

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک
رساله دکتری مهندسی الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی

مدلسازی، طراحی بهینه و مقایسه موتورهای هیستریزیس تخت چند طبقه با
استاتورهای بدون شیار و بدون هسته

نگارنده: حامد طحانیان

استاد راهنما

دکتر احمد دارابی

بهمن ۱۳۹۶



فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای/خانم حامد طحانیان دانشجوی دکتری رشته برق - قدرت به شماره دانشجویی ۹۱۲۴۸۴۵

ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۱ در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۱۰ از رساله نظری / عملی خود با عنوان:

مدلسازی، طراحی بهینه و مقایسه موتورهای هیستریزس تخت چندطبقه با استاتورهای بدون شیار و بدون هسته

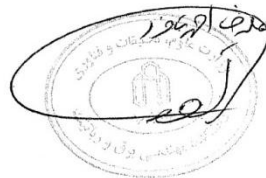
دفاع و با اخذ نمره ۱۹.۷۸ به درجه: ب نائل گردید.

<input type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	<input checked="" type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵	<input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
<input type="checkbox"/> ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد	

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر محمد داریوش	استاد/اساتید راهنما	استاد	
۲	دکتر _____	مشاور/ مشاورین	_____	_____
۳	دکتر محمدعلی منصوری	استاد مدعو داخلی / خارجی	استاد	
۴	دکتر سید علی حسینی	استاد مدعو داخلی / خارجی	دانشیار	
۵	دکتر حسن اصیلی	استاد مدعو داخلی / خارجی	استادیار	
۶	دکتر سید علی حسینی	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای/خانم حامد طحانیان بعمل آید.



نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم به:

پدر، مادر و همسر عزیزم

و همه دوستان علم و دانش

تشکر و قدردانی

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستی‌مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به هم‌نشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت؛ و درود بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...

اکنون که پس از سال‌ها تلاش شیرین به پایان این دوره رسیده‌ام، بر خود فرض می‌دانم از:

- **پدر دلسوز و مادر فداکارم**، این دو بزرگوار، که همواره بر کوتاهی و درستی من قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند، آن‌ها که در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاور بی‌چشم داشت برای من بوده‌اند تا مراتب تحصیلی خود را به نحو احسن به اتمام برسانم؛
- **همسر عزیزم**، که با قلبی آکنده از عشق، محیطی سرشار از سلامت و آرامش و آسایش برای من فراهم آورده است، او که اسوه صبر و تحمل بوده و مشکلات مسیر را برایم تسهیل نمود؛
- **جناب آقای دکتر دارابی**، استاد شایسته، که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این مسیر دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر دوش کشیدند؛

کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید. همچنین، لازم است که سپاسگزار کمک‌ها و حمایت‌های تمامی اعضای خانواده خود و همسرم باشم.

حامد طحانیان

بهمن ۱۳۹۶

تعهد نامه

اینجانب حامد طحانیان دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی برق - قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله مدلسازی، طراحی بهینه و مقایسه موتورهای هیستریزیس تخت چند طبقه با استاتورهای بدون شیار و بدون هسته تحت راهنمایی دکتر احمد دارابی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این رساله 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 رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت می گردد.
- 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

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

موتورهای هیستریزیس به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود به عنوان یک انتخاب اصلی در برخی از کاربردهای سرعت بالا، نظیر سانتریفیوژها، ژيروسکوپها و توربوشارژرها مطرح شده‌اند. عملکرد این موتورها بر اساس پدیده هیستریزیس مغناطیسی است. متأسفانه، پیچیدگی‌های مدل‌های دقیق هیستریزیس و تزویج آن‌ها با روش‌های نوین مدل‌سازی ماشین‌های الکتریکی، باعث شده است که در اکثر تحقیقات گذشته از روش‌های تقریبی برای مطالعه موتورهای هیستریزیس بهره گرفته شود. در این رساله، قابلیت‌های ساختارهای چند طبقه موتورهای هیستریزیس تخت مورد بررسی قرار می‌گیرند. به منظور کاهش تلفات پارازیتیک روتور، بکارگیری استاتورهای با هسته مغناطیسی بدون شیار و بدون هسته مغناطیسی در این ساختارها پیشنهاد شده است. الگوریتمی برای طراحی بهینه موتورهای مورد مطالعه ارائه می‌شود که کاستی‌های کارهای پیشین در آن برطرف شده است. یک رویکرد ابتکاری برای تزویج غیر مستقیم مدل پریساج کلاسیک هیستریزیس و مدل اجزاء محدود موتورهای مورد مطالعه معرفی شده است. این رویکرد بر اساس تقریب خطی مشخصه هیستریزیس هر یک از نقاط دیسک روتور، بین دو لحظه زمانی متوالی است. به منظور یافتن توزیع دقیق میدان در دیسک هیستریزیس، برای هر یک از مؤلفه‌های فضایی میدان در هر یک از المان‌های مش‌بندی روتور، یک بلوک پریساج مجزا در نظر گرفته شده است. با هدف کاهش زمان محاسبات، مدل اجزاء محدود با یک مدل انتگرالی جدید از موتورهای مورد مطالعه جایگزین شده است و در نتیجه، روشی دیگر برای مدل‌سازی این موتورها پیشنهاد شده است. نشان داده می‌شود که روش جدید، ضمن دقت بالا، بسیار سریع‌تر از روش اول است. یک نتیجه مهم به دست آمده از این مدل‌سازی‌ها آن است که تلفات پارازیتیک در ساختارهای مورد مطالعه بسیار ناچیز است. صحت فرآیندهای پیشنهادی برای طراحی و مدل‌سازی از طریق ساخت یک موتور نمونه و انجام آزمایش‌های لازم بر روی آن تأیید شده است. قابلیت‌ها و محدودیت‌های موتورهای بدون شیار و بدون هسته با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین، با استفاده از یک روش آزمایشگاهی سیستماتیک، ساختارهای مورد مطالعه بر اساس چند معیار مهم با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مهم‌ترین نتیجه حاصل از این مقایسه‌ها آن است که مسیر شار محیطی در دیسک‌های هیستریزیس نسبت به مسیر شار محوری برتری دارد.

کلمات کلیدی:

استاتور بدون هسته، تزویج مدل‌ها، پدیده هیستریزیس، ساختار تخت چندطبقه، طراحی بهینه، مدل اجزاء محدود، مدل پریساج، مدل‌سازی گذرای و دینامیکی، موتور هیستریزیس، هسته بدون شیار

[1] Ahmad Darabi, Hamed Tahanian, Shayan Amani, Navid Sedghi "An experimental comparison of disk-type hysteresis motors with slotless magnetic stator core," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 6, pp. 4642-4652, June 2017.

[2] Hamed Tahanian, Ahmad Darabi, "New design method for multi-stack disc-type hysteresis motors based on analytical calculations," IET Electric Power Applications, vol. 12, no. 2, pp. 222-230, February 2018.

[3] Hamed Tahanian, Ahmad Darabi, "A novel approach for analytical modeling of circumferential flux disk type hysteresis motors based on radial division of the motor," Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering, vol. 10, no. 3, pp. 186-194, 2017.

[4] Hamed Tahanian, Ahmad Darabi, "A robust approach for FE-based analysis of electromagnetic systems with hysteretic materials," Electronics (MDPI Publications), Accepted for publication on 13 November 2017.

[5] Hamed Tahanian, Ahmad Darabi, "A new technique for incorporating the Preisach model of hysteresis into finite element analysis of low frequency electromagnetic devices," Accepted for presentation at the 9th International Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC 2018), 13-15 February 2018.

[۶] احمد دارابی، علی بهنیافر، حامد طحانیان، هاشم یوسفی، "مدلسازی عملکرد حالت دائمی موتور هیستریزاس استوانه‌ای معکوس شارمحیطی با استفاده از روش اجزاء محدود"، مجله علمی- پژوهشی مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۳، صفحات ۱۰۰۱-۱۰۱۲، پاییز ۱۳۹۶.

[۷] احمد دارابی، حامد طحانیان، محمدرضا صدقی، شایان امانی، ثبت اختراع با عنوان "موتور هیستریزاس تخت شار ترکیبی بدون نیاز به نگهدارنده مغناطیسی برای دیسک شارمحوری"، شماره اضهارنامه ۱۳۹۶۵۰۱۴۰۰۰۳۰۰۸۲۰۳.

فصل ۱: مقدمه	۱
۱-۱- اصول اولیه تئوری عملکرد موتورهای هیستریزیس	۳
۲-۱- ساختارهای ماشین هیستریزیس	۶
۱-۲-۱- ماشین هیستریزیس استوانه‌ای	۶
۲-۲-۱- ماشین هیستریزیس تخت (دیسکی)	۷
۱-۲-۲-۱- دسته‌بندی بر اساس مسیر عبور شار در داخل دیسک هیستریزیس	۹
۲-۲-۲-۱- دسته‌بندی بر اساس تعداد دیسک‌های هیستریزیس و استاتورها	۹
۳-۲-۲-۱- دسته‌بندی بر اساس نوع هسته استاتور	۱۱
۴-۲-۲-۱- دسته‌بندی بر اساس نحوه سیم‌پیچی استاتور	۱۳
۳-۱- مدل‌سازی پدیده هیستریزیس مغناطیسی	۱۴
۱-۳-۱- معرفی پدیده هیستریزیس	۱۴
۲-۳-۱- مدل‌های مطرح پدیده هیستریزیس	۱۶
۱-۲-۳-۱- مدل‌های اسکالر	۱۶
۲-۲-۳-۱- مدل‌های برداری	۱۸
۳-۲-۳-۱- مدل‌های تقریبی	۱۹
۴-۱- مباحث ویژه در مورد عملکرد ماشین هیستریزیس	۲۱
۱-۴-۱- عملکرد موتور هیستریزیس در بار جزئی	۲۱
۲-۴-۱- گشتاور القایی	۲۳
۳-۴-۱- تلفات پارازیتیک	۲۴
۴-۴-۱- پدیده هانتینگ	۲۵
۵-۴-۱- تحریک اضافی کوتاه مدت	۲۵

- ۵-۱- مهم‌ترین تحقیقات انجام شده بر روی موتورهای هیستریزس ۲۶
- ۱-۵-۱- ساختارهای مورد مطالعه ۲۶
- ۲-۵-۱- نوع مطالعات انجام شده ۲۸
- ۶-۱- چهارچوب رساله ۲۸
- ۷-۱- جمع‌بندی ۳۱
- فصل ۲: طراحی بهینه ۳۳
- ۱-۲- ارزیابی روش‌های طراحی پیشین ۳۵
- ۲-۲- روش طراحی پیشنهادی ۳۶
- ۳-۲- فرآیند کامل طراحی بهینه برای یک موتور نمونه ۴۰
- ۱-۳-۲- استخراج روابط طراحی ۴۱
- ۱-۳-۲- حلقه‌های هیستریزس کاری ۴۲
- ۲-۳-۲- ولتاژ القایی ۴۶
- ۳-۳-۲- مدار معادل الکتریکی ۴۶
- ۴-۳-۲- گشتاور تولید شده ۴۷
- ۵-۳-۲- ارتباط میان ابعاد هر کلاف ۴۷
- ۲-۳-۲- تعیین مشخصه‌های ماده هیستریزس روتور ۴۷
- ۳-۳-۲- الگوریتم طراحی اولیه ۴۸
- ۱-۳-۳-۲- تعیین ابعاد کلاف‌ها ۵۰
- ۲-۳-۳-۲- طراحی هسته استاتور ۵۱
- ۳-۳-۳-۲- تعداد و سائز هادی‌های موجود در هر کلاف ۵۲
- ۴-۳-۲- یافتن طرح بهینه ۵۳
- ۵-۳-۲- ساخت موتور نمونه و نتایج آزمایشگاهی آن ۵۶
- ۴-۲- جمع‌بندی ۶۳
- فصل ۳: توصیف پدیده هیستریزس به کمک مدل پریساج کلاسیک ۶۵

۶۷.....	۱-۳- تعریف ریاضی
۶۹.....	۲-۳- تعبیر هندسی مدل پریساچ
۷۴.....	۳-۳- ویژگی‌های مدل پریساچ
۷۵.....	۴-۳- مسأله شناسایی مدل پریساچ
۷۶.....	۱-۴-۳- روش گسسته‌سازی مثلث محدودکننده
۸۴.....	۲-۴-۳- روش استفاده از توابع تحلیلی
۸۵.....	۵-۳- بکارگیری مدل پریساچ در مدلسازی موتورهای هیستریزیس
۸۹.....	۶-۳- جمع‌بندی
۹۱.....	فصل ۴: مدلسازی موتورهای هیستریزیس به کمک ترکیب مدل پریساچ و مدل اجزاء محدود
۹۴.....	۱-۴- مروری کوتاه بر تئوری الکترومغناطیس
۹۷.....	۲-۴- روش پیشنهادی برای تزویج معادلات میدان و مدل هیستریزیس
۱۰۳.....	۳-۴- مدلسازی موتورهای هیستریزیس به کمک روش پیشنهادی
۱۰۹.....	۴-۴- نتایج مدلسازی و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی
۱۳۰.....	۵-۴- جمع‌بندی
۱۳۱.....	فصل ۵: مدلسازی موتورهای هیستریزیس با استفاده از توصیف انتگرالی آن‌ها
۱۳۳.....	۱-۵- توصیف ریاضی روش
۱۴۰.....	۲-۵- پیاده‌سازی روش
۱۴۳.....	۳-۵- نتایج مدلسازی
۱۴۵.....	۴-۵- جمع‌بندی
۱۴۷.....	فصل ۶: مقایسه موتورها
۱۴۹.....	۱-۶- ساختار بدون شیار در برابر ساختار بدون هسته
۱۵۱.....	۲-۶- مقایسه سیستماتیک ساختارهای مختلف
۱۵۲.....	۱-۲-۶- موتورهای مورد مقایسه
۱۵۷.....	۲-۲-۶- استخراج مشخصه‌های عملکردی موتورها

۱۵۷ ۱-۲-۲-۶- عملکرد در شرایط راهاندازی
۱۵۹ ۲-۲-۲-۶- عملکرد در سرعت سنکرون
۱۶۲ ۳-۲-۲-۶- مقایسه موتورها
۱۶۷ ۳-۶- جمع‌بندی
۱۶۹ فصل ۷: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۷۱ ۱-۷- نتیجه‌گیری
۱۷۴ ۲-۷- پیشنهادات
۱۷۷ منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: یک استوانه آهنی درون یک میدان مغناطیسی دوار (الف) استوانه فاقد خاصیت هیستریزیس است (ب) استوانه خاصیت هیستریزیس دارد [۵]..... ۴
- شکل ۱-۲: نحوه تغییرات گشتاور هیستریزیس، توان مکانیکی هیستریزیس، توان ورودی و تلفات هیستریزیس بر حسب لغزش از لحظه راه‌اندازی تا لحظه ورود به سنکرونیزم..... ۶
- شکل ۱-۳: ساختارهای متداول برای موتورهای هیستریزیس استوانه‌ای: (الف) موتور هیستریزیس استوانه‌ای شار شعاعی (ب) موتور هیستریزیس استوانه‌ای شار محیطی (ج) موتور هیستریزیس استوانه‌ای معکوس..... ۷
- شکل ۱-۴: ماشین هیستریزیس نوع تخت همتای ماشین هیستریزیس استوانه‌ای. ۱- هسته استاتور، ۲- سیم‌پیچ استاتور، ۳-نگه‌دارنده دیسک هیستریزیس، ۴- دیسک هیستریزیس، ۵- قاب، ۶- یاتاقان و ۷- محور [۸]..... ۸
- شکل ۱-۵: نمای سه‌بعدی هسته استاتور و دیسک هیستریزیس موتور نشان داده شده در شکل ۱-۴. ۹
- شکل ۱-۶: چند نمونه از ساختارهای موتور هیستریزیس تخت: (الف) موتور یک‌طرفه با استاتور شیاردار (ب) موتور دوطرفه با استاتور داخلی بدون شیار (ج) موتور دوطرفه با دو استاتور شیاردار (د) موتور دوطرفه با استاتور داخلی بدون هسته. ۱- هسته استاتور، ۲- سیم‌پیچ استاتور، ۳-نگه‌دارنده دیسک هیستریزیس، ۴- دیسک هیستریزیس، ۵- قاب، ۶- یاتاقان و ۷- محور [۸]..... ۱۰
- شکل ۱-۷: یک نمونه موتور هیستریزیس تخت چندطبقه با استاتور بدون هسته مغناطیسی. ۱- سیم‌پیچ استاتور، ۲- دیسک هیستریزیس و نگه‌دارنده آن، ۳- قاب، ۴- یاتاقان و ۵- محور [۸]..... ۱۲
- شکل ۱-۸: چند نمونه از ساختارهای هسته مغناطیسی استاتور در موتورهای هیستریزیس: (الف) هسته مورق در موتور استوانه‌ای (ب) هسته مورق بدون شیار موتور تخت (ج) هسته یکپارچه بدون شیار موتور تخت ساخته شده از مواد SMC (د) هسته مورق شیاردار موتور تخت..... ۱۲
- شکل ۱-۹: چند نمونه استاتور تخت بدون هسته مغناطیسی (الف) سیم‌پیچ غرق‌شده در یک ماده چسب‌مانند (ب) سیم‌پیچ بدون هیچ‌گونه نگه‌دارنده [۹]..... ۱۳
- شکل ۱-۱۰: دو نمونه سیم‌پیچی استاتور ماشین تخت متشکل از کلاف‌هایی با محور عمود بر صفحه فاصله هوایی [۸]..... ۱۴
- شکل ۱-۱۱: دو نمونه سیم‌پیچی استاتور ماشین تخت متشکل از کلاف‌هایی با محور موازی صفحه فاصله هوایی [۸]..... ۱۴

- شکل ۱-۱۲: الف) یک نمونه مشخصه غیرخطی چند شاخه‌ای هیستریزس [۱۵]، ب) یک نمونه حلقه هیستریزس برای تغییرات متناوب H بین دو و فقط دو مقدار اکسترمم [۱۵] و ج) یک نمونه مشخصه هیستریزس با چندین حلقه فرعی [۱۶]. ۱۵
- شکل ۱-۱۳: حلقه هیستریزس بیضوی در مقایسه با حلقه‌های واقعی (الف) تقریب بیضوی حلقه هیستریزس، ب) حلقه هیستریزس برای سطوح اشباع پایین (ج) مشخصه هیستریزس برای سطوح اشباع بالا [۱۹]. ۲۰
- شکل ۱-۱۴: تقریب مشخصه هیستریزس به کمک متوازی‌الاضلاع [۲۰]. ۲۰
- شکل ۱-۱۵: مشخصه گشتاور سرعت ماشین هیستریزس و بار ۲۱
- شکل ۲-۱: فرآیند پیشنهادی برای طراحی موتورهای هیستریزس مورد مطالعه ۳۹
- شکل ۲-۲: ساختار موتور نمونه (الف) نمای سه‌بعدی (ب) نمای گسترده موتور در شعاع متوسط ... ۴۱
- شکل ۲-۳: بخش‌بندی موتور نمونه در راستای شعاعی ۴۲
- شکل ۲-۴: اعمال قوانین الکترومغناطیسی به موتور. (الف) نمای گسترده بخش z ام از یک طبقه از موتور. یک مسیر دیفرانسیلی نشان داده شده است که برای اعمال قانون مداری آمپر به کار می‌رود (ب) یک برش دیفرانسیلی از بخش z ام از یک طبقه از موتور. چگالی شارها در موقعیت‌های مختلف برای اعمال قانون پیوستگی شار نشان داده شده‌اند. ۴۴
- شکل ۲-۵: مدار معادل الکتریکی برای هر فاز از هر طبقه از موتور نمونه ۴۷
- شکل ۲-۶: تعیین مشخصه‌های هیستریزس ماده سازنده روتور. (الف) نمونه حلقوی ساخته شده (ب) حلقه‌های هیستریزس اندازه‌گیری شده در فرکانس ۵۰ هرتز (ج) نفوذپذیری نسبی در تقریب بیضوی حلقه‌های هیستریزس (د) زاویه تأخیر در تقریب بیضوی حلقه‌های هیستریزس ۴۹
- شکل ۲-۷: الگوریتم طراحی اولیه برای موتور نمونه ۵۰
- شکل ۲-۸: مقادیر تابع هدف برای همه طرح‌های قابل قبول ۵۶
- شکل ۲-۹: ساخت موتور نمونه. (الف) قطعات اصلی (ب) موتور مونتاژ شده ۵۷
- شکل ۲-۱۰: نحوه آزمایش موتور (الف) بلوک دیاگرام سیستم تست (ب) میز کار انجام آزمایشات. ۵۸
- شکل ۲-۱۱: جریان ورودی اندازه‌گیری شده ۵۹
- شکل ۲-۱۲: توان ورودی سه‌فاز اندازه‌گیری شده ۶۰
- شکل ۲-۱۳: ضریب توان اندازه‌گیری شده ۶۱
- شکل ۲-۱۴: گشتاور ناخالص تولیدی اندازه‌گیری شده ۶۱
- شکل ۳-۱: یک مبدل هیستریزس ۶۸

- شکل ۳-۲: یک اپراتور هیستریزیس مقدماتی $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$ ۶۸
- شکل ۳-۳: مثلث محدودکننده در مدل پریساج ۷۰
- شکل ۳-۴: نحوه انعکاس تأثیر تغییرات ورودی در مثلث محدودکننده ۷۲
- شکل ۳-۵: تقسیم‌بندی مثلث محدودکننده به دو زیر مجموعه (الف) شرایط افزایش ورودی (ب) شرایط کاهش ورودی ۷۳
- شکل ۳-۶: گسسته‌سازی مثلث محدودکننده برای یافتن توزیع تابع پریساج ۷۸
- شکل ۳-۷: نحوه نمایش یک بلوک پریساج ۸۶
- شکل ۳-۸: یکی از حلقه‌های میانی اندازه‌گیری شده ماده در فرکانس ۵۰ هرتز در کنار تقریب فرکانس پایین آن که با استفاده از تابع پریساج (۳-۲۳) در مدل پریساج به دست آمده است ۸۸
- شکل ۳-۹: حلقه‌های هیستریزیس تقریبی ماده مورد مطالعه در فرکانس پایین ۸۹
- شکل ۳-۱۰: نحوه قرار دادن بلوک پریساج در وضعیت غیرمغناطیسی (الف) شدت میدان اعمالی برای ایجاد وضعیت غیرمغناطیسی (ب) تغییرات چگالی شار خروجی در مسیر رسیدن به وضعیت غیرمغناطیسی (ج) تغییرات مشخصه هیستریزیس در مسیر رسیدن به وضعیت غیرمغناطیسی (د) ۹۰
- شکل ۴-۱: مشخصه هیستریزیس فرضی برای یک نقطه از یک ماده هیستریزیس ۹۹
- شکل ۴-۲: نمایش ترسیمی فرآیند تکراری پیشنهادی برای تزویج مدل پدیده هیستریزیس و روش حل معادلات میدان ۱۰۱
- شکل ۴-۳: بلوک دیاگرام هسته مرکزی برای انواع مدل‌سازی‌های موتورهای هیستریزیس به کمک تزویج مدل پریساج کلاسیک پدیده هیستریزیس و مدل اجزاء محدود موتور ۱۰۵
- شکل ۴-۴: فلوچارت الگوریتم مدل‌سازی یک موتور هیستریزیس روتور قفل شده با تغذیه جریان در یک بازه زمانی مشخص با استفاده از ترکیب مدل پریساج و تحلیل اجزاء محدود ۱۰۸
- شکل ۴-۵: مش‌بندی یک گام دندان از مدل اجزاء موتور ۱۱۱
- شکل ۴-۶: جزئیات مش‌بندی دیسک هیستریزیس ۱۱۲
- شکل ۴-۷: یک سیکل از شکل موج کمیت‌های ترمینال یکی از فازهای موتور در لحظه ورود به سنکرونیزم (الف) ولتاژ فاز (ب) جریان فاز ۱۱۳
- شکل ۴-۸: جریان سه‌فاز اعمالی به مدل اجزاء محدود در طول زمان شبیه‌سازی ۱۱۴
- شکل ۴-۹: توزیع فضایی مؤلفه‌های چگالی شار در فاصله هوایی در چند لحظه زمانی (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y ۱۱۵

- شکل ۴-۱۰: توزیع فضایی مؤلفه‌های چگالی شار در هسته استاتور در چند لحظه زمانی (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y ۱۱۶
- شکل ۴-۱۱: توزیع فضایی مؤلفه‌های چگالی شار در دیسک هیستریزیس در چند لحظه زمانی (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y ۱۱۷
- شکل ۴-۱۲: توزیع فضایی مؤلفه‌های شدت میدان در دیسک هیستریزیس در چند لحظه زمانی (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y ۱۱۸
- شکل ۴-۱۳: توزیع فضایی مؤلفه‌های نفوذپذیری در دیسک هیستریزیس در چند لحظه زمانی (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y ۱۱۹
- شکل ۴-۱۴: توزیع فضایی مؤلفه‌های چگالی شار پسماند در دیسک هیستریزیس در چند لحظه زمانی (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y ۱۲۰
- شکل ۴-۱۵: چگالی شار دیسک هیستریزیس بر حسب شدت میدان آن در دو لحظه زمانی (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y ۱۲۱
- شکل ۴-۱۶: تغییرات زمانی چگالی شار در دو المان از دیسک هیستریزیس (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y ۱۲۲
- شکل ۴-۱۷: تغییرات زمانی شدت میدان در دو المان از دیسک هیستریزیس (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y ۱۲۳
- شکل ۴-۱۸: تغییرات زمانی نفوذپذیری برای دو المان از دیسک هیستریزیس (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y ۱۲۴
- شکل ۴-۱۹: تغییرات زمانی چگالی شار پسماند برای دو المان از دیسک هیستریزیس (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y ۱۲۴
- شکل ۴-۲۰: مشخصه‌های هیستریزیس برای دو المان از دیسک (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y ۱۲۵
- شکل ۴-۲۱: مشخصه‌های هیستریزیس برای دو المان از دیسک هیستریزیس (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y ۱۲۷
- شکل ۴-۲۲: گشتاور وارد بر روتور در جهت محیطی ۱۲۸
- شکل ۴-۲۳: نیروی محوری وارد بر دیسک هیستریزیس و استاتور هر طبقه از موتور ۱۲۸
- شکل ۴-۲۴: تغییرات زمانی ولتاژهای القایی و ترمینال محاسبه شده از مدلسازی اجزاء محدود در کنار ولتاژ ترمینال اندازه‌گیری شده ۱۳۰

- شکل ۵-۱: نمای گسترده یک موتور بدون شیار شارمحیطی در شعاع متوسط آن (الف) نحوه تقسیم‌بندی هندسه به بخش‌های متعدد (ب) نحوه اعمال فرم انتگرالی قانون مداری آمپر (ج) نحوه اعمال فرم انتگرالی قانون گاوس ۱۳۴
- شکل ۵-۲: فلوجارت الگوریتم پیاده‌سازی روش مدل‌سازی جدید ۱۴۳
- شکل ۵-۳: مقایسه توزیع فضایی مؤلفه محیطی چگالی شار حاصل از دو روش مدل‌سازی ۱۴۴
- شکل ۵-۴: مقایسه توزیع فضایی مؤلفه محیطی چگالی شار حاصل از دو روش مدل‌سازی ۱۴۵
- شکل ۶-۱: موتور نمونه طراحی شده در فصل دوم ۱۵۲
- شکل ۶-۲: موتورهایی که به صورت مستقیم از موتور مادر قابل استخراج هستند. (الف) M_1 (ب) M_2 (ج) M_3 (د) M_4 (ه) M_5 (و) M_6 ۱۵۵
- شکل ۶-۳: موتورهایی که به صورت غیرمستقیم از موتور مادر استخراج می‌شوند. (الف) M_7 (ب) M_8 (ج) M_9 (د) M_{10} ۱۵۶
- شکل ۶-۴: ولتاژ خط ترمینال موتورها بر حسب جریان ورودی آن‌ها در شرایط راه‌اندازی ۱۵۸
- شکل ۶-۵: توان سه‌فاز ورودی موتورها بر حسب جریان ورودی آن‌ها در شرایط راه‌اندازی ۱۵۸
- شکل ۶-۶: گشتاور راه‌اندازی موتورها بر حسب جریان ورودی آن‌ها ۱۵۸
- شکل ۶-۷: ضریب توان ورودی موتورها بر حسب جریان ورودی آن‌ها در شرایط راه‌اندازی ۱۵۹
- شکل ۶-۸: ولتاژ خط ترمینال موتورها بر حسب جریان ورودی آن‌ها در سرعت سنکرون ۱۶۱
- شکل ۶-۹: توان سه‌فاز ورودی موتورها بر حسب جریان ورودی آن‌ها در سرعت سنکرون ۱۶۱
- شکل ۶-۱۰: بازده موتورها بر حسب جریان ورودی آن‌ها در سرعت سنکرون ۱۶۱
- شکل ۶-۱۱: ضریب توان ورودی موتورها بر حسب جریان ورودی آن‌ها در سرعت سنکرون ۱۶۲

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: خواسته‌ها، قیود و پارامترهای ثابت طراحی موتور نمونه ۵۴
- جدول ۲-۲: محدوده تغییرات مجاز و گام جستجو برای هر یک متغیرهای طراحی ۵۵
- جدول ۳-۲: محدوده تغییرات مجاز و گام جستجو برای هر یک متغیرهای طراحی ۵۶
- جدول ۱-۶: موتورهایی که کمترین و بیشترین مقادیر کمیت‌ها را در شرایط راه‌اندازی به خود اختصاص داده‌اند ۱۵۹

فصل ۱:

مقدمه

موتورهای هیستریسیس^۱ یا پسماند که برای اولین بار در سال ۱۹۰۰ میلادی توسط آقای اشتاینمتر^۲ توصیف شدند [۱]، موتورهای سنکرون خودراه‌اندازی هستند که بر اساس خصوصیات پسماند مواد مغناطیسی عمل می‌کنند. این موتورها در توان‌های کمتر از یک اسب بخار کاربردهای زیادی پیدا کرده‌اند و از ویژگی‌های منحصربه‌فردی برخوردارند که از آن جمله می‌توان به ساختار ساده و مستحکم، مشخصه گشتاور-سرعت تقریباً یکنواخت، عملکرد بسیار نرم و کم‌صدا و همچنین، جریان راه‌اندازی پایین اشاره کرد [۲]، [۳]. این ویژگی‌ها باعث توسعه کاربرد موتورهای هیستریسیس به‌ویژه در بسیاری از سیستم‌های سرعت بالا مانند سانتریفیوژها، ژيروسکوپ‌ها، توربوشارژرها و غیره شده است. به‌رحال، راندمان و ضریب توان نسبتاً کم، و همچنین چگالی گشتاور پایین از معایب ذاتی آن‌ها به‌شمار می‌آیند که در بعضی از کاربردهای ویژه این‌گونه موتورها به‌عنوان یک مشکل اساسی مطرح می‌شوند [۴-۶]. لازم به ذکر است موتورهای هیستریسیس به راحتی می‌توانند برای سرعت‌های بسیار بالا طراحی و بهره‌برداری شوند. در این سرعت‌ها، حتی با وجود چگالی گشتاور کوچک، چگالی توان موتورهای هیستریسیس می‌تواند از سایر موتورهای الکتریکی بزرگتر باشد [۷].

۱-۱- اصول اولیه تئوری عملکرد موتورهای هیستریسیس

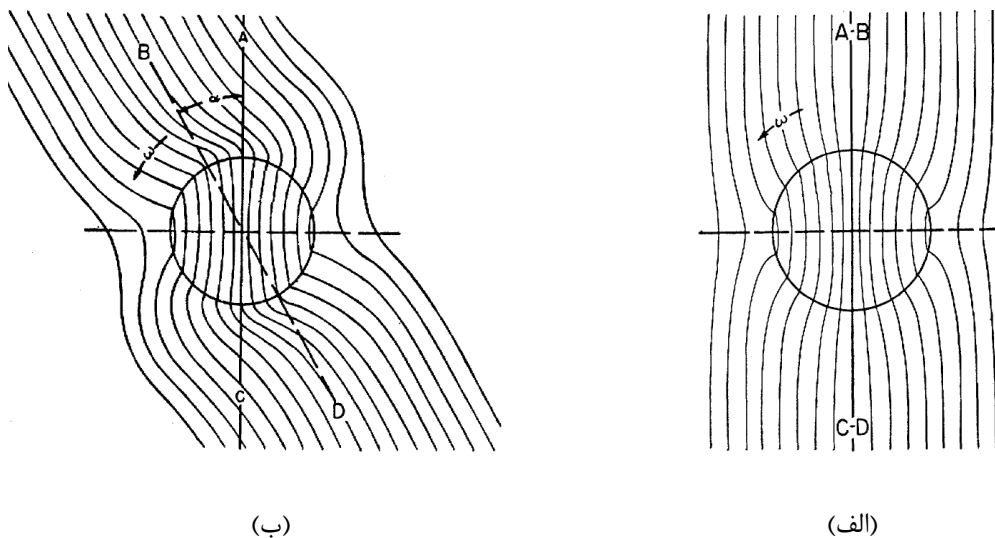
اساس عملکرد کلیه موتورهای هیستریسیس را می‌توان به‌کمک شکل ۱-۱ توضیح داد. در این شکل یک استوانه آهنی نشان داده شده است که در معرض یک میدان مغناطیسی دوار با سرعت ω قرار دارد. این میدان دوار می‌تواند توسط یک استاتور با سیم‌پیچی چندفاز تولید شود. بنابراین در برخی از مراجع از آن به عنوان نیروی محرکه مغناطیسی (mmf^3) دوار یاد شده است. اگر استوانه دارای خاصیت هیستریسیس نباشد، برای همه نقاط داخلی آن چگالی شار مغناطیسی با شدت میدان مغناطیسی هم‌فاز است. بنابراین، خطوط شار مغناطیسی به‌صورت شکل ۱-۱-الف ایجاد می‌شوند که

¹ Hysteresis Motors

² Steinmetz

³ Magnetomotive Force

در آن محور مغناطیسی روتور (AC) با محور مغناطیسی میدان دوار (BD) منطبق است و در نتیجه، هیچ گشتاوری بر استوانه وارد نمی‌شود. اما اگر استوانه دارای خاصیت هیستریزس باشد، در هر نقطه در داخل آن چگالی شار مغناطیسی نسبت به شدت میدان مغناطیسی تأخیر فاز پیدا می‌کند. بنابراین، خطوط شار مغناطیسی به صورت شکل ۱-۱-ب ایجاد می‌شوند که در آن محور مغناطیسی روتور نسبت به محور مغناطیسی میدان دوار عقب می‌افتد و لذا یک گشتاور الکترومغناطیسی ایجاد می‌شود. این گشتاور با سینوس زاویه بین دو محور مغناطیسی متناسب است و تمایل به چرخش استوانه در جهت میدان دوار دارد. اکنون اگر استوانه بتواند آزادانه حول محور خود بگردد، این گشتاور الکترومغناطیسی آن را به حرکت درمی‌آورد تا جایی که سرعت استوانه برای اولین بار به سرعت میدان دوار (سرعت سنکرون) برسد. این لحظه با عنوان لحظه ورود به سنکرونیزم شناخته می‌شود.



شکل ۱-۱: یک استوانه آهنی درون یک میدان مغناطیسی دوار (الف) استوانه فاقد خاصیت هیستریزس است (ب) استوانه خاصیت هیستریزس دارد [۵].

در حالت ایده‌آل فرض می‌شود که در دوره راه‌اندازی (از لحظه راه‌اندازی تا لحظه ورود به سنکرونیزم)، راستای میدان در هر نقطه از شکل ۱-۱-ب با گذشت زمان ثابت می‌ماند و همه نقاط استوانه یک حلقه هیستریزس یکسان را تجربه می‌کنند. در این صورت می‌توان نشان داد که گشتاور ناشی از وجود پدیده هیستریزس متناسب است با حاصلضرب حجم ماده هیستریزس (V) و مساحت

حلقه هیستریزیس (E_h) [۴]. یعنی:

$$T_h \propto VE_h . \quad (1-1)$$

این رابطه نشان می‌دهد که گشتاور هیستریزیس از لحظه راه‌اندازی تا لحظه ورود به سنکرونیزم ثابت است.

اگر سرعت استوانه شکل ۱-۱-ب برابر با ω_r باشد ($0 \leq \omega_r \leq \omega_s$)، می‌توان توان مکانیکی تولیدی در اثر وجود پدیده هیستریزیس را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$P_{mh} = \omega_r T_h = K(1-s)f_s E_h , \quad (2-1)$$

که در این رابطه K ، s و f_s به ترتیب عبارتند از یک عدد ثابت، لغزش و فرکانس میدان دوار. از (۲-۱) مشاهده می‌شود که توان هیستریزیس با سرعت چرخش متناسب است. به راحتی می‌توان نشان داد که تلفات هیستریزیس در استوانه در لغزش s برابر خواهد بود با:

$$P_{lh} = K s f_s E_h , \quad (3-1)$$

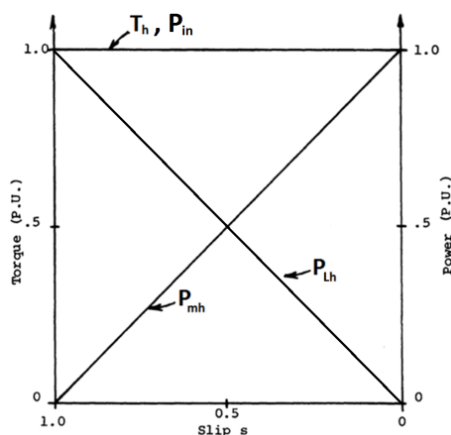
که این تلفات با لغزش متناسب است. اگر از تلفات جریان ادی چشم‌پوشی شود، کل توان تحویلی به استوانه برابر خواهد بود با:

$$P_{in} = P_{mh} + P_{lh} = K f_s E_h . \quad (4-1)$$

واضح است که توان ورودی کل در دوره راه‌اندازی، همانند گشتاور هیستریزیس، مستقل از سرعت استوانه است. شکل ۲-۱ نحوه تغییرات گشتاور، توان مکانیکی، توان ورودی و تلفات هیستریزیس را بر حسب لغزش نشان می‌دهد.

۱-۲- ساختارهای ماشین هیستریزس

کاربردهای متنوع و متفاوت برای موتورهای هیستریزس باعث شده است که ساختارهای زیادی برای این موتورها مطرح شود. هر کدام از این ساختارها به لحاظ عملکرد و ملاحظات طراحی ویژگی‌های خاص خود را دارند که آن‌ها را برای استفاده در کاربردهای خاص مناسب می‌سازد. موتورهای هیستریزس از نقطه نظر ساختار کلی به دو دسته موتورهای استوانه‌ای و موتورهای تخت (دیسکی) تقسیم می‌شوند. در ادامه این بخش به معرفی اجمالی این دو نوع ساختار اساسی پرداخته می‌شود.

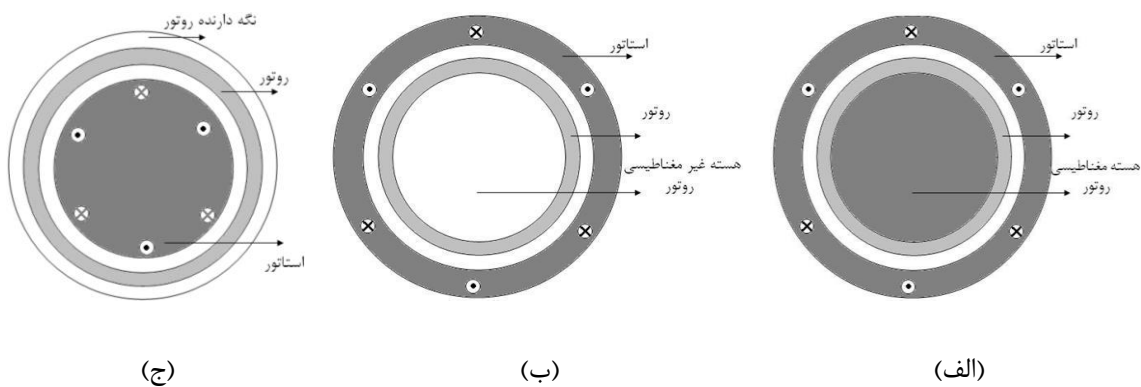


شکل ۱-۲: نحوه تغییرات گشتاور هیستریزس، توان مکانیکی هیستریزس، توان ورودی و تلفات هیستریزس بر حسب لغزش از لحظه راه‌اندازی تا لحظه ورود به سنکرونیسم.

۱-۲-۱- ماشین هیستریزس استوانه‌ای

استاتور موتورهای هیستریزس استوانه‌ای مشابه با استاتور ماشین‌های القایی و سنکرون متداول است و عمدتاً یک سیم‌پیچ چندفاز بر روی آن پیچیده می‌شود. این موتورها یک روتور استوانه‌ای دارند که می‌تواند به طور کامل از مواد هیستریزس ساخته شود و یا این که شامل یک رینگ هیستریزس قرار گرفته بر روی یک نگه‌دارنده مغناطیسی و یا غیرمغناطیسی باشد. بر این اساس، می‌توان این موتورها را به سه دسته تقسیم کرد:

- موتورهای هیستریز استوانه‌ای شار شعاعی، که در آن‌ها روتور به صورت یک پارچه از مواد هیستریز ساخته می‌شود و یا این که یک رینگ هیستریز بر روی یک نگه‌دارنده مغناطیسی قرار می‌گیرد. در این نوع موتورها شار در روتور عمدتاً در راستای شعاعی می‌باشد (شکل ۱-۳-الف).
- موتورهای هیستریز استوانه‌ای شار محیطی، که در آن‌ها یک رینگ هیستریز بر روی یک نگه‌دارنده غیرمغناطیسی قرار دارد. این ساختار ساده‌ترین و معمول‌ترین ساختار برای موتورهای هیستریز استوانه‌ای است. در این نوع موتورها شار در روتور عمدتاً به صورت محیطی می‌باشد (شکل ۱-۳-ب).
- موتورهای هیستریز استوانه‌ای معکوس (روتور خارجی)، که در آن‌ها روتور در قسمت بیرونی قرار گرفته است و استاتور را در بر می‌گیرد. با استفاده از طرح معکوس امکان ساخت موتورهای مینیاتوری با ممان اینرسی زیاد وجود دارد که به‌طور گسترده‌ای در ژيروسکوپ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۱-۳-ج).



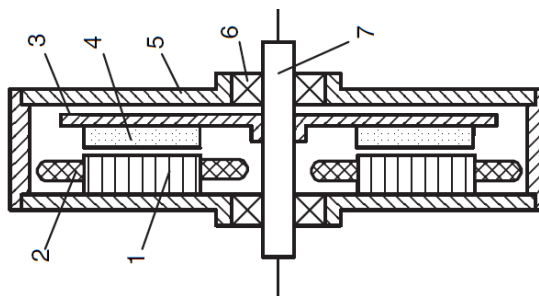
شکل ۱-۳: ساختارهای متداول برای موتورهای هیستریز استوانه‌ای: (الف) موتور هیستریز استوانه‌ای شار شعاعی (ب) موتور هیستریز استوانه‌ای شار محیطی (ج) موتور هیستریز استوانه‌ای معکوس.

۱-۲-۲- ماشین هیستریز تخت (دیسکی)

ماشین‌های نوع تخت به دلیل ویژگی‌های خاص و منحصر به فرد خود، در دهه‌های اخیر بسیار

مورد توجه قرار گرفته‌اند. به نظر می‌رسد ماشین‌های نوع تخت در مقایسه با ماشین‌های استوانه‌ای فشرده‌تر می‌باشند و به عبارت دیگر، چگالی گشتاور و چگالی توان بالاتری دارند. همچنین، فاصله هوایی در این ماشین‌ها به راحتی قابل تنظیم است. مزیت دیگر ماشین‌های تخت آن است که می‌توانند به صورت ماژولار یا چند طبقه ساخته شوند. به عبارت دیگر، می‌توان برای رسیدن به توان و یا گشتاور دلخواه، چند ماشین تخت را در امتداد محور در کنار هم قرار داد و یک ماشین تخت بزرگ‌تر ساخت. امروزه ماشین‌های نوع تخت آهنربای دائم بسیار شناخته شده هستند، اما موتور هیستریزس نوع تخت در مقایسه با موتور هیستریزس استوانه‌ای بسیار کم مورد بررسی قرار گرفته است.

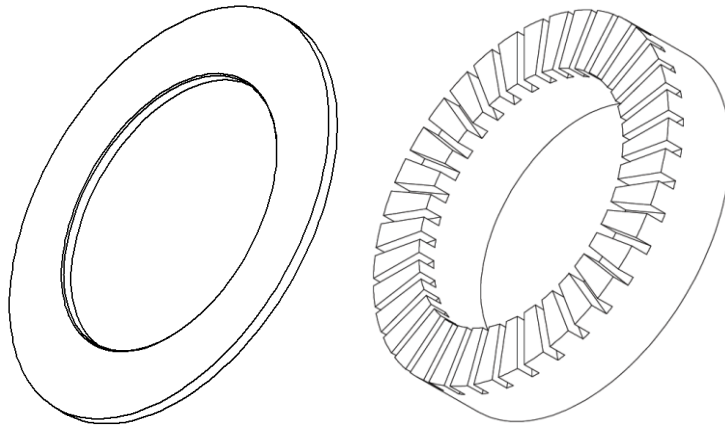
از نقطه نظر تئوری، هر ماشین استوانه‌ای می‌تواند نسخه تخت همتای خود را داشته باشد. بنابراین، در ساده‌ترین حالت، می‌توان ماشین هیستریزس تخت را به صورت باز شده و یا گسترده ماشین هیستریزس استوانه‌ای در نظر گرفت. شکل ۴-۱ نمای دوبعدی ماشین هیستریزس تخت همتای ماشین هیستریزس استوانه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱: ماشین هیستریزس نوع تخت همتای ماشین هیستریزس استوانه‌ای. ۱- هسته استاتور، ۲- سیم‌پیچ استاتور، ۳-نگه‌دارنده دیسک هیستریزس، ۴- دیسک هیستریزس، ۵- قاب، ۶- یاتاقان و ۷- محور [۸].

در ماشین هیستریزس تخت، آن بخش از روتور که دارای خاصیت هیستریزس است به شکل یک دیسک می‌باشد و بنابراین به دیسک هیستریزس یا دیسک روتور معروف است. نمای سه‌بعدی هسته استاتور و دیسک هیستریزس موتور شکل ۴-۱ در شکل ۵-۱ نشان داده شده است.

شکل ۴-۱ تنها ساختار موجود برای ماشین هیستریزیس تخت نیست، بلکه این ماشین‌ها در ساختارهای متنوعی عرضه می‌شوند. ماشین‌های هیستریزیس تخت بر اساس چند معیار قابل دسته‌بندی هستند که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.



شکل ۵-۱: نمای سه‌بعدی هسته استاتور و دیسک هیستریزیس موتور نشان داده شده در شکل ۴-۱.

۱-۲-۲-۱ - دسته‌بندی بر اساس مسیر عبور شار در داخل دیسک هیستریزیس

(۱) موتور هیستریزیس شار محوری: در این موتورها شار عبوری از دیسک هیستریزیس عمده‌تاً محوری است. در شکل ۴-۱ اگر دیسک هیستریزیس نازک باشد و بر روی یک نگه‌دارنده از جنس مواد مغناطیسی قرار گرفته باشد، شار عبوری از دیسک هیستریزیس محوری خواهد بود.

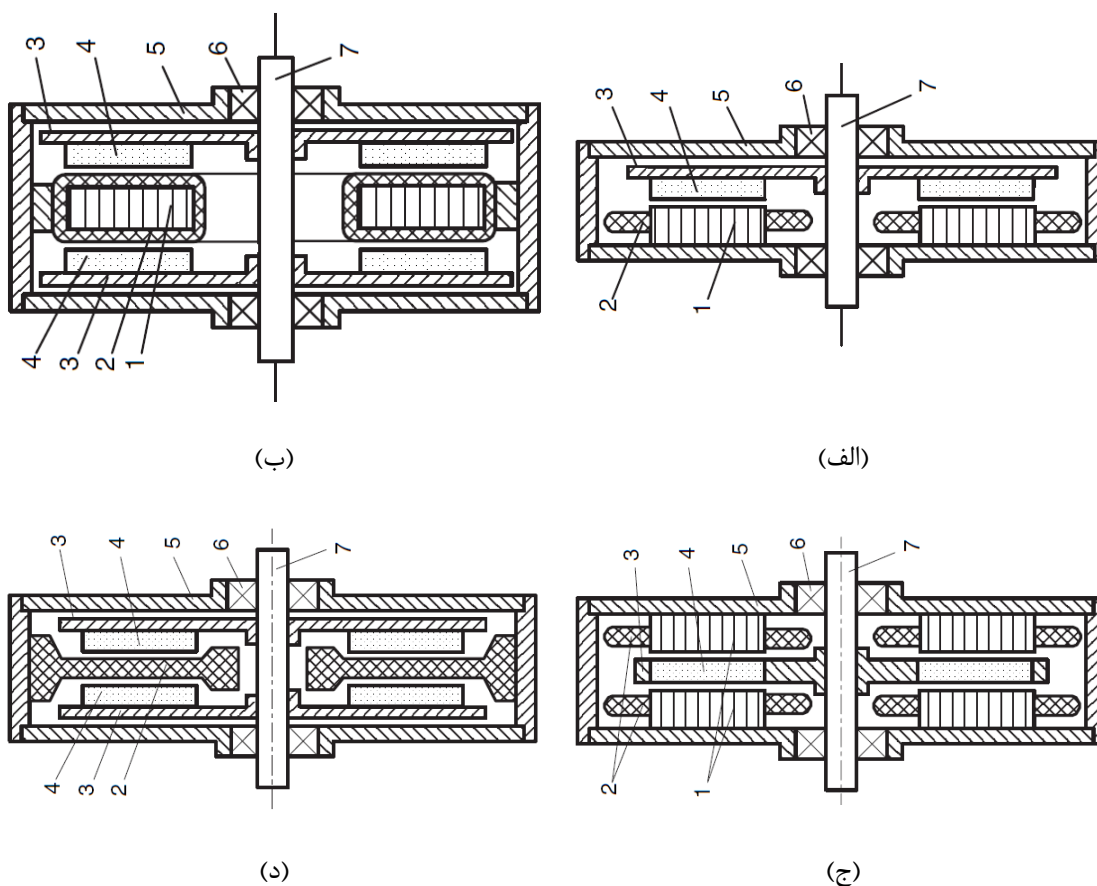
(۲) موتور هیستریزیس شار محیطی: در این موتورها شار عبوری از دیسک هیستریزیس عمده‌تاً محیطی است. در شکل ۴-۱ اگر دیسک هیستریزیس نازک باشد بر روی یک نگه‌دارنده از جنس مواد غیرمغناطیسی قرار داشته باشد، شار عبوری از دیسک هیستریزیس محیطی خواهد بود.

۱-۲-۲-۲ - دسته‌بندی بر اساس تعداد دیسک‌های هیستریزیس و استاتورها

(۱) موتور هیستریزیس یک‌طرفه: در این موتورها فقط در یکی از طرفین استاتور یک دیسک

هیستریزس قرار می‌گیرد و طرف دیگر استاتور آزاد باقی می‌ماند (شکل ۱-۶-الف).

۲) موتور هیستریزس دوطرفه: این دسته از موتورها خود به دو نوع تقسیم می‌شوند. نوع اول دارای دو دیسک هیستریزس و یک استاتور می‌باشد و با نام موتور دوطرفه با استاتور داخلی شناخته می‌شود. در این موتورها در هر طرف استاتور یک دیسک هیستریزس قرار می‌گیرد و این دو دیسک از طریق محور به هم متصل می‌شوند (شکل ۱-۶-ب و شکل ۱-۶-د). موتور نوع دوم یک دیسک هیستریزس و دو استاتور دارد و به نام موتور دوطرفه با روتور داخلی شهرت دارد. در این موتور، دو استاتور روبروی هم قرار می‌گیرند و دیسک هیستریزس بین آن‌ها جای می‌گیرد (شکل ۱-۶-ج)



شکل ۱-۶: چند نمونه از ساختارهای موتور هیستریزس تخت: (الف) موتور یک‌طرفه با استاتور شیاردار (ب) موتور دوطرفه با استاتور داخلی بدون شیار (ج) موتور دوطرفه با دو استاتور شیاردار (د) موتور دوطرفه با استاتور داخلی بدون هسته. ۱- هسته استاتور، ۲- سیم‌پیچ استاتور، ۳- نگه‌دارنده دیسک هیستریزس، ۴- دیسک هیستریزس، ۵- قاب، ۶- یاتاقان و ۷- محور [۸].

۳) موتور هیستریزیس چندطبقه: این موتورها از کنار هم قرار گرفتن چند موتور هیستریزیس دوطرفه در امتداد محور بدست می‌آید. به عنوان مثال، موتور شکل ۱-۷ متشکل از سه موتور هیستریزیس دوطرفه با استاتور داخلی است که محور آن‌ها مشترک است.

۱-۲-۳- دسته‌بندی بر اساس نوع هسته استاتور

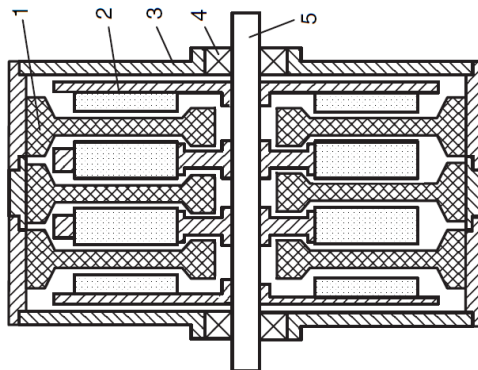
۱) موتور هیستریزیس با استاتور دارای هسته مغناطیسی شیاردار: در این موتور سطحی از هسته مغناطیسی استاتور که روبروی دیسک هیستریزیس قرار دارد (سطح مجاور به فاصله هوایی) دارای شیارهایی است که کلاف‌ها در آن‌ها قرار می‌گیرند (شکل ۱-۵ و شکل ۱-۶ الف). باید توجه داشت که برای کاهش تلفات آهن استاتور، این نوع هسته به صورت مورق ساخته می‌شود (شکل ۱-۸ د). در صورتی که برای ساخت هسته استاتور از کامپوزیت‌های مغناطیسی نرم (SMC)^۱ استفاده شود، نیازی به مورق ساختن هسته نیست.

۲) موتور هیستریزیس با استاتور دارای هسته مغناطیسی بدون شیار: در این نوع موتور، هسته مغناطیسی استاتور فاقد هرگونه شیار است و از لحاظ هندسی شبیه یک دیسک می‌باشد (شکل ۱-۶ ب و شکل ۱-۱۱ ب). مشابه هسته استاتور شیاردار، این نوع هسته نیز باید مورق ساخته شود (شکل ۱-۸ ب)، مگر آن‌که از مواد SMC تهیه شده باشد (شکل ۱-۸ ج).

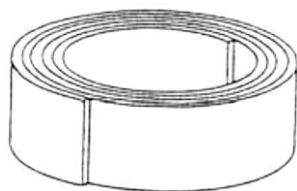
۳) موتور هیستریزیس با استاتور بدون هسته مغناطیسی: در این نوع موتور، هسته استاتور از مواد مغناطیسی ساخته نمی‌شود. در این حالت، هسته غیرمغناطیسی فقط وظیفه نگه‌داری سیم‌پیچ استاتور را به عهده دارد و باید به گونه‌ای باشد که فاصله هوایی مؤثر بین استاتور و روتور را بیش از حد افزایش ندهد. بنابراین معمولاً به صورت یک دیسک بسیار نازک از مواد غیرمغناطیسی ساخته می‌شود که سیم‌پیچ‌ها بر روی آن قرار می‌گیرند. در روشی دیگر، بعد از پیاده‌سازی سیم‌پیچی استاتور، آن را

^۱ Soft Magnetic Composites

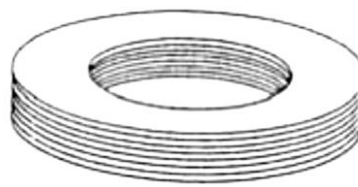
درون یک ماده چسبمانند غرق می‌کنند تا پس از سخت شدن آن ماده، سیم‌پیچ‌ها محکم سر جای خود نگه داشته شوند و استاتوری به شکل یک دیسک به دست آید (شکل ۱-۹-الف). حتی در برخی از موارد، برای کاهش هر چه بیشتر فاصله هوایی، سیم‌پیچ‌ها در ناحیه‌ای که روبروی دیسک هیستریزس قرار می‌گیرند هیچ گونه نگه‌دارنده‌ای ندارند (شکل ۱-۶-د، شکل ۱-۷ و شکل ۱-۹-ب).



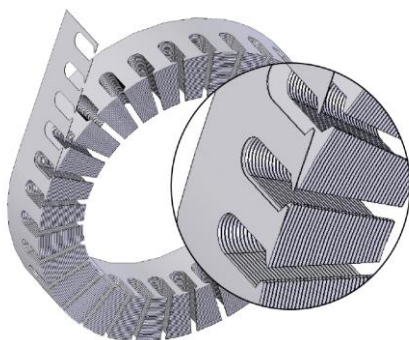
شکل ۱-۷: یک نمونه موتور هیستریزس تخت چندطبقه با استاتور بدون هسته مغناطیسی. ۱- سیم‌پیچ استاتور، ۲- دیسک هیستریزس و نگه‌دارنده آن، ۳- قاب، ۴- یاتاقان و ۵- محور [۸].



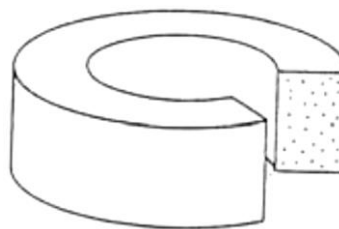
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱-۸: چند نمونه از ساختارهای هسته مغناطیسی استاتور در موتورهای هیستریزس: (الف) هسته مورق در موتور استوانه‌ای (ب) هسته مورق بدون شیار موتور تخت (ج) هسته یکپارچه بدون شیار موتور تخت ساخته شده از مواد SMC (د) هسته مورق شیاردار موتور تخت.

۱-۲-۴- دسته‌بندی بر اساس نحوه سیم‌پیچی استاتور

۱) موتور هیستریزیس با سیم‌پیچ متشکل از کلاف‌هایی که محور آن‌ها عمود بر صفحه فاصله هوایی است: سیم‌پیچ استاتور این نوع موتورها مشابه با سیم‌پیچ معمول استاتور ماشین هیستریزیس استوانه‌ای است. در این حالت، کله‌سیم‌ها بخشی از محیط‌های خارجی و داخلی استاتور را دربر می‌گیرند (شکل ۱-۶-الف، شکل ۱-۶-ج، شکل ۱-۶-د، شکل ۱-۷ و شکل ۱-۱۰).

۲) موتور هیستریزیس با سیم‌پیچ متشکل از کلاف‌هایی که محور آن‌ها موازی با صفحه فاصله هوایی است: در این نوع موتورها، کلاف‌ها به صورت حلقوی یا تروئیدال دور هسته استاتور پیچیده می‌شوند و کله‌سیم‌ها ضخامت محوری استاتور را می‌پیمایند (شکل ۱-۶-ب و شکل ۱-۱۱). باید توجه داشت که این نوع سیم‌پیچ برای استاتورهای فاقد هسته مغناطیسی قابل استفاده نیست.



(ب)

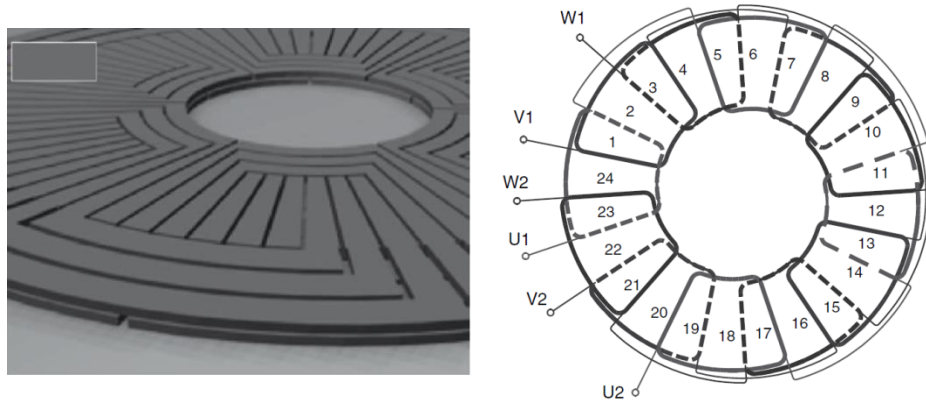


(الف)

شکل ۱-۹: چند نمونه استاتور تخت بدون هسته مغناطیسی (الف) سیم‌پیچ غرق شده در یک ماده چسب‌مانند (ب) سیم‌پیچ بدون هیچ‌گونه نگه‌دارنده [۹].

اگرچه بر اساس دسته‌بندی‌های بالا، موتورهای هیستریزیس تخت متنوعی قابل حصول هستند، اما تنها چند نوع از آن‌ها دارای اهمیت عملی هستند. در بین مهم‌ترین آن‌ها، ساختارهایی که تاکنون در مراجع مورد بررسی قرار گرفته‌اند عبارتند از: موتور یک‌طرفه با استاتور دارای هسته مغناطیسی

شیاردار [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، موتور دوطرفه با استاتور داخلی دارای هسته مغناطیسی بدون شیار [۱۳] و موتور دوطرفه با استاتور داخلی بدون هسته مغناطیسی [۱۴].



شکل ۱۰-۱: دو نمونه سیم‌پیچی استاتور ماشین تخت متشکل از کلاف‌هایی با محور عمود بر صفحه فاصله هوایی [۸].



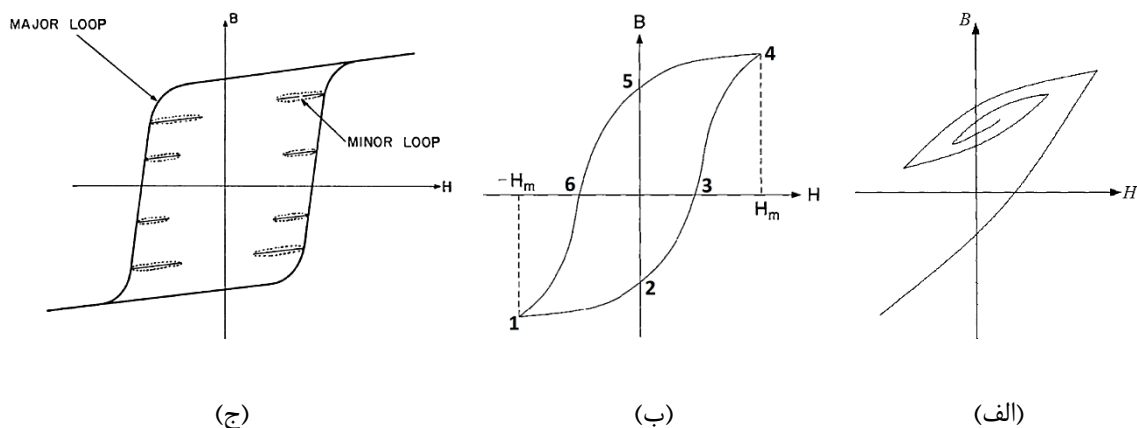
شکل ۱۱-۱: دو نمونه سیم‌پیچی استاتور ماشین تخت متشکل از کلاف‌هایی با محور موازی صفحه فاصله هوایی [۸].

۱-۳-۱- مدل‌سازی پدیده هیستریزس مغناطیسی

۱-۳-۱- معرفی پدیده هیستریزس

اگر یک ماده دارای خاصیت هیستریزس مغناطیسی باشد، رابطه بین شدت میدان مغناطیسی H و چگالی شار مغناطیسی B در هر نقطه از آن با یک مشخصه غیرخطی چندشاخه‌ای همانند

شکل ۱-۱۲-۱ الف قابل بیان است. در این مشخصه، انتقال از یک شاخه به شاخه دیگر، بعد از اکسترم شدن H اتفاق می‌افتد. اگر تغییرات H بسیار سریع نباشد، شاخه‌ها فقط با توجه به مقادیر اکسترم گذشته H انتخاب می‌شوند، در حالیکه نحوه تغییرات H بین نقاط اکسترم، تأثیری بر روی انتخاب شاخه‌ها ندارد [۱۵]. اگر H به صورت متناوب نسبت به زمان بین دو مقدار اکسترم تغییر کند و اکسترم دیگری نداشته باشد، مشخصه چندشاخه‌ای هیستریزس به یک حلقه بسته مشابه شکل ۱-۱۲-۱ ب تبدیل می‌شود که یک حلقه هیستریزس اصلی^۱ نامیده می‌شود. برای بیان مشخصه‌های مغناطیسی یک ماده دارای خاصیت هیستریزس معمولاً حلقه‌های اصلی تودرتو ارائه می‌شوند. مطابق شکل ۱-۱۲-۱ ب، یکی از آثار وجود پدیده هیستریزس ایجاد یک اختلاف فاز بین H و B در هر نقطه از ماده است. در حالتی که شدت میدان مغناطیسی چندین اکسترم محلی را تجربه کند، علاوه بر حلقه اصلی، چندین حلقه کوچک نیز بر روی مشخصه هیستریزس ایجاد می‌شوند که حلقه فرعی یا حلقه جزئی^۲ نامیده می‌شود. شکل ۱-۱۲-۱ ج یک نمونه مشخصه هیستریزس با چندین حلقه فرعی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۲-۱ الف) یک نمونه مشخصه غیرخطی چند شاخه‌ای هیستریزس [۱۵]، ب) یک نمونه حلقه هیستریزس برای تغییرات متناوب H بین دو و فقط دو مقدار اکسترم [۱۵] و ج) یک نمونه مشخصه هیستریزس با چندین حلقه فرعی [۱۶].

¹ Major Loop
² Minor Loop

۱-۳-۲- مدل‌های مطرح پدیده هیستریزس

در حالت کلی، تکنیک‌های مدلسازی برای توصیف پدیده هیستریزس به دو دسته تقسیم می‌شوند: مدلسازی فیزیکی و مدلسازی پدیدارشناختی^۱. در مدلسازی فیزیکی، فرآیندهای اصلی درگیر شبیه‌سازی می‌شوند تا بتوان نحوه مغناطیس شدن را توصیف کرد. در مدل‌های پدیدارشناختی، به وسیله تولید منحنی‌هایی، رفتار ماکروسکوپییک ماده به صورت ریاضی توصیف می‌شود. این مدل‌ها از نظر محاسباتی نسبت به مدل‌های فیزیکی برتر هستند، اما هیچ دید فیزیکی از فرآیندهای در حال اتفاق ارائه نمی‌کنند. در این بخش فقط مدل‌های پدیدارشناختی معرفی می‌شوند.

۱-۳-۱- مدل‌های اسکالر

در این مدل‌ها فرض می‌شود که در هر نقطه از ماده مورد مطالعه، راستای بردارهای شدت میدان مغناطیسی $\mathbf{H}(t)$ ، چگالی شار مغناطیسی $\mathbf{B}(t)$ و مغناطیس‌شوندگی $\mathbf{M}(t)$ با گذشت زمان تغییر نمی‌کند. مدل‌های اسکالر خود به دو دسته مدل‌های استاتیک و مدل‌های دینامیک دسته‌بندی می‌شوند.

۱-۳-۱-۱- مدل‌های اسکالر استاتیک

در این مدل‌ها فرض می‌شود که مقادیر M و B در هر لحظه از زمان فقط به مقدار فعلی H و اکسترمم‌های گذشته آن وابسته بوده و مستقل از سرعت تغییرات H باشند. مشهورترین مدل‌های هیستریزس از نوع اسکالر استاتیک عبارتند از: مدل هودگدون^۲، مدل جیلز-اترتون^۳ و مدل پریساک کلاسیک^۴.

(۱) مدل هودگدون

مدل هودگدون با استفاده از معادله دیفرانسیل زیر، یک رابطه ساختاری بین H و B ارائه می‌دهد

^۱ Phenomenological Modeling

^۲ Hodgdon's model

^۳ Jiles-Atherton model

^۴ classical Preisach model

[۱۷]:

$$\frac{dH}{dB} = \alpha \cdot \operatorname{sgn}\left(\frac{dH}{dt}\right)[f(B) - H] + g(B), \quad (5-1)$$

با انتخاب مناسب α و توابع وابسته به ماده f و g ، می‌توان حلقه‌های هیستریزیس مربوط به مواد مختلف را توصیف کرد.

۲) مدل جیلز-اثرتون

از دیگر مدل‌های معروف هیستریزیس بر پایه معادلات دیفرانسیل، مدل جیلز-اثرتون است. معادلات لازم با استفاده از این اصل به دست می‌آیند که انرژی کل داده شده به ماده می‌تواند به دو بخش تقسیم شود: (۱) انرژی تلف شده (تلفات هیستریزیس) و (۲) تغییرات انرژی به واسطه تغییر در مغناطیس‌شوندگی ماده که می‌تواند برگشت‌پذیر در نظر گرفته شود. بر همین اساس مغناطیس‌شوندگی کل M به صورت مجموع یک بخش بازگشت‌پذیر (M_{rev}) و یک بخش بازگشت‌ناپذیر (M_{irr}) در نظر گرفته می‌شود. این دو مؤلفه به صورت زیر داده می‌شوند [۱۸]:

$$M_{rev} = c_j(M_{an} - M_{irr}), \quad (6-1)$$

$$M_{irr} = M_{an} - \frac{k_j \delta}{\mu_0} \frac{dM_{irr}}{dH_e}. \quad (7-1)$$

در این معادلات H_e میدان مغناطیسی مؤثر در ماده است و M_{an} مغناطیس‌شوندگی غیرهیستریزسی نامیده می‌شود که با رابطه زیر داده می‌شود:

$$M_{an} = M_{sj} \left(\coth \frac{H_e}{a} - \frac{a}{H_e} \right) \quad (8-1)$$

در معادلات (۶-۱) تا (۸-۱)، c_j ، k_j ، M_{sj} و a پارامترهای مدل می‌باشند. δ مقادیر +۱ و -۱ را اختیار می‌کند، بسته به این که آیا H در حال افزایش است یا در حال کاهش.

۱۳) مدل پریساج کلاسیک

مدل پریساج یکی از پرکاربردترین مدل‌های هیستریزس است. این مدل انواع مختلفی دارد، اما تمامی آن‌ها یک ویژگی مشترک دارند: مشخصه‌های هیستریزس از جمع آثار حلقه‌های هیستریزس مستطیلی ساده ساخته می‌شوند. مدل پریساج یک مدل کاملاً ریاضی است و فقط مختص هیستریزس مغناطیسی نیست. در فصل سوم به طور مفصل به معرفی این مدل پرداخته می‌شود.

۱-۳-۲-۱- مدل‌های اسکالر دینامیک

تمامی مدل‌هایی که تاکنون به آن‌ها اشاره شد، ذاتاً استاتیک هستند. در این مدل‌ها فقط مقادیر اکسترمم گذشته ورودی بر روی خروجی اثر خواهند گذاشت، در حالی که سرعت تغییرات ورودی بر روی تغییر شاخه‌ها اثری ندارد. با مجموعه‌ای از اصلاحات بر روی مدل‌های استاتیک، امکان ایجاد مدل‌های دینامیک وجود دارد. مدل پریساج دینامیک معروف‌ترین مدل اسکالر دینامیک است، با این وجود نسخه دینامیک مدل‌هایی مثل مدل جیلز-اثرتون نیز موجود است. طبق آزمایش‌های انجام شده، وابستگی منحنی هیستریزس به سرعت تغییرات ورودی در فرکانس‌های نسبتاً پایین (مثل فرکانس‌های مورد استفاده در ماشین‌های الکتریکی متداول) ناچیز است، و لذا می‌توان در این فرکانس‌ها از مدل‌های استاتیک استفاده نمود.

۱-۳-۲-۲- مدل‌های برداری

تمامی مدل‌هایی که تاکنون مطرح شده‌اند، از نوع اسکالر می‌باشند. در برخی از کاربردها، تغییرات میدان در یک جهت نخواهد بود و کاربرد مدل‌های اسکالر با محدودیت مواجه خواهد شد. در این حالت باید از مدل‌های برداری استفاده کرد که بسیار پیچیده هستند و معمولاً باید در کنار روش‌هایی برای مدل‌سازی رفتار چرخشی حوزه‌های مغناطیسی ماده مورد استفاده قرار گیرند. مدل‌های برداری پریساج متداول‌ترین مدل‌های برداری هیستریزس هستند.

۱-۳-۲-۳- مدلهای تقریبی

در روش‌های کاملاً تحلیلی برای طراحی و بررسی رفتار ماشین‌های هیستریزیس، مدل‌سازی دقیق مشخصه هیستریزیس معمولاً بسیار دشوار است و بنابراین در اکثر موارد از تقریب مشخصه‌های هیستریزیس استفاده می‌شود. دو نوع تقریب متداول و پرکاربرد برای مشخصه هیستریزیس عبارتند از تقریب به کمک بیضی و تقریب به کمک متوازی‌الاضلاع.

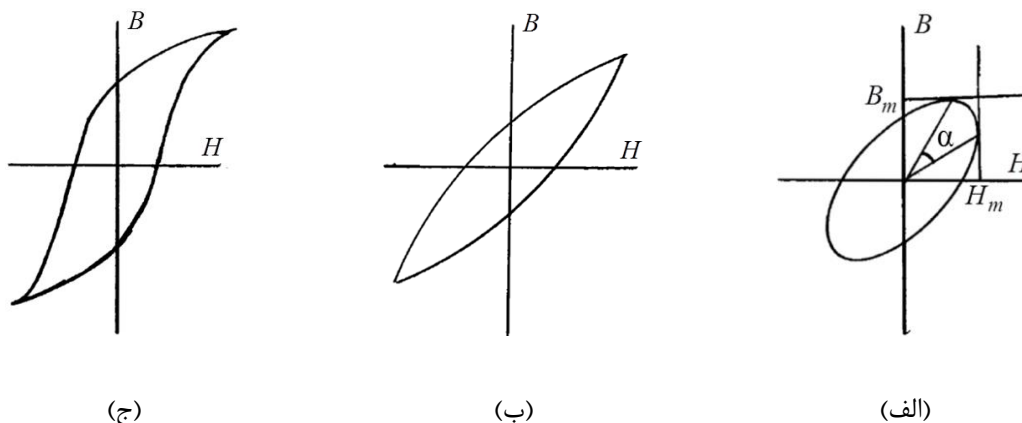
۱-۳-۲-۳-۱- تقریب به کمک بیضی

تقریب بیضوی حلقه هیستریزیس در شکل ۱-۱۳-الف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که اگر اشباع در مشخصه هیستریزیس ناچیز باشد- مقادیر کوچک برای حداکثر H - شکل حلقه هیستریزیس به بیضی نزدیک است (شکل ۱-۱۳-ب را ببینید). به هر حال اگر سطح اشباع بالا باشد، اختلاف بین شکل حلقه واقعی هیستریزیس و تقریب بیضوی آن بیشتر خواهد بود (شکل ۱-۱۳-ج را ببینید). در تقریب بیضوی از اعوجاج ایجاد شده در شکل موج‌های H و B توسط پدیده هیستریزیس صرف نظر می‌شود. یعنی در هر نقطه از ماده تغییرات زمانی H و B به صورت سینوسی خالص در نظر گرفته می‌شوند.

اگر برای H و B فازورهای $\hat{H} = H_m \angle 0$ و $\hat{B} = B_m \angle -\alpha$ را در نظر بگیریم، امکان تعریف نفوذپذیری مختلط $\tilde{\mu}$ به صورت زیر وجود خواهد داشت:

$$\tilde{\mu} = \frac{\hat{B}}{\hat{H}} = \mu e^{-j\alpha} \quad (9-1)$$

که در این رابطه $\mu = B_m / H_m$ دامنه نفوذپذیری است. در واقع، μ برابر شیب محور بیضی می‌باشد. همچنین شکل ۱-۱۳-الف نشان می‌دهد که اختلاف فاز α با پهنای بیضی مرتبط است، به صورتی که هر چه بیضی پهن‌تر شود، α بزرگتر می‌شود.

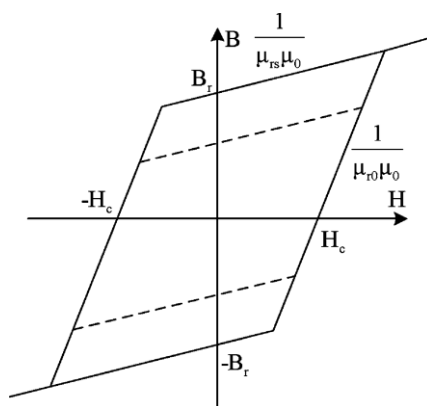


شکل ۱-۱۳: حلقه هیستریزس بیضوی در مقایسه با حلقه‌های واقعی (الف) تقریب بیضوی حلقه هیستریزس، (ب) حلقه هیستریزس برای سطوح اشباع پایین (ج) مشخصه هیستریزس برای سطوح اشباع بالا [۱۹].

۱-۳-۲-۳-۲- تقریب با متوازی‌الاضلاع

برای مواد مغناطیسی سخت، تقریب موازی‌الاضلاع نسبت به تقریب بیضوی دقت بیشتری را فراهم می‌کند [۲۰]. مطابق شکل ۱-۱۴، برای توصیف مدل متوازی‌الاضلاع فقط چهار پارامتر مورد نیاز است. در استفاده از این مدل چندین فرض در نظر گرفته می‌شود:

- ۱) نیروی مغناطیس‌زدا^۱ H_c برای همه حلقه‌ها ثابت است. چگالی شار پسماند B_r متغیر است.
- ۲) نفوذپذیری‌های مغناطیسی اشباع‌شده و اشباع‌نشده μ_{rs} و μ_{r0} ثابت در نظر گرفته می‌شوند.
- ۳) پس از اشباع، افزایش بیشتر اندازه شدت میدان سطح متوازی‌الاضلاع را افزایش نخواهد داد.



شکل ۱-۱۴: تقریب مشخصه هیستریزس به کمک متوازی‌الاضلاع [۲۰].

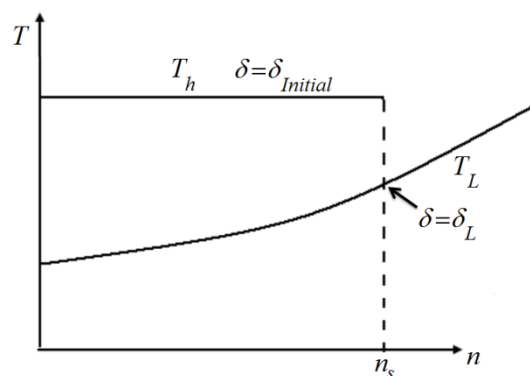
¹ Coercive Force

۴-۱- مباحث ویژه در مورد عملکرد ماشین هیستریزیس

۴-۱-۱- عملکرد موتور هیستریزیس در بار جزئی

همانطور که بیان شد، گشتاور موتور هیستریزیس ایده‌آل از لحظه راه‌اندازی تا لحظه ورود به سنکرونیزم، یک مقدار ثابت است که با توجه به مشخصه هیستریزیس ماده روتور (حلقه‌های اصلی) تعیین می‌شود. این مقدار، حداکثر گشتاوری است که ماشین هیستریزیس در سرعت سنکرون می‌تواند فراهم کند.

وقتی ماشین سنکرون برای اولین بار به سرعت سنکرون می‌رسد، در یک لحظه قطب‌های روتور نسبت به خود روتور ساکن شده و ماشین هیستریزیس تقریباً مشابه با یک ماشین مغناطیس دائم عمل می‌کند. در لحظه ورود به سنکرونیزم اگر (به صورت اتفاق نادر) گشتاور هیستریزیس دقیقاً برابر با گشتاور بار باشد، ماشین همه مشخصات ورودی و خروجی خود را بدون هیچگونه تغییرات و نوسانی حفظ می‌کند. به هر حال، اگر مطابق شکل ۱-۱۵، گشتاور تولیدی بیش از گشتاور بار در سرعت سنکرون باشد (که معمولاً همین چنین است) روتور شتاب گرفته و سرعت آن برای لحظاتی از سرعت سنکرون بیشتر می‌شود. در شکل ۱-۱۵، زاویه بین میدان‌های دوار استاتور و روتور ماشین هیستریزیس از راه‌اندازی تا اولین ورود به سرعت سنکرون و δ_L زاویه نهایی پایدار بین میدان‌های دوار استاتور و روتور برای تأمین گشتاور بار در سرعت سنکرون را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۵: مشخصه گشتاور سرعت ماشین هیستریزیس و بار

در موتورهای هیستریزیس با افزایش سرعت به بیش از سرعت سنکرون، میدان دوار استاتور در جهت عکس دوره راهاندازی، روتور را جاروب می‌کند. به عبارت دیگر، با فرض اینکه جهت گردش میدان دوار استاتور و چرخش روتور در شرایط راهاندازی پادساعتگرد باشد، در سرعت‌های کمتر از سرعت سنکرون میدان دوار استاتور هر نقطه از روتور را در جهت پادساعتگرد جاروب می‌کند. با رسیدن سرعت روتور به سرعت سنکرون، سرعت نسبی بین میدان دوار استاتور و میدان روتور برای یک لحظه ثابت شده و ماشین مشابه ماشین مغناطیس دائم عمل می‌کند. در این لحظه اگر گشتاور محرک بیش از گشتاور بار باشد با افزایش سرعت روتور به مقدار بیش از سرعت سنکرون، میدان دوار استاتور هر نقطه از روتور را در جهت ساعتگرد جاروب خواهد کرد. در این شرایط، جهت طی شدن مشخصه‌های هیستریزیس در کلیه نقاط روتور عوض می‌شود. از طرف دیگر به دلیل وجود حلقه‌های فرعی در مشخصه‌های هیستریزیس روتور، منحنی‌های برگشت هیستریزیس با مسیرهای رفت یکی نیستند و در نتیجه ضمن عوض شدن جهت پیمایش، خود مشخصه عملکردی نیز دستخوش تغییرات می‌شود. با افزایش سرعت روتور، زاویه بین میدان‌های دوار استاتور و روتور روند کاهشی دارد و گشتاور هیستریزیس نیز به تبع آن کاهش می‌یابد تا اینکه از یک لحظه به بعد گشتاور موتور کمتر از گشتاور بار می‌شود و سرعت نیز شروع به کاهش می‌کند. با کاهش سرعت، بعد از مدتی ماشین مجدداً در شرایط زیر سنکرون قرار می‌گیرد. این کاهش سرعت نیز با عکس شدن جهت طی شدن مشخصه هیستریزیس هر یک از نقاط روتور همراه است. این روند کاهشی سرعت منجر به افزایش زاویه بین میدان‌های دوار استاتور و روتور می‌شود. بنابراین، ماشین بعد از مدتی مجدداً دارای گشتاوری بیش از گشتاور بار شده و سرعت بار دیگر افزایش پیدا می‌کند تا به سرعت سنکرون رسیده و از آن عبور کند. این فرآیند نوسانات سرعت و تغییرات مشخصه‌های هیستریزیس نقاط روتور و در نتیجه، زاویه گشتاور δ ، آنقدر ادامه می‌یابد تا سرانجام موتور بر روی یک مشخصه کاری خاص تثبیت شود. نکته مهم آن است که این مشخصه کاری شبیه به هیچ یک از حلقه‌های هیستریزیس اصلی ماده سازنده روتور نخواهد بود. در این شرایط، گشتاور هیستریزیس دقیقاً برابر با گشتاور بار در سرعت سنکرون بوده و

ماشین بدون نوسان به عملکرد پایدار دائمی خود رسیده است.

لازم به تاکید است که تلفات هیستریزیس و تلفات مکانیکی نقش عمده در میرایی نوسانات سرعت در طول بازه زمانی رژیم نوسانی موتور قبل از حالت پایدار دائمی را به عهده دارند. نکته قابل ذکر دیگر اینکه در پاره‌ای از موارد، گشتاور الکترومغناطیسی موتور هیستریزیس در اولین ورود به سنکرونیزم کمتر از گشتاور بار در سرعت سنکرون است. در این صورت، سرعت موتور در حالت دائمی هرگز به سرعت سنکرون نرسیده و موتور هیستریزیس مشابه موتور القایی در شرایط آسنکرون کار خواهد کرد.

۱-۴-۲- گشتاور القایی

ماده سازنده روتور ماشین‌های هیستریزیس معمولاً یک استوانه، یک رینگ و یا یک دیسک فلزی یک‌پارچه است که یک رسانایی الکتریکی محدود دارد. همین موضوع سبب می‌شود که در شرایط آسنکرون در اثر وجود سرعت نسبی بین روتور و میدان دوار، جریان‌های گردابی در داخل روتور ماشین هیستریزیس ایجاد شوند. این پدیده مشابه با ایجاد جریان‌های القایی در سیم‌پیچ‌های اتصال کوتاه شده روتور ماشین‌های القایی است. جریان‌های گردابی در روتور ماشین هیستریزیس باعث ایجاد یک گشتاور القایی می‌شود. این موضوع سبب می‌شود که گشتاور کل موتور هیستریزیس در دوره راه‌اندازی متشکل از دو مؤلفه، یعنی گشتاور هیستریزیس و گشتاور القایی باشد. در سرعت سنکرون گشتاور القایی صفر می‌شود و فقط گشتاور هیستریزیس، که از لحظه راه‌اندازی تا رسیدن به سنکرونیزم ثابت است، باقی می‌ماند. به عبارت دیگر، در حالت ایده‌آل، گشتاور موتور هیستریزیس در سرعت‌های زیرسنکرون از گشتاور آن در سرعت سنکرون بزرگ‌تر است. همین موضوع در کنار ثابت بودن گشتاور هیستریزیس باعث شده است که مشخصه راه‌اندازی موتورهای هیستریزیس مناسب باشد که یکی از مهم‌ترین مزیت‌های آن‌ها است.

۱-۴-۳- تلفات پارازیتیک^۱

ماشین هیستریزس در حالت عملکرد دائمی یک مجموعه از تلفات دارد. این تلفات عبارتند از: (۱) تلفات هیستریزس و جریان‌های گردابی در هسته مغناطیسی استاتور، (۲) تلفات اهمی در سیم‌پیچ‌های استاتور، (۳) تلفات مکانیکی شامل تلفات اصطکاک یاتاقان‌ها و تلفات بادخوری، (۴) تلفات بار سرگردان و (۵) تلفات پارازیتیک.

موارد ۱ تا ۴ در اغلب ماشین‌های الکتریکی مشترک بوده و احتیاج به معرفی بیشتر ندارد، اما مورد پنجم یعنی تلفات پارازیتیک نیاز به کمی توضیح دارد. چنانچه بنا به هر دلیلی توزیع شار فاصله هوایی کاملاً سینوسی نباشد، حلقه‌های فرعی در مشخصه‌های هیستریزس نقاط مختلف روتور ایجاد می‌شوند. تلفات ناشی از وجود حلقه‌های فرعی متناسب با مساحت آنها است که باعث کاهش چشمگیر توان و گشتاور خروجی و همچنین بازده موتور می‌شود. این تلفات به تلفات پارازیتیک معروف است [۱۶]. دو دلیل برای بوجود آمدن این تلفات مطرح شده است. دلیل اول آن است که با توجه به محدودیت‌های موجود در توزیع سیم‌پیچ‌های استاتور، توزیع mmf استاتور سینوسی نیست. به تلفات ناشی از این پدیده، تلفات پارازیتیک نیروی محرکه مغناطیسی^۲ می‌گویند. دلیل دوم، ریپل شار ناشی از وجود دندان‌ها است. دندان‌ها با غیر یکنواخت کردن فاصله هوایی (در زیر دندان‌ها فاصله هوایی کم و در زیر شیارها فاصله هوایی زیاد است) باعث به‌وجود آمدن ریپل‌هایی در شار فاصله هوایی شده که فرکانس آن‌ها متناسب با تعداد دندان‌ها است. این ریپل‌ها نیز باعث ایجاد حلقه‌های فرعی شده که تلفات ناشی از آنها به تلفات پارازیتیک شار^۳ معروف است. حلقه‌های فرعی به‌وجود آمده از توزیع سیم‌پیچی و یا از وجود دندان‌ها، باعث ایجاد تلفات هیستریزس و جریان گردابی در روتور خواهند شد. همچنین، این حلقه‌های فرعی باعث کاهش سطح مفید مشخصه کاری موتور هیستریزس و در نتیجه کاهش گشتاور هیستریزس می‌شوند.

¹ Parasitic Loss

² MMF-Parasitic Losses

³ Flux-Parasitic Losses

۱-۴-۴- پدیده هانتینگ^۱

از جمله معایب مهم موتورهای هیستریزیس آن است که در پاره‌ای از مواقع در حالت دائمی، سرعت موتور حول سرعت سنکرون دچار نوسان می‌شود و مدت زمان نسبتاً طولانی برای میرا شدن آن مورد نیاز است. این پدیده به پدیده هانتینگ معروف است. دوره این نوسانات از مرتبه ثانیه است که در مراجع مقادیر بین ۱ تا ۴ ثانیه نیز گزارش شده‌اند. در برخی از شرایط این نوسانات حتی ممکن است میرا نشوند. از جمله دلایل اصلی پدیده هانتینگ می‌توان به اغتشاشات ناشی از تغییر یا اعوجاج در منبع تغذیه موتور یا تغییرات ناگهانی یا دوره‌ای بار مکانیکی آن اشاره کرد.

۱-۴-۵- تحریک اضافی کوتاه مدت^۲

همان‌طور که قبلاً بیان شد، بازده و ضریب توان کم و نیز چگالی گشتاور کوچک از عیوب اساسی موتورهای هیستریزیس هستند. یک راه‌کار معمول برای کاهش این عیوب عبارت است از اضافه کردن یک گشتاور سنکرون دیگر به گشتاور هیستریزیس. راه‌کار دیگر، تحریک اضافی کوتاه‌مدت می‌باشد. تحریک اضافی کوتاه‌مدت به این معنی است که ولتاژ ورودی V_i اعمالی به موتوری که در سرعت سنکرون مشغول کار است به طور پیوسته تا یک مقدار nV_i ($n > 1$) افزایش یافته و سپس به طور پیوسته تا V_i کاهش می‌یابد. ضریب n به عنوان ضریب تحریک اضافه شناخته می‌شود. مزیت استفاده از تحریک اضافه آن است که لازم نیست ساختار خود موتور تغییری کند.

اگرچه برای بهبود ضریب توان موتورهای سنکرون می‌توان از خازن‌های جبران‌ساز استفاده کرد، اما این کار ممکن است باعث ایجاد تشدید شده و معمولاً بر روی بازده نیز تأثیر قابل توجهی ندارد. تحریک اضافه کوتاه‌مدت نه تنها باعث بهبود ضریب توان می‌شود، بلکه بازده را نیز افزایش می‌دهد. به هر حال، زمانی که بار تغییرات ناگهانی دارد تحریک اضافه کوتاه‌مدت می‌تواند باعث نوسان سرعت حول سرعت سنکرون شود.

¹ Hunting

² Short Duration Overexcitation

۱-۵- مهم ترین تحقیقات انجام شده بر روی موتورهای هیستریزیس

مراجع موجود در مورد موتورهای هیستریزیس را می توان در دو قالب دسته بندی نمود: (۱) ساختارهای مورد مطالعه و (۲) نوع مطالعات انجام شده.

۱-۵-۱- ساختارهای مورد مطالعه

با توجه به اهداف این رساله، در این قسمت فقط به مرور اجمالی تحقیقات منتشر شده پیرامون ساختارهای تخت موتورهای هیستریزیس پرداخته می شود.

تعداد مراجع موجود که به نوع تخت موتورهای هیستریزیس پرداخته اند (در مقایسه با انواع استوانه ای) کم است. اکثر این مراجع نیز به مطالعه موتورهای هیستریزیس تخت یک طرفه با هسته استاتور شیاردار پرداخته اند. برای اولین بار در [۱۰] به مدلسازی این موتور پرداخته شد. در این مرجع هر دو نوع ساختار شار محیطی و شار محوری مورد بررسی قرار گرفته اند و با در نظر گرفتن مجموعه ای از فرضیات ساده کننده، یک مدار معادل الکتریکی به همراه نحوه محاسبه پارامترهای آن ارائه شده است. سال ها بعد در [۱۱] نشان داده شد که برخی از المان های این مدار معادل به ولتاژ ترمینال ماشین وابسته اند که این موضوع باعث پیچیدگی تحلیل این مدار می شود. حل معادله لاپلاس در دستگاه مختصات کارتزین دوبعدی برای یافتن توزیع میدان مغناطیسی در بخش های مختلف موتور هیستریزیس تخت یک طرفه شار محیطی با هسته شیاردار در [۲۱] ارائه شده است و با استفاده از آن رابطه جریان-گشتاور موتور نیز به دست آمده است. در [۲۲] روشی بر پایه تحلیل اجزاء محدود برای استخراج رابطه جریان-گشتاور این موتور معرفی شده است. تأثیر تغییرات فاصله هوایی بر روی عملکرد این موتور در [۲۳] مورد مطالعه قرار گرفته است. در [۲۴] یک موتور هیستریزیس با هسته استاتور شیاردار، به صورت ادغام دو موتور هیستریزیس تخت و استوانه ای شار محیطی، معرفی شده است. همچنین، یک روش طراحی ابتدایی برای این موتور جدید در [۲۵] ارائه شده است.

موتور هیستریزیس تخت تک استاتور- دو روتوره شار محیطی با استاتور دارای هسته مغناطیسی بدون شیار و سیم‌پیچی تروئیدال در [۱۳] معرفی گشت و یک مدار معادل الکتریکی برای آن ارائه شد. بکارگیری استاتور بدون هسته مغناطیسی با سیم‌پیچ روی هم برای موتور هیستریزیس تخت تک استاتور- دو روتوره شار محیطی و نحوه استخراج مدار معادل الکتریکی این ساختار جدید نیز در [۱۴] پیشنهاد شد. مرجع [۹] به ارائه یک روش طراحی بهینه برای این نوع موتور با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداخته است. دو موتور دوطرفه بدون شیار و بدون هسته نیز در [۲۶] با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

یکی از راهکارهای پیشنهاد شده برای بهبود مشخصه‌های عملکردی موتورهای هیستریزیس، اضافه کردن یک مکانیزم گشتاور دیگر به گشتاور هیستریزیس است. این کار به معرفی موتورهای ترکیبی هیستریزیس-رلوکتانس [۲۷-۳۱]، هیستریزیس-القایی [۳۲-۳۴] و هیستریزیس-مغناطیس دائم [۳۵-۳۷] منجر شده است. با این حال، تاکنون فقط دو مرجع به موتورهای ترکیبی با ساختار تخت پرداخته‌اند. مرجع [۳۸] نشان می‌دهد که چگونه می‌توان با اتصال یک لایه مسی با اندازه مناسب به سطح دیسک هیستریزیس در یک موتور تخت یک طرفه با استاتور شیاردار، گشتاور راه‌اندازی این موتور را افزایش داد. موتور ترکیبی به دست آمده به این روش، یک موتور تخت هیستریزیس-القایی می‌باشد. یک موتور تخت هیستریزیس-مغناطیس دائم نیز در [۳۹] معرفی شده است. این موتور شامل یک استاتور با هسته مغناطیسی بدون شیار، یک دیسک هیستریزیس شار محیطی و یک دیسک مغناطیس دائم با اتصال سطحی آهنرباها است. هر یک از این دیسک‌ها در یک طرف استاتور قرار می‌گیرند. اگرچه راه‌اندازی این موتور دشوار است، اما در سرعت سنکرون عملکرد قابل قبولی از خود نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که همه مراجع مرتبط با موتورهای هیستریزیس تخت، از تقریب بیضوی حلقه‌های هیستریزیس استفاده کرده‌اند.

۱-۵-۲- نوع مطالعات انجام شده

مکانیزم عملکرد موتورهای هیستریزس به نوعی متفاوت از سایر ماشین‌های الکتریکی است. بنابراین، در تحقیقات گذشته تلاش شده است که راه‌کارهایی (حتی تقریبی) برای پیش‌بینی رفتار این موتورها در شرایط مختلف ارائه شود. در این راستا، می‌توان مهم‌ترین محورهای مطالعاتی مطرح شده در مراجع مرتبط با موتورهای هیستریزس را به این شرح دسته‌بندی نمود: یافتن توزیع میدان مغناطیسی درون موتور [۲، ۳۳، ۴۰-۴۳]، تخمین گشتاور تولیدی [۴، ۴۴-۵۰]، استخراج مدارهای معادل الکتریکی [۳، ۵۱-۵۳]، پیش‌بینی رفتار دینامیکی [۵۴-۵۶]، بررسی اثرات هارمونیک‌ها [۵۷-۶۲]، مطالعه رفتار آسنکرون [۶۳-۶۷]، ارزیابی اثرات تحریک اضافه کوتاه مدت [۶۸-۷۴]، و بررسی پدیده هانتینگ [۷۵-۷۷].

در اینجا باید اشاره کرد که در اکثر مطالعات فوق، یا از مدل‌های تقریبی هیستریزس استفاده شده است و یا این که فقط به بررسی کیفی یا آزمایشگاهی موضوع پرداخته شده است. حتی، به نظر می‌رسد در پاره‌ای از موارد از خاصیت هیستریزس روتور چشم پوشی شده است. در برخی از مراجع ادعا شده است که از مدل‌های دقیق پدیده هیستریزس استفاده شده است. بررسی دقیق‌تر مراجع مذکور نشان می‌دهد که این مدل‌های دقیق فقط برای تقریب مشخصه کاری موتور با حلقه‌های هیستریزس اصلی ماده روتور بکار گرفته شده‌اند و از قابلیت‌های اصلی این مدل‌ها استفاده نشده است.

۱-۶- چهارچوب رساله

موتورهای هیستریزس با ساختار تخت مزیت‌های ویژه‌ای نسبت به موتورهای استوانه‌ای دارند. یکی از این مزیت‌ها، امکان ساخت موتورهای تخت به صورت چندطبقه است. قابلیت‌های ساختارهای تخت چند طبقه را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

- اگر قطر خارجی موتور در فرآیند طراحی بهینه دارای محدودیت باشد، به‌صورتی که موتور

تخت یک طبقه منجر به طرح مناسبی نشود، ساختار چندطبقه می‌تواند طرح مناسب‌تری را ارائه دهد.

- در ساختارهای یک طرفه نمی‌توان از استاتور بدون هسته مغناطیسی استفاده کرد، در حالیکه برای ساختار چندطبقه چنین محدودیتی وجود ندارد.
- با استفاده از ساختار چندطبقه می‌توان در صورت لزوم ترکیبی از موتورهای شارمحیطی و شارمحوری را در یک مجموعه کنار هم قرار داد. به عنوان مثال در یک موتور با دو استاتور و سه دیسک، مسیر شار در دو دیسک انتهایی می‌تواند محیطی باشد اما در دیسک‌های میانی، بدون استفاده از هیچ نگه‌دارنده مغناطیسی، مسیر شار می‌تواند محوری باشد.
- در ساختارهای چندطبقه، به ویژه انواع با استاتورهای داخلی، از طول هادی‌ها به بهترین نحو استفاده می‌شود (طول اتصالات انتهایی کوچک است). این موضوع موجب بهبود مشخصه‌های عملکردی این موتورها می‌شود.
- در ساختار چندطبقه امکان سری و موازی کردن استاتورها به صورت دلخواه وجود دارد. این موضوع باعث تسهیل طراحی در سطح ولتاژهای گوناگون می‌شود. هم‌چنین با انتخاب اتصال مناسب می‌توان سطح مقطع سیم‌ها را به صورتی به دست آورد که از لحاظ سیم‌پیچی مناسب‌تر باشد.
- در ساختار چندطبقه امکان تغذیه بخشی از استاتورها و مدارباز کردن بخشی دیگر وجود دارد که این امر منجر به تولید گشتاورهای مختلف می‌شود. این کار برخلاف ماشین‌های مغناطیسی دائم باعث ایجاد تلفات آهن در استاتور مدار باز شده و نیز ایجاد گشتاور دندانه‌ای در صورت وجود دندانه در استاتور مدار باز شده نمی‌شود. این موضوع می‌تواند باعث شود که موتور مذکور بتواند بارهای مختلف با گشتاورهای متفاوت را در بازده و ضریب توان مناسب به حرکت درآورد.

• در برخی از کاربردها، ممکن است موتور تخت یک طبقه نتواند ممان اینرسی مطلوبی را فراهم آورد. با استفاده از ساختار تخت چند طبقه می‌توان به طراحی دست یافت که ممان اینرسی آن حتی نسبت به یک موتور استوانه‌ای طرح معکوس با ابعاد مشابه نیز بیشتر باشد.

با توجه به این موارد، در این رساله، استفاده از ساختارهای چندطبقه برای موتورهای هیستریزیس پیشنهاد می‌شود. هسته‌های استاتور از نوع مغناطیسی دارای شیار، نقش مهمی در ایجاد تلفات پارازیتیک روتور ایفا می‌کنند و هزینه ساخت آن‌ها برای ساختارهای تخت زیاد است. بنابراین، بکارگیری استاتورهای با هسته مغناطیسی بدون شیار و یا بدون هسته مغناطیسی پیشنهاد می‌شود. از این پس برای سادگی، به جای عنوان "ساختار تخت دارای استاتور با هسته مغناطیسی بدون شیار" از عنوان مختصر "ساختار بدون شیار" استفاده می‌شود. به طور مشابه، عنوان "ساختار بدون هسته" جایگزین عنوان "ساختار تخت دارای استاتور بدون هسته مغناطیسی" می‌شود.

متأسفانه، مبحث طراحی موتورهای هیستریزیس تا حدود زیادی مورد غفلت واقع شده است. اندک کارهای منتشر شده در این زمینه نیز با نواقصی همراه می‌باشند. بنابراین، در فصل دوم یک روش عمومی برای طراحی موتورهای مورد مطالعه ارائه می‌شود.

برای پیش‌بینی دقیق رفتار یک موتور هیستریزیس لازم است مشخصه‌های دقیق هیستریزیس مربوط به هر یک از نقاط ماده هیستریزیس روتور مشخص شود. این مشخصه‌ها با یکدیگر متفاوت بوده و ممکن است شامل حلقه‌های فرعی نیز باشند. برای این منظور، لازم است که بین مدل الکترومغناطیسی موتور و یک مدل دقیق از پدیده هیستریزیس تزویج برقرار شود. متأسفانه، به دلیل پیچیدگی و زمان‌بر بودن، تاکنون در هیچ مرجعی از این رویکرد برای پیش‌بینی رفتار موتورهای هیستریزیس استفاده نشده است. مدل پریساج اسکالر استاتیک دقیق‌ترین مدل هیستریزیس در مقایسه با سایر مدل‌های مشابه است، و در فصل سوم معرفی می‌شود. در فصل چهارم، روشی برای تزویج پدیده هیستریزیس و معادلات الکترومغناطیسی حاکم بر موتور پیشنهاد می‌شود. با استفاده از این

روش، نحوه مدل‌سازی دقیق موتورهای مورد مطالعه به کمک ترکیب تحلیل اجزاء محدود موتور و مدل پریساج هیستریزیس ارائه می‌شود.

به منظور کاهش زمان مدل‌سازی، می‌توان از معادلات انتگرالی حاکم بر موتورهای مورد مطالعه برای توصیف آن‌ها استفاده نمود. در فصل پنجم، نحوه بکارگیری این توصیف انتگرالی در روش مدل‌سازی پیشنهادی ارائه می‌شود.

هر یک از موتورهای مورد مطالعه ویژگی‌ها، مشخصه‌های عملکردی و کاربردهای مختص خود را دارند. در فصل ششم، موتورهای مورد مطالعه از جنبه‌های گوناگون با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۷-۱- جمع‌بندی

در این فصل موتورهای هیستریزیس و انواع ساختارهای آن‌ها معرفی شدند. به برخی از مباحث عملکردی ویژه این موتورها نیز اشاره شد. مزایای ساختارهای تخت چند طبقه برشمرده شدند و دلایل پیشنهاد استاتورهای بدون شیار و بدون هسته برای این ساختارها ارائه شدند. همچنین، پدیده هیستریزیس و مدل‌های مطرح آن به طور مختصر معرفی شدند. در فصل بعد، روشی جدید برای طراحی موتورهای مورد مطالعه ارائه می‌شود.

فصل ۲:

طراحی بهینه

مشخصه‌های هیستریزیس مواد مغناطیسی از منحنی‌های غیرخطی چندمقداره تشکیل می‌شود. در روش‌های متداول برای طراحی ماشین‌های الکتریکی، معمولاً از خاصیت هیستریزیس مواد صرف نظر می‌شود و یا اثرات این پدیده بطور غیرمستقیم در محاسبات منظور می‌شود [۷۸-۸۰]. به هر حال، اساس عملکرد ماشین‌های هیستریزیس بر پایه این پدیده جالب، اما پیچیده، قرار دارد. بنابراین، پدیده هیستریزیس باید بطور مستقیم در فرآیند طراحی این ماشین‌ها وارد شود. با این توصیف، نمی‌توان از روش‌های متداول موجود برای طراحی دقیق ماشین‌های هیستریزیس استفاده کرد.

مرور مراجع مرتبط با موتورهای هیستریزیس نشان می‌دهد که اکثر آن‌ها به بررسی عملکرد و رفتار این موتورها پرداخته‌اند. تعداد مراجع چاپ شده پیرامون طراحی موتورهای هیستریزیس انگشت‌شمار است و هر کدام از آن‌ها، روش مختص خود را برای طراحی بکار گرفته است. در واقع، یک روش استاندارد و جامع برای طراحی موتورهای هیستریزیس وجود ندارد. اگرچه روش‌های ابتکاری مراجع برای این منظور قابل تحسین می‌باشند، اما متأسفانه همگی آن‌ها نقطه ضعف‌های جدی دارند. در این فصل، یک روش طراحی جدید برای موتورهای هیستریزیس ارائه می‌شود که نواقص روش‌های قبلی در آن رفع شده است. این روش فقط مختص موتورهای تخت بدون شیار و بدون هسته نیست، بلکه با اصلاحات کم می‌توان آن را برای انواع دیگر موتورهای هیستریزیس نیز به کار بست.

۲-۱- ارزیابی روش‌های طراحی پیشین

یک فلوجارت بسیار ساده برای طراحی یک موتور هیستریزیس استوانه‌ای فشرده در [۸۱] پیشنهاد شده است که فاقد هر گونه رابطه طراحی است. برخی روابط ابتدایی برای طراحی موتور هیستریزیس تخت دوطرفه بدون هسته در [۹] ارائه شده است. صرف‌نظر از ابتدایی بودن روش‌های این مراجع، نواقص مهمی نیز در آن‌ها دیده می‌شود. به عنوان مثال، ارتباط تنگاتنگ میان ابعاد کلاف‌ها و

گشتاور تولیدی موتور کاملاً فراموش شده است و فقط نحوه تعیین تعداد دور سیم‌پیچ بر اساس ولتاژ موتور مورد توجه قرار گرفته است.

یک روش برای طراحی موتورهای ترکیبی هیستریزیس-آهنربای دائم از نوع استوانه‌ای در [۶] پیشنهاد شده است. در این مرجع، قطر خارجی محور و قطر داخلی رینگ هیستریزیس به عنوان تنها متغیرهای طراحی انتخاب شده‌اند. با انتصاب مقادیر گوناگون به این متغیرها، و بدون هیچ گونه محاسبات الکترومغناطیسی، پنجاه طرح مختلف از یک طرح اولیه به دست آمده‌اند. لازم به ذکر است که همه این طرح‌ها دارای استاتور یکسان می‌باشند (مواد و ابعاد یکسان برای یوغ، دندانه‌ها و کلاف‌های استاتور). با توجه به قیود مسأله، فقط هشت طرح از میان کل طرح‌ها انتخاب شده‌اند. عملکرد این هشت طرح با یکدیگر مقایسه شده است و طرحی که دارای بهترین عملکرد است به عنوان طرح نهایی برگزیده شده است. باید توجه داشت که این طرح نهایی به گونه‌ای است که قیود و خواسته‌های طراحی را ارضا کند، اما مشخصات عملکردی آن به طور دقیق بر خواسته‌های طراحی منطبق نیست. در ضمن، نمی‌توان فرآیند پیشنهادی را به عنوان یک فرآیند طراحی بهینه پذیرفت.

مرجع [۲۵] جدیدترین مقاله‌ای است که به طراحی موتورهای هیستریزیس پرداخته است. نویسندگان این مقاله خود بیان کرده‌اند که روش آن‌ها یک روش ساده است که شامل پیچیدگی‌های پدیده هیستریزیس نمی‌شود. در روش پیشنهادی آن‌ها، مشخصات سیم‌پیچ (ابعاد هادی‌ها و تعداد دور کلاف‌ها) باید توسط طراح انتخاب شود. ورودی‌های معلوم طراحی فقط شامل اندازه جریان ورودی و فرکانس تغذیه می‌باشد، که این موضوع کمی عجیب به نظر می‌رسد. در نتیجه، ولتاژ ورودی موتور و گشتاور تولیدی آن نامعلوم بوده و پس از اتمام فرآیند طراحی مشخص می‌شوند.

۲-۲- روش طراحی پیشنهادی

در این رساله یک روش جامع برای طراحی موتورهای مورد مطالعه پیشنهاد می‌شود که مشکلات

و نواقص روش‌های طراحی پیشین را ندارد. در این روش، خواسته‌های طراحی (شامل ولتاژ ترمینال، گشتاور خروجی، سرعت سنکرون و فرکانس تغذیه) و نیز قیود طراحی (مکانیکی و الکترومغناطیسی) دریافت می‌شوند. طرح نهایی به گونه‌ای به دست می‌آید که قیود طراحی را نقض نکند و مشخصات عملکردی آن نیز به طور کامل بر خواسته‌های طراحی منطبق باشد.

مهم‌ترین خواسته طراحی برای موتورهای هیستریزیس، یعنی گشتاور خروجی، معمولاً در یکی از این دو شرایط مطرح می‌شود: (۱) شرایط راه‌اندازی و (۲) شرایط حداکثر گشتاور در سرعت سنکرون یا همان شرایط ورود به سنکرونیزم. گشتاور راه‌اندازی و گشتاور ورود به سنکرونیزم به نوعی بیانگر قابلیت موتور در تولید گشتاور می‌باشند. برای درک اهمیت این گشتاورها لازم است که کاربردهای موتورهای هیستریزیس را در نظر بگیریم که می‌توان آن‌ها به دو دسته تقسیم نمود: (۱) کاربردهای عمومی که موتور یک بار مکانیکی را در سرعت سنکرون تأمین می‌کند. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که هر چه گشتاور بار موتور هیستریزیس در سرعت سنکرون به گشتاور حداکثر یا همان گشتاور ورود به سنکرونیزم آن نزدیک‌تر باشد، مشخصه‌های عملکردی موتور بهتر خواهند بود. (۲) کاربردهای اختصاصی که معمولاً در آن‌ها یک قطعه با ممان اینرسی بزرگ به روتور متصل است و با سرعت زیاد به گردش درمی‌آید. در این نوع از کاربردها، گشتاور تولیدی حالت دائم موتور در سرعت سنکرون فقط به اندازه‌ای است که بر اصطکاک و بادخوری مجموعه روتور غلبه کند. بنابراین، این گشتاور نسبتاً کوچک است. به هر حال، با توجه به بزرگ بودن مقادیر اینرسی روتور و سرعت سنکرون، لازم است که گشتاور تولیدی موتور در دوره شتاب‌گیری بزرگ باشد.

گشتاور راه‌اندازی در ابتدای دوره شتاب‌گیری و گشتاور ورود به سنکرونیزم در انتهای دوره شتاب‌گیری ظاهر می‌شوند. بنابراین، این دو گشتاور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. بنابراین، در هر دو نوع کاربرد، گشتاورهای راه‌اندازی و ورود به سنکرونیزم مهم هستند و یکی از آن‌ها به عنوان خواسته اصلی طراحی مطرح می‌شود. در پاره‌ای از موارد نیز ممکن است مقدار مورد نیاز یکی از آن‌ها

داده شود و همچنین یک قید حداقل برای دیگری مطرح شود.

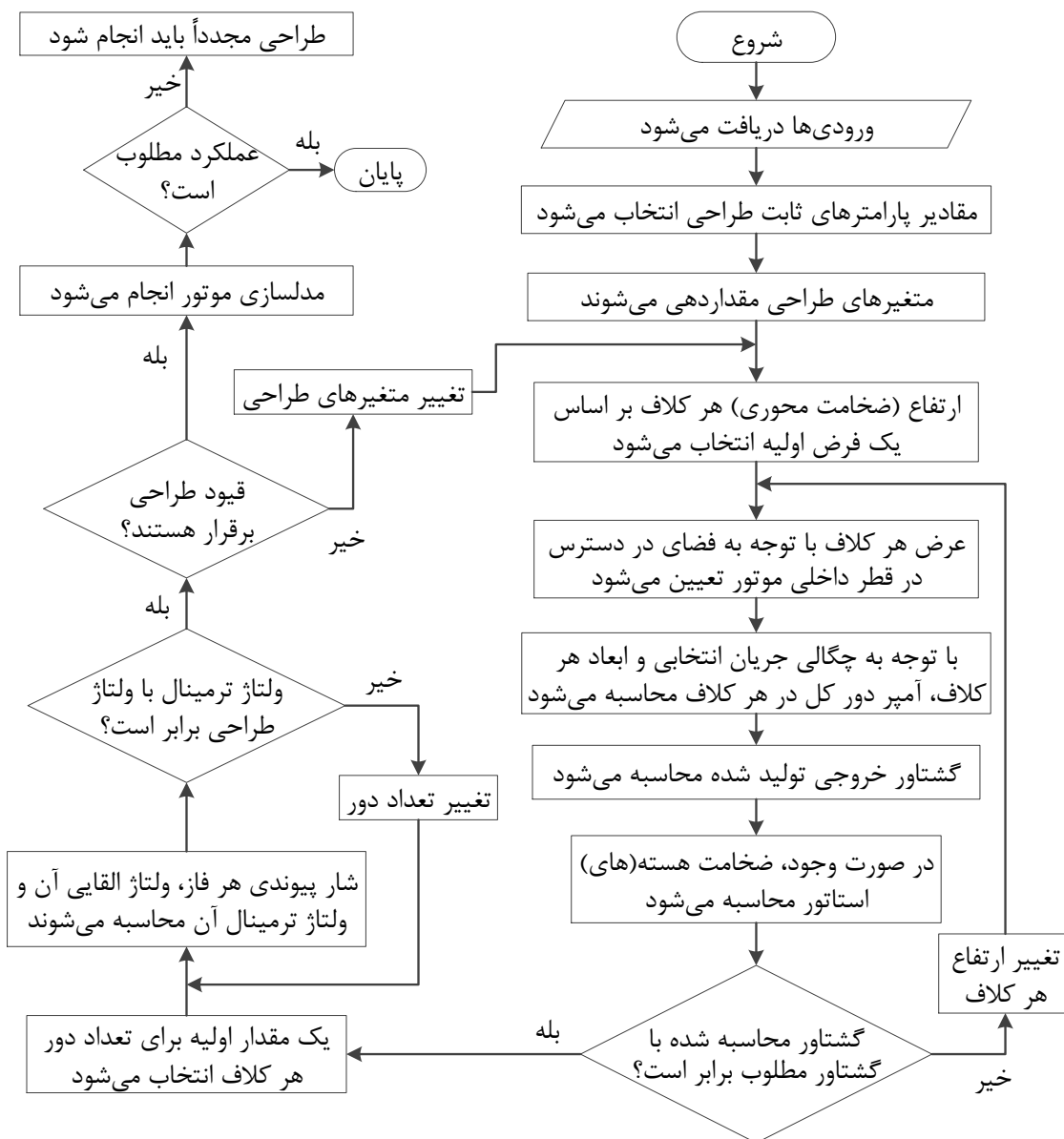
نکته کلیدی در فرآیند پیشنهادی طراحی آن است که مشخصه هیستریزس کاری روتور، و در نتیجه گشتاور تولیدی آن، وابسته به آمپر دور کلافهای استاتور است. بنابراین، با مشخص بودن چگالی جریان نامی کلافها، می توان گفت که گشتاور نامی موتور با ابعاد کلافهای استاتور ارتباط دارد. از طرف دیگر، ولتاژ القایی در هر فاز با تعداد دور سیمپیچ آن فاز ارتباط مستقیم دارد. بنابراین، ابعاد کلافها و تعداد دور آنها به ترتیب بر اساس گشتاور خواسته شده و ولتاژ ترمینال داده شده تعیین می شوند.

شکل ۱-۲ روش طراحی پیشنهادی این رساله را در قالب یک فلوچارت ارائه می دهد. این روش از دو جنبه به عنوان یک روش عمومی قابل طرح است: (۱) این روش برای انواع موتورهای هیستریزس تخت با استاتورهای بدون شیار و بدون دندانه کاربرد دارد. البته، تعمیم آن برای طراحی انواع دیگر موتورهای هیستریزس امکان پذیر است. (۲) در این روش، محدودیتی برای نحوه استخراج روابط طراحی وجود ندارد. به عبارت دیگر، هر شیوه مدلسازی که بتواند ارتباط بین ابعاد کلافها و توزیع میدان روتور، و همچنین ارتباط بین تعداد دور سیمپیچها و ولتاژ ترمینال را در اختیار گذارد، قابل استفاده است. در نتیجه، مدلسازیهای تحلیلی و یا عددی، مدلسازیهای بر پایه تقریب مشخصههای هیستریزس و یا شکل دقیق آنها، و نیز مدلسازیهای دوبعدی و یا سه بعدی، همگی قابل استفاده هستند. بدیهی است که دقت طراحی و زمان مورد نیاز آن به روش مدلسازی مورد استفاده برای استخراج روابط طراحی بستگی دارد.

در مورد الگوریتم طراحی شکل ۱-۲ باید به نکات زیر اشاره کرد:

- ورودیها که در اولین مرحله از الگوریتم دریافت می شوند عبارتند از: (۱) خواستههای طراحی (ولتاژ خط ترمینال، فرکانس تغذیه، سرعت سنکرون و نیز گشتاور راهاندازی یا گشتاور ورود به سنکرونیزم)، (۲) قیود طراحی (قیود ابعاد اصلی، حداقل و حداکثر مقادیر

مجاز برای بارگذاری الکتریکی، چگالی جریان هادی‌ها، چگالی شار مغناطیسی در استاتور و روتور و ... و (۳) مشخصات مواد (مشخصه‌های هیستریزیس ماده سازنده روتور، منحنی مغناطیس‌شوندگی هسته استاتور، ویژگی‌های هادی‌های مسی استاندارد و ...).



شکل ۱-۲: فرآیند پیشنهادی برای طراحی موتورهای هیستریزیس مورد مطالعه

- پارامترهای ثابت طراحی بیانگر انتخاب‌های طراح هستند، که می‌تواند شامل این موارد باشد: تعداد طبقات، نوع اتصال استاتورها به یکدیگر (سری یا موازی)، نوع اتصال سه‌فاز

(ستاره یا مثلث)، نقشه سیم‌پیچی، چگالی جریان کلاف‌ها.

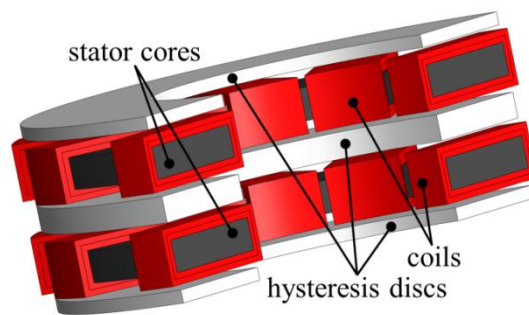
- ابعاد دیسک (های) هیستریزیس (شعاع داخلی، شعاع خارجی و ضخامت) به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته می‌شوند. در فرآیند بهینه‌سازی موتور، مقادیر بهینه این متغیرها پیدا می‌شوند. می‌توانند سایر ابعاد و مشخصات موتور (ابعاد هسته (های) استاتور، تعداد دور هر کلاف، قطر هادی‌ها و ...) بر اساس مقادیر اختصاص یافته به این متغیرها تعیین می‌شوند. دو دلیل می‌توان برای انتخاب ابعاد دیسک به عنوان متغیرهای طراحی مطرح نمود: (۱) به علت مسائل مکانیکی فرآیندهای عملیات حرارتی، ابعاد دیسک با محدودیت مواجه است. به عنوان مثال، اگر ضخامت دیسک هیستریزیس کمتر از یک حد مشخص باشد، در فرآیند آبکاری دچار تاب می‌شود. از طرف دیگر، ضخامت بیش از حد دیسک، علاوه بر تضعیف عملکرد الکترومغناطیسی موتور، موجب می‌شود که فقط سطح خارجی آن سخت شود و (۲) محدودیت‌های تجهیزات ماشین‌کاری فلزات مانع از امکان ساخت دیسک با هر ابعاد دلخواه می‌شود.

روش ارائه شده در این بخش شامل جزئیات بسیار بیشتری است. مناسب است که طرح این جزئیات از طریق بکارگیری این روش برای طراحی بهینه یک موتور نمونه صورت پذیرد.

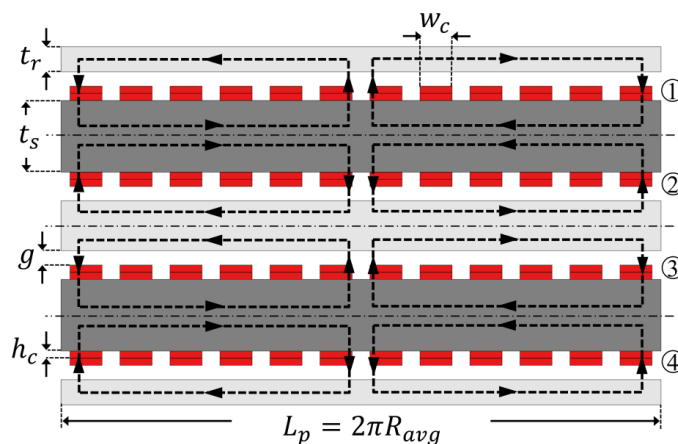
۲-۳- فرآیند کامل طراحی بهینه برای یک موتور نمونه

در این بخش، به عنوان یک نمونه، فرآیند کامل طراحی بهینه یک موتور هیستریزیس تخت چهارطبقه بدون شیار محیطی و کاملاً متقارن ارائه می‌شود. شکل ۲-۲-الف نمای سه‌بعدی این موتور را نشان می‌دهد که در آن فقط بخش‌های فعال نمایش داده شده‌اند. نمای دوبعدی موتور در شعاع متوسط نیز در شکل ۲-۲-ب ارائه شده است. در این شکل مسیرهای اصلی خطوط شار و نحوه

نام‌گذاری ابعاد اساسی موتور نیز مشخص شده‌اند. این شکل نشان می‌دهد که موتور مورد نظر را می‌توان به صورت اتصال پشت به پشت چهار موتور یک طبقه مشابه در نظر گرفت. بنابراین، کلیه محاسبات طراحی را می‌توان فقط برای یکی از این طبقات انجام داد و با استفاده از روابط مناسب، از آن‌ها برای کل موتور استفاده نمود. تعداد طبقات می‌تواند توسط طراح انتخاب شود و یا اینکه به عنوان یک خواسته جانبی مطرح شود.



(الف)



(ب)

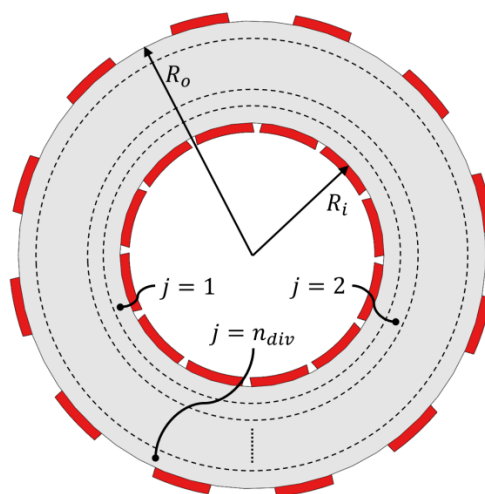
شکل ۲-۲: ساختار موتور نمونه (الف) نمای سه‌بعدی (ب) نمای گسترده موتور در شعاع متوسط

۲-۳-۱- استخراج روابط طراحی

فرض می‌کنیم که خواسته‌های طراحی برای شرایط راه‌اندازی مطرح شده‌اند. در این شرایط می‌توان ادعا کرد که مشخصه هیستریزیس کاری روتور تقریباً منطبق بر مشخصه هیستریزیس طی شده در هر یک از نقاط دیسک هیستریزیس است.

روابط طراحی موتور نمونه با استفاده از یک روش تحلیلی برای مدلسازی عملکرد حالت دائمی آن به دست می‌آیند. این مدلسازی بر اساس تقریب بیضوی حلقه‌های هیستریزس ماده روتور استوار است.

مدلسازی مورد استفاده در این بخش ذاتاً از نوع دوبعدی است ولی با یک تکنیک جالب، تغییرات میدان در راستای شعاعی نیز در آن منظور می‌شود. این خواسته از طریق تقسیم موتور به n_{div} بخش یا لایه در راستای شعاعی محقق می‌شود. شکل ۲-۳ این شیوه تقسیم‌بندی را نشان می‌دهد. در واقع، موتور به صورت اتصال سری چندین موتور کوچک در نظر گرفته می‌شود که تغییرات شعاعی میدان در هر یک از آن‌ها ناچیز بوده و بنابراین، مدل دوبعدی برای آن‌ها قابل استفاده است.



شکل ۲-۳: بخش‌بندی موتور نمونه در راستای شعاعی

۲-۳-۱-۱- حلقه‌های هیستریزس کاری

چگالی زاویه‌ای هادی‌های سیم‌پیچ معادل با توزیع سینوسی برای فاز 'a' و شکل موج جریان تحریک این فاز به ترتیب با N_{as} و i_e نشان داده شده و به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$N_{as}(\phi_{se}) = [4K_w N_{ph} / (p\pi)] |\sin(\phi_{se})|, \quad (1-2)$$

$$i_e(t) = \sqrt{2}I_s \cos(\omega_e t), \quad (2-2)$$

که در آن‌ها I_s ، ω_e ، t ، N_{ph} ، p و K_w به ترتیب بیانگر مقدار مؤثر جریان تحریک هر فاز، فرکانس زاویه‌ای تغذیه، زمان، تعداد دور در سیم‌پیچ هر فاز، تعداد قطب‌ها و ضریب سیم‌پیچی می‌باشند. زاویه الکتریکی حول استاتور، که نسبت به محور فاز 'a' سنجیده می‌شود، با ϕ_{se} نشان داده می‌شود.

چگالی جریان زاویه‌ای خالص J_s به وسیله سیم‌پیچی m -فاز استاتور، که حامل یک مجموعه جریان متعادل در a مسیر موازی هستند، ایجاد می‌شود و به صورت زیر داده می‌شود:

$$J_s(\phi_{se}, t) = \left(\frac{m}{2}\right) \left(\frac{4K_w N_{ph}}{p\pi}\right) \left(\frac{\sqrt{2}I_s}{a}\right) \sin(\omega_e t - \phi_{se}). \quad (3-2)$$

شکل ۲-۴-الف یک مسیر دیفرانسیلی را در بخش شعاعی z ام موتور نشان می‌دهد. با اعمال قانون مداری آمپر به این مسیر، خواهیم داشت:

$$J_s(\phi_{se}, t) = K_g [g + n_{cps} h_c + l_{ins}] \frac{dH_g^j(\phi_{se}, t)}{d\phi_{se}} + \frac{2}{p} R_{avg}^j H_r^j(\phi_{se}, t) - \frac{2}{p} R_{avg}^j H_s^j(\phi_{se}, t), \quad (4-2)$$

که در آن H_g^j ، H_r^j و H_s^j به ترتیب نشان‌دهنده توزیع‌های شدت میدان مغناطیسی در فاصله هوایی، دیسک هیستریزیس و هسته استاتور بخش z می‌باشند. شعاع متوسط بخش z ام، طول فاصله هوایی فیزیکی، تعداد کلاف‌ها در هر شیار موهومی استاتور، ارتفاع هر کلاف و ضخامت عایق در هر شیار مجازی به ترتیب با R_{avg}^j ، g ، n_{cps} ، h_c و l_{ins} نشان داده شده‌اند. شارهای پراکندگی باعث می‌شوند که توزیع چگالی شار فاصله هوایی در راستای محوری یکنواخت نباشد. برای در نظر گرفتن این موضوع، ضریبی بزرگتر از یک به نام K_g در (۴-۲) بکار رفته است. می‌توان طول مؤثر فاصله هوایی، g_e ، را به صورت زیر تعریف نمود:

$$g_e = g + n_{cps} h_c + l_{ins} \quad (5-2)$$

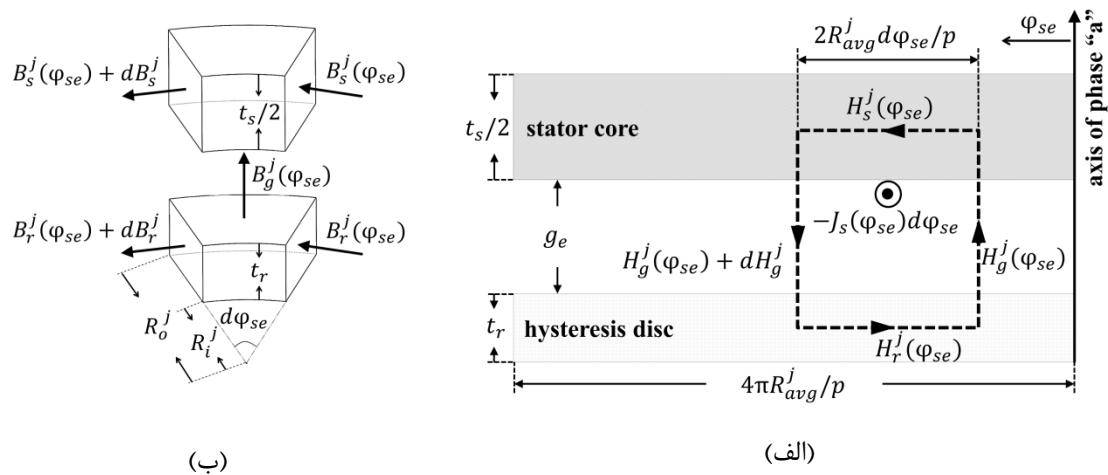
با استفاده از قانون پیوستگی شار، می‌توان چگالی شارهای فاصله هوایی و هسته استاتور را بر حسب چگالی شار دیسک هیستریزیس بیان نمود. با توجه به شکل ۲-۴-ب، روابط زیر به دست

می آیند:

$$B_g^j(\phi_{se}, t) = -\frac{pt_r}{2R_{avg}^j} \frac{dB_r^j(\phi_{se}, t)}{d\phi_{se}}, \quad (6-2)$$

$$B_s^j(\phi_{se}, t) = -\frac{2t_r}{K_{sf}t_s} B_r^j(\phi_{se}, t). \quad (7-2)$$

در این معادلات، B_s^j و B_r^j ، B_g^j به ترتیب بیانگر توزیع‌های چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی، دیسک هیستریزس و هسته استاتور بخش j ام می‌باشند. همچنین، t_r ، t_s و K_{sf} به ترتیب عبارتند از ضخامت دیسک هیستریزس، ضخامت هسته استاتور و ضیب پرشوندگی هسته موق استاتور.



شکل ۲-۴: اعمال قوانین الکترومغناطیسی به موتور. (الف) نمای گسترده بخش j ام از یک طبقه از موتور. یک مسیر دیفرانسیلی نشان داده شده است که برای اعمال قانون مداری آمپر به کار می‌رود (ب) یک برش دیفرانسیلی از بخش j ام از یک طبقه از موتور. چگالی شارها در موقعیت‌های مختلف برای اعمال قانون پیوستگی شار نشان داده شده‌اند.

بر اساس تقریب بیضوی حلقه‌های هیستریزس، B_r^j و H_r^j به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$B_r^j(\phi_{se}, t) = B_m^j \cos(\omega_e t - \phi_{se} - \phi_0^j), \quad (8-2)$$

$$H_r^j(\phi_{se}, t) = H_m^j \cos(\omega_e t - \phi_{se} - \phi_0^j + \alpha^j) = (B_m^j / \mu^j) \cos(\omega_e t - \phi_{se} - \phi_0^j + \alpha^j). \quad (9-2)$$

مقادیر حداکثر B_r^j و H_r^j به ترتیب با B_m^j و H_m^j نشان داده می‌شوند. زاویه ϕ_0^j بیانگر موقعیتی است که در آن B_r^j به ازای $t=0$ مقدار حداکثر خود را اختیار می‌کند. پارامترهای α^j و μ^j به

ترتیب زاویه تأخیر حلقه هیستریزیس و نفوذپذیری حلقه هیستریزیس نامیده می‌شوند.

نفوذپذیری خلا، یعنی μ_0 ، ارتباط بین H_g^j و B_g^j را از طریق رابطه $B_g^j = \mu_0 H_g^j$ برقرار می‌کند. برای استاتور نیز می‌توان رابطه مشابهی به صورت $B_s^j = \mu_s^j H_s^j$ در نظر گرفت، که در آن μ_s^j برابر با نفوذپذیری بخش j ام از هسته استاتور در نقطه کاری آن است. با در نظر داشتن این روابط و با جایگذاری (۳-۲) و (۶-۲)-(۹-۲) در (۴-۲)، B_m^j و ϕ_0^j پس از برخی محاسبات جبری به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$B_m^j = \frac{\left(\frac{m}{2}\right) \left(\frac{4K_w N_{ph}}{p\pi}\right) \left(\frac{\sqrt{2}I_s}{a}\right)}{\sqrt{t_r^2 \left[\frac{K_g g_e p}{2\mu_0 R_{avg}^j} + \frac{4R_{avg}^j}{K_{sf} p \mu_s^j t_s} \right]^2 + \left(\frac{2R_{avg}^j}{p\mu^j}\right)^2 + 2t_r \left[\frac{K_g g_e}{\mu_0 \mu^j} + \frac{8(R_{avg}^j)^2}{K_{sf} p^2 \mu^j \mu_s^j t_s} \right] \cos \alpha^j}}, \quad (10-2)$$

$$\phi_0^j = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left[\frac{\frac{2R_{avg}^j}{p\mu^j} \sin \alpha^j}{\frac{2R_{avg}^j}{p\mu^j} \cos \alpha^j + t_r \left(\frac{K_g g_e p}{2\mu_0 R_{avg}^j} + \frac{4R_{avg}^j}{K_{sf} p \mu_s^j t_s} \right)} \right]. \quad (11-2)$$

می‌توان N_{ph} را به صورت $n_c n_{cps} S / m$ بیان نمود. پارامترهای n_c و n_{cp} به ترتیب تعداد دورهای هر کلاف و تعداد شیارهای مجازی استاتور را نشان می‌دهند. از سوی دیگر، آمپر دور مؤثر هر کلاف، یعنی AT_c ، که برابر است با $n_c I_s / a$ را می‌توان به صورت زیر نیز بیان کرد:

$$AT_c = h_c w_c J_{coil}. \quad (12-2)$$

پارامتر J_{coil} عبارت است از چگالی جریان مؤثر هر کلاف، که توسط طراح انتخاب می‌شود. بنابراین، می‌توان (۱۰-۲) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$B_m^j = \frac{\frac{2\sqrt{2}K_w n_{cps} J_{coil} h_c w_c S}{p\pi}}{\sqrt{t_r^2 \left[\frac{K_g g_e p}{2\mu_0 R_{avg}^j} + \frac{4R_{avg}^j}{K_{sf} p \mu_s^j t_s} \right]^2 + \left(\frac{2R_{avg}^j}{p\mu^j}\right)^2 + 2t_r \left[\frac{K_g g_e}{\mu_0 \mu^j} + \frac{8(R_{avg}^j)^2}{K_{sf} p^2 \mu^j \mu_s^j t_s} \right] \cos \alpha^j}}, \quad (13-2)$$

که برای استفاده در فرآیند طراحی مناسبتر است. این رابطه بیانگر ارتباط میان ابعاد کلاف، یعنی h_c و w_c ، با حلقه هیستریزس کاری در بخش z ام روتور است.

۲-۳-۱-۲ - ولتاژ القایی

شار عبوری از یک دور از سیم پیچ فاز 'a'، یعنی φ_{loop} ، به کمک یک انتگرال گیری دوگانه فضایی از B_g^j محاسبه می شود. اگر مقادیر φ_{loop} همه دوره های سیم پیچ این فاز را با یکدیگر جمع کنیم (توسط یک انتگرال گیری دیگر)، شکل موج شار پیوندی تحریک فاز 'a' در بخش z ام موتور به دست می آید. این کمیت که با λ_a^j نشان داده می شود، در نهایت به صورت زیر بیان می شود:

$$\lambda_a^j = -[2K_w N_{ph} L_{div} t_r / a] B_m^j \sin(\omega_e t - \phi_0^j). \quad (14-2)$$

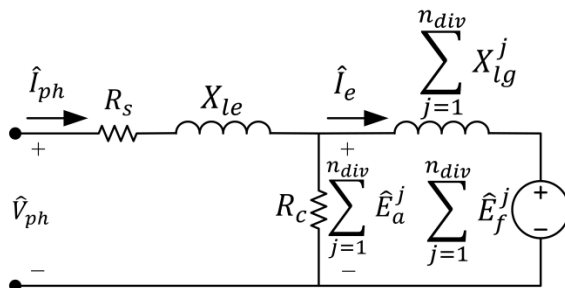
با مشتق گیری از λ_a^j نسبت به زمان، ولتاژ تحریک القایی فاز 'a' در بخش z ام موتور، یعنی e_f^j ، به صورت زیر به دست می آید:

$$e_f^j = [2\omega_e K_w N_{ph} L_{div} t_r / a] B_m^j \cos(\omega_e t - \phi_0^j + \pi). \quad (15-2)$$

۲-۳-۱-۳ - مدار معادل الکتریکی

با محاسبه ولتاژ القایی در هر فاز، می توان یک مدار معادل الکتریکی برای هر فاز از هر طبقه از موتور نمونه در نظر گرفت که ارتباط بین ولتاژ ترمینال و جریان ورودی را نشان می دهد. این مدار معادل در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. در این شکل، \hat{I}_e ، \hat{I}_{ph} و \hat{V}_{ph} به ترتیب بیاتر فازورهای جریان تحریک، جریان ورودی و ولتاژ ترمینال برای هر فاز از هر طبقه هستند. همچنین، \hat{E}_a^j و \hat{E}_f^j فازورهای ولتاژ تحریک القایی و ولتاژ فاصله هوایی را برای بخش z ام از هر فاز از هر طبقه نشان می دهند. راکتانس پراکندگی اتصالات انتهایی سیم پیچ هر فاز از هر طبقه با X_{le} مشخص شده است و X_{lg}^j بیانگر راکتانس پراکندگی فاصله هوایی بخش z ام از هر فاز از هر طبقه می باشد. همچنین، R_c عبارت است از مقاومت معادل تلفات آهن برای هر فاز از هر طبقه و R_s مقاومت اهمی سیم پیچ هر فاز

از هر طبقه را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۵: مدار معادل الکتریکی برای هر فاز از هر طبقه از موتور نمونه

۲-۳-۱-۴- گشتاور تولید شده

بخش j ام از دیسک هیستریز هر طبقه با حجم Vol^j ، که در معرض حلقه هیستریز با سطح E_h^j قرار دارد، گشتاور هیستریز T_h^j را تولید می‌کند. می‌توان نشان داد که:

$$T_h^j = [P/(4\pi)]E_h^j Vol^j. \quad (۱۶-۲)$$

۲-۳-۱-۵- ارتباط میان ابعاد هر کلاف

با توجه به محدودیت فضا در شعاع داخلی موتور و برای پرهیز از برخورد کلاف‌ها در آن ناحیه، لازم است که رابطه زیر بین عرض هر کلاف و ارتفاع آن برقرار باشد:

$$w_c = 2\pi K_{in} [R_i - (n_{cps} h_c + l_{ins})] / S, \quad (۱۷-۲)$$

که در آن یک ضریب جدید به نام K_{in} بکار رفته است که توسط طراح انتخاب می‌شود. نقش این این ضریب تنظیم فاصله بین کلاف‌های شیارهای مجاور در شعاع داخلی موتور است و مقدار آن کوچکتر از یک می‌باشد.

۲-۳-۲- تعیین مشخصه‌های ماده هیستریز روتور

برای ساخت دیسک هیستریز موتور نمونه از نوعی فولاد ۴۳۴۰، که تحت عملیات حرارتی قرار

گرفته است، استفاده شده است. برای تعیین مشخصه‌های هیستریزس این ماده، یک نمونه حلقوی از آن، طبق استانداردهای پیشنهاد شده در [۸۲]، آماده شده است. این نمونه در شکل ۲-۶-الف نشان داده شده است. با اعمال ولتاژهای مختلف در فرکانس ۵۰ هرتز، حلقه‌های هیستریزس این ماده مطابق شکل ۲-۶-ب به دست آمده‌اند. پارامترهای تقریب بیضوی این حلقه‌های هیستریزس عبارتند از نفوذپذیری حلقه هیستریزس، μ ، و زاویه تأخیر حلقه هیستریزس، α . این دو پارامتر از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\mu = \mu_0 \mu_r = \frac{B_m}{H_m}, \quad (18-2)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{E_h}{\pi H_m B_m} \right). \quad (19-2)$$

در این روابط، H_m ، B_m و E_h به ترتیب عبارتند از حداکثر شدت میدان حلقه هیستریزس، حداکثر چگالی شار آن و سطح آن. پارامتر μ_r در (۱۸-۲)، نفوذپذیری نسبی حلقه هیستریزس نامیده می‌شود. این پارامتر در شکل ۲-۶-ج بر حسب B_m ترسیم شده است. همچنین، در شکل ۲-۶-د رابطه α با B_m ارائه شده است. همانطور که از این دو شکل مشاهده می‌شود، پارامترهای α و μ توابعی غیرخطی از B_m می‌باشند. با توجه به این نکته، از بررسی رابطه (۲-۱۳) درمی‌یابیم که محاسبه B_m به ازای ابعاد مشخص برای کلاف‌ها، نیازمند بکارگیری یک روش تکراری است.

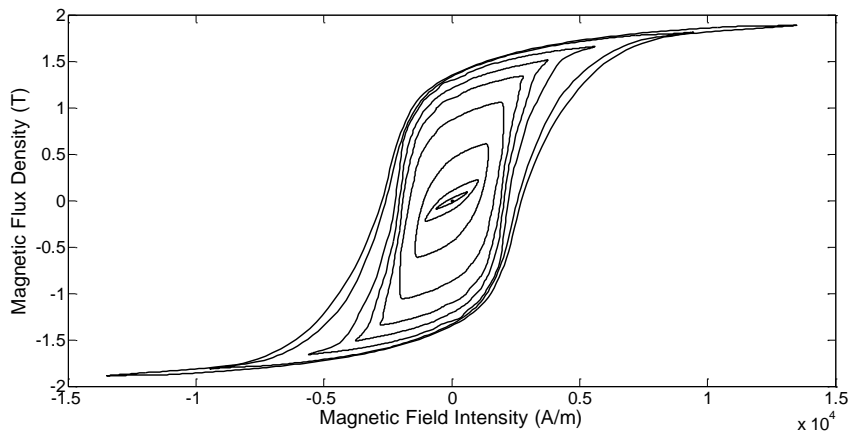
۲-۳-۳- الگوریتم طراحی اولیه

طراحی موتور نمونه به همان روش عمومی که در ابتدای این فصل ارائه شد، انجام می‌شود. به هر حال، برای مشخص شدن جزئیات، لازم است که یک الگوریتم بطور اختصاصی برای این منظور توسعه یابد. این الگوریتم در شکل ۲-۷ به نمایش در آمده است. توضیحاتی که در بخش قبل در مورد ورودی‌ها، پارامترهای طراحی و متغیرهای طراحی ارائه شد، در اینجا نیز قابل استفاده هستند و از تکرار مجدد آن‌ها خودداری می‌شود. برخی محاسبات که در این الگوریتم به آن‌ها اشاره شده است نیاز

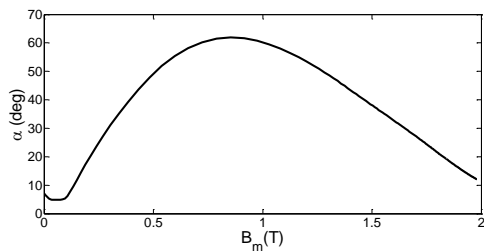
به توضیحاتی دارند که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.



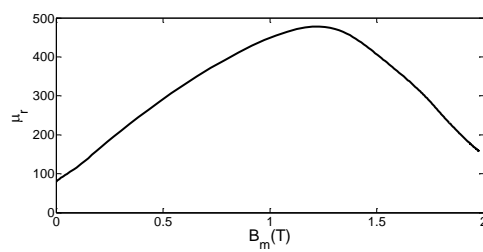
(الف)



(ب)

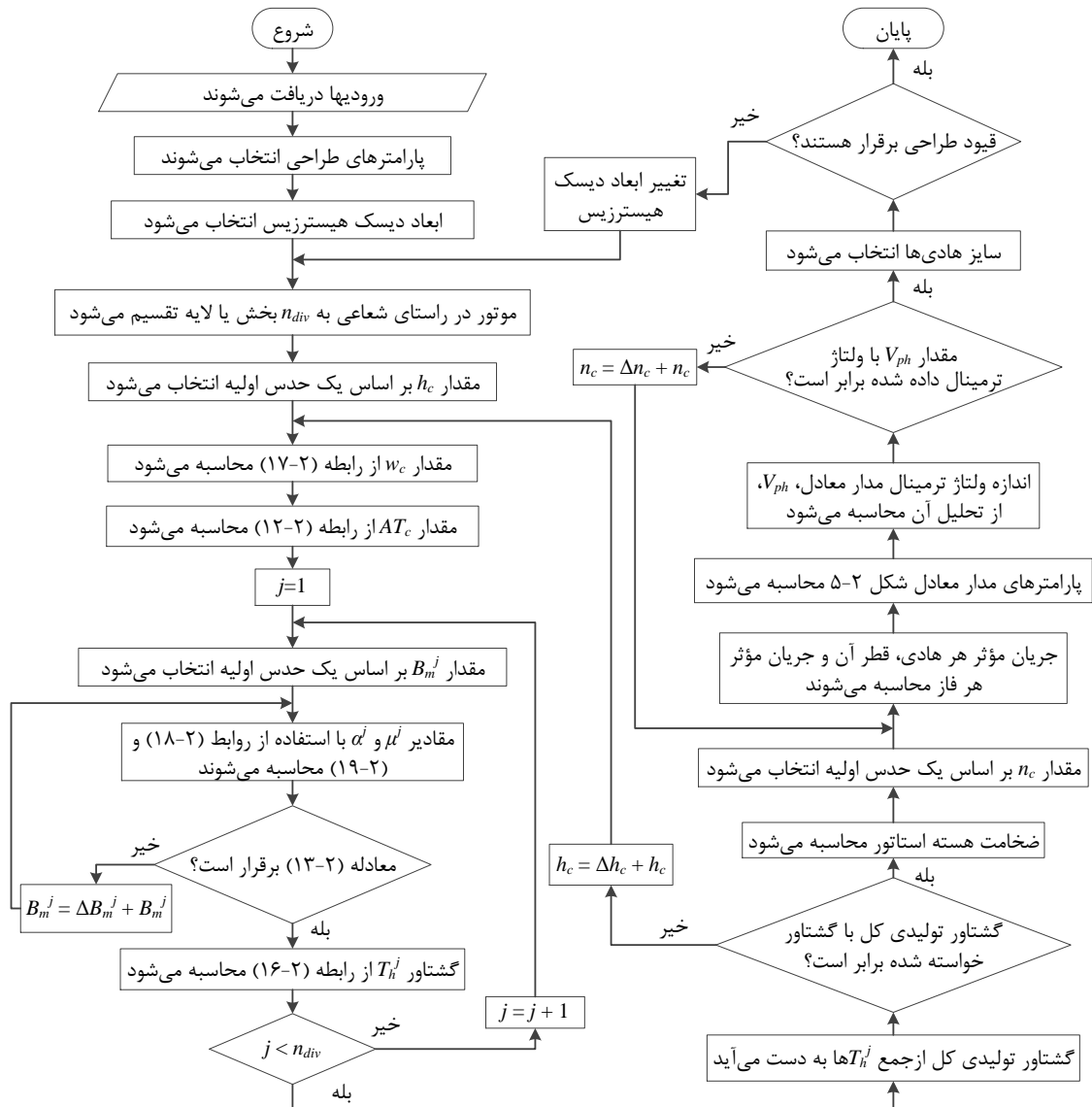


(د)



(ج)

شکل ۲-۶: تعیین مشخصه‌های هیستریزیس ماده سازنده روتور. (الف) نمونه حلقوی ساخته شده (ب) حلقه‌های هیستریزیس اندازه‌گیری شده در فرکانس ۵۰ هرتز (ج) نفوذپذیری نسبی در تقریب بیضوی حلقه‌های هیستریزیس (د) زاویه تأخیر در تقریب بیضوی حلقه‌های هیستریزیس



شکل ۷-۲: الگوریتم طراحی اولیه برای موتور نمونه

۲-۳-۱- تعیین ابعاد کلافها

محاسبه ابعاد هادیها، یعنی h_c و w_c ، از مهم‌ترین مراحل طراحی است. باید توجه داشت که طبق رابطه (۱۷-۲)، w_c تابعی از h_c است. از این رو، کافی است h_c را محاسبه نماییم. همانطور که در شکل ۷-۲ نشان داده شده است، این پارامتر بر حسب میزان گشتاور مورد نیاز و از طریق یک حلقه تکرار محاسبه می‌شود.

ابتدا، یک مقدار اولیه برای h_c در نظر گرفته می‌شود. مقدار w_c متناظر با رابطه (۱۷-۲)

محاسبه می‌شود. با در اختیار داشتن ابعاد کلاف‌ها، مقادیر B_m^j برای یکایک بخش‌های موتور با استفاده از رابطه (۲-۱۳) و شکل ۲-۶ محاسبه می‌شوند. به دلیل وابستگی غیرخطی پارامترهای α^j و μ^j به B_m^j ، یافتن B_m^j ‌ها باید به کمک یک روش تکراری محقق شود. با داشتن B_m^j برای بخش j ام موتور، حلقه هیستریزیس کاری آن مشخص می‌شود. در نتیجه، گشتاور هر بخش شماره j از طریق رابطه (۲-۱۶) محاسبه می‌شود. سپس، گشتاور تولیدی توسط دیسک هیستریزیس به صورت حاصل جمع گشتاور تمام بخش‌های شعاعی آن به دست می‌آید. اگر این گشتاور محاسبه شده با مقدار گشتاوری که هر طبقه از موتور باید تولید کند برابر باشد، مقدار صحیح برای h_c انتخاب شده است. در غیر این صورت، مقدار h_c تغییر داده می‌شود و محاسبات تکرار می‌شوند. این فرآیند آن قدر ادامه می‌یابد تا آن که شرط برابری گشتاورهای محاسبه شده و خواسته شده، با یک خطای قابل قبول، برقرار شود.

پس از مشخص شدن ابعاد هر کلاف و با توجه به چگالی جریان مؤثر هر کلاف، بارگذاری الکتریکی ماشین به دست می‌آید. باید دقت کرد که این بارگذاری الکتریکی بین مقادیر مجاز حداقل و حداکثر آن باشد.

۲-۳-۳-۲- طراحی هسته استاتور

معمولاً در طراحی موتورهای هیستریزیس تخت، شعاع‌های داخلی و خارجی استاتور به ترتیب برابر با شعاع‌های داخلی و خارجی دیسک هیستریزیس در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که استاتور بکار رفته در موتور نمونه از نوع بدون شیار است، ضخامت هسته استاتور تنها پارامتر مورد نیاز برای طراحی آن است. این پارامتر بر اساس رابطه (۲-۷) محاسبه می‌شود. روال کار به این صورت است که در این رابطه، B_s^j با حداکثر مقدار مجاز چگالی شار در هسته استاتور، یعنی B_s^{\max} ، جایگزین می‌شود. همچنین، B_r^j با بیشترین مقدار B_m^j (در میان همه B_m^j ‌ها)، که با B_r^{\max} نشان داده می‌شود، جایگزین می‌شود. بنابراین، ضخامت هسته استاتور به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\frac{t_s}{2} = \frac{K_{Bs} t_r B_r^{\max}}{K_{sf} B_s^{\max}} \quad (2-20)$$

ضریب بزرگتر از یک K_{Bs} برای لحاظ کردن اثر شارهای پراکندگی فاصله هوایی بر چگالی شار استاتور در نظر گرفته شده است.

۲-۳-۳- تعداد و سائز هادی‌های موجود در هر کلاف

تعداد دورهای در هر کلاف، یعنی n_c ، پارامتر مهم دیگری است که باید تعیین شود. این پارامتر بر اساس ولتاژ ترمینال داده شده محاسبه می‌شود. رابطه اساسی برای این محاسبه از طریق اعمال قوانین کیرشهف به مدار معادل هر فاز موتور به دست می‌آید. با توجه به پیچیدگی رابطه مذکور، این محاسبه نیز به صورت تکرار شونده انجام می‌شود.

بر اساس یک حدس اولیه، مقدار n_c انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که مقدار n_c همواره باید یک عدد طبیعی باشد. با توجه به اینکه $(n_c I_s / a) = J_{coil} h_c w_c$ است، مقدار I_s برابر خواهد بود با $J_{coil} h_c w_c a / n_c$. فازور جریان تحریک به عنوان فازور مبنا انتخاب می‌شود، یعنی $\hat{I}_e = I_s \angle 0$. با آگاهی از این که $N_{ph} = n_c n_{cps} S / m$ ، فازورهای \hat{E}_f^j برای یکایک بخش‌های موتور به کمک رابطه (۲-۱۵) به دست می‌آیند. همه X_{lg}^j ها و نیز سایر پارامترهای مدار معادل، یعنی X_{le} ، R_c و R_s ، بر اساس روش‌های موجود در مراجع محاسبه می‌شوند [۷۸]، [۷۹]. باید دقت داشت که این پارامترها خود به n_c وابسته‌اند. اکنون مدار معادل شکل ۲-۵ تحلیل می‌شود و فازور ولتاژ ترمینال \hat{V}_{ph} به دست می‌آید. اگر اندازه \hat{V}_{ph} با ولتاژ ترمینال داده شده برای هر طبقه از موتور برابر باشد، مقدار n_c بطور صحیح انتخاب شده است. در غیر این صورت، مقدار n_c آن قدر اصلاح می‌شود تا اندازه اختلاف ولتاژهای داده شده و محاسبه شده کمتر از یک خطای قابل قبول باشد.

پس از محاسبه n_c ، می‌توان سائز هادی‌ها را مشخص نمود. سطح مقطع بخش رسانای هر دور، S_c ، برابر است با $(I_s / a) / J_{con}$. پارامتر J_{con} بیانگر چگالی جریان مؤثر انتخاب شده برای هر هادی

است. دو چگالی جریان J_{con} و J_{coi} از طریق ضریب پرشوندگی کلاف‌ها، یعنی K_{fl} ، به یکدیگر مرتبط می‌شوند. این ارتباط به صورت $J_{coil} = K_{fl} J_{con}$ بیان می‌شود. سطح مقطع محاسبه شده برای هر هادی معمولاً به طور دقیق با هیچ یک از سطح مقطع‌های هادی‌های استاندارد برابر نیست. بنابراین، هادی استاندارد که نزدیک‌ترین سطح مقطع به مقدار محاسبه شده را دارد، انتخاب می‌شود. در این مرحله باید توجه کرد که چگالی جریان نهایی هر هادی بین مقادیر مجاز حداقل و حداکثر قرار گیرد.

۲-۳-۴- یافتن طرح بهینه

تا اینجا الگوریتم طراحی اولیه برای موتور ارائه شد. حال این سؤال مطرح است که به ازای کدام مقادیر برای متغیرهای طراحی یا همان ابعاد دیسک هیستریزیس، طرح بهینه به دست می‌آید. پاسخ این سؤال از طریق بکارگیری یک روش بهینه‌سازی در کنار الگوریتم طراحی اولیه، مشخص خواهد شد.

در این رساله، با توجه به تعداد کم متغیرهای طراحی و محدود بودن دامنه تغییرات مجاز آن‌ها، از روش جستجوی مستقیم برای طراحی بهینه موتور نمونه استفاده می‌شود. مزیت دیگر این رویکرد آن است که طرح به دست آمده قطعاً طرح بهینه خواهد بود. به هر حال، امکان استفاده از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند و پیشرفته، نظیر الگوریتم ژنتیک، نیز وجود دارد.

فرض می‌کنیم که خواسته‌ها، قیود و پارامترهای ثابت طراحی برای موتور نمونه مطابق جدول ۱-۲ داده شده باشند. بر اساس داده‌های این جدول می‌توان محدوده تغییرات مجاز برای هر یک از متغیرهای طراحی را محاسبه نمود. این محدوده‌های مجاز به همراه گام جستجو برای هر متغیر در جدول ۲-۲ ارائه شده‌اند. بر این اساس، ۴۴۶۶ طرح مختلف جستجو شدند که از میان آن‌ها ۸۹۳ طرح قابل قبول بودند (با توجه به قیود جدول ۱-۲).

جدول ۲-۱: خواسته‌ها، قيود و پارامترهای ثابت طراحی موتور نمونه

ولتاژ نامی برای کل موتور	۱۰۰ ولت
فرکانس نامی	۵۰ هرتز
سرعت سنکرون	۳۰۰۰ دور بر دقیقه
گشتاور راه‌اندازی کل موتور	۰/۱ نیوتن-متر
تعداد فازها	۳
ماده سازنده دیسک‌های هیستریزس	فولاد ۴۳۴۰ با عملیات حرارتی
ماده سازنده هسته‌های استاتور	ورق M235-35A
نوع هادی‌ها	هادی گرد مسی با عایق لاک‌ی
حداکثر شعاع خارجی مجاز برای دیسک‌های هیستریزس	۶۹ میلی‌متر
حداقل شعاع داخلی مجاز برای دیسک‌های هیستریزس	۲۷ میلی‌متر
حداقل طول شعاعی مجاز برای دیسک‌های هیستریزس	۱۵ میلی‌متر
حداکثر ضخامت مجاز برای دیسک‌های هیستریزس بیرونی	۳ میلی‌متر
حداقل ضخامت مجاز برای دیسک‌های هیستریزس بیرونی	۲ میلی‌متر
حداقل فاصله مکانیکی بین شفت و اتصالات انتهایی کلاف‌ها	۵ میلی‌متر
تعداد طبقات	۴
تعداد استاتورها	۲
تعداد دیسک‌های هیستریزس	۳
نوع اتصال سه‌فاز	Y
نوع اتصال استاتورها به یکدیگر	سری
تعداد شیارهای موهومی در هر استاتور	۱۲
گام سیم‌پیچی	۵/۶
تعداد کلاف‌های موجود در هر شیار	۲
تعداد مسیرهای موازی جریان در هر فاز از هر استاتور	۱
حداکثر بار گذاری الکتریکی مجاز	۲۵۰۰۰ آمپر دور بر متر
حداقل چگالی جریان مؤثر مجاز برای هر هادی	۵/۵ آمپر بر متر مربع
حداکثر چگالی جریان مؤثر مجاز برای هر هادی	۶ آمپر بر متر مربع
ضخامت هر لایه از عایق کلاف‌ها	۰/۲ میلی‌متر
طول فاصله هوایی فیزیکی	۱ میلی‌متر
ضریب K_{fl}	۰/۷
ضریب K_{sf}	۰/۹۵
ضریب K_{in}	۰/۹
تعداد بخش‌ها یا لایه‌ها در تقسیم‌بندی شعاعی موتور	۱۵

جدول ۲-۲: محدوده تغییرات مجاز و گام جستجو برای هر یک متغیرهای طراحی

متغیر طراحی	حداقل مقدار	حداکثر مقدار	گام جستجو
t_r	۲ میلیمتر	۳ میلیمتر	۰/۱ میلیمتر
R_i	۲۷ میلیمتر	۵۴ میلیمتر	۱ میلیمتر
R_o	$R_i+۱۵$ میلیمتر	۶۹ میلیمتر	۱ میلیمتر

برای یافتن طرح بهینه، یک تابع هدف باید تعریف شود. تابع هدف مورد استفاده در این طراحی

برای طرح قابل قبول شماره n به صورت زیر بیان می‌شود:

$$obj(n) = \frac{\eta(n)}{\eta_{\max}} + \frac{PF(n)}{PF_{\max}} + \frac{t_r(n)}{t_{r,\max}} + \frac{AV_{\min}}{AV(n)}, \quad (21-2)$$

که در آن، η ، PF و AV به ترتیب بیانگر بازده، ضریب توان، و حجم مواد فعال موتور می‌باشند. کمیت η_{\max} نشان‌دهنده حداکثر مقدار بازده در بین همه طرح‌های قابل قبول است. به همین ترتیب، PF_{\max} و $t_{r,\max}$ عبارتند از حداکثر مقدار ضریب توان و حداکثر مقدار ضخامت دیسک هیستریزیس. همچنین، AV_{\min} بیانگر حداقل مقدار AV در بین همه طرح‌ها است.

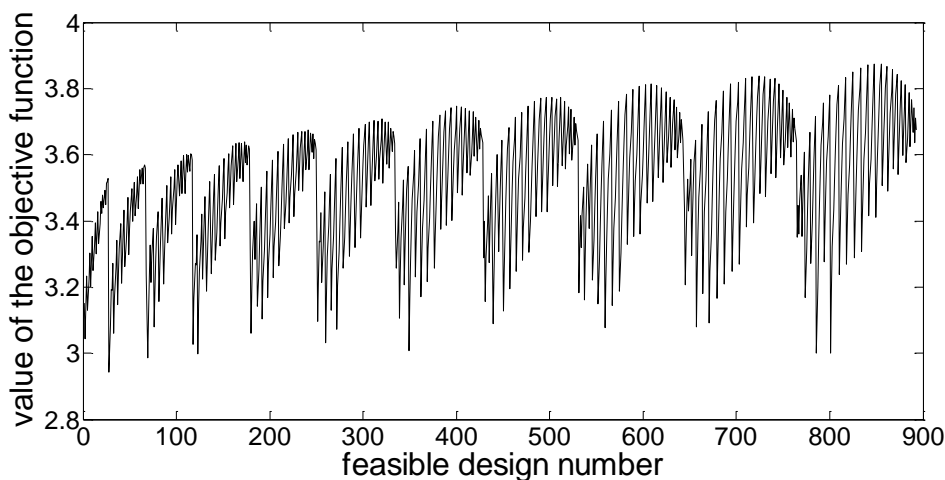
وارد کردن ضخامت دیسک هیستریزیس t_r در تابع هدف دو دلیل دارد: (۱) ضخامت بیشتر دیسک هیستریزیس موجب افزایش دامنه چگالی شار فاصله هوایی می‌شود، که به نوبه خود می‌تواند بهبود عملکرد دینامیکی موتور را به همراه داشته باشد و (۲) برای یک دیسک ضخیم، اجرای عملیات حرارتی بدون آسیب‌دیدگی به آن عملی‌تر است.

نکته مهم دیگر آن است که در شرایط راه‌اندازی، توان مکانیکی خروجی صفر است. بنابراین، تعریف بازده در این شرایط عبارت است از:

$$\eta = \frac{T_{st}}{(P_{in} / \omega_m)}, \quad (22-2)$$

که در آن، T_{st} گشتاور راه‌اندازی خالص موتور، P_{in} توان ورودی به موتور در این شرایط و ω_m سرعت زاویه‌ای مکانیکی موتور در شرایط سنکرونیزم است.

شکل ۲-۸ مقادیر تابع هدف را برای تمام طرح‌های قابل قبول نشان می‌دهد. طرح شماره ۸۴۸، که به ازای آن تابع هدف حداکثر مقدار خود را اختیار می‌کند، به عنوان طرح بهینه انتخاب شده است. علاوه بر اطلاعات عمومی ارائه شده در جدول ۲-۱، سایر مشخصات این طرح، که پس از فرآیند طراحی بهینه به دست آمده‌اند، در جدول ۲-۳ داده شده‌اند.



شکل ۲-۸: مقادیر تابع هدف برای همه طرح‌های قابل قبول

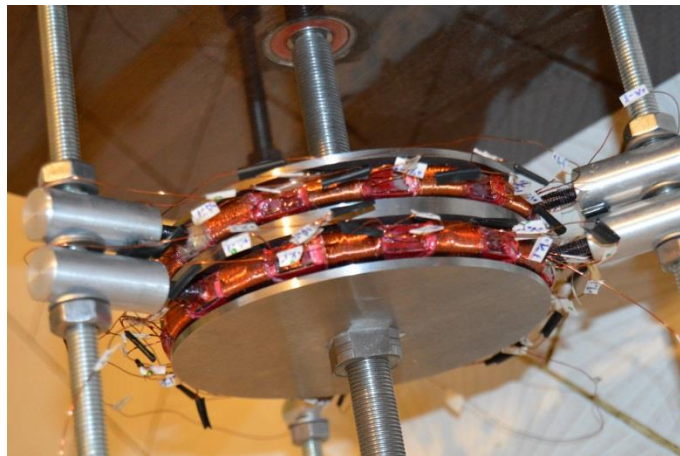
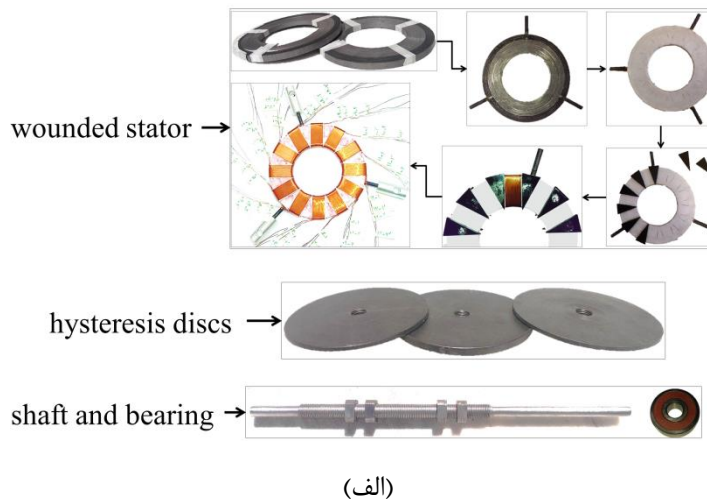
جدول ۲-۳: محدوده تغییرات مجاز و گام جستجو برای هر یک متغیرهای طراحی

۳۹ میلی‌متر	شعاع داخلی دیسک‌های هیستریزس
۶۹ میلی‌متر	شعاع خارجی دیسک‌های هیستریزس
۳ میلی‌متر	ضخامت دیسک هیستریزس در هر طبقه
۷/۵ میلی‌متر	ضخامت هر هسته استاتور
۷۴ دور	تعداد دور هر کلاف
۰/۴ میلی‌متر	قطر هر هادی
۰/۸۰۳ آمپر	جریان فاز در شرایط راه‌اندازی و در ولتاژ نامی
۰/۴۸۹	ضریب توان در شرایط راه‌اندازی و در ولتاژ نامی

۲-۳-۵- ساخت موتور نمونه و نتایج آزمایشگاهی آن

یک نمونه آزمایشگاهی از موتور نمونه بر اساس مشخصات حاصل از طراحی آن (جدول ۲-۱ و جدول ۲-۳) ساخته شد. شکل ۲-۹ الف-۹ قطعات اصلی ساخته شده این موتور را نشان می‌دهد. موتور مونتاژ شده در شکل ۲-۹ ب به نمایش درآمده است. همانطور که مشخص است، بر روی محور

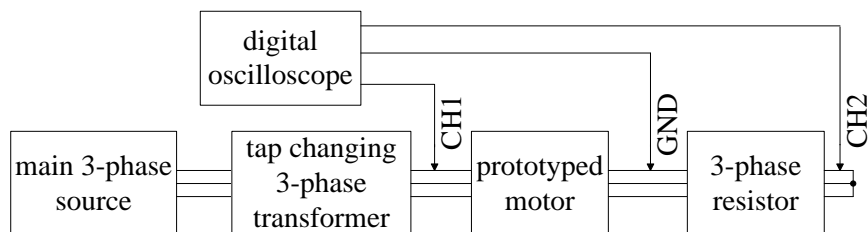
رزوهایی ایجاد شده است که امکان جابجایی دیسک‌ها را فراهم می‌آورد.



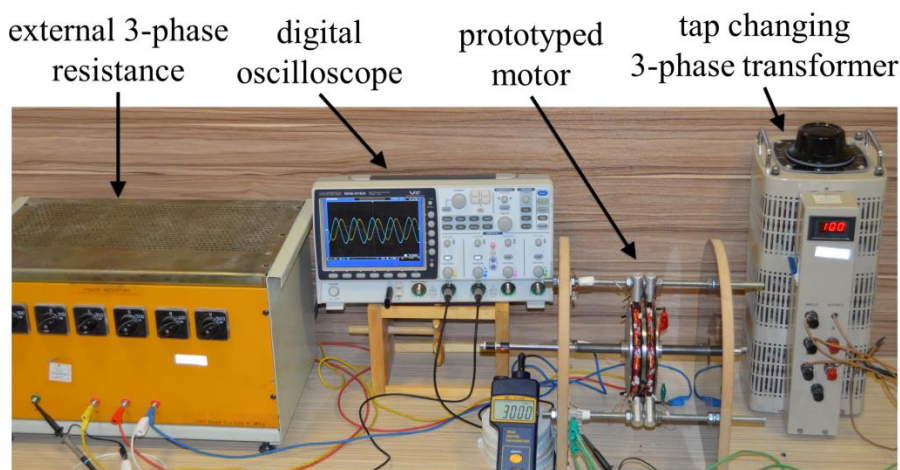
شکل ۲-۹: ساخت موتور نمونه. (الف) قطعات اصلی (ب) موتور مونتاژ شده

بلوک دیاگرام سیستم تست مورد استفاده و نیز، میز آماده شده برای انجام آزمایشات در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده‌اند. همانطور که در این شکل مشخص است، اندازه‌گیری‌ها توسط یک اسیلوسکوپ دیجیتال انجام می‌شود. کانال ۱ شکل موج ولتاژ ترمینال یکی از فازها را نشان می‌دهد. کانال ۲ نیز، افت ولتاژ بر روی یک مقاومت خارجی سری شده با همان فاز را نشان می‌دهد. بنابراین، با تقسیم شکل موج کانال ۲ بر اندازه مقاومت خارجی و نیز معکوس کردن آن، شکل موج جریان ورودی به فاز به دست می‌آید. شکل موج‌های به دست آمده به یک کامپیوتر دیجیتال منتقل می‌شوند. ضریب

توان و نیز توان‌های ورودی اکتیو، راکتیو و ظاهری موتور بطور مستقیم از این شکل موج‌ها به دست می‌آیند. گشتاور تولیدی نیز با کسر تلفات از توان اکتیو ورودی سه‌فاز و تقسیم حاصل آن بر سرعت زاویه‌ای موتور محاسبه می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۲-۱۰: نحوه آزمایش موتور (الف) بلوک دیاگرام سیستم تست (ب) میز کار انجام آزمایشات

مشخصه‌های عملکردی موتور در دو شرایط روتور قفل شده (راه‌اندازی) و بی بار به دست آمده‌اند.

برای این منظور، از تغییر ولتاژ ورودی به کمک یک ترانسفورماتور با تپ متغیر استفاده شده است.

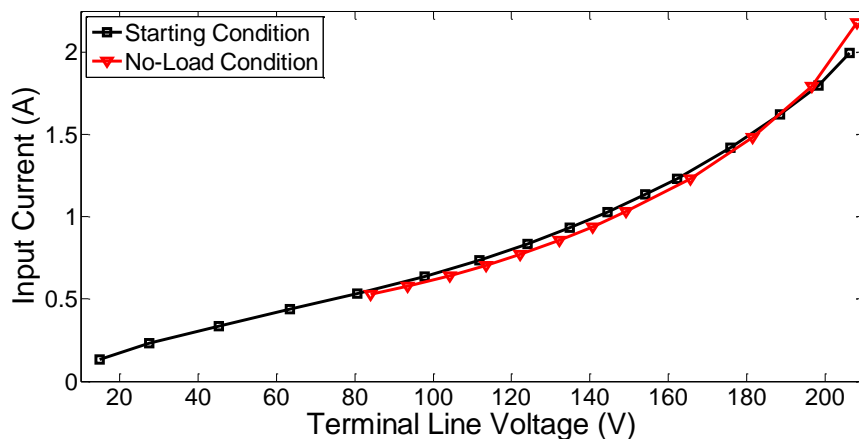
شکل ۲-۱۱ جریان ورودی به موتور ساخته شده را برای هر دو شرایط روتور قفل شده و بی باری

نشان می‌دهد. به علت اشباع دیسک‌های هیستریزس و هسته‌های استاتور در ولتاژهای زیاد، این

منحنی‌ها که یکنوا افزایشی هستند، شیب بزرگتری دارند. این شکل به وضوح نشان می‌دهد که جریان

کشیده شده در دو شرایط مورد مطالعه بسیار نزدیک به یکدیگر هستند. این یکی از ویژگی‌های ذاتی

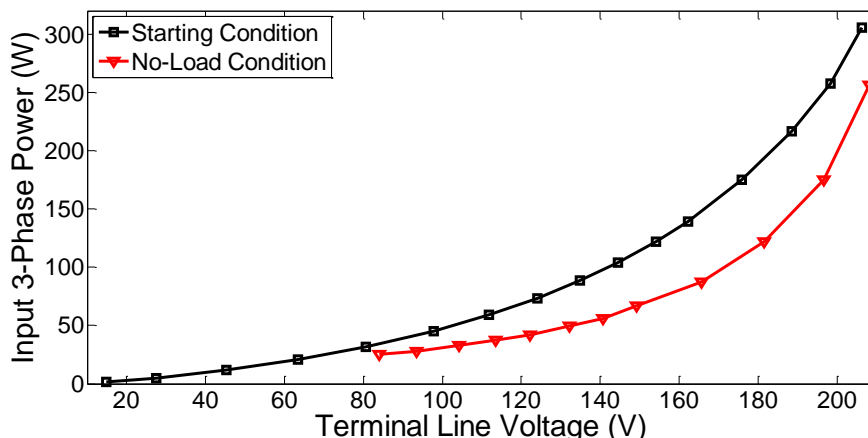
موتورهای هیستریزیس است. همچنین، جریان راه‌اندازی موتور در ولتاژ نامی، حدوداً 0.7 آمپر است که میزان نزدیکی آن به مقدار ارائه شده در جدول ۲-۳، یعنی 0.803 آمپر، قابل قبول است.



شکل ۲-۱۱: جریان ورودی اندازه‌گیری شده

تغییرات توان اکتیو ورودی در دو حالت روتور قفل شده و بی‌باری در شکل ۲-۱۲ ترسیم شده است. مشابه جریان ورودی، توان ورودی نیز از نوع یکنوا افزایشی است. یادآور می‌شود که کل توان ورودی در هر دو شرایط به تلفات تبدیل می‌شود و در نتیجه، توان خروجی صفر است.

در شرایط راه‌اندازی، بخش عمده توان ورودی به تلفات هیستریزیس در دیسک‌های روتور تبدیل می‌شود. این تلفات تقریباً برابر است با توان خروجی موتور در شرایط ورود به سنکرونیزم. همچنین، به دلیل تغییرات زمانی چگالی شار در دیسک‌های هیستریزیس و در شرایط راه‌اندازی، تلفات ادی نیز در این دیسک‌ها ایجاد می‌شود. بخش باقیمانده توان ورودی در حالت روتور قفل شده به تلفات استاتور تبدیل می‌شود. این در حالی است که کل تلفات موتور در حالت بی‌باری عبارت است از مجموع تلفات استاتور با تلفات اصطکاک و بادخوری. در نتیجه، همان طور که شکل ۲-۱۲ نشان می‌دهد، توان دریافتی در شرایط بی‌باری کمتر از مقدار متناظر در شرایط راه‌اندازی است.

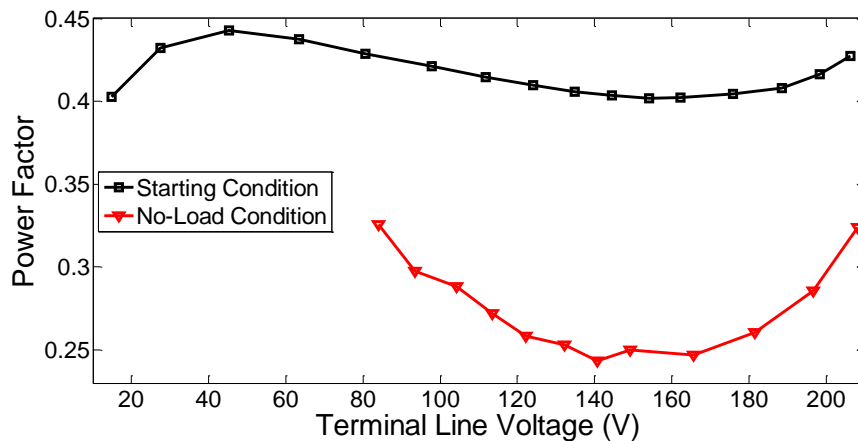


شکل ۲-۱۲: توان ورودی سه فاز اندازه‌گیری شده

شکل ۲-۱۳ مقادیر اندازه‌گیری ضریب توان موتور را در ولتاژهای گوناگون نشان می‌دهد. این کمیت برای هیچ یک از دو شرایط عملکردی دارای تغییرات یکنوا نیست. توان مصرفی در شرایط بی‌باری کمتر از مقدار متناظر در شرایط راه‌اندازی است. از سوی دیگر، مشاهده کردیم که جریان‌های بی‌باری و راه‌اندازی به یکدیگر نزدیک هستند. بنابراین، واضح است که چرا ضریب توان بی‌باری همواره کمتر از ضریب توان راه‌اندازی می‌باشد. ضریب توان راه‌اندازی در ولتاژ نامی تقریباً 0.42 است که با دقت قابل قبولی به مقدار به دست آمده از طراحی، یعنی 0.489 نزدیک است.

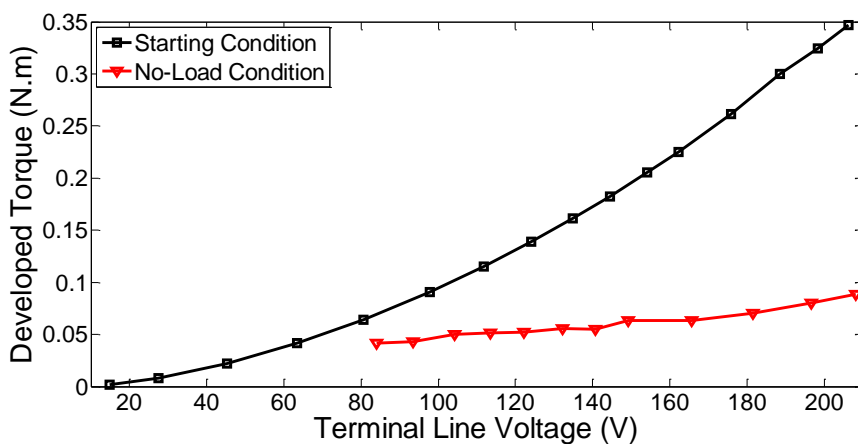
گشتاور تولیدی ناخالص موتور، T_{dev} ، کمیت مهم دیگری است که تغییرات آن بر حسب ولتاژ ترمینال در شکل ۲-۱۴ ارائه شده است. این گشتاور به صورت $(P_{in} - P_{cu}) / \omega_m$ تعریف می‌شود، که P_{cu} تلفات اهمی کل را نشان می‌دهد.

گشتاور ناخالص تولیدی در بی‌باری برابر است با حاصل جمع گشتاور تلفات آهن، T_{fe} ، با گشتاور تلفات اصطکاک و بادخوری در سرعت سنکرون، یعنی T_{fr} . مقدار T_{fr} در همه ولتاژها یکسان است، زیرا تلفات مکانیکی در یک سرعت مشخص، مستقل از ولتاژ ترمینال است. به هر روی، از آنجا که T_{fe} تقریباً متناسب با مربع ولتاژ ترمینال است، گشتاور ناخالص تولیدی در بی‌باری، یک شیب افزایشی کوچک را با تغییر ولتاژ ترمینال نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۳: ضریب توان اندازه‌گیری شده

گشتاور ناخالص تولیدی در راه‌اندازی متشکل است از T_{fe} و گشتاور خالص راه‌اندازی، یعنی T_{st} . به علت وابستگی شدید بین گشتاور تولیدی و چگالی شارهای حداکثر روتور، گشتاور ناخالص راه‌اندازی به سرعت با افزایش ولتاژ ترمینال، افزایش می‌یابد.



شکل ۲-۱۴: گشتاور ناخالص تولیدی اندازه‌گیری شده

محاسبات تقریبی ساده نشان می‌دهند که تلفات آهن در شرایط راه‌اندازی و در ولتاژ نامی برابر با ۱/۰۷ وات است. بنابراین، T_{fe} در این حالت حدوداً ۰/۰۳۴ نیوتون-متر است. این مقدار در برابر گشتاور راه‌اندازی کل ناچیز است و به راحتی می‌توان از آن صرف‌نظر نمود. به عبارت دیگر،

گشتاورهای راهاندازی خالص و ناخالص در ولتاژ نامی تقریباً با یکدیگر برابر هستند. شکل ۲-۱۴ نشان می‌دهد که گشتاور راهاندازی اندازه‌گیری شده در ولتاژ نامی بسیار نزدیک به خواسته طراحی، یعنی ۰/۱ نیوتون-متر است.

در نهایت لازم است که به دلایل اصلی اختلاف قابل قبول بین مقادیر حاصل از طراحی و اندازه‌گیری اشاره کنیم:

- روابط طراحی بر پایه مشخصه‌های هیستریزیس تقریبی و فرضیات ساده‌کننده قطعاً با مقداری خطا همراه است.
- حتی دو نمونه مشابه از یک نوع فولاد که تحت عملیات حرارتی یکسان قرار می‌گیرند، مشخصه‌های هیستریزیس یکسان نخواهند داشت. بنابراین، مشخصه هیستریزیس به دست آمده از نمونه ماده هیستریزس با مشخصه هیستریزیس واقعی دیسک‌های روتور تفاوت‌هایی دارد.
- برای جلوگیری از ایجاد تاب در دیسک‌های هیستریزیس، ضخامت آن‌ها در طول انجام عملیات حرارتی بزرگ‌تر از مقدار طراحی در نظر گرفته شده است. با استفاده از دستگاه‌های تراش ویژه، پس از انجام عملیات حرارتی، ضخامت دیسک‌ها به مقدار مورد نظر رسیده است. این موضوع ممکن است مانع از سخت شدن کامل قسمت‌های داخلی دیسک‌ها، به ویژه دیسک میانی، شده باشد. همچنین، این عملیات تراشکاری ثانویه می‌تواند باعث تغییر مشخصه هیستریزیس دیسک‌ها شود.
- مطابق شکل ۲-۹، به علت محدودیت‌های مکانیکی، قطر داخلی دیسک‌ها کوچکتر از قطر داخلی هسته‌های استاتور در نظر گرفته شده است. در واقع، دیسک‌های هیستریزیس تا شفت امتداد یافته‌اند. این کار می‌تواند باعث شود که توزیع میدان روتور در مقایسه با نتایج پیش‌بینی شده از روابط طراحی، متفاوت باشد.

- در نمونه‌های آزمایشگاهی این چینی، تنظیم فاصله هوایی‌ها، آن هم بطور یکنواخت و یکسان برای همه طبقات، تقریباً غیر ممکن است.

۲-۴- جمع‌بندی

در این فصل یک روش عمومی برای طراحی موتورهای هیستریزیس تخت چندطبقه با استاتورهای بدون شیار و بدون هسته ارائه شد. جزئیات این روش از طریق طراحی یک موتور بدون شیار نمونه توضیح داده شد. از روش جستجوی مستقیم برای به دست آمدن طرح بهینه برای موتور نمونه استفاده شد. صحت فرآیند طراحی بهینه با انجام آزمایش‌های لازم بر روی موتور نمونه ساخته شده مورد تأیید قرار گرفت. در ادامه رساله به ارائه روش‌های دقیق برای مدلسازی موتورهای مورد مطالعه پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه در این روش‌ها از مدل پریساج کلاسیک پدیده هیستریزیس بهره گرفته شده است، فصل بعد به توصیف این مدل اختصاص داده شده است.

فصل ۳:

توصیف پدیده هیستریزیس به کمک مدل

پریساچ کلاسیک

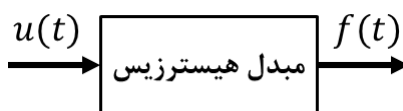
پیدایش مدل پریساج به مقاله برجسته آقای پریساج بازمی‌گردد که در سال ۱۹۳۵ منتشر شد [۸۳]. رویکرد پریساج در ارائه این مدل بر اساس برخی فرضیات قابل تصور در مورد مکانیزم فیزیکی مغناطیس‌شوندگی استوار بود. به همین دلیل، مدل پریساج در ابتدا به عنوان یک مدل فیزیکی برای پدیده هیستریزیس مطرح شد. با گذشت تدریجی زمان، محققین به این نتیجه رسیدند که مدل پریساج یک مفهوم ریاضی جدید را در خود جای داده است. در نتیجه، این مدل از شکل یک مدل فیزیکی خارج شد و به فرم یک مدل کاملاً ریاضی مطرح شد. به این طریق یک ابزار ریاضی به وجود آمد که برای توصیف ریاضی پدیده هیستریزیس در طیف وسیعی از مسائل علمی قابل استفاده بود.

در طی سال‌های بعد، مدل پریساج توسعه یافت و گونه‌های متنوعی از آن، نظیر انواع دینامیکی و برداری، ارائه شد. مرجع [۱۵] را می‌توان به عنوان یکی از بهترین کتاب‌هایی منتشر شده در زمینه معرفی انواع گوناگون مدل پریساج به شمار آورد. مدل پریساج کلاسیک، که با نام مدل پریساج اسکالر استاتیک نیز شناخته می‌شود، برای رسیدن به اهداف این رساله کفایت می‌کند. در این فصل، ابتدا بر اساس مطالب [۱۵]، این گونه از مدل پریساج معرفی می‌شود. سپس، روش شناسایی و بکارگیری آن برای مدلسازی مشخصه هیستریزیس روتور موتورهای هیستریزیس ارائه می‌گردد. از این به بعد، منظور از اصطلاح مدل پریساج، فرم کلاسیک آن است.

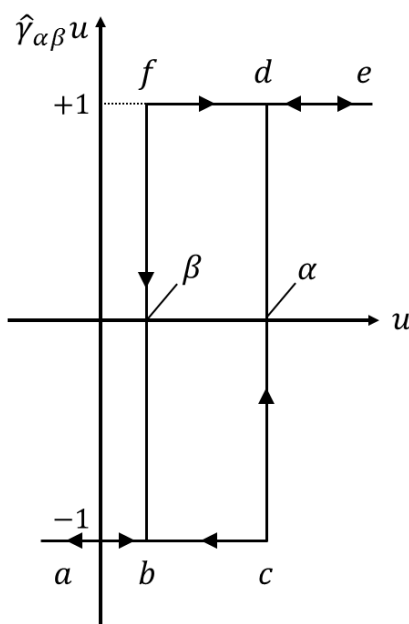
۳-۱- تعریف ریاضی

برای درک مدل پریساج، یک مبدل هیستریزیس را مطابق شکل ۳-۱ در نظر می‌گیریم. در الکترومغناطیس، این مبدل هیستریزیس می‌تواند یک حجم بسیار کوچک از یک ماده مغناطیسی باشد. مدل پریساج را می‌توان با در نظر گرفتن یک مجموعه از ساده‌ترین اپراتورهای هیستریزیس $\hat{Y}_{\alpha\beta}$ توصیف کرد. هر کدام از اپراتورهای هیستریزیس می‌تواند مطابق شکل ۳-۲ با یک حلقه مستطیلی در صفحه ورودی- خروجی ارائه شود. اعداد α و β مربوط به مقادیر سوئیچینگ "بالا" و "پایین"

ورودی $u(t)$ می‌باشند. در ادامه بحث فرض خواهد شد که همواره $\alpha \geq \beta$ برقرار است. این فرض از نقطه نظر فیزیکی کاملاً طبیعی است. خروجی $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}u(t)$ هر یک از این اپراتورهای ابتدایی هیستریزس فقط دو مقدار -1 و $+1$ را می‌تواند اختیار کند. به بیان دیگر، این اپراتورها می‌توانند به صورت رله‌های دو وضعیتی در نظر گرفته شوند، که وضعیت‌های بالا و پایین به ترتیب مربوط به $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}u(t) = +1$ و $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}u(t) = -1$ می‌باشند.



شکل ۱-۳: یک مبدل هیستریزس



شکل ۲-۳: یک اپراتور هیستریزس مقدماتی $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$

هنگامی که ورودی، $u(t)$ ، به صورت یکنوا افزایش می‌یابد، شاخه صعودی abcde طی می‌شود. اگر ورودی به صورت یکنوا کاهش یابد، شاخه نزولی edfba پیموده خواهد شد. در کنار مجموعه اپراتورهای $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$ ، یک تابع وزنی (تابع چگالی) $\eta(\alpha, \beta)$ نیز در نظر گرفته می‌شود که مشهور به تابع

پریساج است. در نهایت، رابطه اصلی مدل پریساج را می‌توان به صورت بیان کرد [۸۴]:

$$f(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \eta(\alpha, \beta) \hat{\gamma}_{\alpha\beta} u(t) d\alpha d\beta, \quad (1-3)$$

از این تعریف مشخص است که مدل پریساج از جمع آثار اپراتورهای هیستریزیس ابتدایی بهره می‌گیرد. به بیان دیگر، این اپراتورها بلوک‌های سازنده اصلی در مدل (۱-۳) می‌باشند.

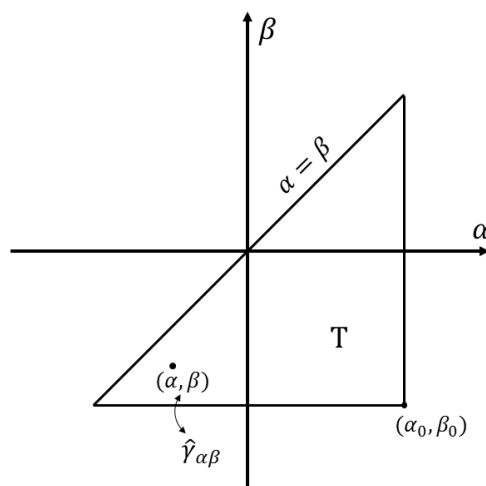
۲-۳- تعبیر هندسی مدل پریساج

درک مدل پریساج با استفاده از توصیف هندسی آن بسیار آسان است. این توصیف بر پایه این اصل ساده استوار است: یک رابطه یک به یک بین اپراتورهای $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$ و نقاط (α, β) در نیم‌صفحه $\alpha \geq \beta$ وجود دارد. به عبارت دیگر، هر نقطه از نیم‌صفحه $\alpha \geq \beta$ فقط می‌تواند با یک اپراتور $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$ مشخص شود. این همان اپراتوری است که مقادیر سوئیچینگ بالا و پایین آن به ترتیب برابر با α و β (یعنی مختصات نقطه مورد نظر) باشند.

مثلث قائم‌الزاویه T را در نیم‌صفحه $\alpha \geq \beta$ مطابق شکل ۳-۳ در نظر بگیرید. وتر این مثلث بخشی از خط $\alpha = \beta$ است و رأس قائمه آن با مختصات (α_0, β_0) مشخص می‌شود. همچنین، رابطه $\beta_0 = -\alpha_0$ برقرار است. این مثلث، از این پس با عنوان مثلث محدودکننده نامیده می‌شود. فرض می‌شود که تابع $\eta(\alpha, \beta)$ در خارج از مثلث T برابر صفر است.

به منظور درک نحوه عملکرد مدل پریساج، ابتدا فرض می‌کنیم که ورودی $u(t)$ در یک لحظه مانند t_0 مقداری کوچکتر از β_0 دارد. در نتیجه، خروجی همه اپراتورهای $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$ در وضعیت پایین خواهد بود. این شرایط بیانگر وضعیت اشباع منفی در مشخصه هیستریزیس است. حالا فرض می‌کنیم که ورودی به صورت یکنوا افزایش یابد تا آن که در لحظه t_1 به یک مقدار ماکزیمم u_1 برسد. همزمان با افزایش ورودی، آن دسته از اپراتورهای $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$ که مقدار سوئیچینگ بالای آن‌ها (α) از مقدار فعلی

ورودی $u(t)$ بزرگتر است، در وضعیت بالا قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر، خروجی آن‌ها برابر با $+1$ می‌شود. از نظر هندسی، این موضوع باعث تقسیم مثلث T به دو قسمت خواهد شد: (۱) ناحیه $S^+(t)$ که شامل آن دسته از نقاط (α, β) است که اپراتورهای $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$ متناظر با آن‌ها در وضعیت بالا قرار دارند و (۲) ناحیه $S^-(t)$ که شامل آن دسته از نقاط (α, β) است که اپراتورهای $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$ متناظر با آن‌ها در وضعیت پایین قرار دارند. این تقسیم‌بندی به وسیله خط $a = u(t)$ صورت می‌پذیرد (شکل ۳-۴-الف)، که با افزایش ورودی به سمت راست حرکت می‌کند. این حرکت به سمت راست زمانی متوقف می‌شود که ورودی به یک مقدار ماکزیمم u_1 برسد. در این لحظه، تقسیم‌بندی مثلث T به نواحی $S^+(t)$ و $S^-(t)$ مطابق شکل ۳-۴-ب انجام می‌شود.



شکل ۳-۳: مثلث محدودکننده در مدل پریساج

در ادامه فرض می‌کنیم که ورودی به صورت یکنوا کاهش یابد، تا جایی که در لحظه t_2 به یک مقدار مینیمم u_2 برسد. در حین کاهش ورودی، آن دسته از اپراتورهای $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$ که در وضعیت بالا قرار داشتند و مقدار سوئیچینگ پایین آن‌ها بزرگتر از مقدار فعلی ورودی $u(t)$ است، دوباره به وضعیت پایین برمی‌گردند. این موضوع باعث تغییر تقسیم‌بندی مثلث T به نواحی $S^+(t)$ و $S^-(t)$ خواهد شد. در واقع، مرز فاصل میان نواحی $S^+(t)$ و $S^-(t)$ ، علاوه بر یک تکه عمودی، اکنون شامل یک خط

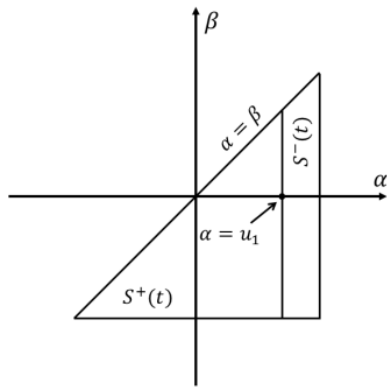
افقی نیز می‌شود. این خط افقی که از بالا به پایین حرکت می‌کند، با معادله $\beta = u(t)$ مشخص می‌شود. این موضوع در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. حرکت این خط افقی هنگامی متوقف می‌شود که ورودی به مینیمم u_2 برسد. تقسیم‌بندی مثلث T در این لحظه مشخص در شکل ۳-۴-د نشان داده شده است. برای این لحظه، مختصات رأس قائمه مرز فاصل L عبارت است از $(\alpha = u_1, \beta = u_2)$.

سپس فرض می‌کنیم که ورودی مجدداً شروع به افزایش می‌کند تا آن که در لحظه t_3 به یک مقدار ماکزیمم u_3 برسد، که از u_1 کوچکتر است. از لحاظ هندسی، این افزایش ورودی منجر به ایجاد یک قسمت عمودی جدید در مرز فاصل $L(t)$ خواهد شد، که به سمت راست حرکت می‌کند. این حرکت به سمت راست زمانی متوقف می‌شود که ورودی به مقدار ماکزیمم u_3 برسد. این شرایط در شکل ۳-۴-ه نشان داده شده است.

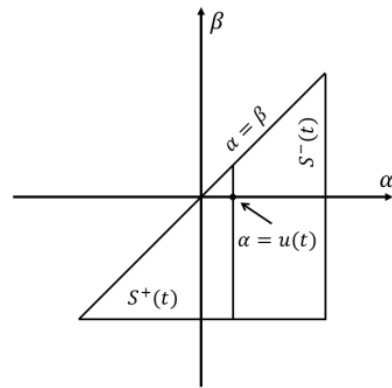
سرانجام فرض می‌کنیم که ورودی مجدداً کاهش یابد تا آن که در لحظه t_4 به یک مقدار مینیمم u_4 برسد، که از u_2 کوچکتر است. از لحاظ هندسی، این تغییرات ورودی منجر به ایجاد یک قسمت افقی جدید در $L(t)$ می‌شود که از بالا به سمت پایین حرکت می‌کند. این حرکت زمانی متوقف می‌شود که ورودی به مقدار مینیمم خود، یعنی u_4 برسد. در نتیجه، همانطور که شکل ۳-۴-و نشان می‌دهد، یک رأس قائمه دیگر با مختصات $(\alpha = u_3, \beta = u_4)$ در $L(t)$ ایجاد می‌شود.

با تعمیم تحلیل ارائه شده، می‌توان نتیجه گرفت که در هر لحظه، مثلث T به دو زیرمجموعه تقسیم می‌شود: (۱) ناحیه $S^+(t)$ که شامل آن دسته از نقاط (α, β) است که اپراتورهای $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$ متناظر با آن‌ها در وضعیت بالا قرار دارند و (۲) ناحیه $S^-(t)$ که شامل آن دسته از نقاط (α, β) است که اپراتورهای $\hat{\gamma}_{\alpha\beta}$ متناظر با آن‌ها در وضعیت پایین قرار دارند. مرز فاصل $L(t)$ بین نواحی $S^+(t)$ و $S^-(t)$ یک مرز پلکانی است که مختصات α و β در رئوس قائمه آن به ترتیب مربوط به ماکزیمم و مینیمم‌های محلی ورودی در لحظات گذشته هستند. آخرین تکه از $L(t)$ به خط $\alpha = \beta$ متصل

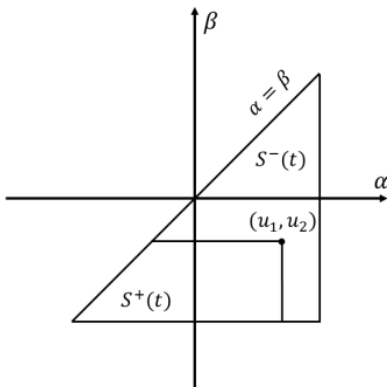
می‌شود و با تغییر ورودی حرکت می‌کند. هنگامی که ورودی در حال افزایش است، این تکه عمودی است و به سمت راست حرکت می‌کند (شکل ۳-۵-الف). اگر ورودی در حال کاهش باشد، این تکه افقی است و از بالا به سمت پایین حرکت می‌کند (شکل ۳-۵-ب).



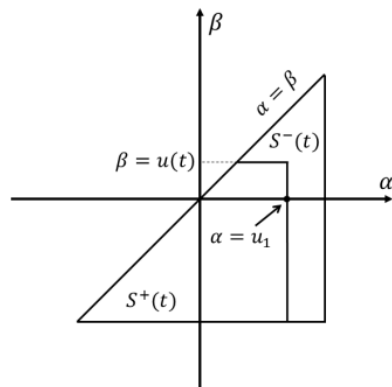
(ب)



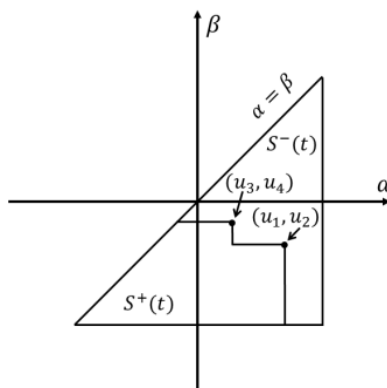
(الف)



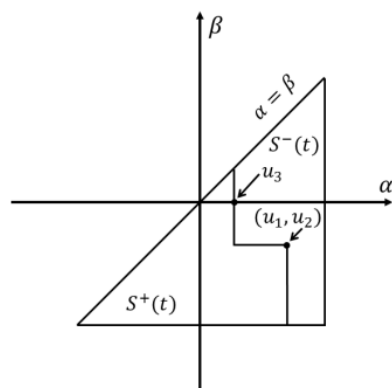
(د)



(ج)

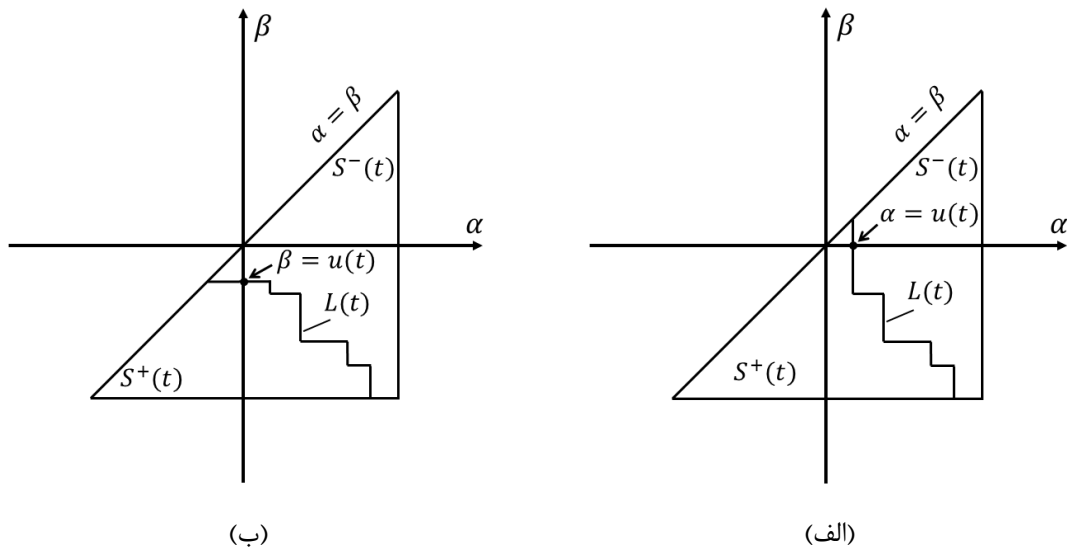


(و)



(ه)

شکل ۳-۴: نحوه انعکاس تأثیر تغییرات ورودی در مثلث محدود کننده



شکل ۳-۵: تقسیم‌بندی مثلث محدود کننده به دو زیر مجموعه (الف) شرایط افزایش ورودی (ب) شرایط کاهش ورودی

در هر لحظه، می‌توان انتگرال سطحی (۳-۱) را به دو انتگرال‌گیری سطحی بر روی نواحی $S^+(t)$ و $S^-(t)$ تجزیه کرد، یعنی

$$f(t) = \iint_{S^+(t)} \eta(\alpha, \beta) \hat{\gamma}_{\alpha\beta} u(t) d\alpha d\beta + \iint_{S^-(t)} \eta(\alpha, \beta) \hat{\gamma}_{\alpha\beta} u(t) d\alpha d\beta. \quad (۲-۳)$$

با توجه به این که به ازای هر نقطه (α, β) در $S^+(t)$ داریم $\hat{\gamma}_{\alpha\beta} u(t) = +1$ و نیز به ازای هر نقطه (α, β) در $S^-(t)$ داریم $\hat{\gamma}_{\alpha\beta} u(t) = -1$ ، رابطه (۲-۳) به صورت زیر ساده می‌شود

$$f(t) = \iint_{S^+(t)} \eta(\alpha, \beta) d\alpha d\beta - \iint_{S^-(t)} \eta(\alpha, \beta) d\alpha d\beta. \quad (۳-۳)$$

رابطه (۳-۳) نشان می‌دهد که مقدار خروجی در هر لحظه برابر است اختلاف انتگرال‌های سطحی تابع پریساج بر روی نواحی $S^+(t)$ و $S^-(t)$. در واقع، مقدار لحظه‌ای خروجی به نحوه تقسیم‌بندی مثلث محدودکننده به قسمت‌های مثبت و منفی $S^+(t)$ و $S^-(t)$ بستگی دارد. این تقسیم‌بندی با توجه به شکل مرز فاصل $L(t)$ صورت می‌پذیرد. شکل $L(t)$ نیز به مقادیر اکستریم گذشته ورودی بستگی دارد، زیرا این مقادیر مختصات رئوس $L(t)$ را تشکیل می‌دهند. در نتیجه، مقادیر اکستریم گذشته ورودی خط واصل پلکانی $L(t)$ را شکل می‌دهند، و به این صورت بر لحظه فعلی تأثیر دارند.

با توجه به توضیحات فوق، مدل پریساج می‌تواند به فرم کاملاً هندسی و بدون نیاز به رابطه تحلیلی (۱-۳) تعریف شود. در واقع، رابطه (۳-۳) به همراه قوانینی که در مورد نحوه تشکیل مرز فاصل $L(t)$ بیان شد، می‌تواند به عنوان یک تعریف مستقل از مدل پریساج در نظر گرفته شود. این تعریف کاملاً معادل تعریف قبل است، اما پیاده‌سازی مدل پریساج به کمک این تعریف هندسی آسان‌تر است.

۳-۳- ویژگی‌های مدل پریساج

مدل پریساج چند ویژگی مهم دارد که در [۱۵] اثبات شده‌اند. در این بخش فقط به آن‌ها اشاره می‌شود.

خصوصیات و ویژگی‌های اصلی مدل پریساج به شرح زیر می‌باشند:

- اندازه خروجی در شرایط اشباع مثبت (یعنی f^+) با قرینه خروجی در شرایط اشباع منفی (f^-) برابر است. به عبارت دیگر، $f^+ = -f^-$.
- تابع چگالی $\eta(\alpha, \beta)$ (تابع پریساج) نسبت به خط $\alpha = -\beta$ تقارن آینه‌ای دارد، در نتیجه برای هر نقطه در مثلث محدود کننده رابطه $\eta(\alpha, \beta) = \eta(-\beta, -\alpha)$ صادق است.
- هر ماکزیمم محلی ورودی، رئوسی از مرز فاصل $L(t)$ که مختصات α آن‌ها کوچکتر از مقدار ماکزیمم مذکور باشند، را حذف می‌کند. بطور مشابه، هر مینیمم محلی ورودی، رئوسی از مرز فاصل $L(t)$ که مختصات β آن‌ها بزرگتر از مقدار مینیمم مذکور باشند، را حذف می‌کند. این ویژگی را محوشوندگی می‌نامند.
- همه حلقه‌های هیستریزس داخلی که در پی تغییرات متناوب ورودی بین دو مقدار یکسان ایجاد می‌شوند، بر هم منطبق می‌شوند. این خاصیت را تجانس می‌نامند.

در اینجا لازم است مفهوم کمیت‌های مدل پریساج هنگام اعمال به پدیده هیستریزس مغناطیسی

تشریح شود. همانطور که قبلاً بیان شد، مبدل هیستریزیس در فرم مغناطیسی مدل پریساج عبارت است از یک نقطه یا یک حجم بسیار کوچک از یک ماده مغناطیسی که خاصیت هیستریزیس دارد. شدت میدان (H) این نقطه در لحظه فعلی به عنوان ورودی مدل پریساج در نظر گرفته می‌شود. همچنین، تاریخچه تغییرات (اکسترمم‌های گذشته) شدت میدان در نقطه مورد نظر باید مشخص باشند. خروجی مدل پریساج عبارت است از مغناطیس‌شوندگی (M) نقطه در لحظه فعلی. البته، چگالی شار (B) نیز می‌تواند به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شود، زیرا همواره رابطه $B = \mu_0(H + M)$ برقرار است. یادآور می‌شود که مدل پریساج کلاسیک فقط برای مسائل اسکالر معتبر است و بنابراین کمیت‌های H ، M و B باید یک‌بعدی باشند.

ویژگی تقارن آینه‌ای تابع پریساج یک نتیجه مهم در مورد هیستریزیس مغناطیسی به همراه دارد. اگر خط $\alpha = -\beta$ به عنوان مرز فاصل بین نواحی $S^+(t)$ و $S^-(t)$ در نظر گرفته شود، مقدار خروجی مدل پریساج، یا همان مغناطیس‌شوندگی، صفر خواهد شد. به عبارت دیگر، نقطه مورد نظر در وضعیت غیرمغناطیسی قرار می‌گیرد. باید توجه داشت که مرز فاصل $L(t)$ شکل پلکانی دارد و نمی‌تواند یک خط صاف باشد. به هر حال، اگر پله‌های این خط بسیار کوچک باشند، می‌توان آن را به صورت تقریبی از یک خط صاف در نظر گرفت. با توجه به این توضیحات، اگر ابتدا ورودی آن قدر افزایش یابد که خروجی در اشباع مثبت قرار گیرد و سپس به صورت نوسانی میراشونده و به تدریج تا صفر کاهش یابد، می‌توان گفت که $L(t)$ شبیه به خط $\alpha = -\beta$ می‌شود و در نتیجه نقطه در وضعیت غیرمغناطیسی قرار می‌گیرد.

۳-۴ - مسأله شناسایی مدل پریساج

طبق رابطه (۳-۳) برای مشخص بودن مدل پریساج، لازم است مقدار تابع پریساج $\eta(\alpha, \beta)$ در هر نقطه (α, β) درون مثلث محدودکننده معلوم باشد. تعیین این تابع با عنوان مسأله شناسایی مدل

پریساج شناخته می‌شود.

روش مستقیم برای تعیین توزیع تابع پریساج شامل استفاده از منحنی‌های انتقالی درجه اول است [۱۵]. متأسفانه، این روش نیاز به تجهیزات متعدد و دقیق آزمایشگاهی دارد [۸۵]. بنابراین، روش‌هایی در این بخش ارائه می‌شوند که به اطلاعات آزمایشگاهی اندکی نیاز دارند.

۳-۴-۱- روش گسسته‌سازی مثلث محدودکننده

مرجع [۸۶] یکی از قدیمی‌ترین تلاش‌های انجام شده برای تعیین توزیع تابع پریساج است. در این مرجع روشی بر پایه گسسته‌سازی مثلث محدود کننده ارائه شده است که اطلاعات مورد نیاز آن فقط شامل حلقه هیستریزس اشباع و منحنی مغناطیس‌شوندگی ماده است. متأسفانه، این مرجع چندان مورد توجه سایر محققین قرار نگرفته است. یکی از دلایل اصلی این موضوع، نحوه گسسته‌سازی مثلث محدودکننده است که می‌تواند بر دقت نتایج مدل پریساج تأثیر منفی داشته باشد. در مقاله مذکور، مثلث محدودکننده فقط با استفاده از المان‌های چهارضلعی گسسته‌سازی شده است. در نتیجه، تابع پریساج در نزدیکی خط $\alpha = \beta$ با خطای بسیار زیاد محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه اندازه تابع پریساج در این نقاط، و به ویژه در نقاط نزدیک به مبدأ، می‌تواند بسیار بزرگ باشد، خطای خروجی مدل پریساج در این حالت بزرگ خواهد بود. به نظر می‌رسد دلیل این نحوه گسسته‌سازی آن است که دستگاه معادلات به دست آمده برای تعیین تابع پریساج قابل حل باشد. در واقع، برای گسسته‌سازی صحیح مثلث محدود کننده باید از ترکیب المان‌های چهارضلعی و مثلثی استفاده نمود، اما در این حالت، دستگاه معادلاتی به دست می‌آید که حل همزمان معادلات آن بسیار دشوار است.

در این بخش از رساله، روش اصلاح شده برای گسسته‌سازی مثلث محدود کننده ارائه می‌شود و معادلات لازم برای حل مسأله به دست می‌آیند. به علت پیچیدگی معادلات، یک روش بازگشتی برای حل آن‌ها پیشنهاد می‌شود. با توجه به ویژگی تقارن آینه‌ای تابع پریساج، کافی است مسأله فقط برای

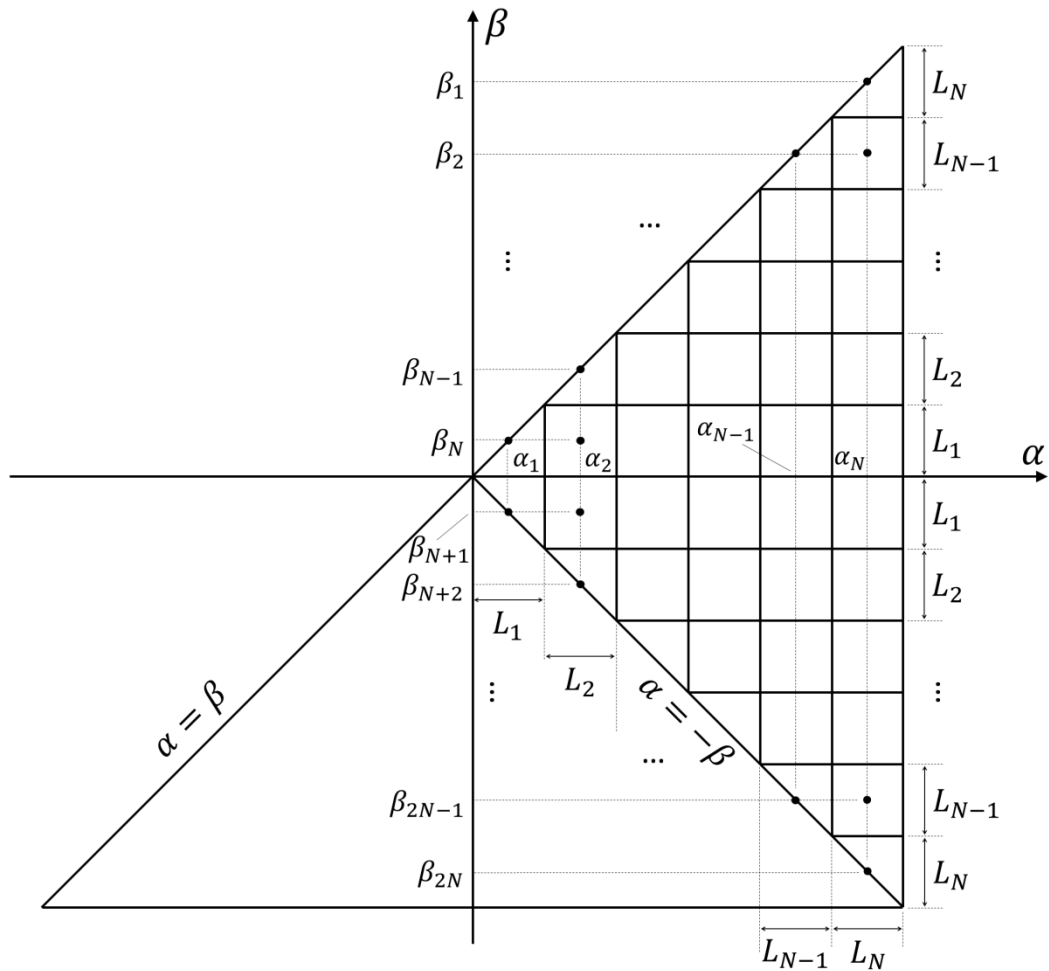
یکی از دو بخش محدود بین خطوط $\alpha = \beta$ و $\alpha = -\beta$ حل شود.

شکل ۳-۶ نحوه صحیح گسسته‌سازی مثلث محدود کننده را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، این کار با استفاده همزمان از المان‌های چهارضلعی و مثلثی انجام شده است. برای این منظور، محور α به N بخش تقسیم شده است که از چپ به راست، طول آن‌ها به ترتیب با L_1 تا L_N و مرکز آن‌ها به ترتیب با α_1 تا α_N مشخص می‌شود. محور β نیز به $2N$ بازه تقسیم شده است که مرکز هر یک از آن‌ها از بالا به پایین به ترتیب با β_1 تا β_{2N} نام‌گذاری می‌شود. طبق هندسه مسأله، لازم است طول هر بخش روی محور β بر اساس تقسیم‌بندی محور α تعیین می‌شود. بنابراین، طول بخش‌های 1 تا N به ترتیب برابر با L_N تا L_1 ، و طول بخش‌های $N+1$ تا $2N$ به ترتیب برابر با L_1 تا L_N خواهد بود. در نهایت، N ستون المان و $2N$ ردیف المان به وجود می‌آید. المان با نقطه مرکزی (α_n, β_m) در محل برخورد ستون n ام و ردیف m ام از المان‌ها قرار می‌گیرد. برای هر المان، اندازه تابع پریساج در هر نقطه ثابت و برابر با مقدار آن در نقطه مرکزی المان فرض می‌شود.

برای پدیده هیستریزیس مغناطیسی، می‌توان تابع پریساج را به صورت حاصلضرب دو تابع یک متغیره در نظر گرفت [۸۶] و [۸۷]. با این فرض خواهیم داشت:

$$\eta(\alpha, \beta) = \xi_1(\alpha) \xi_2(\beta). \quad (۳-۴)$$

تابع ξ_1 فقط به α وابسته است و بنابراین برای همه المان‌های موجود در یک ستون، یکسان است. بطور مشابه، تابع ξ_2 فقط به β وابسته است و برای همه المان‌های موجود در یک ردیف، یکسان است. به عبارت دیگر، به هر ستون از المان‌ها یک مقدار مشخص ξ_1 و به ردیف از المان‌ها یک مقدار مشخص ξ_2 اختصاص می‌یابد.



شکل ۳-۶: گسسته‌سازی مثلث محدودکننده برای یافتن توزیع تابع پریساج

انتگرال سطحی تابع پریساج بر روی ستون شماره n از المان‌ها با F_n و انتگرال سطحی این

تابع بر روی ریف m از المان‌ها با G_m نشان داده می‌شوند

اگر تعریف کنیم

$$\psi_1(\alpha_i) = L_i \xi_1(\alpha_i), \quad (5-3)$$

$$\psi_2(\beta_i) = \begin{cases} L_{N-i+1} \xi_2(\beta_i) & , 1 \leq i \leq N \\ L_{i-N} \xi_2(\beta_i) & , N+1 \leq i \leq 2N \end{cases}, \quad (6-3)$$

آنگاه دستگاه معادلات زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= \frac{1}{2} \psi_1(\alpha_1) [\psi_2(\beta_N) + \psi_2(\beta_{N+1})] , \\
 F_2 &= \psi_1(\alpha_2) \left\{ \frac{1}{2} [\psi_2(\beta_{N-1}) + \psi_2(\beta_{N+2})] + [\psi_2(\beta_N) + \psi_2(\beta_{N+1})] \right\} , \\
 &\vdots \\
 F_n &= \psi_1(\alpha_n) \left\{ \frac{1}{2} [\psi_2(\beta_{N-n+1}) + \psi_2(\beta_{N+n})] + \sum_{i=N-n+2}^{N+n-1} \psi_2(\beta_i) \right\} , \quad n \leq N , \\
 &\vdots \\
 F_N &= \psi_1(\alpha_N) \left\{ \frac{1}{2} [\psi_2(\beta_1) + \psi_2(\beta_{2N})] + \sum_{i=2}^{2N-1} \psi_2(\beta_i) \right\} , \\
 G_1 &= \frac{1}{2} \psi_2(\beta_1) \psi_1(\alpha_N) , \\
 G_2 &= \frac{1}{2} \psi_2(\beta_2) \psi_1(\alpha_{N-1}) + \psi_2(\beta_2) \psi_1(\alpha_N) , \\
 &\vdots \\
 G_m &= \frac{1}{2} \psi_2(\beta_m) \psi_1(\alpha_{N-m+1}) + \psi_2(\beta_m) \sum_{i=N-m+2}^N \psi_1(\beta_i) , \quad m \leq N , \\
 &\vdots \\
 G_N &= \frac{1}{2} \psi_2(\beta_N) \psi_1(\alpha_1) + \psi_2(\beta_N) \sum_{i=2}^N \psi_1(\beta_i) , \\
 G_{N+1} &= \frac{1}{2} \psi_2(\beta_{N+1}) \psi_1(\alpha_1) + \psi_2(\beta_{N+1}) \sum_{i=2}^N \psi_1(\beta_i) , \\
 &\vdots \\
 G_p &= \frac{1}{2} \psi_2(\beta_p) \psi_1(\alpha_{p-N}) + \psi_2(\beta_p) \sum_{i=p-N+1}^N \psi_1(\beta_i) , \quad p > N , \\
 &\vdots \\
 G_{2N} &= \frac{1}{2} \psi_2(\beta_{2N}) \psi_1(\alpha_N) .
 \end{aligned} \tag{۷-۳}$$

مجهولات در مجموعه معادلات (۷-۳) عبارتند از $\psi_2(\beta_1)$ ، $\psi_1(\alpha_N)$ ، ...، $\psi_1(\alpha_2)$ ، $\psi_1(\alpha_1)$ ، $\psi_2(\beta_2)$ ، ... و $\psi_2(\beta_{2N})$ که پس از محاسبه آنها، مقدار تابع پریساج در هر المان با توجه به روابط (۴-۳) تا (۶-۳) به دست می‌آید. همانطور که بعداً نشان داده خواهد شد، پارامترهای F_1 ، F_2 ، ...، F_N ، G_1 ، G_2 ، ... و G_{2N} از نتایج آزمایشگاهی به دست می‌آیند. در ادامه یک روش بازگشتی برای حل این معادلات ارائه می‌شود.

در ابتدا، یک مقدار دلخواه برای $\psi_1(\alpha_N)$ انتخاب می‌کنیم، مثلاً $\psi_1(\alpha_N) = 1$. در این صورت، از

معادلات (۷-۳) به سادگی داریم:

$$\psi_2(\beta_{2N}) = \frac{2G_{2N}}{\psi_1(\alpha_N)}, \quad (۸-۳)$$

$$\psi_2(\beta_1) = \frac{2G_1}{\psi_1(\alpha_N)}. \quad (۹-۳)$$

در مرحله اول از روش حل، مقادیر $\psi_1(\alpha_{N-1})$ ، $\psi_2(\beta_2)$ و $\psi_2(\beta_{2N-1})$ را به دست می‌آیند. با

دقت در معادلات (۷-۳)، معلوم می‌شود که با مشخص بودن $\psi_1(\alpha_N)$ ، $\psi_2(\beta_1)$ و $\psi_2(\beta_{2N})$ ،

حاصل جمع $\sum_{i=2}^{2N-1} \psi_2(\beta_i)$ نیز مشخص است، یعنی

$$\sum_{i=2}^{2N-1} \psi_2(\beta_i) = \frac{F_N}{\psi_1(\alpha_N)} - \frac{1}{2} [\psi_2(\beta_1) + \psi_2(\beta_{2N})]. \quad (۱۰-۳)$$

سه معادله از معادلات (۷-۳) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$F_{N-1} = \psi_1(\alpha_{N-1}) \left\{ \sum_{i=2}^{2N-1} \psi_2(\beta_i) - \frac{1}{2} \psi_2(\beta_2) - \frac{1}{2} \psi_2(\beta_{2N-1}) \right\}, \quad (۱۱-۳)$$

$$\psi_2(\beta_2) = \frac{G_2}{\frac{1}{2} \psi_1(\alpha_{N-1}) + \psi_1(\alpha_N)}, \quad (۱۲-۳)$$

$$\psi_2(\beta_{2N-1}) = \frac{G_{2N-1}}{\frac{1}{2} \psi_1(\alpha_{N-1}) + \psi_1(\alpha_N)}. \quad (۱۳-۳)$$

با قرار دادن (۱۳-۳) و (۱۲-۳) در (۱۱-۳)، معادله درجه دو زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{1}{2} \sum_{i=2}^{2N-1} \psi_2(\beta_i) \right] [\psi_1(\alpha_{N-1})]^2 \\ & + \left\{ \psi_1(\alpha_N) \left[\sum_{i=2}^{2N-1} \psi_2(\beta_i) \right] - \frac{1}{2} (G_2 + G_{2N-1}) - \frac{1}{2} F_{N-1} \right\} \psi_1(\alpha_{N-1}) \\ & - \psi_1(\alpha_N) F_{N-1} = 0. \end{aligned} \quad (۱۴-۳)$$

با در نظر داشتن رابطه (۳-۱۰)، همه ضرایب معادله (۳-۱۴) مشخص هستند. با حل آن و انتخاب ریشه مثبت، $\psi_1(\alpha_{N-1})$ به دست خواهد آمد. با قرار دادن $\psi_1(\alpha_{N-1})$ محاسبه شده در (۳-۱۳) و (۳-۱۲)، $\psi_2(\beta_2)$ و $\psi_2(\beta_{2N-1})$ نیز به دست می‌آیند.

در مرحله دوم، مقادیر $\psi_1(\alpha_{N-2})$ ، $\psi_2(\beta_3)$ و $\psi_2(\beta_{2N-2})$ به دست می‌آیند. با استفاده از نتایج مرحله قبل ($\psi_1(\alpha_{N-1})$ ، $\psi_2(\beta_2)$ و $\psi_2(\beta_{2N-1})$) و بر اساس معادلات (۳-۷)، حاصل جمع

$$\sum_{i=3}^{2N-2} \psi_2(\beta_i)$$

از طریق رابطه زیر مشخص می‌شود

$$\sum_{i=3}^{2N-2} \psi_2(\beta_i) = \frac{F_{N-1}}{\psi_1(\alpha_{N-1})} - \frac{1}{2} [\psi_2(\beta_2) + \psi_2(\beta_{2N-1})]. \quad (۳-۱۵)$$

مجدداً، روابط زیر از بازنویسی سه معادله از مجموعه معادلات (۳-۷) حاصل می‌شوند:

$$F_{N-2} = \psi_1(\alpha_{N-2}) \left\{ \sum_{i=3}^{2N-2} \psi_2(\beta_i) - \frac{1}{2} \psi_2(\beta_3) - \frac{1}{2} \psi_2(\beta_{2N-2}) \right\}, \quad (۳-۱۶)$$

$$\psi_2(\beta_3) = \frac{G_3}{\frac{1}{2} \psi_1(\alpha_{N-2}) + [\psi_1(\alpha_N) + \psi_1(\alpha_{N-1})]}, \quad (۳-۱۷)$$

$$\psi_2(\beta_{2N-2}) = \frac{G_{2N-1}}{\frac{1}{2} \psi_1(\alpha_{N-2}) + [\psi_1(\alpha_N) + \psi_1(\alpha_{N-1})]}. \quad (۳-۱۸)$$

معادله درجه دو زیر از قرار دادن (۳-۱۷) و (۳-۱۸) در (۳-۱۶)، به دست می‌آید:

$$\left[\frac{1}{2} \sum_{i=3}^{2N-2} \psi_2(\beta_i) \right] [\psi_1(\alpha_{N-2})]^2 + \left\{ [\psi_1(\alpha_N) + \psi_1(\alpha_{N-1})] \left[\sum_{i=3}^{2N-2} \psi_2(\beta_i) \right] - \frac{1}{2} (G_3 + G_{2N-2}) - \frac{1}{2} F_{N-2} \right\} \psi_1(\alpha_{N-2}) - [\psi_1(\alpha_N) + \psi_1(\alpha_{N-1})] F_{N-2} = 0. \quad (۳-۱۹)$$

با انتخاب ریشه مثبت (۳-۱۹) به عنوان مقدار $\psi_1(\alpha_{N-2})$ ، مقادیر $\psi_2(\beta_3)$ و $\psi_2(\beta_{2N-2})$ نیز از روابط (۳-۱۷) و (۳-۱۸) به دست می‌آیند.

مراحل بعدی روش حل نیز به همین صورت طی می‌شوند، تا آن که به مرحله شماره k می‌رسیم

$(k \leq N-1)$. در این مرحله، $\psi_1(\alpha_{N-k})$ برابر با ریشه مثبت معادله درجه دو زیر است:

$$\left[\frac{1}{2} \sum_{i=k+1}^{2N-k} \psi_2(\beta_i) \right] [\psi_1(\alpha_{N-k})]^2 + \left\{ \left[\sum_{j=N-k+1}^N \psi_1(\alpha_j) \right] \left[\sum_{i=k+1}^{2N-k} \psi_2(\beta_i) \right] - \frac{1}{2} (G_{k+1} + G_{2N-k}) - \frac{1}{2} F_{N-k} \right\} \psi_1(\alpha_{N-k}) - \left[\sum_{j=N-k+1}^N \psi_1(\alpha_j) \right] F_{N-k} = 0 . \quad (20-3)$$

باید دقت داشت که همه پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه ضرایب این معادله و حل آن، یا از مراحل قبل به دست آمده‌اند و یا از نتایج آزمایشگاهی مشخص شده‌اند. سپس، مقادیر $\psi_2(\beta_{k+1})$ و $\psi_2(\beta_{2N-k})$ از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\psi_2(\beta_{k+1}) = \frac{G_{k+1}}{\frac{1}{2} \psi_1(\alpha_{N-k}) + \sum_{j=N-k+1}^N \psi_1(\alpha_j)} , \quad (21-3)$$

$$\psi_2(\beta_{2N-k}) = \frac{G_{2N-k}}{\frac{1}{2} \psi_1(\alpha_{N-k}) + \sum_{j=N-k+1}^N \psi_1(\alpha_j)} . \quad (22-3)$$

پس از طی $N-1$ مرحله، همه متغیرهای مجهول در مجموعه معادلات (3-7) به دست می‌آیند. همانطور که قبلاً بیان شد، برای رسیدن به این هدف باید پارامترهای $F_1, F_2, \dots, F_N, G_1, G_2, \dots$ و G_{2N} از نتایج آزمایشگاهی مشخص شده باشند. در ادامه به این موضوع پرداخته می‌شود.

طبق تعاریف قبل، F_n برابر است با انتگرال سطحی تابع پریساج بر روی ستون شماره n از المان‌ها. فرض کنید این ستون در بازه $a_{n1} \leq \alpha \leq a_{n2}$ قرار گرفته باشد. از نقطه نظر فیزیکی، می‌توان نشان داد که F_n برابر است با تغییر در مغناطیس‌شوندگی، هنگامی که بر روی منحنی مغناطیس‌شوندگی در ربع اول قرار داشته باشیم و شدت میدان از a_{n1} تا a_{n2} افزایش می‌یابد.

بطور مشابه، G_m بصورت انتگرال سطحی تابع پریساج بر روی ردیف شماره m از المان‌ها تعریف

شد. فرض کنید این ردیف در بازه $b_{m1} \leq \beta \leq b_{m2}$ قرار گرفته باشد. دو حالت متفاوت وجود دارد: (۱) $b_{m1} > 0$ و (۲) $b_{m1} \leq 0$. می‌توان نشان داد که در حالت اول، G_m برابر است با اندازه تغییر در مغناطیس‌شوندگی، هنگامی که بر روی منحنی برگشت حلقه هیستریزیس اشباع قرار داریم و شدت میدان از b_{m1} تا b_{m2} کاهش می‌یابد. محاسبه G_m در حالت دوم شامل دو بخش است. برای این منظور، ابتدا اندازه تغییر در مغناطیس‌شوندگی را هنگامی که بر روی منحنی برگشت حلقه هیستریزیس اشباع قرار داریم و شدت میدان از b_{m1} تا b_{m2} کاهش می‌یابد، به دست می‌آوریم و با ΔM_{m1} نمایش می‌دهیم. همچنین، اندازه تغییر در مغناطیس‌شوندگی را هنگامی که بر روی منحنی مغناطیس‌شوندگی در ربع سوم قرار داریم و شدت میدان از b_{m1} تا b_{m2} کاهش می‌یابد، به دست می‌آوریم و با ΔM_{m2} نمایش می‌دهیم. اکنون می‌توان نشان داد که G_m برابر است با

$$\Delta M_{m1} - \Delta M_{m2}$$

با توجه به توضیحات فوق، برای تعیین تابع پریساج به روش گسسته‌سازی مثلث محدود کننده فقط به منحنی مغناطیس‌شوندگی ماده و منحنی برگشت حلقه هیستریزیس اشباع آن نیاز داریم.

قبل از اتمام این بخش، لازم است به یک محدودیت مدل پریساج اشاره شود که به نظر می‌رسد در مراجع به آن اشاره نشده است. این محدودیت در مورد ارتباط بین شیب منحنی برگشت حلقه هیستریزیس اشباع و شیب منحنی مغناطیس‌شوندگی است. فرض کنید H_{sat} بیانگر شدت میدانی باشد که منجر به اشباع کامل ماده هیستریزیس می‌شود. می‌توان نشان داد که اگر در هر محدوده (هر چند کوچک) از بازه تغییرات شدت میدان بین صفر تا $-H_{sat}$ ، اندازه شیب منحنی برگشت حلقه هیستریزیس اشباع کوچکتر از اندازه شیب منحنی مغناطیس‌شوندگی باشد، آنگاه مقدار تابع پریساج در برخی نقاط از مثلث محدودکننده کوچکتر از صفر خواهد بود. با توجه به اینکه مقدار منفی برای تابع پریساج قابل قبول نیست، مدل پریساج نمی‌تواند برای توصیف چنین مشخصه هیستریزیسی بکار گرفته شود.

۳-۴-۲- روش استفاده از توابع تحلیلی

استفاده از توابع تحلیلی استاندارد به فرم بسته، یکی از روش‌های پرکاربرد برای تعیین توزیع تابع پریساج است. چندین تابع برای این منظور در مراجع پیشنهاد شده است [۸۷]، [۸۸]، [۸۹]، [۹۰]. مشهورترین و پرکاربردترین این توابع عبارتند از [۸۵]:

$$\eta(\alpha, \beta) = \frac{N}{\left[1 + \left(\frac{\alpha - H_o}{\sigma H_o}\right)^2\right] \cdot \left[1 + \left(\frac{\beta + H_o}{\sigma H_o}\right)^2\right]}, \quad (23-3)$$

$$\eta(\alpha, \beta) = N \cdot \exp\left[-\frac{\left(\frac{\alpha - \beta}{2} - H_o\right)^2}{2\sigma^2 H_o^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)^2}{2\sigma^2 H_o^2}\right], \quad (24-3)$$

$$\eta(\alpha, \beta) = \frac{2N}{\alpha - \beta} \cdot \exp\left[-\frac{\left[\ln\left(\frac{\alpha - \beta}{2H_o}\right)\right]^2}{2\sigma^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(\alpha + \beta)^2}{8\sigma^2 H_o^2}\right]. \quad (25-3)$$

در توابع (۲۳-۳)-(۲۵-۳) سه پارامتر N ، H_o و σ وجود دارند که مقادیر آن‌ها باید با توجه به مشخصه‌های هیستریزس مورد مطالعه تعیین شود. روال کار معمول به این صورت است که با استفاده از یک روش بهینه‌سازی (هوشمند)، مقادیر این پارامترها به گونه‌ای انتخاب می‌شود که اختلاف بین حلقه‌های هیستریزس اصلی اندازه‌گیری شده و حلقه‌های متناظر به دست آمده از مدل پریساج، حداقل شود.

روش گسسته‌سازی مثلث محدود کننده می‌تواند توزیع تابع پریساج یک ماده را به دقت محاسبه کند، بطوریکه حلقه‌های هیستریزس اندازه‌گیری شده به طور کامل بر روی حلقه‌های تولیدی مدل پریساج منطبق شوند. این روش (توسط نویسنده این گزارش) برای تعیین تابع پریساج ماده مورد مطالعه در [۸۷] بکار گرفته شد و دقت بالای آن به اثبات رسید. این در حالی است که روش تابع

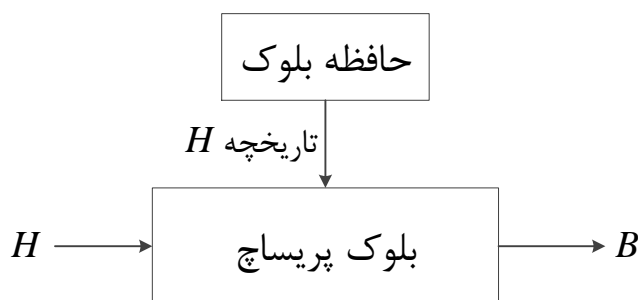
تحلیلی بسته نمی‌تواند حلقه‌های هیستریزیس یک ماده را به صورت دقیق مدل کند. در این روش، شکل کلی حلقه مدلسازی شده بر اساس نوع تابع تحلیلی مورد استفاده تعیین می‌شود و معمولاً با شکل کلی حلقه اندازه‌گیری شده تفاوت‌هایی دارد. به هر حال، استفاده و پیاده‌سازی این روش معمولاً آسان‌تر است و می‌تواند منجر به افزایش سرعت محاسبات در مدل پریساج شود.

۳-۵- بکارگیری مدل پریساج در مدلسازی موتورهای هیستریزیس

دو فصل آینده به مدلسازی موتورهای هیستریزیس با استفاده از مدل پریساج اختصاص یافته‌اند. در این فصل‌ها از مفهومی به نام بلوک پریساج استفاده شده است. بطور ساده می‌توان گفت که هر بلوک پریساج برای یک نقطه مشخص از ماده هیستریزیس تعریف می‌شود و رابطه بین شدت میدان و چگالی شار آن نقطه را در هر لحظه از زمان می‌دهد. این رابطه بر پایه مدل پریساج هیستریزیس استوار است. بنابراین، ورودی‌های اصلی بلوک پریساج عبارتند از مقدار فعلی شدت میدان در نقطه مورد نظر و رئوس مرز فاصل در مثلث محدود کننده. از آنجا که این رئوس بر اساس اکسترمم‌های گذشته شدت میدان مشخص می‌شوند، می‌توان مقدار فعلی شدت میدان و اکسترمم‌های گذشته آن را به عنوان ورودی‌های بلوک پریساج معرفی نمود. چگالی شار در لحظه فعلی نیز به عنوان خروجی بلوک پریساج در نظر گرفته می‌شود. لازم به یادآوری است که در مدل پریساج، معمولاً مغناطیس‌شوندگی به عنوان خروجی اصلی مطرح می‌شود. با این حال، طبق رابطه $B = \mu_0(H + M)$ می‌توان چگالی شار را به عنوان خروجی بلوک پریساج در نظر گرفت.

شکل ۳-۷ یک بلوک پریساج را به صورت گرافیکی نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، باید بخشی از حافظه را به هر بلوک پریساج اختصاص داد که وظیفه آن ذخیره تغییرات گذشته یا همان تاریخچه شدت میدان در نقطه‌ای است که بلوک پریساج برای آن تعریف شده است. در هر لحظه، شکل مرز فاصل در مثلث محدود کننده بر اساس این تاریخچه، و با در نظر

داشتن ویژگی محوشوندگی مدل پریساج، تعیین می‌شود. محاسبات داخلی بلوک بر اساس مباحث ارائه شده در بخش‌های قبل انجام می‌شود. نکته بسیار مهم آن است که میزان تغییرات در سطوح مثبت و منفی مثلث محدود کننده به ازای شدت میدان فعلی، به وسیله انتگرال‌گیری سطحی از تابع پریساج تعیین می‌شود. این انتگرال‌گیری باید به روش‌های عددی انجام شود و به همین دلیل، زمان برترین قسمت محاسبات است.



شکل ۳-۷: نحوه نمایش یک بلوک پریساج

تابع پریساج تعریف شده برای بلوک‌های پریساج، با توجه به مشخصه هیستریزس ماده مورد استفاده در روتور تعیین می‌شود. این کار می‌تواند به یکی از دو روش ارائه شده در بخش قبل صورت گیرد. تأیید صحت روش‌های مدلسازی فصل‌های بعد از طریق اعمال آن‌ها به موتور طراحی شده در فصل دوم انجام خواهد شد. بنابراین، لازم است در اینجا به نحوه تعیین تابع پریساج برای ماده هیستریزس این موتور پرداخته شود.

اگر به حلقه‌های تو در تو هیستریزس اندازه‌گیری شده در فصل دوم (شکل ۲-۶-ب) مراجعه شود، مشخص است که در محدوده شدت میدان‌های منفی، شرط بزرگتر بودن اندازه شیب منحنی برگشت حلقه هیستریزس اشباع از اندازه شیب منحنی مغناطیس‌شوندگی برقرار نیست. دلیل این امر، انجام اندازه‌گیری‌ها در فرکانس ۵۰ هرتز است. با توجه به یکپارچه بودن ماده مورد آزمایش، اثر پوستی و تلفات جریان ادی در این آزمایش قابل توجه بوده‌اند، به طوری‌که منجر به تغییر شکل

محسوس حلقه‌های هیستریزیس شده‌اند. در نتیجه، بر اساس محدودیت بیان شده در بخش قبل، نمی‌توان از مدل پریساج برای مدلسازی دقیق این مشخصه هیستریزیس استفاده کرد.

علی‌رغم اینکه امکان مدلسازی مشخصه هیستریزیس ماده مورد نظر در فرکانس ۵۰ هرتز به کمک مدل پریساج وجود ندارد، اما می‌توان به کمک یک توابع پریساج تحلیلی، تقریبی از مشخصه هیستریزیس ماده در فرکانس‌های بسیار کم (نزدیک به صفر) به دست آورد. توضیح آنکه برای هر یک از حلقه‌های هیستریزیس، سرعت تغییرات چگالی شار هنگامی که بر روی منحنی برگشت حلقه در ربع اول قرار داریم، کم است. بنابراین، می‌توان فرض کرد که در این محدوده، اثرات جریان‌های ادی بر روی شکل حلقه هیستریزیس ناچیز است. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که در فرکانس‌های مختلف، این بخش از منحنی‌های برگشت حلقه هیستریزیس تقریباً مشابه به یکدیگر می‌باشند. با استفاده از این فرض، به منظور تعیین توزیع تقریبی تابع پریساج ابتدا یکی از حلقه‌های هیستریزیس میانی ماده را انتخاب می‌کنیم. همچنین، یک تابع تحلیلی برای توزیع تابع پریساج در نظر می‌گیریم. سپس، پارامترهای این تابع را چنان انتخاب می‌کنیم که سه شرط در رابطه بین دو مقادیر اندازه‌گیری شده و مدلسازی شده برقرار باشد: (۱) نقطه حداکثر یا نوک دو حلقه (حلقه میانی انتخاب شده و تقریب فرکانس پایین آن) بر هم منطبق باشد، (۲) محل برخورد منحنی‌های برگشت دو حلقه با محور عمودی بر هم منطبق باشد و (۳) در شرایط اشباع کامل، مقدار چگالی شار پیش‌بینی شده توسط مدل پریساج با مقدار چگالی شار اندازه‌گیری شده برابر باشد.

از بین حلقه‌های نشان داده شده در شکل ۲-۶-ب، حلقه هیستریزیس با حداکثر چگالی شار پسماند حدوداً یک تسلا انتخاب می‌شود. مطالعات انجام شده در [۸۵] نشان می‌دهد که تابع تحلیلی (۲۳-۳) می‌تواند نتایج دقیق‌تری را نسبت به دو تابع دیگر در اختیار بگذارد. بنابراین این تابع به عنوان تابع پریساج انتخاب شده است. برای برقراری سه شرط لازم، پارامترهای این تابع از طریق یک فرآیند سعی و خطا به صورت زیر به دست آمده‌اند:

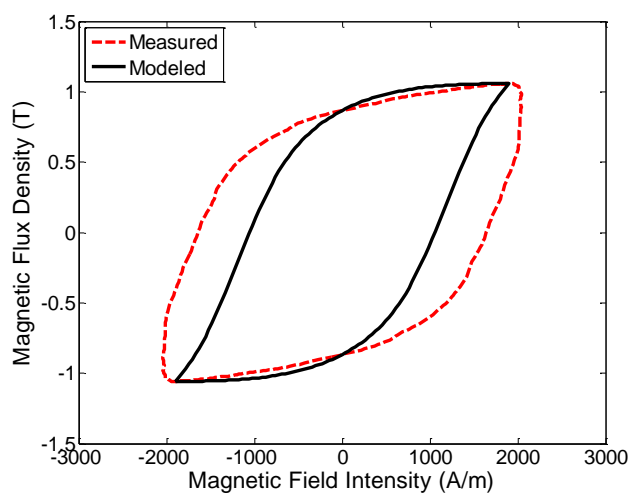
$$N = 0.9225$$

$$H_o = 1175.3616$$

(۲۶-۳)

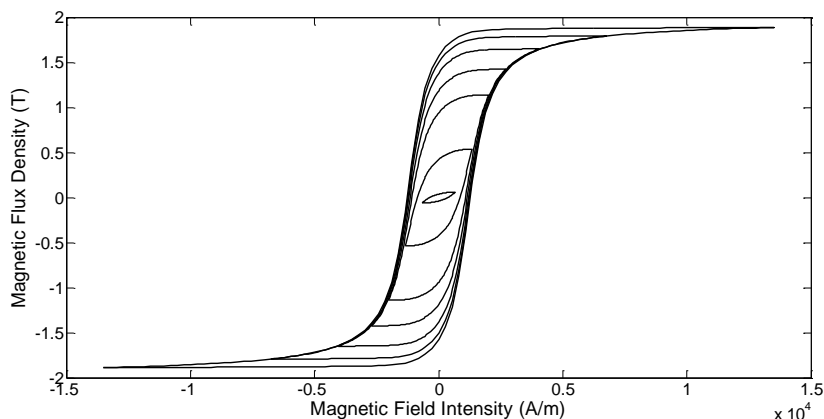
$$\sigma = 0.5407$$

شکل ۳-۸ حلقه هیستریزیس انتخاب شده را در کنار تقریب فرکانس پایین آن به وسیله تابع پریساچ (۳-۲۳) نشان می‌دهد. طبق انتظار، میدان مغناطیس‌زدای حلقه در تقریب فرکانس پایین، کوچکتر از مقدار اندازه‌گیری شده آن در فرکانس ۵۰ هرتز است. همچنین، تعدادی از حلقه‌های هیستریزیس تقریبی ماده در فرکانس‌های پایین در شکل ۳-۹ به نمایش در آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، چگالی شار اشباع کامل در این شکل برابر با مقدار متناظر در شکل ۲-۶-ب است.



شکل ۳-۸: یکی از حلقه‌های میانی اندازه‌گیری شده ماده در فرکانس ۵۰ هرتز در کنار تقریب فرکانس پایین آن که با استفاده از تابع پریساچ (۳-۲۳) در مدل پریساچ به دست آمده است.

در بسیاری از موارد لازم است که شرایط اولیه یک بلوک پریساچ در وضعیت غیرمغناطیسی باشد. همانطور که در بخش قبل توضیح داده شد، برای ایجاد چنین وضعیتی باید یک شدت میدان نوسانی میراشونده به بلوک پریساچ اعمال شود بطوریکه منجر به صفر شدن خروجی بلوک شود. سپس، این تغییرات شدت میدان در حافظه بلوک ذخیره می‌شود و بلوک در وضعیت غیرمغناطیسی قرار می‌گیرد. در این صورت، مشخصه هیستریزیس از مبدأ شروع خواهد شد.



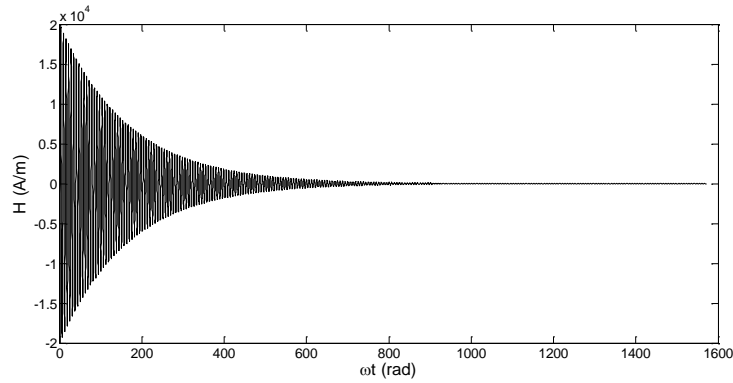
شکل ۳-۹: حلقه‌های هیستریزیس تقریبی ماده مورد مطالعه در فرکانس پایین

شکل ۳-۱۰ نحوه غیرمغناطیسی کردن بلوک پریساج را بطور گرافیکی نشان می‌دهد. با شروع از شرایط اشباع، یک تابع سینوسی میراثونده مطابق شکل ۳-۱۰-الف به ورودی بلوک پریساج اعمال می‌شود. تغییرات چگالی شار خروجی بلوک در اثر اعمال این ورودی در شکل ۳-۱۰-ب نشان داده شده است. اگر تغییرات چگالی شار خروجی بر حسب تغییرات شدت میدان ورودی رسم شود، مشخصه هیستریزیس شکل ۳-۱۰-ج به دست می‌آید. این مشخصه نحوه حرکت تدریجی از شرایط اشباع به سمت مبدأ را ارائه می‌دهد. هنگامی که وضعیت غیرمغناطیسی ایجاد می‌شود، مرز فاصل بین نواحی مثبت و منفی در مثلث محدود کننده مطابق شکل ۳-۱۰-د خواهد بود. طبق انتظار، این مرز فاصل تقریبی از خط $\alpha = -\beta$ است.

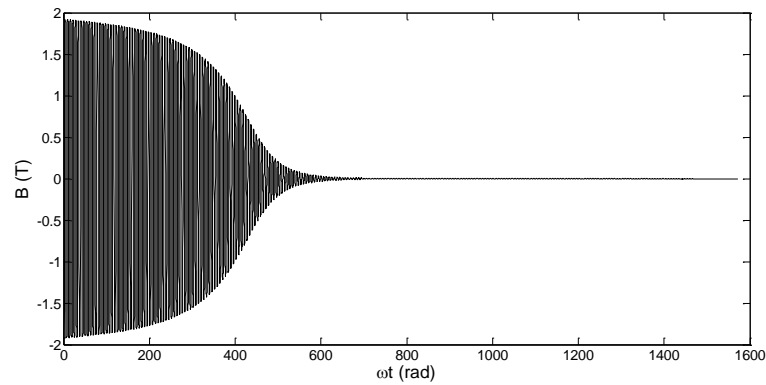
۳-۶- جمع‌بندی

در این فصل به معرفی تعریف ریاضی، توصیف هندسی و ویژگی‌های مدل پریساج کلاسیک پرداخته شد. روش جدیدی برای شناسایی مدل پریساج مواد هیستریزیس بر اساس گسسته‌سازی مثلث پریساج ارائه شد. به دلیل برخی محدودیت‌های اندازه‌گیری در فرکانس ۵۰ هرتز، از یک تابع تحلیلی برای تخمین تابع پریساج ماده هیستریزیس بکار رفته در موتور نمونه فصل قبل بهره گرفته

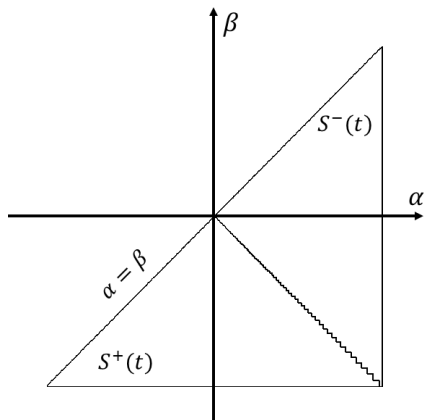
شد. در فصل بعد، روش جدیدی برای تزویج مدل پریساج هیستریزس با مدل اجزاء محدود موتورهای هیستریزس ارائه می‌شود.



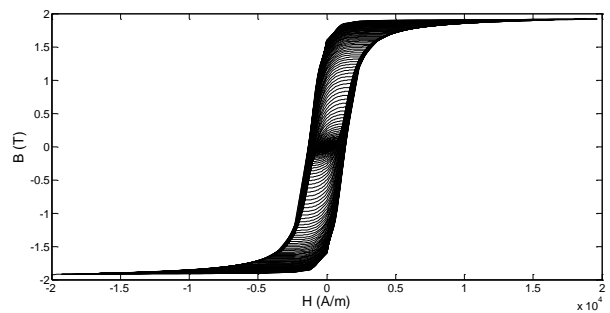
(الف)



(ب)



(د)



(ج)

شکل ۳-۱۰: نحوه قرار دادن بلوک پریساج در وضعیت غیرمغناطیسی (الف) شدت میدان اعمالی برای ایجاد وضعیت غیرمغناطیسی (ب) تغییرات چگالی شار خروجی در مسیر رسیدن به وضعیت غیرمغناطیسی (ج) تغییرات مشخصه هیستریزس در مسیر رسیدن به وضعیت غیرمغناطیسی (د) شکل مرز فاصل در مثلث محدود کننده برای وضعیت غیرمغناطیسی

فصل ۴:

مدلسازی موتورهای هیستریزیس به کمک

ترکیب مدل پریساچ و مدل اجزاء محدود

همانطور که در فصل قبل بیان شد، پدیده پیچیده هیستریزیس مغناطیسی باعث می‌شود که ارتباط بین شدت میدان و چگالی شار (یا مغناطیس‌شوندگی) مواد مغناطیسی را نتوان به کمک یک منحنی تک‌مقداره (خطی یا غیرخطی) بیان نمود. در حقیقت، این ارتباط با منحنی‌های غیرخطی چندمقداره قابل بیان است. همین موضوع سبب شده است که استفاده از مدل‌های دقیق پدیده هیستریزیس در روش‌های متداول مدل‌سازی اجزاء محدود با دشواری‌های بسیاری مواجه شود. اکثر مراجع موجود در این زمینه ناچار به تغییر در کدهای مرسوم اجزاء و نیز اضافه کردن حلقه‌های تکرار اضافی در آن‌ها شده‌اند [۹۱]. همچنین، در آن‌ها عمدتاً به مطالعه مثال‌های ساده و بعضاً غیرعملی بسنده شده است، زیرا از نظر مشخصه‌های همگرایی به جواب چندان قدرتمند نیستند [۹۲]. این موضوع به حدی جدی است که تا زمان نگارش این گزارش، هیچ نرم‌افزار تجاری ارائه نشده است که این قابلیت مهم را داشته باشد. اندک نرم‌افزارهای موجود با ادعای مدل‌سازی پدیده هیستریزیس، از مدل‌های بسیار ساده بهره می‌برند.

در این فصل از گزارش، رویکردی جدید برای ترکیب غیرمستقیم یک مدل دقیق از پدیده هیستریزیس در معادلات میدان مسائل الکترومغناطیسی فرکانس پایین ارائه می‌شود. این رویکرد از چند جنبه کاملاً عمومی است که مهم‌ترین آن‌ها به این شرح هستند: (۱) در آن از هر مدل دلخواه پدیده هیستریزیس می‌توان استفاده کرد، (۲) محدود به یک روش خاص برای حل معادلات میدان نیست و (۳) در کاربردهای متنوع می‌توان از آن استفاده نمود. نکته مهم دیگر آن است که در این رویکرد نیازی به تغییر یا اصلاح روش‌های استاندارد حل معادلات میدان نیست.

با توجه به هدف اصلی رساله، مدل‌سازی موتورهای هیستریزیس مورد مطالعه به عنوان کاربرد روش مذکور تعریف می‌گردد. مدل پریساج کلاسیک، که دقیق‌ترین مدل در بین مدل‌های هم‌سطح خود است، به عنوان مدل پدیده هیستریزیس انتخاب شده است. همچنین، تحلیل اجزاء محدود از طریق نرم‌افزار تجاری COMSOL Multiphysics برای حل معادلات میدان انتخاب می‌شود. این

نرم‌افزار قابلیت ارتباط با محیط برنامه‌نویسی متلب را دارد و برای تزویج با مدل پریساج ایده‌آل است.

۴-۱- مروری کوتاه بر تئوری الکترومغناطیس

پدیده‌های الکترومغناطیسی به صورت زیر توسط معادلات چهارگانه ماکسول توصیف می‌شوند:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (1-4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2-4)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (3-4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v, \quad (4-4)$$

معادلات (۱-۴) تا (۴-۴) به ترتیب فرم‌های نقطه‌ای قانون مداری آمپر، قانون مغناطیسی گاوس، قانون القای فارادی و قانون الکتریکی گاوس نامیده می‌شوند. کمیت‌های میدان برداری \mathbf{H} ، \mathbf{J} ، \mathbf{D} ، \mathbf{B} و \mathbf{E} به ترتیب عبارتند از شدت میدان مغناطیسی، چگالی جریان، چگالی شار الکتریکی، چگالی شار مغناطیسی و شدت میدان الکتریکی. چگالی حجمی بار الکتریکی آزاد با ρ_v نشان داده شده است و t بیانگر زمان است. این کمیت‌ها مستقل نیستند و توسط ویژگی‌های مادی محیط به صورت زیر به یکدیگر مرتبط می‌شوند:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (5-4)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0(\mathbf{E} + \mathbf{P}) \quad (6-4)$$

که در این روابط μ_0 ، ε_0 ، \mathbf{M} و \mathbf{P} به ترتیب نفوذپذیری مغناطیسی و گذردهی الکتریکی خلأ، بردار مغناطیس‌شوندگی و بردار قطبش ماده هستند.

کمیت‌های منبع \mathbf{J} ، \mathbf{M} و \mathbf{P} می‌توانند به صورت زیر به دو بخش تقسیم شوند:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_i \quad (۷-۴)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_0 + \mathbf{M}_i \quad (۸-۴)$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_0 + \mathbf{P}_i \quad (۹-۴)$$

که اندیس 0 نشان دهنده مؤلفه‌های منبع داخلی ماده است که به میدان‌های الکترومغناطیسی اعمالی از خارج وابسته نیستند. اندیس i نشان دهنده مؤلفه‌هایی است که در اثر میدان الکترومغناطیسی اعمالی از خارج القا می‌شوند.

در بسیاری از موارد می‌توان فرض کرد که یک ماده به صورت خطی به میدان‌هی خارجی واکنش نشان می‌دهد. در این صورت می‌توان مؤلفه‌های القا شده را به صورت زیر بیان نمود:

$$\mathbf{J}_i = \sigma \mathbf{E} \quad (۱۰-۴)$$

$$\mathbf{M}_i = \chi_m \mathbf{H} \quad (۱۱-۴)$$

$$\mathbf{P}_i = \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E} \quad (۱۲-۴)$$

که σ ، χ_m و χ_e به ترتیب هدایت الکتریکی، حساسیت مغناطیسی و حساسیت الکتریکی ماده هستند. با ترکیب (۴-۵) تا (۴-۱۲)، روابط زیر حاصل می‌شوند:

$$\mathbf{B} = \mu_0(1 + \chi_m)\mathbf{H} + \mu_0\mathbf{M}_0 = \mu_0\mu_{rel}\mathbf{H} + \mu_0\mathbf{M}_0 \quad (۱۳-۴)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0(1 + \chi_e)\mathbf{E} + \mathbf{P}_0 = \varepsilon_0\varepsilon_{rel}\mathbf{E} + \mathbf{P}_0 \quad (۱۴-۴)$$

که μ_{rel} و ε_{rel} به ترتیب نفوذپذیری نسبی و گذردهی نسبی ماده می‌باشند. حاصلضرب μ_0 و μ_{rel} نفوذپذیری و حاصلضرب ε_0 و ε_{rel} گذردهی ماده نامیده می‌شوند که به ترتیب با μ و ε نشان داده می‌شوند.

بر اساس فرکانس عملکرد تجهیزات الکترومغناطیسی، f ، و اینکه ماده رسانا در تجهیز مورد نظر وجود دارد یا نه، می‌توان مسائل الکترومغناطیسی را دسته‌بندی نمود. تجهیزات الکترومکانیکی عموماً در فرکانس‌های بسیار کوچکتر از یک مگاهرتز کار می‌کنند. در این فرکانس‌ها می‌توان از جریان

جابجایی وابسته به زمان در معادله (۴-۱) صرف نظر نمود. در این صورت، معادلات شبه استاتیک زیر به دست می آیند:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (۴-۱۵)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (۴-۱۶)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (۴-۱۷)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \quad (۴-۱۸)$$

معادلات شبه استاتیک زمانی استفاده می شوند که جریان های گردابی در محیط رسانا، رفتار تجهیز را به گونه ای تحت تأثیر قرار می دهد که نمی توان از آن صرف نظر نمود. در مسائلی که بتوان از اثرات جریان های گردابی صرف نظر نمود (یعنی تغییرات زمانی چگالی شار مغناطیسی در معادله (۴-۱۷) نادیده گرفته شود)، می توان از معادلات استاتیک زیر استفاده کرد:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (۴-۱۹)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (۴-۲۰)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{0} \quad (۴-۲۱)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \quad (۴-۲۲)$$

مزیت استفاده از معادلات ساکن در آن است که کمیت های الکتریکی و مغناطیسی از هم مستقل می شوند. به عبارت دیگر، مسئله به یک مسئله مگنتواستاتیک (فقط وابسته به \mathbf{H} و \mathbf{B}) یا یک مسئله الکترواستاتیک (فقط وابسته به \mathbf{E} و \mathbf{D}) تبدیل می شود.

با توجه به این که همواره رابطه $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ برقرار است، می توان \mathbf{B} را به صورت زیر برابر با کرل یک کمیت برداری دیگر به نام پتانسیل مغناطیسی برداری، \mathbf{A} ، در نظر گرفت:

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B} \quad (۴-۲۳)$$

۴-۲- روش پیشنهادی برای تزویج معادلات میدان و مدل هیستریزیس

هانطور که قبلاً اشاره شد، آنچه که تا زمان نگارش این گزارش به عنوان مهم‌ترین معضل در مدل‌سازی انواع موتور هیستریزیس مطرح می‌شود، پیش‌بینی رفتار آن‌ها پس از اولین تجربه سرعت سنکرون است. ایجاد حلقه‌های هیستریزیس فرعی به علت نوسانات سرعت در شرایط مذکور، عامل اصلی این پیچیدگی است. برای غلبه بر این مشکل باید روشی ارائه نمود که بتواند تغییرات زمانی دقیق مشخصه هیستریزیس مربوط به هر نقطه از روتور را در اختیار گذارد. نکته کلیدی آن است که در شرایط عملکردی در محدوده سرعت سنکرون، نقش جریان‌های ادی در روتور در مقایسه با اثرات ناشی از تغییرات مشخصه‌های هیستریزیس قابل نظر کردن است. بنابراین، برای سادگی بیشتر، می‌توان از معادلات مغناطیس ساکن (روابط (۴-۱۹) و (۴-۲۰)) بهره گرفت. روش‌های پیشنهادی در این رساله، بر پایه این معادلات استوار هستند. به هر حال، با اصلاحاتی می‌توان آن‌ها را به مسائل شبه استاتیک یا مسائل جریان ادی نیز تعمیم داد.

اگر مشخصه‌های مغناطیسی مواد به صورت رابطه (۴-۱۳) داده شوند، روش‌های متداول، نظیر روش اجزاء محدود، به راحتی می‌توانند حل معادلات ماکسول را در اختیار گذارند. حتی اگر یک ماده مغناطیسی با مشخصه BH غیرخطی ولی تک-مقداره در مسأله وجود داشته باشد، با تکنیک‌های موجود می‌توان به جواب مسأله دست یافت. به هر حال، در صورت وجود یک ماده با خاصیت هیستریزیس، حل ساده‌ترین مسائل مغناطیس ساکن نیز پیچیده خواهد شد.

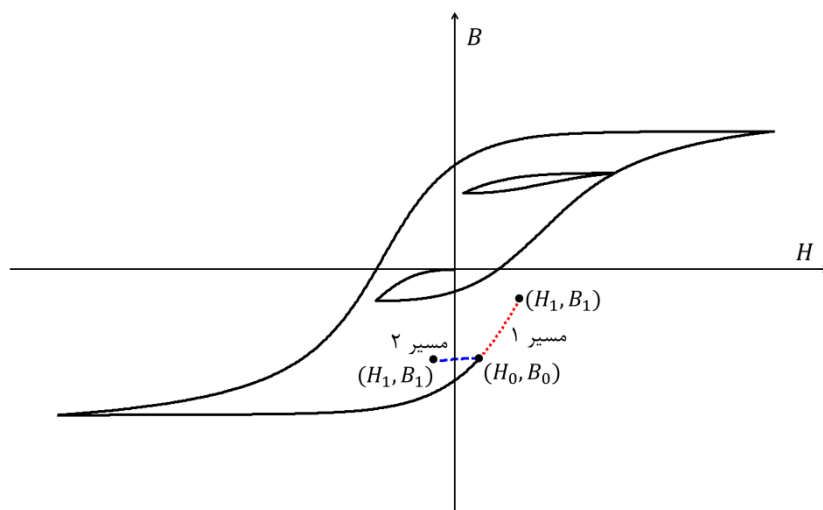
برای واضح شدن دلیل پیچیدگی مذکور، یک نقطه دلخواه از ماده هیستریزیس موجود در مسأله را در نظر می‌گیریم. فعلاً فرض می‌شود که میدان در هر نقطه از ماده هیستریزیس، فقط دارای یک مؤلفه است و یا به اصطلاح یک بعدی است. به دلیل وجود پدیده هیستریزیس، موقعیت فعلی بر روی مشخصه هیستریزیس این نقطه وابسته به تاریخچه تغییرات شدت میدان در آن نقطه است. به عبارت دیگر، به ازای یک شدت میدان مشخص H ، بی‌نهایت مقدار برای چگالی شار B ممکن است و مقدار

B صحیح باید با توجه به تغییرات گذشته H انتخاب گردد. برای این منظور باید یک مدل هیستریزس مناسب برای این نقطه بکار گرفته شود. از طرف دیگر، نقطه اشتراک همه مدل‌های هیستریزس موجود آن است که باید شدت میدان فعلی و تاریخچه آن به عنوان ورودی به مدل اعمال شود تا اینکه چگالی شار فعلی مشخص شود. حال آنکه شدت میدان فعلی در نقطه مورد نظر خود نیز مجهول است. بنابراین، تاکنون به دو چالش اشاره شد: (۱) مجهول بودن H فعلی در نقطه مورد نظر و (۲) نیاز به اطلاع از تاریخچه گذشته H و ذخیره‌سازی آن. به هر حال، یک چالش جدی دیگر نیز در این زمینه وجود دارد که به نوعی مرتبط با چالش دوم نیز است. فرض می‌کنیم که کل تغییرات گذشته مشخصه BH در نقطه مورد نظر را در اختیار داریم. به عنوان مثال، شکل ۴-۱ را در نظر گرفته می‌شود. آخرین شدت میدان مغناطیسی ثبت شده در نقطه مورد نظر تا قبل از رسیدن لحظه فعلی با H_0 نشان داده شده است و H_1 بیانگر شدت میدان فعلی آن است. چالش سوم به این صورت مطرح می‌شود که مسیر طی شدن مشخصه BH برای رسیدن به لحظه فعلی وابسته به آن است که H_1 نسبت به H_0 بزرگتر است یا کوچکتر. همانطور که در شکل نشان داده است، اگر H_1 از H_0 بزرگتر باشد، مسیر ۱ طی می‌شود و اگر H_1 از H_0 کوچکتر باشد، مسیر ۲ طی خواهد شد. مجدداً لازم به ذکر است که خود H_1 مجهول است.

توضیحات فوق نشان می‌دهد که حتی برای یک نقطه از ماده هیستریزس نیز محاسبات میدان پیچیده خواهد بود. به هر حال، دامنه این پیچیدگی بسیار فراتر است، زیرا برای تمام نقاط ماده هیستریزس چنین وضعیتی حاکم است. در ضمن، نباید از تأثیر متقابل نقاط مختلف ماده بر یکدیگر غافل بود.

برای غلبه بر چالش‌های مطرح شده لازم است یک رویکرد تکرارشونده (تکراری) برای منظور کردن پدیده هیستریزس در حل معادلات میدان به کار گرفته شود. قبل از ادامه بحث، لازم به ذکر است که استفاده از روش‌های متداول حل معادلات غیر خطی، نظیر روش نیوتن-رافسون، برای این

منظور کارایی چندانی ندارند. دلیل اصلی این محدودیت آن است که ارتباط ورودی-خروجی در مدل‌های دقیق هیستریزیس معمولاً با یک رابطه صریح ریاضی قابل بیان نیست. از روش نصف کردن فاصله‌ها نیز، که نیازی به مشخص بودن رابطه ریاضی ورودی-خروجی ندارد، نمی‌توان استفاده کرد، زیرا این روش فقط برای مسائل با یک متغیر مجهول قابل بکارگیری است و اثباتی برای توانایی آن در حل یک دستگاه معادلات وجود ندارد. در ادامه این بخش یک روش تکراری جدید برای تزویج مدل هیستریزیس و معادلات میدان پیشنهاد می‌شود.



شکل ۴-۱: مشخصه هیستریزیس فرضی برای یک نقطه از یک ماده هیستریزیس

همانطور که قبلاً اشاره شد، مراجع موجود در زمینه تزویج مدل هیستریزیس با معادلات میدان نیز همگی از روش‌های تکراری برای حل مسائل بهره گرفته‌اند. رویکرد اکثر مراجع مذکور به این گونه است که کمیت‌های مجهول میدان (مثلاً مغناطیس‌شوندگی در نقاط مختلف) بطور مستقیم در فرآیند تکراری حل وارد می‌شوند [۹۳]. متأسفانه، این رویکرد معمولاً منجر به مشخصه‌های همگرایی بسیار نامطلوب می‌شود. دلیل اصلی این موضوع را می‌توان به این صورت برشمرد: (۱) محدوده تغییرات کمیت‌های میدان بسیار گسترده است، (۲) یک وابستگی قوی بین کمیت‌های میدان در نقاط مختلف وجود دارد، بطوریکه تغییر کوچک میدان در یک نقطه می‌تواند منجر به تغییرات آن در نقاط دیگر

می‌شود و ۳) اعمال برخی از کمیت‌های میدان از خارج می‌تواند باعث شود سایر کمیت‌ها مقادیر غیرمعمول اختیار کنند، چراکه معادلات میدان باید به هر نحو ممکن برقرار شوند.

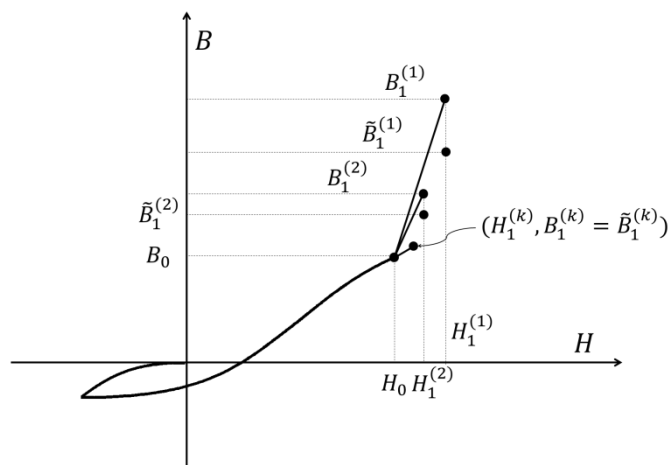
در این رساله پیشنهاد می‌شود که به جای خود کمیت‌های میدان، رابطه بین آن‌ها در فرآیند تکراری وارد شود. در این صورت، ضمن کاهش محدوده تغییرات، آزادی روش حل برای رسیدن به توزیع منطقی میدان افزایش یافته و در نتیجه مشخصه‌های همگرایی بهبود می‌یابند. برای روشن شدن موضوع، دو لحظه متوالی t_0 و t_1 در نظر گرفته می‌شوند. یادآور می‌شود که فرض بر آن است که در هر لحظه از زمان می‌توان مسأله را به کمک معادلات مغناطیس ساکن توصیف نمود. همچنین، جواب مسأله، و در نتیجه وضعیت مشخصه‌های هیستریزس همه نقاط، در لحظه t_0 معلوم فرض می‌شود. رابطه خطی (۴-۱۳) برای توصیف ارتباط بین شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی هر نقطه در بازه t_0 تا t_1 بکار گرفته می‌شود. با توجه به یک‌بعدی بودن میدان، می‌توان این رابطه را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$B = \mu H + b \quad (۴-۲۴)$$

نفوذپذیری μ برابر با شیب خط فرضی است و چگالی شار پسماند b بیانگر محل برخورد این خط با محور B می‌باشد. برای یک ماده هیستریزس، μ همواره یک عدد مثبت است و b می‌تواند مثبت، صفر و یا منفی باشد. همچنین، دامنه تغییرات آن‌ها برای هر ماده، محدود و مشخص است. جواب صحیح زمانی حاصل می‌شود که مقادیر این دو پارامتر در همه نقاط ماده درست انتخاب شده باشند. بنابراین، این دو پارامتر به عنوان متغیرهای مستقیم در فرآیند تکراری حل انتخاب می‌شوند.

مجدداً، یک نقطه دلخواه از ماده را در نظر می‌گیریم. وضعیت مشخصه هیستریزس این نقطه از لحظه صفر تا لحظه t_0 (لحظه ماقبل فعلی) مشخص است. در t_0 داریم $H = H_0$ و $B = B_0$. توجه شود که در ابتدا از موقعیت صحیح در t_1 بی‌اطلاعیم. شکل ۴-۲ بطور ترسیمی فرآیند تکراری پیشنهادی را نشان می‌دهد. بر اساس حدس اولیه، خط (۱) با پارامترهای $\mu^{(1)}$ و $b^{(1)}$ به گونه‌ای

انتخاب می‌شود که از نقطه (H_0, B_0) عبور کند. پس از حل معادلات میدان، جواب به دست آمده در لحظه t_1 ، که قطعاً باید بر روی خط (۱) قرار داشته باشد، عبارت است از $(H_1^{(1)}, B_1^{(1)})$. اگر $H_1^{(1)}$ به عنوان ورودی لحظه فعلی به مدل هیستریزیس نقطه مورد نظر اعمال شود، خروجی آن برابر خواهد بود با $\tilde{B}_1^{(1)}$. از آنجاکه $\tilde{B}_1^{(1)} \neq B_1^{(1)}$ ، نمی‌توان $(H_1^{(1)}, B_1^{(1)})$ را به عنوان جواب صحیح در نظر گرفت، زیرا جواب صحیح باید بطور همزمان در معادلات میدان و مدل هیستریزیس ماده صدق کند. در نتیجه، خط شماره (۲) با پارامترهای $\mu^{(2)}$ و $b^{(2)}$ انتخاب می‌شود و بطور مشابه، مقادیر $H_1^{(2)}$ ، $B_1^{(2)}$ و $\tilde{B}_1^{(2)}$ به دست می‌آیند. مجدداً مشاهده می‌شود که $\tilde{B}_1^{(2)} \neq B_1^{(2)}$ و خط بعدی انتخاب می‌شود. فرآیند فوق ادامه می‌یابد تا آنکه به ازای خط شماره k با پارامترهای $\mu^{(k)}$ و $b^{(k)}$ ، مقادیر $H_1^{(k)}$ ، $B_1^{(k)}$ و $\tilde{B}_1^{(k)}$ به گونه‌ای به دست می‌آیند که $\tilde{B}_1^{(k)} = B_1^{(k)}$. با توجه به اینکه معادلات میدان و مدل هیستریزیس هر دو به یک جواب منتهی شده‌اند، جواب به دست آمده صحیح است. مشاهده می‌شود که با یک فرآیند تکراری بر روی پارامترهای μ و b ، یک تزویج بین روش حل معادلات میدان و مدل هیستریزیس برقرار شده است. نکته مهم این است که این تزویج به صورت غیرمستقیم صورت می‌گیرد، بطوریکه نیازی به ایجاد تغییرات در روش حل معادلات میدان وجود ندارد.



شکل ۴-۲: نمایش ترسیمی فرآیند تکراری پیشنهادی برای تزویج مدل پدیده هیستریزیس و روش حل معادلات میدان

در اینجا لازم است به این نکته اشاره شود که فرآیند تکراری نشان داده شده در شکل ۴-۲ فقط مربوط به یک نقطه از ماده هیستریزس است. این فرآیند باید برای همه نقاط ماده انجام شود. جواب نهایی مسأله زمانی به دست می‌آید که همگرایی برای تمام نقاط اتفاق افتاده باشد. از آنجاکه تعداد نقاط موجود در هندسه یک ماده بی‌نهایت است، استفاده از نوعی گسسته‌سازی الزامی است.

تا اینجا فرض شد که در هر نقطه از ماده هیستریزس، میدان فقط دارای یک مؤلفه فضایی است. در واقعیت این فرض صحیح نیست و اگر هم در مسأله‌ای یک مؤلفه غالب باشد، مؤلفه‌های دیگر برابر با صفر مطلق نخواهند بود. به عنوان مثال، در یک موتور هیستریزس تخت شار محیطی، مؤلفه‌های محوری و شعاعی میدان در دیسک هیستریزس بسیار ناچیز بوده و تأثیر آن‌ها در عملکرد موتور قابل چشم‌پوشی است. منظور کردن یا نکردن این مؤلفه‌های ناچیز در محاسبات، به روش حل معادلات میدان بستگی دارد. مثلاً اگر از روش اجزاء محدود استفاده شود و در این روش از مؤلفه محوری در دیسک صرف نظر شود، ورود شار فاصله‌هایی به دیسک هیستریزس طبق معادلات فیزیکی به دشواری انجام می‌گیرد و یک جواب کاملاً غلط به دست می‌آید. برای رفع این مشکل، باید بتوان به نحوی همه مؤلفه‌ها را منظور کرد. دقیق‌ترین رویکرد آن است که از مدل‌های برداری هیستریزس استفاده شود. متأسفانه، این مدل‌ها علاوه بر پیچیدگی زیاد و نیاز به اطلاعات فیزیکی گسترده از ماده، فوق‌العاده زمان‌بر هستند و در نتیجه، استفاده از آن‌ها در کاربردهای عملی با محدودیت مواجه است. بنابراین، در این رساله برای هر یک از مؤلفه‌های میدان یک مشخصه هیستریزس در نظر گرفته می‌شود که از مدل‌های هیستریزس یک‌بعدی به دست می‌آیند. چنین فرضی نمی‌تواند منجر به یک خطای بزرگ شود.

فرآیند تزویج پیشنهادی در این بخش کاملاً مستقل از روش حل معادلات میدان و نیز مدل انتخاب شده برای پدیده هیستریزس است. همانطور که قبلاً اشاره شد، در این رساله از مدل پریسپاچ کلاسیک به عنوان یک مدل دقیق از پدیده هیستریزس استفاده می‌شود. همچنین در این فصل، حل

معادلات میدان از طریق تحلیل اجزاء محدود صورت می‌گیرد.

۳-۴- مدل‌سازی موتورهای هیستریزیس به کمک روش پیشنهادی

در روش اجزاء محدود، هندسه مسأله به قسمت‌های بسیار کوچک به نام المان گسسته‌سازی می‌شود. فرآیند تکراری نشان داده شده در شکل ۲-۴ باید بطور همزمان برای هر یک از مؤلفه‌های میدان در هر یک از المان‌های ماده هیستریزیس انجام می‌شود. بنابراین، برای هر مؤلفه میدان در هر المان یک بلوک پریساج مجزا در نظر گرفته می‌شود. برای کاهش حجم و زمان محاسبات، از مدل دو بعدی موتور استفاده می‌شود. برای یک موتور تخت، این مدل دوبعدی همان مدل گسترده موتور در شعاع متوسط آن است. اگر مدل دوبعدی در صفحه $x-y$ ترسیم شود، آنگاه شدت میدان و چگالی شار در تمام نقاط حوزه مطالعه فقط دارای مؤلفه‌های x و y می‌باشند. تعداد کل المان‌های ماده هیستریزیس روتور با N نشان داده می‌شود. برای المان شماره n از ماده هیستریزیس، رابطه بین هر یک از مؤلفه‌های شدت میدان و چگالی شار در مرکز المان به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$B_{rx}^n = \mu_{rx}^n H_{rx}^n + b_{rx}^n . \quad (۲۵-۴)$$

$$B_{ry}^n = \mu_{ry}^n H_{ry}^n + b_{ry}^n . \quad (۲۶-۴)$$

در این روابط، B_{rx}^n و B_{ry}^n مؤلفه‌های x و y چگالی شار در مرکز المان n ام، H_{rx}^n و H_{ry}^n مؤلفه‌های x و y شدت میدان در مرکز المان n ام، μ_{rx}^n و μ_{ry}^n مؤلفه‌های x و y نفوذپذیری در مرکز المان n ام، و b_{rx}^n و b_{ry}^n مؤلفه‌های x و y چگالی شار پسماند در مرکز المان n ام می‌باشند.

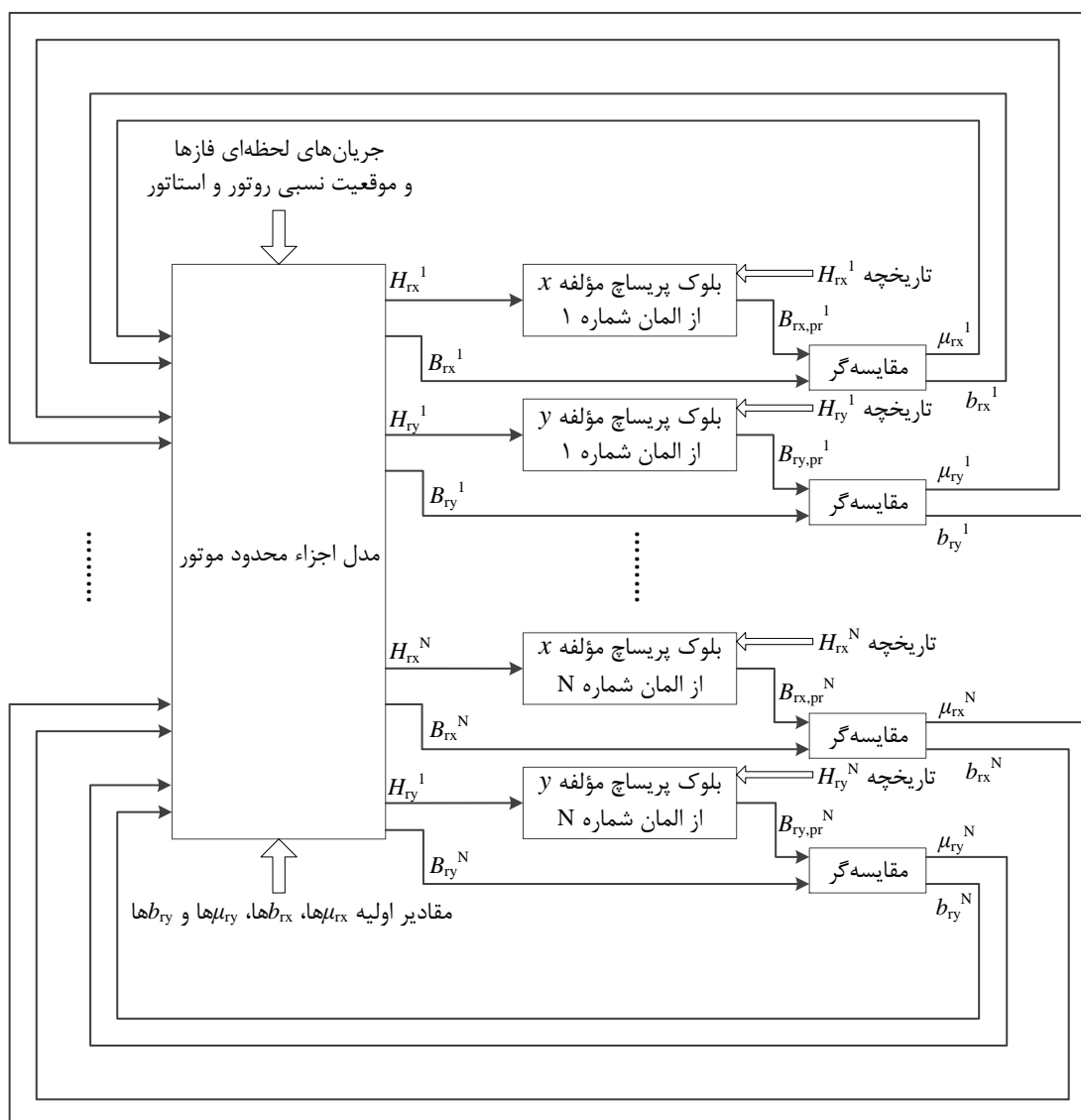
بلوک دیاگرام شکل ۳-۴ هسته مرکزی برای انواع مدل‌سازی‌های موتورهای هیستریزیس را به صورت ترسیمی نشان می‌دهد. ورودی‌های اصلی این بلوک دیاگرام جریان‌های لحظه‌ای فازها، موقعیت نسبی لحظه‌ای روتور و استاتور و نیز حافظه (تغییرات گذشته شدت میدان) هر یک از بلوک‌های پریساج هستند. همچنین، لازم است مقادیر اولیه پارامترهای μ_{rx}^n ، μ_{ry}^n ، b_{rx}^n و b_{ry}^n (به ازای

مدلسازی، طراحی بهینه و مقایسه موتورهای هیستریزس تخت چند طبقه ...

$n=1,2,\dots,N$ نیز تعیین شوند. در هر تکرار، مؤلفه‌های x و y شدت میدان و چگالی شار در هر المان از مدل اجزاء محدود به دست می‌آید. هر مؤلفه از شدت میدان هر المان به بلوک پریساج اختصاص یافته به آن وارد می‌شود و یک مقدار برای چگالی شار همان مؤلفه از المان مورد نظر محاسبه می‌شود. چگالی شارهای محاسبه شده از مدل اجزاء محدود و بلوک پریساج به یک مقایسه‌گر وارد می‌شوند. خروجی مقایسه‌گر، عبارت است از مقادیر جدید نفوذپذیری و چگالی شار پسماند برای مؤلفه مورد نظر از المان مربوطه. این پارامترهای جدید مجدداً به عنوان ورودی به مدل اجزاء محدود اعمال می‌شوند. فرآیند فوق آن قدر تکرار می‌شود تا اینکه برای هر مؤلفه از هر المان، مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل اجزاء محدود و بلوک پریساج مربوطه با یک دقت مناسب برابر شوند. لازم به ذکر است که فرآیند شکل ۳-۴ برای هر نوع موتور هیستریزس قابل بکارگیری است و مختص موتورهای مورد مطالعه در این رساله نیست.

بسته به نوع و هدف مدلسازی می‌توان از فرآیند شکل ۳-۴ به صورت‌های مختلف استفاده کرد و مطالعات متنوعی را انجام داد. در ادامه، الگوریتم مدلسازی موتور هیستریزس برای یک شرایط نسبتاً ساده تشریح می‌شود و سپس نحوه تعمیم آن به مدلسازی‌های پیچیده‌تر ارائه می‌شود.

یک موتور هیستریزس تخت با تغذیه از نوع جریانی را در شرایط روتور قفل شده در نظر می‌گیریم. هدف عبارت است از مدلسازی این موتور در شرایط مذکور و به ازای یک بازه زمانی مشخص. فرض می‌شود که بتوان از اثرات جریان‌های ادی در روتور و تلفات آهن در هسته استاتور چشم‌پوشی کرد. به هر حال، توجه به این نکته مهم الزامی است که اگر مشخصه هیستریزس ماده سازنده روتور در فرکانس نامی موتور به دست آمده باشد، تلفات ادی را نیز شامل می‌شود. بنابراین، حتی با استفاده از معادلات مغناطیس ساکن نیز رفتار راه‌اندازی موتور می‌تواند با دقت مناسب به دست آید. مراحل کار به شرح زیر می‌باشد:



شکل ۳-۴: بلوک دیاگرام هسته مرکزی برای انواع مدل‌سازی‌های موتورهای هیستریزیس به کمک توزیع مدل پریساج کلاسیک پدیده هیستریزیس و مدل اجزاء محدود موتور

گام ۱ یک جفت قطب از یک طبقه از موتور مورد نظر انتخاب می‌شود و مدل دوبعدی اجزاء محدود آن ایجاد می‌شود. رابطه ساختاری برای ماده هیستریزیس به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$B_x = \mu_x(x, y)H_x + b_x(x, y) . \quad (۲۷-۴)$$

$$B_y = \mu_y(x, y)H_y + b_y(x, y) . \quad (۲۸-۴)$$

که μ_x ، μ_y ، b_x و b_y به صورت توابعی از مختصات به مدل اجزاء محدود اعمال می‌شوند.

گام ۲ برای هر مؤلفه (x و y) از هر المان ماده هیستریزس یک بلوک پریساج مجزا در نظر گرفته می‌شود که حافظه اولیه همگی آن‌ها در وضعیت غیرمغناطیسی قرار داده شده است.

گام ۳ در شرایط اولیه، مقدار همه جریان‌ها و کمیت‌های میدان برابر با صفر قرار داده می‌شود.

گام ۴ لحظه زمانی اول انتخاب می‌شود ($m_t = 1$).

گام ۵ جریان‌ها در لحظه مورد نظر خوانده می‌شوند و به مدل اجزاء محدود اعمال می‌شوند.

گام ۶ برای مرکز هر المان شماره n در ماده هیستریزس، مقادیر اولیه برای مؤلفه‌های x و y نفوذپذیری و چگالی شار پسماند ($\mu_{rx}^n, \mu_{ry}^n, b_{rx}^n$ و b_{ry}^n) انتخاب می‌شود. با استفاده از درونیابی خطی، توابع $\mu_x(x, y), b_x(x, y), \mu_y(x, y)$ و $b_y(x, y)$ تعیین می‌شوند و به مدل اجزاء محدود اعمال می‌شوند. به ازای لحظه زمانی اول، همه b_{rx}^n ‌ها و b_{ry}^n ‌ها برابر با صفر منظور می‌شوند و μ_{rx}^n ‌ها و μ_{ry}^n ‌ها بر حسب شیب اولیه منحنی‌های مغناطیس‌شوندگی دیسک هیستریزس در نظر گرفته می‌شوند. برای لحظات زمانی دوم به بعد، مقادیر اولیه همه این پارامترها بر اساس مقدار محاسبه شده متناظر آن‌ها در لحظه زمانی قبل انتخاب می‌شوند.

گام ۷ مدل اجزاء محدود اجرا می‌شود و مقادیر مؤلفه‌های x و y شدت میدان و چگالی شار در مرکز هر المان شماره n ($H_{rx}^n, H_{ry}^n, B_{rx}^n$ و B_{ry}^n) از آن استخراج می‌شود.

گام ۸ برای هر المان شماره n ، H_{rx}^n و H_{ry}^n به دست آمده از روش اجزاء محدود به ترتیب در ورودی بلوک‌های پریساج مؤلفه‌های x و y آن المان اعمال می‌شوند. چگالی شارهای خروجی از این بلوک‌های پریساج، به صورت $B_{rx,pr}^n$ و $B_{ry,pr}^n$ نامگذاری می‌شوند.

گام ۹ برای مؤلفه‌های x و y هر المان شماره n ، دو مقدار خطای نسبی erB_{rx}^n و erB_{ry}^n به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$erB_{rx}^n = \frac{|B_{rx,pr}^n - B_{rx}^n|}{\varepsilon + |B_{rx,pr}^n|} \quad (29-4)$$

$$erB_{ry}^n = \frac{|B_{ry,pr}^n - B_{ry}^n|}{\varepsilon + |B_{ry,pr}^n|} \quad (30-4)$$

که ε یک عدد مثبت بسیار کوچک است و برای جلوگیری از نامحدود شدن خطاها به ازای چگالی شارهای نزدیک به صفر بکار می‌رود.

گام ۱۰ اگر $\max_{n=1,2,\dots,N}(erB_{rx}^n) \leq \varepsilon_x$ و $\max_{n=1,2,\dots,N}(erB_{ry}^n) \leq \varepsilon_y$ ، که ε_x و ε_y مقادیر حداکثر خطای مجاز برای

مؤلفه‌های x و y هستند، روش حل در لحظه زمانی فعلی به جواب درست همگرا شده است. در این صورت نتایج مورد نیاز ذخیره می‌شوند. همچنین، حافظه‌های بلوک‌های پریساج به روز می‌شوند. اگر لحظه زمانی پایانی فرا رسیده باشد، برنامه به پایان می‌رسد و اگر لحظه زمانی پایانی فرا نرسیده باشد، به m_t یک واحد اضافه می‌شود ($m_t = m_t + 1$) و برنامه به گام ۵ منتقل می‌شود. در صورتی که $\max_{n=1,2,\dots,N}(erB_{rx}^n) > \varepsilon_x$ یا $\max_{n=1,2,\dots,N}(erB_{ry}^n) > \varepsilon_y$ ، برنامه وارد گام بعد می‌شود.

گام ۱۱ برای هر المان شماره n ، پارامترهای $\mu_{rx,pr}^n$ ، $\mu_{ry,pr}^n$ ، $b_{rx,pr}^n$ و $b_{ry,pr}^n$ به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\mu_{rx,pr}^n = \frac{B_{rx,pr}^n - B_{rx}^n(m_t - 1)}{H_{rx}^n - H_{rx}^n(m_t - 1)} \quad (۳۱-۴)$$

$$\mu_{ry,pr}^n = \frac{B_{ry,pr}^n - B_{ry}^n(m_t - 1)}{H_{ry}^n - H_{ry}^n(m_t - 1)} \quad (۳۲-۴)$$

$$b_{rx,pr}^n = B_{rx,pr}^n - \mu_{rx,pr}^n H_r^n \quad (۳۳-۴)$$

$$b_{ry,pr}^n = B_{ry,pr}^n - \mu_{ry,pr}^n H_r^n \quad (۳۴-۴)$$

که $B_{rx}^n(m_t - 1)$ ، $B_{ry}^n(m_t - 1)$ ، $H_{rx}^n(m_t - 1)$ و $H_{ry}^n(m_t - 1)$ بیانگر مقادیر لحظه قبل مؤلفه‌های x و y چگالی شار و شدت میدان در مرکز المان n ام هستند.

گام ۱۲ مقادیر پارامترهای μ_{rx}^n ، μ_{ry}^n ، b_{rx}^n و b_{ry}^n از طریق انتصابات زیر اصلاح می‌شوند

$$\mu_{rx}^n = \mu_{rx}^n + K_x(\mu_{rx,pr}^n - \mu_{rx}^n) \quad (۳۵-۴)$$

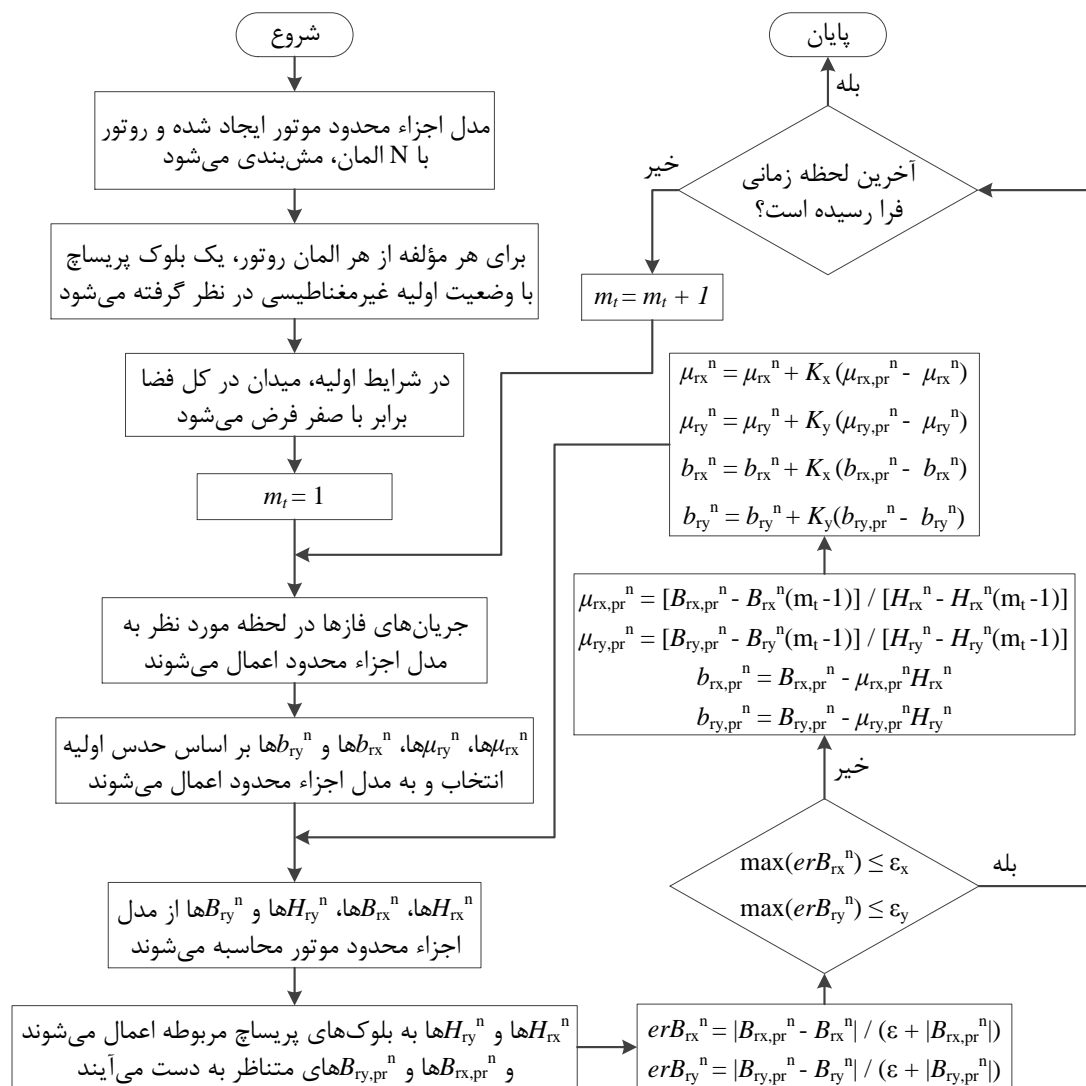
$$\mu_{ry}^n = \mu_{ry}^n + K_y(\mu_{ry,pr}^n - \mu_{ry}^n) \quad (۳۶-۴)$$

$$b_{rx}^n = b_{rx}^n + K_x(b_{rx,pr}^n - b_{rx}^n) \quad (۳۷-۴)$$

$$b_{ry}^n = b_{ry}^n + K_y(b_{ry,pr}^n - b_{ry}^n) \quad (۳۸-۴)$$

که K_x و K_y دو ضریب مثبت کوچکتر از یک هستند. مجدداً با استفاده از درونیایی خطی، توابع $\mu_x(x, y)$ ، $b_x(x, y)$ ، $\mu_y(x, y)$ و $b_y(x, y)$ تعیین می‌شوند و به مدل اجزاء محدود اعمال می‌شوند. سپس، برنامه به گام ۷ منتقل می‌شود.

فلوچارت خلاصه این الگوریتم در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۴: فلوچارت الگوریتم مدلسازی یک موتور هیستریزس روتور قفل شده با تغذیه جریانی در یک بازه زمانی مشخص با استفاده از ترکیب مدل پریساج و تحلیل اجزاء محدود

اکنون فرض می‌کنیم که موتور مورد مطالعه از نوع تغذیه ولتاژی باشد، یعنی در هر لحظه از زمان، ولتاژهای ترمینال موتور، و نه جریان‌ها آن، مشخص است. برای مدلسازی این حالت، کافی است

یک حلقه تکرار دیگر به الگوریتم شکل ۴-۴ اضافه شود که وظیفه آن یافتن مقادیر جریان فازها در هر لحظه و به ازای ولتاژهای داده شده است. توضیح آنکه برای هر لحظه، ابتدا جریان‌ها بر اساس حدس اولیه انتخاب می‌شوند و فرآیند مدل‌سازی تا همگرایی مدل‌های پریساج و اجزاء محدود در آن لحظه زمانی ادامه می‌یابد. سپس شارهای پیوندی فازها در لحظه مورد نظر محاسبه می‌شود. به کمک مشتق‌گیری عددی از شارهای پیوندی، ولتاژهای ترمینال محاسبه می‌شوند. اگر مقادیر محاسبه شده ولتاژها با مقادیر داده شده برابر باشند، جریان‌ها به درستی انتخاب شده‌اند. در غیر این صورت، جریان‌ها آنقدر اصلاح می‌شوند تا شرط برابری ولتاژهای محاسبه شده و داده شده در لحظه مورد نظر برآورده شود.

در مرحله بعد فرض می‌شود که علاوه بر تغذیه ولتاژی موتور، روتور قادر به حرکت است. این حالت نیز به سادگی قابل مدل‌سازی است. برای پیاده‌سازی این نوع مدل‌سازی، پس از همگرایی کامل در هر لحظه، گشتاور وارد بر روتور از مدل اجزاء محدود محاسبه شود. بر اساس این گشتاور و با استفاده از معادله دینامیک حرکت روتور، میزان جابجایی روتور در پله زمانی پیش‌رو به دست می‌آید. برای لحظه زمانی بعد، این جابجایی در مدل اجزاء محدود منظور می‌شود. نکته حائز اهمیت آن است که جابجایی روتور در مدل اجزاء محدود ممکن است باعث تغییر مش‌بندی در ماده هیستریزیس شود که این موضوع ممکن است باعث واگرایی الگوریتم و یا جواب‌های غلط شود. در واقع، برای هر المان ماده هیستریزیس، دو بلوک پریساج تعریف شده‌اند و تغییر در شکل و مختصات المان‌ها مشکلاتی در حفظ تاریخچه مورد نیاز بلوک‌ها ایجاد می‌کند. بنابراین، بهتر است هر گونه حرکت روتور، از طریق جابجایی استاتور به همان میزان ولی در جهت عکس، اعمال شود.

۴-۴- نتایج مدل‌سازی و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی

الگوریتم شکل ۴-۴ برای پیش‌بینی رفتار یک موتور هیستریزیس در شرایط روتور قفل شده ارائه

شد. به هر حال، از این الگوریتم برای مطالعه موتورهای بدون شیار و بدون هسته در شرایط ورود به سنکرونیزم نیز می‌توان بهره گرفت. در واقع، برای این موتورها می‌توان با تقریب خوب شرایط ورود به سنکرونیزم را با شرایط راه‌اندازی یکسان در نظر گرفت، مشروط بر آنکه از جریان‌های ادی در روتور چشم‌پوشی شود. از آن‌جاکه معادلات مورد استفاده از نوع ساکن هستند، این شرط زمانی محقق می‌شود که مشخصه هیستریزس ماده روتور از آزمایش با فرکانس بسیار پایین به دست آمده باشد.

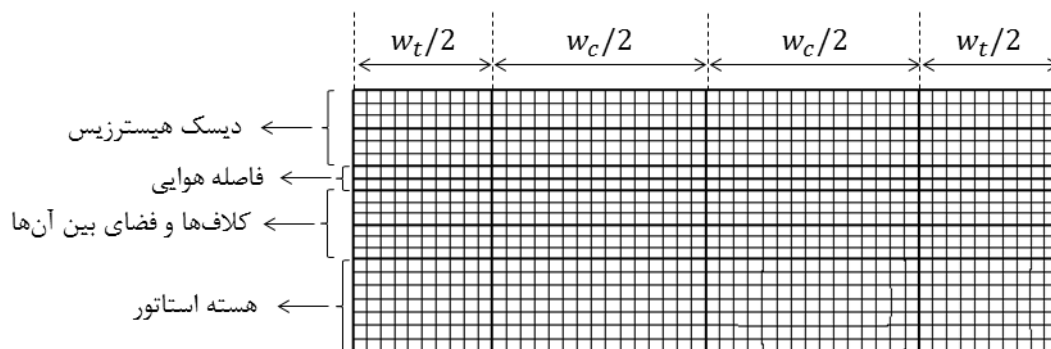
با توجه به توضیحات فوق، و به عنوان یک نمونه، از الگوریتم شکل ۴-۴ برای مدلسازی شرایط ورود به سنکرونیزم موتور بدون شیار طراحی شده در فصل دوم استفاده می‌شود. یادآور می‌شود که مشخصه تقریبی ماده هیستریزس بکار رفته در این موتور در فصل سوم بدست آمد. همچنین، با توجه به تقارن موتور، مدلسازی برای یک طبقه از آن انجام می‌شود و نتایج حاصله از طریق اعمال ضرایب مناسب به کل موتور تعمیم داده می‌شود.

به منظور نشان دادن قابلیت رویکرد پیشنهادی در تزویج مدل‌های پریساج و اجزاء محدود بدون نیاز به کدنویسی ویژه اجزاء محدود، از نرم‌افزار تجاری COMSOL Multiphysics برای تحلیل اجزاء محدود استفاده می‌شود. این نرم‌افزار از قابلیت برقراری ارتباط دوطرفه با محیط برنامه‌نویسی متلب برخوردار است. همچنین، بر خلاف نرم‌افزارهای مشابه، در آن امکانات متنوعی برای ایجاد دسترسی کاربر به تنظیم دلخواه مدل اجزاء محدود در نظر گرفته شده است. به غیر از محاسبات اصلی اجزاء محدود، تمامی محاسبات در محیط متلب صورت می‌پذیرد.

مش‌بندی، یکی از مهم‌ترین مراحل ایجاد مدل اجزاء محدود موتور است. رزلوشن مناسب و تقارن دو ویژگی اصلی یک مش‌بندی خوب هستند، که برای اهداف این فصل از اهمیت دوچندان برخوردار می‌باشند. با توجه به نسبت طول به عرض بسیار بزرگ، نشان دادن مدل کامل مش‌بندی‌شده در اینجا امکان‌پذیر نیست. شکل ۴-۵ مش‌بندی یک گام دندان (یعنی یک دوازدهم) موتور مورد مطالعه را نشان می‌دهد. یازده گام دندان دیگر نیز مطابق شکل ۴-۵ مش‌بندی شده‌اند. با توجه به هندسه خاص

مدل دوبعدی مورد مطالعه، برای همه بخش‌های موتور از المان‌های چهاروجهی استفاده شده است. برای ایجاد تقارن کامل، نیمی از طول کلاف‌ها ($w_c/2$) مش‌بندی شده است و عیناً بر روی نیمه دیگر منعکس شده است. این کار برای فاصله بین کلاف‌های مجاور ($w_t/2$) نیز انجام شده است.

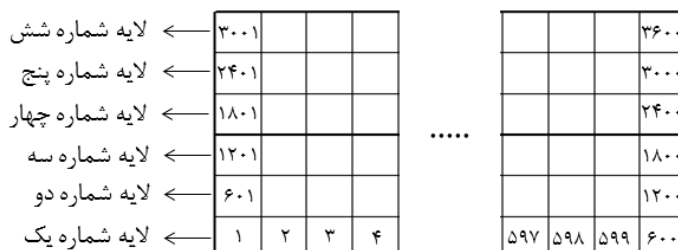
تعداد المان‌های دیسک هیستریزیس باید به گونه‌ای انتخاب شود که: (۱) ابعاد المان‌های فاصله هوایی معقول باشند، (۲) تغییرات فضایی هر دو مؤلفه کمیت‌های میدان با دقت مناسب به دست آیند، (۳) زمان مورد نیاز برای انجام محاسبات بیش از حد طولانی نشود. مورد آخر بسیار مهم است، زیرا با توجه به اختصاص دو بلوک پریساج به هر المان، تعداد کل بلوک‌های پریساج برابر است با دو برابر تعداد المان‌های دیسک هیستریزیس. از طرف دیگر، انتگرال‌گیری‌های عددی موجود در هر بلوک پریساج، زمان برترین بخش محاسبات الگوریتم شکل ۴-۴ را تشکیل می‌دهد. بنابراین، تعداد المان‌های دیسک هیستریزیس نباید بیش از حد بزرگ انتخاب شود.



شکل ۴-۵: مش‌بندی یک گام دندانه از مدل اجزاء موتور

شکل ۴-۶ جزئیات بیشتری از مش‌بندی دیسک هیستریزیس را در اختیار می‌گذارد که برای درک بهتر نتایج به دست آمده ضروری است. همان‌طور که نشان داده شده است، دیسک هیستریزیس در راستای محوری به شش لایه از المان‌های چهاروجهی تقسیم‌بندی شده است. هر لایه متشکل از ۶۰۰ المان است که مطابق شکل از سمت چپ به راست شماره‌گذاری می‌شوند و بنابراین در مجموع ۳۶۰۰ المان در دیسک هیستریزیس بکار رفته است. همچنین، کوچک‌ترین شماره‌ها نشان‌دهنده

المان‌های نزدیک به فاصله هوایی هستند و المان‌های با شماره بزرگتر در فاصله بیشتری از فاصله هوایی قرار دارند.

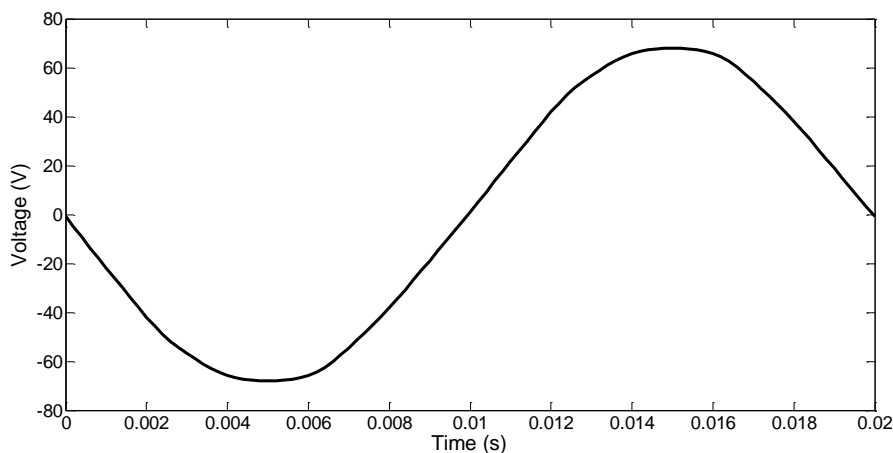


شکل ۴-۶: جزئیات مش‌بندی دیسک هیستریزس

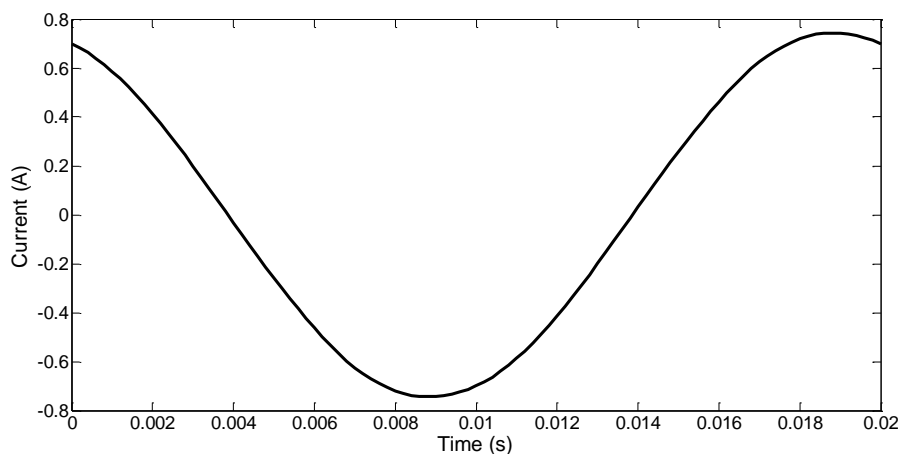
موتور نمونه طراحی شده در فصل دوم، پس از ساخت مورد آزمایش‌های مختلف قرار گرفته است. در یکی از این آزمایش‌ها، ولتاژ ترمینال ماشین به تدریج از صفر تا حدی افزایش یافت که روتور برای اولین بار سرعت سنکرون را تجربه کند. در این لحظه، که همان لحظه ورود به سنکرونیزم است، شکل موج‌های ولتاژ فاز و جریان فاز موتور توسط اسیلوسکوپ دیجیتال ثبت شده و به کامپیوتر دیجیتال منتقل شدند. پس از حذف نویزها و آفست شکل‌موج‌ها با استفاده از تبدیل فوریه گسسته، یک سیکل از ولتاژ و جریان موتور برای یکی از فازها به ترتیب مطابق شکل ۴-۷-الف و شکل ۴-۷-ب به دست می‌آیند.

اگر شکل ۴-۷-ب به عنوان جریان فاز a در نظر گرفته شود، جریان‌های فازهای b و c با جابجایی‌های 120° درجه‌ای این شکل موج به دست می‌آیند (با توجه به متعادل بودن ولتاژ سه‌فاز تغذیه و مقارن بودن ساختار موتور). اگر زمان شبیه‌سازی را به اندازه دو سیکل در نظر بگیریم و جریان فازها را در یک تابع نمایی ضرب کنیم (برای مطابقت بیشتر با این فرض که در شرایط اولیه همه نقاط روتور در وضعیت غیرمغناطیسی قرار دارند و نیز برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی در پیش‌بینی عملکرد گذرای موتور)، شکل موج جریان‌های سه‌فاز اعمال شده به مدل اجزاء محدود به صورت شکل ۴-۸ خواهد بود. در هر لحظه از زمان شبیه‌سازی، جریان فازها از این شکل خوانده

شده و به مدل اجزاء محدود اعمال می‌شود.



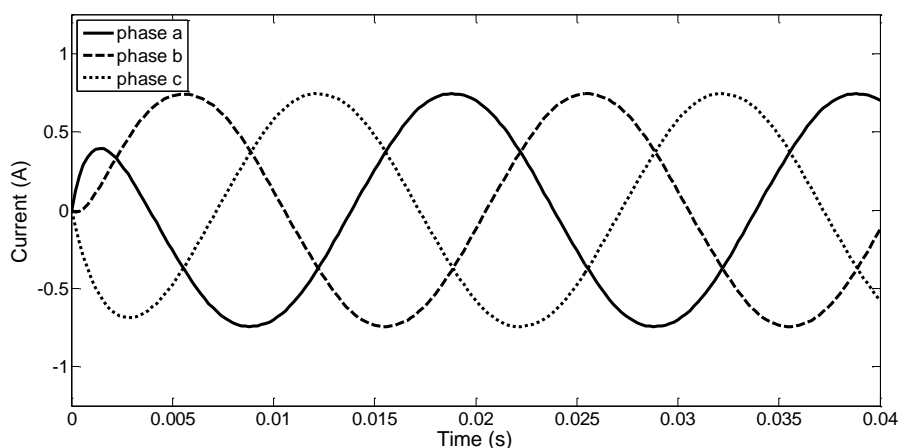
(الف)



(ب)

شکل ۴-۷: یک سیکل از شکل موج کمیت‌های ترمینال یکی از فازهای موتور در لحظه ورود به سنکرونیزم (الف) ولتاژ فاز (ب) جریان فاز

برای انجام شبیه‌سازی، هر سیکل به ۱۰۰ بازه تقسیم می‌شود. در نتیجه، ۲۰۱ لحظه زمانی خواهیم داشت. شبیه‌سازی بر روی یک کامپیوتر رومیزی با پردازنده مرکزی Intel Core i7-2600k و حافظه رم نصب شده به میزان ۱۲ گیگابایت انجام شد. همچنین، از قابلیت پردازش موازی در نرم‌افزار متلب استفاده شد. زمان سپری شده برای انجام محاسبات برابر با ۱۱۹۳۴۱/۷۶ ثانیه (بیش از ۳۳ ساعت) است.

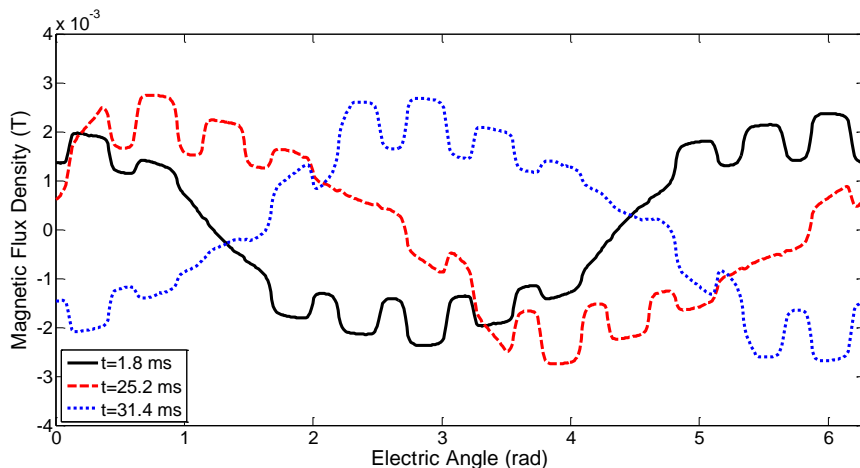


شکل ۴-۸: جریان سه فاز اعمالی به مدل اجزاء محدود در طول زمان شبیه‌سازی

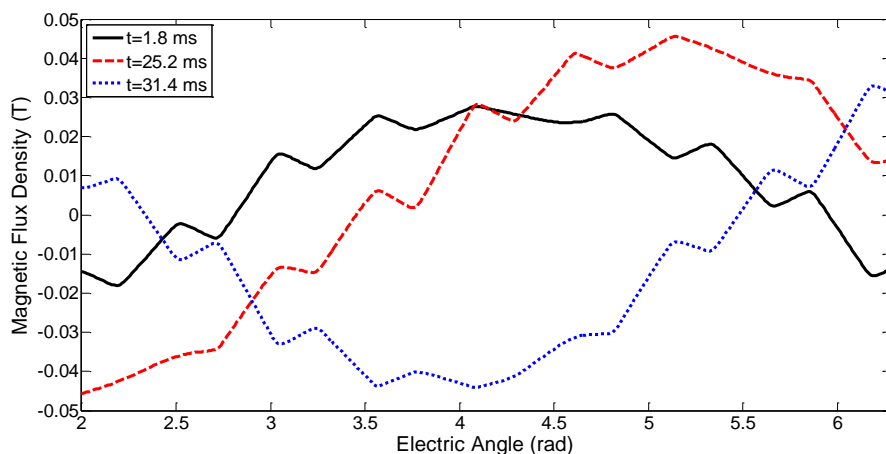
پس از اجرای کامل الگوریتم شکل ۴-۴ و ذخیره همه اطلاعات، می‌توان نتایج گوناگونی را بررسی نمود. ابتدا با توزیع‌های فضایی کمیت‌های مختلف آغاز می‌کنیم. این توزیع‌ها به ازای سه لحظه $t_1 = 1.8 \text{ ms}$ ، $t_2 = 25.2 \text{ ms}$ و $t_3 = 31.4 \text{ ms}$ ارائه می‌شوند. لحظه t_1 مربوط به رژیم گذرایی است، در حالیکه دو لحظه دیگر در دوره عملکرد حالت دائمی قرار دارند.

شکل ۴-۹ الف تغییرات مؤلفه x چگالی شار میانه فاصله هوایی را حول محیط موتور نشان می‌دهد. مؤلفه y این کمیت در شکل ۴-۹ ب ترسیم شده است. از بررسی این دو شکل می‌توان بیان نمود که: (۱) با وجود اینکه استاتور فاقد هرگونه دندانه است، توزیع سیم‌پیچی باعث ایجاد اعوجاجات قابل توجه در هر دو مؤلفه شده است، (۲) طبق انتظار، دامنه مؤلفه محوری چگالی شار فاصله هوایی بسیار بزرگتر از دامنه مؤلفه محیطی آن است (بیش از ۱۰ برابر)، (۳) با گذشت زمان این توزیع‌های فضایی جابجا می‌شوند، (۴) در دوره گذرا دامنه چگالی شار فاصله هوایی کوچکتر است و این مورد در مؤلفه محوری مشهودتر است، و (۵) نوعی عدم تقارن یا کشیدگی در مؤلفه محوری رخ داده است که به نظر می‌رسد ناشی از اختلاف فاز ایجاد شده بین میدان‌های استاتور و روتور باشد. نکته قابل توجه دیگر در این شکل‌ها آن است که، طبق انتظار، حداکثر اندازه چگالی شار در فاصله هوایی موتور شار محیطی مورد مطالعه بسیار کوچک است (کمتر از ۰/۰۵ تسلا). این موضوع نشان می‌دهد که استفاده

از استاتورهای بدون شیار و بدون هسته در این نوع موتورها، با توجه به بزرگ بودن طول مؤثر فاصله هوایی آنها، مشکل ساز نیست.



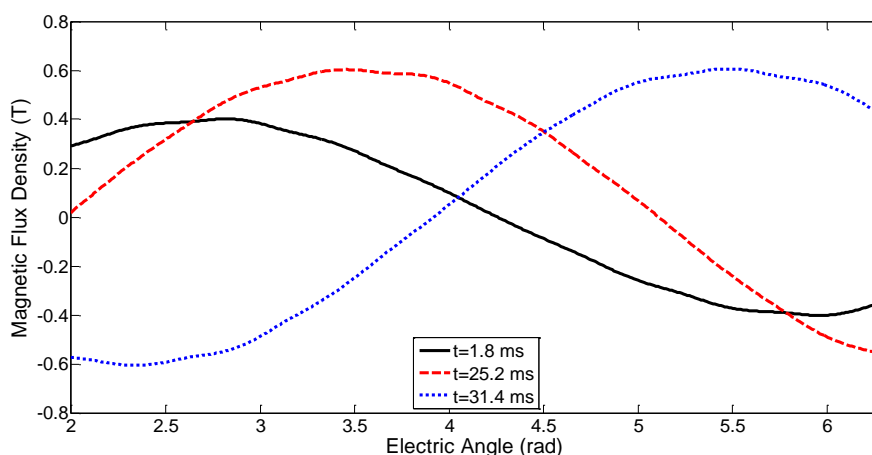
(الف)



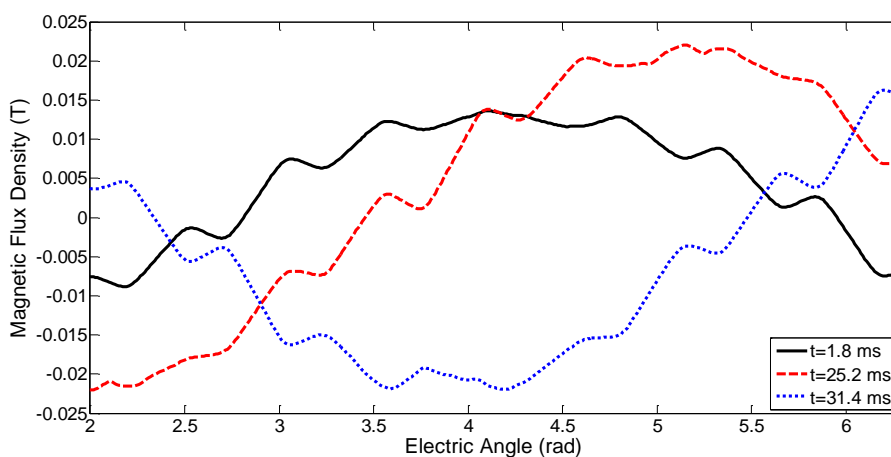
(ب)

شکل ۹-۴: توزیع فضایی مؤلفه‌های چگالی شار در فاصله هوایی در چند لحظه زمانی (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y

مؤلفه‌های محیطی و محوری چگالی شار میانه هسته استاتور در شکل ۴-۱۰ ترسیم شده‌اند. بر خلاف فاصله هوایی، چگالی شار در هسته استاتور عمدتاً محیطی است (با نسبت حدودی ۲۰ برابر). همچنین، مؤلفه محیطی چگالی شار استاتور، که با انتگرال مؤلفه محوری چگالی شار در فاصله هوایی ارتباط دارد، تغییرات نرم‌تری را نشان می‌دهد.



(الف)

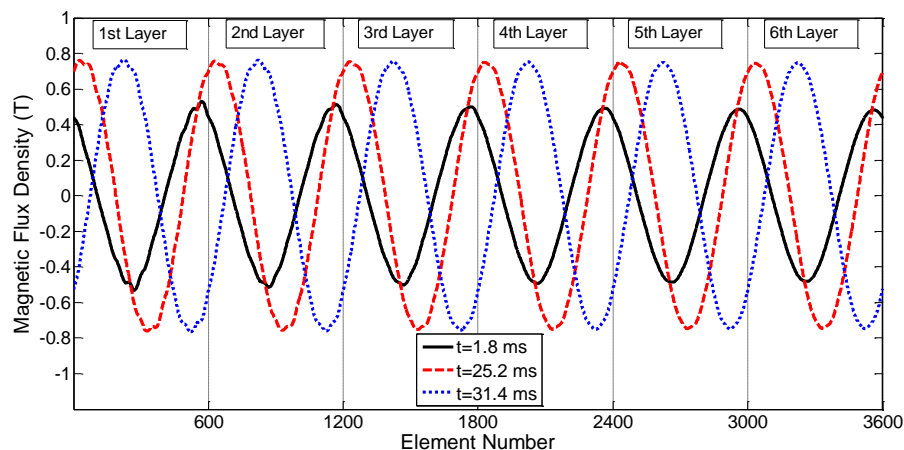


(ب)

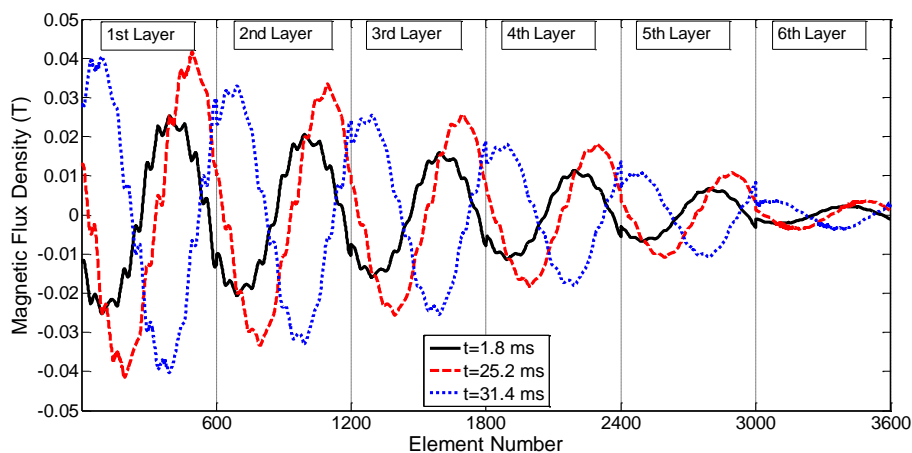
شکل ۴-۱۰: توزیع فضایی مؤلفه‌های چگالی شار در هسته استاتور در چند لحظه زمانی (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y

مطالعه میدان در دیسک هیستریزس از اهمیت بالاتری برخوردار است و لذا برای آن جزئیات بیشتری ارائه می‌شود. شکل ۴-۱۱ مقادیر مؤلفه‌های محیطی و محوری چگالی شار را برای تک تک المان‌های آن در اختیار می‌گذارد. در این شکل با استفاده از علائمی، وضعیت المان‌های موجود در هر لایه از مش بندی دیسک (به شکل ۴-۶ مراجعه شود) مشخص شده است. طبق انتظار، مؤلفه محیطی چگالی شار در دیسک هیستریزس بر مؤلفه محوری آن غالب می‌باشد (با نسبت حدود ۲۰ برابر). همچنین میزان اعوجاج آن، بخصوص در لایه‌های بالا، بسیار کمتر است. نکته جالب توجه دیگر آن

است که با دور شدن از فاصله هوایی (افزایش شماره لایه)، اندازه مؤلفه محیطی تغییر محسوسی ندارد، در حالیکه مؤلفه محوری به شدت افت می‌کند. همچنین، در دیسک هیستریزیس نیز با تغییر زمان، توزیع چگالی شار جابجا می‌شود و دامنه آن در رژیم گذرا کوچکتر است.



(الف)

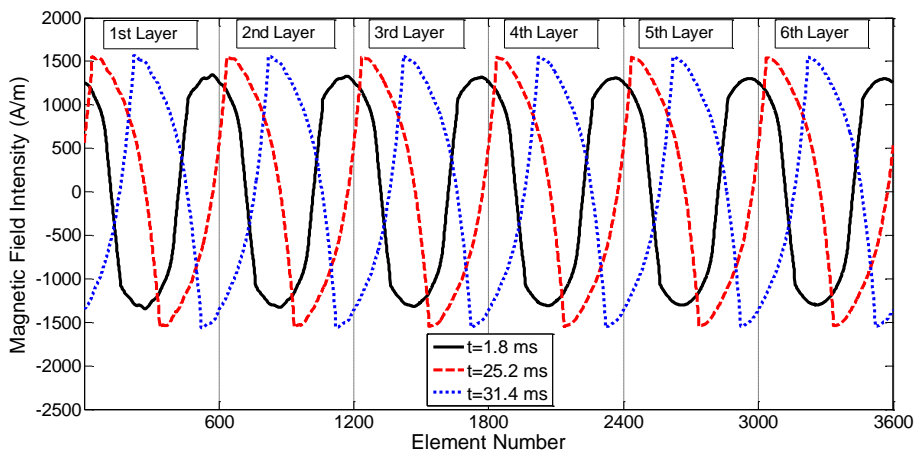


(ب)

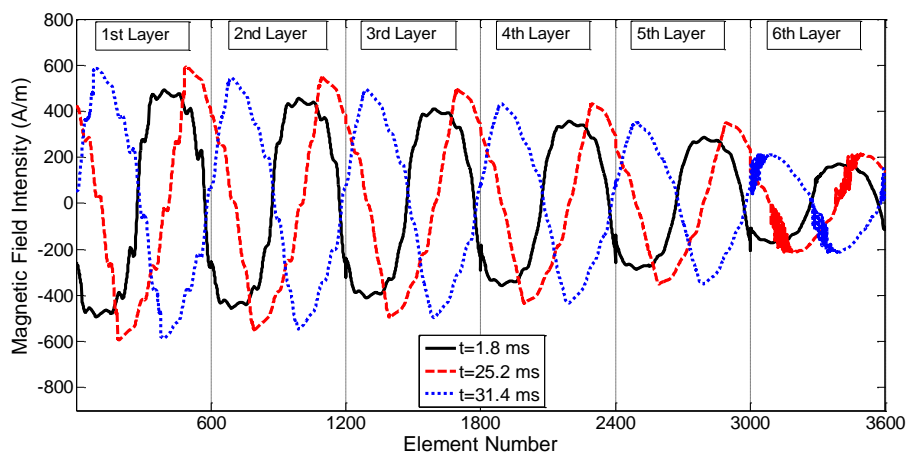
شکل ۴-۱۱: توزیع فضایی مؤلفه‌های چگالی شار در دیسک هیستریزیس در چند لحظه زمانی (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y

مؤلفه‌های محیطی و محوری شدت میدان در دیسک در شکل ۴-۱۲ به تصویر کشیده شده‌اند. مطالب ارائه شده برای چگالی شار دیسک را می‌توان در مورد شدت میدان آن نیز تکرار کرد. به هر حال، بررسی تفاوت موجود در شکل تغییرات این کمیت‌ها، بیانگر وجود یک رابطه شدیداً غیرخطی

بین چگالی شار هر مؤلفه و شدت میدان متناظر آن است. در توزیع مؤلفه محوری شدت میدان در لایه ششم دیسک، یک مجموعه از نوسانات شدید به چشم می‌خورند که این نوسانات از لحاظ فیزیکی واقعی نبوده و ناشی از مشکلات عددی مدل پریساج در چگالی شارهای بسیار کوچک می‌باشد.



(الف)

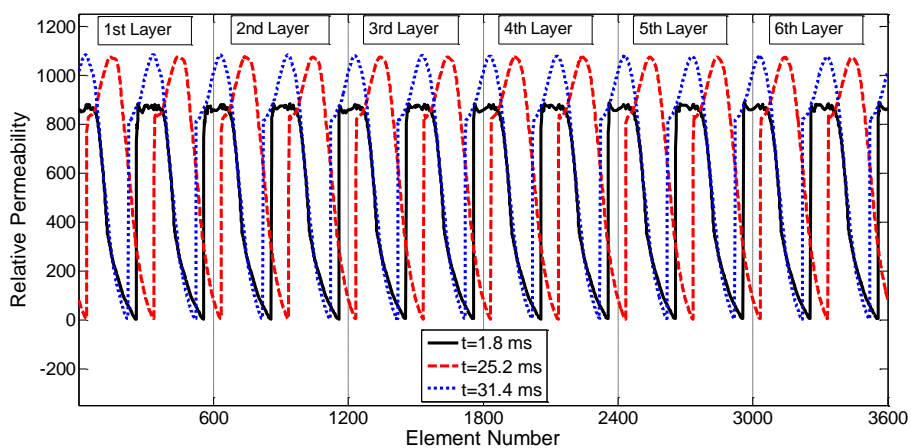


(ب)

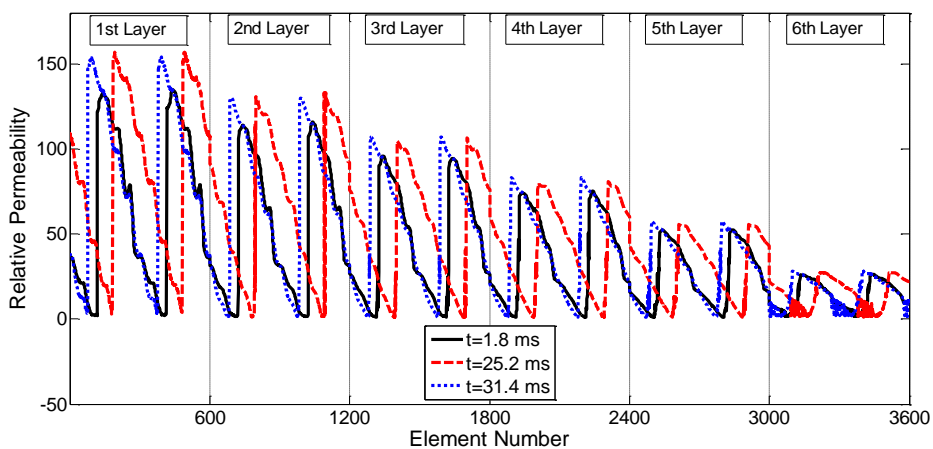
شکل ۴-۱۲: توزیع فضایی مؤلفه‌های شدت میدان در دیسک هیستریزس در چند لحظه زمانی (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y

تغییر پارامترهای نفوذپذیری و چگالی شار پسماند برای المان‌های مختلف، عامل ایجاد تفاوت در شکل توزیع‌های فضایی چگالی شار و شدت میدان در دیسک هیستریزس شده است. توزیع مؤلفه‌های این دو پارامتر به ترتیب در شکل ۴-۱۳ و شکل ۴-۱۴ نشان داده شده‌اند. آنچه از این دو شکل

مشخص می‌شود، محدود بودن دامنه تغییرات این پارامترها می‌باشد. بطور خاص می‌توان به نفوذپذیری اشاره نمود که همواره مثبت بوده و همانند یک موج یکسو شده، در هر لایه تقریباً دو بار تکرار می‌شود.

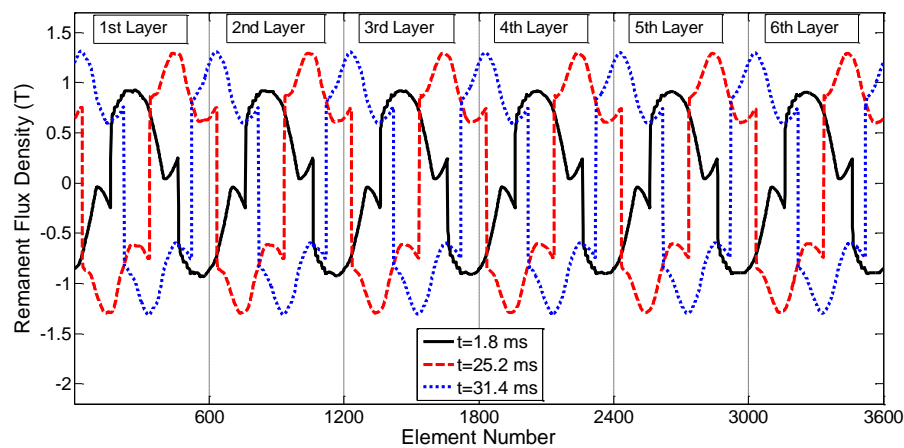


(الف)

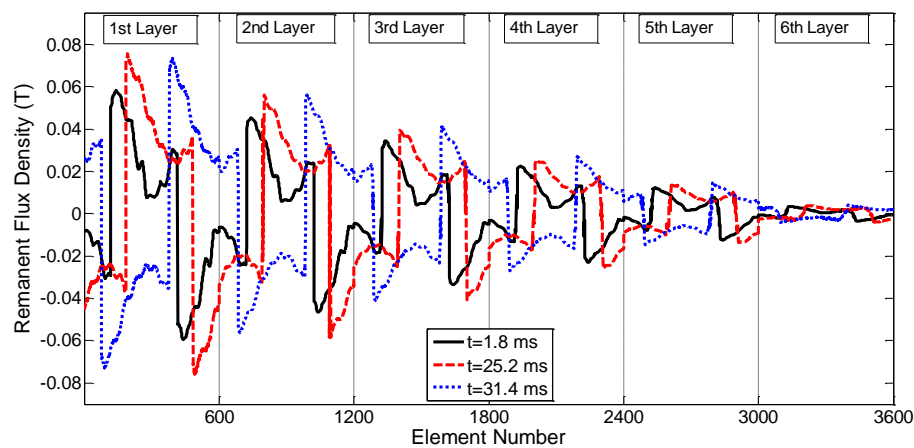


(ب)

شکل ۴-۱۳: توزیع فضایی مؤلفه‌های نفوذپذیری در دیسک هیستریزیس در چند لحظه زمانی (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y



(الف)

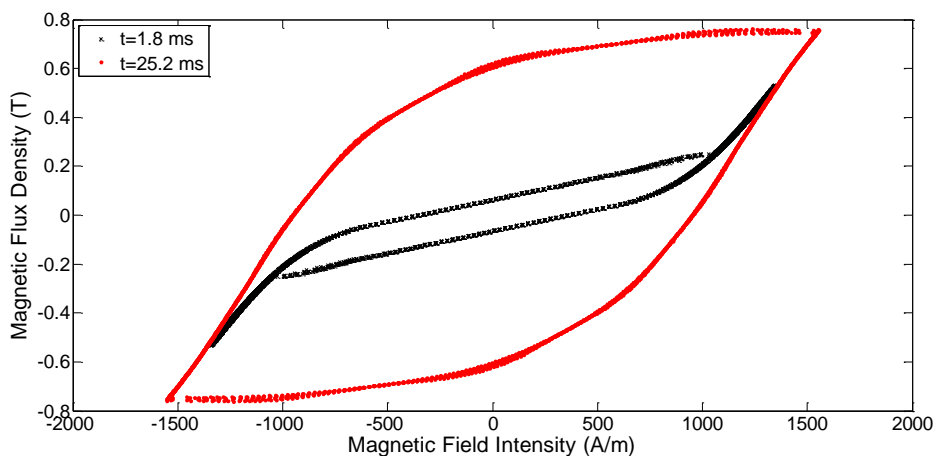


(ب)

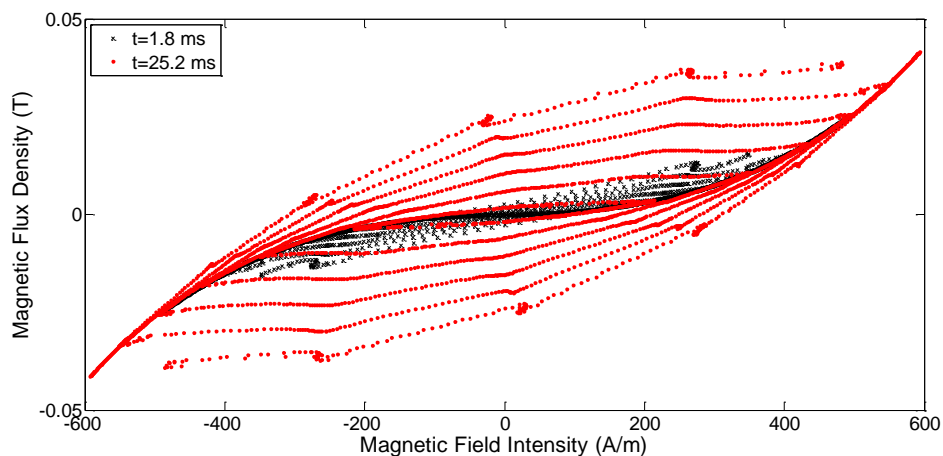
شکل ۴-۱۴: توزیع فضایی مؤلفه‌های چگالی شار پسماند در دیسک هیستریزس در چند لحظه زمانی (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y

اگر برای هر یک از دو مؤلفه میدان در هر یک از المان‌های روتور، زوج مرتب چگالی شار و شدت میدان با یک نقطه در صفحه BH نمایش داده شود، شکل ۴-۱۵ به دست می‌آید. برای پرهیز از درهم‌تنیدگی بیش از حد نقاط، فقط دو لحظه $t_1 = 1.8 \text{ ms}$ ، $t_2 = 25.2 \text{ ms}$ در نظر گرفته شده‌اند. این شکل می‌تواند دو نکته جالب توجه برداشت کرد: (۱) به علت توزیع نرم و تقریباً یکنواخت مؤلفه محیطی میدان در راستای محور، توزیع فضایی BH محیطی در دیسک هیستریزس تقریباً حلقه مانند است. این در حالی است که این توزیع برای مؤلفه محوری بسیار نامنظم‌تر است. (۲) در حالت

دائمی، شکل توزیع فضایی BH محیطی شبیه به حلقه‌های اصلی مشخصه BH ماده سازنده دیسک است. به هر حال، شکل توزیع فضایی BH محیطی در رژیم گذرا منحصر به فرد است.



(الف)

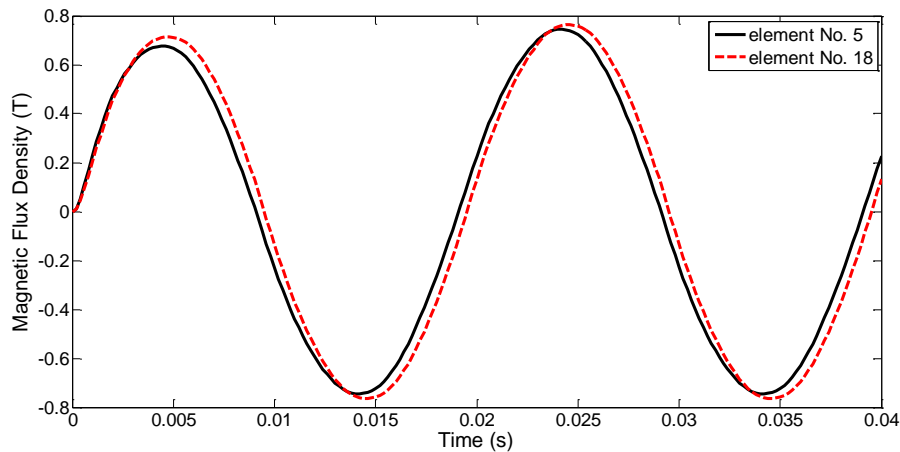


(ب)

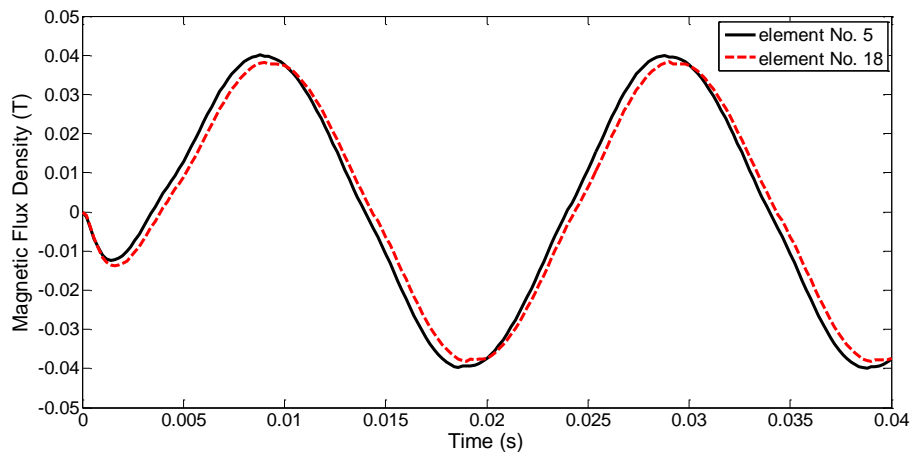
شکل ۴-۱۵: چگالی شار دیسک هیستریزیس بر حسب شدت میدان آن در دو لحظه زمانی (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y

اکنون، به بررسی تغییرات زمانی برخی از کمیت‌ها پرداخته می‌شود. ابتدا با کمیت‌های میدان در دیسک هیستریزیس آغاز می‌کنیم. تغییرات زمانی دو مؤلفه چگالی شار، شدت میدان، نفوذپذیری و چگالی شار پسماند برای دو المان (با شماره‌های ۵ و ۸) به ترتیب در شکل ۴-۱۶، شکل ۴-۱۷، شکل ۴-۱۸ و شکل ۴-۱۹ ارائه شده‌اند. مؤلفه غالب برای همه این کمیت‌ها، مؤلفه محیطی است. همچنین،

تأخیر زمانی میان شکل موج‌های مربوط به دو المان کاملاً مشهود است. نکته جالب توجه که از مقایسه این شکل‌ها با شکل‌های پیش‌مشخص می‌شود آن است که شکل موج تغییرات زمانی یک کمیت در یک المان تا حدودی شبیه به قرینه توزیع فضایی همان کمیت در یک لحظه از زمان است. جابجایی میدان با گذشت زمان موجب بوجود آمدن این شباهت می‌شود.

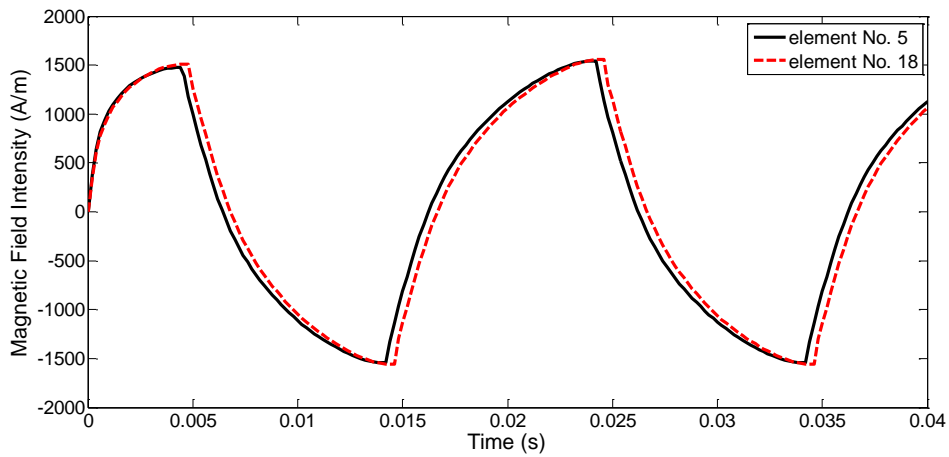


(الف)

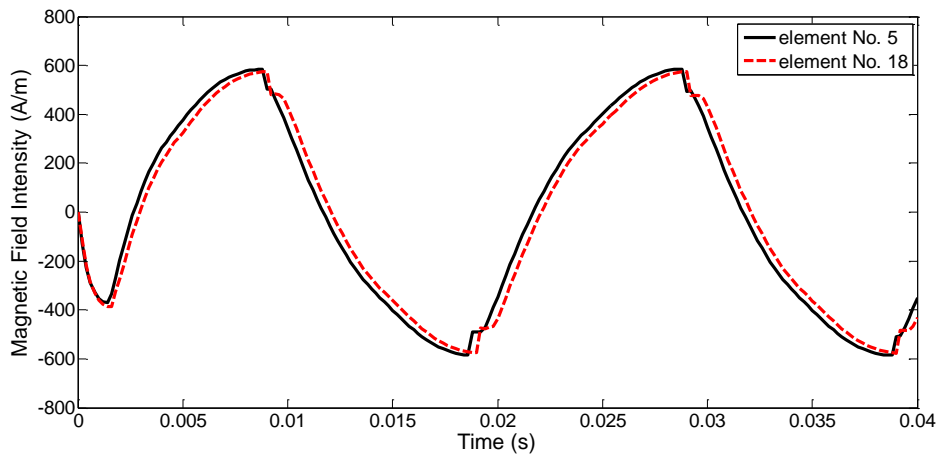


(ب)

شکل ۴-۱۶: تغییرات زمانی چگالی شار در دو المان از دیسک هیستریزیس (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y

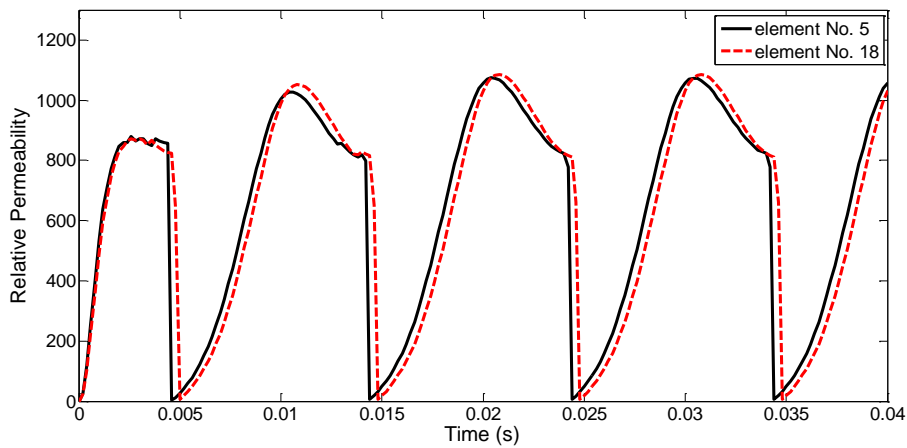


(الف)

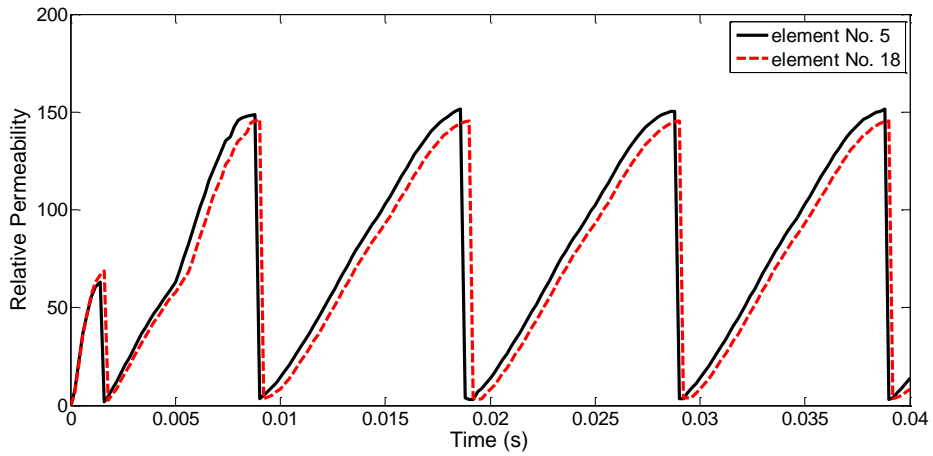


(ب)

شکل ۴-۱۷: تغییرات زمانی شدت میدان در دو المان از دیسک هیستریزیس (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y

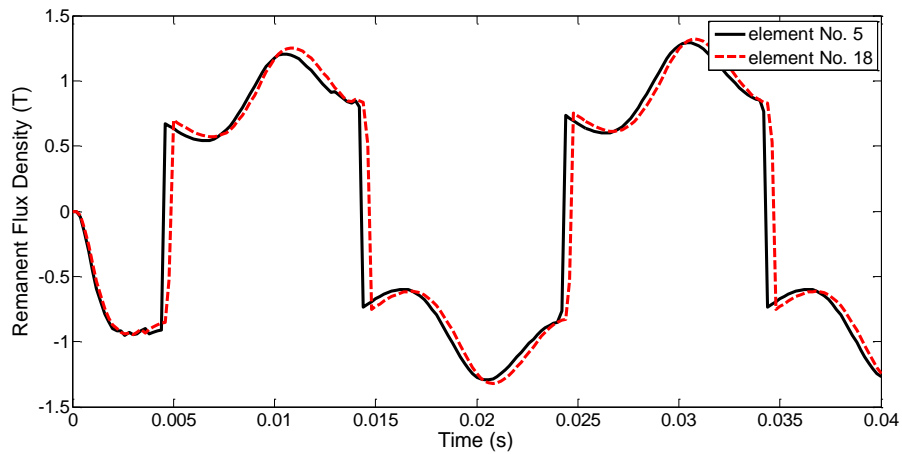


(الف)

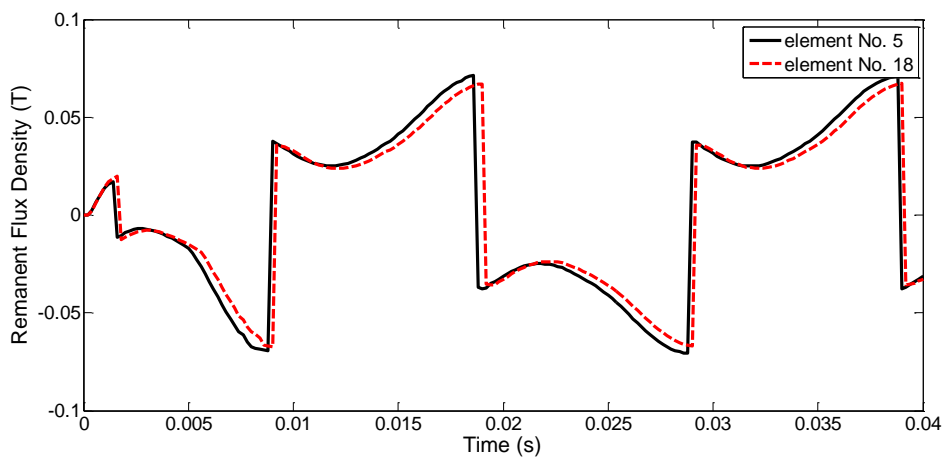


(ب)

شکل ۴-۱۸: تغییرات زمانی نفوذپذیری برای دو المان از دیسک هیستریزس (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y



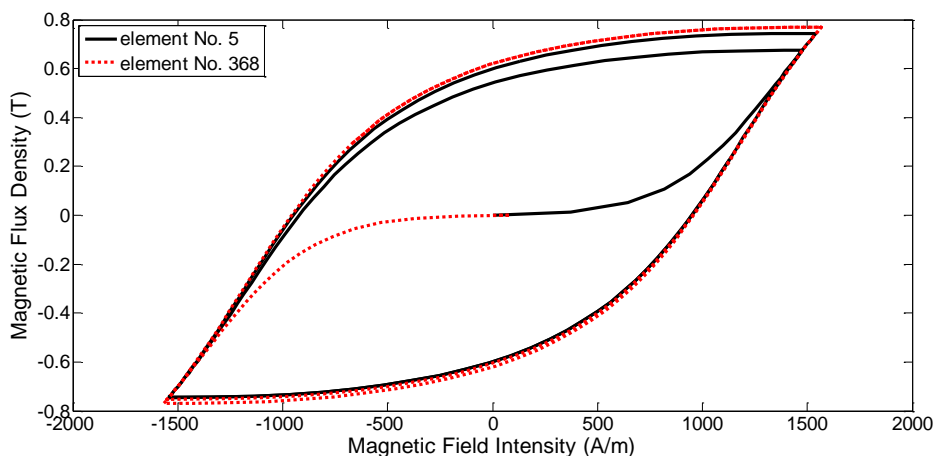
(الف)



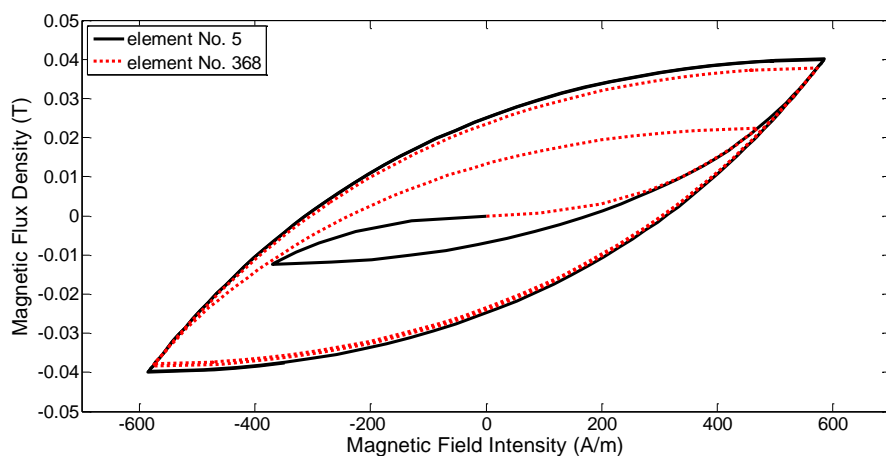
(ب)

شکل ۴-۱۹: تغییرات زمانی چگالی شار پسماند برای دو المان از دیسک هیستریزس (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y

اگر پارامتر زمان بین شکل موج‌های چگالی شار و شدت میدان حذف شود، مشخصه‌های هیستریزیس برای هر المان دیسک به دست می‌آیند. این مشخصه‌ها برای هر دو مؤلفه محیطی و محوری المان‌های با شماره ۵ و ۳۶۸ در شکل ۴-۲۰ به نمایش درآمده‌اند. با توجه به وضعیت اولیه غیرمغناطیسی، هر مشخصه از نقطه $(0,0)$ آغاز می‌شود و با توجه به تغییرات زمانی شدت میدان در المان مربوطه، مسیر خاص خود را طی می‌کند. در حالت دائمی، تمام مشخصه‌ها به شکل حلقه‌های بسته در می‌آیند. به علت عدم وجود دندانه مغناطیسی در استاتور، حلقه‌های فرعی بر روی این مشخصه‌ها ظاهر نمی‌شوند که این موضوع مؤید مزیت استاتورهای بدون شیار و بدون هسته در کاهش تلفات پارازیتیک روتور می‌باشد.



(الف)

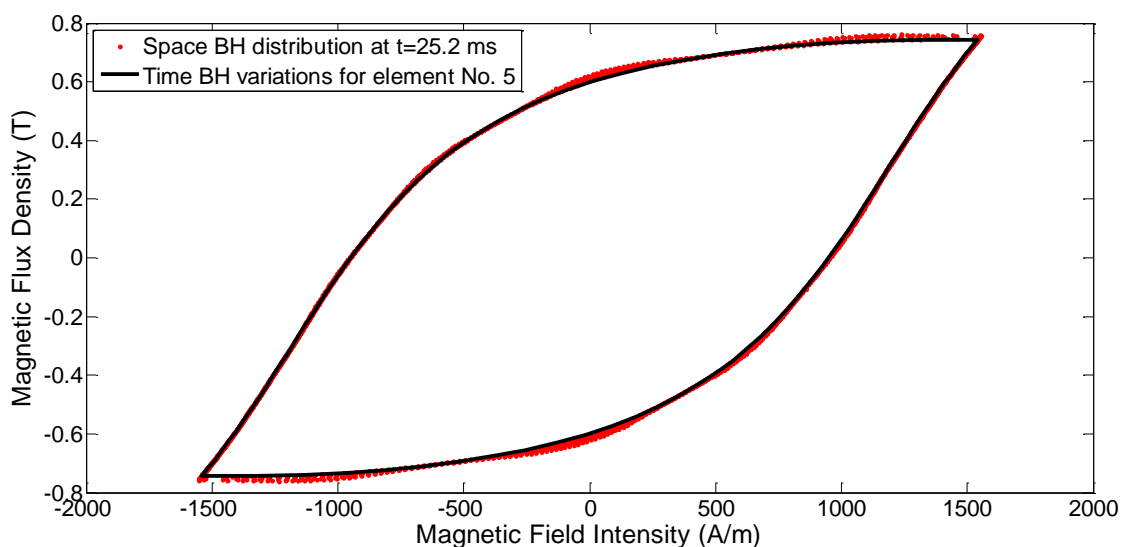


(ب)

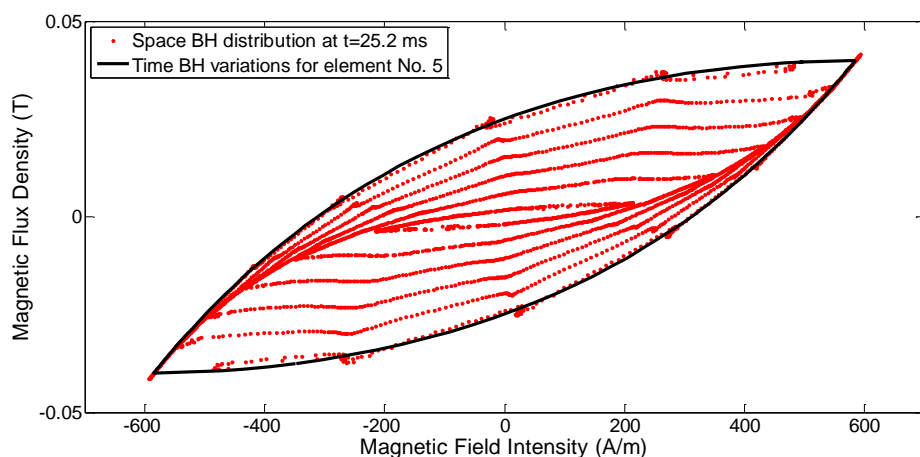
شکل ۴-۲۰: مشخصه‌های هیستریزیس برای دو المان از دیسک (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y

مقایسه مشخصه‌های هیستریزیس حالت دائمی یکی از المان‌های روتور با توزیع‌های فضایی BH در یک لحظه زمانی در دوره حالت دائمی جالب توجه است. این مقایسه توسط شکل ۴-۲۱ به تصویر کشیده شده است. طبق این شکل، مشخصه هیستریزیس مؤلفه محیطی در یک نقطه بسیار شبیه به توزیع فضایی BH محیطی در یک لحظه است. بنابراین، فرض ساده‌کننده روش‌های تقریبی، مبنی بر یکسان گرفتن حلقه‌های کاری روتور با حلقه‌های هیستریزیس اصلی ماده سازنده آن تا حدود زیادی صحیح است. باید توجه داشت که وجود هارمونیک‌های زمانی قابل توجه در جریان‌ها و یا وجود دندانه مغناطیسی در استاتور می‌تواند باعث غیرواقعی شدن این فرض شود.

شکل ۴-۲۱-ب نشان می‌دهد که بحث فوق برای مؤلفه محوری صادق نیست. در واقع مشخصه هیستریزیس محوری در یک نقطه از یک حلقه تشکیل شده است، حال آنکه توزیع فضایی BH محوری در یک لحظه شامل نقاط پراکنده می‌شود. دلیل این موضوع، همان تغییرات شدید مؤلفه محوری میدان دیسک در امتداد محوری می‌باشد. با توجه به اینکه المان شماره ۵ بسیار نزدیک به فاصله هوایی قرار دارد، مؤلفه محوری میدان در این المان مقدار بزرگی دارد. بنابراین، مشخصه هیستریزیس محوری مربوط به این المان شبیه به یک پوش برای توزیع فضایی BH محوری در یک لحظه از زمان می‌باشد.



(الف)



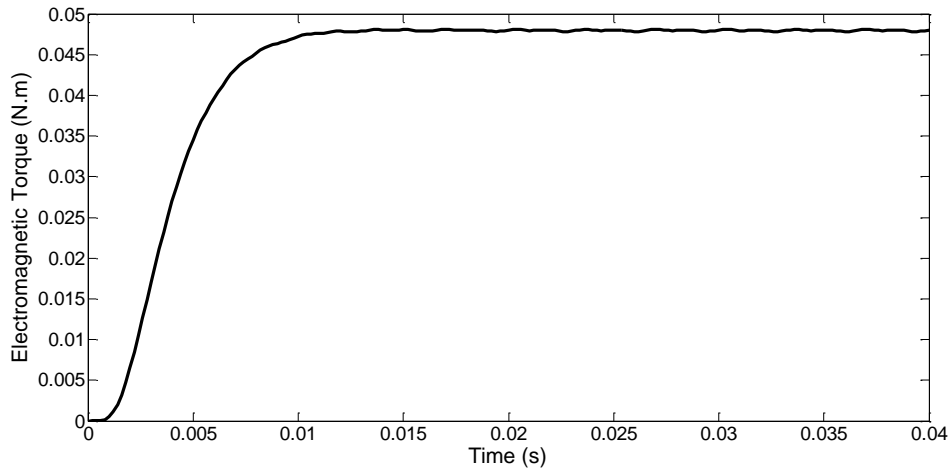
(ب)

شکل ۴-۲۱: مشخصه‌های هیستریزیس برای دو المان از دیسک هیستریزیس (الف) مؤلفه محیطی یا x (ب) مؤلفه محوری یا y

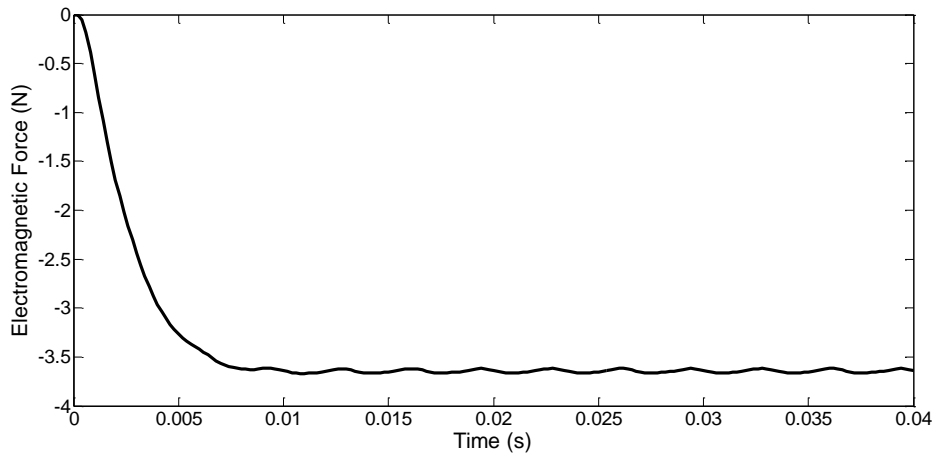
شکل ۴-۲۲ گشتاور لحظه‌ای وارد بر روتور در جهت محیطی را نشان می‌دهد. برای محاسبه این گشتاور، ابتدا مؤلفه x نیروی لحظه‌ای وارد بر دیسک هیستریزیس یک طبقه از مدل اجزاء محدود به دست آمده است. سپس این نیرو در تعداد طبقات (یعنی ۴) و همچنین شعاع متوسط موتور ضرب شده است. نکته مهم آن است که هر دو مؤلفه محیطی و محوری میدان در تولید این گشتاور سهمیم هستند، ولی تفکیک آن‌ها با مدل موجود غیرممکن است. به هر حال، سهم مؤلفه محوری میدان در این گشتاور بسیار ناچیز است. همانطور که مشاهده می‌شود، در دوره گذرا گشتاور از مقدار صفر به تدریج افزایش می‌یابد تا اینکه به شرایط حالت دائمی به حدود 0.05 نیوتن-متر می‌رسد. در شرایط حالت دائمی، نوسانات بسیار کوچکی در گشتاور تولیدی اتفاق می‌افتد که می‌تواند ناشی از هارمونیک‌های زمانی جریان و توزیع سیم‌پیچی باشد.

بررسی نیروی محوری بین دیسک هیستریزیس و استاتور هر طبقه نیز مهم می‌باشد. تغییرات لحظه‌ای این نیرو در شکل ۴-۲۳ ترسیم شده است. با توجه به نحوه ترسیم هندسه مسأله در صفحه $x-y$ (شکل ۴-۵)، علامت منفی نیروی محوری نشان می‌دهد که این نیرو تمایل دارد دیسک هیستریزیس را به سمت استاتور بکشد. اگرچه، نیروی محوری خالص بر استاتورها و دیسک

هیستریزس میانی تقریباً صفر است، اما دیسک‌های بیرونی تحت تأثیر این نیرو قرار دارند.



شکل ۴-۲۲: گشتاور وارد بر روتور در جهت محیطی



شکل ۴-۲۳: نیروی محوری وارد بر دیسک هیستریزس و استاتور هر طبقه از موتور

در پایان به بررسی صحت روش مدلسازی پیشنهادی می‌پردازیم. با توجه به اینکه موتور مورد مطالعه یک سیستم الکتریکی است، رابطه ولتاژ-جریان ترمینال می‌تواند بطور کامل آن را توصیف کند. همانطور که در ابتدای این بخش بیان شد، جریان‌های سه‌فاز مورد استفاده در فرآیند مدلسازی بر اساس جریان اندازه‌گیری شده در ترمینال موتور و در شرایط ورود به سنکرونیزم به دست آمده‌اند.

بنابراین، اگر شکل موج ولتاژ ترمینال به دست آمده از مدل‌سازی بر شکل موج ولتاژ ترمینال اندازه‌گیری شده در شرایط مذکور منطبق باشد، می‌توان ادعا کرد که روش پیشنهادی بطور کامل و دقیق موتور را توصیف کرده است.

اگر جریان ورودی به یک فاز با i_{ph} نشان داده شود، ولتاژ ترمینال آن فاز v_{ph} موتور از رابطه زیر به دست می‌آید

$$v_{ph} = e_{ph} + R_{ph} i_{ph} + L_{le} \frac{di_{ph}}{dt}. \quad (39-4)$$

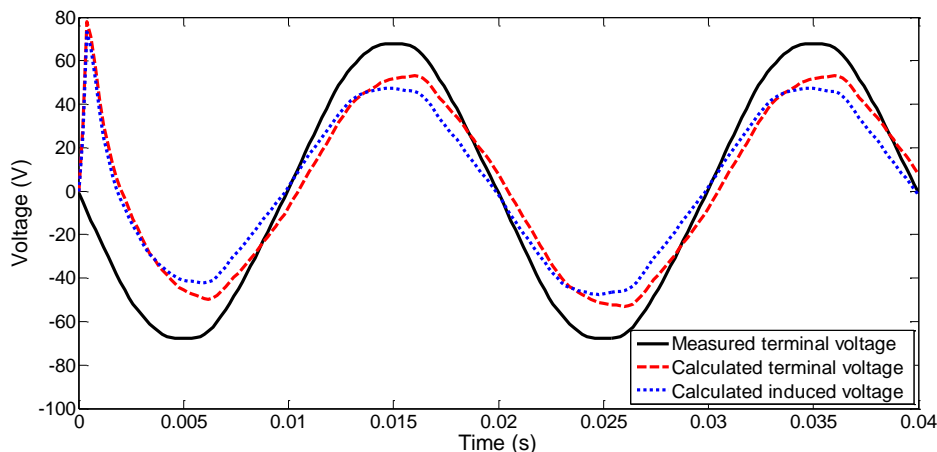
پارامترهای R_{ph} و L_{le} به ترتیب بیانگر مقاومت اهمی سیم‌پیچ هر فاز و راکتانس پراکندگی اتصالات انتهایی هر فاز می‌باشند. شارپیوندی فاز مربوطه نیز با e_{ph} نشان داده می‌شود. برای محاسبه مقدار لحظه‌ای e_{ph} از توزیع پتانسیل برداری به دست آمده در مدل اجزاء محدود استفاده می‌شود. روال کار به این صورت است که ابتدا شار پیوندی λ_c برای هر کلاف N_c دوره از فاز مورد نظر از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\lambda_c = N_c L_r \left[\frac{\int_{S_{c1}} A_z(x, y) ds - \int_{S_{c2}} A_z(x, y) ds}{h_c w_c} \right], \quad (40-4)$$

که در آن A_z مؤلفه z از پتانسیل برداری است، L_r طول شعاعی موتور را نشان می‌دهد و حاصلضرب $h_c w_c$ برابر است با سطح مقطع هر کلاف. انتگرال‌گیری‌های سطحی بر روی S_{c1} و S_{c2} به ترتیب بیانگر انتگرال‌گیری بر روی اضلاع برونسوی و درونسوی کلاف هستند. شار پیوندی فاز از جمع شار پیوندی همه کلاف‌های آن و ضرب حاصل در تعداد طبقات به دست می‌آید. سپس با استفاده از یک مشتق‌گیری عددی، ولتاژ القایی در آن فاز محاسبه می‌شود.

شکل ۴-۲۴ شکل موج ولتاژهای القایی و ترمینال محاسبه شده برای یکی از فازهای موتور را در کنار ولتاژ اندازه‌گیری شده همان فاز نشان می‌دهد. اگرچه اختلاف بین مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده قابل توجه است، اما می‌توان گفت که ولتاژ محاسبه شده، ولتاژ اندازه‌گیری شده را

دنبال می‌کند و در نتیجه صحت روش پیشنهادی قابل تأیید است. علاوه بر دلایل مطرح شده در فصل دوم برای وجود تفاوت بین مقادیر تجربی و محاسباتی، مهم‌ترین دلیل اختلاف این ولتاژها را می‌توان در تقریب توزیع چگالی پریساچ با یک تابع ریاضی (به فصل سوم مراجعه شود) بیان کرد.



شکل ۴-۲۴: تغییرات زمانی ولتاژهای القایی و ترمینال محاسبه شده از مدلسازی اجزاء محدود در کنار ولتاژ ترمینال اندازه‌گیری شده

۴-۵- جمع‌بندی

در این فصل، یک رویکرد جدید برای تزویج مدل پریساچ هیستریزس با مدل اجزاء محدود موتورهای هیستریزس ارائه شد، که اساس آن تقریب خطی مشخصه هیستریزس بین دو لحظه متوالی است. از این تکنیک برای مدلسازی موتور طراحی شده در فصل دوم در یک شرایط عملکردی خاص استفاده شد و صحت آن با استفاده از نتایج آزمایشگاهی تأیید گردید. زمان بر بودن روش مدلسازی ارائه شده مهم‌ترین چالش در بکارگیری آن است. بنابراین، در فصل بعد روش مدلسازی دیگری ارائه خواهد شد که در آن از معادلات انتگرالی حاکم بر موتورهای مورد مطالعه به جای مدل اجزاء محدود آن‌ها بهره گرفته می‌شود.

فصل ۵:

مدلسازی موتورهای هیستریزیس با استفاده

از توصیف انتگرالی آنها

در فصل گذشته، فرایند مدل‌سازی دقیق موتورهای مورد مطالعه به کمک ترکیب روش اجزاء محدود و مدل پریسچ ارائه شد. همانطور که توضیح داده شد، زمان مورد نیاز برای انجام محاسبات در این نوع از مدل‌سازی بسیار طولانی است. بنابراین، یافتن روشی جایگزین که بدون کاهش قابل توجه در دقت، بتواند نتایج مورد نیاز را در زمان کوتاه‌تری فراهم آورد از اهمیت زیادی برخوردار است.

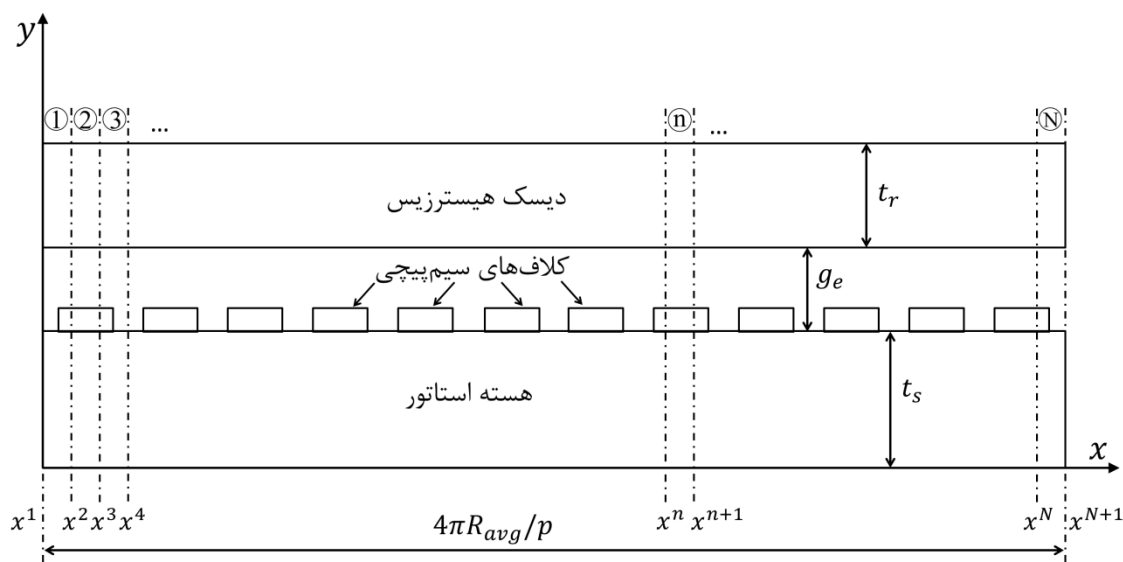
نتایج ارائه شده در فصل قبل مؤید این موضوع است که میدان در اغلب بخش‌های یک موتور هیستریز خوب طراحی شده، یک بعدی است. برای یک موتور بدون شیار شارمحیطی، مولفه غالب میدان در دیسک‌های هیستریز و هسته‌های استاتور از نوع محیطی است، در حالیکه میدان در فضای متشکل از فاصله‌های هوایی و سیم‌پیچ‌ها، تقریباً محوری است. این موضوع در مورد سایر موتورهای بدون شیار و بدون هسته مورد مطالعه نیز صادق است. بنابراین، فرض یک‌بعدی بودن میدان در هر بخش از موتور نمی‌تواند منجر به خطای بزرگی شود. با استفاده از این فرض و به کمک توصیف انتگرالی معادلات حاکم بر موتور می‌توان روش جدیدی برای مدل‌سازی موتورهای هیستریز مورد مطالعه ارائه نمود که نسبت به روش مبتنی بر محاسبات اجزاء محدود بسیار سریع‌تر می‌باشد.

۵-۱- توصیف ریاضی روش

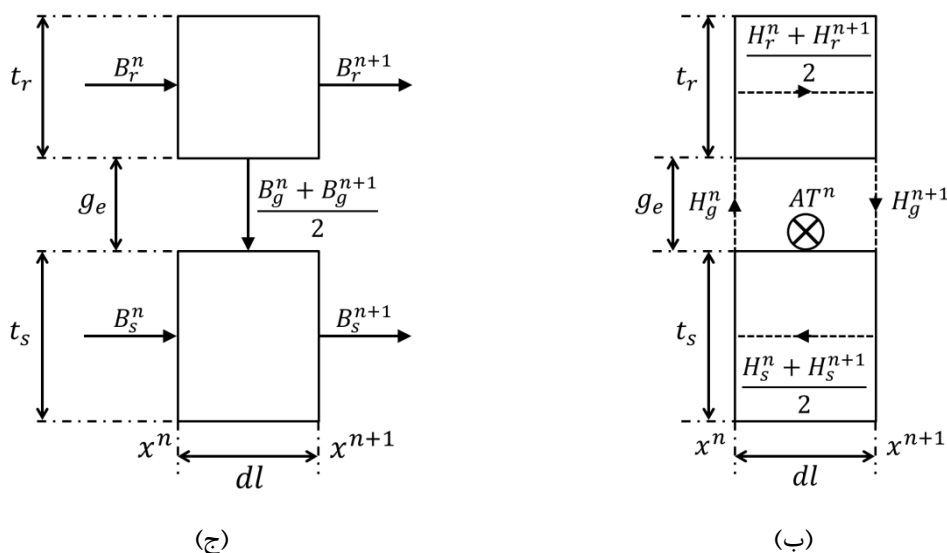
در این بخش، نحوه استخراج معادلات مورد نیاز توضیح داده می‌شود. این فرآیند برای یک موتور بدون شیار شارمحیطی یک طبقه انجام می‌شود. این فرآیند با تغییرات جزئی می‌تواند برای سایر موتورهای مورد مطالعه نیز بکار گرفته شود.

شکل ۵-۱-الف نمای گسترده هندسه واقعی یک جفت قطب از یک موتور هیستریز تخت بدون شیار شارمحیطی را نشان می‌دهد. به منظور سهولت بیشتر، از دستگاه مختصات دکارتی استفاده شده است. در این صورت، محور x بیانگر راستای محیطی و محور y بیانگر راستای محوری می‌باشد. جهت مثبت محور x به عنوان جهت مثبت میدان در دیسک هیستریز و هسته استاتور فرض

می‌شود. طبق قرارداد، میدان مثبت در حد فاصل بین هسته استاتور و دیسک هیستریزیس (فاصله هوایی و سیم‌پیچ‌ها) از سمت روتور به سمت استاتور، یعنی در خلاف جهت محور y ، در نظر گرفته می‌شود. همچنین، فرض می‌شود که اندازه میدان در هر بخش از موتور فقط با تغییر x تغییر می‌کند و نسبت به y ثابت است.



(الف)



(ج)

(ب)

شکل ۵-۱: نمای گسترده یک موتور بدون شیار شارمحیطی در شعاع متوسط آن (الف) نحوه تقسیم‌بندی هندسه به بخش‌های متعدد (ب) نحوه اعمال فرم انتگرالی قانون مداری آمپر (ج) نحوه اعمال فرم انتگرالی قانون گاوس

همانطور که در شکل ۵-۱-الف نشان داده شده است، موتور در راستای x به N بخش تقسیم شده است. بخش n ام بین x^n و x^{n+1} قرار گرفته است. بطور دلخواه، x^1 برابر با صفر انتخاب شده است. بر این اساس کمیت‌های H_r^n ، H_g^n و H_s^n در موقعیت x^n به ترتیب به عنوان شدت میدان مغناطیسی در دیسک هیستریزیس، فاصله هوایی و هسته استاتور تعریف می‌شوند. بطور مشابه، B_r^n ، B_s^n و B_g^n در موقعیت x^n به ترتیب بیانگر چگالی شار مغناطیسی در دیسک هیستریزیس، فاصله هوایی و هسته استاتور می‌باشند. به دلیل تقارن زوج قطب، تمامی کمیت‌های میدان در موقعیت x^{N+1} برابر با مقادیر متناظرشان در موقعیت x^1 خواهند بود.

در شکل ۵-۱-ب یک مسیر بسته برای اعمال قانون مداری آمپر در بخش n ام موتور به نمایش در آمده است. کمیت AT^n بیانگر آمپر دوری است که در بخش n ام قرار دارد. این کمیت که جهت مثبت آن درونسو است، با توجه به مشخصات سیم‌پیچ و جریان لحظه‌ای در هر یک از فازها مشخص می‌شود. لازم به ذکر است که بر خلاف روش‌های مبتنی بر تقریب حلقه هیستریزیس، در اینجا لزومی به فرض توابع سینوسی خالص برای توزیع فضایی سیم‌پیچ و تغییرات زمانی جریان‌ها وجود ندارد. با اعمال قانون مداری آمپر به هر یک از n بخش، یک مجموعه معادلات به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned}
 AT^1 &= dl \left[\frac{H_r^1 + H_r^2}{2} - \frac{H_s^1 + H_s^2}{2} \right] + g_e (H_g^2 - H_g^1), \\
 &\vdots \\
 AT^n &= dl \left[\frac{H_r^n + H_r^{n+1}}{2} - \frac{H_s^n + H_s^{n+1}}{2} \right] + g_e (H_g^{n+1} - H_g^n), \\
 &\vdots \\
 AT^N &= dl \left[\frac{H_r^N + H_r^1}{2} - \frac{H_s^N + H_s^1}{2} \right] + g_e (H_g^1 - H_g^N).
 \end{aligned} \tag{۱-۵}$$

در این معادلات، g_e طول مؤثر فاصله هوایی (شامل فاصله هوایی فیزیکی و ضخامت کلاف‌ها) و dl عرض هر بخش است. به منظور سادگی بیشتر، dl برای همه بخش‌ها یکسان در نظر گرفته شده است.

شکل ۵-۱-ج نحوه اعمال قانون گاوس به بخش n ام موتور را نشان می‌دهد. با اعمال این قانون

به همه بخش‌ها، می‌توان نشان داد

$$\begin{aligned} B_g^1 + B_g^2 &= \frac{2t_r}{dl} (B_r^1 - B_r^2), \\ &\vdots \\ B_g^n + B_g^{n+1} &= \frac{2t_r}{dl} (B_r^n - B_r^{n+1}), \\ &\vdots \\ B_g^N + B_g^1 &= \frac{2t_r}{dl} (B_r^N - B_r^1). \end{aligned} \quad (۲-۵)$$

همچنین خواهیم داشت

$$\begin{aligned} B_s^2 - B_s^1 &= \frac{t_r}{t_s} (B_r^1 - B_r^2), \\ &\vdots \\ B_s^{n+1} - B_s^n &= \frac{t_r}{t_s} (B_r^n - B_r^{n+1}), \\ &\vdots \\ B_s^1 - B_s^N &= \frac{t_r}{t_s} (B_r^N - B_r^1). \end{aligned} \quad (۳-۵)$$

در مجموعه معادلات (۲-۵) و (۳-۵)، t_r و t_s به ترتیب نشان‌دهنده ضخامت دیسک هیستریزس و هسته استاتور هستند.

با تعریف بردارهای $\bar{B}_g = [B_g^1 \ \dots \ B_g^n \ \dots \ B_g^N]^T$ ، $\bar{B}_r = [B_r^1 \ \dots \ B_r^n \ \dots \ B_r^N]^T$ و

$\bar{B}_s = [B_s^1 \ \dots \ B_s^n \ \dots \ B_s^N]^T$ ، می‌توان معادلات (۲-۵) و (۳-۵) را به فرم فشرده زیر بازنویسی

نمود

$$\bar{B}_g = \frac{2t_r}{dl} [C]^{-1} [D] \bar{B}_r, \quad (۴-۵)$$

$$\bar{B}_s = -\frac{t_r}{t_s} \bar{B}_r, \quad (۵-۵)$$

که $[C]$ و $[D]$ دو ماتریس $N \times N$ هستند و درایه‌های آن‌ها، که به ترتیب با c_{ij} و d_{ij} نشان داده

می‌شوند، عبارتند از:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 & j = i \\ 1 & j = i + 1, i < N \\ 1 & j = 1, i = N \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}, \quad (6-5)$$

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 & j = i \\ -1 & j = i + 1, i < N \\ -1 & j = 1, i = N \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}. \quad (7-5)$$

ماتریس $[C]$ فقط به ازای N های فرد معکوس پذیر است که در این صورت، $[E] = [C]^{-1}[D]$ قابل تعریف است. عنصر e_{ij} از این ماتریس صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$e_{ij} = \begin{cases} 0 & j = i \\ (-1)^{i+j} & j > i \\ (-1)^{i+j+1} & j < i \end{cases}. \quad (8-5)$$

بردارهای $\bar{H}_s = [H_s^1 \ \dots \ H_s^n \ \dots \ H_s^N]^T$ و $\bar{H}_g = [H_g^1 \ \dots \ H_g^n \ \dots \ H_g^N]^T$ به

ترتیب مرتبط با \bar{B}_g و \bar{B}_s هستند. از آنجا که طبق روابط (4-5) و (5-5)، \bar{B}_s و \bar{B}_g وابسته به \bar{B}_r می‌باشند، می‌توان \bar{H}_s و \bar{H}_g را نیز به صورت زیر بر حسب \bar{B}_r بیان نمود:

$$\bar{H}_g = \frac{\bar{B}_g}{\mu_0} = \frac{2t_r}{\mu_0 dl} [E] \bar{B}_r, \quad (9-5)$$

$$\bar{H}_s = [\text{MS}]^{-1} \bar{B}_s = -\frac{t_r}{t_s} [\text{MS}]^{-1} \bar{B}_r, \quad (10-5)$$

که در این روابط μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی خلأ است و ماتریس $[\text{MS}]^{-1}$ عکس ماتریس نفوذپذیری هسته استاتور نامیده می‌شود. عنصر μs_{ij} از این ماتریس عبارت است از

$$\mu s_{ij} = \begin{cases} 1/\mu_s^i & j = i \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}. \quad (11-5)$$

پارامتر μ_s^i در (11-5)، که تابعی از اندازه B_s^i می‌باشد، بیانگر نفوذپذیری مغناطیسی استاتور در

موقعیت x^i است. بر این اساس، بردار $\bar{\mu}_s = [\mu_s^1 \ \dots \ \mu_s^n \ \dots \ \mu_s^N]^T$ قابل تعریف می‌باشد.

اگر بین هر دو لحظه متوالی دلخواه و به ازای هر n ، رابطه B_r^n و H_r^n را با یک خط تقریب

بزنیم، می‌توان نوشت

$$B_r^n = \mu_r^n H_r^n + b_r^n. \quad (12-5)$$

در این رابطه، پارامترهای μ_r^n و b_r^n به ترتیب نفوذپذیری دیسک هیستریزس و چگالی شار پسماند آن

در موقعیت x^n نامیده می‌شوند. همچنین، بردارهای $\bar{H}_r = [H_r^1 \ \dots \ H_r^n \ \dots \ H_r^N]^T$ ،

$$\bar{\mu}_r = [\mu_r^1 \ \dots \ \mu_r^n \ \dots \ \mu_r^N]^T \text{ و } \bar{b}_r = [b_r^1 \ \dots \ b_r^n \ \dots \ b_r^N]^T \text{ تعریف می‌گردند.}$$

اگر (12-5) در روابط (9-5) و (10-5) جایگزین شود، \bar{H}_s و \bar{H}_g بر حسب \bar{H}_r قابل بیان خواهند

بود. از جایگزین کردن نتایج به دست آمده در (1-5) و با کمی محاسبات جبری، یک دستگاه معادلات

خطی به دست می‌آید که متغیرهای مجهول آن فقط عناصر بردار \bar{H}_r هستند. بنابراین، این دستگاه

معادلات را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$[P]\bar{H}_r = \bar{q}, \quad (13-5)$$

که $[P]$ ماتریس ضرایب و \bar{q} بردار معلوم دستگاه معادلات هستند. همانطور که بیان شد، بردار

مجهول دستگاه است. عنصر p_{ij} از ماتریس $[P]$ و عنصر q_i از بردار \bar{q} عبارتند از:

$$p_{ij} = \begin{cases} (-1)^{i+j} \frac{4g_e t_r \mu_r^j}{\mu_0 dl} & j < i \\ \frac{2g_e t_r \mu_r^j}{\mu_0 dl} + \frac{dl}{2} \left(1 + \frac{t_r \mu_r^j dl}{t_s \mu_s^j} \right) & j = i \text{ or } j = i + 1, \\ (-1)^{i+j+1} \frac{4g_e t_r \mu_r^j}{\mu_0 dl} & j > i + 1 \end{cases} \quad (14-5)$$

$$q_i = AT^i - \frac{t_r dl}{2t_s} \left(\frac{b_r^i}{\mu_s^i} + \frac{b_r^{i+1}}{\mu_s^{i+1}} \right) - \frac{4g_e t_r}{\mu_0 dl} \left(\frac{b_r^i}{2} + \frac{b_r^{i+1}}{2} + \sum_{j=1}^{i-1} [(-1)^{i+j} b_r^j] + \sum_{j=i+2}^N [(-1)^{i+j+1} b_r^j] \right). \quad (15-5)$$

پس از محاسبه \bar{H}_r ، \bar{B}_r از (۵-۱۲) و نیز \bar{B}_g از (۵-۴) به دست می‌آیند. با داشتن \bar{B}_g ، توزیع چگالی شار در فاصله هوایی، B_{ag} ، به صورت تابعی از x مشخص می‌شود. در نتیجه ولتاژ القایی در هر فاز به کمک فرم انتگرالی قانون القای ولتاژ فارادی قابل محاسبه است. شار پیوندی λ_c برای یک کلاف دلخواه که ضلع برونسوی آن در موقعیت x_{c1} و ضلع درونسوی آن در موقعیت x_{c2} قرار دارد، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\lambda_c = N_c L_r \int_{x=x_{c1}}^{x=x_{c2}} B_{ag}(x) dx, \quad (۵-۱۶)$$

که N_c تعداد دور کلاف و L_r طول شعاعی موتور است. شار پیوندی هر فاز λ_{ph} از جمع جبری شار پیوندی همه کلاف‌های آن تعیین می‌شود. در نتیجه، ولتاژ القایی لحظه‌ای در آن فاز e_{ph} با مشتق‌گیری از شار پیوندی آن نسبت به زمان محاسبه می‌شود:

$$e_{ph} = \frac{d\lambda_{ph}}{dt}. \quad (۵-۱۷)$$

ولتاژ ترمینال لحظه‌ای فاز مورد نظر، v_{ph} ، نیز برابر خواهد بود با

$$v_{ph} = e_{ph} + R_{ph} i_{ph} + (L_{lg} + L_{le}) \frac{di_{ph}}{dt}. \quad (۵-۱۸)$$

پارامترهای R_{ph} ، L_{lg} و L_{le} به ترتیب عبارتند از مقاوت اهمی فاز، راکتانس پراکندگی فاصله هوایی فاز و راکتانس پراکندگی اتصالات انتهایی فاز. جریان لحظه‌ای فاز نیز با i_{ph} نشان داده می‌شود. باید توجه داشت که مشتق‌گیری‌های موجود در روابط (۵-۱۷) و (۵-۱۸) باید به روش‌های عددی انجام شود.

همانطور که روابط (۵-۱۴) و (۵-۱۵) به خوبی نشان می‌دهند، برای محاسبه بردار \bar{H}_r در هر لحظه از زمان لازم است بردارهای $\bar{\mu}_r$ ، \bar{b}_r و $\bar{\mu}_s$ در آن لحظه مشخص باشند. به دلیل وجود پدیده هیستریز، بردارهای $\bar{\mu}_r$ و \bar{b}_r به مقدار فعلی \bar{H}_r ، که خود آن مجهول است، و تغییرات زمانی گذشته آن وابسته است. همچنین، $\bar{\mu}_s$ به علت غیرخطی بودن مشخصه مغناطیسی هسته استاتور به

\bar{B}_s وابسته است. از آنجاکه \bar{B}_s بر حسب \bar{H}_r قابل بیان است (روابط (۵-۱۲) و (۵-۵))، $\bar{\mu}_s$ نیز وابسته به \bar{H}_r است. با توجه به این توضیحات، حل دستگاه (۵-۱۳) نیازمند بکارگیری یک روش تکراری است که در بخش بعد توضیح داده خواهد شد.

۵-۲- پیاده‌سازی روش

در این فصل، معادلات حاکم بر موتور به وسیله توصیف انتگرالی از قوانین ماکسول به دست آمده‌اند. این در حالی است که در فصل قبل، از فرم نقطه‌ای یا دیفرانسیلی معادلات ماکسول استفاده شد که به کمک روش اجزاء محدود قابل حل هستند. این موضوع تفاوت اصلی دو روش پیشنهادی است. با این حال، همان رویکرد فصل گذشته برای تزویج مدل پریساج با معادلات حاکم بر موتور می‌تواند در این فصل نیز مورد استفاده قرار گیرد.

مراحل الگوریتم پیاده‌سازی روش پیشنهادی را می‌توان به صورت زیر ارائه نمود:

گام ۱ یک جفت قطب از یک طبقه از موتور مورد نظر انتخاب می‌شود و نمای گسترده آن در شعاع متوسط در نظر گرفته می‌شود (مطابق شکل ۵-۱-الف).

گام ۲ موتور در راستای محور x توسط $N+1$ برش به N بخش تقسیم می‌شود (N الزاماً باید یک عدد فرد باشد).

گام ۳ برای هر یک از نقاط شماره ۱ تا N در دیسک هیستریزس، یک بلوک پریساج مجزا در نظر گرفته می‌شود که حافظه اولیه همگی آن‌ها در وضعیت غیرمغناطیسی قرار داده شده است (با توجه به تقارن زوج قطب، نقطه $N+1$ شرایط یکسانی با نقطه ۱ دارد و لذا در نظر گرفته نمی‌شود).

گام ۴ در شرایط اولیه، مقدار همه جریان‌ها و کمیت‌های میدان برابر با صفر قرار داده می‌شود.

گام ۵ لحظه زمانی اول انتخاب می‌شود ($m_t = 1$).

گام ۶ جریان‌ها در لحظه زمانی مورد نظر خوانده می‌شوند.

گام ۷ بر اساس نحوه سیم‌پیچی استاتور، مشخصات آن و نیز مقادیر لحظه‌ای جریان‌ها، آمپر دور هر یک از بخش‌ها (AT^n , $n = 1, 2, \dots, N$) محاسبه می‌شود.

گام ۸ برای هر نقطه شماره n در دیسک هیستریزیس، یک مقدار اولیه برای نفوذپذیری μ_r^n و یک مقدار اولیه برای چگالی شار پسماند b_r^n انتخاب می‌شود. همچنین، برای هر نقطه شماره n در هسته استاتور، یک مقدار اولیه برای نفوذپذیری μ_s^n انتخاب می‌شود. برای لحظه زمانی اول، همه b_r^n ‌ها برابر با صفر منظور می‌شوند و μ_r^n ‌ها و μ_s^n ‌ها به ترتیب بر حسب شیب اولیه منحنی‌های مغناطیس‌شوندگی دیسک هیستریزیس و هسته استاتور در نظر گرفته می‌شوند. برای لحظات زمانی دوم به بعد، مقادیر اولیه همه این پارامترها بر اساس مقدار محاسبه شده متناظر آن‌ها در لحظه زمانی قبل انتخاب می‌شوند.

گام ۹ ماتریس ضرایب $[P]$ و بردار معلوم \bar{q} طبق روابط (۵-۱۴) و (۵-۱۵) تشکیل می‌شوند.

گام ۱۰ بردار مجهول \bar{H}_r از حل دستگاه معادلات خطی (۵-۱۳) به دست می‌آید.

گام ۱۱ بردارهای \bar{B}_r ، \bar{B}_s و \bar{H}_s به ترتیب با استفاده از معادلات (۵-۱۲)، (۵-۵) و (۵-۱۰) محاسبه می‌شوند.

گام ۱۲ برای هر نقطه شماره n ، H_r^n محاسبه شده به عنوان ورودی بلوک پریساج آن نقطه در نظر گرفته می‌شود و چگالی شار خروجی آن بلوک پریساج، به صورت $B_{r,pr}^n$ نامگذاری می‌شود.

گام ۱۳ برای هر نقطه شماره n ، با استفاده از یک درونیابی بر روی منحنی مغناطیس‌شوندگی هسته استاتور، چگالی شار متناظر با H_s^n محاسبه شده و با عنوان $B_{s,in}^n$ نامگذاری می‌شود.

گام ۱۴ برای هر نقطه شماره n ، دو خطای نسبی erB_r^n و erB_s^n به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$erB_r^n = \frac{|B_{r,pr}^n - B_r^n|}{\varepsilon + |B_{r,pr}^n|} \quad (۱۹-۵)$$

$$erB_s^n = \frac{|B_{s,in}^n - B_s^n|}{\varepsilon + |B_{s,in}^n|} \quad (۲۰-۵)$$

که ε یک عدد مثبت بسیار کوچک است و برای جلوگیری از نامحدود شدن خطاها به ازای چگالی شارهای نزدیک به صفر بکار می‌رود.

گام ۱۵ اگر $\max_{n=1,2,\dots,N}(erB_s^n) \leq \varepsilon_s$ و $\max_{n=1,2,\dots,N}(erB_r^n) \leq \varepsilon_r$ که ε_s و ε_r مقادیر حداکثر خطای مجاز در

روتور و استاتور هستند، روش حل در لحظه زمانی فعلی به جواب درست همگرا شده است. در این صورت نتایج ذخیره می‌شوند. همچنین، حافظه‌های بلوک‌های پریساج به روز می‌شوند. اگر لحظه زمانی پایانی فرا رسیده باشد، برنامه به پایان می‌رسد و اگر لحظه زمانی پایانی فرا نرسیده باشد، به m_t یک واحد اضافه می‌شود ($m_t = m_t + 1$) و برنامه به گام ۶ منتقل می‌شود. در صورتی که $\max_{n=1,2,\dots,N}(erB_s^n) > \varepsilon_s$ یا $\max_{n=1,2,\dots,N}(erB_r^n) > \varepsilon_r$ ، برنامه وارد گام بعد می‌شود.

گام ۱۶ پارامترهای $\mu_{r,pr}^n$ ، $b_{r,pr}^n$ و $\mu_{s,in}^n$ به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\mu_{r,pr}^n = \frac{B_{r,pr}^n - B_r^n(m_t - 1)}{H_r^n - H_r^n(m_t - 1)} \quad (21-5)$$

$$b_{r,pr}^n = B_{r,pr}^n - \mu_{r,pr}^n H_r^n \quad (22-5)$$

$$\mu_{s,in}^n = \frac{B_{s,in}^n}{H_s^n} \quad (23-5)$$

که $B_r^n(m_t - 1)$ و $H_r^n(m_t - 1)$ به ترتیب بیانگر مقادیر B_r^n و H_r^n در لحظه زمانی قبل هستند.

گام ۱۷ مقادیر پارامترهای μ_r^n ، b_r^n و μ_s^n از طریق روابط زیر اصلاح می‌شوند

$$\mu_r^n = \mu_r^n + K_r(\mu_{r,pr}^n - \mu_r^n) \quad (24-5)$$

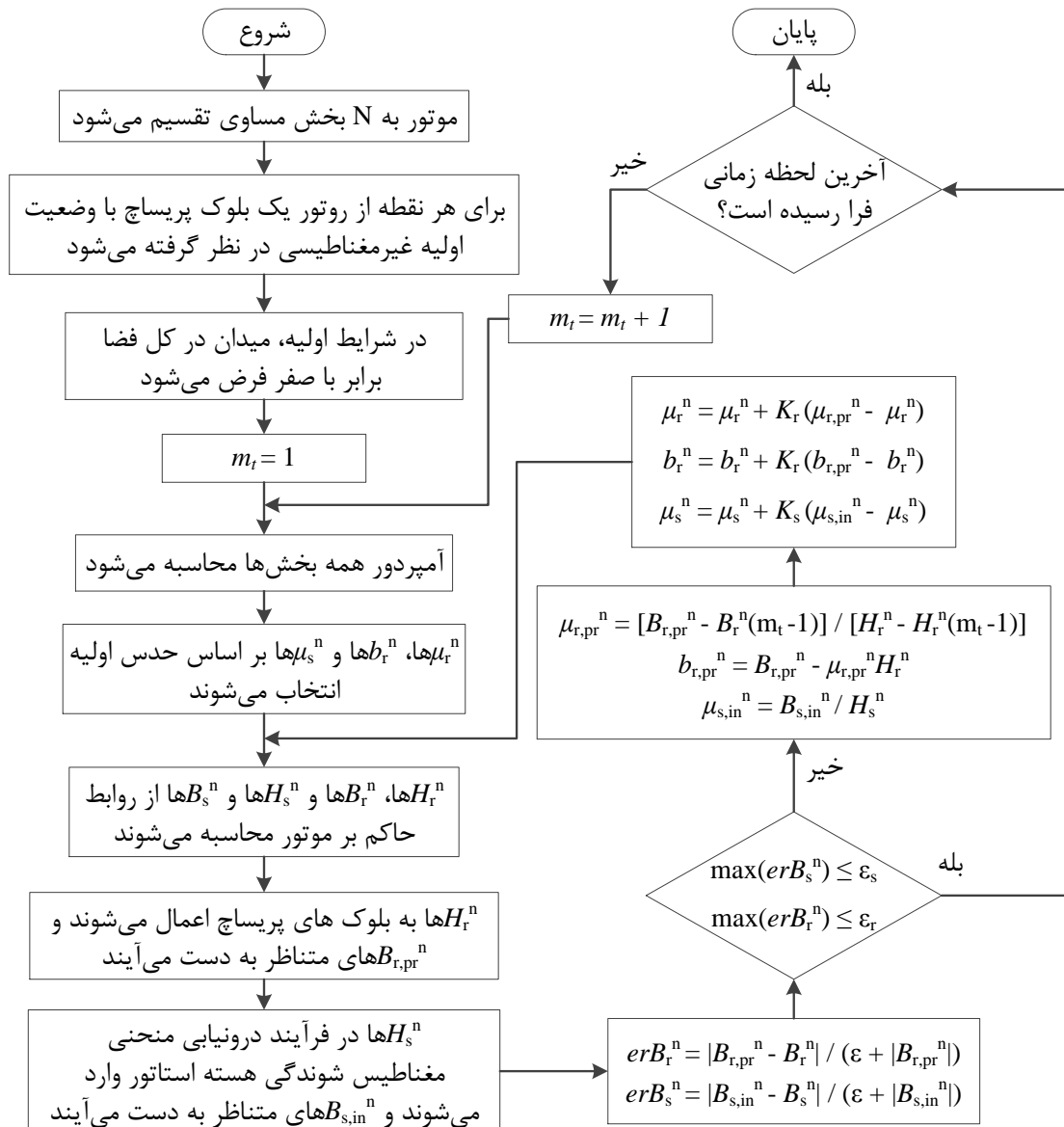
$$b_r^n = b_r^n + K_r(b_{r,pr}^n - b_r^n) \quad (25-5)$$

$$\mu_s^n = \mu_s^n + K_s(\mu_{s,in}^n - \mu_s^n) \quad (26-5)$$

که K_r و K_s دو ضریب مثبت کوچکتر از یک هستند. سپس، برنامه به گام ۹ منتقل می‌شود.

فلوچارت نشان داده شده در شکل ۵-۲، خلاصه‌ای از الگوریتم پیاده‌سازی را بطور گرافیکی ارائه

می‌دهد.



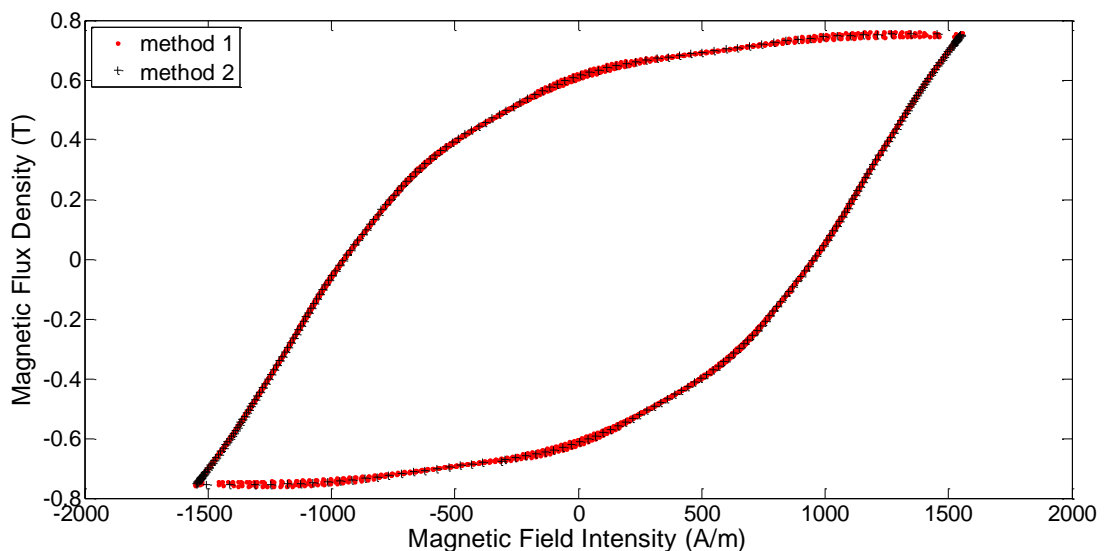
شکل ۵-۲: فلوجارت الگوریتم پیاده‌سازی روش مدل‌سازی جدید

۵-۳- نتایج مدل‌سازی

روش مدل‌سازی پیشنهادی در این فصل به مسئله فصل قبل اعمال می‌شود. شبیه‌سازی در همان شرایط و با همان سخت‌افزار انجام می‌شود. زمان سپری شده برای انجام محاسبات برابر با ۸۱۴/۲۲ ثانیه (کمتر از ۱۴ دقیقه) است که نسبت به روش فصل قبل، بطور قابل توجهی کمتر است.

شکل ۵-۳ توزیع فضایی (H, B) محیطی در دیسک هیستریزیس را برای یک لحظه زمانی خاص

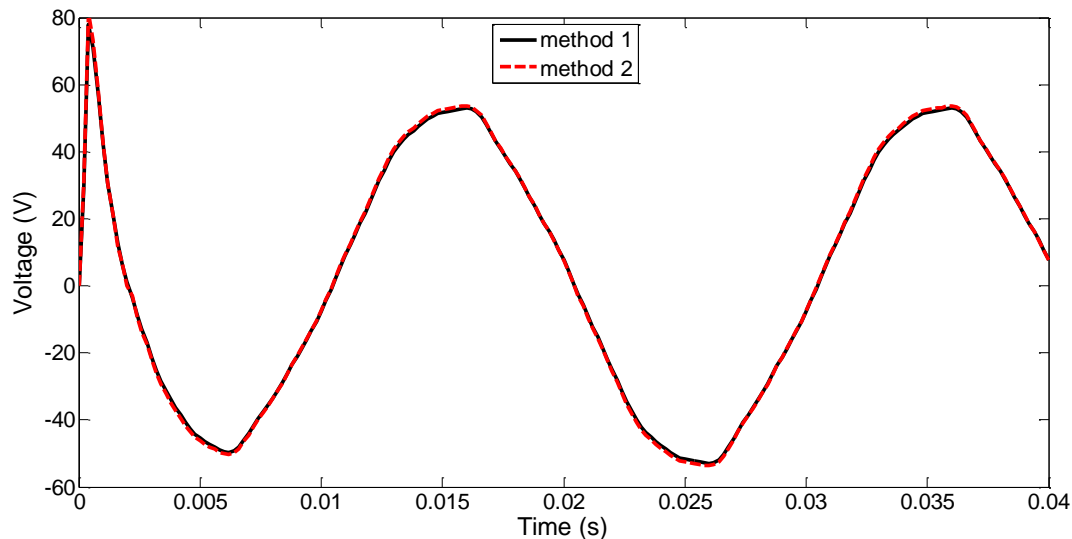
نشان می‌دهد. نتایج دو روش در این شکل آورده شده است. روش فصل قبل (اجزاء محدود) با عنوان روش ۱ همان است و روش جدید (معادلات انتگرالی) با عنوان روش ۲ مشخص شده‌اند. همان‌طور که شکل ۳-۵ نشان می‌دهد، توزیع فضایی حاصل از روش ۲ به خوبی بر نتایج روش ۱ منطبق است. البته، پراکندگی نقاط در روش ۱ بیشتر است. دلیل این پراکندگی آن است که در مدل اجزاء محدود دیسک هیستریزس شش لایه از المان‌ها در راستای محوری قرار دارند، در حالیکه در روش ۲ از تغییرات مؤلفه محیطی میدان دیسک در راستای محوری صرف‌نظر شده است. یادآور می‌شود که در روش ۲ از مؤلفه محوری چگالی شار نیز چشم‌پوشی شده است و بنابراین، برای این کمیت نمی‌توان مقایسه‌ای بین دو روش انجام داد. به هر حال، همان‌طور که در فصل قبل نشان داده شد، نادیده گرفتن این مؤلفه به علت ناچیز بودن آن خطای قابل توجهی به همراه نخواهد داشت.



شکل ۳-۵: مقایسه توزیع فضایی مؤلفه محیطی چگالی شار حاصل از دو روش مدلسازی

شکل موج‌های ولتاژ ترمینال به دست آمده از دو روش در شکل ۴-۵ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. می‌توان گفت که این ولتاژها بطور کامل بر هم منطبق هستند. این انطباق دقیق رابطه ولتاژ-جریان بیانگر آن است که دقت روش جدید در حد دقت روش اجزاء محدود است. به علت شباهت زیاد سایر

نتایج حاصل از روش جدید با نتایج ارائه شده در فصل قبل، و برای پرهیز از زیاده‌گویی، از ارائه آن‌ها چشم‌پوشی می‌شود.



شکل ۴-۵: مقایسه توزیع فضایی مؤلفه محیطی چگالی شار حاصل از دو روش مدل‌سازی

۴-۵- جمع‌بندی

در این فصل نحوه مدل‌سازی موتورهای مورد مطالعه به کمک ترکیب معادلات انتگرالی حاکم بر آن‌ها با مدل پریساج هیستریز ارائه شد. برای برقراری این تزویج از همان رویکرد فصل قبل استفاده شد. روش مدل‌سازی جدید نسبت به روش فصل قبل بسیار سریع‌تر است، ضمن آن‌که نتایج حاصل از این دو روش کاملاً منطبق بر یکدیگر هستند. در فصل بعد به بخش سوم رساله، یعنی مقایسه موتورها، پرداخته خواهد شد.

فصل ٦:

مقایسه موتورها

همانند سایر ماشین‌های الکتریکی، موتورهای هیستریزیس نیز ساختارهای متنوع دارند. به هر حال، نمی‌توان یک ساختار مشخص از این نوع موتور را نام برد که برای همه کاربردها بهترین گزینه باشد. بنابراین، طراحان باید ضمن آگاهی از تأثیر عوامل مختلف، بتوانند این ساختارها را از جنبه‌های گوناگون با یکدیگر مقایسه کرده و سپس اقدام به انتخاب ساختار مناسب برای کاربرد مورد نظر نمایند. متأسفانه، کارهای چاپ شده (تا قبل از انجام این رساله) در مورد مقایسه موتورهای هیستریزیس فقط به [۲۶] محدود می‌شود.

در ابتدای این فصل به مقایسه دو نوع بدون هسته و بدون شیار موتورهای هیستریزیس تخت پرداخته می‌شود. هر یک از این دو نوع موتور، ساختارهای متنوعی دارند که امکان مقایسه یک به یک آن‌ها وجود ندارد. به هر حال، می‌توان با مقایسه تعدادی ساختار مشخص، عواملی که موجب تفاوت آن‌ها می‌شود را شناسایی و بررسی نمود و نتایج حاصل را به ساختارهای دیگر تعمیم داد. بنابراین، در بخش دوم این فصل با استفاده از یک شیوه سیستماتیک، ده ساختار مختلف با یکدیگر مقایسه می‌شوند و به بررسی تأثیر عوامل مختلف بر روی عملکرد موتورهای هیستریزیس مورد مطالعه پرداخته می‌شود. اگرچه این کار برای ساختارهای بدون شیار انجام می‌شود، اما نتایج به دست آمده در مورد ساختارهای بدون هسته نیز صدق می‌کند.

۶-۱- ساختار بدون شیار در برابر ساختار بدون هسته

عدم وجود دندانه مغناطیسی در هسته استاتور، و همچنین فاصله هوایی مؤثر نسبتاً بزرگ، در موتورهای هیستریزیس تخت بدون شیار و بدون هسته باعث کاهش شدید تلفات پارازیتیک روتور در این نوع موتورها می‌شود [۱۶]. از آنجا که تلفات پارازیتیک بخش بزرگی از تلفات موتورهای هیستریزیس را تشکیل می‌دهد، استفاده از استاتورهای بدون هسته و یا بدون شیار تأثیر بسزایی در افزایش بازدهی واقعی موتورهای هیستریزیس تخت دارد. از نقطه نظر عملکردی، این دو نوع ساختار

بسیار نزدیک به یکدیگر می‌باشند. به هر حال، برخی تفاوت‌های کاربردی نیز وجود دارند که در این بخش به آن‌ها اشاره می‌شود.

عدم بکارگیری هسته استاتور مغناطیسی در ساختار بدون هسته موجب حذف تلفات آهن استاتور و نیز کاهش حجم اشغالی این ساختار می‌شود. مورد اول، یک مزیت ویژه در کاربردهایی محسوب می‌شود که فرکانس تغذیه در آن‌ها بالا است. به هر حال، یادآور می‌شود که از استاتور بدون هسته نمی‌توان در ساختار یک طرفه استفاده کرد. در ضمن، فرآیند سیم‌پیچی آن، که نمی‌تواند از نوع تروئیدال باشد، بسیار دشوار است و نیاز به حوصله فراوان و صرف زمان زیاد دارد. همچنین، طول اتصالات انتهایی در سیم‌پیچی موتورهای بدون هسته معمولاً بزرگ است، که تأثیر نامطلوبی بر عملکرد این موتورها دارد. از طرف دیگر، اگر برای نگهداری سیم‌پیچ‌ها از یک صفحه غیرمغناطیسی استفاده شود، طول مؤثر فاصله هوایی افزایش می‌یابد، که عامل دیگری در تضعیف عملکرد موتورهای بدون هسته است. با توجه به این توضیحات، استفاده از استاتور بدون هسته مغناطیسی فقط در موارد خاص توصیه می‌شود.

استاتورهای بدون شیار را می‌توان به صورت تروئیدال سیم‌پیچی نمود که علاوه بر سهولت بیشتر، استحکام مکانیکی بیشتری نسبت به سیم‌پیچی معمولی فراهم می‌آورد. همچنین، معمولاً طول مؤثر فاصله هوایی موتورهای بدون شیار، در مقایسه با موتورهای بدون هسته، کمتر است. موتورهای هیستریزس معمولاً با تعداد قطب پایین طراحی می‌شوند و بنابراین، سیم‌پیچی تروئیدال می‌تواند باعث کاهش طول اتصالات انتهایی سیم‌پیچی شود. به علاوه، ساخت موتور یک طرفه با استاتور بدون شیار امکان پذیر است.

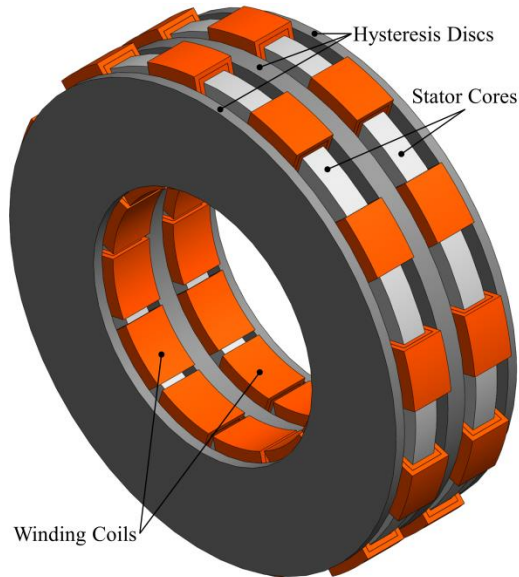
در [۲۶] دو موتور هیستریزس تخت دوطرفه شارمحیطی بدون شیار و بدون هسته با توان نامی یکسان با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این مقایسه‌ها در دو فرکانس ۵۰ و ۴۰۰ هرتز انجام شده است. نتایج حاصل از این مقایسه‌ها، که با توضیحات فوق مطابقت دارد، به شرح زیر می‌باشد:

- موتور بدون هسته در فرکانس ۵۰ هرتز، با وجود تعداد دور بیشتر در هر فاز، جریان بیشتری نسبت به موتور بدون شیار دریافت می‌کند. این در حالی است که در فرکانس ۴۰۰ هرتز، به علت عدم وجود تلفات آهن استاتور در موتور بدون هسته، وضعیت عکس می‌شود.
- بازده موتور بدون شیار در هر دو فرکانس بالاتر از بازدهی موتور بدون هسته است. در طول کوچک‌تر اتصالات انتهایی در موتور بدون شیار دلیل اصلی این برتری است. لازم به ذکر است که به علت افزایش تلفات آهن در موتور بدون شیار، اختلاف بازده موتورها در فرکانس ۴۰۰ هرتز کم‌تر است.
- ضریب توان موتور بدون هسته در هر دو فرکانس از موتور بدون شیار بزرگ‌تر است. در نگاه اول این موضوع در تضاد با نسبت طول اتصالات انتهایی سیم‌پیچ دو موتور به نظر می‌رسد. اگرچه اتصالات انتهایی بزرگ در موتور بدون هسته موجب افزایش جذب توان راکتیو می‌شود، اما همزمان باعث افزایش تلفات اهمی موتور و در نتیجه جذب توان اکتیو نیز می‌شود. این افزایش توان اکتیو معمولاً بزرگتر از افزایش توان راکتیو متناظر است. بنابراین، ضریب توان موتور بدون هسته بزرگ خواهد بود. این بزرگ بودن ضریب توان یک مزیت محسوب نمی‌شود، زیرا ناشی از تلفات مسی بزرگ است و نه توان خروجی بزرگ. برای یک موتور، ضریب توان بزرگ در کنار بازده بالا به عنوان یک مزیت تلقی می‌شود.

۶-۲- مقایسه سیستماتیک ساختارهای مختلف

در فصل دوم یک موتور نمونه طراحی شد که برای سهولت در مراجعه، نمای سه‌بعدی دیگری از آن مجدداً در شکل ۶-۱ نشان داده شده است. این موتور چهارطبقه، شامل دو استاتور و سه دیسک هیستریزیس است. این موتور نمونه یک ویژگی بسیار جالب دارد: با جابجایی دیسک‌ها و استاتورها و همچنین، قطع تغذیه و/یا تعویض پلاریته تغذیه یکی از استاتورها، می‌توان چندین ساختار دیگر را از

این موتور نمونه استخراج نمود.



شکل ۱-۶: موتور نمونه طراحی شده در فصل دوم

۶-۲-۱- مقایسه موتورهای مورد

اگر از این پس موتور شکل ۱-۶ را موتور مادر بنامیم، با استفاده از تکنیک فوق می‌توان شش موتور مختلف را به صورت مستقیم از آن استخراج نمود. این شش موتور در شکل ۲-۶ نشان داده شده‌اند.

شکل ۲-۶ الف یک موتور تک استاتور- تک روتور شار محیطی را نشان می‌دهد که با M_1 نام‌گذاری می‌شود. هنگامی که در موتور مادر فقط یکی از استاتورها تغذیه شود و دو دیسک خارجی از استاتورها دور هستند، موتور M_1 ساخته می‌شود. باید توجه داشت که دیسک هیستریزیس این موتور همان دیسک میانی است که ضخامت آن دو برابر دیسک‌های خارجی می‌باشد.

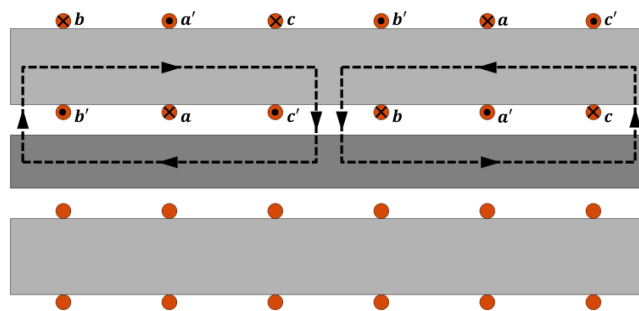
موتور دو استاتور- تک روتور شار محیطی M_2 در شکل ۲-۶ ب نشان داده شده است. اگر در موتور مادر هر دو استاتور با پلاریته مشابه تغذیه شوند و دیسک‌های بیرونی از استاتورها دور باشند، موتور M_2 ایجاد می‌شود.

شکل ۶-۲-ج یک موتور دو استاتور- تک روتور شار محوری را نشان می‌دهد که با M_3 نام‌گذاری می‌شود. اگرچه این موتور از نظر ساختاری کاملاً مشابه با موتور M_2 است، اما بر خلاف M_2 ، دو استاتور M_3 با پلاریته عکس یکدیگر تغذیه می‌شوند. دیسک هیستریزس این موتور نیز همان دیسک ضخیم میانی است. نکته جالب توجه آن است که بر خلاف موتورهای تک استاتور- تک روتور شار محوری، در M_3 نیازی به استفاده از یک نگهدارنده مغناطیسی برای دیسک هیستریزس وجود ندارد که یک مزیت بسیار مهم به حساب می‌آید.

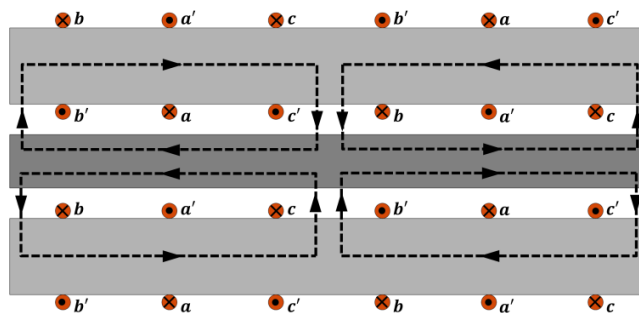
در شکل ۶-۲-ج یک موتور تک استاتور- دو روتور شار محیطی نامتقارن با نام M_4 نشان داده شده است. این موتور از تغذیه یک استاتور و قرار گرفتن دیسک میانی و یکی از دیسک‌های خارجی در کنار این استاتور تشکیل می‌شود. واژه نامتقارن از آنجا به این موتور اطلاق می‌شود که ضخامت یکی از دیسک‌های آن دو برابر ضخامت دیسک دیگر است.

موتور مادر که از نوع دو استاتور- سه روتور شار محیطی است و با M_5 نام‌گذاری می‌شود در شکل ۶-۲-ه به نمایش درآمده است. در این موتور هر دو استاتور با پلاریته مشابه تغذیه می‌شوند و تمامی دیسک‌ها در مجاورت استاتورها قرار می‌گیرند.

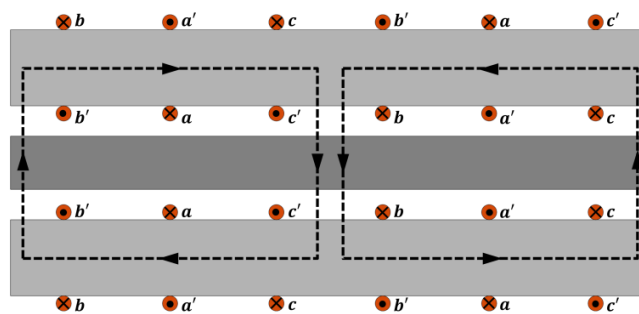
در شکل ۶-۲-و یک موتور دو استاتور- سه روتور شار ترکیبی با نام M_6 نشان داده شده است. این موتور از لحاظ ساختاری همان موتور مادر است، اما پلاریته تغذیه استاتورهای آن عکس یکدیگر است. همانطور که مشاهده می‌شود، مسیر شار در دیسک‌های بیرونی محیطی است و در دیسک میانی محوری می‌باشد. در این موتور نیز برای ایجاد شار محوری در دیسک میانی نیازی به استفاده از نگه دانه مغناطیسی نیست.



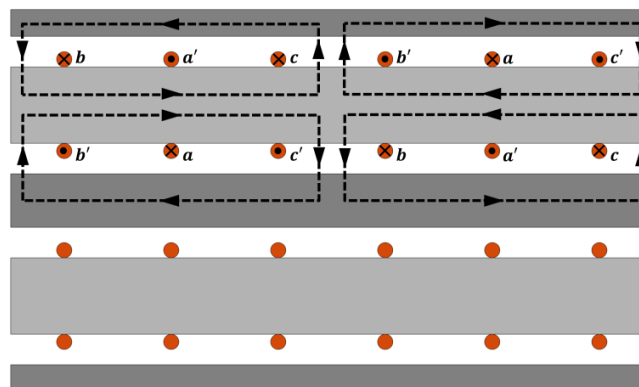
(الف)



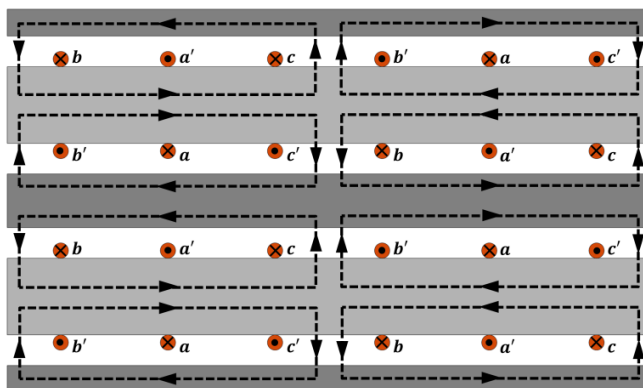
(ب)



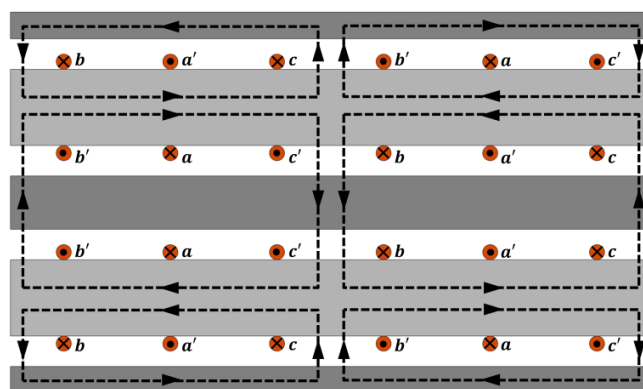
(ج)



(د)



(ه)



(و)

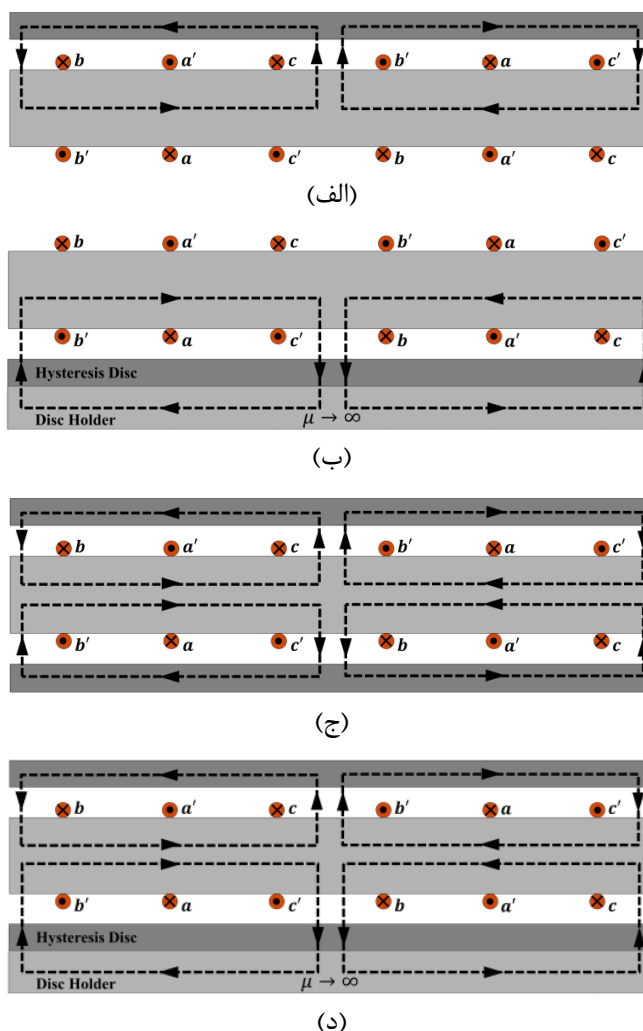
شکل ۶-۲: موتورهایی که به صورت مستقیم از موتور مادر قابل استخراج هستند. (الف) M_1 (ب) M_2 (ج) M_3 (د) M_4 (ه) M_5 (و) M_6

به دلیل تقارن موجود در برخی از موتورهای نشان داده شده در شکل ۶-۲، می‌توان آن‌ها را به صورت اتصال پشت به پشت موتورهای دیگر در نظر گرفت. این موضوع، منجر به استخراج غیر مستقیم چهار موتور دیگر از موتور مادر می‌شود. این موتورها در شکل ۶-۳ نشان داده شده‌اند.

موتور M_2 (شکل ۶-۲-ب) از کنار هم قرار گرفتن دو موتور تک استاتور- تک روتور شار محیطی به نام M_7 (شکل ۶-۳-الف) به دست می‌آید. تفاوت مهم دو موتور تک استاتور- تک روتور شار محیطی M_7 و M_1 (شکل ۶-۲-الف) در آن است که ضخامت دیسک هیستریزیس در موتور M_1 دو برابر ضخامت دیسک موتور M_7 می‌باشد. به صورت مشابه، موتور M_3 (شکل ۶-۲-ج) را می‌توان با اتصال دو موتور تک استاتور- تک روتور شار محوری M_8 (شکل ۶-۳-ب) به دست آورد. باید توجه داشت که برای ایجاد شار محوری در دیسک هیستریزیس موتور M_8 ، وجود یک نگهدارنده مغناطیسی

فرضی برای دیسک هیستریزس الزامی است. نفوذپذیری مغناطیسی ماده سازنده این نگهدارنده باید بی‌نهایت فرض شود تا آنکه اتصال دو موتور M_8 معادل یک موتور M_3 شود.

موتور مادر یعنی M_5 (شکل ۶-۲-۵) خود از دو موتور تک استاتور- دو روتور شار محیطی متقارن M_9 (شکل ۶-۳-ج) تشکیل می‌شود. بر خلاف موتور نامتقارن M_4 (شکل ۶-۲-د)، ضخامت دیسک‌های M_9 برابر هستند. در نهایت، اتصال پشت به پشت دو موتور تک استاتور- دو روتور شار ترکیبی M_{10} (شکل ۶-۳-د) معادل موتور M_6 (شکل ۶-۲-و) خواهد بود. در موتور M_{10} نیز، در نظر گرفتن یک نگهدارنده مغناطیسی با نفوذپذیری بی‌نهایت برای دیسک با شار محوری الزامی است.



شکل ۶-۳: موتورهایی که به صورت غیرمستقیم از موتور مادر استخراج می‌شوند. (الف) M_7 (ب) M_8 (ج) M_9 (د) M_{10}

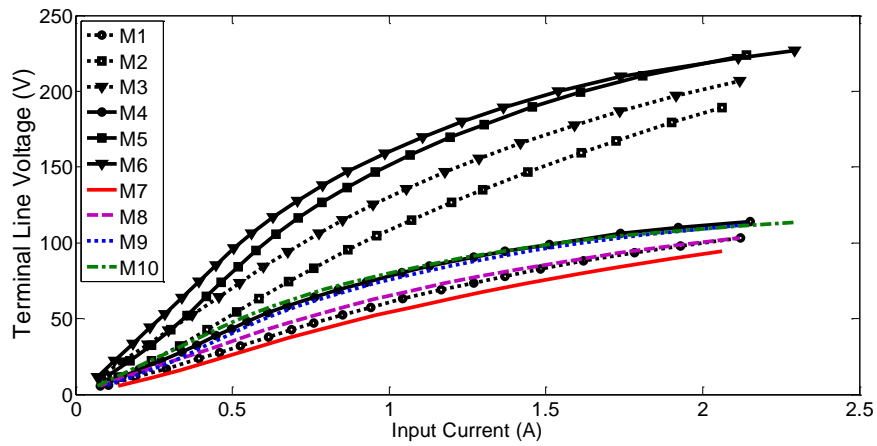
۶-۲-۲- استخراج مشخصه‌های عملکردی موتورها

برای استخراج مشخصه‌های عملکردی همه موتورهای M_1 تا M_{10} از همان شیوه آزمایشگاهی معرفی شده در فصل دوم استفاده می‌گردد. مشخصه‌های هر موتور با تغییر اندازه ولتاژ اعمال شده به ترمینال آن به دست آمده‌اند. در هر یک از آزمایش‌ها، ولتاژ ترمینال تا جایی افزایش داده شده است که جریان هادی‌های سیم‌پیچ موتور از حدود دو و نیم برابر جریان نامی آن‌ها تجاوز نکند. با توجه به این موضوع، برای مقایسه بهتر موتورها، کلیه منحنی‌ها بر حسب اندازه جریان ورودی موتور ترسیم می‌شوند.

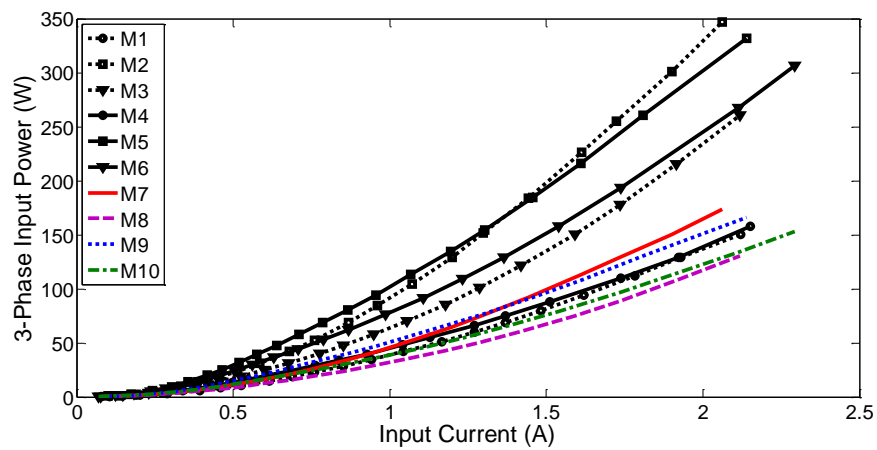
۶-۲-۱- عملکرد در شرایط راه‌اندازی

برای استخراج نتایج مربوط به شرایط راه‌اندازی موتورهای مورد بررسی، آزمایش روتور قفل شده بر روی آن‌ها انجام گرفته است. این نتایج شامل چهار مشخصه عملکردی مهم است که عبارتند از: منحنی جریان-ولتاژ، منحنی جریان-توان ورودی سه‌فاز، منحنی جریان-گشتاور راه‌اندازی و منحنی جریان-ضریب توان ورودی. این مشخصه‌ها برای تمام موتورها به ترتیب در شکل ۶-۴، شکل ۶-۵، شکل ۶-۶ و شکل ۶-۷ نشان داده شده‌اند. جدول ۶-۱ با توجه به این شکل‌ها تشکیل شده است و مشخص می‌کند که مقادیر حداکثر و حداقل هر یک از این کمیت‌ها مربوط به کدام یک از این موتورها می‌باشند.

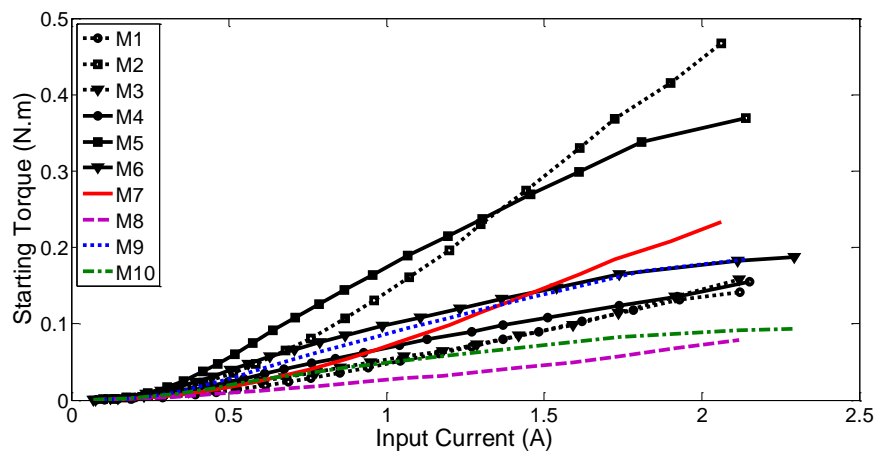
نتایج ارائه شده نشان می‌دهند که با افزایش جریان ورودی، طبق انتظار، ولتاژ ترمینال، توان ورودی و گشتاور راه‌اندازی تمام موتورها افزایش می‌یابند. به هر حال، تغییرات ضریب توان ورودی موتورها یکنوا نیست. لازم به تذکر است که ضریب توان موتورهای نشان داده شده در شکل ۶-۳ با موتورهایی که از آن‌ها استخراج شده‌اند (شکل ۶-۲) برابر می‌باشند.



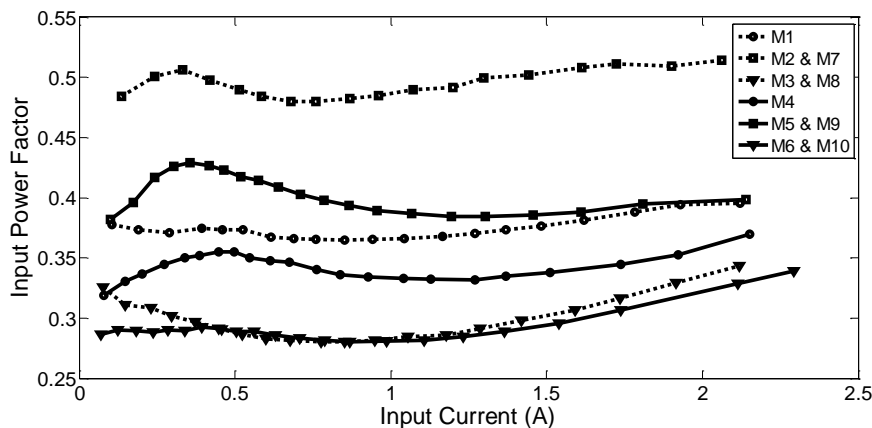
شکل ۴-۶: ولتاژ خط ترمینال موتورها بر حسب جریان ورودی آنها در شرایط راهاندازی



شکل ۵-۶: توان سه‌فاز ورودی موتورها بر حسب جریان ورودی آنها در شرایط راهاندازی



شکل ۶-۶: گشتاور راه‌اندازی موتورها بر حسب جریان ورودی آنها



شکل ۶-۷: ضریب توان ورودی موتورها بر حسب جریان ورودی آنها در شرایط راهاندازی

جدول ۶-۱: موتورهایی که کمترین و بیشترین مقادیر کمیت‌ها را در شرایط راهاندازی به خود اختصاص داده‌اند

موتور(ها) با کمترین مقدار	موتور(ها) با بیشترین مقدار	کمیت
M_7	M_6	ولتاژ ترمینال
M_8	M_5 (به ازای جریان‌های پایین تا میانی) M_2 (به ازای جریان‌های میانی تا بالا)	توان ورودی
M_8	M_5 (به ازای جریان‌های پایین تا میانی) M_2 (به ازای جریان‌های میانی تا بالا)	گشتاور راهاندازی
M_{10} و M_6	M_7 و M_2	ضریب توان

۶-۲-۲-۲- عملکرد در سرعت سنکرون

در این بخش مشخصه‌ها عملکردی موتورهای مورد مطالعه در شرایط عملکردی حالت دائمی در سرعت سنکرون و تحت بار مکانیکی یکسان ارائه می‌شوند. بنابراین، برای اعمال بار مکانیکی به موتورها از یاتاقان‌هایی با ضریب اصطکاک نسبتاً بزرگ استفاده شده است. این کار تضمین می‌کند که مشخصه گشتاور-سرعت بار برای تمام موتورها یکسان می‌باشد.

از میان موتورهایی که به صورت مستقیم از موتور مادر استخراج شده‌اند، موتورهای M_1 و M_3 تحت این بار نمی‌توانند به سرعت سنکرون برسند. این موضوع با توجه به گشتاور راهاندازی پایین این دو موتور (شکل ۶-۶) منطقی به نظر می‌رسد. بنابراین، فقط مشخصه‌های عملکردی موتورهای M_2 ، M_4 ، M_5 و M_6 و نیز موتورهای مستخرج از آنها، یعنی M_7 ، M_9 و M_{10} قابل استخراج می‌باشند.

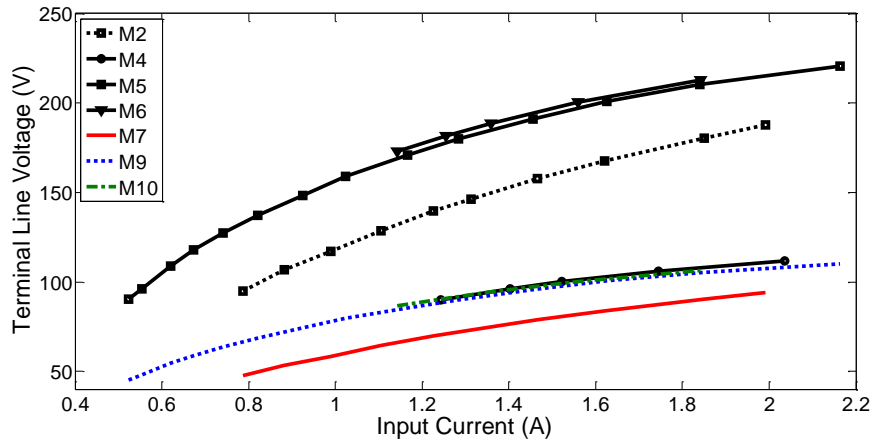
همچنین، حداقل جریان (یا ولتاژ) مورد نیاز برای سنکرون کردن این موتورها با یکدیگر متفاوت است. به عنوان مثال موتور M_5 با جریانی در حدود ۰/۵ آمپر سنکرون می‌شود در حالیکه موتور M_6 برای سنکرون شدن به جریانی بیش از ۱/۱ آمپر نیاز دارد. با توجه به این موضوع، مشخصه‌های موتورهای مختلف به ازای محدوده‌های متفاوتی از جریان ورودی قابل ترسیم می‌باشند.

مشخصه‌های عملکردی در سرعت سنکرون برای موتورهای مورد مطالعه، یعنی ولتاژ خط ترمینال، توان ورودی سه‌فاز، بازده و ضریب توان ترمینال، بر حسب جریان ورودی، به ترتیب در شکل ۸-۶، شکل ۹-۶، شکل ۱۰-۶ و شکل ۱۱-۶ ترسیم شده‌اند. مشاهده می‌شود که مشابه با شرایط راه‌اندازی، در سرعت سنکرون نیز برای افزایش جریان ورودی باید ولتاژ ورودی افزایش یابد که این کار توان ورودی را نیز افزایش می‌دهد. همچنین روال تغییرات ضریب توان موتورها با یکدیگر متفاوت می‌باشند. به هر حال، همانطور که از شکل ۱۰-۶ مشخص است، بازده کلیه موتورها با افزایش جریان ترمینال کاهش می‌یابد. در واقع با توجه به ثابت بودن توان خروجی، افزایش جریان فقط تلفات را افزایش می‌دهد و در نتیجه منجر به کاهش بازده می‌شود.

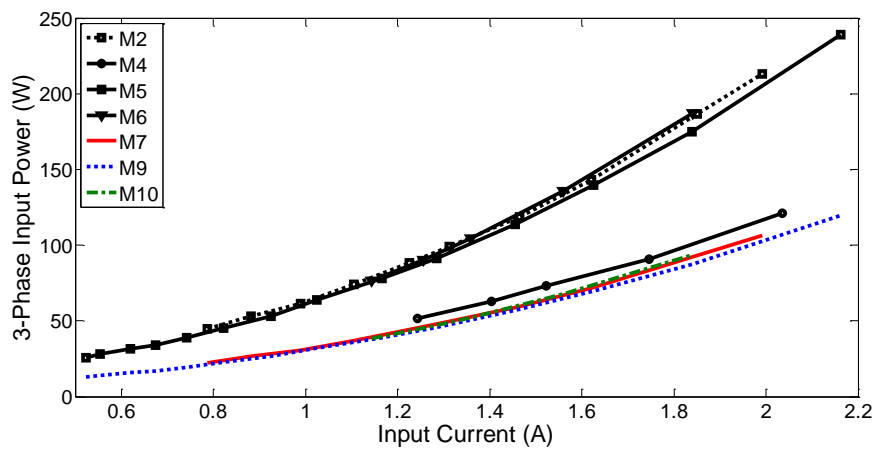
لازم به ذکر است که برای محاسبه بازده η از رابطه زیر استفاده شده است:

$$\eta = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \times 100 \quad (1-6)$$

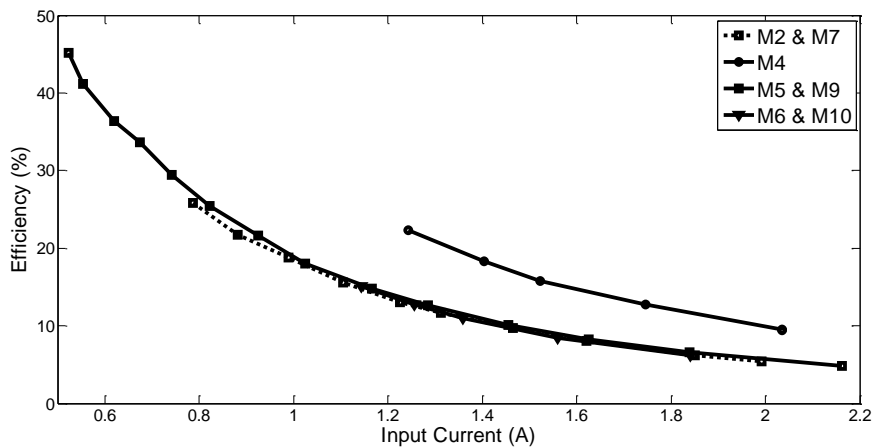
همانطور که در فصل‌های قبل بیان شد، در محاسبه تلفات کل، P_{loss} ، می‌توان از تلفات هسته استاتور و تلفات پارازیتیک روتور در برابر تلفات مسی چشم‌پوشی کرد. تأکید می‌شود که توان مورد نیاز برای غلبه بر اصطکاک همان توان خروجی موتور است و نباید در محاسبه تلفات منظور شود.



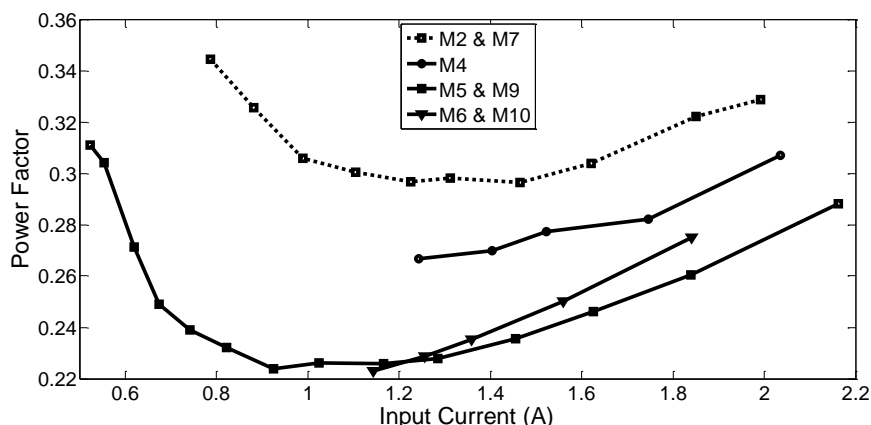
شکل ۶-۸: ولتاژ خط ترمینال موتورها بر حسب جریان ورودی آنها در سرعت سنکرون



شکل ۶-۹: توان سه فاز ورودی موتورها بر حسب جریان ورودی آنها در سرعت سنکرون



شکل ۶-۱۰: بازده موتورها بر حسب جریان ورودی آنها در سرعت سنکرون



شکل ۱۱-۶: ضریب توان ورودی موتورها بر حسب جریان ورودی آن‌ها در سرعت سنکرون

۳-۲-۲-۶- مقایسه موتورها

برای قضاوت در مورد قابلیت‌های یک موتور هیستریزس می‌توان از مطالعه رفتار آن در دو شرایط عملکردی خاص استفاده نمود: (۱) شرایط راه‌اندازی و (۲) شرایط عملکرد حالت دائمی در حداکثر گشتاور در سرعت سنکرون (شرایط ورود به سنکرونیسم). مطالعه آزمایشگاهی رفتار یک موتور هیستریزس در شرایط راه‌اندازی نسبت به شرایط عملکردی دوم راحت‌تر است. همچنین، رفتار راه‌اندازی موتورهای هیستریزس از دو جنبه اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد: (۱) معمولاً بیشترین گشتاور موتورهای هیستریزس در شرایط راه‌اندازی آن‌ها تولید می‌شود. این گشتاور شامل دو مؤلفه گشتاور هیستریزس و گشتاور القایی است. این در حالی است که گشتاور القایی در سرعت سنکرون تولید نمی‌شود. به علاوه، با تقریب قابل قبول می‌توان گفت که مؤلفه گشتاور هیستریزس در راه‌اندازی برابر با حداکثر گشتاوری است که موتور می‌تواند در سرعت سنکرون تولید کند. (۲) در برخی از کاربردهای ویژه، تنها وظیفه موتور هیستریزس آن است که یک جسم متصل به شفت موتور که ممان اینرسی بزرگی دارد را با سرعت سنکرون به گردش درآورد. در این کاربردها، معمولاً گشتاور مورد نیاز در سرعت سنکرون بسیار کوچکتر از گشتاور مورد نیاز برای شتاب‌گیری مطلوب مجموعه روتور در راه‌اندازی و رژیم آسنکرون است. در این حالت، بررسی عملکرد موتور در شرایط راه‌اندازی از بررسی عملکرد آن در سرعت سنکرون مهم‌تر است.

با توجه به توضیحات فوق، به منظور مقایسه قابلیت‌های موتورهای مورد مطالعه، از مشخصه‌های عملکردی آن‌ها در شرایط راه‌اندازی استفاده می‌شود. لازم است که به این نکته مهم اشاره شود که حداکثر گشتاور تولیدی توسط موتورهای مورد مطالعه در این فصل با یکدیگر متفاوت می‌باشند. بنابراین، مقایسه آن‌ها با استفاده از مشخصه‌های عملکردی در سرعت سنکرون و بار یکسان صحیح نیست.

در ادامه این بخش موتورهای مورد مطالعه بر اساس چند معیار مهم با یکدیگر مقایسه می‌شوند. این معیارها عبارتند از: (۱) مسیر عبور شار در دیسک(ها)، (۲) ضخامت دیسک(ها)، (۳) تعداد دیسک‌های مجاور به هر استاتور و (۴) تعداد استاتورها.

۶-۲-۳-۱- مسیر عبور شار در دیسک(های) هیستریزیس

مطالعه تأثیر مسیر عبور شار در دیسک(های) هیستریزیس از مقایسه موتورهای M_2 با M_3 ، M_5 با M_6 ، M_7 با M_8 و نیز M_9 با M_{10} محقق می‌شود. مسیر عبور شار در تمامی دیسک‌های موتورهای M_2 ، M_5 ، M_7 و M_9 به صورت محیطی است، در حالیکه در موتورهای M_3 ، M_6 ، M_8 و M_{10} یک دیسک با مسیر محوری برای عبور شار وجود دارد. نتایج ارائه شده نشان می‌دهند که به ازای یک جریان مشخص، توان ورودی، گشتاور راه‌اندازی و ضریب توان ورودی موتورهایی که کاملاً شار محیطی هستند نسبت به موتورهای متناظر با دیسک شارمحوری بزرگتر می‌باشند. همچنین، اختلاف موجود بین گشتاورهای راه‌اندازی موتورهای شار محیطی و شار محوری مشهودتر از اختلاف بین توان‌های ورودی آن‌ها است. بنابراین به نحوی می‌توان گفت که بازده موتورهای شار محیطی بیشتر از موتورهای شارمحوری است. از طرف دیگر، ولتاژ ترمینال مورد نیاز برای ایجاد یک جریان مشخص در موتورهای شار محوری بزرگتر است. تأکید می‌شود که این مقایسه فقط برای دو موتوری صحیح است که تعداد دیسک و ابعاد دیسک مشابه یکدیگر داشته باشند. برتری موتورهای شار محیطی نسبت به موتورهای شارمحوری متناظر را می‌توان با بررسی ارتباط چگالی شار فاصله هوایی و

هستند. موتور M_1 یک دیسک سه میلیمتری دارد، در حالیکه ضخامت تنها دیسک موتور M_7 شش میلیمتر است. به صورت مشابه ضخامت هر دو دیسک موتور M_4 سه میلیمتر است، اما موتور M_9 دو دیسک سه و شش میلیمتری دارد. از نتایج ارائه شده مشاهده می‌شود که توان ورودی، گشتاور راه‌اندازی و ضریب توان موتورهای با دیسک نازک، یعنی M_1 و M_7 ، نسبت به موتورهای با دیسک ضخیم، یعنی M_4 و M_9 بزرگتر هستند. به عبارت دیگر، در یک موتور شارمحیطی افزایش حجم ماده هیستریزیس از طریق افزایش بیش از حد ضخامت دیسک منجر به تضعیف عملکرد آن می‌شود. دلیل این موضوع آن است که با افزایش ضخامت، دامنه چگالی شار در دیسک و در نتیجه مساحت حلقه هیستریزیس کاری موتور کاهش می‌یابد. همچنین در یک دیسک ضخیم، مؤلفه شعاعی شار در مقایسه با مؤلفه محیطی آن قابل چشم‌پوشی نیست و این توزیع میدان دوبعدی عملکرد کلی موتور را تحت تأثیر قرار خواهد داد. همچنین شکل ۴-۶ نشان می‌دهد که برای ایجاد یک جریان مشخص، موتورهای دارای دیسک ضخیم به ولتاژ ترمینال بزرگتری نیاز دارند.

لازم به ذکر است که با استفاده از نتایج آزمایش‌های این رساله نمی‌توان به صورت مستقیم در مورد تأثیر ضخامت دیسک(های) هیستریزیس در موتورهای شار محوری قضاوت کرد. به هر حال به نظر می‌رسد که افزایش ضخامت یک دیسک با شار محوری باعث بهبود عملکرد موتور می‌شود. توضیح آنکه به دلیل فاصله هوایی نسبتاً بزرگ در موتورهای بدون شیار، تغییر ضخامت دیسک شار محوری تأثیر چندانی بر روی دامنه چگالی شار آن ندارد و در نتیجه مساحت حلقه هیستریزیس کاری تقریباً ثابت می‌ماند. بنابراین، در موتورهای دارای دیسک شار محوری، افزایش ضخامت دیسک شار محوری منجر به افزایش حجم ماده هیستریزیس و افزایش گشتاور و توان خروجی موتور خواهد شد. به هر حال افزایش بیش از حد ضخامت دیسک باعث قابل توجه شدن مؤلفه محیطی شار می‌شود که خود موجب تضعیف عملکرد موتور است.

دلیل این وضعیت عجیب آن است که شار عبوری از هسته استاتور موتور دوطرفه M_5 تقریباً دو برابر مقدار متناظر در موتور یک طرفه M_2 می‌باشد. به عبارت دیگر، هسته M_5 در جریان کوچکتری دچار اشباع می‌شود. در این شرایط، بخش بزرگی از جریان ورودی M_5 صرف غلبه بر افت قابل توجه mmf در هسته استاتور می‌شود و نمی‌تواند منجر به ایجاد حلقه‌های هیستریزیس بزرگ و در نتیجه، گشتاور بزرگ شود.

۶-۲-۲-۳-۴- تعداد استاتورها

طبق انتظار، برای ایجاد یک جریان مشخص، ولتاژ ترمینال موتورهای تک استاتوره (M_1 ، M_4 ، M_7 ، M_8 ، M_9 و M_{10}) نسبت به موتورهای دو استاتوره (M_2 ، M_3 ، M_5 و M_6) کوچکتر است. دلیل این موضوع سری شدن دو استاتور می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که موتورهای تخت چند استاتوره (چندطبقه) انتخاب مناسب‌تری برای کاربردهای با ولتاژ بالا هستند، زیرا طراحی موتورهای تخت تک استاتوره در این ولتاژها با مشکلاتی همراه است. شایان ذکر است که این نتیجه‌گیری مستقل از مسیر عبور شار در دیسک(های) هیستریزیس، جنس و ضخامت آنها است. همچنین، برای موتورهای مورد مطالعه، توان سه فاز ورودی به انواع دو استاتوره نسبت به انواع تک استاتوره بزرگ‌تر می‌باشد. با این حال، همانطور که شکل ۶-۶ و شکل ۶-۷ نشان می‌دهند، در مورد تأثیر تعداد استاتورها بر روی گشتاور راه‌اندازی و ضریب توان موتورها نمی‌توان قضاوت نمود زیرا این کمیت‌ها به شدت وابسته به مسیر عبور شار در دیسک(های) هیستریزیس، جنس و ضخامت آنها هستند.

۶-۳- جمع‌بندی

در این فصل به مقایسه موتورهای هیستریزیس تخت مورد مطالعه پرداخته شد. در ابتدا ویژگی‌ها، محدودیت‌ها و کاربردهای ساختارهای بدون شیار و بدون هسته ارائه شدند. سپس، با استفاده از یک

روش سیستماتیک آزمایشگاهی، موتورهای هیستریزیس تخت چندطبقه بر اساس معیارهای مختلف (مسیر شار، ضخامت دیسک‌های هیستریزیس، تعداد دیسک‌ها و تعداد استاتورها) مورد مقایسه قرار گرفتند. فصل بعد به نتیجه‌گیری رساله و ارائه پیشنهادات برای کارهای آتی اختصاص داده شده است.

فصل ۷:

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷-۱- نتیجه‌گیری

موتورهای هیستریزیس تخت مزیت‌های ویژه‌ای برای استفاده در کاربردهای سرعت بالا دارند. به هر حال، این موتورها آن‌چنان که شایسته است مورد توجه قرار نگرفته‌اند. در این رساله، ساختارهای چندطبقه موتورهای هیستریزیس تخت و قابلیت‌های آن‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور کاهش تلفات پارازیتیکی، استاتورهای با هسته مغناطیسی بدون شیار و بدون هسته مغناطیسی برای استفاده در این موتورها پیشنهاد شدند.

با توجه به نقاط ضعف موجود در روش‌های طراحی پیشین، یک الگوریتم جدید و عمومی برای طراحی موتورهای مورد مطالعه ارائه شد. در این الگوریتم، خواسته‌ها و قیود طراحی در یکی از دو شرایط راه‌اندازی یا حداکثر گشتاور در سرعت سنکرون دریافت می‌شوند. نشان داده شد که ابعاد دیسک‌های هیستریزیس انتخاب مناسبی برای متغیرهای طراحی بوده و سایر مشخصات مورد نیاز بر اساس آن‌ها قابل محاسبه می‌باشند. جزئیات فرآیند طراحی بهینه یک موتور نمونه، از نوع چهارطبقه بدون شیار، ارائه شد. این کار از طریق ترکیب الگوریتم طراحی پیشنهادی و روش بهینه‌سازی جستجوی مستقیم به انجام رسید. یک نمونه آزمایشگاهی از موتور طراحی شده ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج به دست آمده، صحت این روش طراحی را تأیید نمود. لازم به ذکر است که حلقه‌های هیستریزیس ماده مورد استفاده در موتور با استفاده از یک نمونه حلقوی از این ماده به دست آمدند. اندازه‌گیری‌های لازم برای رسیدن به این هدف در فرکانس ۵۰ هرتز انجام شدند.

موتورهای هیستریزیس بر اساس خاصیت هیستریزیس مواد مغناطیسی عمل می‌کنند. برای پیش‌بینی دقیق رفتار آن‌ها لازم است که در هر لحظه از زمان، وضعیت مشخصه‌های هیستریزیس هر یک از نقاط روتور مشخص باشند. عوامل متعددی، نظیر هارمونیک‌های تغذیه، توزیع فضایی سیم‌پیچ‌ها و نوسانات سرعت روتور، بر روی این مشخصه‌ها تأثیرگذار هستند. بنابراین، هر نقطه از

روتور می‌تواند مشخصه هیستریزس خاص خود را داشته باشد. همچنین، این مشخصه، که الزاماً به شکل یک حلقه بسته نیست، ممکن است شامل حلقه‌های فرعی باشد. برای در نظر گرفتن این جزئیات لازم است یک مدل دقیق از پدیده هیستریزس به کار گرفته شود. در این رساله از مدل پریساج کلاسیک، که در بین مدل‌های هم‌تراز خود به عنوان دقیق‌ترین مدل هیستریزس شناخته می‌شود، استفاده شد. برای شناسایی مدل پریساج مربوط به یک ماده مشخص لازم است که توزیع تابع پریساج آن ماده مشخص شود. برای این منظور، یک روش اصلاح شده بر پایه گسسته‌سازی مثلث محدود کننده پیشنهاد شد. یک شرط برای امکان به کارگیری مدل پریساج کلاسیک ارائه شد. این شرط، رابطه‌ای بین شیب منحنی برگشت حلقه هیستریزس اشباع و منحنی مغناطیس‌شوندگی ماده ایجاد می‌کند. به علت وجود جریان‌های گردابی قابل توجه در فرکانس ۵۰ هرتز، این شرط برای حلقه‌های هیستریزس به دست آمده از ماده نمونه برقرار نیست. بنابراین، یک تابع پریساج تحلیلی برای تقریب مشخصه هیستریزس ماده در فرکانس‌های پایین به کار گرفته شد.

در ادامه رساله یک رویکرد نوآورانه برای تزویج مدل پریساج پدیده هیستریزس و مدل اجزاء محدود موتورهای مورد مطالعه ارائه شد. این رویکرد بر پایه تقریب خطی مشخصه‌های هیستریزس بین دو لحظه زمانی متوالی استوار است و از لحاظ همگرایی بسیار قدرتمند می‌باشد. همچنین، تزویج مدل‌ها به صورت غیر مستقیم انجام می‌شود، یعنی نیازی به تغییر کدهای استاندارد اجزاء محدود وجود ندارد و از نرم‌افزارهای تجاری می‌توان برای این منظور استفاده نمود. روش تزویج پیشنهاد شده به عنوان هسته مرکزی در هر نوع مدلسازی موتورهای هیستریزس قابل بکارگیری است. به کمک این روش، مدلسازی شرایط ورود به سنکرونیزم برای موتور نمونه انجام شد و نشان داده شد که تطابق آن با نتایج آزمایشگاهی قابل قبول است.

به دلیل تعداد زیاد المان‌ها در مش‌بندی دیسک‌های هیستریزس، مدلسازی موتورهای هیستریزس از طریق تزویج مدل اجزاء محدود و مدل پریساج بسیار زمان‌بر است. با استفاده از

تقریب‌های منطقی، توصیف انتگرالی به عنوان یک جایگزین برای مدل اجزاء محدود موتورهای مورد مطالعه معرفی شد. نشان داده شد که نتایج مدل‌سازی به کمک تزویج مدل پریساج و توصیف انتگرالی موتور نمونه با دقت بسیار بالا بر نتایج حاصل از روش قبل منطبق می‌باشند. لازم به ذکر است که محاسبات روش جدید در مدت زمان بسیار کم‌تر انجام شدند.

در بخش پایانی رساله به مقایسه موتورهای مورد مطالعه پرداخته شد. قابلیت‌ها، محدودیت‌ها و تفاوت‌های کاربردی ساختارهای بدون شیار و بدون هسته با یکدیگر مقایسه شدند. همچنین، با استفاده از یک روش سیستماتیک آزمایشگاهی، ساختارهای چندطبقه بر اساس چهار معیار مهم با یکدیگر مقایسه شدند. این معیارها عبارتند از مسیر عبور شار در دیسک‌های هیستریزیس، ضخامت دیسک‌های هیستریزیس، تعداد دیسک‌های مجاور به هر استاتور و نیز تعداد استاتورها. نتایج مهم حاصل از این مقایسه‌ها به شرح زیر است:

- ساختارهای چندطبقه بدون شیار به علت کوتاه‌تر بودن طول اتصالات انتهایی سیم‌پیچ‌ها و نیز طول مؤثر فاصله هوایی، مشخصه‌های عملکردی بهتری نسبت به انواع بدون هسته از خود نشان می‌دهند. البته، در فرکانس‌های تغذیه بسیار بالا، ساختارهای بدون هسته که فاقد تلفات آهن استاتور می‌باشند، عملکرد مناسبی دارند.
- برای دو موتور مشابه از لحاظ هندسی، عملکرد موتوری که مسیر شار در دیسک(های) هیستریزیس آن کاملاً محیطی است نسبت به موتوری که حداقل یک دیسک هیستریزیس با مسیر محوری عبور شار داشته باشد، بهتر می‌باشد.
- افزایش ضخامت دیسک(های) هیستریزیس در موتورهای شار محیطی می‌تواند موجب تضعیف عملکرد آن‌ها شود، در حالی که به نظر می‌رسد این کار عملکرد موتورهای شار محوری را بهبود می‌بخشد.
- با توجه به پایین بودن دامنه چگالی شار فاصله هوایی در موتورهای تخت تک استاتور، طراح

موتور آزادی عمل مناسبی برای طراحی موتور در ولتاژهای دلخواه ندارد. با افزایش تعداد استاتورها و اتصال مناسب آنها می‌توان موتورهای هیستریزیس تخت را در ولتاژهای دلخواه طراحی نمود.

۲-۷- پیشنهادات

با توجه به نتایج به دست آمده در این رساله، موارد زیر برای انجام مطالعات بعدی پیشنهاد می‌شوند:

(۱) اصلاح مدل پریساج کلاسیک برای رفع محدودیت آن در مدلسازی مشخصه‌های هیستریزیس با شیب‌های دلخواه برای حلقه اشباع و منحنی مغناطیس‌شوندگی

(۲) کاهش چشمگیر زمان محاسبات مدلسازی، از طریق جایگزین کردن انتگرال‌گیری‌های عددی در مدل پریساج با انتگرال‌گیری‌های تحلیلی

(۳) استفاده از معادلات شبه استاتیک میدان (مسائل جریان ادی) در فرآیند مدلسازی اجزاء محدود

(۴) ارزیابی قابلیت‌های سایر مدل‌های هیستریزیس برای استفاده در فرآیند مدلسازی موتورهای هیستریزیس و با هدف کاهش زمان محاسبات

(۵) تعمیم روش مدلسازی بر اساس توصیف انتگرالی به موتورهای هیستریزیس با دندان مغناطیسی

(۶) مقایسه دقیق ساختارهای بدون هسته و بدون شیار با ساختار دارای دندان مغناطیسی

(۷) مدلسازی موتورهای هیبرید هیستریزیس-رلکتانس، هیستریزیس-القایی و هیستریزیس-آهنربای دائم و مقایسه آنها با موتورهای هیستریزیس معمول

(۸) مطالعه دقیق اثرات هارمونیک‌های تغذیه، تحریک اضافی کوتاه‌مدت، تغییرات بار و غیره با

استفاده از روش مدلسازی پیشنهادی

-
- [1] C. P. Steinmetz, *Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena*, 3rd ed. New York: McGraw, 1900.
- [2] S. D. T. Robertson and S. Z. G. Zaky, "Analysis of the hysteresis machine - part I," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-88, no. 4, pp. 474-483, 1969.
- [3] M. A. Rahman, "Analytical models for polyphase hysteresis motor," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-92, no. 1, pp. 237-242, 1973.
- [4] B. R. Teare, "Theory of hysteresis-motor torque," *Electrical Engineering*, vol. 59, no. 12, pp. 907-912, 1940.
- [5] H. C. Roters, "The hysteresis motor - advances which permit economical fractional horsepower ratings," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 66, no. 1, pp. 1419-1430, 1947.
- [6] M. Jagiela, T. Garbiec, and M. Kowol, "Design of high-speed hybrid hysteresis motor rotor using finite element model and decision process," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 2, pp. 861-864, 2014.
- [7] R. Galluzzi, A. Tonoli, and N. Amati, "Magnetic hysteresis machines for next-generation electric turbochargers," in *2017 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive*, 2017, pp. 1-5.
- [8] J. F. Gieras, R. J. Wang, and M. J. Kamper, *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, 2nd ed. Springer, 2008.
- [9] A. Darabi, M. Sadeghi, and A. Hassannia, "Design optimization of multistack coreless disk-type hysteresis motor," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 4, pp. 1081-1087, 2011.
- [10] T. Ishikawa and T. Kataoka, "Basic analysis of disc-type hysteresis motors," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 101, no. 6, pp. 55-62, 1981.
- [11] A. Darabi, H. Lesani, T. Ghanbari, and A. Akhavanhejazi, "Modeling and optimum design of disk-type hysteresis motors," in *Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on*, 2007, pp. 998-1002.
- [12] M. Modarres, A. Vahedi, and M. Ghazanchaei, "Effect of Air gap variation on characteristics of an Axial flux hysteresis motor," in *Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), 2010 1st*, 2010, pp. 323-328.
- [13] A. Darabi, T. Ghanbari, and M. Sanati-Moghadam, "Slotless axial flux hysteresis motor, modelling and performance calculation," *IET Electric Power Applications*, vol. 3, no. 5, pp. 491-501, 2009.

- [14] A. Darabi, M. Sanati-Moghadam, and T. Ghanbari, "Coreless dual-rotor disc hysteresis motor, modeling, and performance prediction," *Electric Power Components and Systems*, vol. 38, no. 5, pp. 575-591, 2010.
- [15] I. D. Mayergoyz, *Mathematical Models of Hysteresis and Their Applications*. New York: Elsevier Science, 2003.
- [16] M. A. Rahman, M. A. Copeland, and G. R. Slemon, "An analysis of the hysteresis motor part III: parasitic losses," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-88, no. 6, pp. 954-961, 1969.
- [17] M. L. Hodgdon, "Applications of a theory of ferromagnetic hysteresis," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 24, no. 1, pp. 218-221, 1988.
- [18] D. C. Jiles and D. L. Atherton, "Theory of ferromagnetic hysteresis," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 61, no. 1-2, pp. 48-60, 1986.
- [19] G. Nagy, "The Hysteresis Motor," Master of Engineering, Department of Electrical Engineering, McGill University, Montreal, 1960.
- [20] C. Liang and L. Ge, "Complete parallelogram hysteresis model for electric machines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 3, pp. 626-632, 2010.
- [21] R. Nasiri-Zarandi and M. Mirsalim, "Analysis and torque calculation of an axial flux hysteresis motor based on hyperbolic model of hysteresis loop in Cartesian coordinates," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 7, pp. 1-10, 2015.
- [22] R. Nasiri-Zarandi and M. Mirsalim, "Finite-element analysis of an axial flux hysteresis motor based on a complex permeability concept considering the saturation of the hysteresis loop," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 2, pp. 1390-1397, 2016.
- [23] M. Modarres, A. Vahedi, and M. Ghazanchaei, "Study on axial flux hysteresis motors considering airgap variation," *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, vol. 2, no. 4, pp. 252-257, 2010.
- [24] R. Nasiri-Zarandi, M. Mirsalim, and A. Tenconi, "A novel hybrid hysteresis motor with combined radial and axial flux rotors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 3, pp. 1684-1693, 2016.
- [25] F. Parvin, R. Nasiri-Zarandi, M. Mirsalim, and A. Cavagnino, "General design algorithm for a hybrid hysteresis motor based on mathematical modeling," in *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2016, pp. 1656-1661.
- [26] T. Ghanbari, M. S. Moghadam, and A. Darabi, "Comparison between coreless and slotless kinds of dual rotor discs hysteresis motors," *IET Electric Power Applications*, vol. 10, no. 2, pp. 133-140, 2016.
- [27] B. J. Chalmers and A. S. Mulki, "Synchronous motor with combined hysteresis, reluctance and induction torques," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 118, no. 7, pp. 907-908, 1971.

- [28] B. J. Chalmers and I. R. Ciric, "Performance analysis of hysteresis-reluctance motors with segmental rotors," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 121, no. 9, pp. 991-992, 1974.
- [29] M. Azizur Rahman and A. M. Osheiba, "Steady-state performance analysis of polyphase hysteresis-reluctance motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-21, no. 3, pp. 659-663, 1985.
- [30] G. Wakui, "Hysteresis motor with reaction torque and its analysis," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 98, no. 5, pp. 58-67, 1978.
- [31] G. Wakui, K. Kurihara, and T. Kubota, "Radial flux type hysteresis motor with reaction torque--Numerical analysis of hysteresis motor using finite element method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 23, no. 5, pp. 3845-3852, 1987.
- [32] T. Kataoka, "Unified analysis of solid rotor induction and hysteresis motors," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 95, no. 3, pp. 60-67, 1975.
- [33] M. Jagiea, J. Bumby, and E. Spooner, "Time-domain and frequency-domain finite element models of a solid-rotor induction/hysteresis motor," *IET Electric Power Applications*, vol. 4, no. 3, pp. 185-197, 2010.
- [34] G. Wakui, K. Kurihara, and T. Kubota, "Radial flux type hysteresis motor with rotor ring of copper-sprayed surface layer," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 112, no. 4, pp. 132-143, 1992.
- [35] A. M. Osheiba, J. Qian, and M. A. Rahman, "Performance of hysteresis permanent magnet motors," *Electric Machines & Power Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 265-280, 1989.
- [36] M. Azizur Rahman and R. Qin, "Starting and synchronization of permanent magnet hysteresis motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 5, pp. 1183-1189, 1996.
- [37] M. Azizur Rahman and R. Qin, "A permanent magnet hysteresis hybrid synchronous motor for electric vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, no. 1, pp. 46-53, 1997.
- [38] M. Modarres and K. Byung-il, "Rotor design to improve dynamic performance of axial flux hysteresis motors," *IET Electric Power Applications*, vol. 9, no. 1, pp. 44-49, 2015.
- [39] B. Ali and D. Ahmad, "Analytical modeling of disc-type permanent magnet hysteresis motor in steady-state operational conditions," *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 36, no. 4, pp. 991-1007, 2017.
- [40] M. Azizur Rahman, "Field analysis of polyphase hysteresis motor," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-99, no. 3, pp. 1164-1171, 1980.
- [41] S. Gavril and A. Mor, "An analysis of the hysteresis motor," *Electric Machines & Power Systems*, vol. 7, no. 3, pp. 203-214, 1982.

- [42] R. D. Jackson, M. A. Rahman, and G. R. Slemon, "Analysis and determination of ring flux distribution in hysteresis motors," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 8, pp. 2743-2749, 1983.
- [43] F. A. A. Zaher, "An analytical solution for the field of a hysteresis motor based on complex permeability," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 5, no. 1, pp. 156-163, 1990.
- [44] J. Perard and M. Poloujadoff, "Subsynchronous torque calculation in a shaded pole hysteresis motor," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 95, no. 3, pp. 994-999, 1976.
- [45] J. PÉRard and M. Poloujadoff, "Hysteresis machine torque: alternative demonstrations of Teare's formula," *Electric Machines & Power Systems*, vol. 7, no. 5, pp. 325-330, 1982.
- [46] T. Kubota, H. Sawa, G. Wakui, and M. Itagaki, "Experimental formula for pull-out torque of hysteresis motor with space higher harmonics," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 109, no. 5, pp. 93-102, 1989.
- [47] K. Hong-Kyu, J. Hyun-Kyo, and H. Sun-Ki, "Finite element analysis of hysteresis motor combined with magnetization-dependent model," in *Electric Machines and Drives Conference Record, 1997. IEEE International, 1997*, pp. MC1/2.1-MC1/2.3.
- [48] L. Hak-Yong, H. Song-Yop, P. Gwan-Soo, and K.-S. Lee, "Torque computation of hysteresis motor using finite element analysis with asymmetric two dimensional magnetic permeability tensor," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 5, pp. 3032-3035, 1998.
- [49] H. Sun-Ki, K. Hong-Kyu, K. Hyeong-Seok, and J. Hyun-Kyo, "Torque calculation of hysteresis motor using vector hysteresis model," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, no. 4, pp. 1932-1935, 2000.
- [50] M. Repetto and P. Uzunov, "Analysis of hysteresis motor starting torque using finite element method and scalar static hysteresis model," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 5, pp. 2405-2408, 2013.
- [51] M. A. Copeland and G. R. Slemon, "An analysis of the hysteresis motor I - analysis of the idealized machine," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 82, no. 65, pp. 34-42, 1963.
- [52] M. A. Copeland and G. R. Slemon, "An analysis of the hysteresis motor II - the circumferential-flux machine," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 83, no. 6, pp. 619-625, 1964.
- [53] S. F. Rabbi and M. A. Rahman, "Equivalent circuit modeling of an interior permanent magnet hysteresis motor," in *Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2014 IEEE 27th Canadian Conference on*, 2014, pp. 1-5.
- [54] M. Azizur Rahman and A. M. Osheiba, "Dynamic performance prediction of polyphase hysteresis motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 26, no. 6, pp. 1026-1033, 1990.

- [55] A. H. Niasar and A. Ghanbari, "Evaluation of various dynamic modeling methods of a circumferential-flux hysteresis motors," in *2016 7th Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC)*, 2016, pp. 1-6.
- [56] A. H. Niasar, A. Ghanbari, and A. PirZadeh, "An improved analytical dynamic modeling of hysteresis motor," in *2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2016, pp. 879-884.
- [57] G. Wakui, "Effect of high harmonic fields on the characteristics of hysteresis motors. Fundamental consideration I: Case of single higher harmonic," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 93, no. 1, pp. 36-46, 1973.
- [58] G. Wakui, "Effect of higher harmonic fields on the operating characteristics of hysteresis motor. Part II: Case where two or more higher harmonics exist," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 93, no. 2, pp. 66-74, 1973.
- [59] G. Wakui, "Operating characteristics of capacitor split-phase hysteresis motors driven by square voltage source," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 94, no. 6, pp. 87-95, 1974.
- [60] S. Kajita, "Analysis of the characteristics of hysteresis motor taking into account higher harmonics of magnetomotive force," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 96, no. 5, pp. 40-48, 1976.
- [61] S. Gavril and A. Mor, "Influence of stator slotting on the synchronous performance of the hysteresis machine," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 318, no. 3, pp. 201-213, 1984.
- [62] D. O'Kelly, "Computation of hysteresis motor performance including negative sequence excitation," *Electric Power Applications, IEE Proceedings -*, vol. 143, no. 2, pp. 157-164, 1996.
- [63] D. Schieber, "Asynchronous performance of hysteresis motor," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 299, no. 6, pp. 433-447, 1975.
- [64] J. Perard and M. Poloujadoff, "Asynchronous performances of hysteresis motors under unbalanced conditions," *Electric Machines & Power Systems*, vol. 1, no. 4, pp. 377-389, 1977.
- [65] A. Mor and S. Gavril, "Eddy current effects on the asynchronous performance of the hysteresis machine," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 314, no. 2, pp. 77-93, 1982.
- [66] S. Gavril and A. Mor, "Asynchronous performance of hysteresis motor considering eddy-current effects," *Electric Machines & Power Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 57-67, 1983.
- [67] T. Horii, N. Yuge, and G. Wakui, "Analysis of a hysteresis motor on asynchronous speed using complex permeability," *IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan*, vol. 9, no. 2, pp. 135-142, 1994.

- [68] D. O'Kelly, "Hysteresis motor with overexcitation and solid-state control," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 125, no. 4, pp. 288-292, 1978.
- [69] G. Wakui and S. Nishino, "Performance of hysteresis motor after short-duration overexcitation (underexcitation) and its analysis," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 101, no. 3, pp. 100-109, 1981.
- [70] T. Kataoka, T. Ishikawa, and T. Takahashi, "Analysis of a hysteresis motor with overexcitation," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 18, no. 6, pp. 1731-1733, 1982.
- [71] G. Wakui, I. Ohashi, and K. Kurihara, "Automatic operation of hysteresis motor with short duration overexcitation," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 103, no. 6, pp. 98-105, 1983.
- [72] T. Kubota, T. Tamura, and K. Kurihara, "High-Efficiency operation of PWM inverter-driven hysteresis motor with short-duration overexcitation," in *Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009. International Conference on*, 2009, pp. 1-4.
- [73] T. Kubota, K. Kurihara, and T. Tamura, "Characteristics of PWM inverter-driven hysteresis motor with short-duration overexcitation," in *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2010 International Conference on*, 2010, pp. 1429-1433.
- [74] T. Kubota, T. Tamura, and K. Kurihara, "New scheme for high-efficiency operation of PWM inverter-driven hysteresis motor with short-duration overexcitation," in *Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on*, 2010, pp. 1-6.
- [75] S. Clurman, "On hunting in hysteresis motors and new damping techniques," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 7, no. 3, pp. 512-517, 1971.
- [76] A. Darabi, M. Rafiei, and T. Ghanbari, "Hunting in hysteresis motors, impact of supply," in *Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on*, 2007, pp. 1715-1718.
- [77] H. R. Soroush, A. R. Rahmati, H. Moghbelli, A. Vahedi, and A. H. Niasar, "Study on the hunting in high speed hysteresis motors due to the rotor hysteresis material," in *EUROCON 2009, EUROCON '09. IEEE*, 2009, pp. 677-681.
- [78] J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*, 2nd ed. Wiley, 2014.
- [79] J. F. Gieras, *Permanent Magnet Motor Technology :Design and Applications*, 3rd ed. CRC Press, 2010.
- [80] T. A. Lipo, "Principles of Design," in *Introduction to AC Machine Design*: John Wiley & Sons, Inc., 2017, pp. 251-303.
- [81] K. R. Rajagopal, "Design of a compact hysteresis motor used in a gyroscope," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 39, no. 5, pp. 3013-3015, 2003.
- [82] B. D. Cullity and C. D. Graham, *Introduction to Magnetic Materials*: John Wiley & Sons, Inc., 2008.

- [83] F. Preisach, "Über die magnetische Nachwirkung," *Zeitschrift für Physik*, vol. 94, no. 5-6, pp. 277-302, 1935.
- [84] I. D. Mayergoyz, "Mathematical models of hysteresis," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 22, no. 5, pp. 603-608, 1986.
- [85] O. Henze and W. M. Rucker, "Identification procedures of Preisach model," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 38, no. 2, pp. 833-836, 2002.
- [86] G. Biorci and D. Pescetti, "Analytical theory of the behaviour of ferromagnetic materials," *Il Nuovo Cimento (1955-1965)*, vol. 7, no. 6, pp. 829-842, 1958.
- [87] Z. Szabó, I. Tugyi, G. Kádár, and J. Füzi, "Identification procedures for scalar Preisach model," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 343, no. 1, pp. 142-147, 2004.
- [88] G. Bertotti, "Chapter 13 - Collections of Bistable Units," in *Hysteresis in Magnetism*, San Diego: Academic Press, 1998, pp. 433-477.
- [89] B. Azzerboni, M. Carpentieri, G. Finocchio, and M. Ipsale, "Super-Lorentzian Preisach function and its applicability to model scalar hysteresis," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 343, no. 1, pp. 121-126, 2004.
- [90] B. Azzerboni, E. Cardelli, and G. Finocchio, "A comparative study of Preisach scalar hysteresis models," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 343, no. 1, pp. 164-170, 2004.
- [91] E. Fallah and V. Badeli, "A New Approach for Modeling of Hysteresis in 2-D Time-Transient Analysis of Eddy Current Using FEM," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 53, no. 7, pp. 1-14, 2017.
- [92] Y. O. Amor, M. Feliachi, and H. Mohellebi, "A new convergence procedure for the finite element computing associated to Preisach hysteresis model," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 36, no. 4, pp. 1242-1245, 2000.
- [93] P. Alotto, P. Girdinio, and P. Molfino, "A 2D finite element procedure for magnetic analysis involving non-linear and hysteretic materials," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 30, no. 5, pp. 3379-3382, 1994.

Abstract

Hysteresis motors are among the main selections for some special high speed applications, e.g. centrifuges, gyroscopes, and turbochargers, because of their unique features. The operation mechanism of these motors is based on the magnetic hysteresis phenomenon. Unfortunately, due to the complexities of accurate hysteresis models, as well as their coupling the modern modeling techniques of electric machines, approximate methods have been used in most of the previous researches on the hysteresis motors. In this dissertation, the capabilities of multi-stack structures of disk-type hysteresis motors are investigated. Stators with slotless magnetic core and without magnetic core have been proposed to be employed in these structures, in order to reduce the parasitic losses. An algorithm is presented for design optimization of the studied motors, in which the shortcomings of previous works have been resolved. A novel approach has been introduced for the indirect coupling of classical Preisach model and finite element model of the studied motors. This approach is based on the linear approximation of the hysteresis characteristic for each point of the hysteresis disk, between two successive time instants. To find the accurate field distribution inside the hysteresis disk, a separate Preisach block has been considered for each spatial field component of each element in the rotor mesh. The finite element model has been replaced by a new integral model of the studied motors, in order to reduce the calculations time, and hence, another modeling method has been proposed for these motors. It is shown that the new method is very accurate and it is much faster than the first method. An important result of these modelings is that the parasitic losses are negligible for the studied structures. The proposed procedures for design optimization and modeling of the motors have been verified by the experimental results obtained from a prototyped sample motor. Capabilities and limitations of the slotless and coreless motors have been compared. Furthermore, through a systematic experimental method, studied structures have been compared on the basis of some important criteria. The most important result of these comparisons is that the circumferential flux path in hysteresis disks is superior to the axial flux path.

Keywords:

Coreless stator, coupling of models, design optimization, finite element model, hysteresis motor, hysteresis phenomenon, multi-stack disk-type structure, Preisach model, slotless core, transient and dynamic modeling



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical Engineering and Robotic

Ph.D. Thesis in Power Electronic and Machine Engineering

**Modeling, Optimal Design, and Comparison of Multi-Stage
Disk-Type Hysteresis Motors with
Slotless and Coreless Stators**

By: Hamed Tahanian

Supervisor:
Prof. Ahmad Darabi

January 2018