mK$    | DIN 52612     | هدایت حرارتی  |
| ۰/۱٪            | %         | ISO 62/1      | افزایش وزن  |
| ۱۰۸             | G y       | IEC 544       | مقاومت در برابر اشعه با انرژی بالا                  |

### ب) ورق فایبر با نام تجاری ISOVAL TM

این ورق نیز با سیستم اپوکسی از گلاس<sup>۴</sup> آغشته شده است. مقاومت شیمیایی خیلی زیاد و استقامت حرارتی بالا به نحوی که در تحمل حرارتی قابل قبولی تا دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد را دارا باشد، از

4) Glass

خصوصیات آن است. این ماده علاوه بر قابلیت‌های فوق، قابلیت ماشینکاری بالایی داشته و در ضخامت‌های ۰/۲ تا ۱۴۵ میلیمتر قابل تولید می‌گردد.

کاربردهای عمومی این ورق در ساخت اسلیپ رینگ‌های موتورهای روتور سیم‌پیچی شده تا توان ۱۰ MW، قالب‌های بوبین‌های اصلی و کمکی موتورهای DC و گوه‌های شیار موتورهای MV و HV می‌باشد [۱۷].

اطلاعات فنی و تصاویر مربوط به آن در ادامه ارائه گردیده است.

جدول ۲-۲- اطلاعات فنی ورق ISOVAL TM

| مقدار       | واحد      | استاندارد تست | خصوصیات                                |
|-------------|-----------|---------------|--|
| حدود ۲      | $g/cm^3$  | ISO 1183 / A  | تراکم                                  |
| ۴۰۰/۲۸۰/۲۰۰ | MPa       | ISO 178       | استحکام خمشی در ۱۵۰/۱۲۰/۲۳ درجه سلسیوس |
| ۳۳          | $KJ/mm^2$ | ISO 179/3 C   | استقامت به ضربه                        |
| ۲۴۰         | MPa       | ISO 527       | استحکام کششی                           |
| ۵۰۰         | MPa       | ISO 604       | مقاومت فشاری عمود بر لایه              |
| ۱۰          | TΩ        | IEC 167       | مقاومت عایق پس از غوطه‌وری در آب       |
| ۱۳          | $KV/mA$   | IEC 243       | قدرت الکتریکی                          |
| ۴۰          | KV        | IEC 243       | ولتاژ شکست                             |
| ۵/۵         |           | IEC 250       | ضریب تلفات                             |
| ۱۸۰         | T.I.      | IEC 216       | استقامت حرارتی                         |
| ۲۰          | mg        | ISO 62/1      | جذب آب در ضخامت ۱۰ میلیمتر             |

در پروسه ساخت موتور القایی شار محوری با استاتور بدون هسته از ورق فایبرگلاس ISOVAL 11 استفاده شده است. در این فرآیند ابتدا ورق مذکور با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر طبق نقشه با دستگاه

CNC ماشینکاری گردیده، سپس به جهت از بین بردن لبه‌های برنده مقاطع ماشینکاری، با استفاده از روش سندبلاست<sup>۵</sup> با فشار بسیار پائین تمامی لبه‌های تیز از بین رفته و تبدیل به سطوح صاف و قابل استفاده برای سیم‌پیچی با سیم لاکه گردیده است.

برای از بین بردن لبه‌های برنده روش دیگری نیز پیشنهاد می‌گردد.

رزین کاری ورق توسط رزین هوا خشک باعث ایجاد یک لایه نازک روی فیبر شده و مشکل برندگی لبه‌ها مرتفع خواهد شد.

در ساخت استاتور با آخرین روش پیشنهادی ارائه شده، بایستی با توجه به طراحی، ورق را به صورت یک رینگ با ابعاد مورد نظر برشکاری کرده و به تعداد شیارهای استاتور در ابتدا و انتهای طول شعاعی استاتور شیار تعبیه گردد. این شیارها می‌تواند به صورت سوراخ‌های گرد و یا مستطیل شکل باشند، به نحوی که بازوهای طبقه زیر شیارهای استاتور از یک طرف ورق و بازوهای طبقه بالای شیار از طرف دیگر ورق مورد نظر عبور کند.

دفرمگی پیشانی و بازوها در حین عبور جریان بر اثر نیروهای الکترومغناطیسی وارده مسئله مهمی است که بر اثر عدم حضور یک هسته خودنمایی می‌کند. لذا به جهت مهار کردن کلاف‌ها در قسمت پیشانی نیز سوراخ‌هایی تعبیه خواهد شد.

جهت حصول به نتیجه بهتر و رسیدن به ضریب پخش بالای سیم‌بندی پیشنهاد می‌گردد، بجای استفاده از یک شیار که درون آن چند هادی قرار گیرد، تا حد امکان شیارها را افزایش داده و تعداد هادی عبوری درون شیار را کاهش دهیم. با این کار احتمال اتصال حلقه بین هادی‌ها نیز کاهش داده خواهد شد.

---

5) Sand blast

جهت تثبیت استاتور داخل موتور نیز بایستی قطر خارجی ورق مورد نظر را از پیشانی بیرونی کلاف بزرگتر انتخاب کرده، به نحوی که با ایجاد یک نافی بین دو درب قالباق موتور، مکانی برای استقرار و هم محور نگه داشتن استاتور ایجاد می نماییم.



شکل ۲-۲- نمایش نشیمنگاه استاتور بین درب قالباقها

نظر به اینکه استاتور تنها از قسمت محیط خارجی تثبیت می گردد و به قالباقها اتصال می یابد، لذا صلب بودن جنس آن بسیار حائز اهمیت است.

تمامی ماشینهای الکتریکی در حین کارکرد افزایش درجه حرارت داشته و بالتبع مواد بکار رفته در آنها نیز به تناسب ضریب انبساط حرارتی آنها دچار انبساطهای طولی، سطحی و یا حجمی می گردند.

مقدار این انبساط با توجه به جنس مواد انتخابی مختلف بوده، ولی افزایش ابعاد ناشی از افزایش درجه حرارت غیر قابل انکار و اجتناب ناپذیر می باشد.

در طراحی قطعات علاوه بر در نظر گرفتن تلرانس‌هایی برای انبساط‌های فوق‌الذکر، فضاهای خالی در مناطق مشخص برای جلوگیری از تغییر شکل ناشی از افزایش درجه حرارت بایستی در نظر گرفته شود.

در استاتور مورد بحث نیز با توجه به شکل دایره‌ای بودن آن و در نظر گرفتن این موضوع که محیط خارجی آن توسط درب قالب‌های موتور مهار گردیده با افزایش درجه حرارت محیط داخلی تغییر شکل داده و به صورت مخروطی شکل می‌شود. این انحراف باعث تغییر در فاصله هوایی شده و در افزایش شدید دما، باعث تماس سیم‌پیچی استاتور به روتور خواهد گردید. پیشنهاد ارائه شده جهت حل مشکل فوق ایجاد شکاف‌هایی شعاعی در محیط داخلی استاتور بوده تا در اثر افزایش دما و انبساط سطحی این فضا از مخروطی شدن استاتور جلوگیری نماید.



شکل ۲-۳- نحوه ایجاد شکاف در استاتور



مؤکداً بیان می‌گردد استفاده از هر جنسی اعم از سرامیک و یا حتی سنگ‌های سخت مشابه اگرچه تحمل حرارتی بسیار بالایی در طبیعت دارند، ولی وجود انبساط سطحی در آنها را نمی‌توان انکار کرد. هر چند استفاده از آنها به خاطر سختی فوق‌العاده بالا، عملیات ماشینکاری را بسیار سخت نموده و در هنگام افزایش‌های ناگهانی درجه حرارت ناشی از اضافه بارهای ناگهانی خطر شکستن استاتور نیز بسیار زیاد است.

اجرای سیم‌بندی در این هسته مجازی به سادگی امکان‌پذیر بوده و با توجه به طرح ارائه شده بزرگترین مشکل مولدهای شار محوری که همانا حضور فاصله هوایی بسیار زیاد می‌باشد، به نحو قابل توجهی کاهش می‌یابد.

با کاهش فاصله هوایی پراکندگی شار نیز کاهش یافته و ضریب قدرت موتور افزایش خواهد داشت. نکته قابل توجه اینکه سربندی سیم‌پیچ‌ها و اتصالات خروجی در پیشانی خارجی صورت می‌گیرد تا ضمن کمک به کاهش فاصله هوایی از احتمال تماس سرهای خروجی به قطعات دوار جلوگیری گردد.



شکل ۲-۴- استاتور سه فاز شار محوری با هسته هوا

## ۲-۱-۳- رزین‌های تثبیت‌کننده

اگر از هر هادی که در میدان مغناطیسی قرار دارد، جریان الکتریکی عبور کند، بر آن نیرویی وارد می‌شود که جهت و مقدار آن از قوانین الکترومغناطیسی به راحتی قابل محاسبه می‌باشد. از این رو به تمامی هادی‌های سیم‌پیچی استاتور موتور ساخته شده نیز نیروهایی وارد می‌شوند که مطمئناً باعث حرکت هادی‌ها از جایگاه خود در طی زمان بهره‌برداری می‌گردند.

نظر به اینکه در موتور القایی شار محوری بدون هسته، عملاً هیچگونه شیاری جهت استحکام هادی‌ها وجود ندارد، مشکل فوق بیشتر خودنمایی می‌کند. استفاده از یک نوع رزین که استحکام مکانیکی، مقاومت عایقی و مقاومت حرارتی بالایی داشته باشد، ثبات مورد نیاز هادیها در استاتور را ایجاد خواهد کرد. استفاده از تجربیات بیش از دو دهه کار با انواع رزین‌ها و بررسی کاربردی رزین‌های ساخته شده توسط شرکت‌های بزرگ تولید مواد عایقی، منجر به معرفی دو نوع رزین فوق‌العاده کاربردی برای استفاده در این ساختار گردید. این رزین‌ها ساخت شرکت معظم VONROLL با نام تجاری DAMIVAL بوده و دو جزئی می‌باشند. در ادامه مشخصات فنی هر دو نوع به تفکیک ارائه گردیده است.

### الف) رزین DAMIVAL 13522

این نوع رزین دو جزئی با قابلیت تحمل حرارتی بالا جهت استفاده در موتورهای الکتریکی، ترانسفورماتورها، سنسورها و خازن‌ها می‌باشد.

در هنگام استفاده از این رزین بایستی سخت‌کننده آن به نسبت ۴۰ درصد وزنی و یا ۵۰ درصد حجمی با رزین بخوبی ترکیب شود.

پس از مخلوط کردن رزین و سخت‌کننده، مواد می‌بایست فوراً مورد استفاده قرار گیرند. رزین پس از ترکیب دو جزء بعد از گذشت زمان حدود یک ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد بصورت ژله‌ای

شده و بعد از خشک کردن و کوره‌گذاری با طی شدن زمانی حدود ۹۰ دقیقه به ماکزیمم سختی خود می‌رسد [۱۸]. مشخصات مکانیکی، فیزیکی، گرمایی و الکتریکی آن بشرح مندرج در جدول ۲-۳ می‌باشد.

جدول ۲-۳- مشخصات رزین DAMIVAL13522

| استاندارد تست    | مقدار (بعداز کیورینگ) | مقدار (بعداز ترکیب) | مقدار (هاردنر) | مقدار (رزین) | واحد    |                    |
|------------------|-----------------------|---------------------|----------------|--------------|---------|--------------------|
| خصوصیات مکانیکی  |                       |                     |                |              |         |                    |
| ISO527           | 55                    |                     |                |              | MPa     | استحکام کششی       |
| ISO527           | 2.6                   |                     |                |              | %       | افزایش ضخامت       |
| خصوصیات فیزیکی   |                       |                     |                |              |         |                    |
|                  |                       | بی رنگ              | قهوه‌ای        | بی رنگ       |         | رنگ                |
|                  |                       | 1.42                | 1.21           | 1.54         |         | چگالی              |
| TECAM            |                       | 62                  |                |              | Min     | زمان ژله‌ای شدن    |
| خصوصیات گرمایی   |                       |                     |                |              |         |                    |
|                  | -30~160               |                     |                |              |         | محدوده کاربرد      |
| DINEN821-2       | 0.4                   |                     |                |              | W / m.K | هدایت گرمایی       |
| TMA              | 47-146                |                     |                |              | ppm/ K  | ضریب انبساط        |
| خصوصیات الکتریکی |                       |                     |                |              |         |                    |
|                  | 20                    |                     |                |              | KV / mm | استقامت دی-الکتریک |

### ب) رزین DAMIVAL 15182

رزین فوق‌الذکر هم مانند رزین قبلی دوجزئی بوده و جهت وارنیش کاری سطوح نازک مانند شیشه و پلی‌استر بسیار مناسب می‌باشد و در صنایع ماشین‌های الکتریکی از جمله موتور و ژنراتور کاربرد فراوانی دارد.

این رزین از لحاظ ساختاری به گونه‌ای است که در هوای سرد شکل کریستاله به خود می‌گیرد. در چنین حالتی بایستی رزین را قبل از استفاده تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد گرم کرد.

زمان ژله‌ای شدن آن بستگی به حجم مورد استفاده دارد، ولی باتوجه به رزین معرفی شده قبلی زمان ژله‌ای شدن طولانی‌تری دارد. بعنوان مثال برای ۲۵ گرم رزین DAMIVAL 15182 تقریباً ۷ ساعت زمان نیاز است تا رزین حالت ژله‌ای به خود بگیرد. نسبت ترکیبی سخت کننده آن ۵۰ درصد وزنی می‌باشد.

زمان و دمای کوره‌گذاری دو پارامتر مهم در رسیدن رزین به ماکزیمم سختی خود می‌باشند [۱۹].

در جدول زیر دما و زمان کوره‌گذاری برای ضخامت لایه‌ای ۵ میلیمتری ارائه گردیده است.

جدول ۲-۴- دما و زمان پخت رزین ۱۵۱۸۲

| Temperature (°C) | 25        | 80°C     | 110°C   | 120     |
|------------------|-----------|----------|---------|---------|
| Time (min, hour) | 12(hours) | 2(hours) | 40(min) | 20(min) |

شرایط نگهداری رزین فوق‌الذکر ۱۲ ماه در بسته‌بندی‌های اصلی و در دمای ۱۵ الی ۲۵ درجه سانتیگراد می‌باشد. مشخصات مکانیکی، فیزیکی، گرمایی و الکتریکی آن در جدول ۲-۵ ارائه گردیده است.

جدول ۲-۵- مشخصات رزین DAMIVAL15182

| استاندارد تست     | مقدار ( بعداز کیورینگ) | مقدار(بعدازتر کیب) | مقدار(هارد- نر) | مقدار(رزین) | واحد           |                    |
|-------------------|------------------------|--------------------|-----------------|-------------|----------------|--------------------|
| خصوصیات فیزیکی    |                        |                    |                 |             |                |                    |
|                   |                        | بی رنگ             | قهوه‌ای         | بی رنگ      |                | رنگ                |
|                   |                        | 1.1                | 0.96            | 1.16        |                | چگالی              |
| <i>DIN53019</i>   |                        | 1500               | 350             | 11500       | <i>mPa.s</i>   | چسبندگی            |
| <i>TECAM</i>      |                        | 4                  |                 |             | hours          | زمان ژله‌ای شدن    |
| <i>ISO868</i>     | 70                     |                    |                 |             |                | سختی لبه‌ها        |
| خصوصیات گرمایی    |                        |                    |                 |             |                |                    |
|                   | F                      |                    |                 |             |                | کلاس حرارتی        |
| <i>DINEN821-2</i> | 0.17                   |                    |                 |             | <i>W / m.K</i> | هدایت گرمایی       |
| <i>TMA</i>        | 47-146                 |                    |                 |             | <i>ppm/ K</i>  | ضریب انبساط        |
| <i>DMA</i>        | 60                     |                    |                 |             | °C             | دمای شیشه‌ای شدن   |
| خصوصیات الکتریکی  |                        |                    |                 |             |                |                    |
|                   | 3                      |                    |                 |             |                | ضریب‌دی الکتریک    |
|                   | 0.008                  |                    |                 |             |                | ضریب تلفات         |
|                   | 32                     |                    |                 |             | <i>kv/mm</i>   | استقامت‌دی الکتریک |

## ۲-۱-۴- خنک‌کنندگی استاتور و روتور

موتور القایی شار محوری با استاتور بدون هسته به جهت ساختار دیسکی مانند خود تهویه بسیار خوبی دارد. وجود فاصله هوایی زیاد اگرچه از نظر الکترومغناطیسی برای موتور یک عیب برشمرده می‌شود، لیکن جابجایی هوا در آن قسمت موجب خنک‌کنندگی سیم‌پیچی استاتور می‌گردد. روش‌هایی که برای کولینگ ماشین‌ها طراحی می‌گردند، به درجه حفاظت ماشین بستگی دارند.

درجه حفاظت یا IP عددی دو رقمی است که با توجه به حفاظت ماشین در برابر اشیاء خارجی از جدول زیر قابل دستیابی هستند.

جدول ۲-۶- مقادیر IP [۲۰]

(الف)

| نوع حفاظت  | عدد اول |
|--|---------|
| هیچگونه حفاظتی در برابر قسمت‌های برق‌دار و یا متحرک داخل محفظه و همچنین هیچگونه حفاظتی در برابر ورود اجسام خارجی به داخل جسم وجود ندارد.   | ۰       |
| در برابر تماس‌های اتفاقی یا غیرعمدی با قسمت‌های برق‌دار یا متحرک دستگاه حفاظت شده، ولی عمداً و با اراده می‌توان به قسمت‌های برق‌دار و یا متحرک دستگاه دست زد و به طور خلاصه دستگاه در برابر ورود اشیاء با قطر بزرگتر از ۵۰ میلی‌متر حفاظت شده‌است. | ۱       |
| قسمت‌های برق‌دار و یا متحرک داخل دستگاه در برابر انگشت محافظت شده و یا به عبارت دیگر دستگاه در برابر ورود اشیاء خارجی با قطر بزرگتر از ۱۲ میلی‌متر حفاظت شده‌است.  | ۲       |
| قسمت‌های برق‌دار و یا متحرک داخل دستگاه در برابر ورود ابزار، سیم و هر چیز دیگر با قطر بیش از ۲/۵ میلی‌متر حفاظت شده و به طور کلی اشیاء با قطر بیش از ۲/۵ میلی‌متر نمی‌توانند وارد دستگاه شوند.   | ۳       |
| قسمت‌های برق‌دار و یا متحرک داخل دستگاه در برابر ورود اجسام خارجی بیش از یک میلی‌متر محافظت شده‌است.   | ۴       |
| حفاظت کامل در برابر تماس با قسمت‌های برق‌دار یا متحرک دستگاه، منفذهای ورود گرد و غبار به داخل دستگاه به طور کامل مسدود نشده ولی گرد و غباری که وارد دستگاه می‌شود باعث اختلال در سیستم داخلی و عملکرد دستگاه نمی‌گردد.                             | ۵       |
| قسمت‌های برق‌دار و یا متحرک داخل دستگاه به طور کامل در برابر تماس‌های خارجی حفاظت شده و مطلقاً منفذی جهت ورود گرد و غبار به داخل دستگاه وجود ندارد.  | ۶       |

(ب)

| نوع حفاظت   | عدد دوم |
|---|---------|
| دستگاه هیچگونه حفاظتی در برابر آب ندارد.  | ۰       |
| دستگاه در برابر قطرات متراکم شده که به طور قائم از بالا بر روی قاب آن می‌ریزد، محافظت شده- است.   | ۱       |
| دستگاه در برابر پاشش آب به طور قائم یا با زاویه ۱۵ درجه نسبت به خط قائم، محافظت شده‌است.  | ۲       |
| دستگاه در برابر پاشش آب به طور قائم یا با زاویه ۶۰ درجه نسبت به خط قائم، محافظت شده‌است.  | ۳       |
| دستگاه در برابر پاشش آب در هر جهت به بدنه آن حفاظت شده‌است.   | ۴       |
| دستگاه در برابر پاشش آب با فشار از هر جهت به بدنه آن در شرایط معین حفاظت شده و خطر جدی برای دستگاه ندارد.   | ۵       |
| دستگاه در برابر موقعیت خاص عرشه کشتی‌ها حفاظت شده و در این شرایط آب وارد دستگاه نمی- شود.   | ۶       |
| دستگاه در برابر غوطه‌ور شدن در آب حفاظت شده، وقتی جسم در داخل مایع غوطه‌ور است در فشار معین مایع و زمان معین آب وارد دستگاه نمی‌شود.              | ۷       |
| دستگاه در برابر غوطه‌ور شدن در آب در زمان نامحدود حفاظت شده، وقتی دستگاه در عمق معین از آب قرار می‌گیرد برای زمان نامحدود آب وارد دستگاه نمی‌شود. | ۸       |

برای خنک‌کنندگی بهتر موتور القایی شار محوری با استاتور بدون هسته پیشنهادات زیر ارائه گردیده که هر کدام به تناسب درجه حفاظت موتور (IP) قابل بررسی و استفاده می‌باشند.

الف) در موتورهای با IP 23 پیشنهاد می‌شود دریچه‌ای روی درب قالباق‌ها تعبیه شده، همچنین روی فلانچ روتور در محل ارتباط دیسک‌های روتور به شفت نیز سوراخ‌هایی در نظر گرفته شود. با توجه به قوانین سیالاتی در حین چرخش هوای بین دو روتور جابجا شده و موجب خنک‌کنندگی استاتور و روتور می‌شود.

ب) در سطح بیرونی روتور پره‌هایی نصب شده، به نحوی که این پره‌ها بر روی دو روتور از طریق جابجایی به صورت محوری هوا را از طرفین مکیده و به داخل استاتور هدایت می‌کنند. سپس هوا از داخل استاتور به صورت شعاعی به بیرون رانده می‌شود.

ج) استفاده از پروانه‌های مجزا در خارج از محفظه داخلی روتور و استاتور در روی شفت نیز به خوبی تهویه هوا را انجام می‌دهد. این روش بسیار کم‌هزینه‌تر از روش‌های الف و ب بوده ولی سیم‌پیچ‌های استاتور مستقیماً در معرض باد قرار نمی‌گیرند و این مسئله در انتخاب چگالی جریان استاتور بایستی مد نظر قرار گیرد.

د) با توجه به عدم حضور هسته مغناطیسی در استاتور خنک‌کنندگی استاتور با آب به وسیله مجراهای تعبیه شده در هسته استاتور راه‌حلی بسیار کاربردی جهت ایجاد خنک‌کنندگی موتور می‌باشد. این روش در بعضی ژنراتورهای قدرت تا توان ۴۰۰ مگا ولت آمپر که به علت سرعت پائین توان خنک‌کنندگی از فن‌های کوپل شده به روتور را ندارند، استفاده می‌شود.

با خنک‌کنندگی به این روش به شدت درجه حرارت استاتور کاهش یافته و بارگذاری الکتریکی بالایی را می‌توانیم در طراحی موتور لحاظ نماییم. هزینه اجرایی این طرح بالا بوده و در پروژه‌هایی که سرعت پائین و جریان بالا عوامل تشدید گرمای درون موتور هستند، استفاده از این روش اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.

د) استفاده از فن‌های خارجی روشی معمول جهت خنک‌کنندگی انواع موتورها بوده و در موتورهای القایی شار محوری نیز قابل استفاده خواهد بود.

ه) استفاده از ابررساناها در ساختار سیم‌پیچی استاتور و روتور و یا بهره‌برداری از هسته‌های مغناطیسی با تلفات بسیار پائین‌تر نیز می‌تواند پیشنهاداتی برای ساخت موتورهای القایی شار محوری با استاتور بدون هسته در آینده باشد.



## ۲-۱-۵- ساختار روتور و چگونگی استقرار روتور بارها

اگر تحلیل روتور در موتورهای القایی را در دو مرحله گذرا (از لحظه استارت تا رسیدن به دور نامی) و دائمی (مدت زمان کار در دور نامی) مورد بررسی قرار دهیم، این نتیجه دست‌یافتنی خواهد بود که لغزش در لحظه استارت برابر ۱ و در دور نامی مقداری بسیار کم و در حدود ۵ - ۳ درصد می‌باشد.

هرچه سرعت روتور به سرعت سنکرون نزدیک‌تر باشد لغزش کمتر خواهد شد. از طرفی فرکانس شار عبوری در هسته روتور طبق رابطه  $f_r = s \cdot f_s$  قابل محاسبه می‌باشد. بنابراین چنانچه ماشین مورد نظر در دور نامی بهره‌برداری گردد، با توجه به اینکه تلفات آهنی روتور به فرکانس روتور بستگی دارد، لذا مقدار آن بسیار ناچیز و معمولاً قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد.

در فرایند ساخت هسته روتورها در ماشین‌های معمولی و صنعتی چون هسته روتور پس از برش هسته استاتور از مقدار پرت دایره وسط ورق سیلیس به راحتی قابل دستیابی است، بدین جهت تمایل زیادی به استفاده از آهن یکپارچه دیده نمی‌شود.

اما در موتور شار محوری با توجه به مسیر عبور شار مغناطیسی، که در امتداد محور است باید با پیچیدن ورق سیلیس به نحوی که ابعاد طراحی شده لحاظ گردد، نسبت به ساخت روتور اقدام نمود.

فرایند ساخت هسته روتور به صورت مورق و نهایتاً تعبیه شیار روی آن بسیار سخت و نیاز به ماشین‌آلات مرکب و ساخت تجهیزات خاص می‌باشد. از طرفی استفاده از این هسته در سرعت‌های بالا نیز خطر از هم گسستگی را در پی دارد. لذا به جهت استحکام بالای مکانیکی و هزینه زیاد فرایند ساخت و همچنین نظر به تلفات آهن بسیار پایین روتور، استفاده از آهن یکپارچه برای هسته روتور بلامانع خواهد بود. لذا جهت ساخت روتور، استفاده از یک ورق آهن با ضخامت محاسبه شده و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مطلوب بهترین انتخاب خواهد بود.



شکل ۲-۵- هسته روتور خورشیدی شارمحوری

پس از انتخاب ورقی با ضخامت طراحی شده و جنس مشخص مطابق با مشخصات مغناطیسی مورد نیاز، عملیات شیار زنی روتور جهت تعبیه روتوربارها و رینگ‌های انتهایی، قدم بعدی ساخت روتور می‌باشد.

استفاده از دستگاه تراش CNC تنها راه ایجاد شیار جهت جایگذاری روتوربارهای خورشیدی می‌باشد. روتوربارها می‌توانند از جنس مس و یا آلومینیوم انتخاب گردند، ولی در هر حالت بنا به محاسبات باید مقاومت آن برای ایجاد گشتاور راه‌اندازی و گشتاور دائم کار کفایت کند.

با توجه به اینکه در روتور موتورهای شار محوری روتوربارها دیگر شکل قفس ندارند، استفاده از واژه روتور قفس سنجابی جایگاهی نخواهد داشت، لذا چون میله‌های شعاعی روتور شباهت زیادی به شعاع‌های نوری خورشید دارند، پیشنهاد می‌گردد روتور مذکور، روتور خورشیدی نامیده شود. طول شیار روتور بارها برابر طول شیار استاتور بوده و دو رینگ خارجی و داخلی می‌بایست با اندازه محاسبه شده روی دیسک آهنی روتور جهت جایگذاری روتوربارها و رینگ‌های انتهایی ایجاد گردد.



شکل ۲-۶- روتوربارها

در موتورهای شار شعاعی، با توجه به پارامترهای طراحی و به خاطر پراکندگی شار، طول روتوربارها کمی بلندتر از طول شیار استاتور در نظر گرفته می‌شود.

در ساختار موتورهای شار محوری بدون هسته، این ضرورت وجود دارد که برای بسته شدن مسیر شار مغناطیسی، از دو روتور مشابه که در دو طرف استاتور با هسته هوا و به صورت هم محور تعبیه می‌گردند استفاده شود.

بدین صورت ساختار موتور القایی شار محوری با استاتور بدون هسته و با استفاده از دو عدد روتور کامل می‌گردد. البته با هدف کامل شدن مسیر شار می‌توان از دو استاتور و یک روتور دو وجهی نیز استفاده کرد که در این صورت پراکندگی شار استاتور به شدت افزایش خواهد یافت و با توجه به مشکلات ساخت استاتور بدون هسته، ساخت دو عدد استاتور پیشنهاد نمی‌گردد.

## ۲-۱-۶- نحوه استحکام و ایجاد پایداری روتور در حین چرخش

روتور خورشیدی شار محوری بخاطر ساختار دیسکی مانند خود از یک طرف و از طرف دیگر به جهت اینکه فقط از قسمت مرکز دیسک قابل مهار شدن است، نیاز به استحکام بالایی دارد. عدم استحکام روتور در حین چرخش و یا صلب نبودن هسته روتور به اندازه کافی باعث بروز لنگی و نهایتاً غیر یکنواختی فاصله هوایی خواهد شد.

چنانچه به این موضوع توجه کافی نگردد، ارتعاشات ناشی از عدم یکنواختی فاصله هوایی در روتور و همچنین لنگی دیسک‌ها به سرعت باعث بروز ارتعاشات و تماس بین روتور و استاتور و نهایتاً از بین رفتن ماشین می‌شوند. لذا جهت نیل به اهداف فوق، ساخت فلانچی که رابط بین هسته روتور و محور روتور باشد، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است.

جهت استحکام و پایداری روتور، ساخت فلانچ به شکل مخروطی و افزایش ضخامت آن از محیط خارجی به سمت محور پیشنهاد می‌گردد. افزایش سطح درگیری فلانچ با روتور نیز تا حد امکان از بروز خطاهای بعدی جلوگیری می‌کند.



شکل ۲-۷- فلانچ

همچنین داشتن چگالی جرمی یکنواخت در هنگام انتخاب فلانچ و انجام بالانس دینامیکی مجموعه فلانچ و روتور با تأکید فراوان یادآوری می‌گردد.

## ۲-۱-۷- یاتاقان‌ها

یاتاقان‌ها قلب موتورهای الکتریکی هستند، به نحوی که بروز کوچکترین خطا در یاتاقان‌ها، کل موتور را تهدید می‌کند. سطح تماس مجموعه روتور با محور هرچه بیشتر باشد پایداری مکانیکی آن در هنگام چرخش بیشتر است.

تمام نیروهای الکترومغناطیسی از طریق روتور به محور منتقل می‌شوند، پس انتخاب یاتاقان مناسب شاید به اندازه طراحی تمام موتور با اهمیت به نظر برسد.

یاتاقان‌ها از نظر کلی به دو دسته لغزشی و غلتشی تقسیم می‌شوند. یاتاقان‌های غلتشی مانند انواع بالبرینگ‌ها و رولبرینگ‌ها می‌باشند. رولبرینگ‌ها اگرچه سطح تماس بیشتری نسبت به بالبرینگ‌ها دارند، ولی نسبت به یاتاقان‌های لغزشی دارای لقی بالاتر و نویز فراوانی هستند. لذا برای موتورهای القایی شار محوری استفاده از یاتاقان‌های لغزشی نسبت به غلتشی از اولویت بالاتری برخوردار هستند.

یاتاقان‌های لغزشی اگرچه هزینه‌های طراحی و ساخت بسیار بالاتری دارند، لیکن نظر به اهمیت موضوع در ایجاد پایداری در سرعت و کاهش ارتعاشات، ما ملزم به استفاده از آنها خواهیم بود.

در نظر گرفتن میزان لقی یاتاقان‌ها، برای محاسبه فاصله هوایی بسیار حائز اهمیت است. چون کمترین لقی در مرکز روتور باعث می‌شود تا مقدار لنگی محیط خارجی روتور زیاد شده و تماس بین روتور و سیم‌پیچ‌های استاتور اتفاق بیفتد.

## ۲-۲- طراحی الکترومغناطیسی

در طراحی الکترومغناطیسی، ابعاد اصلی اجزاء الکتروموتور از جمله طول، قطر، تعداد شیار، نوع سیم پیچی، اتصالات و همچنین کمیت‌های مغناطیسی از جمله اندوکسیون در نقاط مختلف ماشین مانند اندوکسیون فاصله هوایی، اندوکسیون یوغ، چگالی شار در دندان‌های روتور و استاتور و همچنین تلفات محاسبه می‌شود. سپس بر مبنای این پارامترها نقشه‌های طراحی استخراج شده و سپس ماشین مورد نظر تحت عملیات ساخت قرار می‌گیرد.

در ماشین‌های شار شعاعی محدودیت‌هایی از جمله به اشباع رسیدن شار در ریشه شیار روتور، خنک‌کنندگی موتور و عدم دستیابی به گشتاور بالا بخاطر طول محوری بزرگ وجود دارد. اما در ماشین‌های شار محوری، چگالی شار در دندان ثابت و خنک‌کنندگی استاتور و روتور به جهت ساختار دیسکی مانند آن، بهبود یافته است. همچنین برای کاربردهای گشتاور بالا، طول محوری کاهش یافته و در یک زمان می‌توان با تغییر فاصله هوایی، راه‌اندازی با سرعت‌های مختلف صورت گیرد [۲۱].

## ۲-۲-۱- الگوریتم طراحی

در اغلب اوقات بنا به دلایل اقتصادی و یا عدم دسترسی به مواد مورد نظر، پارامترهای محاسبه شده در محدوده کوچکی تغییرات می‌کند، اما نبایستی این تغییرات موجب کاهش یا افزایش مقادیر نامی پلاک

ماشین گردد. قابل توجه اینکه تهیه دستورالعمل‌های اجرایی و نقشه‌های طراحی با توجه به آخرین ویرایش محاسبات الکترومغناطیسی صورت می‌پذیرد.

ماشین مورد نظر یک دستگاه موتور القایی سه فاز شار محوری روتور قفسی با استاتور بدون هسته می‌باشد. نظر به اینکه با توجه به عدم حضور هسته در ماشین فوق‌الذکر، محاسبه ابعاد شیار استاتور و اجزا مختلفی از جمله یوغ استاتور، دندانه و ... جایگاهی ندارد، لذا از ذکر آنها صرفنظر می‌گردد.

## ۲-۱-۱-۱-۱-۱-۱ ابعاد هسته استاتور و روتور

در محاسبات استاتور دو پارامتر مهم نسبت به دیگر مقادیر قابل توجه هستند.

الف) چگالی شار متوسط فاصله هوایی که از آن به بارگذاری ویژه مغناطیسی نیز یاد می‌کنیم. این پارامتر به جنس هسته ماشین بستگی دارد.

ب) بارگذاری ویژه الکتریکی استاتور که آمپر هادی موجود در واحد طول استاتور می‌باشد.

بارگذاری ویژه الکتریکی به نحوه خنک‌کنندگی ماشین که نهایتاً منجر به مقدار در نظر گرفته شده برای چگالی جریان هادی‌ها می‌باشد بستگی تنگاتنگی دارد.

در ماشین شار محوری توان دریافتی ماشین بر حسب ولت آمپر بصورت زیر قابل محاسبه می‌باشد. این معادله بعنوان معادله خروجی ماشین معرفی می‌گردد [۲۱].

$$S = \pi^2 * K_D * K_W * N_s * B_{mg} * AC * D_o^3 \quad (1-2)$$

همانطور که ملاحظه می‌شود قدرت ماشین با توان سوم قطر خارجی استاتور در ارتباط است. با در نظر گرفتن ضرایب  $K_D$  و  $K_W$  محاسبه قطر خارجی استاتور به عنوان اصلی‌ترین اندازه موتور امکانپذیر می‌باشد.

بهینه‌ترین مقدار  $K_d$  (نسبت قطر داخلی به قطر خارجی) بین ۰/۵ تا ۰/۸ و ضریب سیم‌بندی نیز ۰/۹ تا ۰/۹۷ قابل تغییر است. با فرض یک مقدار اولیه برای ضرایب فوق می‌توان طراحی را شروع و مجدداً با حصول نتایج تازه آنها را اصلاح کرد.

$$D_o = \sqrt[3]{\left( \frac{S}{\pi^2 * K_D * K_W * N_s * B_{mg} * AC} \right)} \quad (2-2)$$

$$D_i = K_d * D_o \quad (3-2)$$

$$K_D = \frac{1}{8} * (1 + K_d) * (1 - K_d^2) \quad (4-2)$$

در موتورهای شار محوری با توجه به دیسکی بودن استاتور رابطه بین قطر خارجی و قطر داخلی استاتور و طول آنها به صورت زیر خواهد بود.

$$D = \frac{D_o + D_i}{2} \quad (5-2)$$

$$L = \frac{D_o - D_i}{2} \quad (6-2)$$

معادله خروجی ماشین شاید مهم‌ترین و جامع‌ترین معادله‌ای است که بر اساس آن حتی قیمت یک ماشین الکتریکی و ابعاد تقریبی آن را می‌توان تخمین زد.



همانطور که از معادله فوق پیداست، ابعاد ماشین (یا حجم هسته) با سرعت ماشین رابطه عکس دارد و این بدان معناست که ماشین با سرعت پایین می‌بایست حجم هسته بالایی داشته باشد.

در ماشین‌های القایی در صورت نیاز به سرعت‌های بالاتر از سرعت میدان ۳۰۰۰ دور در دقیقه (در فرکانس ۵۰ هرتز) نیازمند استفاده از مبدل‌های فرکانسی می‌باشد. به این ترتیب که می‌توان با افزایش فرکانس تغذیه از ۵۰ هرتز به بالا سرعت را به مقدار دلخواه تنظیم نمود.

بزرگترین مشکل استفاده از فرکانس بالا در تغذیه افزایش تلفات هسته در استاتور می‌باشد. با توجه به اینکه تلفات فوکو (گردابی) با مجذور فرکانس رابطه عکس دارد، در فرکانس‌های چندین کیلوهرتز، تلفات گردابی بزرگترین مشکل ماشین‌های القایی محسوب می‌گردد.

همچنین نظر به معادله خروجی ماشین، چنانچه به سرعت‌های بسیار پایین در صنعت نیاز باشد، با توجه به افزایش قابل توجه حجم هسته و بالتبع بالا رفتن تلفات آهن و کاهش راندمان، پیشنهاد استفاده از گیربکس‌های صنعتی ارائه می‌گردد.

البته نکته قابل توجه در طراحی ماشین‌ها این است که بعضا با توجه به نوع کاربری ماشین استفاده از گیربکس برای رسیدن به سرعت پایین و یا تغذیه با فرکانس بالا برای رسیدن به سرعت‌های فوق‌العاده بالا امکان‌پذیر نمی‌باشد، لذا در نظر گرفتن جمیع شرایط از جمله نوع کاربرد ماشین، محیطی که ماشین در آنجا کار می‌کند، نوبزهای ناشی از عملکرد ماشین و صرفه اقتصادی و همچنین دسترسی به مواد مورد نیاز جهت ساخت، اکثرا طراحی‌ها تحت‌الشعاع این مسائل قرار می‌گیرند.

بنابراین در راستای حل این مشکل، حذف هسته استاتور پیشنهاد گردیده است. با حذف هسته استاتور، راندمان ماشین شار محوری افزایش یافته و مسئله افزایش حرارت هسته استاتور کاملا منتفی می‌گردد.

ضریب سیم‌پیچ  $K_w$  در معادله خروجی ماشین از حاصل ضرب ضریب توزیع سیم‌پیچ و ضریب گام کلاف بدست می‌آید.

$$K_w = K_D \times K_e$$

(۷-۲)

ماکزیمم مقدار  $K_w$  از نظر تئوری می‌تواند یک باشد اما از آنجا که سیم‌پیچ‌های ماشین عموماً به صورت مطلوب توزیع شده نیستند و یا برای حذف هارمونیک‌ها از گام کوتاه شده استفاده می‌کنند، این مقدار معمولاً کوچکتر از یک است.

پس از محاسبه قطر استاتور انتخاب تعداد شیار استاتور در اولویت قرار دارد.

با در نظر گرفتن محدودیت‌های ساخت هر چه تعداد شیار استاتور بیشتر باشد، توزیع سیم‌پیچی مناسب‌تر خواهد بود، ولی بنا به تجربه شیارها باید به تعدادی انتخاب شوند که عرض هر دندانه تقریباً با عرض شیار برابر باشد. با این فرض معمولاً چگالی شار در ریشه دندانه‌ها در مقدار مجاز قرار می‌گیرد. این مقدار تقریباً برابر با  $1/2$  تسلا خواهد شد.

در بدست آوردن تعداد شیار، داشتن شیار بر قطب بر فاز الزامی است. این مقدار به نحوی انتخاب می‌شود که پس از محاسبه تعداد شیار، دندانه‌ها به اشباع نروند.

مقدار  $q$  بصورت تجربی بین ۲ تا ۵ انتخاب مناسبی خواهد بود.

$$S_s = q * P * m$$

(۸-۲)

از دیگر اجزاء استاتور که در عبور شار مغناطیسی بسیار مهم می‌باشد، ضخامت یوغ استاتور است.

یوغ قسمتی از هسته می‌باشد که فوران تولید شده سیم‌پیچ‌ها بعد از عبور از دندان‌ها از آنجا عبور کرده و یک گام قطبی را طی می‌کند.

حداکثر چگالی شار عبوری در یوغ به جنس آن بستگی داشته، ولی نباید از  $1/8$  تسلا بالاتر برود.

محاسبات ابعادی روتور تا حد زیادی به استاتور بستگی دارد.

قطر خارجی و قطر داخلی هسته روتور بایستی منطبق بر ابعاد استاتور باشد، اما مواردی از جمله اضافه اندازه‌های در نظر گرفته شده برای فائق آمدن بر مشکلات ساخت، می‌بایست حتما لحاظ گردد.

همانگونه که قبلاً ذکر گردید، موتور القایی شار محوری با استاتور بدون هسته بخاطر عدم وجود هسته و جهت ایجاد یک مسیر بسته برای عبور شار مغناطیسی نیاز به دو عدد روتور در طرفین استاتور می‌باشد، به صورتی که قفسه هر کدام به سمت استاتور قرار گیرد.

با توجه به اینکه تمام گشتاور الکترومغناطیسی در فاصله هوایی جهت تبدیل به گشتاور مکانیکی به روتور منتقل می‌شود، ضمن اینکه تنها قسمت چرخنده یک ماشین روتور آن می‌باشد و علاوه بر نیروی الکترومغناطیسی دائماً تحت تنش‌های مکانیکی نیز قرار دارد، دقت در انتخاب مواد اجزای مختلف روتور و جلوگیری از گسستگی آنها اعم از قفسه روتور و گوه‌های نگهدارنده، از اهمیت بسیار ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

انتخاب جنس هادی‌های روتور به عواملی از قبیل گشتاور راه‌اندازی، گشتاور دائم کار، ابعاد شیار روتور و تلفات مسی روتور بستگی دارد، ولی غالباً جنس روتور بارها از مس و یا آلومینیوم بوده و از انتخاب هادی‌های دیگر بخاطر تلفات و یا مقرون بصرفه نبودن اقتصادی، استقبال نشده است.

انتخاب تعداد شیارهای روتور اولین قدم در طراحی روتور قفسی می‌باشد. هیچ محدودیتی در انتخاب تعداد شیارهای بیشتر یا کمتر از شیارهای استاتور وجود ندارد، ولی رعایت محدودیت‌های زیر الزام‌آور می‌باشد.

الف) برای اجتناب از دندان‌دندان شدن میدان اختلاف بین تعداد شیارهای استاتور و روتور نباید مضرب صحیحی از 3P باشد.

$$S_s - S_r \neq 3kp$$

(۹-۲)

ب) برای جلوگیری از برآمدگی‌های سنکرون در منحنی گشتاور-سرعت، اختلاف بین تعداد شیارهای روتور و استاتور نباید برابر P و 2P و 5P باشد.

$$S_s - S_r \neq p, 2p, 5p$$

(۱۰-۲)

ج) برای جلوگیری از عملکرد پر سر و صدا، اختلاف شیارهای استاتور و روتور نباید برابر ۱ و ۲ و P+1 باشد.

$$S_s - S_r \neq 1, 2, p+1, p+2$$

(۱۱-۲)

د) جهت جلوگیری از پدیده تضاریس دندان‌ها تعداد شیارهای روتور نبایستی برابر با تعداد شیارهای استاتور باشد.

در شروط فوق با فرض بیشتر بودن شیارهای استاتور نسبت به روتور  $S_s - S_r$  مطرح گردیده است که در صورت عکس بودن شرط فوق لحاظ می‌گردد. هر چه تعداد شیار روتور بیشتر انتخاب شود، عملکرد موتور القایی نیز مناسب‌تر خواهد بود.

## ۲-۱-۲-۲- مشخصات سیم پیچی استاتور و قفسه روتور

الف) سیم پیچی استاتور: در صورت انتخاب سیم پیچی یک طبقه، گام سیم بندی با گام کامل و در سیم پیچی های دو طبقه، گام کوتاه پیشنهاد می شود.

مقدار کوتاهی گام با توجه به حذف هارمونیک های نامطلوب mmf صورت می پذیرد.

بطور مختصر تاثیر هارمونیک های اول تا هفتم بر عملکرد ماشین به صورت زیر می باشد:

هارمونیک اول میدان دوار راست گرد اصلی را به وجود می آورد و هارمونیک سوم باعث شار ضربانی می گردد. هارمونیک پنجم میدان دوار چپ گردی ایجاد می کند که از نظر جهت با میدان گردان ناشی از هارمونیک اول مخالفت نموده و برای یک ماشین گردان عملکرد ترمزی دارد. هارمونیک هفتم یک میدان دوار راست گرد در جهت میدان هارمونیک اول به وجود می آورد که با فرکانس ۷ برابر میدان دوار هارمونیک اول می چرخد.

با توجه به اینکه دامنه هارمونیک های مرتبه  $n$ ، برابر  $1/n$  دامنه هارمونیک اصلی می باشد لذا هارمونیک های مرتبه بالاتر از ۷ عملاً تاثیر بسیار ناچیزی بر عملکرد ماشین دارد. همچنین بایستی توجه داشت که علاوه بر اعوجاج شکل موج میدان، تلفات و ...، ایجاد نویز صوتی و لرزش ماشین نیز از اثرات منفی هارمونیک می باشد.

نکته قابل یادآوری اینکه علت بحث در مورد هارمونیک های فرد به این خاطر است که ماشین به علت تقارن ساختاری و سیم پیچ ها دارای ماهیت یک تابعیت فرد می باشد.

برای انجام محاسبات لازم ضریب توزیع سیم پیچی را با  $k_D$  نمایش داده و برای هارمونیک  $n$  از رابطه زیر بدست می آوریم.

$$k_D = \frac{\sin(qn\gamma/2)}{q\sin\left(\frac{n\gamma}{2}\right)} \quad (12-2)$$

$$\gamma = \frac{\frac{p}{2} * 360}{q * p * m} = \frac{180p}{s} \quad (13-2)$$

ضریب گام کلاف نیز از رابطه روبرو قابل محاسبه است.

$$k_e = \sin\left(\frac{n\epsilon_o}{2}\right) \quad (14-2)$$

با داشتن ضریب توزیع و ضریب کوتاهی، ضریب سیم‌پیچی برای هارمونیک  $n$  محاسبه می‌گردد.

$$K_w = K_D * K_e \quad (15-2)$$

با در دست داشتن ضریب سیم‌پیچی و فوران زیر هر قطب، تعداد دور هر کوئل در استاتور به راحتی به دست می‌آید.

$$\varphi = Bav * \left( \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4P} \right) \quad (16-2)$$

$$N_{ph} = \frac{V_{ph}}{4.44 * \varphi * 50 * Kw} \quad (17-2)$$

$n_{coil}$  با توجه به دو طبقه یا یک طبقه بودن موتور مشخص می‌گردد.

$$n_{coil} = S_s * t / 2 \quad (18-2)$$

$$n_{coil/ph} = \frac{n_{coil}}{m} \quad (19-2)$$

$$N_{coil} = N_{ph} / (n_{coil/ph}) \quad (20-2)$$

بدین ترتیب تعداد دور هر بوبین جهت اجرای سیم‌پیچی حاصل خواهد شد.

جهت ترسیم دیاگرام سیم‌بندی روش پیشنهادی بسیار ساده و کاربردی، استفاده از جدول سیم‌بندی می‌باشد. بدین ترتیب که جدولی با تعداد ردیف (قطب + ۱) و تعداد ستون (فاز + ۱) رسم می‌کنیم.

ستون‌ها را برای فازهای R T S و ردیف‌ها را برای قطب‌های N و S اختصاص می‌دهیم. سپس اعداد شیار را پشت سر هم در داخل جدول نوشته به طوری که در هر خانه به تعداد q، عدد اختصاص داده شود.

جدول ۲-۷- نمونه جدول سیم‌بندی

|   | R           | T             | S            |
|---|-------------|---------------|--------------|
| N | (۱) ۲ ۳ ۴   | ۵ ۶ ۷ ۸       | (۹) ۱۰ ۱۱ ۱۲ |
| S | ۱۳ ۱۴ ۱۵ ۱۶ | (۱۷) ۱۸ ۱۹ ۲۰ | ۲۱ ۲۲ ۲۳ ۲۴  |
| N | ۲۵ ۲۶ ۲۷ ۲۸ | ۲۹ ۳۰ ۳۱ ۳۲   | ۳۳ ۳۴ ۳۵ ۳۶  |
| S | ۳۷ ۳۸ ۳۹ ۴۰ | ۴۱ ۴۲ ۴۳ ۴۴   | ۴۵ ۴۶ ۴۷ ۴۸  |

چنانچه سیم‌بندی مد نظر یک طبقه باشد جدول فوق کامل خواهد بود.

اولین عدد ردیف N در ستون R شیار شروع فاز R ، اولین عدد ردیف S در ستون T شیار شروع فاز T و اولین عدد ردیف N در ستون S شیار شروع فاز S می‌باشد. با توجه به نوع سیم‌بندی گام مساوی و یا تعداد مرکز شیارهای برگشت و سربندی گروه‌ها به راحتی قابل تشخیص می‌باشد.

لیکن چنانچه سیم‌بندی دو طبقه باشد در زیر اعداد نوشته شده باید شیار برگشت و یا طبقه زیر کلاف ها را با اعداد پریم‌دار مشخص کرد. شیار برگشت از حاصل جمع شیار رفت و گام سیم‌بندی به دست می‌آید.

روش ارائه شده روشی بسیار ساده، کاربردی و علمی می‌باشد و با نگاهی گذرا به آن می‌توان تمام مشخصات سیم‌بندی از جمله تعداد کلاف، تعداد گروه کلاف، شیارهای شروع فازها، نوع سربندی، شیارهای مربوط به هر فاز و یا شیارهای مربوط به هر قطب را مشخص نمود. محاسبه گام قطبی، گام سیم‌بندی و شیار شروع فازها به قرار زیر خواهد بود.

$$Y_p = \frac{S_s}{P} \quad (21-2)$$

$$Y_s = \varepsilon_o * Y_p \quad (22-2)$$

$$\alpha_{ez} = \gamma = \frac{180 * P}{S} \quad (23-2)$$

$$U = 1 \quad (24-2)$$



$$V = U + \frac{120}{\alpha_{ez}} = 1 + \frac{120}{\alpha_{ez}} \quad (25-2)$$

$$W = U + \frac{240}{\alpha_{ez}} = 1 + \frac{240}{\alpha_{ez}} \quad (26-2)$$

سطح مقطع مورد نیاز برای هادی‌های استاتور با توجه به محاسبه جریان دریافتی از شبکه و تعداد مسیره‌های در نظر گرفته شده برای سیم‌بندی استاتور و همچنین چگالی جریان استاتور محاسبه می‌شود. نحوه تعیین تعداد مسیره‌های سیم‌بندی استاتور به عواملی از قبیل ساختار شیار استاتور، مقدار فضای پیشانی کلاف‌ها و ولتاژ جریان تغذیه ماشین بستگی دارد.

در ماشین‌های با ولتاژ بالا اتصال سری و در ماشین‌های با جریان بالا اتصال سری موازی و یا موازی پیشنهاد می‌گردد. عوامل دیگری از جمله عایق‌بندی هادی‌ها و یا اتصالات هادی‌ها به یکدیگر از طریق جوشکاری در نحوه انتخاب نوع سیم‌بندی در ماشین‌های بزرگ بسیار حائز اهمیت هستند.

انتخاب چگالی جریان در سیم‌بندی‌های استاتور موكداً به نوع خنك‌كنندگی ماشین بستگی دارد. به طور معمول چگالی جریان در يك ماشین بسته بين ۳ تا ۵ آمپر بر میلی‌متر مربع انتخاب می‌شوند. ولی در ماشین‌هایی با خنك‌كنندگی خاص و شرایط ویژه و همچنین نحوه عملکرد ماشین انتخاب چگالی جریان تا ۲۰ آمپر بر میلی‌متر مربع نیز دیده شده است.

$$I_{ph} = \frac{S}{3 * V_{ph}} \quad (27-2)$$

$$a_s = \frac{I_{ph}}{j} \quad (28-2)$$

ب) سیم‌پیچی روتور: پس از تعیین تعداد شیار روتور، محاسبه ابعاد شیار روتور در الویت قرار دارد. در محاسبه ابعاد شیار روتور در نظر گرفتن اندوکسیون در دندان روتور و همچنین در هسته روتور بسیار حائز اهمیت می‌باشد. لیکن نظر به اینکه روتور بارها می‌بایست بصورت کاملاً هم اندازه و حتی با سختی داخل شیارهای روتور جایگذاری گردند و هرگونه داشتن لقی و یا عدم استحکام آنها در جایگاه خود باعث صدمات زیادی به موتور در حین بهره‌برداری خواهد شد، لذا بهتر است محاسبه عمق و عرض شیار به مرحله بعد از تعیین سطح مقطع روتور بار موکول گردد.

برای محاسبه سطح مقطع روتور بار نیاز است ابتدا جریان عبوری از هادی‌های روتور محاسبه گردد. در موتورهای القایی آمپر هادی استاتور برابر با آمپر هادی روتور در نظر گرفته می‌شود.

$$m * 2 * N_{ph} * K_{w_s} * I_s = N_b * K_{w_r} * I_r \quad (29-2)$$

چگالی جریان روتور نیز همانند استاتور با توجه به خنک‌کنندگی موتور بین ۳ تا ۵ آمپر بر میلی‌متر مربع و در صورت داشتن خنک‌کنندگی خاص مقادیر بالاتر را انتخاب می‌کنیم.

$$a_b = I_r / j_r \quad (30-2)$$

حال با داشتن سطح مقطع روتور بار و با لحاظ کردن ضخامت روتور و محدودیت‌های اجرایی ساخت ابعاد شیار را محاسبه می‌نماییم.

نکته حائز اهمیت اینکه عرض و عمق شیار روتور در تعیین گشتاور راه‌اندازی و گشتاور دائم کار بسیار تاثیرگذار هستند که توجه به این نکته ما را در طراحی موتور بهتر یاری می‌رساند.

محاسبه جریان در حلقه‌های انتهایی با توجه به مقدار جریان رینگ‌ها قابل محاسبه است.

$$I_e = I_2 * \frac{N_b}{P\pi} \quad (31-2)$$

$$a_e = \frac{I_e}{j_r}$$

(۳۲-۲)

جهت محاسبه ضخامت یوغ روتور داشتن شار عبوری از هسته الزامی است.

$$\varphi_{cr} = \varphi / 2$$

(۳۳-۲)

$$a_{cr} = \varphi_{cr} / B_{cr}$$

(۳۴-۲)

$$d_{cr} = a_{cr} / l_r$$

(۳۵-۲)

ضخامت هسته روتور، اندازه کف شیار روتور تا پشت هسته می‌باشد.

## ۲-۲-۱-۳- محاسبه فاصله هوایی

فاصله هوایی در موتورهای القایی بهتر است تا حد امکان کوچک باشد، زیرا شدت جریان مغناطیس-کنندگی و ضریب توان به فاصله هوایی بستگی دارد. فاصله هوایی بزرگ باعث ایجاد جریان مغناطیس-کنندگی بزرگ شده و ضریب قدرت مدار را کاهش می‌دهد. کم کردن این فاکتور نیز اگرچه مشکل فوق را رفع می‌کند، ولی خطر افزایش جریان اتصال کوتاه مدار را زیاد می‌نماید.

اگر چه تعیین فاصله هوایی می‌بایست از روش‌های الکترومغناطیسی بدست می‌آید، ولی شاید بتوان گفت که این پارامتر بیشتر به مسائل مکانیکی از جمله تکنولوژی‌های ساخت و توانمندی‌های سازنده بستگی دارد. معمولاً موتورهای با طول محوری بلندتر نیاز به فاصله هوایی بیشتری دارند.

لذا جهت تعیین فاصله هوایی در موتورهای القایی شار شعاعی بیشتر به روابط تجربی استناد گردیده است [۲۲].

محاسبه طول فاصله هوایی در ماشین‌های القایی شار شعاعی برای توان بالاتر از یک وات از رابطه ۲-۳۳ محاسبه می‌گردد.

$$g = 0.18 + (0.006 * P^{0.4})$$

(۲-۳۶)

برای ماشین‌های با کارکرد سنگین، فاصله هوایی تا ۶۰ درصد نیز افزایش می‌یابد. همچنین برای محاسبه فاصله هوایی برای ماشین‌های با تعداد قطب زیاد نیز رابطه ۲-۳۴ پیشنهاد می‌گردد [۲۳].

۷ در رابطه زیر سرعت ماشین بر حسب متر بر ثانیه است.

$$g = 0.001 + \frac{D_r}{0.007} + \frac{v}{400} \quad (m)$$

(۲-۳۷)

در ماشین‌های شار محوری بدون هسته، فاصله هوایی بشدت به ضخامت هسته استاتور و سیم‌پیچ آن دارد.

در محاسبه ضخامت سیم‌پیچ، تعداد لایه‌های سیم‌پیچی و ضریب فشردگی لایه‌ها و ضخامت رزین می‌بایست مد نظر قرار داده شود. همچنین فاصله هوایی می‌تواند تابعی از قطر بیرونی روتور نیز باشد. چون با توجه به تکیه‌گاه روتور که فقط محیط داخلی آن می‌باشد، کمترین بروز لنگی در محیط داخلی، باعث افزایش لنگی در محیط خارجی می‌گردد.

از طرفی، یاتاقان‌ها بسته به نوع و عملکرد خود مقداری لقی دارند که این لقی در محیط خارجی با ضریبی معادل شعاع خارجی روتور ظاهر می‌شود. لذا اضافه کردن این مورد نیز به طول فاصله هوایی باید مد نظر قرار گیرد.

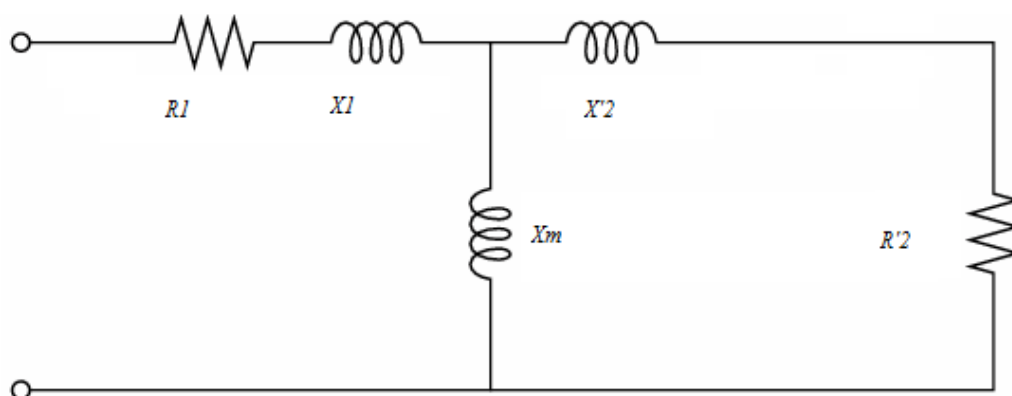
در ادامه روش پیشنهادی محاسبه طول فاصله هوایی در موتورهای شار محوری بدون هسته ارائه گردیده است. نکته قابل ذکر اینکه در محاسبه تعداد لایه ها، جواب بدست آمده باید بصورت یک عدد صحیح روند شده به عدد بالاتر باشد.

$$l_g = g + d_c + d_w + d_{re \sin} + (\zeta * D_o / 2) \quad (38-2)$$

$$d_w = (S_s * N_{coil} * d_s) / \pi D_i \quad (39-2)$$

#### ۲-۲-۱-۴- محاسبه مدار معادل

مدار معادل پیشنهادی برای موتورهای القایی شار محوری با استاتور بدون هسته به صورت زیر می باشد.



شکل ۲-۸- مدار معادل ماشین القایی با استاتور بدون هسته

$R_1$  مقاومت اهمی سیم پیچی هر فاز استاتور

$X_1$  راکتانس نشتی سیم پیچ استاتور

$R'_2$  مقاومت روتور ارجاع شده به سمت استاتور

$X'_2$  راکتانس نشتی روتور ارجاع به سمت استاتور

$X_m$  راکتانس مغناطیس کنندگی ماشین

الف) محاسبه مقاومت اهمی سیم پیچ فاز استاتور با داشتن طول سیم و سطح مقطع آن از رابطه زیر بدست می آید.

$$R_{ph} = \rho \frac{l}{A}$$

(۴۰-۲)

$$\rho_{cu} = 0.0178 \left( \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right)$$

(۴۱-۲)

محاسبه مقاومت به روش ذکر شده در واقع مقدار مقاومت سیم پیچ در دمای صفر درجه بوده و با توجه به تعریف ماشین که حداکثر دمای عملکردی آن مشخص گردیده، می توان مقاومت را در دمای  $t$  درجه محاسبه نمود.

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t)$$

(۴۲-۲)

افزایش درجه حرارت ماشین بسته به نوع عایقی که در آن استفاده می شود، در چهار کلاس رده بندی می شود. در جدول زیر تحمل حرارتی هر کلاس عایقی مشخص گردیده، لیکن به جهت افزایش عمر

ماشین‌ها همیشه سعی می‌شود افزایش درجه حرارت ماشین به مقداری پایین‌تر از اعداد اعلام شده محدود گردد.

جدول ۲-۶- جدول کلاس عایقی

| Ins. Class   | A   | B   | F   | H   |
|--------------|-----|-----|-----|-----|
| Temp. ( °C ) | 105 | 130 | 155 | 180 |

ب) راکتانس نشتی سیم‌پیچ استاتور ( $X_1$ ) شامل راکتانس شیار ( $X_s$ ) و راکتانس انتهایی کویل‌ها ( $X_e$ ) می‌باشد. در این موتور چون استاتور بدون هسته و شیار می‌باشد، با فرض اینکه راکتانس نشتی شیار بخاطر فاصله هوایی زیاد مسیر خود را از هوا می‌بندد، لذا راکتانس شیار با ضرب نسبت طول شیار به طول پیشانی کلاف‌ها در راکتانس پیشانی قابل دستیابی است.

$$X_e = \frac{8\pi f \mu_0 (N_{ph} k_w)^2}{P} * \frac{3.75}{2\pi} * (2l_{e2} - l_{e1}) \quad (۴۳-۲)$$

$$X_s = X_e * (2L / l_{e1}) \quad (۴۴-۲)$$

$$X_1 = X_s + X_e \quad (۴۵-۲)$$

ج) راکتانس مغناطیس‌کنندگی در موتور شار محوری از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$X_m = \frac{3\pi f (N_{ph} K_w)^2 \mu_0 (D_o^2 - D_i^2)}{P^2 g} \quad (۴۶-۲)$$

د) مقاومت اهمی روتور انتقالی به سمت اولیه

یک روتور قفسی می‌تواند معادل یک آرایش سیم‌پیچی چند فاز با تعداد فازهای زیاد باشد، که تعداد فازها با تعداد شیارهای روتور برابری می‌کند.

برای محاسبه مقاومت اهمی روتور، کفایت توان مسی روتور که شامل جمع توان روتور بارها و توان رینگ‌های انتهایی است را بدست آورده و آن را به سمت استاتور انتقال دهیم. سپس مقاومت روتور انتقالی به سمت استاتور بصورت روبرو خواهد بود.

$$R_2' = \frac{4m}{n_b} (N_{ph} K_w)^2 \left( R_b + \frac{2R_e n_b}{p^2 \pi^2} \right) \quad (47-2)$$

ه) راکتانس نشتی روتور مانند راکتانس نشتی استاتور غالباً از دو جزء نشت شیار و نشت انتهایی تشکیل می‌شود، لیکن میتوان از نشت انتهایی در روتور موتور حاضر، بخاطر کوچک بودن فاصله بین روتوربارها صرف‌نظر کرد.

$$X_{sr}' = \frac{8\pi f \mu_0 L (N_{ph} K_w)^2}{pq_r} \left( \frac{S_s}{S_r} * P \right) \quad (48-2)$$

## ۲-۲-۱-۵- محاسبه تلفات و راندمان

تلفات در یک ماشین القایی شامل تلفات ثابت و تلفات متغیر است. تلفات ثابت را تلفاتی گویند که به ازای تغییرات بار تغییر نمی‌کنند. تلفات آهن از آن جمله می‌باشند.

همچنین اگرچه تلفات مکانیکی شامل بار و اصطکاک، در بارهای مختلف کمی تغییرات دارند، ولی آن را نیز جزو تلفات ثابت قلمداد کرده و از تغییرات ناچیز آن صرف‌نظر می‌کنند.



در موتور القایی شار محوری با استاتور بدون هسته با توجه به اینکه آهن استاتور حذف شده است و در آهن روتور نیز بخاطر فرکانس پایین شار عبوری در سرعت نامی تلفات گردابی قابل صرف نظر کردن است، بنابراین صرفاً تلفات ثابت را فقط تلفات مکانیکی و بنا به تجربه حدود یک تا دو درصد توان خروجی در نظر می گیرند.

تلفات متغیر ماشین نیز شامل تلفات مسی روتور و استاتور می باشد که به سادگی از روابط ارائه شده زیر قابل محاسبه خواهد بود.

$$\Delta P_{cus} = 3R_{phs} I_{ph}^2 \quad (49-2)$$

$$\Delta P_{cur} = n_b R_b I_b^2 + 2R_e I_e^2 \quad (50-2)$$

پس از محاسبه تلفات بدست آوردن راندمان از رابطه زیر صورت می پذیرد.

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} * 100 \quad (51-2)$$



## فصل سوم

محاسبه یک موتور نمونه

۳-۱- طراحی موتور سه فاز ۳۰ وات، ۴۸ ولت با سرعت ۱۴۸۵ دور در دقیقه پارامترهای بدست آمده از طراحی بشرح زیر بوده و محاسبات در پیوست (۱) ارائه گردیده است.

$$P = 30 (w)$$

$$U = 48 (v)$$

$$I = 7.5 (A)$$

$$N = 1485 (rpm)$$

$$P.F = 0.54$$

$$Efficiency = 10 \%$$

$$AC = 12000$$

$$k_d = 0.55$$

$$B_{mg} = 0.314$$

$$k_w = 0.957$$

$$S = 666.66 (V.A)$$

$$D_o = 0.177 (m)$$

$$D_i = 0.10 (m)$$

$$\varphi = 0.82 (mwb)$$

$$N_{ph} = 159.1$$

$$N_{ph} \approx 160$$

$$q = 4$$

$$S_s = 48$$

$$N_{coil} = 20$$

$$a_s = 0.51 (mm^2)$$

$$\rho_{cu} = 0.0178 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$$

$$R_{ph} = 1.7 (\Omega)$$

$$y_p = 12$$

$$S_R = 45$$

$$I_b = 71 (A)$$

$$I'_b = 35.5 (A)$$

$$j_b = 17.7 (A/mm^2)$$

$$a_b = 2 (mm^2)$$

$$I_{e.ring} = 127.2 (mm^2)$$

$$r_b = 0.000356 (\Omega)$$

$$r_{ei} = 0.0028 (\Omega)$$

$$r_{eo} = 0.005 (\Omega)$$

$$R'_2 = 8.06 (\Omega)$$

$$X'_2 = 0.4212 (\Omega)$$

$$a_{cr} = 0.0002 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$X_e = 1.05 \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$X_s = 0.442 \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$X_1 = 1.492 \text{ (}\Omega\text{)}$$

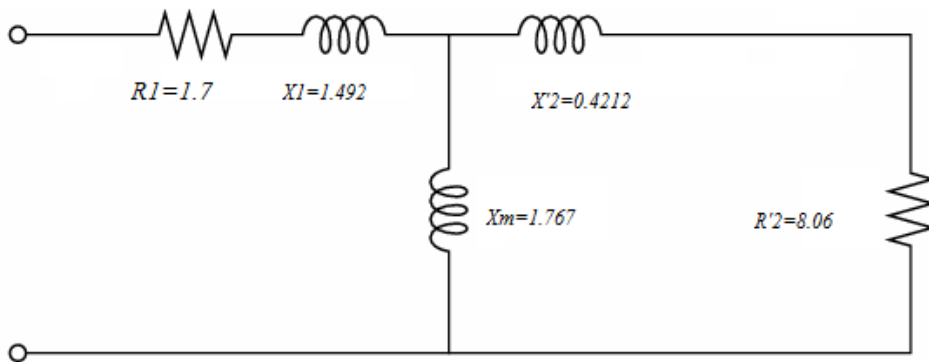
$$d_c = 1.5 \text{ (mm)}$$

$$d_{re \sin} = 2 \text{ (mm)}$$

$$l_g \approx 11 \text{ (mm)}$$

$$X_m = 1.767 \text{ (}\Omega\text{)}$$

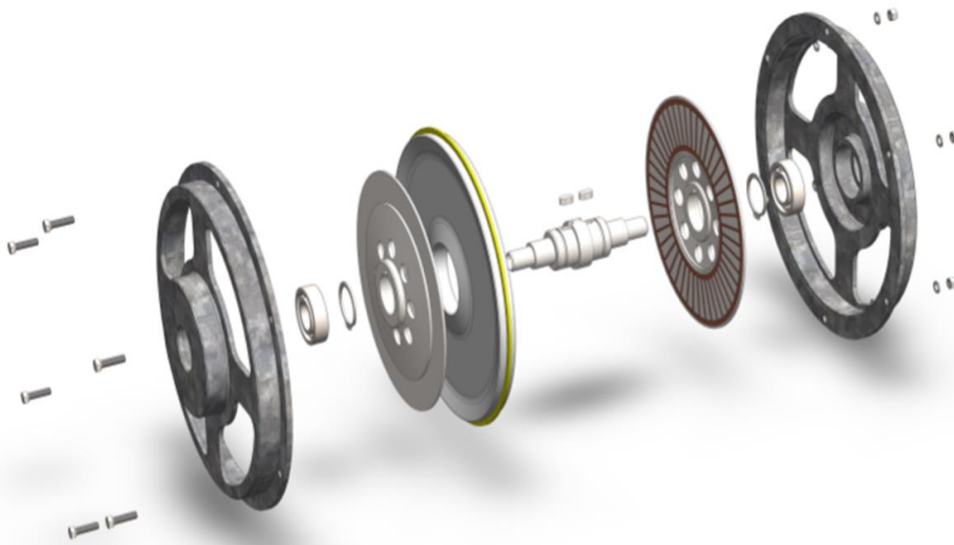
$$R_c = \infty$$



شکل ۳-۱- مدار معادل موتور

### ۳-۲- دیاگرام‌ها و نقشه‌ها

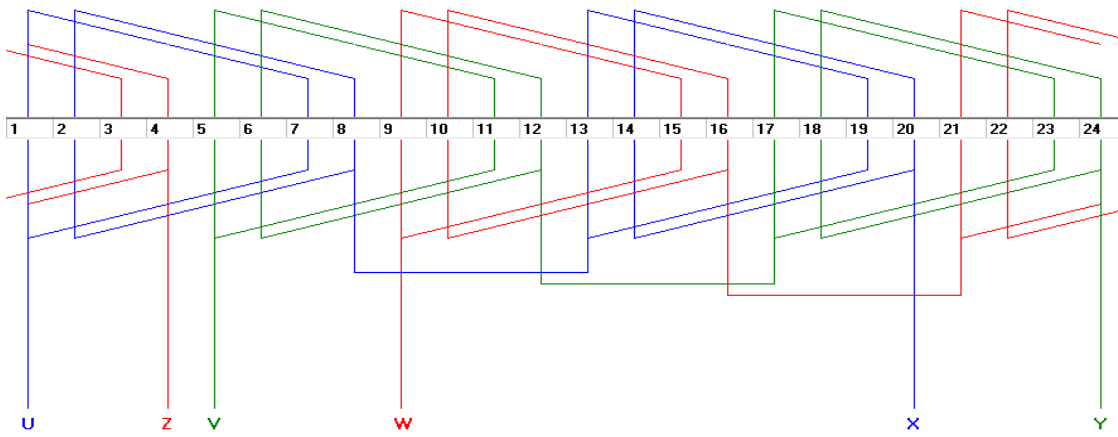
نظریه نتایج محاسبات و طراحی، لازم است نقشه‌های تمامی قطعات اعم از روتور، استاتور، درب قالب‌ها و شفت استخراج گردد. بدین منظور دیاگرام سیم‌بندی استاتور جهت تدوین دستور کاری و نقشه‌ها برای بهره‌برداری در پروسه ساخت در ادامه ارائه می‌گردد.



شکل ۳-۲- موتور القایی شار محوری با استاتور بدون هسته

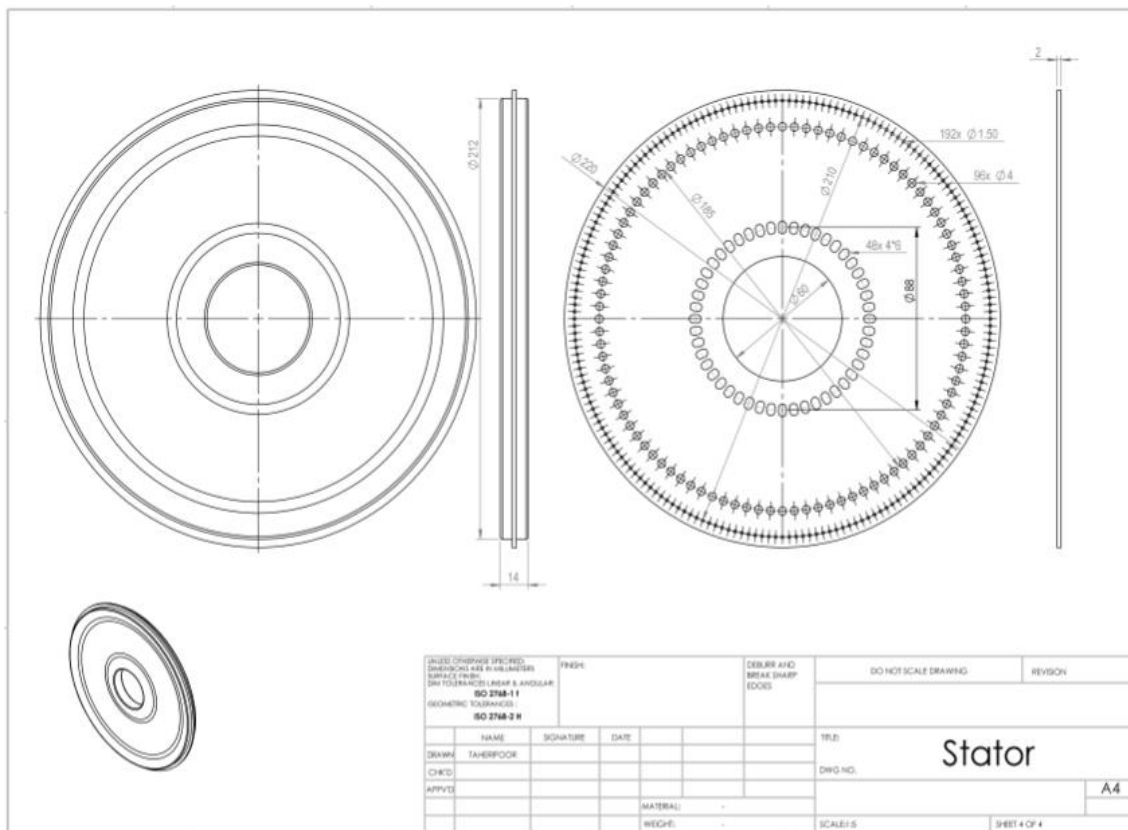
### ۳-۲-۱- دیاگرام سیم‌بندی استاتور

سیم‌بندی استاتور مورد نظر، از نوع سیم‌بندی، یک طبقه، گام مساوی، سربندی سری با اتصال ستاره بصورت شکل ۳-۳ می‌باشد.



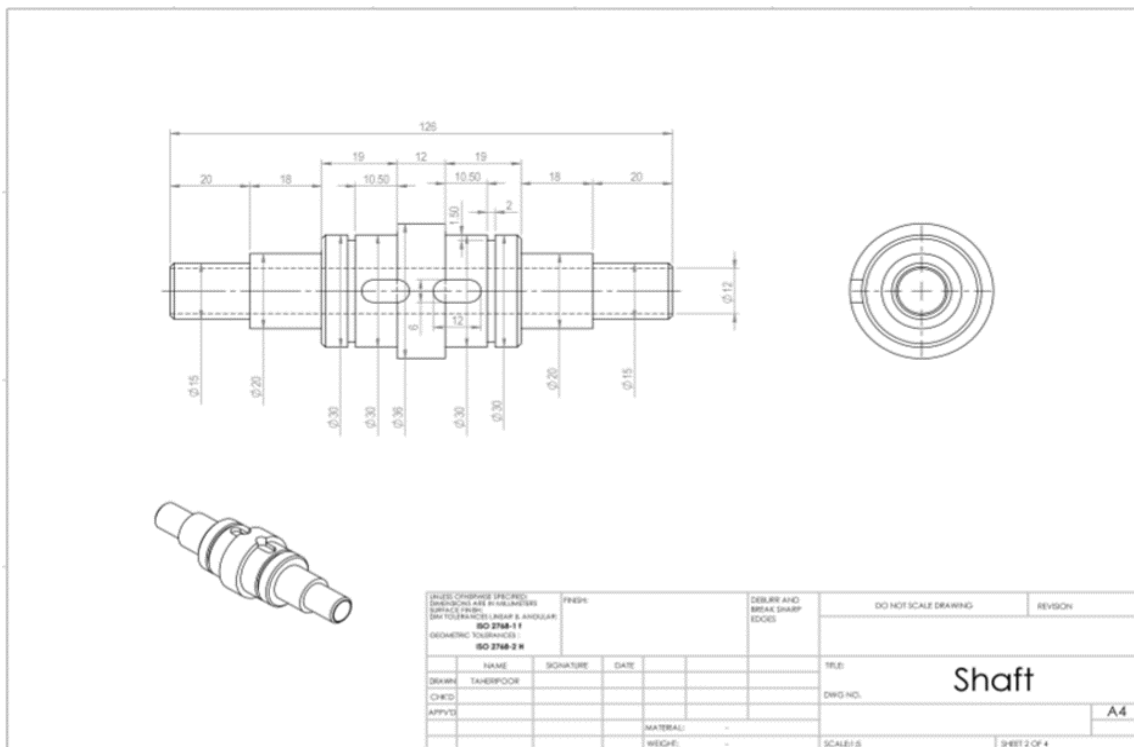
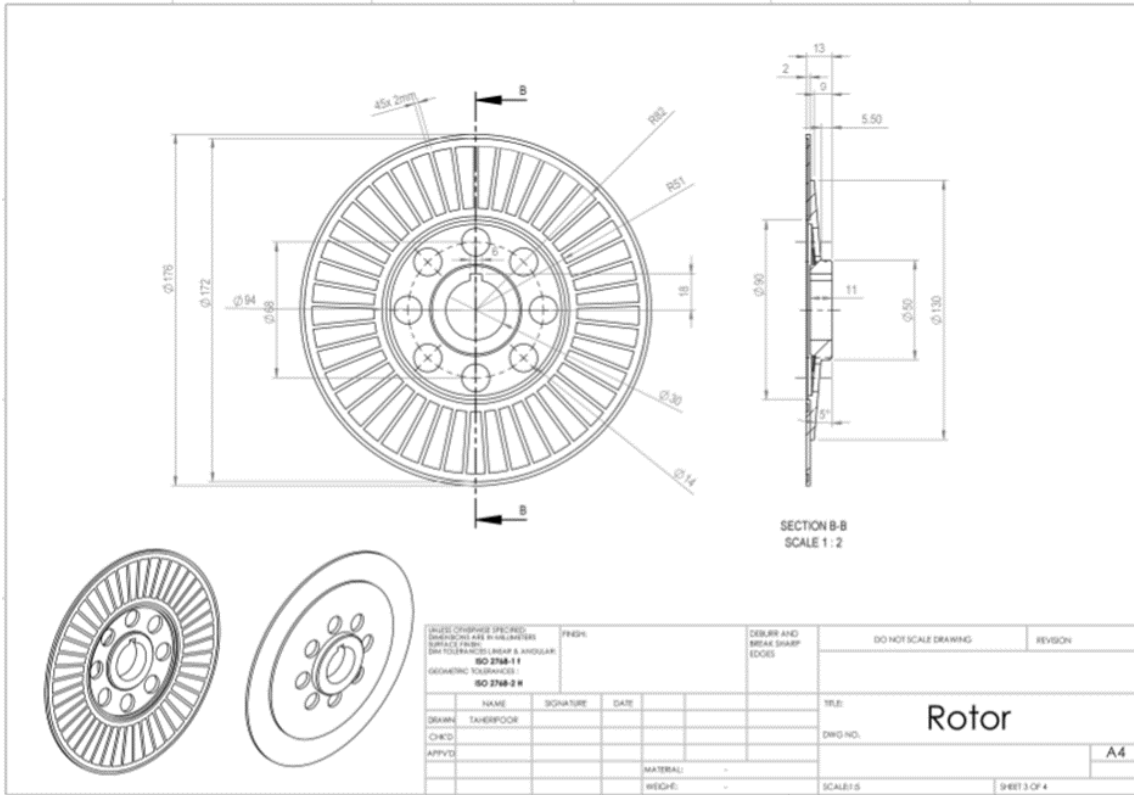
شکل ۳-۳- دیاگرام سیم‌بندی

۳-۲-۲- نقشه‌های مکانیکی استاتور

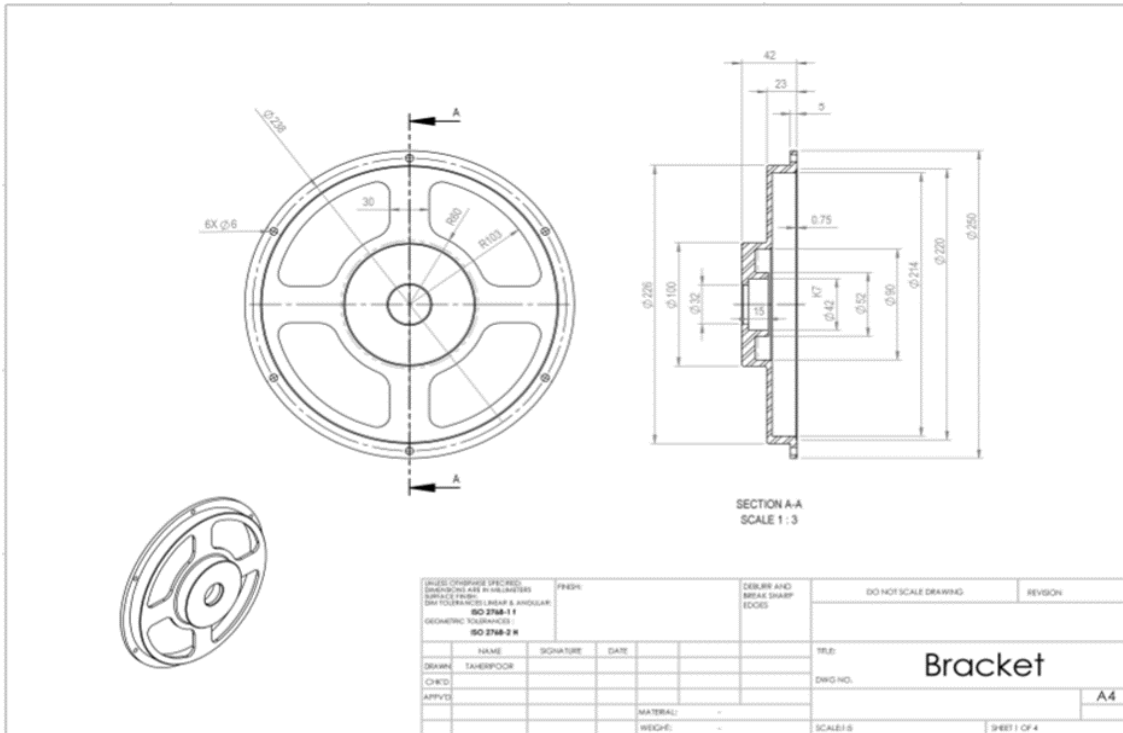




۳-۲-۳- نقشه‌های مکانیکی روتور

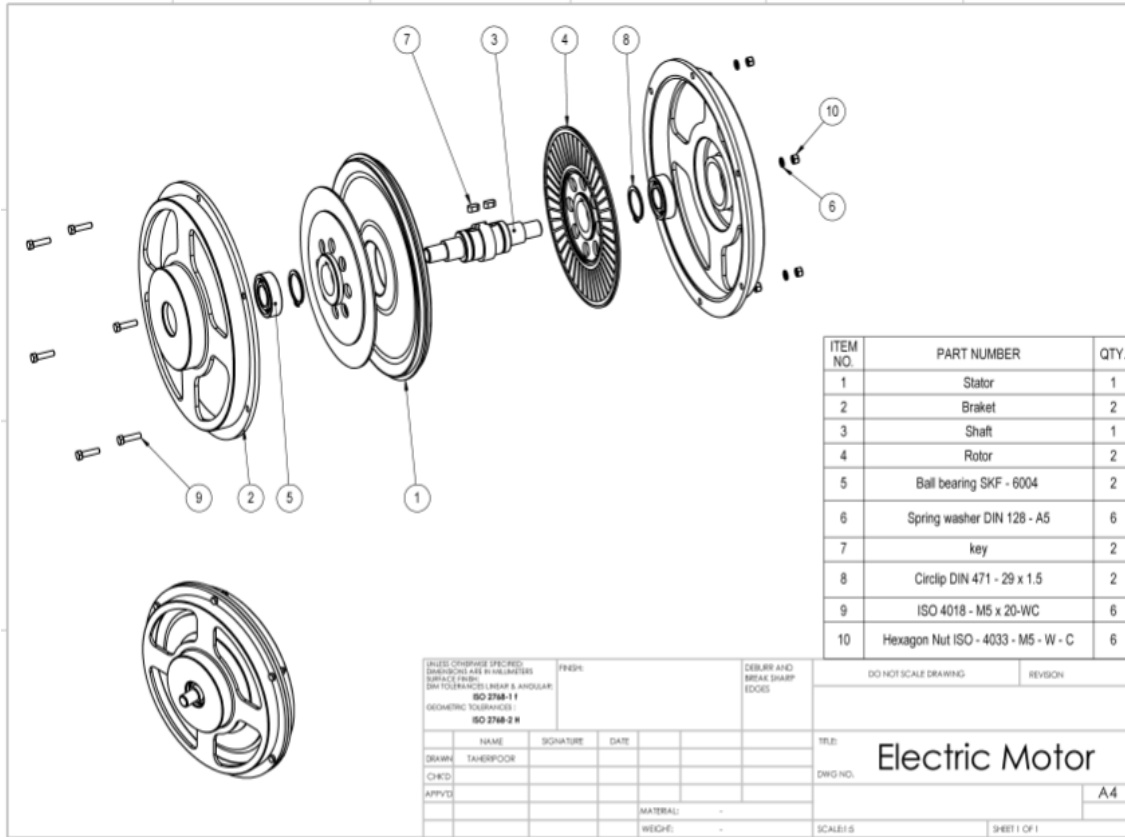


۳-۲-۴- نقشه‌های درب قالبها



۳-۲-۵- نقشه انفجاری مجموعه موتور القایی شار محوری با استاتور بدون

هسته





## فصل چهارم

### آزمایشات و تعیین پارامترهای ماشین

#### ۴-۱- نتایج آزمایشات

آزمایشات و نتایج حاصله، تنها مرجع بررسی عملکرد ماشین می‌باشند، مشروط بر اینکه دستگاه‌های اندازه‌گیری از دقت کافی برخوردار بوده و با دستگاه‌های مرجع کالیبره شده باشند. استفاده از دستگاه مناسب اندازه‌گیری هر کمیت خاص و انتخاب رنج مناسب شرط حصول به نتایج واقعی می‌باشد.

#### ۴-۱-۱- اندازه‌گیری مقاومت اهمی

جهت اندازه‌گیری مقاومت اهمی هر مدار، ساده‌ترین راه، استفاده از یک دستگاه میکرواهم‌تر می‌باشد. این دستگاه با اعمال یک ولتاژ dc به سیم‌پیچ و اندازه‌گیری ولتاژ و جریان عبوری، مقدار مقاومت dc هر فاز را اندازه‌گیری می‌نماید.

اعمال ولتاژ از منبع تغذیه جداگانه و محاسبه عددی مقاومت از قانون اهم نیز قابل استناد می‌باشد.

جدول ۴-۱- نتایج اندازه‌گیری مقاومت اهمی

|                         | U-X | V-Y | W-Z |
|-------------------------|-----|-----|-----|
| RESISTANCE ( $\Omega$ ) | 1.7 | 1.7 | 1.7 |

#### ۴-۱-۲- اندازه‌گیری مقاومت عایقی

جهت اطمینان از عدم هرگونه اتصال بین سیم‌پیچ و بدنه موتور و یا بین سیم‌پیچ‌های فازها بایستی تست مقاومت عایقی صورت گیرد. در این تست با اعمال یک ولتاژ dc بین هر فاز و بدنه، مقاومت عایقی بین آنها در ولتاژ مورد نظر، مشخص می‌گردد.

دستگاهی که این اندازه‌گیری را انجام می‌دهد مگر نام دارد. ساختمان مگرهای قدیمی از یک ژنراتور dc کوچک تشکیل شده بودند که در هنگام اعمال ولتاژ می‌بایست آرمیچر آن را توسط اهمی با سرعت ثابت به چرخش درآورد تا ولتاژ مورد نیاز تولید و اعمال گردد. بدیهی است که در سرعت‌های مختلف، ولتاژهای مختلفی در خروجی ظاهر می‌گردید. لیکن با استفاده از مدارات الکترونیکی سعی می‌شد خروجی تقریباً ثابت باشد.

در مگرهای جدید، ولتاژ مورد نیاز از طریق باتری و تقویت‌کننده‌های الکترونیکی تامین می‌گردد. مقدار ولتاژ اعمال شده جهت انجام تست مقاومت عایقی بایستی به اندازه ماکزیمم مقدار ولتاژ لحظه کلیدزنی باشد.

در موتورهای MV و HV با اندازه‌گیری مقاومت عایقی در دو زمان مختلف اندیس پلاریزاسیون عایق به دست می‌آید.

مقدار اندیس پلاریزاسیون (PI) نسبت مقاومت عایقی در ده دقیقه به همان کمیت در یک دقیقه می‌باشد. PI بین ۲ و ۴ مطلوب و قابل قبول است. مقادیر کمتر از ۲ نشانه رطوبت داشتن عایق و بالاتر از ۴ نشانه تردی و شکنندگی و خشکی بیش از حد عایق می‌باشد و در هر دو حالت اخیر غیر قابل قبول است.

جدول ۴-۲- نتایج مقاومت عایقی

|   | U-Ground | V- Ground | W- Ground |
|---|----------|-----------|-----------|
| Insulation resistance at 100 volt ( $M\Omega$ ) | $\infty$ | $\infty$  | $\infty$  |
|   | U-V      | U-W       | V-W       |
|   | 400      | 400       | 400       |

### ۴-۱-۳- آزمایش راهاندازی موتور

جهت راهاندازی الکتروموتور در ولتاژهای مختلف بایستی اندازه‌گیری ولتاژ و جریان و ضریب قدرت و سرعت به دقت انجام پذیرد.

در صورت عدم دسترسی به کسینوس فی متر می‌توان از واتمتر استفاده نمود و ضریب قدرت را از طریق رابطه ۴-۱ بدست آورد.

$$\cos\phi = P/\sqrt{3}UI$$

(۴-۱)

در موتورهای صنعتی اندازه‌گیری دما و ارتعاشات از اهمیت خاصی برخوردار است. در اینگونه موتورها با توجه به عدم دسترسی مستقیم به سیم‌پیچ‌ها از سنسورهای دمایی استفاده می‌کنند. این سنسورها با توجه به ساختارشان با افزایش دما، مقاومت آنها افزایش و یا کاهش می‌یابد که به ترتیب به آنها PTC و یا NTC می‌گویند.

جدول زیر رابطه دما با مقاومت اهمی یک نمونه سنسور PTC با نام PT-100 جهت آشنایی ارائه گردیده است.

جدول ۴-۳- مقاومت PT-100 در دماهای مختلف

| TEMP | 0   | 10  | 20        | 30        | 40        | 50        | 60        | 70        | 80        | 90        | 100       |
|------|-----|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| R    | 100 | 103 | 107.<br>7 | 111.<br>6 | 115.<br>5 | 119.<br>4 | 123.<br>2 | 127.<br>0 | 130.<br>9 | 134.<br>7 | 138.<br>5 |

اندازه‌گیری‌های انجام شده در تست‌های راهاندازی موتور القایی سه فاز شار محوری با استاتور بدون هسته به صورت زیر می‌باشد.



جدول ۴-۴- نتایج راه‌اندازی موتور نمونه

|         | 1    | 2   | 3     | 4   | 5   | 6    | 7   | 8    | 9    | 10   |
|---------|------|-----|-------|-----|-----|------|-----|------|------|------|
| U (V)   | 10.8 | 15  | 19.95 | 24  | 28  | 32.6 | 38  | 43   | 45   | 48.1 |
| I (A)   | 1.9  | 2.6 | 3.4   | 4.2 | 4.7 | 5.3  | 6   | 6.9  | 7    | 7.2  |
| F (Hz)  | 50   | 50  | 50    | 50  | 50  | 50   | 50  | 50   | 50   | 50   |
| P (W)   | 20   | 25  | 45    | 70  | 87  | 140  | 140 | 180  | 200  | 290  |
| N (RPM) | 38   | 116 | 238   | 388 | 422 | 654  | 823 | 1154 | 1380 | 1451 |

#### ۴-۲- تخمین پارامترهای مدار معادل

هدف از انجام آزمایشات روی ماشین القایی شار محوری با استاتور بدون هسته، تعیین پارامترهای مدار معادل ماشین بوده تا از این طریق رفتار ماشین در حالت‌های مختلف قابل بررسی گردد.

پارامترهای مدار معادل یک موتور القایی شامل مقاومت اهمی و راکتانس نشتی استاتور، راکتانس مغناطیسی‌کنندگی، مقاومت مغناطیسی هسته، مقاومت اهمی و راکتانس نشتی روتور می‌باشند. در موتور ساخته شده بخاطر حذف هسته استاتور مقاومت مغناطیسی هسته بی‌نهایت می‌باشد.

برای بدست آوردن مقادیر فوق کافی است، موتور تحت آزمایش بی‌باری و روتور قفل قرار گرفته و با استفاده از نتایج بدست آمده پارامترهای مدار معادل محاسبه گردند.

لیکن با توجه به توان پایین موتور ساخته شده، این تجهیز هیچگاه در شرایط واقعی بدون بار نخواهد بود، چون وزن روتور و متعلقات مربوطه به آن بار محسوب می‌گردد.

لذا جهت انجام این کار موتور را در ولتاژها و لغزشهای مختلف تست کرده و نتایج آن را با مقایسه با مقادیر تحلیلی و استفاده از روش حداقل مربعات خطا با کمک نرم افزار MATLAB مورد بررسی قرار می دهیم. پارامترهای بدست آمده از این روش بسیار نزدیک به واقعیت می باشند. سپس با کمک برنامه شبیه سازی نرم افزار MATLAB پارامترها را در مدار معادل قرار داده ولتاژ نامی به آن اعمال می شود. بدست آوردن مقادیر جریان و ضریب قدرت مشابه اعداد بدست آمده از اندازه گیری های تجربی، نشانه حصول اطمینان از صحت پارامترهای مدار معادل دارد.

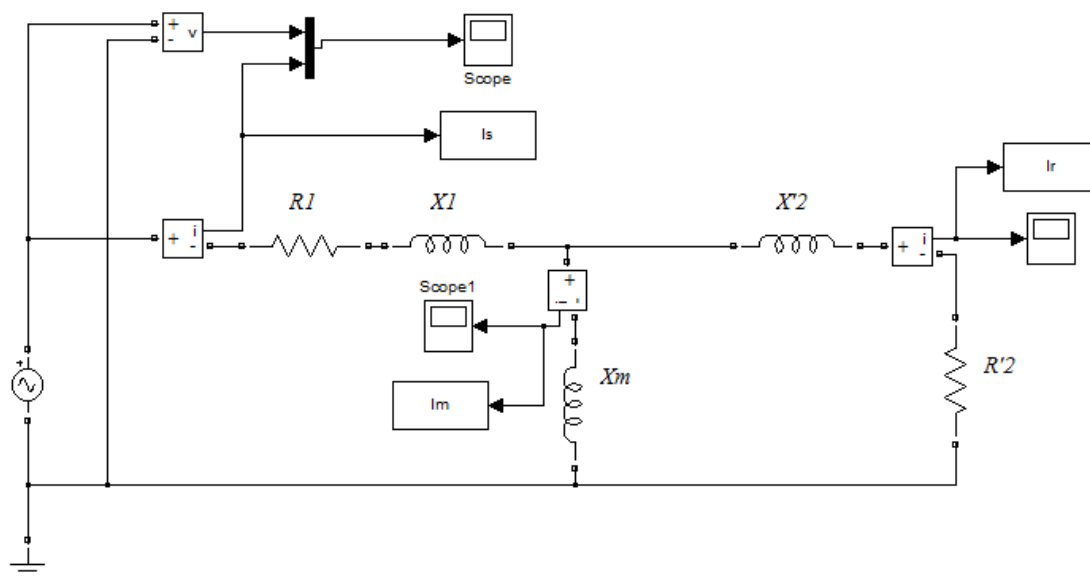
نتایج ارائه شده در ادامه، پارامترهایی هستند که با روش مینیمم مربعات خطا از طریق نرم افزار MATLAB برداشت گردیده اند.

جدول ۴-۵- پارامترهای مدار معادل حاصل از آزمایش

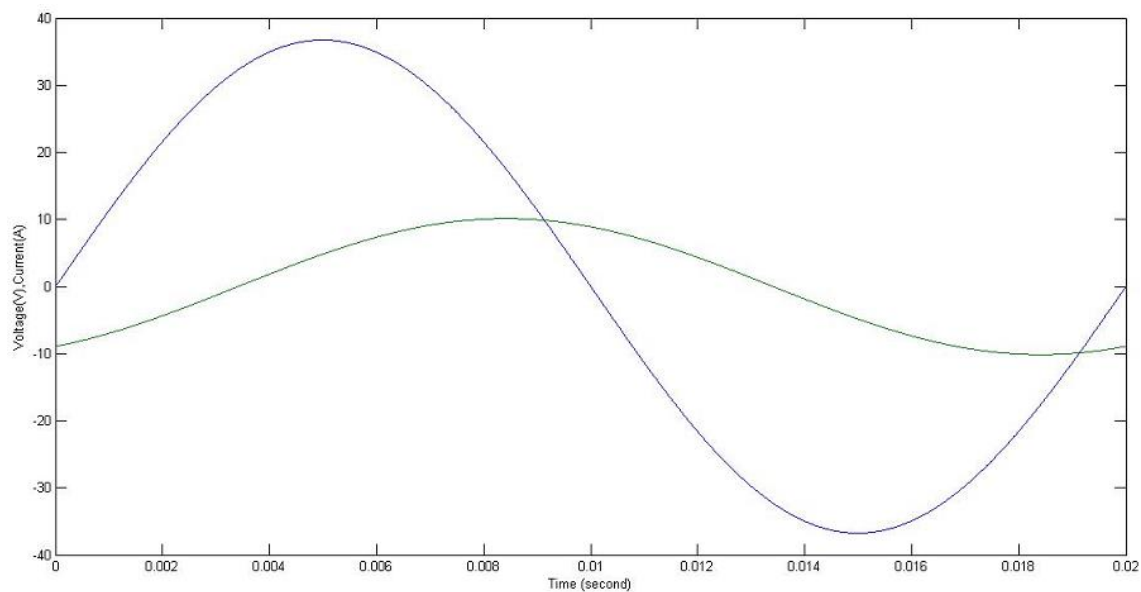
|                    | $R1$ | $X1$   | $Xm$   | $R'2$ | $X'2$  |
|--------------------|------|--------|--------|-------|--------|
| Value ( $\Omega$ ) | 1.7  | 1.4652 | 1.7217 | 8.064 | 0.4062 |

نظر به اینکه مدار روتور شامل دو عدد روتور مجزا می باشد، پارامترهای بدست آمده برای روتور در واقع معادل دو مسیر موازی روتورها است.

حال جهت اطمینان از نتایج بدست آمده آنها را در مدار شبیه سازی زیر قرار داده و مقادیر جریان و ضریب قدرت را بازای ولتاژ اعمالی متناظر با ولتاژ زمان تست اندازه گیری می گردد.



شکل ۴-۱- مدار معادل جهت شبیه‌سازی موتور ساخته شده



شکل ۴-۲- منحنی ولتاژ و جریان

همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار موثر جریان بی‌باری موتور و ضریب قدرت بی‌باری حاصل از جایگذاری پارامترهای آزمایشاتی تقریباً با نتایج تست‌ها برابری می‌کند.

$$I = 7.21(A) \quad \cos \phi = 0.536$$

#### ۴-۲-۱- مقایسه پارامترهای مدار معادل حاصل از روش تحلیلی و آزمایشات

در محاسبات پارامترهای مدار معادل، چون مقاومت اهمی استاتور از قانون اهم بدست می‌آید، نتایج در هر دو حالت کاملاً برابر هستند، لیکن روابط مورد استفاده جهت بدست آوردن راکتانس‌ها با تقریب بوده که اختلاف موجود نیز به همین خاطر است.

جدول ۴-۶- مقایسه پارامترهای مدار معادل حاصل از روش تحلیلی و آزمایشات

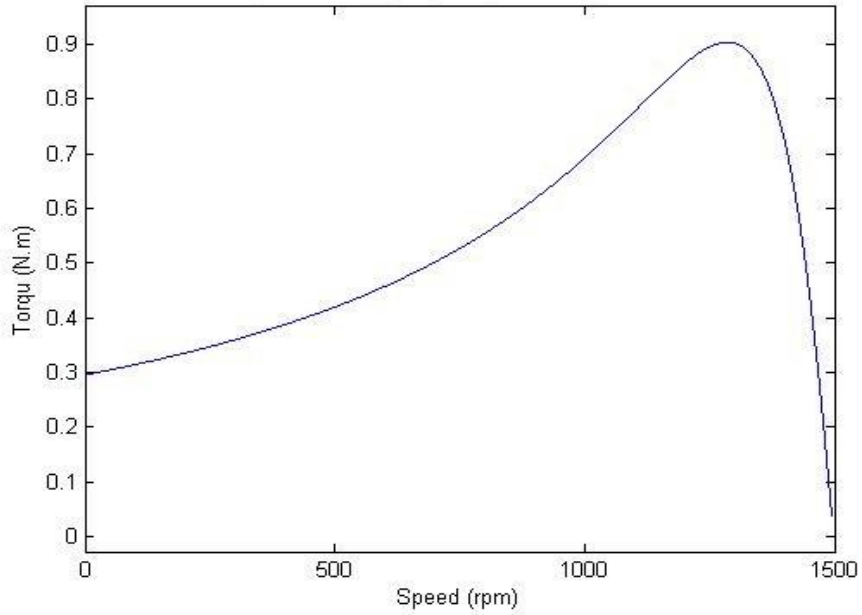
|           | R1  | X1     | X m    | R'2   | X'2    |
|-----------|-----|--------|--------|-------|--------|
| محاسباتی  | 1.7 | 1.44   | 1.767  | 8.06  | 0.4212 |
| آزمایشاتی | 1.7 | 1.4652 | 1.7217 | 8.064 | 0.4062 |

#### ۴-۳- مشخصه‌های عملکردی ماشین

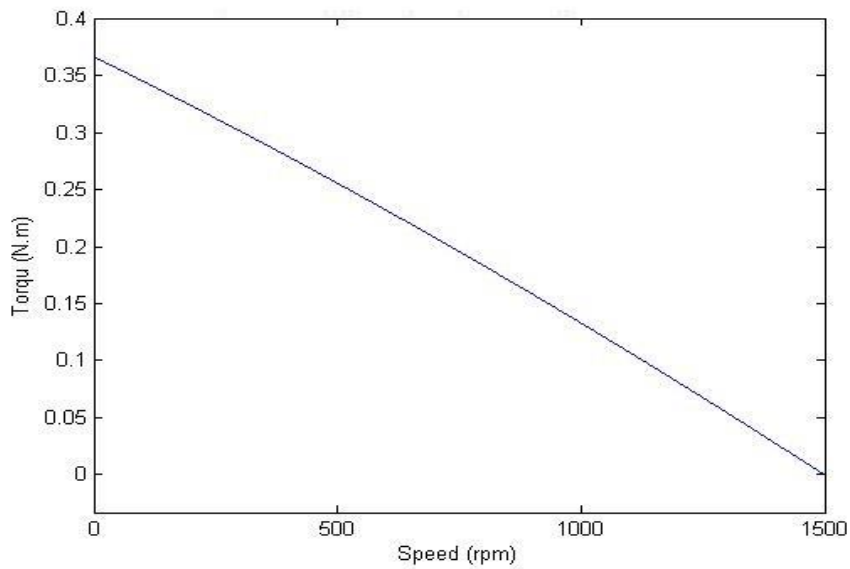
پس از آنکه مدار معادل دو روتور القایی شار محوری با استاتور بدون هسته نهایی گردید، با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار MATLAB و دادن اطلاعات ورودی در روابط مربوطه، برخی مشخصه‌های عملکرد ماشین را دریافت کرده تا نسبت به تحلیل پروژه ماشین ساخته شده اشراف بیشتر حاصل گردد و نهایتاً بتوان با تحلیل آنها نسبت به رفع کاستی‌ها اقدام نمود.

مشخصه‌های گشتاور، توان و جریان نسبت به سرعت در بخش‌های زیر به دو صورت ارائه گردیده است. شکل (الف) در هر بخش نمایانگر مشخصه مذکور با مقاومت روتوری حدود ۱۰ درصد معادل حالت واقعی، و شکل (ب) هر بخش مشخصه مورد نظر با مقدار واقعی مقاومت روتور جهت تسهیل در مقایسه ارائه شده است.

۴-۳-۱- مشخصه گشتاور-سرعت



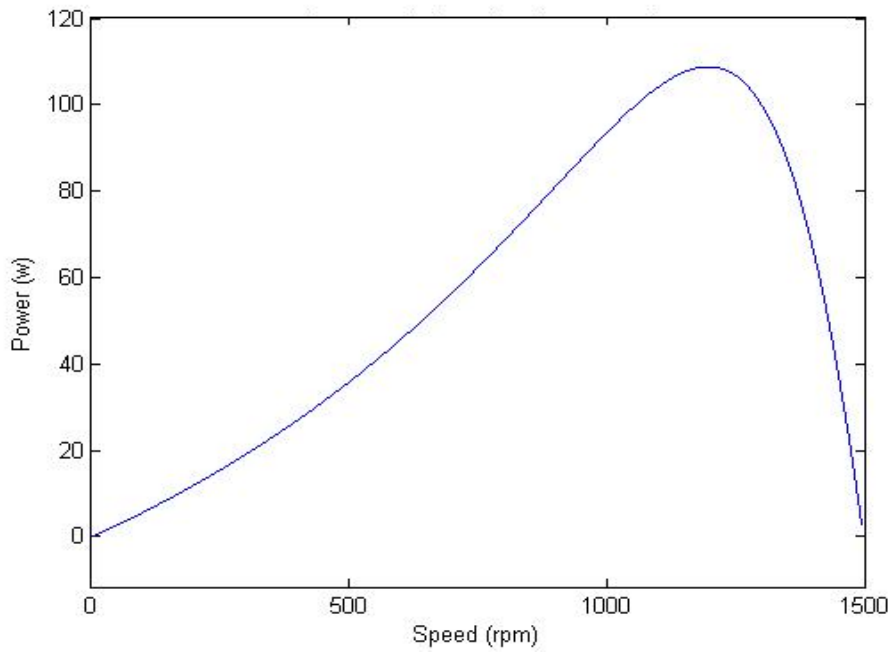
(الف)



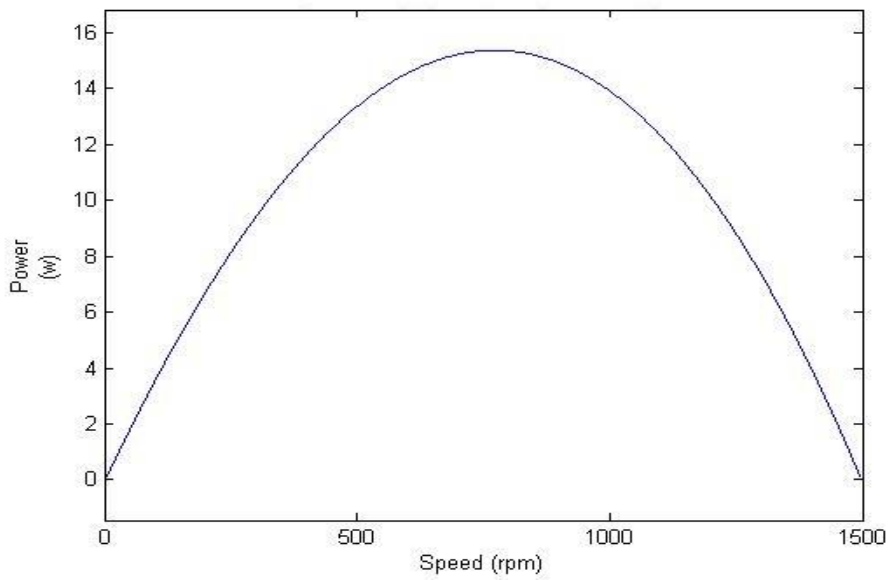
(ب)

شکل ۴-۳- منحنی گشتاور لغزش

۴-۳-۲- مشخصه توان - سرعت



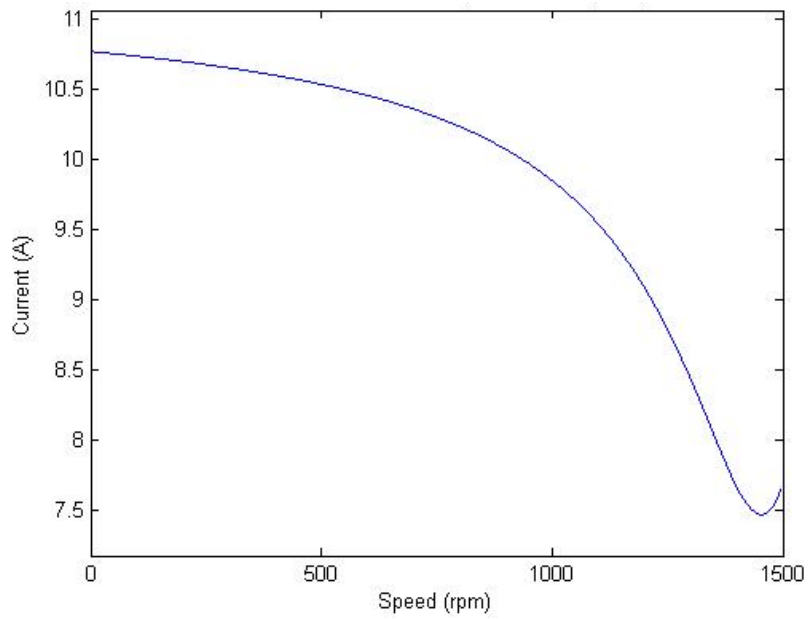
(الف)



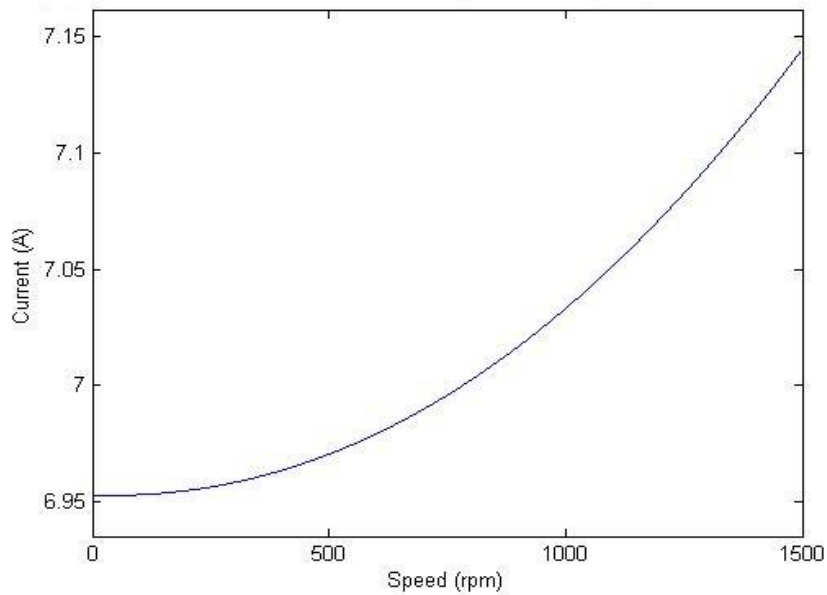
(ب)

شکل ۴-۴- منحنی توان سرعت موتور ساخته شده

۴-۳-۳- مشخصه جریان - سرعت



(الف)



(ب)

شکل ۴-۵- منحنی مشخصه جریان سرعت موتور ساخته شده





فصل پنجم

نتیجه گیری

## ۵-۱- مرور و نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پایان‌نامه مدلسازی، طراحی و ساخت یک موتور القایی شار محوری سه فاز با استاتور بدون هسته بود. در فرآیند انجام این کار ابتدا انواع ماشین‌های الکتریکی به اختصار معرفی شده و ساختمان موتورهای القایی یادآوری گردید.

شناخت ماشین‌های شار محوری و انواع ساختارهای آن و همچنین کاربرد، پیچیدگی‌ها و مشکلات ساخت و مزایا و معایب ماشین‌های القایی شار محوری با استاتور بدون هسته به استناد تحقیقات و مقالات علمی ثبت شده در مجامع بین‌المللی به عنوان مقدمه پایان‌نامه بیان شد.

در ارائه این پایان‌نامه، تأکید بر بررسی و نحوه فائق آمدن بر مشکلات موجود در مسیر ساخت آن، تکنولوژی ساخت استاتور بدون هسته و معرفی موادی با قابلیت نفوذپذیری مغناطیسی هوا و معرفی رزین‌های تثبیت‌کننده و همچنین نحوه ساخت روتور دیسکی از موضوعات موکد در این تحقیق بوده است. این موضوعات به نحوی کاربردی به همراه جداول قابل استناد و اشکال واقعی در فصل دوم بیان گردید.

همچنین در ادامه، طراحی مکانیکی، تبیین الگوریتم و محاسبات و طراحی یک نمونه موتور القایی جهت ساخت و اجرا ارائه گردیده است.

در فصل چهارم انجام آزمایشات مربوط به تست و راه‌اندازی ماشین و تعیین پارامترهای مدار معادل ماشین با دقت صورت گرفته و با کمک نرم‌افزار MATLAB تمامی داده‌ها و نتایج شبیه‌سازی گردیده و با اخذ جواب‌های اطمینان‌بخش و قابل قبول، طراحی صحنه‌گذاری گردید.

## ۵-۲- بررسی طرح و مزایا و معایب آن

موتورهای شار محوری دارای گشتاور راه‌اندازی بالا، جریان راه‌اندازی کم، مشخصه مکانیکی نرم و استحکام حرارتی بالا هستند [۲۴].

حذف تلفات هسته به عنوان بالاترین مزیت، ماشین مذکور را جهت ورود به عرصه موتورهای القایی با سرعت‌های چند ده هزار دور در دقیقه آماده می‌کند. تراکم گشتاور و سبکی وزن از دیگر مزایای این موتورها بوده و کاهش هزینه تمام شده آن نسبت به موتورهای مشابه قابل تامل می‌باشد.

در ساخت موتور به جهت حساسیت و دقت بالای پروسه ساخت روتور، جایگذاری روتوربارها و رینگ‌های انتهایی نیاز به ابزار خاص داشته که مورد استفاده عمومی در صنعت نمی‌باشد. به علاوه فاصله هوایی زیاد می‌تواند به عنوان عیب ماشین مطرح گردد. هرچند که این موارد برای کاربردهایی خاص نیز می‌تواند به عنوان مزایای آن به حساب می‌آیند.

## ۵-۳- مقایسه با ماشین‌های ساخته شده مشابه

موتورهای القایی شار محوری با روتور یکپارچه دارای طول محوری کوتاه‌تر از ماشین‌های دیگر بوده و از نظر اقتصادی بصره‌تر هستند. این موتورها به شدت به فاصله هوایی حساس بوده و دارای چگالی قدرت مطلوب می‌باشند [۲۵].

موتورهای AFPM که می‌توانند با گشتاور کم و راندمان بالا کار کنند، ویژگی‌های مناسبی در میان دیگر تجهیزات شار محوری دارند و از آنجا که این ماشین‌ها فاصله هوایی بزرگی دارند، هسته‌های آنها هیچگاه به اشباع نمی‌روند و برای راه‌اندازی با درایوها مناسب هستند [۲۶]. بزرگترین نقطه ضعف این موتورها، نیاز آنها به آهنربای دائمی قوی است [۲۷].

نظر به اینکه اولین موتور ساخته شده، یک موتور شار محوری بوده و انواع ماشین‌های AFPM, AFIM, و شار محوری هیستریزیس نیز مورد مطالعه و ساخت نیز قرار گرفته‌اند، لیکن بنا به بررسی‌های نویسنده هیچ گزارش مستندی در مورد ساخت موتور القایی شار محوری سه فاز روتور قفسی با استاتور بدون هسته، گزارش نشده است، لذا از حیث سبکی وزن و کاهش تلفات آهنی بخاطر حذف هسته ویژگی‌های منحصر بفردی را به خود اختصاص داده است.

در موتورهای القایی شار محوری با توجه به ساختار روتور، احتیاج به هیچ راه‌اندازی نداشته و تعمیرات و نگهداری آن به مراتب ساده‌تر خواهد بود. موارد فوق‌الذکر باعث می‌شود ساخت این نوع موتورها نسبت به انواع دیگر از نظر اقتصادی مقرون بصرفه‌تر باشد.

#### ۵-۴- پیشنهادات جهت بهینه‌سازی طرح ارائه شده

طرح ارائه شده به اندازه علوم قابل دستیابی در آینده، قابل ارتقاء و بهینه‌سازی می‌باشد.

استفاده از هسته موق در روتور و کاهش فاصله هوایی موجود در ماشین، اولین موضوعاتی خواهند بود که در بهبود نوع ساخته شده این ماشین موثر خواهند بود. همچنین استفاده از روتورهای با سطح مقطع بالاتر و ضخامت هسته بیشتر، می‌توانند تلفات را در این ماشین تا حد زیادی کاهش دهند.

اضافه کردن انواع کولینگ جهت خنک‌کاری مناسب ماشین و مهار محیط داخلی استاتور به جهت جلوگیری از تغییر شکل در هنگام افزایش دمای استاتور و کنترل محیط خارجی روتور به وسیله یاتاقان‌های روتور از جمله موارد قابل تحقیق در این زمینه می‌باشد.

امید آنکه با تحقیقات و تخصیص پتانسیل بیشتر در جهت ارتقاء و رفع عیوب این تجهیز، زمینه برای ورود این ماشین به صنایع کشور در راستای خدمت‌گذاری به میهن عزیزمان مهیا گردد.

پیوست‌ها

## پیوست ۱

محاسبات موتورسه فاز ۳۰ وات، ۴۸ ولت با سرعت ۱۴۸۵ دور در دقیقه

$$P = 30 \text{ (w)}$$

$$U = 48 \text{ (v)}$$

$$I = 7.5 \text{ (A)}$$

$$N = 1485 \text{ (rpm)}$$

$$P.F = 0.54$$

$$\text{Efficiency} = 10 \%$$

$$AC = 12000$$

$$k_d = 0.55$$

$$B_{mg} = 0.314$$

$$k_w = 0.957$$

$$S = P_2 / \eta * \cos \varphi$$

$$S = \frac{30}{0.10} * 0.54 = 666.66 \text{ (V.A)}$$

$$K_D = \frac{1}{8} * (1 + K_d) * (1 - K_d^2)$$

$$K_D = \frac{1}{8} * (1 + 0.55) * (1 - 0.55^2) = 0.13514$$

$$S = \pi^2 * K_D * K_w * N_s * B_{mg} * AC * D_o^3$$

$$D_o = \sqrt[3]{\left( \frac{S}{\pi^2 * K_D * K_W * N_s * B_{mg} * AC} \right)}$$

$$D_o = \sqrt[3]{\left( \frac{666.666}{\pi^2 * 0.13514 * 0.957 * 25 * 0.314 * 10000} \right)}$$

$$D_o = 0.177 (m)$$

$$D_i = K_d * D_o$$

$$D_i = 0.55 * 0.18 = 0.10 (m)$$

$$\varphi = Bav * \left( \frac{\pi (D_o^2 - D_i^2)}{4P} \right)$$

$$\varphi = \left( 2 * \frac{0.314}{\pi} \right) * \left( \frac{\pi (0.18^2 - 0.10^2)}{4 * 4} \right) = 0.82 (mwb)$$

$$N_{ph} = \frac{V_{ph}}{4.44 * \varphi * 50 * K_w} = \frac{48}{\sqrt{3} * 4.44 * 0.00082 * 50 * 0.957} = 159.1$$

$$N_{ph} \approx 160$$

$$q = 4$$

$$S_s = q * P * m = 4 * 4 * 3 = 48$$

$$n_{coil} = 48 * 1/2 = 24$$

$$n_{coil/ph} = \frac{n_{coil}}{m} = \frac{24}{3} = 8$$

$$N_{coil} = N_{ph} / n_{coil/ph} = 160 / 8 = 20$$

$$l = (2l + l_o + l_i) = (2 * 0.04 + 0.14 + 0.0785) = 47.7 (m)$$

$$a_s = I_{ph} / j = \frac{3.6}{7} = 0.51 (\text{mm}^2)$$

$$\rho_{cu} = 0.0178 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$R_{ph} = \rho \frac{l}{A} = 0.0178 * \frac{47.7}{0.51} = 1.7 (\Omega)$$

$$\gamma = \frac{180 * P}{S} = 180 * \frac{4}{48} = 15$$

$$k_D = \frac{\sin(qn\gamma/2)}{q \sin\left(\frac{n\gamma}{2}\right)}$$

$$k_D = \frac{\sin(4 * 15 / 2)}{4 \sin\left(\frac{15}{2}\right)} = 0.957$$

$$k_e = \sin\left(\frac{n\varepsilon_o}{2}\right) = 1$$

$$k_w = k_D \times k_e = 0.957$$

$$y_p = \frac{s_s}{P} = \frac{48}{4} = 12$$

$$U = 1$$

$$V = S_R + \frac{120}{\alpha_{ez}} = 1 + \frac{120}{15} = 9$$

$$W = S_R + \frac{240}{\alpha_{ez}} = 1 + \frac{240}{15} = 17$$



|   | R  |    |    |    | T  |    |    |    | S  |    |    |    |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| N | ۱  | ۲  | ۳  | ۴  | ۵  | ۶  | ۷  | ۸  | ۹  | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ |
| S | ۱۳ | ۱۴ | ۱۵ | ۱۶ | ۱۷ | ۱۸ | ۱۹ | ۲۰ | ۲۱ | ۲۲ | ۲۳ | ۲۴ |
| N | ۲۵ | ۲۶ | ۲۷ | ۲۸ | ۲۹ | ۳۰ | ۳۱ | ۳۲ | ۳۳ | ۳۴ | ۳۵ | ۳۶ |
| S | ۳۷ | ۳۸ | ۳۹ | ۴۰ | ۴۱ | ۴۲ | ۴۳ | ۴۴ | ۴۵ | ۴۶ | ۴۷ | ۴۸ |

$$S_s - S_R \neq 3kp \quad \pm 12, \pm 24, \pm 36$$

$$S_s - S_R \neq P, 2P, 5P \quad \pm 4, \pm 8, \pm 12, \pm 16, \pm 20$$

$$S_s - S_R \neq 1, 2, P+1, P+2 \quad \pm 1, \pm 2, \pm 5, \pm 6$$

$$S_R = 45$$

$$2m \times N_{PH} \times K_{WS} \times I_S = V_b \times K_{Wr} \times I_b$$

$$2 \times 3 \times 160 \times 0.924 \times 5 = 45 \times 1 \times I_b$$

$$I_b = 71(A)$$

$$I'_b = 35.5(A)$$

$$j_b = 17.7 \text{ (A/mm}^2\text{)}$$

$$a_b = \frac{35.5}{17.7} = 2 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$I_{e.ring} = I_b \frac{N_b}{\pi P} = 35.5 * \frac{45}{\pi * 4} = 127.2 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$j_{e.r} = 63 \text{ (A/mm)}$$

$$a_{e.r} = \frac{127.2}{63} = 2(\text{mm}^2)$$

$$r_b = \frac{\rho L_b}{a_b} = \frac{0.0178 * 0.04}{2} = 0.000356 (\Omega)$$

$$r_{ei} = \rho \frac{\pi D_{ei}}{a_{ei}} = \frac{0.0178 * \pi * 0.1}{2} = 0.0028 (\Omega)$$

$$r_{eo} = \rho \frac{\pi D_{eo}}{a_{eo}} = \frac{0.0178 * \pi * 0.18}{2} = 0.005 (\Omega)$$

$$R_e = r_{ei} + r_{eo}$$

$$R_2' = \frac{4m}{n_b} (N_{ph} K_w)^2 \left( R_b + \frac{2R_e n_b}{p^2 \pi^2} \right)$$

$$R_2' = \frac{4 * 3}{45} (160 * 0.957)^2 \left( 0.000356 + \frac{0.0078 * 45}{16 * \pi^2} \right) = 16.12 (\Omega)$$

$$R_2' = \frac{16.12}{2} = 8.06 (\Omega)$$

$$q_r = \left( \frac{s_r}{s_s} \right) q = \frac{45}{48} * 4 = 3.75$$

$$X_2' = \frac{8\pi f \mu_0 L (N_{ph} K_w)^2}{p q_r} \left( \frac{S_s}{S_r} \right) P = \frac{8\pi * 50 * 4\pi * 10^{-7} * 0.04 * (160 * 0.957)^2}{4 * 3.75} * \frac{48}{45} * 4$$

$$X_2' = 0.4212 (\Omega)$$

$$\varphi_{cr} = \frac{\varphi}{2} = 0.00082 / 2 = 0.00041 (\text{wb})$$

$$a_{cr} = \frac{\varphi_{cr}}{B_{cr}} = 0.00041 / 2 = 0.0002 (\text{m}^2)$$

$$d_{cr} = \frac{a_{cr}}{l_r} = 0.0002 / 0.04 = 0.005 (\text{m})$$

$$X_1 = X_s + X_e$$

$$X_e = \frac{8\pi F \mu_0 (N_{ph} K_{ws})^2}{P} \times \frac{3.75}{2\pi} * (2l_{e1} + l_{e2})$$

$$X_e = \frac{8\pi \times 50 \times 4\pi \times 10^{-7} (160 \times 0.924)^2}{4} \times \frac{3.75}{2\pi} \times (2 \times 0.01 + 0.17)$$

$$X_e = 0.9784 (\Omega)$$

$$X_s = X_e * (2L / l_{e1}) = 0.9784 * \left( \frac{0.08}{0.17} \right) = 0.46 (\Omega)$$

$$X_1 = X_s + X_e = 0.9784 + 0.46 = 1.44 (\Omega)$$

$$d_w = (S_s * N_{coil} * d_s) / \pi D_i$$

$$d_w = (48 * 20 * 0.80) / (\pi * 100) = 2.45 (mm)$$

$$d_w \approx 2.50 (mm)$$

$$l_g = g + d_c + d_w + d_{re \sin} + (\zeta * D_o / 2)$$

$$d_c = 1.5 (mm)$$

$$d_{re \sin} = 2 (mm)$$

$$\zeta = 0.01 (mm)$$

$$l_g = 4 + 1.5 + 2.5 + 2 + (0.01 * 180 / 2) = 10.9 (mm)$$

$$l_g \approx 11 (mm)$$

$$X_m = \frac{3\pi f (N_{ph} K_w)^2 \mu_0 (D_o^2 - D_i^2)}{P^2 g}$$

---

$$X_m = \frac{3\pi * 50(160 * 0.957)^2 \mu_0 (0.18^2 - 0.10^2)}{16 * 0.11} = 1.767 (\Omega)$$

$$R_c = \infty$$

## پیوست ۲

الف) برنامه محاسبه و ترسیم گشتاور، توان و جریان بر سرعت در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار Matlab

```
f=50;

Vs.=48;

c=f/50;

R_stator=1.7;

X_stator=1.44*c;

X_mag=1.7214*c;

X_rotor=0.4062*c;

R_rotor=8.064;

Data;

syms n ss pm te i2;

ss=(1500*c-n)/(1500*c);

Req=(1/((R_stator)^2+(X_stator+X_mag)^2))*(X_mag*R_stator*(X_mag+X_stator)-
X_mag*X_stator*R_stator);

Xeq=(1/((R_stator)^2+(X_stator+X_mag)^2))*(X_mag*R_stator^2+X_mag*X_stator*
(X_mag+X_stator));

Veq=(Vs/sqrt(3))*X_mag/sqrt(R_stator^2+(X_stator+X_mag)^2);

te=(1/50/pi)*((3*Veq^2*R_rotor/ss)/((Req+R_rotor/ss)^2+(Xeq+X_rotor)^2));

i2=Veq/sqrt((Req+R_rotor/ss)^2+(Xeq+X_rotor)^2);

i1=(Vs/sqrt(3))/sqrt((R_stator+(1/((R_rotor/ss)^2+(X_mag+X_rotor)^2))*(X_mag^2*R
_rotor/ss))^2
+(X_stator+(1/((R_rotor/ss)^2+(X_mag+X_rotor)^2))*(X_mag*(R_rotor/ss)^2+X_mag*
X_rotor*(X_mag+X_rotor)))^2);

pm=(3/ss)*(1-ss)*R_rotor*i2^2;
```

---

```

ezplot(pm,[0,1500*c]);

ezplot(te,[0,1500*c]);

ezplot(i1,[0,1500*c]);

```

ب) برنامه حداقل مربعات خطا در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار Matlab

```

clear all

format long;

A=-1*eye(4);

B=[-0.00001;-0.00001;-0.00001;-0.00001]; %inequality constraints are in linear form:
A*x<=b

for ii=1:100

x0=[0.001+0.01*(ii-1);0.001+0.01*(ii-1);0.001+0.01*(ii-1);0.001+0.01*(ii-1)];

%start points

options = optimset('Display','iter','Algorithm','interior-point'); %The algorithm can be
either 'trust region reflective' or 'active-set' or 'sqp' or 'interior-point'

[x,fval] = fmincon(@ggg,x0,A,B,[],[],[],1.5;10;0.6;9),[],options);

%R1(ii)=x(1);

X1(ii)=x(1);

Xm(ii)=x(2);

X2(ii)=x(3);

R2(ii)=x(4);

error(ii)=fval;

end

%R_stator=mean(R1);

```

$X_{\text{stator}} = \text{mean}(X1);$

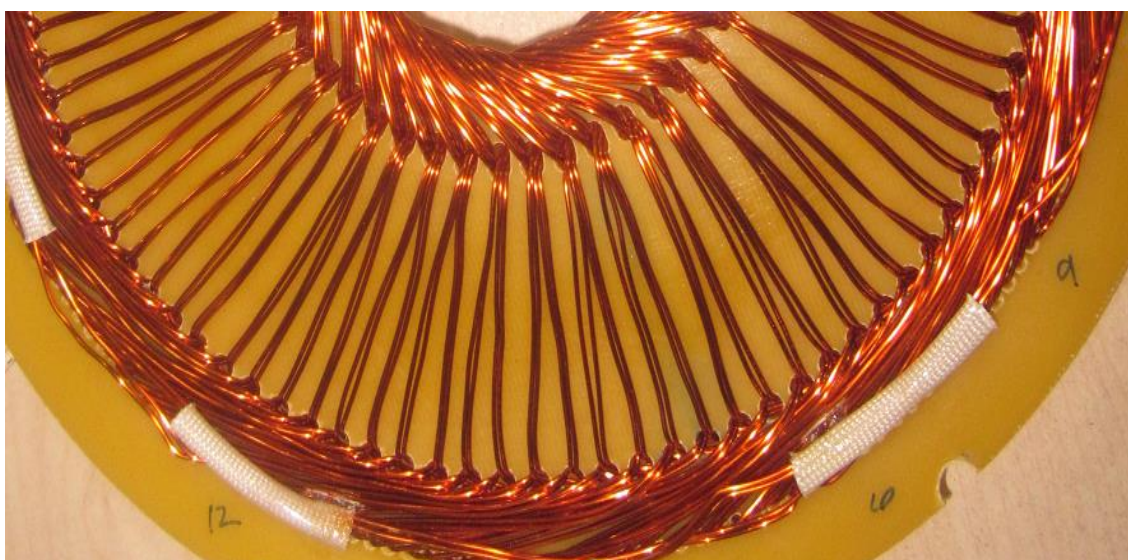
$X_{\text{mag}} = \text{mean}(Xm);$

$X_{\text{rotor}} = \text{mean}(X2);$

$R_{\text{rotor}} = \text{mean}(R2);$

### پیوست ۳

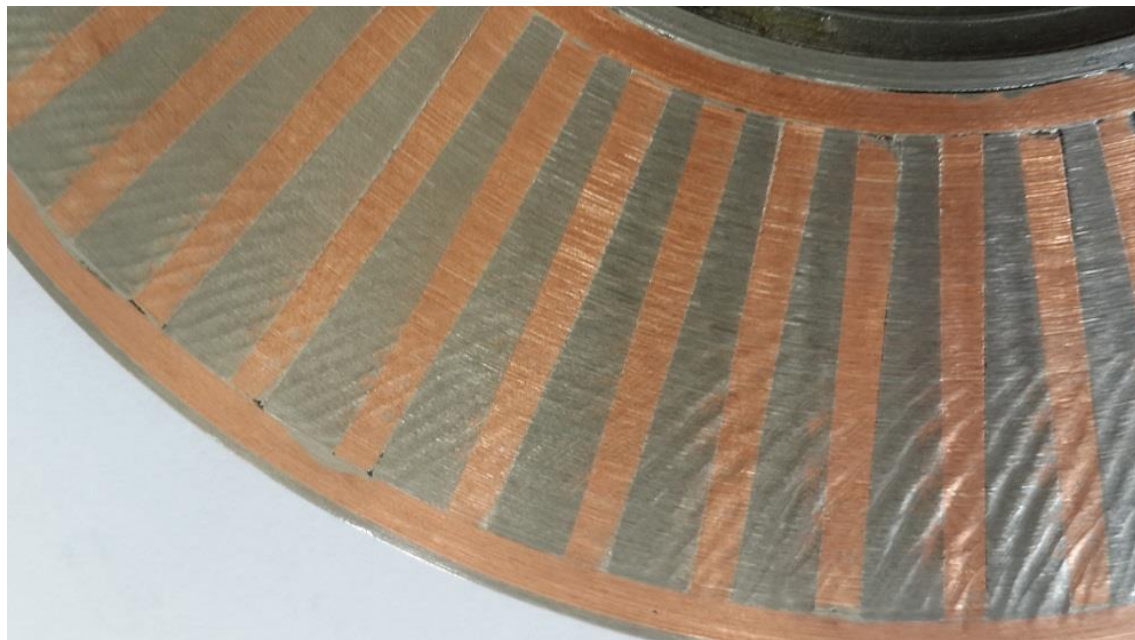
تصاویر مراحل ساخت قطعات موتور نمونه









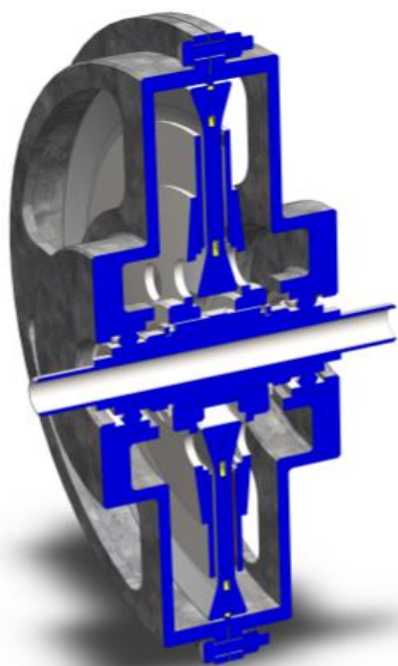
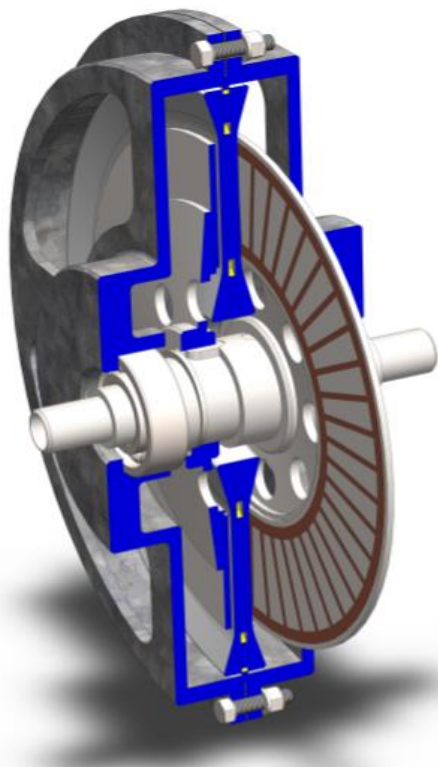






## پیوست ۴

برش عرضی استاتور و روتور و درب قالب‌ها



## پیوست ۵

CD شامل فایل نمایش نحوه دمونتاژ و مونتاژ کامل قطعات الکتروموتور بانضمام فایل نقشه‌ها





مراجع

- [1] W. S. Leung, j.c.c. Chan,(1980), **Axial-Field Electrical Machines Design and Application**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-99, no. 4, pp. 1679-1685.
- [2] Zahra Nasiri-Gheidari, Hamid Lesani,(2012), **A Survey On Axial Flux Induction Motors**, University of Tehran.
- [3] M. Valtonen, A. Parviainen and j. Pyrhonen,(2006), **Electromagnetic Field Analysis of 3d Structure of Axial-Flux Solid-Rotor Induction Motor**, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion,pp.39-12.pp.39-16.
- [4] Available on [http:// www.axco-motors.com](http://www.axco-motors.com), axco motors lappeenranta, finland
- [5]C. C. Chan,(1987), **Axial-Field Electrical Machines Design and Applications**, IEEE University of Hong Kong, Hong Kong, pp. 294-300
- [6] S. Kubzdela and B. Weglinski,(1988),**Magnetodielectrics In Induction Motors With Disk Rotor**, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 24, no. 1, pp. 635-638.
- [7] A. Benoudjit, N. Nait Said,(1998), **New Dual Air Gap Axial & Radial Flux Induction Motor For on Wheel Drive Electric Propulsion Systems**,1998, IEEE Conference, pp. 615-619.
- [8] R. Wallace, L. Mopan, G. Cea F. Perez, **Design and Construction of Medium Ppower Axial Flux Induction Motors**, Universidad De Concepcion, Chile
- [9] V.Ramesh Babu & M. P. Soni, (2012), **Modeling of Axial Flux Induction machine With Sinusoidal Winding Distribution**, International Journal of Electrical and Electronics Engineering EEE Dept, VNRVignana Jyothi Institute of Engg & Technology, Hyderabad, India, ISSN (PRINT): 2231 – 5284,Vol-2, Iss-2,3,4.
- [10] Mikko Valtonen, (2007), **Performance Characteristics of An Axial flux Solid Rotor Core Induction Motor**, Department of Electrical Engineering, University of Technology, Lappeenranta, Finland
- [11] D. J. Patterson, (2009), **A Comparison of Radial And Axial Flux Structures In Electrical Machines**, Electric Machines and Drives Conference.

[12] Stefan Kubzdela and Bogumil, Weglinski, (1988), **Magnetodielectrics In Induction Motors With Disk Rotor**, IEEE Transactions On Magnetics, VOL. 24, NO. 1.

[13] Qin Wei , Fan Yu , Zhu Xi ,Li Shuo, **Analysis on Electromagnetic Field of An Axial Flux Solid Aluminum Rotor Induction Motor**, Department of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University

[14] J. Wisniewski and W. Koczara,(2009), **Sensorless Control of Axial Flux Permanent Magnet Motor At Standstill and At Low Speed**, In Electrical Review, 7/2009, pp. 177-181.

[15] Mikko Valtonen, Asko Parviainen , Juha PyrhOnen,(2008), **Influence of the Air-Gap Length To The Performance of An Axial-Flux Induction Motor** Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines Paper ID 1103, Lappeenranta University of Technology, Finland

[16] Availbel on [http:// www.rigid-laminates@isovolta.com](http://www.rigid-laminates@isovolta.com), Isovall 11.

[17] Availbel on [http:// www.rigid-laminates@isovolta.com](http://www.rigid-laminates@isovolta.com), Isovall TM.

[18] Availbel on [http:// www.vonroll.com](http://www.vonroll.com), Damival 13522

[19] Availbel on [http:// www.vonroll.com](http://www.vonroll.com),Damivall 15182

[20] W.M.M. Menheere, **Degrees of Protection IP Codes**, The Netherlands, Holec Holland N.V. PP. 6-7.

[21] Prof. Jacek F. Gieras, Dr. Rong-Jie Wang, Prof. Maarten J. Kamper,(2008), **Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines**, Second Edition, Springer, pp. 56-58.

[۲۲] سلطانی م، (۱۳۷۵)، طراحی ومحاسبه موتور آسنکرون، چاپ دوم،انتشارات دانشگاه تهران،ص ۲۵۱-۲۵۲.

[23] J. Pyrhonen, T. Jokinen, V. Hrabovcova,(2014), **Electrical Machines Design of Rotating**, John wily & sons LTD,ISBN 978-1-118-58157-5,UK, pp 305-306.

[24] Pesari Neelima, Mrs. Ch. Manjeera, Mr. V Ramesh Babu, (2014), **Modelling of Axial Flux Induction Machines and It Application As Differential In Electrical**

**Vehicles**, International Journal Of Innovative Research In Advanced Engineering (IJIRAE) ISSN: 2349-2163, Volume 1, Issue 12. Page 1.

[25] Li Shuo, Fan Yu, Zhu Xi, Qin Wei, **New Structure of Axial Flux Induction Motor and Characterization Analysis**, Department Of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University

[26] W. Fei, P. C. K. Luk, K. Jinupun,(2010), **Design and Analysis of High- Speed Coreless Axial Flux Permanent Magnet Generator With Circular Magnets and Coils**, IET Electric Power Applications, Vol.4, no.9, pp. 739-747.

[27] J. Wisniewski and W. Koczara,(2009), **Sensorless Control of Axial Flux Permanent Magnet Motor At Standstill and At Low Speed**, In Electrical Review, pp. 177-181.



## **Abstract**

Having flexibility in the structure of the axial flux machines is the main reason for those machines to be eligible for some specific applications responding to hard achievement requirements. For example in the recent years, axial-flux machines particularly new topologies are becoming prime movers of many electric vehicle propulsion systems.

Regarding the specific features of the axial flux machines being disk-type with adjustable air gap, higher power to weight density, greater diameter to length ratio, compact construction and excellent efficiency are expressed by some researchers. In fact some low speed axial flux machines have been designed and manufactured before the radial flux machines but they were forgotten shortly due to many manufacturing difficulties particularly those related to ferromagnetic stator core assembling.

By the way removing the stator core can solved the problem associated with stator core loss and manufacturing difficult which is regarded by the present thesis. This thesis investigates a method for mechanical and electromagnetic designing and manufacturing of a miniature ironless stator machine. It is shown how the components of a coreless machine can be designed pretty and then assembled beautifully. After then a sample three-phase axial flux squirrel cage induction motor with coreless stator is designed and manufactured in our laboratory and its excellent modelling technique is validated with comparing the simulation results with those measured experimentally.

Results specify that axial flux induction motor with coreless stator compared to other AFIM will have low weight and final cost, high power factor and good ventilation.

## **Key word:**

Axial flux induction motor, coreless stator, modeling of AFIM, tow face squirrel cage rotor, equal circuit AFIM, coreless motor, discoid rotor, axial flux stator.





Shahrood University of Technology

Electronic education center

**Modeling, design & manufacturing of a three-phase axial flux  
squirrel cage induction motor with coreless stator**

Mohammad Ali Taheri Pour

Supervisor:  
DR. Ahmad Darabi

February 2016