بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

بررسی تکنیکهای کاهش نیروی بازدارنده
در موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم به روش المان محدود

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق – قدرت

آرش ابتیاع

استاد راهنما

دکتر سید مرتضی سقائیان نژاد

تیرماه ۱۳۸۶

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت آقای آرش ابتیاع

تحت عنوان

بررسی تکنیکهای کاهش نیروی بازدارنده
در موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم به روش المان محدود

در تاریخ ۱۳۸٦/٤/۳۱ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه — دکتر سید مرتضی سقاییان نژاد

۲- استاد مشاور پایان‌نامه — دکتر مهدی معلم

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده — دکتر علی‌محمد دوست‌حسینی

تشکر و قدردانی

خداوند را سپاسگزارم که به من توفیق داد تا این دوره را به پایان برسانم. بی‌شک گذارندن این دوره بدون همکاری و همراهی خانواده، اساتید و دوستان ارجمندم، امکان‌پذیر نبود لذا از خداوند متعال موفقیت و بهروزی این عزیزان را خواستارم.

لازم می‌دانم از زحمات بی‌دریغ پدر و مادر و خانواده عزیزم که در دوران تحصیل یار و مشوق بنده بوده و راه را در این مسیر هموار نموده‌اند تشکر و قدردانی کنم.

از استاد ارجمند، جناب آقای دکتر سید مرتضی سقاییان نژاد که با رهنمودهای دلسوزانه، در طول انجام پایان‌نامه همراه بنده بوده‌اند قدردانی می‌نمایم. همچنین از جناب آقای دکتر مهدی معلم که در طول این دوره از نعمت مشاوره با ایشان بهره‌مند بوده‌ام و آقایان دکتر محمد ابراهیمی و دکتر حمیدرضا کارشناس که زحمت داوری این پایان‌نامه را پذیرفتند و دکتر علی‌محمد دوست‌حسینی سرپرست تحصیلات تکمیلی تشکر و قدردانی می کنم.

آرش ابتیاع

تیرماه ۱۳۸۶

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعـــات، ابتکارات
و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پـایـــان نامه
(رساله) متعلق به دانشگـــــاه صنعتـــــی اصفهان است.

تقدیم به پدر و مادر عزیز و همسر مهربان و فداکارم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه ۲

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ لزوم انجام تحقیق ٤

۱-۳ روند ارائهٔ مطالب ٦

فصل دوم: انواع ساختارهای ماشینهای خطی ۸

۲-۱ مقدمه ۸

۲-۲ موتورهای یک بر ۱۱

۲-۲-۱ ساختار یک بر با اولیه کوتاه و آهنربای سطحی (ساختار یک بر پایه) ۱۱

۲-۲-۲ ساختار یک بر با اولیه کوتاه و آهنربای درونی ۱۲

۲-۲-۳ ساختار یک بر با اولیه کوتاه و آهنربای درونی عمودی ۱۳

۲-۲-۴ ساختار یک بر با اولیه کوتاه و آرایش آهنربای به صورت هالباخ ۱۴

۲-۲-۵ ساختارهای یک بر با ثانویه کوتاه ۱۵

۲-۳ ساختارهای دوبر ۱۷

۲-۳-۱ ساختار دوبر با دوثانویه بلند ویک اولیه کوتاه با هسته هوایی (ساختار دوبر پایه) ۱۷

۲-۳-۲ ساختار دوبر با دوثانویه بلند ویک اولیه کوتاه یوغ دار ۱۸

۲-۳-۳ ساختار دوبر با دوثانویه بلند ویک اولیه کوتاه با آهنربای دائمی درونی عمودی ۲۰

۲-۳-۴ ساختارهای دوبر با یک ثانویه بلند و دو اولیه کوتاه ۲۱

۲-۳-۵ ساختارهای دوبر با یک اولیه بلند و دو ثانویه کوتاه ۲۳

۲-۳-۶ ساختار دو بر با دو ثانویهٔ کوتاه و یک اولیهٔ دو بر ۲۴

۲-۳-۷ ساختار دو بر با یک ثانویه کوتاه و دو اولیه بلند ۲۵

۲-۴ ساختارهای لوله ای ۲۷

۲-۵ مقایسهٔ برخی از ساختارها ۲۷

فصل سوم: مدلسازی موتور سنکرون مغناطیس دائم خطی ۳۱

۳-۱ مقدمه ۳۱

۳-۲ مدلسازی مغناطیسی به روش مدار معادل مغناطیسی ۳۲
۳-۳ مدلسازی مغناطیسی به کمک روش حل معادلات ماکسول(لایه‌ای) ۴۰
۳-۴ مدلسازی الکتریکی ۴۵
۳-۵ مدلسازی مکانیکی ۴۷
۳-۶ مدلسازی موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم و استفاده از روش المان محدود ۴۷
فصل چهارم: اصول طراحی موتور سنکرون مغناطیس دائم خطی ۴۹
۴-۱ مقدمه ۴۹
۴-۲ روابط طراحی ۴۹
۴-۳ محدویت حرارتی و ضد مغناطیسی آهنربا ۵۳
۴-۴ محاسبه راکتانس‌های موتور ٥٤
۴-۵ محاسبه تلفات ۵۷
فصل پنجم: بررسی نیروی بازدارنده و چند تکنیک کاهش آن ۶۰
۵-۱ مقدمه ۶۰
۵-۲ اجزاء نیروی بازدارنده ۶۱
۵-۳ نقش مکان نقطهٔ انتهایی آهنربا در نیروی بازدارنده ۶۴
۵-۴ ساختارهای اساسی موتورهای PMLSM و نیروی بازدارنده در آنها ۶۵
۵-۵ نقش پهنای آهن اولیهٔ مناسب در کاهش نیروی بازدارنده ٦٨
۵-۶ اثر نوع شیار در نیروی بازدارنده ۶۹
فصل ششم: تحلیل موتور سنکرون مغناطیس دائم خطی به روش المان محدود ۷۱
۶-۱ مقدمه ۷۱
۶-۲ تاریخچه روش المان محدود ۷۱
۶-۳ پیشینهٔ پژوهش ۷۳
۶-۴ مدلسازی PMLSM و تحلیل اثر پهنای آهنربا در نیروی بازدارنده ۷۴
۶-۵ مدلسازی PMLSM و تحلیل اثر پهنای اولیه در نیروی بازدارنده ۸۰
۶-۶ مدلسازی PMLSM و تحلیل اثر نوع شیار در نیروی بازدارنده ۹۰
فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهاد ۹۸
مراجع ۱۰۱

چکیده

امروزه ماشینهای مغناطیس دائم سنکرون خطی، کاربرد بسیار گسترده ای در صنعت پیدا کرده اند. خصوصاً در مواردی که نیاز به حرکت رفت و برگشتی باشد، کاربرد این موتورها بیش از پیش مشخص می شود. یکی از معایب این موتورها در مقایسه با موتورهای گردان، وجود نیروی بازدارنده است. این نیرو به عنوان عاملی مهم در ایجاد خطای تعیین موقعیت دقیق قسمت متحرک، شناخته می شود. در این پایان نامه ابتدا به روشهای مختلف تحلیل موتورهای سنکرون خطی مغناطیس دائم اشاره می شود و سپس از روش المان محدود به عنوان روش برتر استفاده خواهد شد.

با استفاده از روش المان محدود، نیروی وارد بر قسمت متحرک محاسبه می شود و سپس با اعمال تکنیکهایی که در پایان نامه به آنها اشاره شده است، سعی در کاهش نیروی بازدارنده خواهیم داشت.

در ادامه نشان داده خواهد شد که در مواردی با ایجاد تغییراتی هرچند ناچیز، می توان اثر نیروی بازدارنده را تا حد زیادی حذف کرد. نهایتاً بعد از اعمال تغییرات مورد نظر در ساختار و مدل موتور مورد نظر، مقادیر بهینه جهت مینیمم سازی هرچه بیشتر نیروی بازدارنده معرفی خواهند شد.

فصل اول
مقدمه

۱-۱ مقدمه

امروزه موتورهای خطی در کاربردهایی که در آنها به حرکت‌های انتقالی و رفت و برگشتی نیاز است، به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند [1]. علی رغم اینکه موتورهای گردان نیز به کمک اجزاء مکانیکی جانبی قادر به تولید حرکت خطی هستند ولی مزایای موتورهای خطی در اینگونه کاربردها سبب شده است که این موتورها در پژوهش‌های بسیاری مورد توجه قرار بگیرند. مهمترین مزیت این موتورها تولید مستقیم حرکت انتقالی و در نتیجه حذف اجزاء تبدیل کننده حرکت گردان به حرکت انتقالی است [2]. حذف این اجزاء منجر به حذف تلفات و لقی ناشی از آنها شده و در نتیجه راندمان، دقت و قابلیت اطمینان سیستم افزایش می‌یابد.

موتورهای خطی نیز همانند موتورهای گردان از لحاظ اصول عملکرد به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند. با این تفاوت که ساختارهای موجود در هر نوع از موتورهای خطی به مراتب بیشتر و متنوع‌تر از ساختارهای مربوط به موتورهای گردان می‌باشند. از میان انواع مختلف این موتورها موتور سنکرون آهنربای دائم خطی به دلیل خصوصیات ویژه‌ای از قبیل، چگالی نیرو و راندمان زیاد، عملکرد دینامیکی خوب و ساختار کنترلی نه چندان پیچیده بسیار مورد توجه است [3و4].

نیاز به ادوات الکترونیک قدرت برای راه‌اندازی و کنترل این دسته از موتورها و هزینه زیاد آن از یک طرف و قیمت بالای آهنربا از سوی دیگر دو مشکل عمده تولید و استفاده از این موتورها در صنایع گوناگون بوده است. امروزه با ظهور ادوات الکترونیک سریع و ارزان و کشف منابع آهنربای دائم بسیار قدرتمند و کاهش نسبی قیمت آهنربای دائم، ساخت این موتورها و استفاده از آنها در صنعت اقتصادی و عملی شده است.

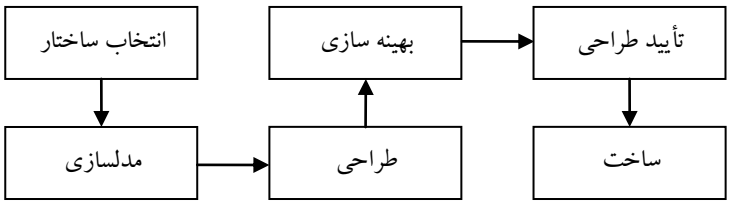
هم اینک موتورهای سنکرون اهنربای دائم بیشترین حجم تولید تجاری و پژوهشی موتورهای خطی را به خود اختصاص داده است [5-10]. کاربردهای متعددی در رنج وسیعی از عملکرد برای اینگونه موتورها وجود دارد.

از این جمله می‌توان به کاربردهای بسیاردقیق و با توان نسبتاً کم مانند صنایع تولید نیمه‌هادی‌ها [11] تا کاربردهایی با توان‌های بالا مانند صنایع حمل و نقل [12] اشاره کرد. برخی دیگر از کاربرهای اینگونه موتورها در زیر آمده است:

- ✓ میزهای متحرک برای نصب قطعات بر روی بردهای الکترونیکی
- ✓ دستگاه‌های برش دیجیتالی
- ✓ کاربردهای پزشکی مانند تخت دستگاه اسکن مغز
- ✓ پرینترها و پلاترهای بزرگ
- ✓ اتوماسیون صنعتی و اداری و ...

عملکرد مناسب موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی نیاز به طراحی و بهینه سازی دقیق آنها دارد. بهینه سازی نیازمند طراحی ابتدایی و طراحی ابتدایی نیز نیازمند مدلسازی مناسب موتور است. برای مدلسازی این موتورها باید ابتدا ساختار موتور مشخص باشد. ساختار موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی بسیار متنوع و گسترده است. ماهیت خطی بودن و ساختارهای مختلف آن مانند یک‌بر، دوبر و غیره در کنار آرایش و طرق مختلف بکارگیری آهنربای دائم، ساختارهای مختلفی را برای این موتورها امکان پذیر کرده است. لذا با توجه به کاربرد مورد نظر ساختار مناسب انتخاب می‌شود. پس از انتخاب ساختار مناسب نوبت به مدلسازی می‌رسد. داشتن مدلی مناسب برای تحلیل پدیده‌های حاکم بر موتور و طراحی آن کمک می‌کند. مدلسازی شامل تعیین روابط حاکم بر موتور است و به بخش‌های مختلفی تقسیم می‌شود. بعد از مدلسازی، طراحی موتور بر اساس روابط بدست آمده در مدلسازی و با توجه به خواسته‌ها و نیازهای مربوط به کاربرد آن ضروری است. طراحی ابتدایی ممکن است از بسیاری جهات بهینه نباشد. لذا بهینه سازی برای مشخصات و پارامترهای مورد نظر الزامی است. بهینه سازی بعد از طراحی ابتدایی انجام می‌شود. در نهایت نیز طراحی باید به کمک روش مناسبی تأیید شود. بهترین روش تأیید طراحی ساخت عملی موتور است ولی از آنجا که

ساخت موتور هزینه زیادی دارد لذا قبل از ساخت می‌توان به کمک های روش‌های دقیق عددی صحت طراحی را مورد بررسی قرار داد. روش‌های عددی متعددی برای تحلیل مسائل الکترومغناطیس وجود دارد. در این میان روش اجزاء محدود به علت برخی ازمزایا در مسائل فرکانس پایین عمومیت بیشتری یافته و اکثر نرم‌افزارها از این روش برای تحلیل مسائل الکترومغناطیسی استفاده می‌کنند. دلیل این امر کوچک‌تر شدن ماتریس‌ها و ساده‌تر شدن حل معادلات حاکم بر مسائل الکترمغناطیس فرکانس پایین است. بعد از تأیید طراحی نیز نوبت به ساخت موتور خواهد رسید که باید در آن محدودیت‌ها و ملاحظات عملی به طور کامل مورد توجه قرار گیرد. مراحل مختلف طراحی و ساخت یک موتور در شکل ۱-۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱-۱ مراحل مختلف طراحی و ساخت یک موتور

۱-۲ لزوم انجام تحقیق

مراحل مختلف طراحی یک موتور در بخش قبلی بررسی شد. در ادامه به مروری بر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه پرداخته و جایگاه تحقیق حاضر نشان داده می‌شود.

برخی از ساختارهای موتور سنکرون آهنربای دائم خطی مورد بررسی قرار گرفته است [10]. دیگر ساختارها و خصوصیات هر ساختار در مقالات به صورت پراکنده وجود دارد و مرجعی که این ساختارها را به طور جامع بررسی کند وجود ندارد.

همانطور که اشاره شد مدلسازی مغناطیسی یکی از مراحل مهم در طراحی است. مدلسازی مغناطیسی موتور به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. روش‌های عددی مانند روش اجزاء محدود یکی از روش‌های قدرتمند در مدلسازی مغناطیسی است. با این حال از این روش‌ها ، به دلیل پیچیدگی روابط و زمان‌بر بودن حل آن نمی‌توان در مراحل ابتدایی طراحی که مستلزم تکرار زیاد است استفاده کرد. روش دیگری که می‌توان از آن

برای مدلسازی مغناطیسی استفاده کرد روش لایه‌ای است [13-۱7]. با این حال این روش برای موتورهای شیار دار چندان مناسب نیست. زیرا در این روش ابتدا از اثر شیارها و اشباع صرف نظر می‌شود و سپس برای جبران خطای ناشی از این ساده‌سازی‌ها این اثرات توسط روش‌هایی به معادلات اضافه می‌شود که منجر به پیچیدگی معادلات می‌گردد [18-25]. اما این روش در موتورهای بدون شیار که مساله اشباع چندان جدی نیست می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. روش دیگری برای مدلسازی مغناطیسی روش مدار معادل مغناطیسی است. مدار معادل مغناطیسی به صورت بسیار ساده در بسیاری از طراحی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [26-32]. در این مدارهای معادل فقط فاصله هوایی و آهنربا مدل شده و اثر شیارها با اعمال ضریب کارتر صورت گرفته است. سادگی بیش از حد این مدل باعث بروز خطای زیاد می‌باشد. به منظور بهبود این مدل شار نشتی بین دو آهنربای مجاور و شارنشتی خودی آهنربا نیز به مدار معادل اضافه شده است [33]. تحقیقی بر روی شار نشتی زیگزاگ نیز صورت گرفته ولی منجر به مدلسازی آن با یک المان مشخص در مدار معادل نشده است [34]. اما مدارهای معادل مذکور شامل اشباع نبوده و آهن در آنها مدل نمی‌شود. یک مدل غیر خطی شامل اشباع و شارهای نشتی ارائه شده است [33]. همچنین مدار معادلی شامل نشت شار بین دندانه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [35]. ولی در مدارهای معادل مذکور اثر شیارها بر روی توزیع چگالی شار مورد توجه قرار نگرفته است. برای بررسی اثر شیارها مدارهای معادل پیچیده‌ای ارائه شده است [36-42]. در آنها توزیع چگالی شار ناشی از آهنربای دائم به کمک المان‌های زیاد در نظر گرفته شده است. اما تعداد زیاد المان ها منجر به پیچیده شدن این مدل‌ها می‌شود. در نتیجه این مدل‌ها برای الگوریتم طراحی مناسب نیست. با توجه به مباحث ذکر شده خلاء یک مدار معادل که شامل شارهای نشتی و اشباع بوده و توزیع چگالی شار و اثر شیارها بر آن را در بر گیرد و در ضمن ساختار ساده داشته و قابل استفاده در طراحی موتور باشد احساس می‌گردد. در این پژوهش سعی شده مدار معادلی با این خصوصیات ارائه شود.

روابط مربوط به طراحی موتورهای آهنربای دائم در مراجع مختلفی مورد توجه قرار گرفته است [28و 35-40]. با این حال ترتیب مراحل طراحی و الگوریتم مناسبی برای آن در این مراجع کمتر مورد توجه بوده است. در این پژوهش الگوریتمی برای طراحی ارائه شده است. مشکل دیگری که در طراحی وجود دارد متغیرهایی است که انتخاب آن اختیاری و به عهده طراح است. در صورتی که طراح تجربه کافی نداشته باشد، ممکن است این متغیرها به صورت نامناسب انتخاب شود. برای حل این مشکل در این پژوهش سیستمی ارائه شده که به تصمیم گیری طراح کمک می‌کند.

بهینه سازی موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی در مقالات مختلفی انجام شده است. بیشتر پژوهش‌ها مربوط به کاهش نیروی بازدارنده در این موتورها بوده است [42و43]. موتورهای دوبر با اولیه کوتاه و هسته

هوایی به علت حذف هسته آهنی نیروی بازدارنده ندارند و تلفات آهنی آنهانیز ناچیز است [45]. لذا در کاربردهای دقیق بسیار مورد توجه‌اند. با این حال به بهینه سازی این موتورها توجه چندانی نشده است. افزایش نیروی تولیدی موتور با تغییر ابعاد آهنربا و شکل سیم پیچی مورد توجه قرار گرفته است [46]. همچنین کاهش ضربان نیرو تنها با تغییر عرض آهنربا بررسی شده است. بهینه سازی چگالی نیرو (نیرو بر سطح موتور) به کمک تغییر عرض موتور و عرض سیم پیچ انجام شده است [47]. در [48] دو تابع هدف برای بهینه سازی انتخاب شده است. این توابع عبارتند از ثابت الکتریکی موتور و نسبت نیروی تولیدی به جذر تلفات اهمی. در پژوهش حاضر با ارائه یک تابع هدف ترکیبی هر دو این اهداف به طور همزمان مورد توجه قرار گرفته است. حذف هسته هوایی در این موتورها منجر به کاهش نیروی تولیدی می‌گردد. این عیب معمولاً با استفاده از مقدار بیشتری آهنربا جبران می‌شود. ولی این امر منجر به افزایش هزینه تولید موتور می‌گردد. با این حال این موضوع در پژوهش‌های پیشین کمتر مورد توجه بوده است. لذا لازم است نیروی تولیدی و حجم موتور تواماً در بهینه سازی مورد توجه قرار گیرند. از طرف دیگر همانطور که اشاره شد بهینه سازی ضربان نیرو فقط با بهینه سازی عرض آهنربای دائم بررسی شده است. در نتیجه لزوم بررسی اثر سایر پارامترهای طراحی بر آن احساس می‌شود. این بهینه سازی‌ها در این پژوهش مورد توجه قرارگرفته‌اند.

۱-۳ روند ارائه مطالب

در این پایان‌نامه مراحل انتخاب ساختار، مدلسازی، طراحی ابتدایی و بررسی چند تکنیک کاهش نیروی بازدارنده در موتور سنکرون آهنربای دائم خطی بررسی می‌گردد.

در فصل دوم ساختارهای مختلف موتور سنکرون آهنربای دائم خطی بررسی شده است. این ساختارها در گروه‌هایی تقسیم بندی شده‌اند و مزایا و معایب هر گروه بررسی شده است.

در فصل سوم مدلسازی موتور مورد توجه قرار گرفته است. عمدهٔ این بخش مربوط به مدلسازی مغناطیسی است. در مدلسازی مغناطیسی دو روش مدار معادل مغناطیسی و روش لایه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان این فصل نیز به مدلسازی الکتریکی و مکانیکی نیز اشاره شده است.

فصل چهارم مربوط به طراحی ابتدایی موتور است. در فصل به اصول طراحی، محدودیتها و محاسبات راکتانس و تلفات اشاره شده است.

فصل پنجم به بیان مطالبی در مورد نیروی بازدارنده و روشهای کاهش آن اختصاص داده شده است.

فصل ششم که مهمترین بخش پایان نامه است به مدلسازی و تحلیل موتور PMLSM به روش المان محدود اختصاص داده شده است.

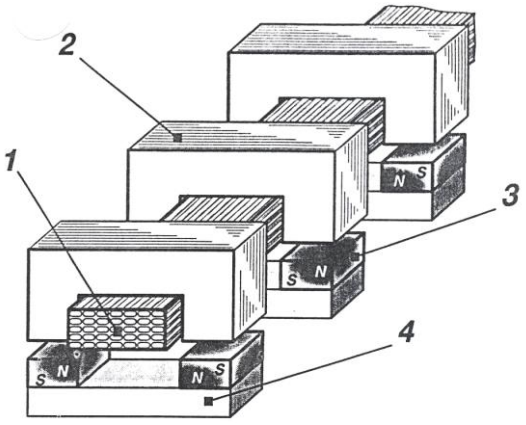
در فصل هفتم نتایج تحلیلها ارائه شده است و حتی الامکان پیشنهاداتی در زمینهٔ این پروژه آورده شده است.

فصل دوم
انواع ساختارهای ماشینهای خطی

۲-۱ مقدمه

ترکیب موتورهای خطی که به لحاظ ساختار بسیار متنوعند با آهنربای دائمی که خود درجات آزادی وسیعی در ساختار ایجاد می‌کند، باعث ایجاد تنوع زیادی در ساختارهای موتور آهنربای دائم خطی شده است. در یک دسته بندی کلی موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی را می‌توان به دو دسته شار طولی و شار عرضی تقسیم کرد. در موتورهای شار طولی راستای مسیر حرکت موج مغناطیسی و جزء متحرک با هم موازی و در موتورهای شار عرضی این دو راستا بر هم عمودند. موتور با شار عرضی در شکل ۲-۱ نمایش داده شده است. موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی شار طولی عمومیت بیشتری دارند لذا ما از در این پژوهش به بررسی این نوع ازموتورها می‌پردازیم. موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی شار طولی از لحاظ نوع و ساختار تحریک به سه دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول که بخش عمده این موتورها را تشکیل می‌دهد فقط دارای آهنربای دائم برای تحریک هستند و آهنربا و سیم پیچ تغذیه در روی دو قسمت مجزا قرار گرفته‌اند.

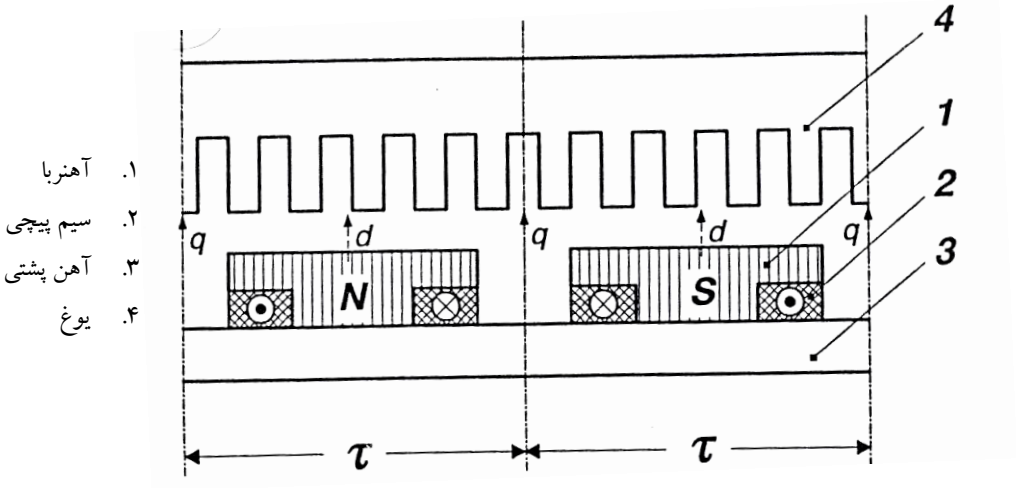
۱. قسمت متحرک
۲. هستهٔ آهنی
۳. آهنربا
۴. آهن پشتی



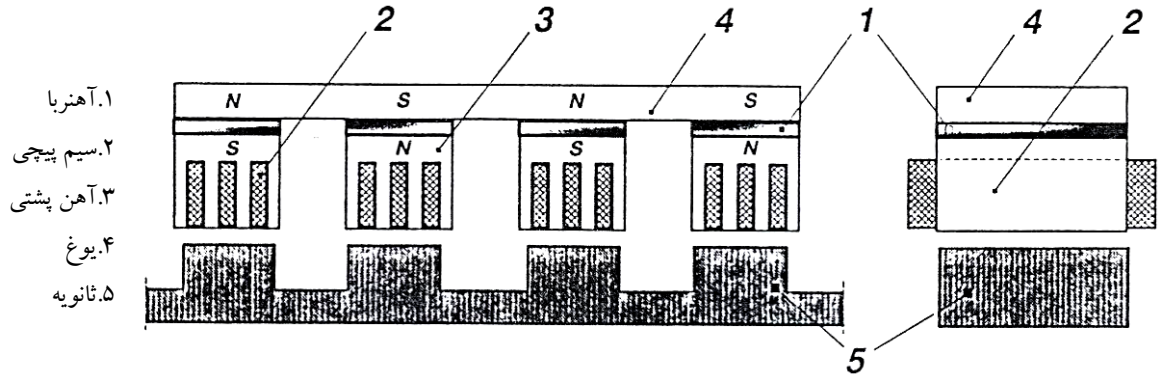
شکل۲-۱ موتور آهنربای دائمی خطی شار عرضی [۴]

در نوع دوم علاوه بر آهنربای دائم سیم پیچ DC نیز برای تحریک وجود دارد. به این نوع از موتورهای آهنربای دائم، نوع هیبرید می‌گویند. شکل ۲-۲ یک نمونه از این موتورها را نشان می‌دهد. در نوع سوم سیستم تحریک و سیستم قدرت یا تغذیه که همان سیم پیچ AC است بر روی یک جزء از موتور(اولیه یا ثانویه) بسته می‌شود و به نوع هموپولار معروفند. یک نمونه از آن در شکل۲-۳ دیده می‌شود. این دسته بندی‌ها در نمودار درختی شکل ۲-۴ نمایش داده شده‌اند.

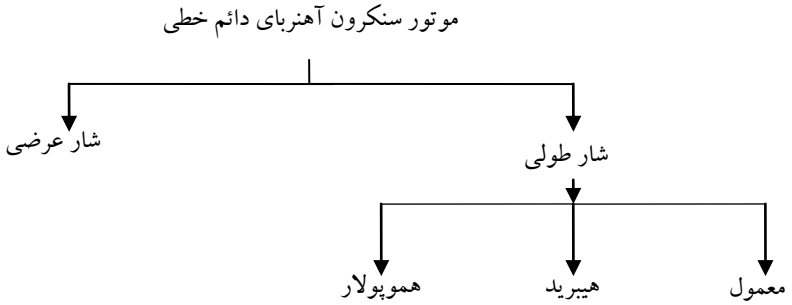
در ادامه هر کجا از موتور سنکرون آهنربای دائم خطی نام برده شد منظور همان نوع معمول در صنعت (تحریک فقط با آهنربای دائم) است که در نمودار درختی شکل ۲-۴ شاخه‌ای از موتورهای شار طولی است.



شکل۲-۲ موتور سنکرون آهنربای دائم خطی هیبرید [۴]

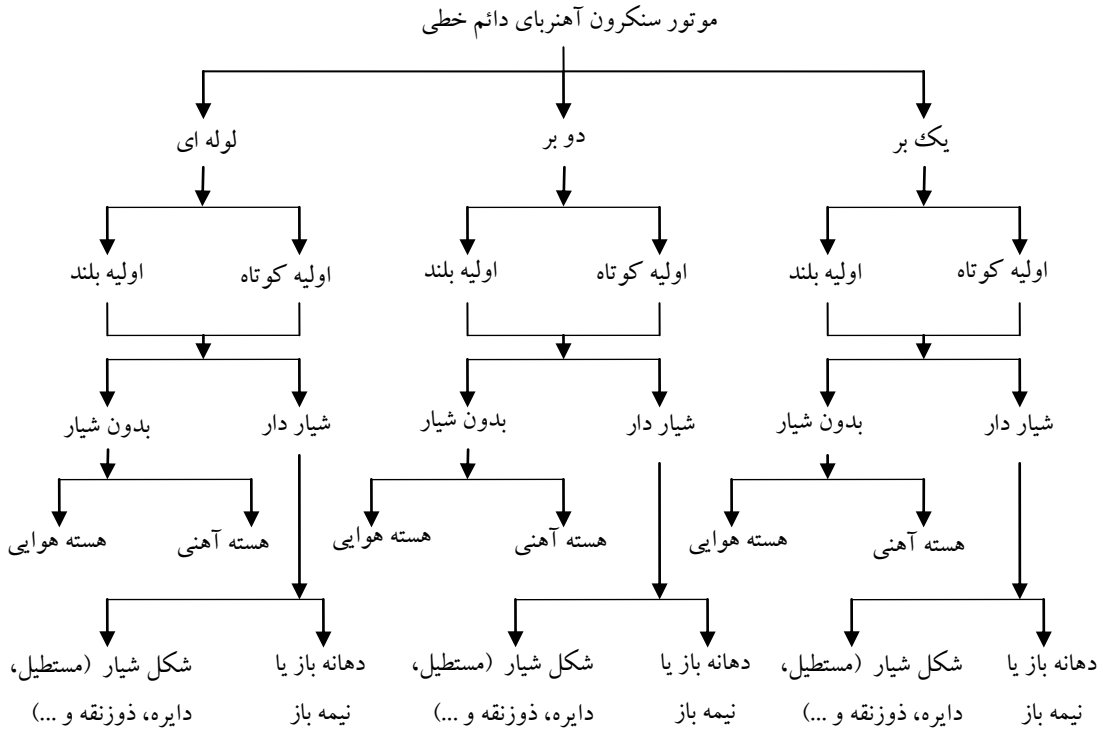


شکل۲-۳ موتور سنکرون آهنربای دائم خطی هموپولار [۴]

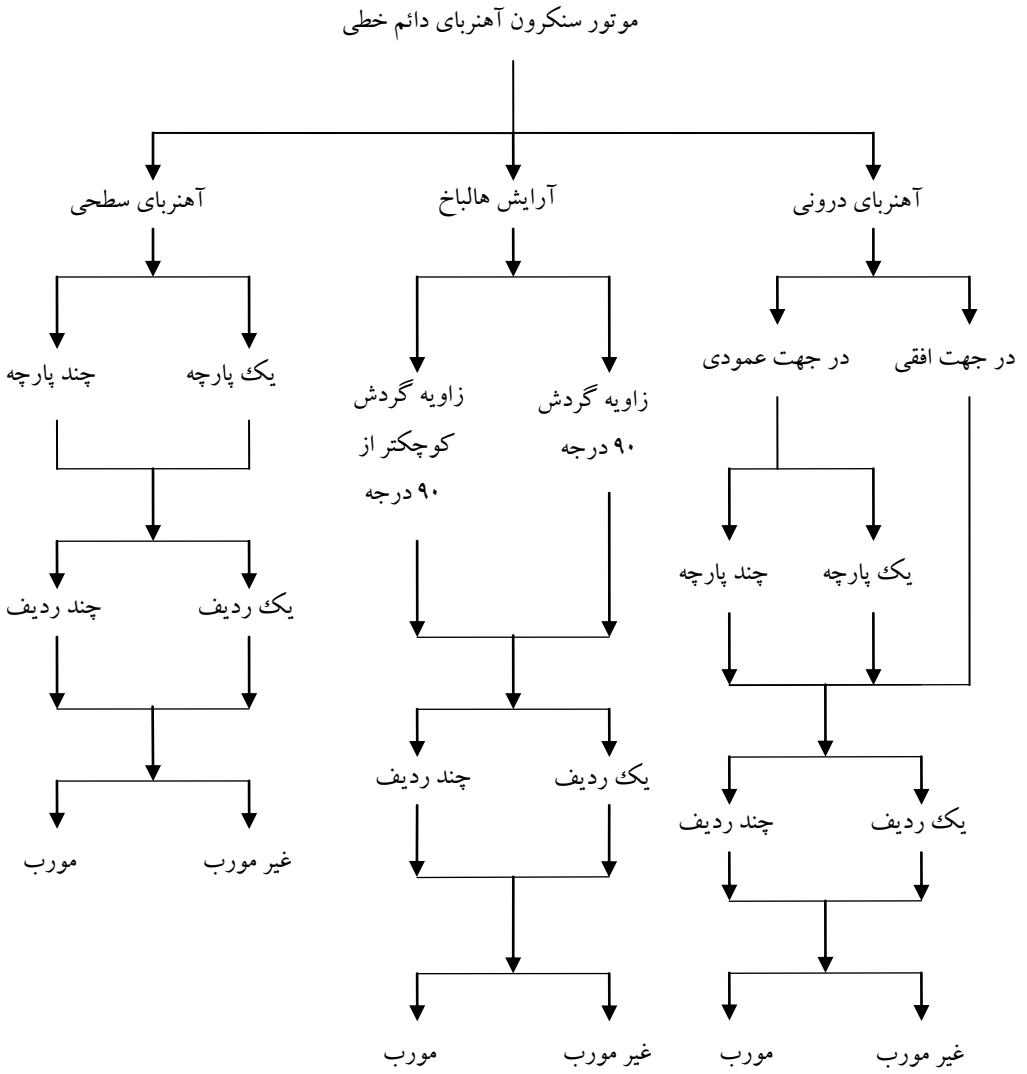


شکل۲-٤ دسته‌بندی کلی موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی[۵]

موتورهای آهنربای دائم خطی سنکرون از لحاظ ساختار به سه دسته یک بر، دو بر و لوله ای تقسیم بندی کرد. هر کدام از این سه نوع نیز تقسیم بندی‌های مختلفی دارند. نمودارهای درختی صفحات بعدی این تقسیم بندی ها را نشان می‌دهد. نمودار اول ساختارهای مختلف مربوط به ماهیت خطی و شکل هندسی و نمودار دوم ساختارهای مختلف مربوط به نحوه استفاده از آهنربا را نشان می دهد.در ادامه ابتدا با در نظر گرفتن یکی از ساختارهای یک بر به عنوان ساختار، بقیه ساختارهای یک بر را با آن مقایسه کرده و مزایا و معایب هر کدام را نسبت به ساختارپایه بررسی می‌کنیم. برای ساختارهای دو بر و لوله ای نیز به همین ترتیب عمل کرده و در نهایت ساختارهای یک بر دوبر و لوله ای را با هم مقایسه می کنیم.



شکل۲-۵ نمودار درختی انواع موتور سنکرون آهنربای دائم خطی از نظر شکل هندسی [۵]



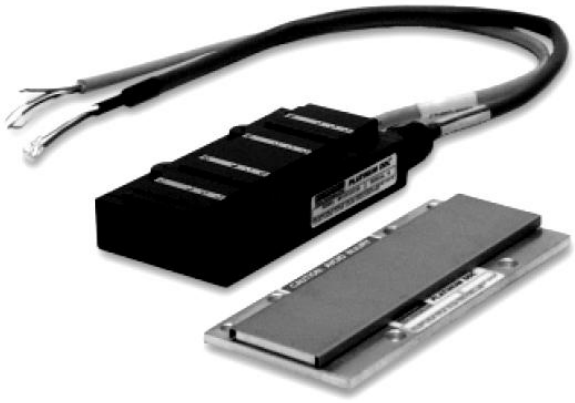
شکل۲-۶ نمودار درختی انواع موتور سنکرون آهنربای دائم خطی از نظر آرایش آهنربای دائم[۵]

۲-۲ موتورهای یک بر

۲-۲-۱ ساختار یک بر با اولیه کوتاه و آهنربای سطحی (ساختار یک بر پایه)

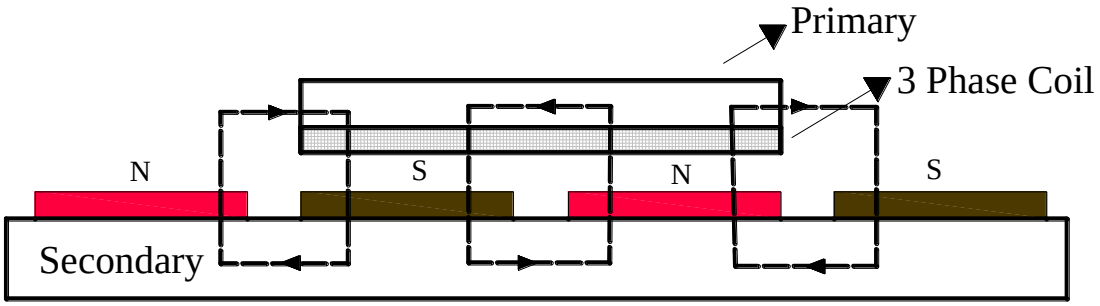
برای انتخاب ساختار پایه از ساختاری استفاده می‌کنیم که بیشتر در پژوهش‌ها و در صنعت استفاده می‌شود. این ساختار دارای اولیه کوتاه و آهنربای سطحی است. در این ساختار آهنربا بر روی مسیر قرار می گیرد و مسیر در قسمت هایی با طول مشخص ساخته می شود که با اتصال تعداد مناسب از آنها می توان به طول

دلخواه رسید. از این گونه موتورها معمولاً در مسیرهای کوتاه استفاده می شود زیرا درمسیرهای بلندتر تغذیه اولیه آن مشکل می شود. برای تغذیه این موتورها همان طور که در شکل ۲-۷ دیده می‌شود سیم اتصالی به اولیه متصل است و ولتاژ را به موتور می رساند. محدودیت طول این سیم و طول مسیر شامل آهنربای دائم بازه حرکتی اولیه را محدود می کند. [5و6]



شکل۲-۷ موتور آهنربای دائم خطی سنکرون با اولیه کوتاه [6]

در شکل ۲-۸ این ساختار به همراه مسیر شار آهنربای دائم آن (موتور در حالت بی بار) دیده می‌شود.



شکل۲-۸ ساختار یک بر با اولیه کوتاه و آهنربای سطحی

۲-۲-۲ ساختار یک بر با اولیه کوتاه و آهنربای درونی