



ماشین های الکتریکی

مؤلف:

سید محمد تقی نبوی رضوی

سرشناسه : نبوی رضوی، سید محمدتقی،
 عنوان و نام پدیدآور : ماشین‌های الکتریکی / سید محمدتقی نبوی رضوی
 مشخصات نشر : تهران: دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، بسیج دانشجویی، ۱۳۹۵
 مشخصات ظاهری : [۴۴۰] ص: مصور (رنگی)، جدول (رنگی)، نمودار (رنگی)
 شابک : ۹۷۸-۶۰۰-۶۹۲۷-۷۶-۳ ۳۵۰۰۰۰ ریال
 وضعیت فهرست نویسی : فیپا
 موضوع : ماشین آلات برقی
 موضوع : Electric machinery
 موضوع : ماشین‌آلات برقی -- آزمونها و تمرینها (عالی)
 رده‌بندی دیویی : ۶۲۱/۳۱۰۴۲
 رده‌بندی کنگره : TK۲۱۸۱/۲۳م۲ ۱۳۹۵
 شماره کتاب‌شناسی ملی : ۴۵۲۵۹۳۸

نام کتاب : ماشین‌های الکتریکی
 مؤلف : سید محمدتقی نبوی رضوی
 ناشر : بسیج دانشجویی دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
 با همکاری : مرکز خدمات آموزشی نصیر
 نوبت چاپ : اول
 سال و محل نشر : تهران، ۱۳۹۵
 ناظر فنی چاپ : احسان ابویی، علیرضا داودی مقدم
 حروفچینی و صفحه‌آرایی : سعید آزاد
 گرافیکست : سعید آزاد
 طرح جلد : محمدرضا حاج محمدحسینی
 تیراژ : ۱۰۰۰ جلد
 قیمت : ۳۵۰۰۰ تومان
 شابک : ISBN ۹۷۸-۶۰۰-۶۹۲۷-۷۶-۳

* هرگونه چاپ و تکثیر از این اثر ممنوع و به موجب بند ۵ ماده ۲ قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان پیگرد قانونی دارد.
 نشانی: خیابان شریعتی، نرسیده به پل سید خندان، دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، مرکز خدمات آموزشی نصیر
 تلفن: ۸۸۴۶۶۹۳۵-۸۸۴۶۴۷۸۰

مقدمه ناشر

پس از انتشار کتب «مدارهای الکتریکی»، «الکترونیک ۲»، «۵۰۰ تست تألیفی کنترل خطی»، «تجزیه تحلیل سیگنال‌ها و سیستم‌ها»، «کنترل خطی»، «الکترومغناطیس» و «بررسی سیستم‌های قدرت» از مجموعه کتاب‌های رشته مهندسی برق «مرکز خدمات آموزشی نصیر»، بار دیگر توفیق یافتیم تا با انتشار کتاب «ماشین‌های الکتریکی» به قلم استاد گرانقدر و فرهیخته آقای، سید محمد تقی نبوی رضوی، خدمت دیگری به دانشجویان عزیز ارائه نماییم. کتاب پیش روی شما به گونه‌ای نگاشته شده که هم برای دانشجویان کارشناسی قابل استفاده بوده و هم برای داوطلبان آزمون کارشناسی ارشد مورد استفاده قرار می‌گیرد و از این نظر مجموعه‌ای کامل است که نیاز دانشجویان را به هر مرجع دیگری برطرف می‌سازد.

«مرکز خدمات آموزشی نصیر» وابسته به بسیج دانشجویی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، اولین مرکز آموزشی در حیطه‌ی آمادگی آزمون‌های کارشناسی ارشد در کشور است که از شروع فعالیت‌های آن قریب به ۲۵ سال می‌گذرد. این مرکز که در سال ۱۳۷۱ توسط دانشجویان بسیجی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی راه‌اندازی شد در طی این سال‌ها همواره در حال رشد و ترقی و تعالی بوده است و علاوه بر گسترش حیطه فعالیت‌ها و گسترش کمی مخاطبان آن، کیفیت آموزش و سطح علمی آن همواره روند رو به رشدی را داشته است. با توجه به اینکه این مرکز زیرمجموعه بسیج دانشجویی می‌باشد، اصلی‌ترین هدف خود را خدمت‌رسانی، عدالت آموزشی و ارتقاء علمی دانشجویان قرار داده و از این جهت شاخص‌ترین مرکز آموزشی در میان مؤسسات مشابه است. و این حقیقت فراتر از یک ادعا می‌باشد و از این جهت همواره به عنوان مرکزی خوش‌نام و موفق در میان اساتید و دانشجویان محترم مطرح بوده است و به علت اینکه مسئولین و کادر این مرکز خود نیز اغلب از دانشجویان دانشگاه‌های تهران هستند بیشترین ارتباط را با دانشجویان مخاطب این مرکز دارا بوده و از نقطه نظرات آنان همواره استفاده نموده است. در زیر نکاتی برای آشنایی بیشتر شما مخاطب گرامی با این مرکز ذکر می‌شود:

۱. استفاده از اساتید مجرب و طراز اول دانشگاه‌های تهران که به لحاظ علمی جزو سرآمدترین اساتید کشور می‌باشند از اصلی‌ترین نقاط قوت این مرکز است. اعتقاد ما بر این است که به این نقطه از موفقیت هرگز نائل نمی‌شدیم مگر با مساعدت و تلاش و همکاری صادقانه اساتید گرانقدری که بزرگ‌ترین انگیزه آنان نیز در این مسیر، هدف مقدس و والایی است که سرلوحه فعالیت‌های مرکز قرار گرفته است.
۲. رویکرد ما همواره افزایش سطحی کیفی فعالیت‌ها در عین ارائه آن با کمترین هزینه می‌باشد که با تحقق این مهم، هدف اصلی ما که خدمت‌رسانی و ارتقاء هر چه بیشتر علمی دانشجویان این مرز و بوم در کنار عدالت آموزشی می‌باشد محقق می‌شود.
۳. با توجه به برگزاری ۲۵ سال کلاس‌های آموزشی و ۱۵ سال آزمون‌های آزمایشی، تجربه گرانقدری اندوخته‌ایم که یکی از عوامل اصلی موفقیت روز افزون ما است. این تجربیات که در مواردی سایر مؤسسات نیز از آن استفاده کرده‌اند و از آن الگو گرفته‌اند، همواره این مرکز را در جایگاه پیشروترین مؤسسه آموزشی کارشناسی ارشد و دکتری قرار داده است.

۴. **با توجه به اهداف ذکر شده، شهریه ارائه شده کمترین مقدار را در میان تمام مؤسسات مشابه دارا می‌باشد، که این اختلاف عمیق بعضاً باعث تعجب و ایجاد سؤال برای مخاطبانی گردیده که تازه با این مرکز آشنا شده‌اند. ولی آشنایی بیشتر آنان با مجموعه راه را در جهت دریافت پاسخ باز می‌نماید.**

با توجه به سابقه درخشان این مرکز در طی این سال‌ها و ضعف موجود در زمینه کتاب‌های کارشناسی ارشد به لحاظ کیفی، این مجموعه تصمیم بر آن گرفت که در این زمینه نیز وارد شده و افتخاری دیگر به افتخارات خود بیفزاید.

"مجموعه کتاب‌های کارشناسی ارشد نصیر" که از این پس به مرور در اختیار علاقمندان قرار خواهد گرفت، مجموعه‌ای بی‌نظیر با رویکردی نوین و ویژگی‌های منحصر به فرد می‌باشد به طوری که داوطلبان بعد از مراجعه به آن، نیازی به استفاده از منبع دیگری نخواهند داشت و نظر به همکاری اساتید گرانقدری که کوله‌باری از تجربه ارزشمند علمی را در سطح دانشگاه‌ها و کلاس‌های مرکز خدمات آموزشی نصیر با خود دارند و رعایت بالاترین کیفیت در صفحه آرایی و چاپ، دانشجویان عزیز لذت واقعی یادگیری را خواهند چشید. در این جا لازم است از زحمات فراوان استاد گرانقدر آقای سید محمد تقی نبوی رضوی در تألیف این اثر ارزشمند کمال قدردانی را بنماییم. در پایان اجر معنوی فعالیت‌های این مرکز را تقدیم می‌کنیم به شهدای دفاع مقدس، این شمع‌های همیشه فروزان بشریت که با مقاومت مردانه خود حماسه‌ای جاوید آفریدند.

مرکز خدمات آموزشی نصیر

مقدمه مؤلف

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ وَصَلَّى اللَّهُ عَلَى وَلِيِّ أَمْرِهِ الْمَهْدِيِّ عَجَّلَ اللَّهُ لَهُ الْفَرَجَ

نوشته‌ای که پیش رو دارید به مباحثی از نظریه‌ی ماشین‌های الکتریکی می‌پردازد. این مباحث از مدارهای مغناطیسی آغاز می‌شود و در پی آن اصول تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی، ترانسفورماتورهای تک‌فاز و سه‌فاز، موتورهای القائی سه فاز می‌آید؛ و نوشته سرانجام با سامان‌دادن مبحث ماشین‌های الکتریکی جریان مستقیم پایان می‌یابد.

کوشیده شده تا هریک از عناوین یاد شده به کوتاهی و رسائی تشریح شود. اما دنبال کردن روند استنتاج مناسب بخش‌های گوناگون هر یک از مباحث از نظر دور داشته نشده. آری آن جایی که استدلال پیش‌نیاز یک بخش به درازا می‌کشد و با به اختصار نوشتن منافات دارد، تنها به ترسیم دورنمای استدلال اکتفا شده است. پا به پای تبیین هر بخش از مباحثی تلاش شده مثال‌های مناسبی آورده شود تا خواننده را به فهم عمیق مباحث کمک کند.

در پایان هر یک از مباحث، همگی پرسش‌هایی از آزمون سالیانه‌ی سراسری ورودی دانشگاه‌ها در مقطع کارشناسی ارشد، که با دانستن مطالب آن مبحث حل می‌شود، آورده شده است. به هر پرسش با توضیح مناسب پاسخ داده شده اما با تطویل همراه نیست و مطالعه‌کننده را به کمی اندیشیدن ناچار می‌کند.

نویسنده مدعی است پاسخ برخی از پرسش‌ها در جواب‌های چهارگانه پیشنهادشده از سوی طراحان یافت نمی‌شود، و از این رو پاسخی که به گمان نویسنده درست به نظر می‌رسد با استدلال در ذیل پرسش آمده. البته تعداد این گونه پرسش‌ها که گاه به نادرستی محتوای پرسش هم تسری پیدا می‌کند بسیار کم است. متن پرسش‌های یادشده عمدتاً از چندین مجلد کتابی که در آن برخی از همکاران من در دانشگاه تهران عهده‌دار حل همگی پرسش‌های آزمون‌های سراسری سالیانه در رشته‌ی مهندسی برق شده‌اند، و توسط موسسه‌ی انتشارات دانشگاه تهران انتشار یافته، نقل شده است. هیچ گونه تغییری در متن پرسش‌ها داده نشده مگر به ندرت و به ضرورت. بنا بر این ای بسا نحوه‌ای ابهام و نارسائی ادبی در متن برخی پرسش‌ها به نظر آید. سعی شده تا هر مرجعی که به نوعی در تدوین این نوشته دخالت پیدا کرده، تا آن جایی که در خاطر داشته‌ام، در پایان کتاب ذکر شود.

از خداوند می‌خواهم تا این نوشته، که بی شک از نارسائی‌ها به دور نیست، در فهمیدن درس ماشین‌های الکتریکی در محدوده‌ی کارشناسی برای مطالعه‌کنندگان آن سودمند افتد.

وَلِلَّهِ الْحَمْدُ أَوَّلًا وَآخِرًا،

وَصَلَّى عَلَيَّ مُحَمَّدٌ وَآلِهِ وَعَجَّلَ اللَّهُ فَرَجَهُمْ بِقَائِمِهِمْ.

سید محمد تقی نبوی رضوی

۱۳۹۵/۹/۱۹

فصل اول مدارهای مغناطیسی.....	۱
۱-۱- تحلیل مدارهای مغناطیسی.....	۱
۱-۱-۱- فرآیند تحلیل یک مدار مغناطیسی.....	۳
۱-۲- رفتار مغناطیسی مواد.....	۶
۱-۳- تلفات مغناطیسی در تحلیل مدارهای مغناطیسی.....	۱۱
۱-۴- مدل سازی‌های مدار مغناطیسی.....	۱۶
۱-۴-۱- مدار مغناطیسی به مثابه‌ی مجموعه‌های از رگولانسها و نیروهای محرکه‌ی مغناطیسی.....	۱۶
۱-۴-۲- مدار معادل الکتریکی مدار مغناطیسی.....	۱۸
مسائل پایانی فصل اول.....	۲۰
فصل دوم تبدیل انرژی، پدیدار گشتن نیرو و گشتاور در مدارهای مغناطیسی.....	۵۳
۲-۱- نیرو و گشتاور الکترومغناطیسی در سیستم‌های تک‌تحریکی.....	۵۳
۲-۲- نیرو و گشتاور الکترومغناطیسی در سیستم‌های چندتحریکی.....	۵۹
۲-۳- نگاهی به چند اصل در تبدیل انرژی ماشین‌های الکتریکی.....	۶۴
مسائل پایانی فصل دوم.....	۶۷
فصل سوم ترانسفورماتورها.....	۱۰۳
۳-۱- ترانسفورماتور ایده‌آل.....	۱۰۳
۳-۲- ترانسفورماتور واقعی.....	۱۰۹
۳-۳- مدار معادل الکتریکی ترانسفورماتور با عناصر یکانی شده.....	۱۱۶
۳-۴- مدارهای معادل الکتریکی تقریبی ترانسفورماتور.....	۱۱۹
۳-۵- زیر بار رفتن ترانسفورماتور و تحلیل عملکرد آن در حالت با باری.....	۱۲۱
۳-۶- آزمایش‌هایی برای دست یافتن به عناصر مدار معادل الکتریکی ترانسفورماتور.....	۱۲۶
۳-۷- محاسبه‌ی تقریبی راندمان ترانسفورماتور.....	۱۳۲
۳-۸- موازی کردن ترانسفورماتورها.....	۱۳۵
۳-۹- اتوترانسفورماتور تک‌فاز ایده‌آل.....	۱۴۰
۳-۱۰- ترانسفورماتور سه‌فازه.....	۱۴۰
۳-۱۰-۱- نگاهی گذرا به اصول شبکه‌های سه‌فازه‌ی متعادل.....	۱۴۴
۳-۱۰-۲- سه ترانسفورماتور تک‌فاز مشابه به مثابه‌ی ترانسفورماتور سه‌فازه.....	۱۴۶
مسائل پایانی فصل سوم.....	۱۵۰

فصل چهارم موتورهای القائی سه فازه ۲۱۱

- ۴-۱- ماشین‌های الکتریکی القائی ۲۱۱
- ۴-۲- توزیع فضائی چگالی میدان مغناطیسی سیم‌پیچی یک فاز از فازهای سه‌گانه ۲۱۳
- ۴-۳- پدیدآمدن میدان گردان مغناطیسی در شکاف هوائی ماشین القائی ۲۱۴
- ۴-۳-۱- میدان‌های گردان دیگر هارمونیک‌های فضائی توزیع چگالی میدان ۲۱۶
- ۴-۴- رفتار موتور القائی در هنگام بازبودن پایانه‌های سیم‌پیچیهای رتور ۲۱۸
- ۴-۵- رفتار موتور القائی در هنگام اتصال کوتاه‌شدن سیم‌پیچی رتور، زیر بار رفتن موتور القائی ۲۱۹
- ۴-۶- تحلیل الکتریکی و مکانیکی موتور القائی ۲۲۵
- ۴-۶-۱- نمودار گشتاور- سرعت موتور القائی و روابط ساده‌شده‌ی موتور ۲۲۹
- ۴-۷- آزمایش‌هائی برای اندازه‌گیری پارامترهای مدار معادل الکتریکی ماشین القائی ۲۳۴
- ۴-۸- راه‌اندازی موتور القائی ۲۳۸
- ۴-۹- کنترل سرعت موتور القائی ۲۴۳

مسائل پایانی فصل چهارم ۲۵۱

فصل پنجم ماشین‌های جریان مستقیم ۳۰۹

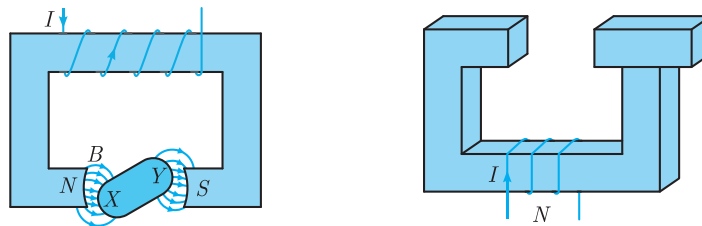
- ۵-۱- ساختمان استاتور ماشین جریان مستقیم و توزیع فضایی چگالی میدان قطب‌ها ۳۰۹
- ۵-۲- نیروی محرکه‌ی القائی در یک کلاف با گام قطبی ۳۱۱
- ۵-۳- نگاهی به یکسوسازی مکانیکی نیروی محرکه‌ی القائی ۳۱۵
- ۵-۴- میدان مغناطیسی پدیدآمده از عبور جریان در سیم‌پیچی رتور، میدان عکس‌العمل آرمیچر ۳۱۷
- ۵-۵- مدار معادل‌های الکتریکی سیم‌پیچی رتور و سیم‌پیچی استاتور ۳۱۹
- ۵-۶- تأثیرگذاری کیفی عکس‌العمل آرمیچر بر عملکرد ماشین جریان مستقیم ۳۲۰
- ۵-۷- انواع ماشین‌های الکتریکی جریان مستقیم و توان، گشتاور و سرعت در آنها ۳۲۵
- ۵-۸- مدارهای معادل الکتریکی ماشین‌های الکتریکی مستقیم ۳۳۲
- ۵-۹- شرایط پدیدآمدن نیروی محرکه‌ی القائی در ژنراتورهای تحریک سرخود ۳۳۶
- ۵-۱۰- نمودارهای $V_L - I_a$ (ولت- آمپر) در ژنراتورهای گوناگون ۳۳۹
- ۵-۱۰-۱- ژنراتور تحریک شنت ۳۳۹
- ۵-۱۰-۲- ژنراتور کمپوند ۳۴۰
- ۵-۱۰-۳- ژنراتور تحریک جداگانه ۳۴۲
- ژنراتور تحریک سری ۳۴۳
- ۵-۱۱- در نظرگرفتن اشباعگشتن مغناطیسی در تحلیل رفتار ژنراتور جریان مستقیم ۳۴۳
- ۵-۱۲- راه‌اندازی موتور جریان مستقیم ۳۴۵
- ۵-۱۳- کنترل سرعت موتورهای جریان مستقیم ۳۴۷
- متوقفکردن موتورهای جریان مستقیم ۳۵۰
- مسائل پایانی فصل پنجم ۳۵۳
- مراجع ۴۳۳

فصل اول

مدارهای مغناطیسی

درآمد

تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی در موتورها و یا تحول یافتن انرژی مکانیکی به الکتریکی در ژنراتورها در فضایی رخ می‌دهد که در آنجا میدان مغناطیسی پدید آمده باشد. ساختارهایی که میدان مغناطیسی را در فضایی مناسب برای تبدیل انرژی الکترومکانیکی فراهم می‌آورند مدارهای مغناطیسی نام دارند. اجزای یک مدار مغناطیسی پیکره‌ای از ماده‌ی مغناطیسی است که بر روی آن یک یا چند سیم‌پیچی تعبیه شده که از هر یک آن‌ها جریان الکتریکی عبور می‌کند. از مغناطیس دائم در برخی مدارهای مغناطیسی بهره گرفته می‌شود. از آنجایی که در بسیاری از مدارهای مغناطیسی جابه‌جایی و چرخش رخ می‌دهد، ناگزیر در پیکره‌ی ماده‌ی مغناطیسی گسستگی پیش می‌آید. این گسستگی‌ها به شکل شکاف‌های هوایی در مدارهای مغناطیسی بروز می‌کند.



شکل ۱-۱- دو مدار مغناطیسی با حرکت دورانی و دیگری با حرکت خطی

۱-۱- تحلیل مدارهای مغناطیسی

راه و رسمی پیشنهاد می‌شود تا با تقریب مناسبی بتوان شدت میدان مغناطیسی یا چگالی میدان مغناطیسی را در همگی نقاط یک مدار مغناطیسی چه درون مواد مغناطیسی و چه درون شکاف‌های هوایی به‌دست آورد. پیش‌فرض‌های ضروری عبارتند از:

- ۱) توزیع جریان‌های سیم‌پیچی‌ها فقط و فقط در مواد مغناطیسی و شکاف‌های هوایی که با مواد مغناطیسی احاطه شده‌اند میدان مغناطیسی پدید می‌آورند.
- ۲) در همگی بخش‌های پیکره‌ی مدار مغناطیسی یک مسیر میانگین در نظر گرفته می‌شود. این کار به شکل شهودی انجام می‌گیرد.
- ۳) فصل مشترک هر بخش از پیکره‌ی مدار مغناطیسی را با صفحه‌ای که بر مسیر میانگین عمود می‌شود، سطح مقطع مدار در آن بخش نامگذاری می‌کنیم.

(۴) شدت میدان مغناطیسی و چگالی میدان مغناطیسی در نقطه‌ی تلاقی سطح مقطع و مسیر میانگین با H_{av} و B_{av} نمایش داده می‌شود. در نظر می‌گیریم در همگی نقاط روی یک سطح مقطع شدت میدان برابر H_{av} و چگالی میدان برابر B_{av} است. به خاطر می‌سپاریم راستای شدت میدان و چگالی میدان بر سطح مقطع عمود است.

بر این پایه شار گذرنده از هر سطح مقطع از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد.

$$\varphi = \int_{A_m} \vec{B} \cdot \vec{ds} = AB_{av} \quad (1-1)$$

که در این رابطه A_m ، سطح مقطع مدار مغناطیسی است و A اندازه‌ی مساحت آن. بزرگ‌ترین بخش‌های یک مدار مغناطیسی که شار گذرنده از هر سطح مقطع دلخواه آن، در یک لحظه اندازه‌ی یکسانی دارد، یک شاخه‌ی مغناطیسی نام می‌گیرد. به بخشی از شاخه‌ی مغناطیسی که سطح مقطع آن در همه‌جا برابر و از یک جنس است قطعه شاخه گفته می‌شود. در یک قطعه شاخه که در شکل (۱-۲) نمایش داده شده شار گذرنده از هر سطح مقطع یکسان است، چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی در همگی نقاط آن برابر H_{av} و B_{av} است و افت پتانسیل مغناطیسی در آن از رابطه‌ی (۱-۲) محاسبه می‌شود.

$$V_{mag} = \int_a^b \vec{H} \cdot \vec{dl} = L_{av} \cdot H_{av} \quad (1-2)$$

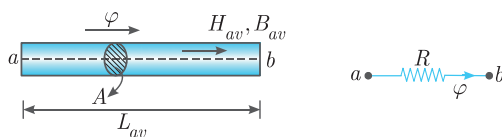
که L_{av} ، طول میانگین قطعه شاخه است.

اگر قطعه شاخه از ماده‌ی مغناطیسی با ضریب نفوذ ثابت μ ساخته شده باشد و سطح مقطع آن A باشد آنگاه می‌توان رابطه‌ی (۱-۲) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$V_{mag} = L_{av} H_{av} = \left(\frac{L_{av}}{A\mu}\right)(A\mu H_{av}) = \left(\frac{L_{av}}{A\mu}\right)(AB_{av}) = R\varphi \quad (1-3)$$

$R = \frac{L_{av}}{A\mu}$ رلوکتانس یا مقاومت مغناطیسی قطعه شاخه است:

قطعه شاخه را می‌توان متناظر با یک مقاومت مغناطیسی R دانست که شار مغناطیسی φ از آن می‌گذرد.



(الف). ۱-۲

(ب). ۱-۲

شکل ۱-۲- قطعه شاخه و مدل متناظر آن

(الف) یک قطعه شاخه و مشخصه‌های آن (ب) مدل متناظر با یک قطعه شاخه، مقاومت مغناطیسی که شاری از آن می‌گذرد

رلوکتانس قطعه شاخه‌ای که ماده‌ی مغناطیسی آن ضریب نفوذ ثابتی ندارد وابسته به شار گذرنده از آن خواهد بود. در این حالت رلوکتانس غیرخطی است. اما رلوکتانس قطعه شاخه‌ای که رفتار مغناطیسی ماده‌ی سازنده‌ی آن خطی است، تنها به ابعاد و ضریب نفوذ بستگی دارد و اندازه‌ی آن همواره یکسان خواهد بود.

۱-۱-۱- فرآیند تحلیل یک مدار مغناطیسی

برای به دست آوردن شدت میدان و چگالی میدان مغناطیسی در هر نقطه‌ی مدار مغناطیسی بایستی شارهای گذرنده از شاخه‌ها را بدانیم. برای دست یافتن به شارهای شاخه‌ها کافی است ابعاد قطعه شاخه‌ها، منحنی تغییرات $B - H$ ماده مغناطیسی سازنده‌ی قطعه شاخه‌ها و آمپر دور سیم‌پیچی‌ها را در اختیار داشته باشیم. در آغاز ضروری است قطعه شاخه‌های مدار مغناطیسی مشخص شوند. شار گذرنده از هریک از قطعه شاخه‌ها همان شار شاخه‌ی مغناطیسی دربرگیرنده‌ی آن است (φ_j). پس برای هریک از آن‌ها B_{avk} ، H_{avk} در نظر گرفته می‌شود.

بخشی از مدار مغناطیسی که در آن بیش از دو شاخه به هم متصل می‌شوند گره مغناطیسی نام دارد و در هر گره مغناطیسی خواهیم داشت:

$$\oint_s \vec{B} \cdot \vec{ds} = \sum_{j=1}^n \varphi_j = 0 \quad (1-4)$$

s نشان‌دهنده‌ی یک سطح بسته دلخواه است که گره مغناطیسی درون آن جای دارد و φ_j ‌ها نشان‌دهنده‌ی شارهای شاخه‌هایی است که گره مغناطیسی را تشکیل داده‌اند. در این رابطه شارهای خروجی با علامت مثبت و شارهای ورودی با علامت منفی در نظر گرفته می‌شود.

هر مسیر مسدود از شاخه‌های مغناطیسی در یک مدار مغناطیسی حلقه مغناطیسی نام یافته. در مسیر میانگین شاخه‌هایی که یک حلقه‌ی مغناطیسی را می‌سازند، قانون مداری آمپر؛ $\oint \vec{H} \cdot \vec{dl} = \int \vec{J} \cdot \vec{ds}$ به کار گرفته می‌شود. چون یک حلقه‌ی مغناطیسی از تعدادی شاخه ساخته شده و هر شاخه متناظر با چندین قطعه شاخه است، قانون مداری آمپر به روابط زیر منتهی می‌گردد:

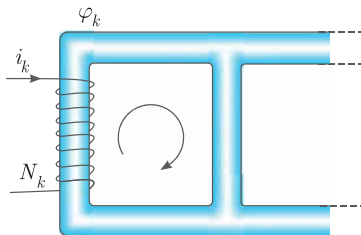
$$\oint \vec{H} \cdot \vec{dl} = \sum_{j=1}^n H_{avj} \cdot L_{avj} = \sum_{j=1}^n R_j \varphi_j \quad (1-5-1)$$

$$\int \vec{J} \cdot \vec{ds} = \sum_{k=1}^m N_k I_k \quad (1-5-2)$$

$$\sum_{j=1}^n H_{avj} \cdot L_{avj} = \sum_{j=1}^n R_j \varphi_j = \sum_{k=1}^m N_k I_k \quad (1-5-3)$$

گذرنده از قطعه شاخه‌ی j ام در یک حلقه‌ی مغناطیسی است. n برابر تعداد قطعه شاخه‌های همان حلقه φ_j ، R_j ، L_{avj} ، H_{avj} ، طول میانگین، مقاومت مغناطیسی و شار

است. N_k ، تعداد حلقه‌های k امین سیم‌پیچی از m سیم‌پیچی است که بر روی شاخه‌های حلقه‌ی مغناطیسی نصب شده و I_k جریان گذرنده از آن سیم‌پیچی است. از آنجایی که کمیت $N_k I_k$ عامل ایجاد شار مغناطیسی است نیروی محرکه‌ی مغناطیسی (mmf) نام دارد و واحد آن آمپر دور AT است. اگر جهت چرخش به هنگام نوشتن رابطه‌ی (۱-۵-۱) در یک حلقه با جهت φ_j یا H_{avj} یکسان شود. $R_j \varphi_j$ یا $H_{avj} L_{avj}$ با علامت مثبت در نظر گرفته می‌شود و در غیر این صورت از علامت منفی استفاده می‌کنیم. به طریق مشابه در هنگام به کار گرفتن رابطه‌ی (۱-۵-۲) برای یک حلقه، اگر جهت چرخش هم‌جهت با شاری باشد که سیم‌پیچی k ام به تنهایی در مدار مغناطیسی پدید می‌آورد. $N_k I_k$ را با علامت مثبت در نظر می‌گیریم و در غیر این صورت از علامت منفی استفاده می‌کنیم.



شکل ۱-۳-۱- اگر جهت φ_k اری که سیم‌پیچی k ام به تنهایی پدید می‌آورد با جهت چرخشی که برای نوشتن افت پتانسیل‌ها به کار می‌آید یکسان باشد $N_k I_k$ با علامت مثبت در نظر گرفته می‌شود.

همگی معادله‌های ناپسته‌ای که از به کار بستن (۱-۴) در گره‌های مغناطیسی و (۱-۵-۳) در حلقه‌های مغناطیسی به دست می‌آیند، به شرط آن که افت پتانسیل مغناطیسی در شاخه‌های مغناطیسی به شکل $R\varphi$ نوشته شوند، برای دسترسی به شار همگی شاخه‌ها کافی است. لازم به ذکر است این مجموعه معادله‌ها تنها برای تحلیل مدارهای مغناطیسی که همگی مواد مغناطیسی به کار رفته در آن رفتار خطی دارند (ضریب نفوذهای مواد مغناطیسی ثابت هستند) مناسب است.

اگر همگی معادله‌های پیشین در نظر گرفته شوند اما در معادله‌های ناشی از گره‌ها شارها به صورت $A_j B_{avj}$ بازنویسی شوند، افت پتانسیل مغناطیسی در قطعه شاخه‌ها به شکل $H_{avj} L_{avj}$ نوشته شوند و سرانجام رابطه‌ی $B - H$ در هر ماده‌ی هریک از قطعه شاخه‌ها به این معادله‌ها ملحق گردد، مجموعه معادلات ضروری برای محاسبه‌ی B_{av} ، H_{av} در هر قطعه شاخه به دست می‌آید. ذکر مجدد این نکته ضروری است که این مجموعه معادلات تنها برای تحلیل مدارهای مغناطیسی که در آنها مواد مغناطیسی با رفتار مغناطیسی غیرخطی به کار رفته مناسب است.

* در آغاز طول میانگین هسته را محاسبه می‌کنیم:

$$L_{av} = 2[(740 + 15 + 15) + (940 + 15 + 15)] = 3480 \text{ mm}$$

اکنون شدت میدان را به دست می‌آوریم:

$$H_{max} = 1.6 - 0.5 \cdot 5 (1.6)^2 \approx 1.4 \text{ A/m}$$

$$H_e = \frac{1.4}{\sqrt{2}} = 0.99 \approx 1$$

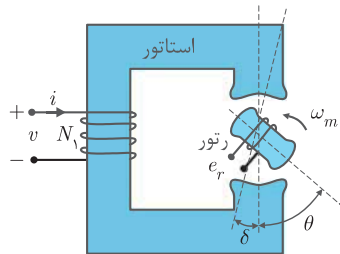
$$N = \frac{V_e}{4.44 f A B_{max}} = \frac{100}{4.44 \times 50 \times (30 \times 30 \times 10^{-4}) \times 1.6} = 312.8 \approx 313 \quad \text{حلقه}$$

با به کار گرفتن قانون آمپر در هسته:

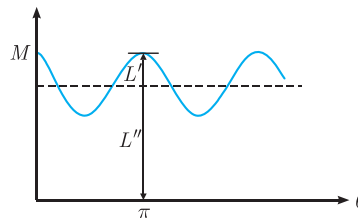
$$1 \times 313 \times 48 = 313 \times I_{mag}$$

$$I_{mag} = 100.97 \approx 11 \text{ mA}$$

۱۲- در یک سیستم الکترومکانیکی مطابق شکل *a* رتور با سرعت زاویه‌ای ω_m می‌چرخد. سیم‌پیچی N_1 حامل جریان مستقیم I_{dc} است. تغییرات اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچی رتور در حین گردش رتور نیز در شکل *b* نشان داده شده است؟ ولتاژ القاء شده مدار باز بر روی سیم‌پیچی رتور برابر است با:



(a)



(b)

$$e_r = -\omega_m L' I_{dc} \sin(\omega_m t + \delta) \quad (2) \quad e_r = -2\omega_m L'' I_{dc} \sin(\omega_m t + \delta) \quad (1)$$

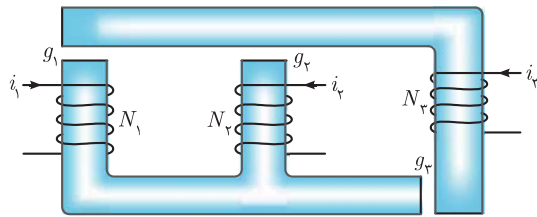
$$\text{صفر} \quad (4) \quad e_r = -2\omega_m L' I_{dc} \sin(\omega_m t + \delta) \quad (3)$$

$$300i = 2(10 \times 10^{-2} \times 400 + 9 \times 10^{-2} \times 1600)$$

$$i = 1,33 A$$

۲۵- در مدار مغناطیسی شکل زیر هسته آهنی ایده آل و سطح مقطع آن در تمام قسمت‌های مدار برابر A فرض می‌شود. اندوکتانس متقابل L_{12} از کدام رابطه زیر به دست می‌آید؟ فرض شود که $g_1 = g_2 = g$ ،

$$g_1 = \frac{1}{2}g$$



$$\frac{\mu_0 AN_1 N_2}{4g} \quad (2)$$

$$\frac{\mu_0 AN_1 N_2}{5g} \quad (1)$$

$$\frac{\mu_0 AN_1 N_2}{2g} \quad (4)$$

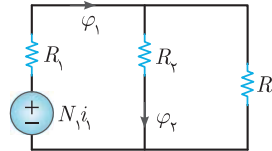
$$\frac{\mu_0 AN_1 N_2}{2,5g} \quad (3)$$

(سال ۱۳۹۰)

* مدار کولتانی زیر با توجه به آنکه مقاومت مغناطیسی شاخه‌ها ناچیز است. برای محاسبه‌ی اندوکتانس متقابل سیم‌پیچی‌های یکم و دوم کارساز است. جریان‌های سیم‌پیچی‌های دوم و سوم صفر فرض می‌شوند:

$$R_1 = \frac{1/2g}{\mu_0 A}$$

$$R_2 = R_3 = \frac{g}{\mu_0 A}$$



رکولتانس معادل را به دست می‌آوریم:

$$R_{eq} = R_1 + (R_2 || R_3) = \frac{1/2g}{\mu_0 A} + \frac{1}{2} \frac{g}{\mu_0 A}$$

$$= \frac{g}{\mu_0 A}$$

اکنون ϕ_1 و ϕ_2 را مشخص می‌کنیم:

$$\phi_1 = \frac{N_1 i_1}{R_{eq}} = \frac{N_1 i_1}{\frac{g}{\mu_0 A}} = \frac{\mu_0 AN_1}{g} i_1$$

$$\phi_2 = \frac{1}{2} \phi_1 = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 AN_1}{g} i_1$$

و سرانجام:

$$L_{12} = \frac{N_2 \phi_2}{i_1} = \frac{N_2}{i_1} \frac{1}{2} \frac{\mu_0 AN_1}{g} i_1 = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 N_1 N_2 A}{g}$$

از این پس مقادیر کمیت‌های خواسته شده را حساب می‌کنیم:

اندازه‌ی القاگری خودی در $x = 0.5 \text{ mm}$:

$$L = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(1 \times 10^{-4})(1000)^2}{(2 \times 0.5)(10^{-2})} = 0.126 \text{ H}$$

در این سیستم انرژی و کوانرژی برابر هستند:

$$W_f = W_c = \frac{1}{2} L i^2 = \frac{1}{2} \times 0.126 \times 1 = 0.063 \text{ J}$$

و سرانجام به نیروی الکترومغناطیسی خواهیم رسید:

$$f = -\frac{1}{4} \times \frac{(4\pi \times 10^{-7})(1 \times 10^{-4})(1000)^2}{(0.5 \times 10^{-2})^2} \times 1^2 = -125.7 \text{ N}$$

مثال ۲

در یک عملگر الکترومغناطیسی: $\lambda = 0.06 \frac{\sqrt{i}}{x} \text{ Wb}$ ، $0 < x < 0.04 \text{ m}$ ، $0 < i < 9 \text{ A}$ اگر این

عملگر در فاصله‌ی $x = 0.02 \text{ m}$ و $i = 8 \text{ A}$ تنظیم گردد نیروی الکترومغناطیسی پدیدآمده چه اندازه است؟

پاسخ

$$W_c(i, x) = \int_{(x,0)}^{(x,i)} \lambda di' = \int_{(x,0)}^{(x,i)} \frac{0.06 \sqrt{i'}}{x} di' = \frac{0.06}{x} \times \frac{2}{3} i^{\frac{3}{2}} = 0.04 \frac{i \sqrt{i}}{x} \text{ J}$$

$$f_c = \frac{\partial W_c}{\partial x} = -0.004 \frac{i \sqrt{i}}{x^2}$$

$$f_c = -0.004 \frac{8 \sqrt{8}}{(0.02)^2} = -\frac{0.004 \times 8 \times 2.828}{10^{-4}} = -90 \text{ N}$$

روشی را که برای رسیدن به f_c دنبال کردیم در یک سیستم الکترومکانیکی گردان به کار می‌بریم. در این سیستم‌های

گردان بخش متحرک همواره گرداگرد یک محور می‌چرخد. پی‌گیری روند یاد شده به روابط متناظری برای محاسبه‌ی τ_e ،

گشتاور الکترومغناطیسی می‌انجامد. سیاهه‌ی آن روابط عبارتند از:

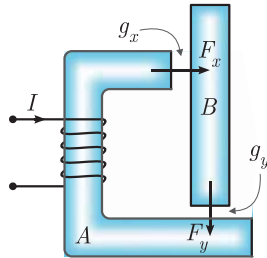
$$dW_f = i d\lambda - \tau_e d\theta \quad dW_c = \lambda di + \tau_e d\theta \quad (2-11)$$

$$\tau_e = -\frac{\partial W_f}{\partial \theta} = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} \quad i = \frac{\partial W_f}{\partial \lambda} \quad \lambda = \frac{\partial W_c}{\partial i} \quad (2-12)$$

$$W_f(\lambda, \theta) = \int_{(\theta,0)}^{(\theta,\lambda)} i(\theta, \lambda') d\lambda' \quad W_c(i, \theta) = \int_{(\theta,0)}^{(\theta,i)} \lambda(\theta, i') di' \quad (2-13)$$

$$W_f = \frac{1}{2} \Gamma(\theta) \lambda^2 = \frac{1}{2} R(\theta) \varphi^2 \quad W_c = \frac{1}{2} L(\theta) i^2 \quad (2-14)$$

۲۵- به ازای جریان I در سیم‌پیچی مدار شکل مقابل، چگالی شار در فاصله هوایی g_y برابر $\frac{1}{4} T$ است. سطح مقطع در قسمت‌های A و B به ترتیب ۲ و ۴ سانتی‌مترمربع است. از شکستگی شار، پراکندگی شار و افت آهن صرف‌نظر می‌شود. F_x و F_y برابرند با: ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$)



$$F_x = F_y = \frac{\lambda^2}{\pi} \quad (1)$$

$$F_x = F_y = \frac{16}{\pi} \quad (2)$$

$$F_x = \frac{\lambda^2}{\pi}, F_y = \frac{16}{\pi} \quad (3)$$

$$F_x = \frac{16}{\pi}, F_y = \frac{\lambda^2}{\pi} \quad (4)$$

(سال ۱۳۸۳)

* در آغاز انرژی ذخیره‌شده در مجموعه را به دست می‌آوریم:

$$\varphi = 4 \times 10^{-4} \times 0.4 = 1.6 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$R(x, y) = \frac{x}{2 \times 10^{-4} \mu_0} + \frac{y}{4 \times 10^{-4} \mu_0} = \frac{2x + y}{4 \times 10^{-4} \mu_0}$$

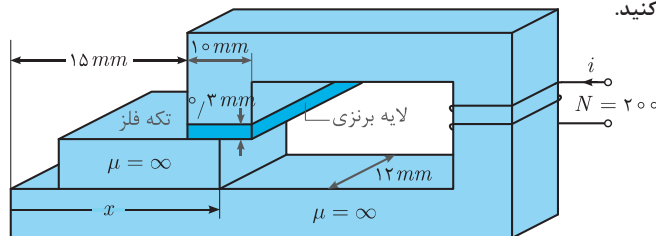
$$W_f = \frac{1}{2} R(x, y) \varphi^2 = \frac{2.56 \times 10^{-8}}{8 \times 10^{-4} \mu_0} (2x + y) = \frac{0.32 \times 10^{-4}}{\mu} (2x + y)$$

مشتق‌های جزئی نسبت به x و y نیروها را در دو راستای x و y به دست می‌دهد:

$$F_x = -\frac{\partial W_f}{\partial x} = -\frac{0.64 \times 10^{-4}}{\mu_0} = -\frac{0.64 \times 10^{-4}}{4\pi \times 10^{-7}} = -\frac{16}{\pi} \text{ N}$$

$$F_y = -\frac{\partial W_f}{\partial y} = -\frac{0.32 \times 10^{-4}}{\mu_0} = -\frac{0.32 \times 10^{-4}}{4\pi \times 10^{-7}} = -\frac{8}{\pi} \text{ N}$$

۲۶- در مدار مغناطیسی مقابل تکه فلز تنها مجاز به حرکت در جهت x است. لایه برنزی مانع از حرکت در جهت قائم است. به ازاء $i = 10 \text{ A}$ و $15 \text{ mm} < x < 25 \text{ mm}$ نیروی وارد در جهت x چقدر است؟ از پراکندگی شار در فاصله هوایی صرف‌نظر کنید.



$$10.5 \text{ N} \quad (1)$$

$$12 \text{ N} \quad (2)$$

$$50.25 \text{ N} \quad (3)$$

$$100.5 \text{ N} \quad (4)$$

(سال ۱۳۸۳)

از اینجا به دو معادله‌ی غیرخطی دسترسی پیدا می‌کنیم:

$$V_{Lu} I_{Lu} \cos \alpha = 0.8, \quad V_{Lu} I_{Lu} \sin \alpha = 0.6$$

با توجه به رابطه‌ی افت ولتاژ خواهیم داشت:

$$1 \angle 0^\circ = (0.125 \angle 125^\circ)(I_{Lu} \angle \alpha - 37^\circ) + (j 0.1 \angle 484^\circ)(I_{Lu} \angle \alpha - 37^\circ) + \bar{V}_{Lu}$$

از این تساوی نیز به دو معادله‌ی غیرخطی دیگر می‌رسیم:

$$I_{Lu} (0.125 \cos(\alpha - 37^\circ) + 0.1 \cos(\alpha + 53^\circ)) + V_{Lu} \cos \alpha = 1$$

$$I_{Lu} (0.125 \sin(\alpha - 37^\circ) + 0.1 \sin(\alpha + 53^\circ)) + V_{Lu} \sin \alpha = 0$$

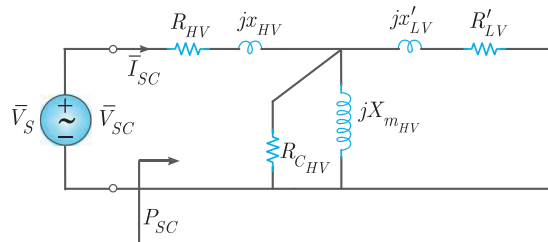
از چهار معادله‌ی غیرخطی که در اختیار داریم به: V_{Lu} , I_{Lu} , $\sin \alpha$ و $\cos \alpha$ می‌توان دسترسی پیدا کرد بی‌شک راهی دراز در پیش داریم که پاسخ‌هایی در حدود همان روش تقریبی را آشکار می‌سازند.

۳-۶- آزمایش‌هایی برای دست یافتن به عناصر مدار معادل الکتریکی

ترانسفورماتور

دو آزمایش بی‌باری و اتصال کوتاه در ترانسفورماتور زمینه‌ی پی‌بردن به اندازه‌های عناصر مدار معادل الکتریکی ترانسفورماتور را فراهم می‌کنند.

در آزمایش اتصال کوتاه معمولاً دو سر سیم‌پیچی فشار ضعیف اتصال کوتاه می‌گردد و منبع ولتاژی که بتواند جریان نامی فشارقوی را در سیم‌پیچی فشارقوی پدید آورد، آن سیم‌پیچی را تغذیه می‌کند. وسایل اندازه‌گیری جریان، ولتاژ و توان در سیم‌پیچی فشارقوی نصب می‌گردد. به کمک وسایل اندازه‌گیری توان آزمایش اتصال کوتاه P_{sc} و جریان آزمایش اتصال کوتاه I_{sc} و ولتاژ آزمایش اتصال کوتاه V_{sc} را به دست می‌آوریم:



شکل ۳-۸- مدار معادل الکتریکی ترانسفورماتور در آزمایش اتصال کوتاه

اگر عناصر R_{cHV} و X_{mHV} به سبب کمی جریان در آنها از مدار الکتریکی شکل ۳-۸ به کناری گذشته شوند می‌توان به تساوی‌های زیر رسید:

$$P_{sc} = (R_{HV} + R'_{LV}) I_{sc}^2$$

$$R_{scHV} = R_{HV} + R'_{LV} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} \quad (3-30)$$

فصل چهارم

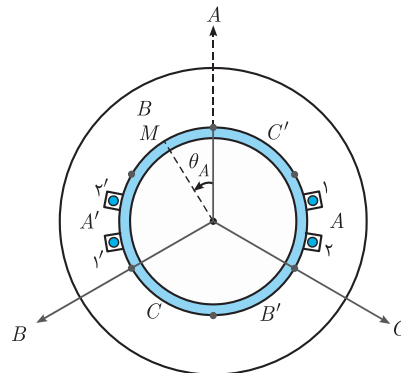
موتورهای القائی سه فازه

درآمد

موتورهای القائی سه فازه از ساده‌ترین ماشین‌های الکتریکی به شمار می‌آیند که با جریان متناوب کار می‌کنند. رفتار الکتریکی این موتورها تشابه چشم‌گیری با عملکرد ترانسفورماتورهای سه‌فازه دارد. از این پس به دنبال آشنایی به ساختار موتور می‌کشیم تا مدار معادل الکتریکی مناسبی برای آن پیشنهاد کنیم. سپس رفتار آن را در حالت ماندگار الکتریکی - مکانیکی تحلیل کنیم. چگونگی راه‌بردن به پارامترهای الکتریکی آن را مشخص کنیم و سرانجام با روش‌های راه‌اندازی و کنترل سرعت آن آشنا شویم.

۴-۱- ماشین‌های الکتریکی القائی

یک ماشین القائی از استاتوری که در آن سیم‌پیچی سه‌فازه نصب شده ساخته می‌شود و رتور آن به دو شکل طراحی می‌گردد، گاه این رتور قفسه‌ای شکل است و گاه سیم‌پیچی شده. در رتور استوانه‌ای شکل تعدادی شیار متقارن ایجاد شده که اگر با شمش‌های فلزی پر شود و ابتداهای آن شمش‌ها با یک حلقه‌ی فلزی و انتهاهایشان با حلقه‌ای دیگر به هم وصل شود رتور قفسه‌ای پدید می‌آید. موتورهای القائی رتور قفسه‌ای با در نظر گرفتن ساختمان شیارهای آن‌ها که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است در چهار رده‌ی A ، B ، C و D جای می‌گیرند.



شکل ۴-۱- شش بخش مشابه شیارهای استاتور برای پایه‌گذاری سیم‌پیچی سه‌فازه‌ی دو قطب تک‌لایه‌ای

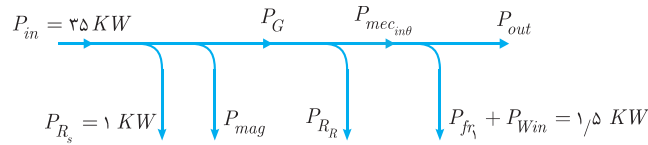
در برخی از موتورهای القائی دو گروه شمش‌های فلزی جداگانه دو قفسه در رتور ایجاد می‌کنند. این گونه را موتور القائی با قفسه‌های دوگانه می‌نامند.

اما اگر شیارها بر روی استوانه‌ی رتور با سه دسته کلاف مشابه که یک سیم‌پیچی سه‌فازه با تعداد قطب‌هایی برابر با تعداد قطب‌های سیم‌پیچی سه‌فازه‌ی استاتور پر شود، رتور سیم‌پیچی شده واقعیت پیدا می‌کند.

در نظر بگیرید شیارهای متقارن استاتور یا رتور به شش بخش متساوی تقسیم گردد. گیریم در هر بخش از یکی از آنها مثلاً دو شیار جای گرفته باشد. همچنان‌که در شکل ۴-۱ نشان داده شده است دو کلاف کاملاً مشابه

پاسخ

داده‌های مثال را به دیاگرام تحول توان انتقال می‌دهیم



تعداد قطبها را باید شش در نظر گرفت. در این حالت:

$$n_s = \frac{120 \times 50}{6} = 1000 \text{ RPM} \rightarrow S = \frac{1000 - 980}{1000} = 0.02$$

چنین مقداری اندازه‌ی مناسبی برای لغزش است. اگر تعداد قطب‌های کمتر و یا بیشتر از ۶ باشد اندازه‌ی لغزش مناسبی به‌دست نمی‌دهد

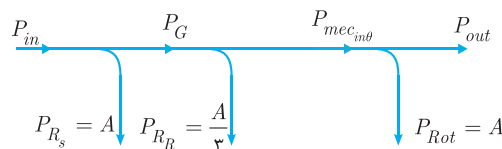
$$\begin{aligned} P_G &= 35 - 1 = 34 \text{ KW} \\ P_{Rr} &= SP_G = 0.02 \times 34 = 0.68 \text{ KW} \\ P_{mec_{in\theta}} &= 34 - 0.68 = 33.32 \text{ KW} \\ P_{out} &= 33.32 - 1.5 = 31.82 \\ \eta &= \frac{31.82}{35} = 0.9091 = 90.91\% \end{aligned}$$

مثال ۹-۴

در یک موتور القایی تلفات اهمی استاتور با تلفات چرخشی برابر است. همین تلفات سه برابر تلفات اهمی رتور است. اگر راندمان موتور ۰.۷۹ باشد لغزش موتور چه اندازه است؟

پاسخ

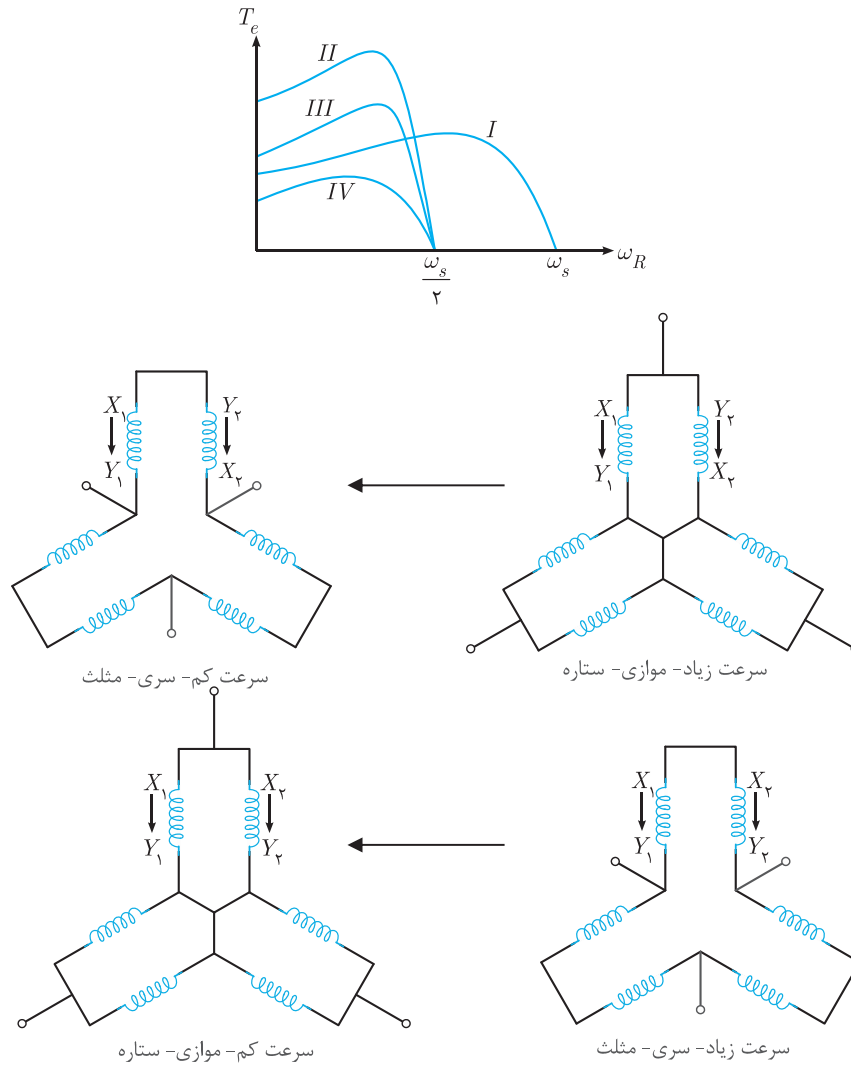
به دیاگرام تحول توان در موتور القایی باز می‌گردیم:



بر این پایه:

$$\begin{aligned} 0.79 &= \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + A + A + \frac{A}{3}} = 0.79 \\ P_{out} &= \frac{0.79 \times \frac{4}{3} A}{0.21} = 1.77 A \end{aligned}$$

اکنون اگر هم زمان با تعویض جریان در یکی از دو سیم‌پیچی سازنده‌ی یک فاز موتور القایی؛ آن دو از اتصال سری یا موازی به موازی یا سری متحول شود و سرانجام اتصال مثلث یا ستاره‌ی سیم‌پیچی‌های استاتور به اتصال ستاره یا مثلث دگرگونه شود نمودار گشتاور-سرعت موتور به سه صورت مختلف نشان داده شده و شکل ۴-۲۲ متحول می‌گردد.



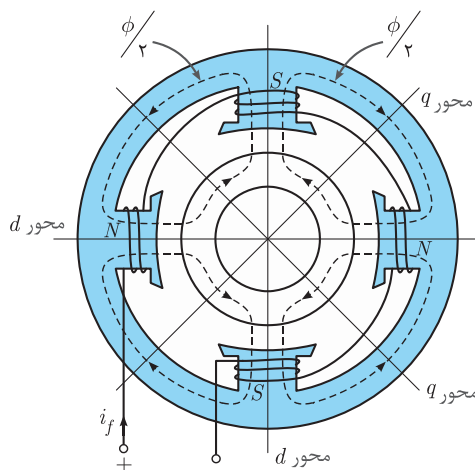
فصل پنجم

ماشین‌های جریان مستقیم

درآمد

امروزه از ژنراتورهای جریان مستقیم بهره‌برداری چندانی نمی‌کنند. بیشتر مبدل‌های ساکن جریان متناوب به جریان مستقیم برجای آنها نشسته‌اند. اما از آن‌رو که ماشین الکتریکی آنگاه که به صورت موتور به کار می‌آید با هنگامی که به شکل ژنراتور به کار گرفته می‌شود تمایز بنیادینی ندارد و از سوئی درک عملکرد ژنراتور جریان مستقیم را به سادگی قدم به قدم می‌توان تبیین کرد؛ از ژنراتورهای جریان مستقیم در تشریح ماشین‌های جریان مستقیم آغاز می‌کنیم.

۵-۱- ساختمان استاتور ماشین جریان مستقیم و توزیع فضایی چگالی میدان قطب‌ها



شکل ۵-۱- نمایش استاتور و رتور یکسان ماشین جریان مستقیم ۴ قطب

در شکل ۵-۱ پیکره‌ی استاتور یک ماشین جریان مستقیم چهار قطب نشان داده شده است. چهار قطب مغناطیسی ماشین با ساختاری متقارن در درون فضای استوانه‌ای شکل استاتور نصب می‌شود. بر روی بدنه‌ی هر یک از قطب‌ها یک دسته یا دو دسته سیم‌پیچی نصب می‌گردد که از آنها جریان‌های تحریک، که جریانی مستقیم هستند، عبور می‌کند. میدان مغناطیسی پدید آمده از جریان‌های تحریک گاهی هم‌جهت هستند و گاهی ناهم‌جهت. سیم‌پیچی‌های تحریک مشابه بر روی بدنه‌های قطب‌ها با یکدیگر سری می‌گردند و یک مدار تحریک ماشین ساخته می‌شود. دو مدار تحریکی که در یک ماشین جریان مستقیم دو تحریکی تعبیه شده و یا یک مدار تحریک ماشین جریان مستقیم تک‌تحریکی از سوی منبع ولتاژ جریان مستقیمی، تغذیه می‌گردد. منبع ولتاژ تحریک گاه همان نیروی محرکه‌ی القائی جریان مستقیم پدید آمده در ژنراتور است و گاهی دیگر منبع ولتاژی متمایز با نیروی محرکه‌ی داخلی عهده‌دار پدیدآوردن جریان تحریک می‌شود. نخستین گروه ماشین‌های تحریک سرخود هستند و گروه دوم ماشین تحریک جداگانه. برای آن که تقارن کامل مغناطیسی پدید آید

پاسخ:

چون از اتصال کلاف‌ها سه مسیر مسدود جداگانه پدید آمده سیم بندی مرکب است و مسیر جریان‌ها برابر است با:

$$a = mp = 3 \times 14 = 42$$

$$Z = 420 \times 20 \times 2 = 16800$$

$$E = \frac{p}{a} Z \phi \frac{n_a}{60} = \frac{14}{42} \times 16800 \times 0.01 \times 42 \times \frac{60}{60} = 235.2V$$

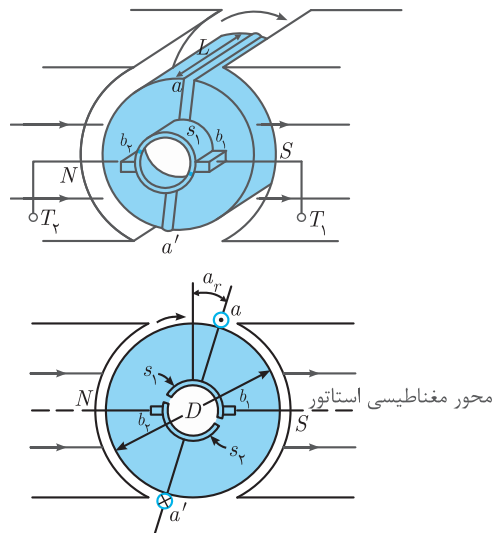
۳-۵- نگاه به یکسوسازی مکانیکی نیروی محرکه‌ی القائی، بنیاد یک ژنراتور**جریان مستقیم و شالوده‌ی یک موتور جریان مستقیم**

اگر پایانه‌های یک کلاف سیم‌پیچی که درون دو شیار از شیارهای رتور جای گرفته به دو نیم‌حلقه متصل گردند و دو قطعه از جنس ذغال (دو جاروبک) در حالی که ساکن هستند همراه با گردش بازوهای کلاف بر روی دو نیم‌حلقه بلغزند، درست آن‌گونه که در شکل (۴-۵) نشان داده شده، نیروی محرکه‌ی القائی که در دو پایانه جاروبک‌ها آشکار می‌گردد یکسو خواهد شد.

تردیدی نیست در اثنای گردش رتور در هنگامی که:

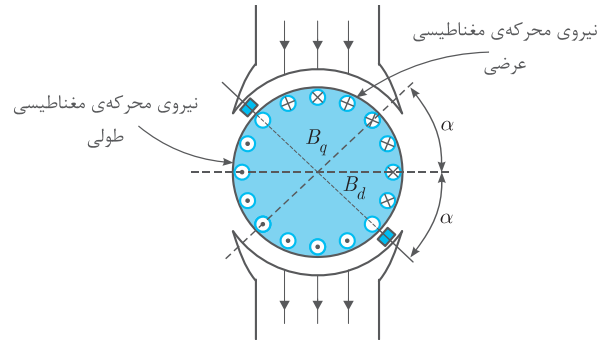
$$\alpha_r = 0$$

نیروی محرکه‌ای در کلاف القاء نمی‌گردد و دو سر کلاف توسط دو جاروبک اتصال کوتاه می‌شود. هنگامی که $0 < \alpha_r < \pi$ ، نیم‌حلقه‌ای که به بازوی a اتصال دارد به جاروبک b_1 وصل است. اگر مسیر کلاف مسدود گردد جریان از پایانه‌ی T_1 خارج می‌گردد و به پایانه‌ی T_2 داخل می‌شود. از این رو T_1 قطب مثبت ژنراتور و T_2 قطب منفی خواهد بود.

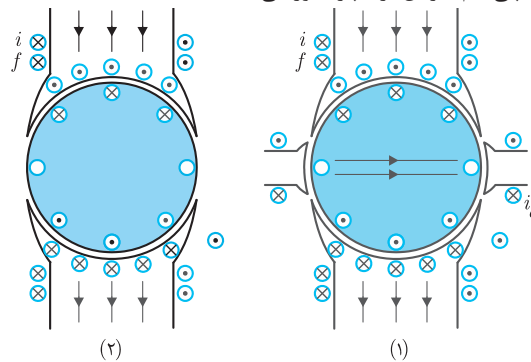


شکل ۴-۵- یک سوسازی (کموتاسیون) مکانیکی در یک کلاف از سیم‌پیچی ماشین جریان مستقیم دو قطب

در شکلی که پس از این آمده توزیع جریان هادی‌های رتور در هنگامی که جاروبک‌ها به محل خنثای مغناطیسی توزیع چگالی میدان در شکاف هوایی به هنگام باباری منتقل یافته، نشان داده شده است.



نصب سیم‌پیچی جبران‌کننده در ماشین الکتریکی که می‌تواند آمپر دور عکس‌العمل را در همگی نقاط شکاف هوایی به شکلی مناسب تضعیف کند اعوجاج پدید آمده در توزیع فضایی چگالی میدان قطب‌ها را کم و بیش از میان می‌برد. از این سیم‌پیچی هم جریان آرمیچر عبور می‌کند.



شکل ۵-۱۰-۵- روش‌های از میان برداشتن تاثیر عکس‌العمل آرمیچر

(۱) قطب‌های کمکی برای از میان برداشتن انحراف محور خنثای مغناطیسی

(۲) سیم‌پیچی جبران‌کننده برای تضعیف اعوجاج پدید آمده در توزیع فضایی چگالی میدان قطب‌ها

مثال ۵-۶

یک ژنراتور جریان مستقیم $520 V$ ، $1800 KW$ و 12 قطب با سیم‌پیچی موجی ساده 2400 هادی دارد. پیشانی هر قطب 70% سطحی را که در درون استاتور به یک قطب نسبت داده می‌شود می‌پوشاند. برای آن که عکس‌العمل آرمیچر کاملاً جبران گردد بایستی سیم‌پیچی جبران‌کننده در برابر هر قطب چند هادی داشته باشد؟