

بسمه تعالی

- عنوان درس: ماشین‌های الکتریکی I
تعداد واحد: ۳ دروس پیش‌نیاز: الکترومغناطیس، مدارهای الکتریکی I
- سرفصل‌های براساس توصیه شورای عالی برنامه‌ریزی
 - ۱- مقدمه کلی در مورد ماشین‌های الکتریکی
 - ۲- مدارهای مغناطیسی
 - محاسبات مدارهای غیرخطی، سری و موازی با فاصله هوایی
 - مدارهای مغناطیسی با تحریک ac و dc
 - فلوهای نشتی و پراکندگی
 - مدارهای مغناطیسی کوپل و مدار معادل آنها
 - ۳- تبدیل انرژی الکترومغناطیسی
 - تعادل انرژی و توان
 - ذخیره انرژی در میدان مغناطیسی
 - نیرو گشتاور در سیستم میدان مغناطیسی تک تحریک و چند تحریک
 - معادلات تعادل انرژی مبدل‌های الکترومغناطیسی با تغییر مکان خطی و دورانی
 - ۴- ماشین‌های جریان مستقیم
 - اصول و ساختمان ماشین‌های DC با سیم فشرده و گسترده
 - انواع سیم‌پیچی آرمیچر
 - کموتاسیون و بهبود آن
 - اثرات عکس‌العمل آرمیچر و جبران آن
 - محاسبه نیروی محرکه و گشتاور
 - نمودار پخش توان و محاسبه تلفات و راندمان
 - روابط اساسی و مدار معادل ماشین
 - ۵- ژنراتورهای جریان مستقیم
 - منحنی مغناطیسی ژنراتور
 - ژنراتورهای با تحریک موازی، سری و مختلط
 - مشخصه‌های بی‌باری و بارداری ژنراتورها
 - کار موازی ژنراتورهای مختلف
 - ۶- موتورهای جریان مستقیم
 - مشخصه‌های بی‌باری و بارداری موتورهای مختلف
 - تغذیه موتور DC از طریق یکسوکننده
 - بررسی راه‌اندازی موتورها و روشهای مختلف آن

- ترمز سریع موتورها
- روشهای کنترل سرعت (معمولی و الکتریکی)
- ۷- ماشینهای جریان مستقیم خاص
 - موتور اونیورسال و مشخصه‌های آن
 - اصول اساسی موتورهای پله‌ای dc
 - موتورهای خطی dc
 - موتورهای dc با مغناطیس دائم

• فصل‌بندی جزوه حاضر

- ۱- معرفی کلی ماشینهای الکتریکی
- ۲- مدارهای مغناطیس
- ۳- تبدیل انرژی الکتریکی ↔ مغناطیسی ↔ مکانیکی
- ۴- اصول کار و ساختار کلی انواع ماشینهای الکتریکی
- ۵- مفاهیم و اجزاء ساختاری ماشینهای الکتریکی جریان مستقیم (dc)
- ۶- ژنراتورهای جریان مستقیم (dc)
- ۷- موتورهای dc و اصول راه‌اندازی و کنترل دور آنها
- ۸- برخی از روشهای مرسوم راه‌اندازی و کنترل دور موتورهای dc
- ۹- آشنایی با موتورهای dc خاص (اونیورسال، مغناطیس دائم، پله‌ای، بدون جاروب)

• نمره‌بندی (بر مبنای ۲۰ نمره)

- تکالیف و امتحانهای کلاسی: ۵ نمره
 - امتحان میان ترم: ۷ نمره
 - امتحان پایان ترم: ۸ نمره
- تبصره - امتحان میان ترم پس از اتمام فصل چهارم برگزار خواهد شد.
تبصره - امتحان پایان ترم فقط شامل بخش دوم درس (فصلهای پنجم تا نهم) خواهد بود.

• مراجع قابل استفاده

- ۱- ماشینهای الکتریکی تألیف دکتر مهرداد عابدی - انتشارات نشر دانش - تهران، چاپ اول پائیز ۱۳۸۴
- ۲- ماشینهای الکتریکی تألیف P.C.Sen ترجمه دکتر مهرداد عابدی و مهندس سید محمد تقی نبوی - انتشارات بصیر تهران - چاپ نهم ۱۳۸۳
- ۳- ماشینهای الکتریکی تألیف P.C.Bimbhra ترجمه دکتر حمید سانی و مهندس جعفر سلطانی، انتشارات قائم ۱۳۷۶

4- A.E.Fizjgerald, C.Kigsley, S.DUmans, Electric Machinery, McGreus - Hall, NewYork, 2003

5- T.wildi, Electrical Machines, Drives and Power Systems, Prentice Hall, USA, 1997

فهرست

۱	فصل اول - معرفی کلی ماشینهای الکتریکی
۱	۱-۱) مقدمه
۱	۲-۱) ژنراتور
۲	۳-۱) الکتروموتور
۴	۴-۱) ترانسفورماتور
۴	۵-۱) قوانین فیزیکی مرتبط با ماشینهای الکتریکی
۵	۶-۱) میدان مغناطیسی
۵	۷-۱) اثر مغناطیسی جریان الکتریکی
۷	۸-۱) نیرو بین سیم حامل جریان و میدان مغناطیسی
۸	۹-۱) اثر الکتریکی میدان مغناطیسی متغیر
۹	۱۰-۱) جهت ولتاژ القا شده در هادی (قانون لنز)
۱۰	۱۱-۱) یادآوری برخی از کمیتها
۱۱	فصل دوم - مدارهای مغناطیسی
۱۱	۱-۲) مواد مغناطیسی
۱۱	۲-۲) مشخصه B-H مواد مختلف
۱۲	۳-۲) مدار مغناطیسی
۱۵	۴-۲) مدار مغناطیسی با فاصله هوایی
۲۰	۵-۲) مدار مغناطیسی با دو منبع mmf
۲۲	۶-۲) مدار مغناطیسی با مشخصه غیرخطی هسته
۲۳	۷-۲) شار پیوندی و اندوکتانس در مدارهای مغناطیسی
۲۴	۸-۲) سلف اندوکتور به عنوان یک عنصر در مدارهای الکتریکی
۲۵	۹-۲) اندوکتانس متقابل
۲۶	۱۰-۲) انرژی در مدارهای مغناطیسی
۲۹	۱۱-۲) مدار مغناطیسی با تحریک ac
۲۹	۱-۱۱-۲) منحنی مغناطیس شونده و پدیده هیستریزیس در مواد مغناطیسی
۳۲	۲-۱۱-۲) هسته با مشخصه خطی با جریان تحریک ac
۳۳	۳-۱۱-۲) مدار مغناطیسی با تحریک ac و هسته بدون هیستریزیس
۳۵	۴-۱۱-۲) مدار مغناطیسی (بدون تقریب) با تحریک ac
۳۶	۱۲-۲) انرژی و تلفات هسته در تحریک با جریان ac
۳۶	۱-۱۲-۲) تلفات هیستریزیس
۳۹	۲-۱۲-۲) تلفات جریان گردابی (Eddy Currents)
۴۱	۳-۱۲-۲) تلفات هسته
۴۲	۱۳-۲) آهنربای دائمی (Permanent Magnet)
۴۵	فصل سوم - تبدیل انرژی الکترومکانیکی
۴۵	۱-۳) مقدمه
۴۵	۲-۳) اصول حاکم بر عملکرد مبدل الکترومکانیکی

۴۵	۳-۲-۱) قانون لورنتس
۴۷	۳-۲-۲) قانون حداقل رلوکتانس (اصل همسویی)
۴۸	۳-۲-۳) قوانین حرکت مکانیکی
۵۰	۳-۲-۴) قانون بقای انرژی
۵۰	۳-۳) انواع مبدل‌های الکترومکانیکی
۵۲	۳-۴) بررسی تبدیل انرژی در مبدل الکترومکانیکی تک تحریکه
۵۲	۳-۴-۱) انواع مبدل تک تحریکه
۵۳	۳-۴-۲) تعادل انرژی‌های موثر در عملکرد مبدل تک تحریکه
۶۴	۳-۴-۳) تبدیل انرژی در مبدل تک تحریکه EM با حرکت زاویه‌ای
۶۵	۳-۴-۴) تبدیل انرژی در مبدل‌های EM تک تحریکه با حرکت دورانی
۶۸	۳-۵) بررسی تبدیل انرژی در مبدل‌های الکترومکانیکی دو تحریکه
۶۸	۳-۵-۱) مبدل EM دو تحریکه با حرکت خطی
۷۰	۳-۵-۲) مبدل EM دو تحریکه با حرکت دورانی
۷۵	فصل چهارم - اصول کار و ساختار کلی ماشین‌های الکتریکی چرخان
۷۵	۴-۱) مفاهیم اولیه
۷۷	۴-۲) کاربرد قوانین الکترومغناطیس در ماشین‌های الکتریکی دوار
۷۹	۴-۳) معرفی ماشین‌های ac و dc
۸۵	۴-۴) MMF سیم‌پیچ‌های گسترده (توزیع شده)
۹۰	۴-۵) میدان‌های مغناطیسی در ماشین‌های چرخان
۹۲	۴-۶) MMF چرخان در ماشین‌های AC
۹۳	۴-۷) تولید ولتاژ
۹۷	۴-۸) گشتاور الکترومغناطیسی در ماشین‌های با قطب غیر برجسته
۱۰۰	فصل پنجم - اصول کلی و ساختاری ماشین‌های dc
۱۰۰	۵-۱) ساختمان ماشین‌های dc
۱۰۰	۵-۱-۱) ساختمان استاتور
۱۰۲	۵-۱-۲) ساختمان روتور (آرمیچر)
۱۰۳	۵-۲) سیم‌بندی آرمیچر
۱۰۴	۵-۲-۱) سیم‌بندی حلقوی ساده Simplex Lap Winding
۱۰۴	۵-۲-۲) سیم‌بندی موجی ساده Simplex Wave Winding
۱۰۶	۵-۳) القای ولتاژ در آرمیچر
۱۰۶	۵-۳-۱) القای ولتاژ در یک کلاف
۱۰۷	۵-۳-۲) یکسوسازی ولتاژ کلاف
۱۰۸	۵-۳-۳) ولتاژ القا شده در آرمیچرهای چند کلافه
۱۱۰	۵-۳-۴) کنترل و تنظیم سطح ولتاژ آرمیچر
۱۱۰	۵-۳-۵) منحنی مغناطیس شونده ماشین dc
۱۱۱	۵-۴) فرآیند کموتاسیون
۱۱۱	۵-۴-۱) عملکرد کموتاتور
۱۱۲	۵-۴-۲) کموتاسیون موفق
۱۱۳	۵-۴-۳) تاثیر خود القایی پیچک در کموتاسیون (ولتاژ راکتانسی آرمیچر)

۱۱۴	۵-۵) عکس العمل آرمیچر و راههای مقابله با آن
۱۱۴	۵-۵-۱) توصیف پدیده عکس العمل آرمیچر
۱۱۵	۵-۵-۲) قطبهای کمکی
۱۱۵	۵-۵-۳) عکس العمل آرمیچر در بارهای متغیر و نقش سیم پیچ جبرانگر
۱۱۶	۵-۶) ایجاد گشتاور در ماشینهای dc
۱۱۷	۵-۷) مدار معادل ماشین dc در حالت پایدار (Steady State)
۱۱۷	۵-۷-۱) مدار معادل سیستم تحریک
۱۱۸	۵-۷-۲) مدار معادل آرمیچر

۱۱۹ فصل ششم - ژنراتورهای جریان مستقیم (Direct Current Generators)

۱۱۹	۶-۱) تحلیل عملکرد ژنراتور dc
۱۱۹	۶-۲) مشخصه و مقادیر نامی
۱۲۰	۶-۳) روشهای اتصال آرمیچر و مدار تحریک
۱۲۰	۶-۳-۱) مدار تحریک مستقل ژنراتور
۱۲۱	۶-۳-۲) مدار تحریک خودی ژنراتور
۱۲۲	۶-۴) ژنراتور dc با تحریک جداگانه
۱۲۲	۶-۴-۱) ژنراتور تحریک مستقل در وضعیت بی باری
۱۲۳	۶-۴-۲) ژنراتور تحریک مستقل در وضعیت بارداری
۱۲۵	۶-۴-۳) تلفات و بازده در ژنراتورهای dc با تحریک مستقل
۱۲۸	۶-۵) ژنراتور dc با تحریک شنت
۱۲۸	۶-۵-۱) ژنراتور dc تحریک شنت در حالت بی باری
۱۳۰	۶-۵-۲) ژنراتور dc با تحریک شنت در حالت بارداری
۱۳۲	۶-۵-۳) تلفات و بازده ژنراتور شنت
۱۳۴	۶-۶) ژنراتور dc با تحریک سری
۱۳۴	۶-۶-۱) فرآیند ولتاژسازی در ژنراتور سری
۱۳۴	۶-۶-۲) مشخصه‌های ژنراتور dc سری
۱۳۶	۶-۷) ژنراتور dc با تحریک کمپوند
۱۳۷	۶-۷-۱) فرآیند ولتاژسازی در ژنراتور کمپوند و مشخصه بی باری ژنراتور
۱۳۷	۶-۷-۲) ژنراتور کمپوند در حالت بارداری
۱۳۸	۶-۷-۳) تلفات و بازده در ژنراتور dc کمپوند اضافی
۱۳۸	۶-۸) موارد استفاده از ژنراتورهای dc

۱۳۹ فصل هفتم - موتورهای جریان مستقیم و اصول راه اندازی و کنترل دور آنها

۱۳۹	۷-۱) تحلیل عملکرد موتور dc
۱۴۰	۷-۲) مشخصه‌های موتورهای dc
۱۴۰	۷-۳) روشهای اتصال آرمیچر و مدار تحریک
۱۴۱	۷-۴) سرعت موتورهای dc
۱۴۲	۷-۵) موتور dc شنت
۱۴۲	۷-۵-۱) مشخصه سرعت-جریان موتور dc شنت
۱۴۲	۷-۵-۲) مشخصه گشتاور-جریان موتور dc شنت
۱۴۳	۷-۵-۳) مشخصه گشتاور-سرعت موتور dc شنت

۱۴۴	۴-۵-۷) بازده موتور dc شنت
۱۴۴	۵-۵-۷) راه‌اندازی موتور شنت
۱۴۵	۶-۵-۷) کنترل سرعت موتور شنت
۱۴۵	۷-۵-۷) ویژگیهای عملکردی موتور شنت
۱۴۵	۸-۵-۷) مقادیر نامی موتور شنت
۱۴۶	۶-۷) موتور dc با تحریک سری
۱۴۶	۱-۶-۷) مشخصه سرعت-جریان موتور dc سری
۱۴۶	۲-۶-۷) مشخصه گشتاور-جریان موتور dc سری
۱۴۶	۳-۶-۷) مشخصه گشتاور - سرعت موتور dc سری
۱۴۷	۴-۶-۷) ویژگیهای عملکردی موتور سری
۱۴۸	۷-۷) موتور dc با تحریک کمپوند
۱۴۸	۱-۷-۷) مشخصه سرعت-جریان موتور کمپوند
۱۴۸	۲-۷-۷) مشخصه گشتاور-جریان موتور کمپوند
۱۴۹	۳-۷-۷) مشخصه گشتاور-سرعت موتور کمپوند
۱۴۹	۴-۷-۷) کاربرد موتور کمپوند

فصل اول - معرفی کلی ماشینهای الکتریکی

۱-۱) مقدمه

تولید، توزیع و مصرف انرژی الکتریکی یکی از مهمترین ویژگیهای تمدن و تکنولوژی جهان امروز است. از همین رو، میزان تولید و مصرف توان الکتریکی به عنوان یک معیار اصلی برای تعیین میزان توسعه یافتگی صنعتی کشورها و جوامع مختلف مطرح می‌شود. نیاز به تاکید نیست که امروزه تقریباً صد درصد انرژی الکتریکی توسط ماشینهای الکتریکی تولید می‌شوند (سهم پیلهای الکتروشیمیایی و برخی از سیستمهای انرژیهای نو همچون پیلهای سوختی (Fuel cell) و یا سلولهای خورشیدی (solar cell) در حال حاضر بسیار ناچیز است). همچنین می‌توان ادعا کرد که بیشترین مصرف انرژی الکتریکی نیز به واسطه ماشینهای الکتریکی انجام می‌شود. نقش غیرقابل حذف ترانسفورماتورها در سیستمهای انتقال و توزیع انرژی الکتریکی نیز بر مهندسان و متخصصان صنعتی پوشیده نیست.

اما بایستی اذعان نمود که علیرغم موقعیت مهم و اساسی ماشینهای الکتریکی، تعریف دقیق و جامعی از آنها وجود ندارد. در واقع هر یک از تعریفهایی که تاکنون برای ماشینهای الکتریکی داده شده، برخی از انواع ماشینها را نادیده گرفته و یا برخی از عناصر دیگر را شامل شده است.

به عنوان مثال هنگامی که گفته شود ماشین الکتریکی یک مبدل انرژی است که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی و بالعکس تبدیل می‌کند. ترانسفورماتورها از این مجموعه خارج شده و در عوض عناصری همچون رله‌ها، سلونوئیدها، دستگاههای اندازه‌گیری آنالوگ و ... به عنوان ماشین در نظر گرفته می‌شوند!

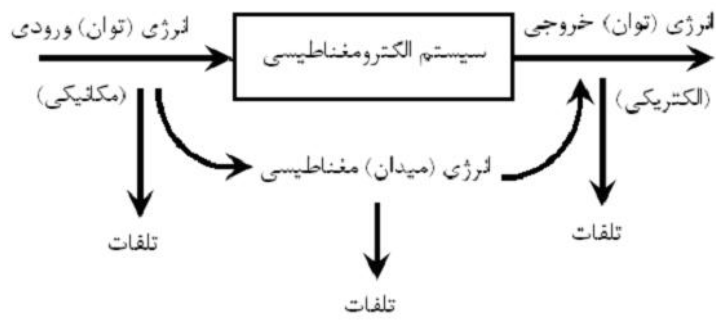
یا حتی هنگامی که بر دوار بودن ماشین تاکید شود. بسیاری از انواع الکتروموتورهای خطی از لیست حذف می‌شوند، که خلاف واقع است.

بنابراین ترجیح می‌دهیم به جای اینکه به دنبال تعریف جامع و مانع (دربارگیرنده تمام ماشینها و جداکننده تمام غیر ماشینها) بگردیم، ۳ گروه اصلی ماشینهای الکتریکی را به ترتیب ذیل در نظر بگیریم:

- ژنراتورها
- الکتروموتورها
- ترانسفورماتورها

۱-۲) ژنراتور

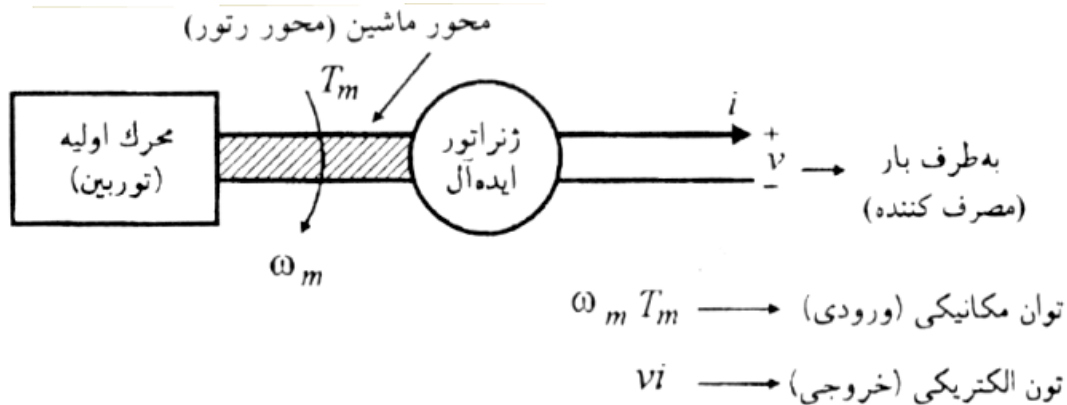
این ماشین انرژی مکانیکی (ورودی) را به انرژی الکتریکی (خروجی) تبدیل می‌نماید و بنابراین یک مبدل الکترومکانیکی است. مهمترین شاخصه در این تبدیل این است که انرژی (یا میدان) مغناطیسی بایستی بصورت انرژی (میدان) واسطه حضور و نقش داشته باشد. در واقع در یک ژنراتور فرآیند تبدیل انرژی ۲ مرحله‌ای است و البته در هر میدان مقداری انرژی بصورت گرما، صوت و تشعشع تلف می‌شود.



شکل (۱-۱)

عموم ژنراتورها، از نوع ماشینهای دوار هستند، یعنی بخشی از ماشین دارای حرکت دورانی دائمی (پیوسته) است تا فرآیند تبدیل انرژی امکان پذیر باشد. در واقع انرژی مکانیکی ورودی به سیستم صرف چرخاندن محور ژنراتور می شود. سیستم تامین کننده این انرژی "محرك اولیه" (Prime Mover) نامیده می شود. اصلی ترین انواع محرکهای اولیه، توربینهای بخار، توربینهای آبی، توربینهای گاز و موتورهای احتراق داخلی هستند. امروزه سهم توربینهای بادی نیز به عنوان محرك اولیه، قابل توجه شده و رو به افزایش است.

انرژی الکتریکی خروجی از ژنراتور برای تغذیه مصرف کننده های گوناگون انرژی الکتریکی، بکار می رود. این مصرف کننده ها را بطور عموم بار الکتریکی (Electrical Load) و یا به اختصار "بار (Load)" می نامند. هنگامی که انرژی الکتریکی توسط بار مصرف می شود. نیروی مکانیکی متقابل با نیروی مکانیکی ورودی ایجاد می شود و بنابراین با افزایش بار، نیروی مکانیکی ورودی بایستی افزایش یابد تا ژنراتور به حرکت خود ادامه داده و تبدیل انرژی انجام شود.



شکل (۲-۱)

بدیهی است در صورتیکه هیچ مصرف کننده انرژی، در خروجی ژنراتور وجود نداشته باشد و ژنراتور ایده آل باشد، (مبدل بدون تلفات) انرژی مکانیکی ورودی به ژنراتور نیز صفر می شود. اما به دلیل وجود تلفات در سیستم مکانیکی، در سیستم مغناطیسی و در سیستم الکتریکی هیچ گاه یک مبدل ایده آل بوجود نخواهد آمد. دو قانون مهم فیزیکی که در توجیه و تحلیل عملکرد ژنراتور نقش اصلی و محوری دارند، عبارتند از قانون القای فارادی و قانون لورنتس. قانون القای فارادی ایجاد ولتاژ (نیروی محرکه الکتریکی) در یک سیستم الکترومغناطیسی را بیان می کند و قانون لورنتس ایجاد نیروی مکانیکی در اینگونه سیستم ها را تشریح می نماید.

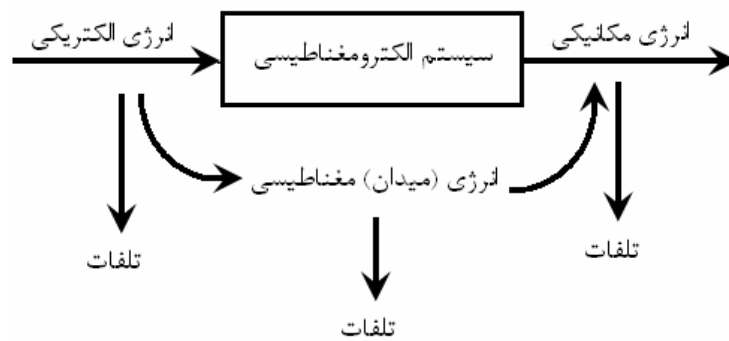
۱-۳) الکتروموتور

اساس کار موتور الکتریکی، پدیده ای است که از دیر باز برای انسان شناخته شده است. یک آهنربا به یک قطعه آهن و یا آهنربای دیگری که در مجاورت آن (و یا در حوزه مغناطیسی آن) قرار گیرد، نیرو وارد می کند. در حالت اول

این نیرو صرفاً نیروی جاذبه است و در حالت دوم بسته به وضعیت نسبی دو آهنربا، ممکن است نیروی جاذبه یا دافعه بین آنها ایجاد شود. در یک موتور الکتریکی از پدیده دیگری نیز استفاده می‌شود: در اطراف یک هادی (سیم) جریان‌دار میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود (قانون آمپر) و به عبارت دیگر: از طرف یک میدان مغناطیسی به سیم جریان‌داری که در آن میدان واقع شده است نیرو وارد می‌شود (قانون لورنتس).

در واقع، در یک موتور الکتریکی ممکن است تنها یک مغناطیسی وجود داشته باشد (حالت اول) که قطعاً این مغناطیس توسط جریان الکتریکی تولید می‌شود، یعنی قسمت اصلی موتور از یک آهنربای الکتریکی تشکیل می‌گردد. در موتورهایی که براساس تعامل بین دو آهنربا کار می‌کنند (حالت دوم) هر دو این آهنرباها و یا حداقل یکی از آنها، آهنربای الکتریکی است.

بنابراین، می‌توان گفت که در یک موتور الکتریکی، انرژی الکتریکی به عنوان ورودی دریافت شده و کار (یا انرژی یا توان مکانیکی) به بار مکانیکی تحویل داده می‌شود.

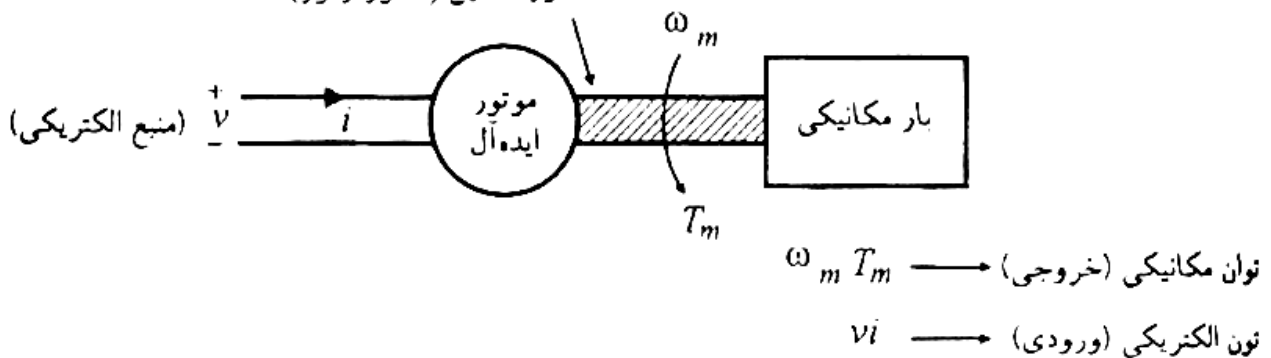


شکل (۱-۳)

انرژی مکانیکی خروجی موتور به صورت حرکت قسمت متحرک موتور ظاهر می‌شود، که قادر است جرم (بار) مکانیکی بیرونی را با خود به حرکت درآورد. حرکت موتور می‌تواند دورانی پیوسته، دورانی پله‌ای، خطی پیوسته، خطی پله‌ای و یا خطی رفت و برگشتی باشد.

برای اینکه بتوان بین موتور و سایر مبدلهایی که تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی را انجام می‌دهند تفکیک قائل شد، بایستی تاکید شود که موتورها برای حرکت دائمی طراحی، ساخته و بکارگیری می‌شوند.

محور ماشین (محور رنور)

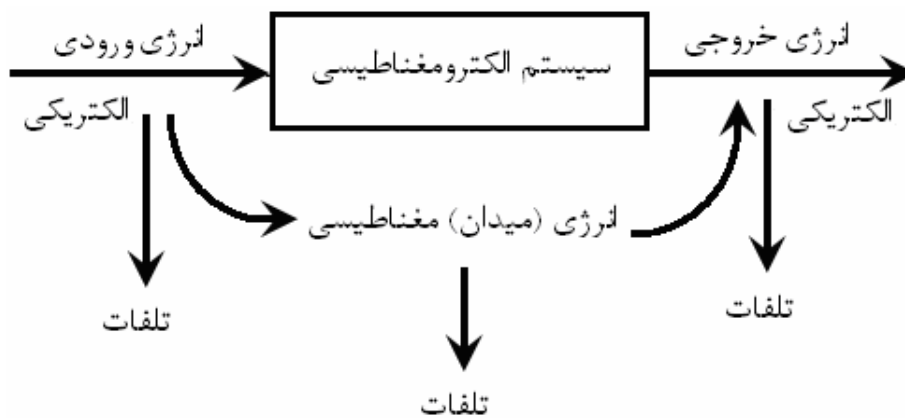


شکل (۱-۴)

لازم بذکر است که الکتروموتورها دارای رنج توان و کاربردهای بسیار گسترده‌ای هستند. اما قریب به اتفاق آنها از میکروموتورها گرفته تا موتورهای بسیار بزرگ در نیروگاهها و کارخانه‌های سیمان، تبدیل انرژی را با واسطه میدان مغناطیسی انجام می‌دهند. البته جدیداً موتورهای بسیار کوچک و خاصی برای مصارف معین، با استفاده از نیروی میدانهای الکترواستاتیک (نیروهای کولمبی) طراحی و ساخته شده‌اند.

۴-۱) ترانسفورماتور

گرچه بسیاری از مؤلفین ترانسفورماتور را یک ماشین الکتریکی نمی‌دانند. اما همواره مبحث ترانسفورماتورها یکی از سرفصلهای درس ماشین بوده و هست. ترانسفورماتور در واقع یک نمونه کاربردی از مدار مغناطیسی است و در برخی از کتب معتبر ماشین الکتریکی، در فصل مدارهای مغناطیسی آورده شده است. بهر حال، از دیدگاه تبدیل انرژی، ترانسفورماتور انرژی الکتریکی را به عنوان ورودی گرفته و انرژی خروجی را نیز بصورت الکتریکی به بار تحویل می‌دهد. تبدیل انرژی در این سیستم از الکتریکی به مغناطیسی و مجدداً از مغناطیسی به الکتریکی صورت می‌پذیرد. در اینجا نیز تلفات در هر میدان وجود دارد.



شکل (۵-۱) نمودار ترانسفورماتور از دیدگاه تبدیل انرژی

چنانچه دیده می‌شود در ترانسفورماتور هم سیستم الکترومغناطیسی بخش اصلی دستگاه را تشکیل می‌دهد. البته در ترانسفورماتور تبدیل انرژی مکانیکی وجود نداشته، بنابراین ترانسفورماتور فاقد بخش متحرک بوده و در واقع یک دستگاه ساکن است.

قانون القای فاراده و قانون آمپر دو قانونی هستند که برای توجیه و تحلیل عملکرد ترانسفورماتور بکار می‌روند.

۵-۱) قوانین فیزیکی مرتبط با ماشینهای الکتریکی

چنانچه دیده شد ماشینهای الکتریکی سیستمهای الکترومغناطیسی هستند که بصورت مبدل انرژی بکار می‌روند. گرچه این تعریف می‌تواند شامل برخی تجهیزات دیگر نیز بشود. اما گویای این واقعیت است که ماشینهای الکتریکی براساس قوانین الکترومغناطیس کار می‌کنند. در واقع، علاوه بر قوانین عمومی مکانیک در خصوص نیرو و حرکت مکانیکی اجسام، قوانین الکترومغناطیس بر ماشینهای الکتریکی حاکم هستند. برای سهولت این قوانین را در دو گروه اصلی می‌توان طبقه‌بندی کرد.

۱- اثر مغناطیسی جریان الکتریکی (یا حرکت ذره باردار)

۲- اثر الکتریکی میدان مغناطیسی متغیر

در یک ماشین الکتریکی (اعم از ژنراتور، موتور و یا ترانسفورماتور) از هر دو گروه این قوانین (یا پدیده‌ها یا اثرها) استفاده شده است. لذا، به عنوان مقدمه‌ای برای ورود در بحث ماشینهای الکتریکی این قوانین بطور خلاصه مرور می‌شوند. اما قبل از آن بایستی به پدیده جذب و دفع مغناطیسی و به عبارت علمی‌تر به میدان مغناطیسی اشاره‌ای داشته باشیم.

۶-۱) میدان مغناطیسی

شاید بتوان ویلیام گیلبرت (1544-1603) را اولین دانشمندی دانست که پیشرفتهای معاصر در رشته الکترومغناطیس با نوشته‌های او آغاز می‌شود. وی با آزمایش و استدلال اعلام نمود که در اطراف هر آهنربا میدان نیرویی قرار دارد که به اجسام مغناطیسی دیگر که در آن میدان قرار گیرند، نیرو وارد می‌کند و هرچه جسم به آهنربا نزدیکتر باشد نیروی وارده بر آن بیشتر است. گرچه او مفهوم میدان را بکار نبرد و از عبارت "کره نفوذ" استفاده کرد. اما توصیف او از کره نفوذ در اطراف یک آهنربا دقیقاً همان است که ما از آن به عنوان میدان مغناطیسی نام می‌بریم. در واقع با معلوم بودن میدان، شدت نیروی وارده و جهت و شکل آن در هر نقطه از اطراف آهنربا معین می‌شود.

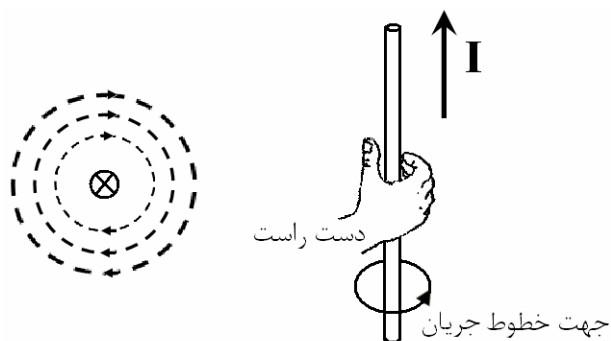
توصیف دیگری از میدان مغناطیسی با استفاده از مفهوم شار (خطوط قوا - Flow) مغناطیسی است. در این توصیف فرض می‌شود یک جریان نامرئی سیال از قطب N به قطب S آهنربا و در مسیرهای مشخصی برقرار است و اگر یک جسم آهنی در این مسیر قرار گیرد با آن هم راستا می‌شود. این همراستا شدن مستلزم اعمال نیرو بر جسم آهنی است و میزان نیرو نیز به تراکم خطوط شار در نقطه‌ای که جسم در آن واقع شده بستگی دارد.

توصیف معادل دیگری برای این پدیده با استفاده از مفهوم "رلوکتانس" وجود دارد. در این جا فرض می‌شود که شارها برای حرکت از قطب N به S با مقاومت در مسیر مواجهند و این مقاومت به جنس ماده مسیر بستگی دارد. خلاء و هوا و سایر مواد مغناطیسی دارای مقاومت عبوری (رلوکتانس) بالا (گذردهی کم) و مواد مغناطیسی دارای گذردهی مناسب (و یا رلوکتانس کم) هستند. بطور طبیعی، نیرویی که آهنربا به مواد مغناطیسی دیگر اعمال می‌کند به گونه‌ای است که رلوکتانس مسیر شار را کاهش دهد.

هر یک از توصیفهای فوق در خصوص پدیده جذب و دفع آهنربایی (یا مغناطیسی) در ماشینهای الکتریکی کاربرد داشته و البته همه این توصیفها سازگار هستند و تعارضی بین آنها وجود ندارد.

۷-۱) اثر مغناطیسی جریان الکتریکی

هانس کریستین اورستد (1777-1851) فیزیکدان دانمارکی اولین کسی بود که در سال ۱۸۲۰ وجود میدان مغناطیسی در اطراف یک سیم حامل جریان الکتریکی را کشف و اعلام نمود. او نیروی وارد بر یک عقربه مغناطیسی در مجاورت یک سیم جریاندار را کشف و مایکل فارادی درست یکسال بعد این واقعیت را چنین توصیف کرد که سیم با خطوط نیروی دایره‌ای شکل یعنی با یک میدان مغناطیسی دایره‌ای شکل احاطه شده است. جهت حرکت این خطوط به گونه‌ای است که اگر سیم حامل جریان به شکلی در دست راست قرار گیرد که انگشت شست جهت جریان را نشان دهد، پیش‌سایر انگشتان در جهت خطوط میدان مغناطیسی خواهد بود (شکل ۶-۱).

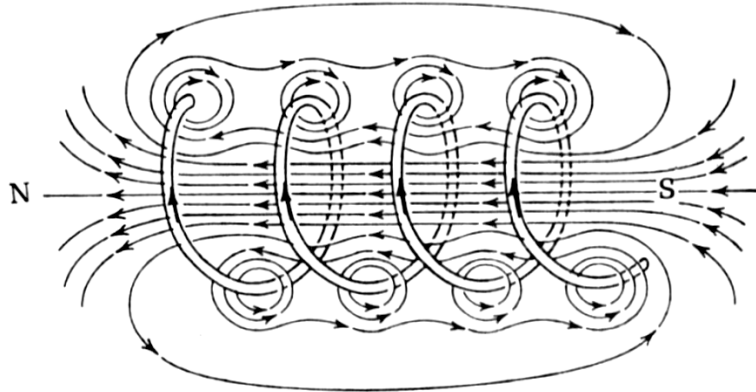


شکل (۶-۱)

شدت میدان در هر نقطه به فاصله r از سیم هادی با استفاده از قانون آمپر بدست می‌آید.

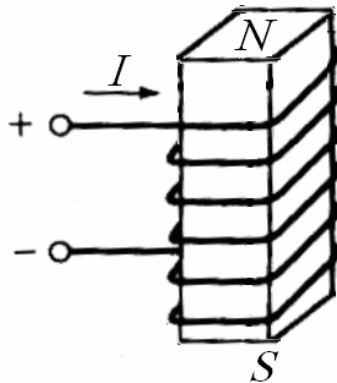
$$\oint \vec{H} d\vec{l} = i \Rightarrow \text{برای یک مسیر دایره‌ای به شعاع } r \text{ حول سیم } |\vec{H}| = \frac{I}{2\pi r} \text{ A/m}$$

در یک کاربرد عملی اگر هادی بصورت پیچک، درآید و جریان i از درون آن بگذرد، خطوط میدان در فضای وسط پیچک در راستای محور استوانه و به صورت خطوط موازی در می‌آیند و اگر یک هسته آهنی در مرکز پیچک قرار گیرد و جهت جریان در پیچک ثابت باشد، میله آهنی همانند یک آهنربا با قطبهای N و S ثابت در می‌آید.



شکل (۷-۱)

به این ترتیب یک "آهنربای الکتریکی" ساخته می‌شود.



شکل (۸-۱)

سؤال - جهت جریان و جهت میدان را تست کنید.

می‌توان فرض کرد که سیم جریاندار مدلی از یک مجموعه بار الکتریکی در حال حرکت است. به همین دلیل می‌توان انتظار داشت که "بار الکتریکی در حال حرکت" نیز در اطراف خود میدان مغناطیسی ایجاد کند.

۸-۱ نیرو بین سیم حامل جریان و میدان مغناطیسی

حال به جنبه دیگری از اثر مغناطیسی، جریان الکتریکی می‌پردازیم. همانطور که در بخش (۶-۱) دیدیم میدانهای مغناطیسی نسبت به همدیگر و نسبت به اجسام مغناطیسی نیرو اعمال می‌نمایند. بنابراین سیم حامل جریان می‌تواند بر یک آهنربا نیرو اعمال کند و طبق قانون عمل و عکس‌العمل همین مقدار نیرو از آهنربا می‌تواند بر سیم حامل جریان وارد شود. به بیان دقیقتر بر سیم حامل جریان و یا بطور کلی بر بار الکتریکی در حال حرکت در یک میدان مغناطیسی معین، نیروی مکانیکی وارد می‌شود. جهت نیرو عمود بر صفحه‌ای است که بردار میدان و بردار

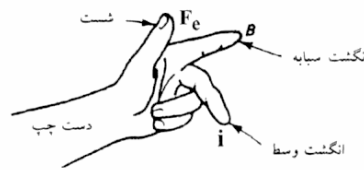
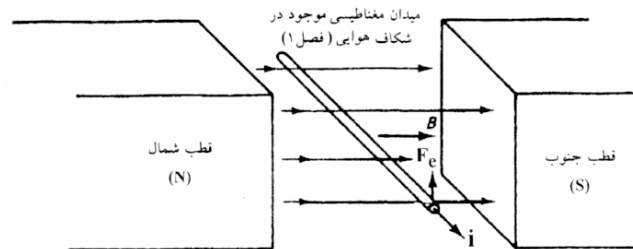
جریان را در خود می‌گیرد. به عبارت ریاضی شدت نیرو علاوه بر طول سیم، تابع شدت جریان و شدت میدان مغناطیسی و زاویه بین آنها است. با انتخاب واحدهای مناسب خواهیم داشت (معادله لورنتس):

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}$$

نیرو بر حسب نیوتن : F

چگالی شار بر حسب تسلا : B

جریان بر حسب آمپر : I



شکل (۱-۹)

:

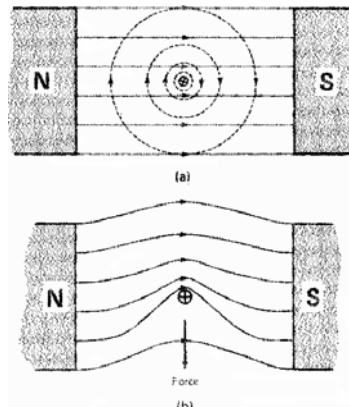
$$1T = \frac{1N}{1m \cdot 1A} = \frac{\text{نیوتن}}{\text{آمپر متر}}$$

اگر به جای جریان و طول سیم، ذره باردار با سرعت حرکت \vec{V} قرار گیرد رابطه زیر بیانگر نیروی وارده بر ذره است.

$$\vec{F} = q\vec{V} \times \vec{B}$$

در شتاب دهنده‌ها از این قانون استفاده شده است.

توجیه تعامل دو میدان و جهت نیروی وارده با استفاده از شکل (۱-۱۰) آسان خواهد بود.



شکل (۱-۱۰)

الف - میدان مغناطیسی آهنربا و سیم حامل جریان به صورت جداگانه

ب - میدان مغناطیسی برآیند و جهت نیروی وارده به سیم (جهت جریان به داخل صفحه عمود است)

لازم به ذکر است که دانشمند فرانسوی آندره ماری آمپر (1775-1836) در پی کشف اورستد و با آزمایشات جدیدتر به نتیجه رسید که اثر متقابل مکانیکی بین دو مدار حامل جریان نیز وجود دارد. او تحقیق کرد که این نیرو به

فاصله بین سیمها، مواضع نسبی سیمها و مقدار جریانها بستگی دارد. وی با اندازه‌گیری این نیروها از آن به عنوان معیاری برای اندازه‌گیری جریان استفاده کرد و ترازوی جریان‌سنج را اختراع نمود. امروزه نیز واحد جریان الکتریکی براساس همین معیار تعریف شده و به افتخار وی "آمپر" نامیده می‌شود.

۹-۱) اثر الکتریکی میدان مغناطیسی متغیر

کشف این اثر را نیز به مایکل فارادی دانشمند انگلیسی (1791-1867) نسبت می‌دهند. او پس از آزمایشهای متعدد بر روی یک هسته فلزی که دو پیچک جداگانه بر روی آن پیچیده بود دریافت که وقتی جریان الکتریکی در یک سیم ساکن در حال تغییر باشد، در سیم ساکن دیگر ولتاژ القا می‌کند. فارادی با توسعه این آزمایشها و آزمایشهای متعدد دیگر اصل کلی القای الکترومغناطیسی را بیان کرد: خطوط نیروی مغناطیسی متغیر (یا میدان مغناطیسی متغیر) می‌تواند در یک سیم، ولتاژ الکتریکی القا کند. چنین تغییراتی از حرکت نسبی سیم و میدان ثابت، از تغییر شدت میدان در حضور سیم ساکن و یا از تغییر میدان همراه با حرکت سیم می‌تواند بوجود آید. قانون القای فارادی زمینه را برای کاربردهای عملی الکتروسیسته فراهم کرد و مبنایی شد برای عملکرد ترانسفورماتورها، ژنراتورها و موتورهای جریان متناوب. از این لحاظ فارادی را به درستی می‌توان پایه‌گذار عصر جدید الکتریکی دانست.

سؤال - توصیف قانون فارادی با رابطه $F = qVB$

برای بیان کمی قانون القای فاراده باید این نکته اضافه شود که میزان ولتاژ القا شده در هادی به سرعت تغییرات میدان (و یا تغییرات شار مغناطیسی) بستگی دارد. بطور مشخص، با استفاده از سیستم بین‌المللی واحدها (SI) هنگامی که شار عبوری از داخل یک حلقه سیم با سرعت ۱ و بر بر ثانیه تغییر کند، ولتاژی معادل 1V بین دو سر آن القا خواهد شد. حال اگر هادی دارای N حلقه باشد این ولتاژها با هم سری شده و در واقع ولتاژ القایی N برابر خواهد شد.

$$E = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

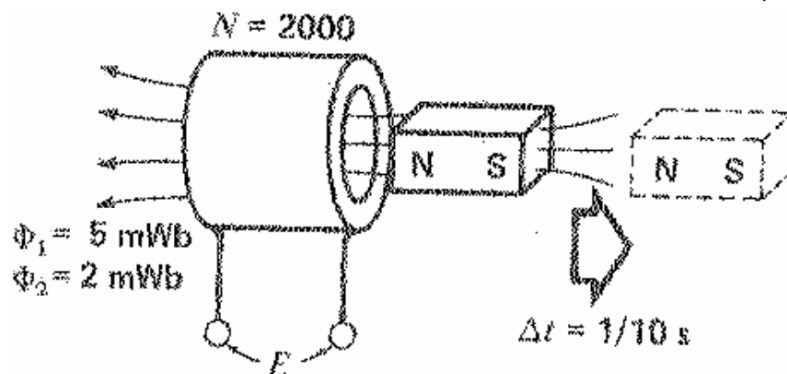
ولتاژ القا شده بر حسب ولت : E

تعداد حلقه‌های هادی (تعداد دورهای سیم‌پیچ) : N

تغییرات شار در داخل سیم‌پیچ بر حسب وبر : $\Delta\phi$

فاصله زمانی که شار تغییر می‌کند : Δt

مثال: یک سیم‌پیچ با ۲۰۰۰ دور یک شار 5mWb را که بوسیله یک آهنربای دائمی ایجاد شده در بر گرفته است (شکل ۱-۱). آهنربا ناگهان از داخل کوئل بیرون کشیده می‌شود تا شار درون آن طی زمان $\frac{1}{10}$ ثانیه به 2mWb کاهش یابد. متوسط ولتاژ القایی چقدر است؟



شکل (۱-۱) ولتاژ القایی توسط آهنربای متحرک

حل: تغییرات شار عبارت است:

$$\Delta\phi = (5mWb - 2mWb) = 3 \times 10^{-3} \quad \text{Wb}$$

$$\Delta t = \frac{1}{10} \text{S} \quad \Rightarrow \quad E = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = 2000 \times \frac{3 \times 10^{-3}}{\frac{1}{10}} = 60V$$

قانون القای فارادی را می‌توان در حالت میدان ثابت و هادی متحرک نیز به صورت کمی ارائه کرد: این مدل در بسیاری از موتورها و ژنراتورها که هادی متحرک و شار مغناطیسی در فضا ساکن است کاربرد دارد. بدیهی است که در این حالت نیز هادی شار متغیری را تجربه کرده و به عبارت دیگر هادی خطوط میدان را قطع می‌کند. بنابراین طبق قانون فارادی در آن ولتاژ القا می‌شود.
مقدار این ولتاژ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E = B l v \quad (1-1)$$

ولتاژ القا شده بر حسب ولت : E

چگالی شار بر حسب تسلا : B

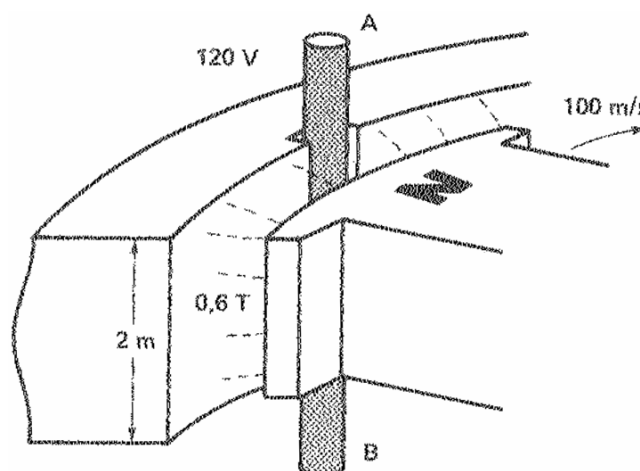
طول موثر هادی در میدان مغناطیسی بر حسب متر : l

سرعت نسبی هادی بر حسب m/s : v

توجه شود در اینجا v سرعت نسبی میدان و هادی است و بنابراین ممکن است هادی ثابت و میدان متحرک باشد.

مثال - هادی ساکن در بدنه یک ژنراتور بزرگ با طول ۲ متر توسط یک میدان به شدت ۰٫۶ تسلا قطع داده می‌شود. سرعت حرکت میدان نسبت به هادی $100 m/s$ است (شکل ۱-۱۲). ولتاژی که در هر هادی القا می‌شود پیدا کنید.
حل : با استفاده از فرمول (۱-۱) داریم:

$$E = 0.6 \times 2 \times 100 = 120V$$



شکل (۱-۱۲) ولتاژ القا شده در یک هادی ساکن

(۱۰-۱) جهت ولتاژ القا شده در هادی (قانون لنز)

گفته شد هنگامی که یک سیم پیچ یا حتی یک سیم در معرض شار متغیر قرار می‌گیرد در آن ولتاژ القا می‌شود. فارادی در آزمایشهای خود دریافت که جهت (پلاریته) ولتاژ القایی در حالتی که شار رو به افزایش است با

حالتی که شار کاهش می‌یابد، تفاوت دارد. اما بیان دقیق این پدیده توسط لنز انجام شده است. "جهت ولتاژ القایی به گونه‌ای است که بتواند جریانی را برقرار سازد که با تغییر شار مقابله نماید." به همین دلیل در بسیاری از متون درسی قانون القای فارادی را بصورت $E = -N \frac{d\phi}{dt}$ می‌نویسند که نشان می‌دهد جهت ولتاژ القایی، معکوس جهت تغییرات شار $(\frac{d\phi}{dt})$ است. این پدیده بخصوص در هنگام قطع و وصل مدارهای شامل پیچک اهمیت زیادی پیدا می‌کند.

۱-۱) یادآوری برخی از کمیتها

H: شدت میدان مغناطیسی بر حسب $\frac{A}{m}$ یا $\frac{دورآمپر}{متر}$

B: چگالی شار میدان مغناطیسی بر حسب تسلا

ϕ : شار مغناطیسی بر حسب وبر

μ_0 : قابلیت گذردهی خلاء یا هوا

$$B = \mu_r \mu_0 H$$

$$\phi = B \cdot A$$

فصل دوم - مدارهای مغناطیسی

۱-۲) مواد مغناطیسی

در فصل اول دیدیم که پدیده مشترک و اساسی در تمام ماشینهای الکتریکی ایجاد میدان مغناطیسی توسط جریان الکتریکی و یا به عبارت ساده‌تر ساخت یک آهنربای الکتریکی است. همچنین دیدیم که شدت میدان مغناطیسی (H) با جریان عبوری از سیم متناسب است. اما دیده شد که در کاربردهای این آهنربای الکتریکی در موتور و ژنراتور و ترانسفورماتور به جای H، ϕ یعنی شار مغناطیسی و یا B (چگالی شار مغناطیسی) در معادلات مربوط به القای ولتاژ و ایجاد نیروی مکانیکی ظاهر می‌شوند. در واقع، عملکرد ماشین بیش از آنکه به مقدار H بستگی داشته باشد به چگالی شار (و شار) ایجاد شده از H در فضای ماشین مربوط می‌شود. بنابراین در سازه ماشینهای الکتریکی از موادی استفاده می‌شود که بتواند به ازای H معین، شار بیشتری را تولید کنند. این مواد بطور مشخص آهن، نیکل، کبالت و آلیاژهای آنها هستند و به آنها مواد مغناطیسی می‌گویند.

۲-۲) مشخصه B-H مواد مختلف

هنگامی که هادی در خلاء قرار می‌گیرد رابطه بین H و B در اطراف آن یک رابطه خطی است:

$$B = \mu_0 H \quad (1-2) \quad \text{چگالی بر حسب تسلا: B}$$

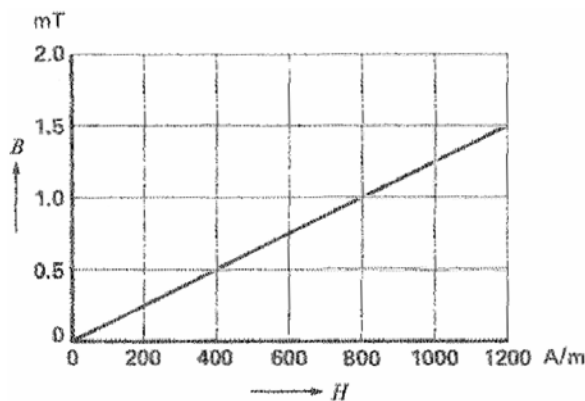
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad \text{شدت میدان مغناطیسی بر حسب } \frac{\text{آمپر}}{\text{متر}}: H$$

$$\Rightarrow H \approx 800,000 B$$

μ_0 را ضریب گذردهی خلاء می‌نامند.

مواد غیرمغناطیسی همانند مس، آلومینیوم، هوا، کاغذ، عایقهای مختلف و غیره مشخصه B-H تقریباً مشابه

خلاء، یعنی مشخصه خطی با شیب بسیار کم را دارند:

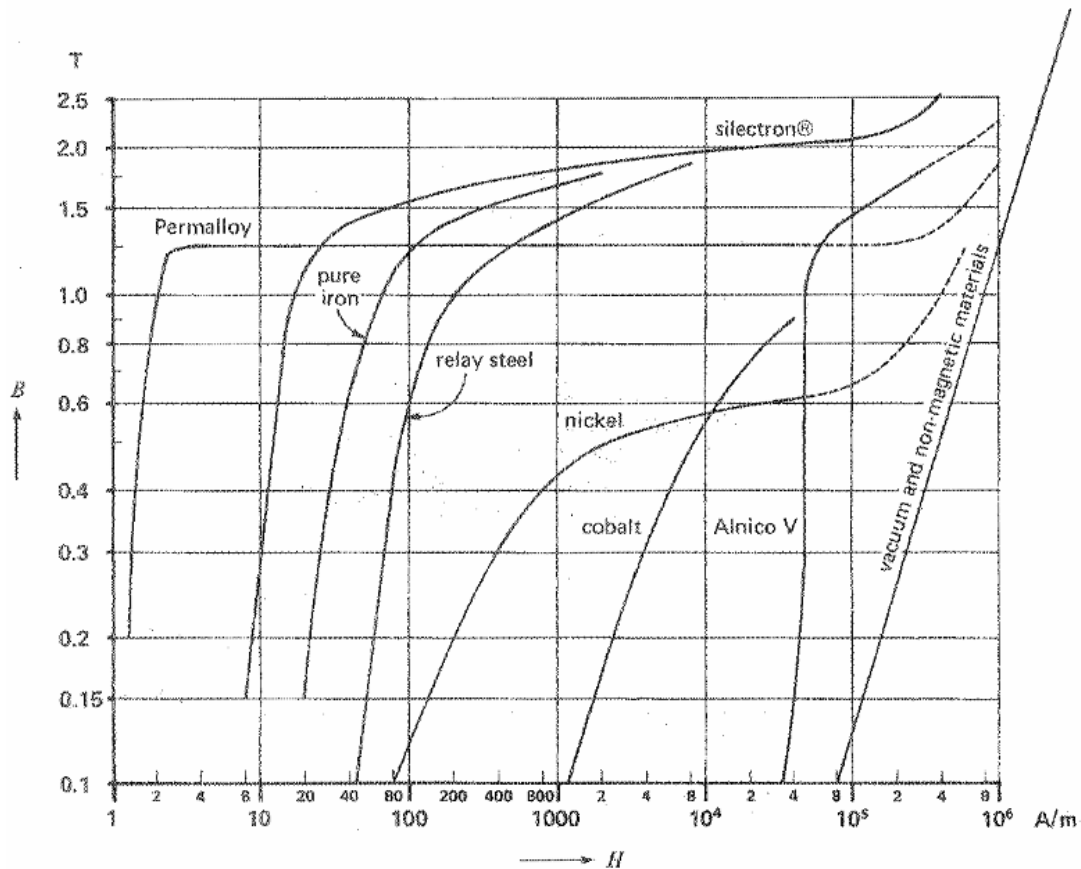


شکل (۱-۲) - مشخصه B-H خلاء و مواد مغناطیسی

چگالی شار در یک ماده مغناطیسی نیز با شدت میدان متناسب است و با رابطه زیر داده می‌شود.

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu H \quad (2-2)$$

μ گذردهی ماده و μ_r گذردهی نسبی ماده نامیده می‌شود. μ_r مواد مغناطیسی از ۲۰۰۰ تا 10^5 می‌تواند باشد. بدیهی است که این ضریب در مورد مواد غیرمغناطیسی عدد بزرگی نبوده و می‌توان آنرا برابر با ۱ در نظر گرفت. مسئله دیگر در مورد مواد مغناطیسی، غیرخطی بودن مشخصه برای H های بزرگ است. هنگامی که H از حد معینی بزرگتر می‌شود، شیب مشخصه تقریباً صفر شده و گفته می‌شود که ماده مغناطیسی اشباع شده است. در واقع، μ یا μ_r برای مواد مغناطیسی مقدار ثابتی ندارد و در حالت اشباع تغییر می‌کند.



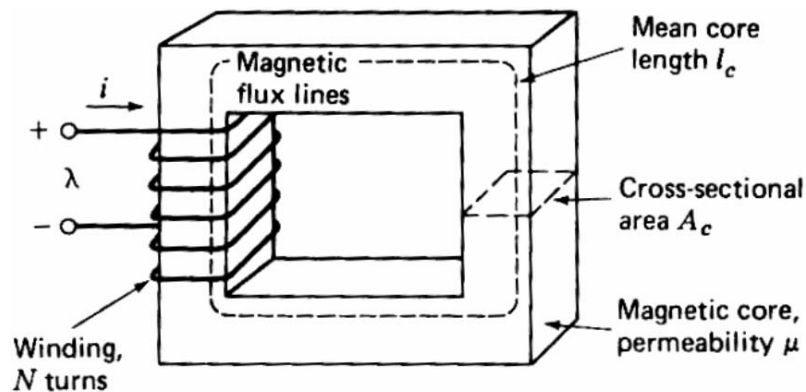
شکل (۲-۲) مشخصه‌های مواد مغناطیسی مختلف در مقایسه با خلاء و مواد غیرمغناطیسی (به پدیده اشباع توجه کنید)

۳-۲ مدار مغناطیسی

چنانچه دیده شد امتیاز استفاده از مدار مغناطیسی در ماشینهای الکتریکی این است که چگالی شار قابل ملاحظه‌ای را در مقایسه با هوا یا سایر مواد غیرمغناطیسی فراهم می‌کنند. به عبارتی چگالی انرژی ذخیره شده در فضای فیزیکی دستگاه افزایش یافته و ابعاد این دستگاهها کوچک می‌شود.

یک مدار مغناطیسی، ساختار و سازه‌ای است از مواد مغناطیسی همراه با یک یا چند سیم‌پیچ حامل جریان. بخشی از مدار که از ماده مغناطیسی تشکیل شده "هسته" نامیده می‌شود. بدلیل ضریب گذردهی بالای هسته نسبت به هوا، معمولاً فرض می‌شود که تمامی شار تولیدی پیچکها از داخل هسته می‌گذرد. دقیقاً همانطور که جریان الکتریکی از داخل هادیها عبور می‌کند.

در تعبیر دیگر می‌توان گفت که هسته مغناطیسی، مسیر عبور شار مغناطیسی را شکل و جهت می‌دهد. مفاهیم مربوط به مدار مغناطیسی با توجه به شکل مدار مغناطیسی ساده (شکل ۲-۳) توضیح داده می‌شود:



شکل (۲-۳) مدار مغناطیسی ساده

فرض می‌شود هسته از ماده مغناطیسی ای تشکیل شده که ضریب گذردهی آن بسیار بالاتر از هوای اطراف است. مقطع هسته نیز یکنواخت فرض می‌شود. مدار توسط یک سیم‌پیچ N دوری که جریان i از آن می‌گذرد تحریک می‌شود. میدان مغناطیسی ایجاد شده، توسط خطوط شار که هسته را دور زده و از داخل پیچک نیز می‌گذرند نشان داده شده است. دیده می‌شود که منبع تولید شار مغناطیسی، Ni (برحسب آمپر دور) است. در مقایسه با ولتاژ که عامل برقراری جریان در مدارهای الکتریکی است و به آن نیروی محرکه الکتریکی (emf) می‌گویند، در مدارهای مغناطیسی نیز Ni را نیروی محرکه مغناطیسی (magneto motive force) mmf می‌نامند و آنرا با F نمایش می‌دهند.

طبق قانون آمپر با انتگرال‌گیری از یک مسیر بسته (نشان داده شده در شکل) می‌توان دید که:

$$F = Ni = H_c l_c \quad (۲-۳)$$

H_c میدان مغناطیسی داخل هسته

l_c طول متوسط هسته (مسیر عبور شار)

در صورتیکه شار خارج از هسته را ناچیز فرض کنیم و توزیع شار در داخل هسته نیز یکنواخت باشد با استفاده از تعریف چگالی شار می‌توان گفت:

$$\phi = \int B \cdot dA \Rightarrow \phi_c = B_c A_c \quad (۲-۴)$$

چگالی شار داخلی هسته برحسب تسلا: B_c

شار داخل هسته برحسب وبر: ϕ_c

سطح مقطع هسته برحسب m^2 : A_c

با فرض اینکه $B = \mu_0 \mu_r H$ می‌توان از روابط قبل نتیجه‌های زیر را بدست آورد.

$$B_c = \mu H_c = \mu \frac{Ni}{l_c} = \frac{N \mu_0 \mu_r i}{l_c} \quad (۲-۵)$$

$$\phi_c = B_c A_c = \frac{N \mu_0 \mu_r i A_c}{l_c} = \frac{Ni}{\left(\frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A_c} \right)} \quad (۲-۶)$$

در مقایسه با مدارهای الکتریکی اگر ϕ_c را معادل جریان و F را معادل ولتاژ بگیریم. می‌بینیم که:

$$\phi_c = \frac{F}{\frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A_c}} \quad (۲-۷)$$

مخرج کسر سمت راست که نقش مقاومت (R) در مدار الکتریکی را دارد، در اینجا بنام مقاومت مغناطیسی یا

رلوکتانس هسته نامیده شده و با \mathcal{R}_c نمایش داده می‌شود و واحد آن نیز $\frac{\text{آمپر دور}}{\text{وبر}}$ است.

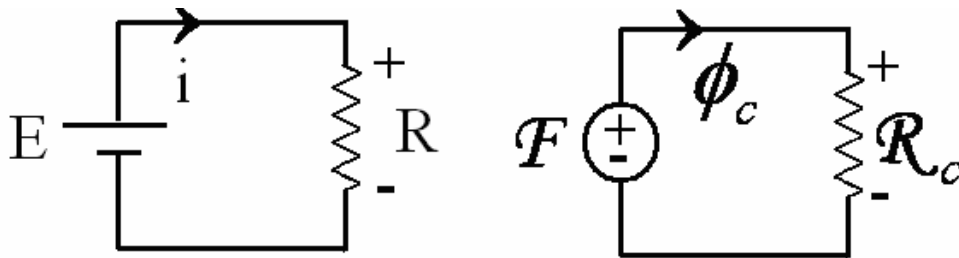
$$\mathcal{R}_c = \frac{F}{\phi_c} = \frac{l_c}{\mu A_c} \quad \left[\frac{\text{AT}}{\text{Wb}} \right] \quad (۸-۲)$$

معکوس رلوکتانس را پرمیانس هسته می‌نامند:

$$\mathcal{P}_c = \frac{1}{\mathcal{R}_c} \quad (۹-۲)$$

بنابراین، مدار معادل هسته سیم‌پیچی شده شکل (۳-۲) به صورت شکل (۲-۴-الف) در می‌آید که مشابه

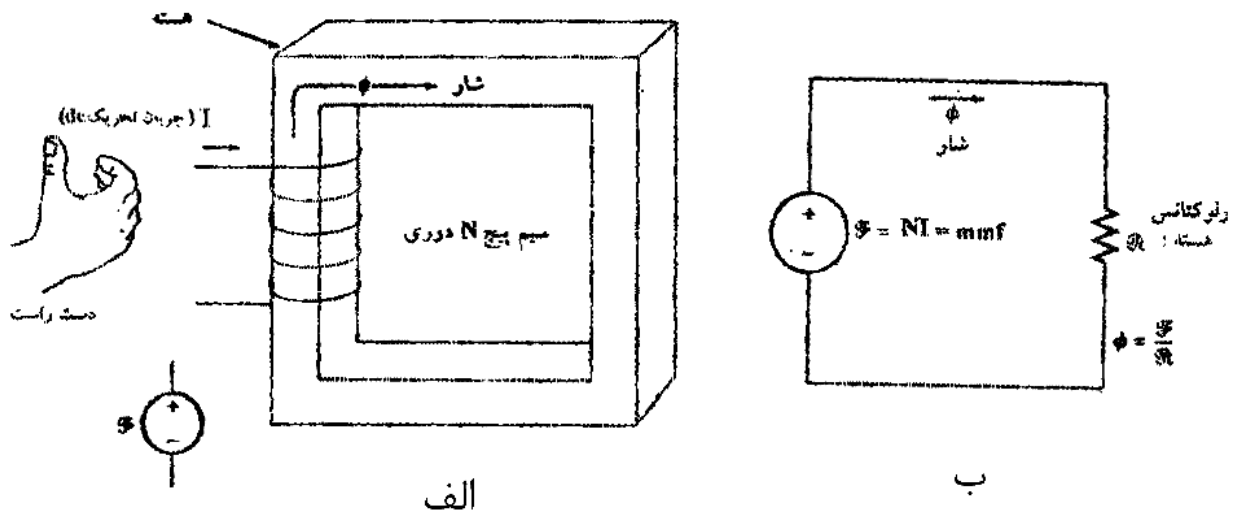
الکتریکی آن نیز در شکل (۲-۴-ب) داده شده است.



شکل (۲-۴) (الف) مدل مدار مغناطیسی و (ب) معادل الکتریکی آن

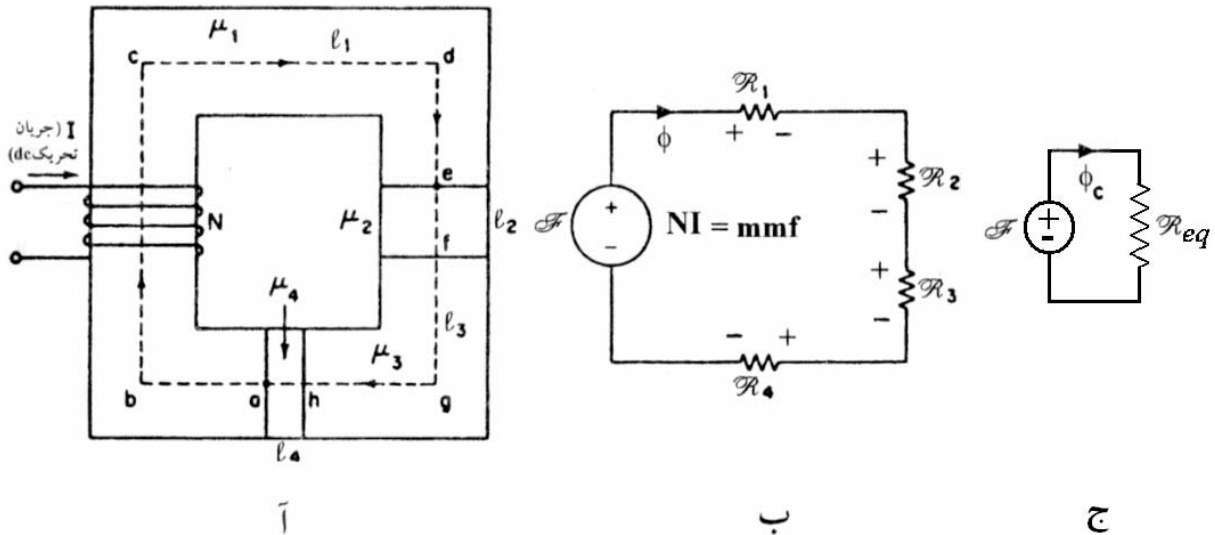
برای تعیین جهت (پلاریته) منبع F در مدار مغناطیسی شکل ۲-۳ از قاعده دست راست استفاده می‌شود. به

این ترتیب که اگر سیم‌پیچ به گونه‌ای در دست قرار گیرد که چرخش انگشتان جهت جریان را در آن نشان دهد. انگشت شست پلاریته میدان را مشخص خواهد نمود (شکل ۲-۵).



شکل (۲-۵) تعیین پلاریته mmf در یک پیچک با هسته آهنی

مثال ۲-۱- یک مدار مغناطیسی مطابق شکل ۲-۶ مفروض است که در آن هسته از چهار قطعه با طول‌ها و سطح مقطعه‌های متفاوت و مواد مختلف با مشخصه‌های B-H خطی تشکیل شده و بر روی هسته یک سیم‌پیچ سوار شده است. مدل مدار را بدست آورید.



شکل (۲-۶)

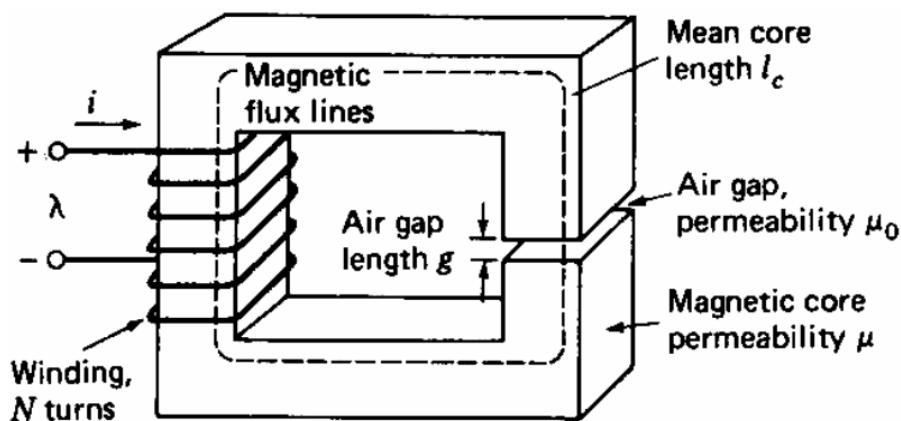
حل - چون عملاً هسته از ۴ بخش تشکیل شده می‌توان مدل مداری آن دارای ۴ رلوکتانس متفاوت خواهد بود که هر کدام قابل محاسبه است.

$$\mathcal{R}_1 = \frac{l_1}{\mu_1 A_1} \quad \mathcal{R}_2 = \frac{l_2}{\mu_2 A_2} \quad \mathcal{R}_3 = \frac{l_3}{\mu_3 A_3} \quad \mathcal{R}_4 = \frac{l_4}{\mu_4 A_4}$$

$$\mathcal{R}_{eq} = \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_3 + \mathcal{R}_4 \quad F = \mathcal{R}_{eq} \cdot \phi_c$$

۲-۴ مدار مغناطیسی با فاصله هوایی

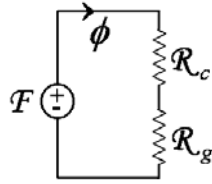
مدار مغناطیسی مبدل‌های الکترومکانیکی (موتورها، ژنراتورها، رله‌ها و ...) که دارای المان متحرک هستند، بایستی دارای فاصله هوایی باشند. به عبارت دیگر مسیر شار در این مبدل‌ها علاوه بر هسته آهنی، شکاف هوایی بین قسمت‌های هسته را نیز شامل می‌شود. نمودار ساده‌ای از یک مدار مغناطیسی با فاصله هوایی در شکل (۲-۷) ارائه شده است.



شکل (۲-۷) مدار مغناطیسی با فاصله هوایی

طول فاصله هوایی (g) در عمل بایستی بسیار کوچکتر از ابعاد هسته باشد. به این ترتیب می‌توان فرض کرد که شار مغناطیسی تماماً از داخل هسته و فاصله هوایی عبور کرده و یک مسیر بسته را تشکیل می‌دهد.

بنابراین، مدار معادل این سیستم، دارای دو رلوکتانس سری \mathcal{R}_c و \mathcal{R}_g خواهد بود. که \mathcal{R}_c مربوط به هسته آهنی و با طول l_c و پلاریته μ و \mathcal{R}_g مربوط به فاصله هوایی با طول l_g و پلاریته μ_0 است (شکل ۸-۲).



شکل (۸-۲) مدل مدار مغناطیسی با فاصله هوایی

$$\mathcal{R}_c = \frac{l_c}{\mu A_c} \quad \text{و} \quad \mathcal{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g}$$

در اینجا فرض شده که سطح مقطع فاصله هوایی و هسته یکسان است (یعنی از باز شدن خطوط شار در فاصله هوایی صرف نظر می شود).

$$F = H_c l_c + H_g g = \frac{B_c l_c}{\mu} + \frac{B_g g}{\mu_0} = \phi (\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g) \quad (11-2)$$

مثال ۲-۲- فرض کنید در مدار مغناطیسی شکل (۷-۲) سطح مقطع هسته $4\text{cm} \times 4\text{cm} = 16 \times 10^{-4} \text{m}^2$ طول موثر هسته 0.6m و μ_r هسته 4000 و فاصله هوایی $g = 0.5\text{mm}$ باشد. اگر سیم پیچ 5000 دور داشته باشد، جریان آنرا برای اینکه چگالی شار در فاصله هوایی برابر 1 تسلا باشد، بدست آورید.

$$\mathcal{R}_c = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A_c} = \frac{0.6}{(4\pi \times 10^{-7})(4000)(16 \times 10^{-4})} = 74603.8 \quad \text{حل -}$$

$$\mathcal{R}_g = \frac{g}{\mu_0 A_c} = \frac{5 \times 10^{-4}}{(4\pi \times 10^{-7})(16 \times 10^{-4})} = 248679.5$$

دیده می شود که رلوکتانس فاصله هوایی حدوداً سه برابر رلوکتانس هسته است. هرچه پرمابیلیته هسته بیشتر باشد، اختلاف بین این دو رلوکتانس بیشتر می شود.

حال اگر بخواهیم $B_g = 1\text{T}$ باشد:

$$\phi_g = B_g A_c = 16 \times 10^{-4} \quad \text{Wb}$$

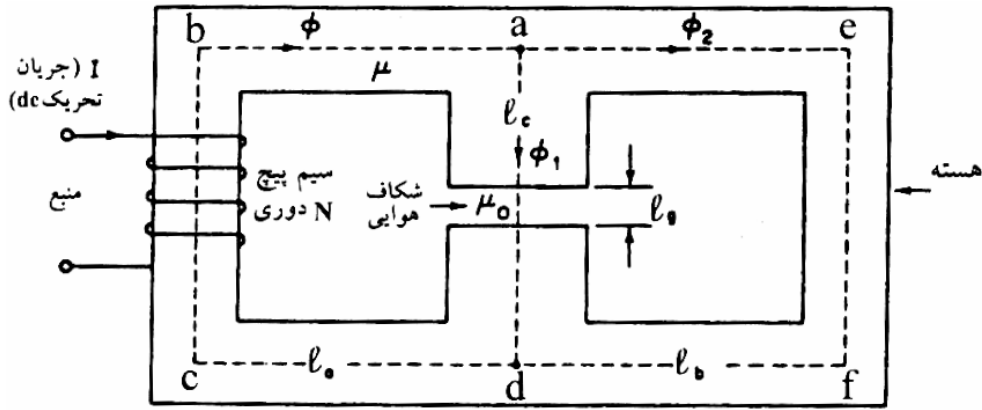
$$F = NI = (\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g) \phi_g \Rightarrow I = \frac{(\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g) \cdot (16 \times 10^{-4})}{500} \approx 1.034\text{A}$$

می توان دید که افت mmf در فاصله هوایی نیز حدوداً ۳ برابر افت mmf در هسته است. بدیهی است در صورتیکه پرمابیلیته هسته بزرگتر باشد، افت mmf در هسته نسبت به افت در فاصله هوایی باز هم کوچکتر می شود. در حالت ایده آل معمولاً از افت mmf در هسته صرف نظر می شود. در واقع، رلوکتانس هسته در مقایسه با رلوکتانس فاصله هوایی، صفر فرض می شود. در این حالت فرض شده پرمابیلیته هسته بی نهایت بزرگ است و بنابراین، این مدل را مدل مدار مغناطیسی با هسته ایده آل می گویند.

مثال ۲-۳ - یک مدار مغناطیسی در شکل (۹-۲) داده شده است. در این شکل

$$l_a = l_b = 0.85\text{m} \quad l_c = 0.36\text{m} \quad l_g = 0.8\text{mm}$$

فرض می شود که هسته به اشباع نرفته و μ_r آن معادل 4100 است. سطح مقطع هسته نیز در کل سازه یکسان بوده و برابر با $8 \times 10^{-3} \text{m}^2$ است. اگر mmf اعمال شده به سیستم معادل 180AT باشد چگالی شار در فاصله هوایی را بیابید.



شکل (۹-۲) یک مدار مغناطیسی تک تحریکه با هسته دو دریچه‌ای و فاصله هوایی

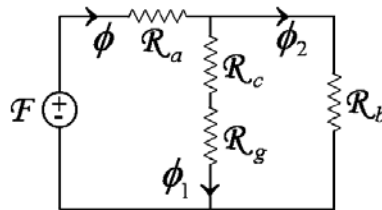
حل - l_a مربوط به مسیر abcd و l_b مربوط به مسیر aefd می‌باشد. l_c طول مسیر ad و l_g فاصله هوایی است. رلوکتانس قسمت‌های مختلف هسته به قرار زیر است.

$$\mathcal{R}_a = \mathcal{R}_b = \frac{l_a}{\mu_0 \mu_r A} = \frac{0.85}{(4\pi \times 10^{-7})(4100)(8 \times 10^{-3})} = 20.622 \times 10^3$$

$$\mathcal{R}_c = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A} = 8.734 \times 10^3$$

$$\mathcal{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 A} = \frac{0.85 \times 10^{-3}}{(4\pi \times 10^{-7})(8 \times 10^{-3})} = 79.577 \times 10^3$$

مدل مداری این سیستم به شکل زیر است.



شکل (۱۰-۲)

رلوکتانس معادل از دید منبع mmf چنین می‌شود:

$$\mathcal{R}_{eq} = \mathcal{R}_a + [\mathcal{R}_b \parallel (\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g)] = 37.34 \times 10^3$$

بنابراین می‌توان ϕ را بدست آورد.

$$\phi = \frac{F}{\mathcal{R}_{eq}} = \frac{180}{37.34 \times 10^3} = 4.82 \times 10^{-3} \quad \text{Wb}$$

همچنین شار در هر یک از شاخه‌ها قابل محاسبه است:

$$\phi_1 = \frac{\phi \mathcal{R}_b}{\mathcal{R}_b + \mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g} = 912.57 \times 10^{-6} \quad \text{Wb}$$

$$\phi_2 = \phi - \phi_1$$

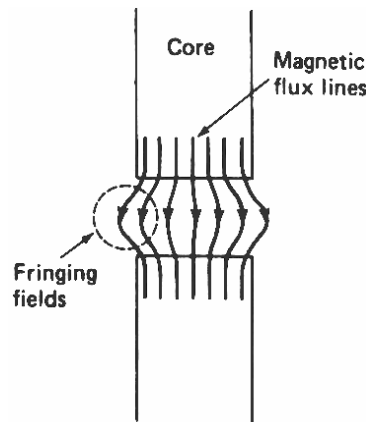
چگالی شار در فاصله هوایی

$$B_g = \frac{\phi_1}{A} = \frac{912.57 \times 10^{-6}}{8 \times 153} = 0.114 \quad \text{T}$$

• اثر فاصله هوایی در شکستگی خطوط شار

هنگامی که خطوط شار از محیط مغناطیسی وارد فاصله هوایی می‌شوند، کمی به سمت بیرون انحنای پیدا می‌کنند و دوباره جمع شده و وارد سر دیگر هسته مغناطیسی می‌شوند. به این پدیده شکستگی خطوط شار (fringing) می‌گویند.

می‌گویند (شکل ۲-۱۱). البته گفته شد که با کوچک بودن فاصله هوایی این اثر چندان محسوس نبوده و قابل صرف نظر است. اما در محاسبات دقیقتر می‌توان گفت که بدلیل اثر لبه، سطح مقطع فاصله هوایی کمی بزرگتر از سطح مقطع هسته شده و بنابراین چگالی شار در فاصله هوایی کمتر خواهد بود.



شکل (۲-۱۱) پدیده شکستگی خطوط شار در فاصله هوایی سطح مقطع فاصله هوایی با منظور کردن اثر شکستگی از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$A_g = (a + l_g)(b + l_g) \quad (۲-۱۲)$$

سطح مقطع فاصله هوایی: A_g

طول و عرض هسته در دو طرف فاصله هوایی: a و b

طول (ضخامت) فاصله هوایی: l_g

مثال ۲-۴ - مثال (۲-۲) را با در نظر گرفتن پدیده شکستگی حل کنید.

حل - در این شرایط سطح مقطع فاصله هوایی و رلوکتانس آن تغییر می‌کند:

$$A_g = (4 + 0.05)(4 + 0.05) = 16.4 \text{ cm}^2 = 16.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\mathcal{R}_g = \frac{0.5 \times 10^{-3}}{(4\pi \times 10^{-7})(16.4 \times 10^{-4})} = 242.5 \times 10^3$$

دیده می‌شود که رلوکتانس فاصله هوایی اندکی کاهش یافته است. از مثال (۲-۲) شار هسته (و شار فاصله

هوایی) و رلوکتانس هسته را داریم که بدون تغییر می‌مانند. بنابراین:

$$F = 500I = 16 \times 10^{-4} (242.5 + 74.8) \times 10^3 = 508AT$$

$$\Rightarrow I = \frac{508}{500} = 1.016 \quad \text{A}$$

(جریان تحریک نسبت به مثال (۲-۲) کمتر است.)

• اثر مورق بودن هسته

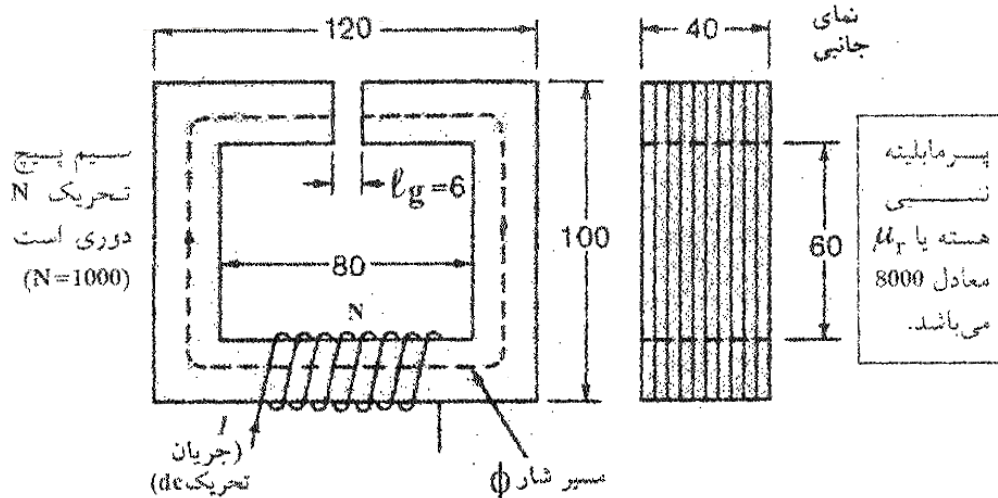
بسیاری از هسته‌های مغناطیسی از ورقه‌های بسیار نازک که بر روی هم قرار می‌گیرند تشکیل شده‌اند. بدیهی

است که سطح مقطع موثر (سطح مقطع واقعی ماده مغناطیسی) در این حالت کمتر از سطح مقطع واقعی هسته خواهد بود. ضریب انباشتگی (K_d) بنا به تعریف نسبت حجم واقعی ماده مغناطیسی هسته به حجم کلی هسته را نشان

می‌دهد و بنابراین می‌توان گفت که:

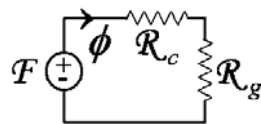
$$K_d = \frac{\text{حجم ماده مغناطیسی هسته}}{\text{حجم کل هسته}} = \frac{\text{سطح مقطع موثر مغناطیسی}}{\text{سطح مقطع واقعی هسته}} = \frac{A_{eff}}{A_{ac}}$$

مثال ۲-۵- یک مدار مغناطیسی که از هسته مورق با $K_d = 0.94$ ساخته شده در شکل (۲-۱۲-الف) دیده می‌شود. اگر شار در فاصله هوایی برابر 10^{-3} باشد، جریان تحریک را بیابید. مشخصه B-H هسته را خطی فرض کرده ($\mu_r = 8000$) و از اثر شکستگی (اثر لبه) صرف‌نظر نمائید. همچنین، تعداد دور سیم پیچ (N) را 1000 در نظر بگیرید.



شکل (۲-۱۲-الف) مدار مغناطیسی مثال (۲-۵)

حل - مدل مداری این سیستم در شکل زیر دیده می‌شود.



شکل (۲-۱۲-ب) مدل مداری سیستم شکل (۲-۱۲-الف)

$$\mathcal{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} = \frac{6 \times 10^{-3}}{\mu_0 \times (8 \times 10^{-4})} = 597 \times 10^4$$

$$\mathcal{R}_c = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A_{eff}}$$

$$l_c = 2(100 + 80) - 6 = 0.354m$$

$$A_{eff} = A_{ac} \times K_d = (20 \times 40 \times 10^{-6}) \times (0.94) = 0.752 \times 10^{-3} m^2$$

$$\Rightarrow \mathcal{R}_c = 46900$$

$$F = NI = (\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g)\phi \Rightarrow I = 6A$$

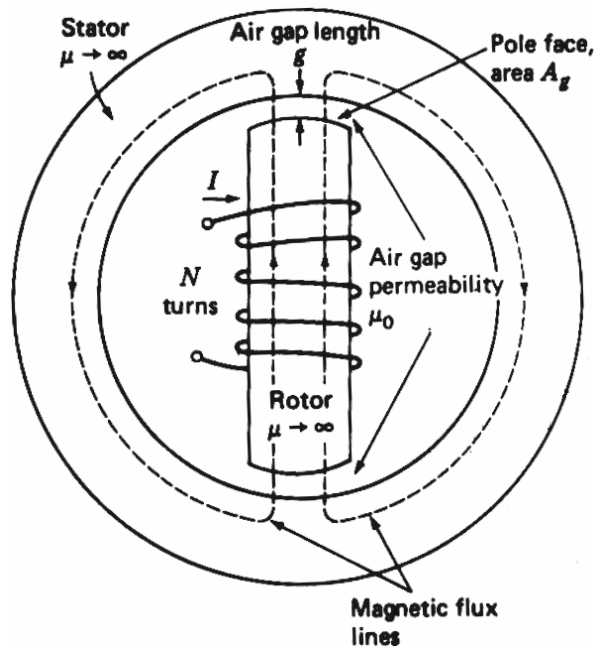
• هسته ایده‌آل

همانطور که گفته شد می‌توان از رلوکتانس هسته در مقابل رلوکتانس فاصله‌های هوایی صرف‌نظر کرد و مدار را بصورت ساده‌تر بدل نمود.

مثال ۲-۶- یک مدار مغناطیسی با هسته ایده‌آل در شکل ۲-۱۳ داده شده است (این سیستم در واقع نمایش ساده مدار مغناطیسی یک ماشین سنکرون است). شار فاصله هوایی (ϕ) و چگالی شار در این فاصله (B_g) را بدست آورید. اطلاعات این مثال عبارتند از:

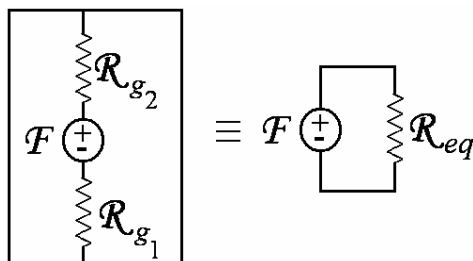
$$I = 10A, \quad N = 1000 \text{ دور}, \quad g = 1cm, \quad A_g = 2000cm^2$$

حل - مدار معادل این سیستم با ایده‌آل فرض کردن هسته ($\mu \rightarrow \infty$) به صورت زیر خواهد بود:



شکل (۲-۱۳-الف) مدل ساده ماشین سنکرون

$$\mathcal{R}_{eq} = \mathcal{R}_{g_1} + \mathcal{R}_{g_2} = 2\mathcal{R}_{g_1} = 2\mathcal{R}_{g_2}$$



شکل (۲-۱۳-ب) معادل مداری

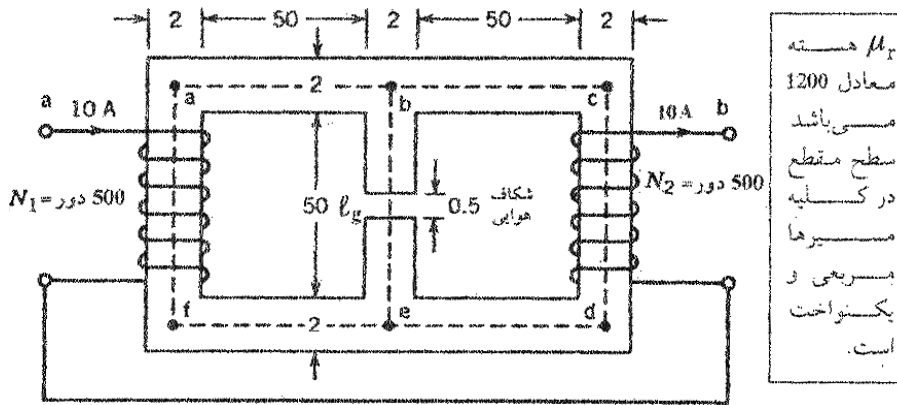
$$\Rightarrow \mathcal{R}_{eq} = 2 \frac{g}{\mu_0 A_g} \Rightarrow \phi = \frac{F}{\mathcal{R}_{eq}}$$

$$\Rightarrow \phi = \frac{NI\mu_0 A_g}{2g} = \frac{(1000)(10)(4\pi \times 10^{-7})(0.2)}{0.02} = 0.13 \quad \text{Wb}$$

$$\Rightarrow B_g = \frac{\phi}{A_g} = \frac{0.13}{0.2} = 0.65 \quad \text{T}$$

۲-۵) مدار مغناطیسی با دو منبع mmf

بسیاری از هسته‌های تک پنجره یا چند پنجره‌ای (با فاصله هوایی یا بدون فاصله هوایی) توسط بیش از یک منبع mmf تحریک می‌شوند. به عبارت دیگر ممکن است چندین پیچک بر روی یک هسته پیچیده شده باشند. تحلیل مدار مغناطیسی در این گونه موارد همانند تحلیل مدارهای الکتریکی با چند منبع ولتاژ است. مثال ۲-۷- مدار مغناطیسی شکل (۲-۱۴) از هسته با مشخصه خطی و $\mu_r = 1200$ تشکیل شده است. سطح مقطع هسته در کلیه مسیرها مربعی و یکنواخت و به ابعاد $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ می‌باشد. در این سیستم در سیم پیچ بر روی دو پایه هسته سوار شده و از هر کدام جریان 10A می‌گذرد. چگالی شار و شدت میدان را در فاصله هوایی بیابید (طبق شکل زیر).



μ_r هسته
 معادل 1200
 مسی باشد
 سطح مقطع
 در کلیه
 مسیرها
 مربعی و
 یکسواخت
 است.

شکل (۲-۱۴-الف) سیستم مغناطیسی دو تحرکه

حل - در این سیستم دو منبع mmf و چهار رلوکتانس به ترتیب ذیل می توان در نظر گرفت:

\mathcal{R}_1 : رلوکتانس abef
 \mathcal{R}_2 : رلوکتانس bcde
 \mathcal{R}_3 : رلوکتانس سنجش مغناطیسی مسیر be
 \mathcal{R}_g : رلوکتانس فاصله هوایی

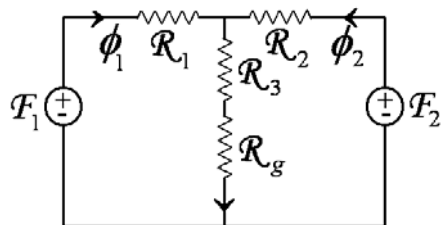
هر کدام از این رلوکتانس ها با توجه به اینکه A در تمام مسیرها ثابت و برابر $4 \times 10^{-4} m^2$ است، قابل محاسبه اند.

$$\mathcal{R}_1 = \mathcal{R}_2 = \frac{l_{abef}}{\mu A} = 2.58 \times 10^6 \quad \mathcal{R}_3 = \frac{l_{be}}{\mu A} = 0.82 \times 10^6 \quad \mathcal{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 A} = 9.94 \times 10^6$$

همچنین در مورد mmfها می توان نوشت:

$$F_1 = F_2 = 5000 \quad \text{AT}$$

بنابراین مدل مداری سیستم مغناطیسی به شکل زیر بدست می آید.



شکل (۲-۱۴-ب)

برای بدست آوردن ϕ_1 و ϕ_2 معادلات مش مدار فوق نوشته می شود.

$$\phi_1(\mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_3 + \mathcal{R}_g) + \phi_2(\mathcal{R}_3 + \mathcal{R}_g) = F_1$$

$$\phi_1(\mathcal{R}_3 + \mathcal{R}_g) + \phi_2(\mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_3 + \mathcal{R}_g) = F_2$$

از حل دستگاه دو معادله و دو مجهولی فوق ϕ_1 و ϕ_2 بدست می آیند:

$$\phi_1 = \phi_2 = 2.067 \times 10^{-4}$$

$$\Rightarrow \phi_g = \phi_1 + \phi_2 = 4.134 \times 10^{-4} \quad \text{Wb}$$

$$B_g = \frac{\phi_g}{A_g} = \frac{4.134 \times 10^{-4}}{4 \times 10^{-4}} = 1.034 \quad \text{T}$$

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} = \frac{1.034}{4\pi \times 10^{-7}} = 822 \times 10^3 \text{ AT/m}$$

۲-۶) مدار مغناطیسی با مشخصه غیر خطی هسته

در بخش ۲-۲ دیده شد که مواد مغناطیسی واقعی دارای پرمابیلیته ثابت نیستند. بلکه مقدار μ در آنها با تغییر میزان شار (و یا افزایش شدت میدان) تغییر می‌کند. خوشبختانه، هنگامی که μ به اندازه کافی بزرگ باشد، تغییرات آن، بخصوص هنگامی که مدار شامل فاصله هوایی است، تاثیر چندانی در محاسبات و عملکرد مدار مغناطیسی ندارد.

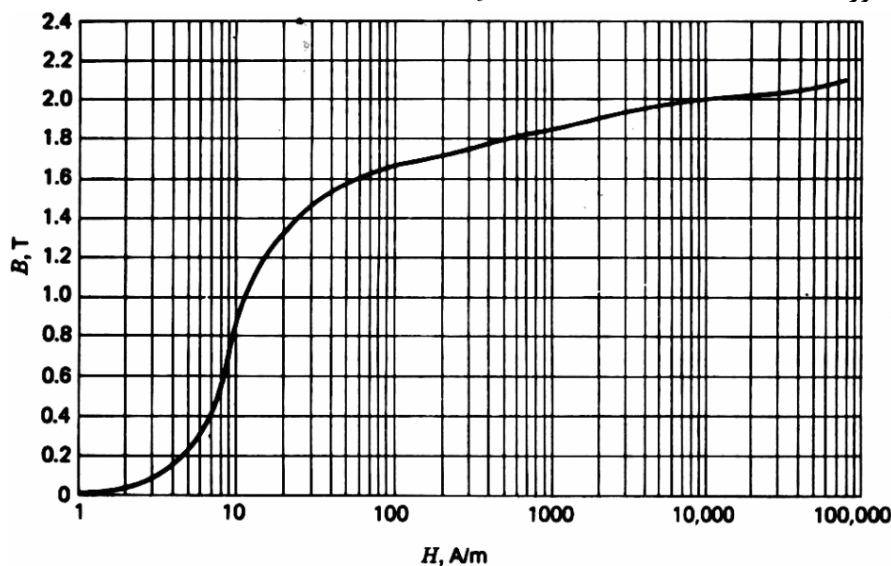
بهرحال، بایستی توجه داشت که اگر مشخصه B-H ماده مغناطیسی بصورت ترسیمی و یا تحلیلی (رابطه ریاضی) و یا جداول عددی در اختیار باشد با دانستن نقطه کار (معین بودن وضعیت ϕ یا B یا H) می‌توان μ را بدست آورد و رلوکتانس هسته را (البته در آن نقطه کار) محاسبه کرد. بدیهی است که در اینگونه موارد \mathcal{R} تابعی از H یا B یا ϕ است.

اما در صورتیکه نقطه کار هسته معلوم نبوده و با دانستن mmf بخواهیم شار هسته را معلوم نمائیم، بایستی از روشهای ترسیمی یا سعی و خطا برای تعیین نقطه کار استفاده شود.

لازم به ذکر است که در صورتیکه هسته فقط از یک نوع ماده مغناطیسی (و بدون فاصله هوایی) تشکیل شده باشد، می‌توان نقطه کار را بدون نیاز به روشهای ترسیمی یا سعی و خطا بدست آورد.

مثال ۲-۸- فرض کنید هسته مغناطیسی نشان داده شده در شکل (۲-۷) دارای B-H همانند شکل (۲-۱۵) باشد. جریان i را برای اینکه چگالی شار هسته 1T بشود، محاسبه نمائید. سایر مشخصات هسته را به ترتیب ذیل در نظر بگیرید:

$$A_c = A_g = 9\text{cm}^2 \quad g=0.05\text{cm} \quad l_c = 30\text{cm} \quad N=500 \text{ دور}$$



شکل (۲-۱۵) یک نمونه منحنی B-H مربوط به مثال ۲-۸

حل - با توجه به شکل ۲-۱۵ مقدار H_c برای اینکه $B_c = 1\text{T}$ بشود، خوانده می‌شود.

$$H_c = 12 \quad \text{A/m}$$

و از اینرو mmf هسته با توجه به مسیر موثر هسته بدست می‌آید.

$$\mathcal{F}_c = H_c l_c = 12(0.3) = 3.6 \quad \text{AT}$$

mmf لازم برای فاصله هوایی نیز قابل محاسبه است.

$$F_g = H_g g = \frac{B_g g}{\mu_0} = \frac{5 \times 10^{-4}}{4\pi \times 10^{-7}} = 396 \quad \text{AT}$$

بنابراین جریان لازم عبارتست از:

$$i = \frac{F_c + F_g}{N} = \frac{400}{500} = 0.8 \quad \text{A}$$

۷-۲) شار پیوندی و اندوکتانس در مدارهای مغناطیسی

دیدیم که در یک مدار مغناطیسی تک تحریک (همانند شکل‌های ۲-۳ و ۲-۷) شاری که در هسته براه می‌افتد تابعی از رلوکتانس مسیر و نیروی محرکه مغناطیسی است. mmf نیز خود از دو عامل جریان و تعداد دور سیم‌پیچ نتیجه می‌شود. به عنوان یک معیار برای تعیین کیفیت آهنربای الکتریکی ساخته شده توسط مدارهای مغناطیسی پیش‌گفته می‌توان رابطه و نسبت ϕ به i یا ϕ به Ni را در نظر گرفت. این نسبت‌ها بصورت منحنی‌هایی دقیقاً شبیه منحنیهای B-H ماده مغناطیسی با مقیاسهای متفاوت در می‌آیند. چرا که:

$$Ni = H_c l_c \quad \text{و} \quad BA = \phi$$

بنابراین اگر به عنوان مثال محور عمودی منحنی B-H یک ماده مغناطیسی در A، یعنی در سطح مقطع هسته‌ای که از این ماده ساخته شده، ضرب شود و محور افقی این مشخصه نیز در طول متوسط هسته مزبور ضرب شود، مشخصه $F - \phi$ سیستم بدست می‌آید. مشخصه دیگری که به دلیل خاص خود مورد توجه است، مشخصه‌ای است که نسبت بین i و $N\phi$ را در مدارهای مغناطیسی نشان می‌دهد. بدیهی است که این منحنی نیز مشابه منحنی B-H ماده مغناطیسی است و می‌تواند به عنوان معیاری برای کیفیت آهنربای الکتریکی در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر، نسبت بین i و $N\phi$ نشان می‌دهد که به ازای عبور چه جریانی، چه آهنربایی ساخته شده است. لازم به ذکر است که مشخصه B-H کیفیت ماده مغناطیسی بکار برده شده را نشان می‌دهد، اما با مشخصه‌هایی همچون $N\phi - i$ و $F - \phi$ ساختار مدار مغناطیسی ارزیابی می‌شود.

در فرهنگ مهندسی برق $N\phi$ با علامت λ نشان داده شده و به آن "flux linkage" گفته می‌شود که ترجمه فارسی مناسبی تاکنون برای آن ارائه نشده و از آن به عنوان "شار پیوندی"، "شار دور"، "شار حلقه زننده" و ... یاد شده است.

بنابراین رابطه بین λ و i به عنوان یک معیار، بیانگر شدت میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط پیچک به ازای جریان معین است. در واقع هر چه نسبت λ/i بزرگتر باشد. نشان دهنده این است که تعداد دور سیم‌پیچ و یا شار هسته و یا هر دوی اینها بزرگتر است. نسبت λ/i را اندوکتانس سیستم مغناطیسی و یا بطور عمومی‌تر اندوکتانس پیچک می‌گویند و با L نمایش می‌دهند. واحد آن هانری (H) یا $\frac{\text{و بردور}}{\text{آمپر}}$ می‌باشد:

$$\lambda = N\phi \quad , \quad L = \lambda/i \quad (14-2)$$

از آنجا که L یا اندوکتانس یک ویژگی ساختاری سیستم الکترومغناطیسی است و به جریانی که از سیم‌پیچ می‌گذرد بستگی ندارد، مناسب است، آنرا برحسب مشخصات ابعادی سیستم بنویسیم:

$$L = \lambda/i = \frac{N\phi}{i} = \frac{NF}{i\mathcal{R}} = \frac{N \cdot Ni}{i \frac{g}{\mu_0 A_c}}$$

$$\Rightarrow L = \frac{N^2 \cdot \mu_0 A_c i}{g} = \frac{N^2}{\mathcal{R}_g} \quad (15-2)$$

توجه شود که در نوشتن رابطه بالا از رلوکتانس هسته در مقابل رلوکتانس فاصله هوایی صرفنظر شده است. در صورتی که هسته فاقد فاصله هوایی بوده و طول موثر و پرمابلیته آن به ترتیب l_c و μ باشند. خواهیم داشت:

$$L = \frac{N^2 \mu A_c}{l_c} = \frac{N^2}{\mathcal{R}_c} \quad (16-2)$$

یعنی اندوکتانس با توان دوم تعداد دور سیم پیچ، با ضریب نفوذ هسته و با سطح مقطع هسته نسبت مستقیم و با طول هسته نسبت معکوس دارد. بطور کلی اگر به جای μ نسبت $\frac{B}{H}$ را قرار دهیم، رابطه کلی تری برای L در مدارهای مغناطیسی خطی و غیرخطی بدست می آید.

$$L = \frac{N^2 A}{l} \times \frac{B}{H} \quad (17-2)$$

سؤال - تفاوت نسبت B و H در نقطه کار هسته (μ) با L و شباهت آن؟

۲-۸) سلف اندوکتور به عنوان یک عنصر در مدارهای الکتریکی

با استفاده از قانون القای فارادی می توان رابطه بین اندوکتانس و ولتاژ القا شده در یک سیم پیچ را پیدا کرد. در اینجا مجدداً قانون القای فارادی را برای یک سیم پیچ مرور می کنیم: هنگامی که میدان مغناطیسی در هسته یک سیم پیچ تغییر می کند، در هر حلقه پیچک، ولتاژی القا می شود که مقدار آن برابر است با $\frac{d\phi}{dt}$ و اگر پیچک دارای N حلقه باشد ولتاژ القا شده در دو سر آن N برابر می شود:

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{dN\phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (18-2)$$

از طرف دیگر می دانیم که اگر جریان i از داخل سیم پیچ بگذرد شار $\lambda = Li$ در آن ایجاد می شود، حال اگر i متغیر باشد، λ نیز متغیر خواهد بود و بنابراین ولتاژی در دو سر پیچکی که جریان متغیر از آن می گذرد القاء می شود. یعنی این پیچک نقش "خود القا" را بازی می کند. ترکیب رابطه (۲-۱۸) با (۲-۱۴) رابطه بین ولتاژ و جریان در این عنصر را نشان می دهد:

$$e = \frac{d\lambda}{dt}, \quad \lambda = Li \quad \Rightarrow e = L \frac{di}{dt} \quad (19-2)$$

بنابراین، سلف اندوکتانس یا سلف اندوکتور یا خود القا را می توان به عنوان یک عنصر مداری که رابطه معینی بین جریان درونی و ولتاژ دو سر آن وجود دارد، تعریف کرد.

لازم به تاکید است که بیشترین کاربرد مفهوم اندوکتانس در مواردی است که هسته مغناطیسی در نقطه کار خطی خود باشد و یا بدلیل وجود فاصله هوایی نقش غیرخطی آن بسیار کم اثر باشد. مثال ۲-۹- اندوکتانس مدار شکل (۲-۷) را با صرفنظر از پدیده شکستگی خطوط شار، بدست آورید. حل - ابتدا شار هسته را بدست می آوریم:

$$\phi = \frac{Ni}{\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g} = \frac{N A_c i}{\frac{l_c}{\mu} + \frac{g}{\mu_0}}$$

حال می توان اندوکتانس را با استفاده از رابطه (۲-۱۴) نوشت:

$$L = \frac{N\phi}{i} = \frac{N^2 A_c}{l_c/\mu + g/\mu_0} = \frac{\mu_0 N^2 A_c}{g + (\mu_0/\mu)l_c}$$

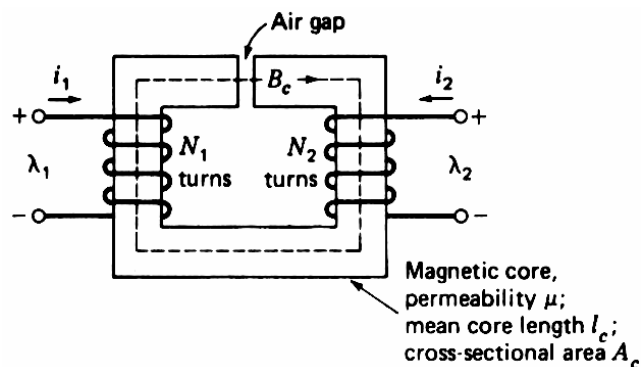
از آنجا که μ_0/μ بسیار کوچک است و می‌توان دید که $(\mu_0/\mu)l_c \ll g$ است، بنابراین می‌توان گفت:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A_c}{g}$$

که با رابطه (۲-۱۵) و شرط ذیل آن مطابقت دارد.

۹-۲) اندوکتانس متقابل

شکل (۲-۱۶) یک مدار مغناطیسی که هسته آن دارای فاصله هوایی بوده و دو سیم‌پیچ نیز روی پایه‌های هسته پیچیده شده را نشان می‌دهد. توجه کنید که جهت مرجع برای جریان‌ها طوری انتخاب شده که شارهای تولیدی دو سیم‌پیچ هم جهت باشند.



شکل (۲-۱۶) یک مدار مغناطیسی دو تحرک

در این مدار mmf کل عبارتست از:

$$\mathcal{F} = Ni = N_1 i_1 + N_2 i_2 \quad (20-2)$$

و با صرف‌نظر از رلوکتانس هسته، شار هسته چنین خواهد شد:

$$\phi = (N_1 i_1 + N_2 i_2) \frac{\mu_0 A_c}{g} \quad (21-2)$$

از معادله (۲-۲۱) دریافت می‌شود که شار برآیند در هسته نتیجه عملکرد همزمان هر دو mmf است و این شار است که نقطه کار هسته مغناطیسی را معین می‌کند. عبارت دیگر این شار هم از داخل پیچک ۱ و هم از داخل پیچک ۲ می‌گذرد و می‌توان برای هر پیچک شار پیوندی را چنین نوشت:

$$\lambda_1 = N_1 \phi \quad , \quad \lambda_2 = N_2 \phi \quad (22-2)$$

اگر رابطه مربوط به یکی از سیم‌پیچها را گسترش دهیم، خواهیم دید که:

$$\lambda_1 = N_1 \phi = N_1 \left[(N_1 i_1 + N_2 i_2) \frac{\mu_0 A_c}{g} \right]$$

$$\Rightarrow \lambda_1 = N_1^2 \frac{\mu_0 A_c}{g} i_1 + N_1 N_2 \frac{\mu_0 A_c}{g} i_2 \quad (23-2)$$

با توجه به تعریف اندوکتانس معادله فوق را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$\lambda_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2 \quad (24-2)$$

$$L_{11} = N_1^2 \frac{\mu_0 A_c}{g} = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_g} \quad (25-2) \quad \text{که در آن}$$

$$L_{12} = N_1 N_2 \frac{\mu_0 A_c}{g} = \frac{N_1 N_2}{\mathcal{R}_g} \quad (26-2) \quad \text{و}$$

L_{11} را اندوکتانس خودی سیم پیچ ۱ می گویند و $L_{11}i_1$ شار پیوندی سیم پیچ ۱ ناشی از جریان خودش است. به عبارت دیگر، اگر سیم پیچ دوم جریان نداشت ($i_2 = 0$) همین شار از سیم پیچ ۱ عبور می کرد.

L_{12} اندوکتانس متقابل بین سیم پیچ ۱ و ۲ نامیده شده و $L_{12}i_2$ بیانگر بخشی از شار پیوندی کوئل ۱ است که عامل ایجاد آن جریان کوئل ۲ می باشد. بطور متشابه می توان اندوکتانس خودی و متقابل را برای پیچک ۲ نوشت:

$$\lambda_2 = L_{21}i_1 + L_{22}i_2 \quad (27-2)$$

$$L_{21} = N_1 N_2 \frac{\mu_0 A_c}{g} = \frac{N_1 N_2}{\mathcal{R}_g} \quad (28-2) \quad \text{که در آن}$$

$$L_{22} = N_2^2 \frac{\mu_0 A_c}{g} = \frac{N_2^2}{\mathcal{R}_g} \quad (29-2) \quad \text{و}$$

دیده می شود که در این مدار $L_{21} = L_{12}$ است. این ویژگی در تمام سیستمهایی که مشخصه B-H خطی دارند همواره وجود خواهد داشت.

توجه داشته باشید که در صورتیکه از رلوکتانس هسته صرف نظر نمی کردیم، طبق معادلات (۲۵-۲)، (۲۶-۲)، (۲۸-۲) و (۲۹-۲) به جای \mathcal{R}_g ، $\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g$ در مخرج کسرهای قرار می گرفت.

همچنین، باید گفت که مطالب فوق برای سیستمی با n سیم پیچ تحریک قابل تعمیم است. یعنی:

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} \quad (30-2)$$

و اگر سیستمها دارای مشخصه B-H خطی می بودند، برای تمام i و j ها داشتیم:

$$L_{ij} = L_{ji} \quad (31-2)$$

۲-۱۰) انرژی در مدارهای مغناطیسی

تاکنون بطور ضمنی دریافته ایم که مدارهای مغناطیسی با دریافت انرژی از منبع الکتریکی، آنرا بصورت انرژی (در میدان) مغناطیسی ذخیره می کنند. اکنون این موضوع را با رابطه و استدلال بی می گیریم. توان الکتریکی دریافتی یک مدار مغناطیسی (یا بطور ساده تر یک سیم پیچ) از منبع الکتریکی، بطور لحظه ای از حاصلضرب جریان و ولتاژ سیم پیچ بدست می آید:

$$P = ie = i \frac{d\lambda}{dt} \quad (32-2) \quad e = \frac{d\lambda}{dt}$$

از طرف دیگر با استفاده از قوانین فیزیک کلاسیک داریم:

$$P = \frac{dw}{dt} \Rightarrow \Delta w = \int_{t_1}^{t_2} P dt \quad (33-2)$$

بنابراین در یک مدار مغناطیسی که با توان الکتریکی تحریک می شود، داریم:

$$\Delta w = \int P dt = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} i d\lambda \quad (34-2)$$

Δw انرژی دریافتی است که در میدان مغناطیسی ذخیره می‌شود. به عبارت دیگر Δw میزان تغییر انرژی در میدان مغناطیسی در فاصله تغییرات شار پیوندی از λ_1 به λ_2 و یا در دوره زمانی t_1 تا t_2 است. هنگامی که سیستم دارای یک سیم پیچ تحریک بوده و اندوکتانس آن نیز ثابت است، می‌توان تغییر انرژی را بصورت زیر نوشت:

$$\Delta w = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} i d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\lambda}{L} d\lambda = \frac{1}{2L} (\lambda_2^2 - \lambda_1^2) \quad (35-2)$$

اگر λ_1 را برابر صفر قرار دهیم، انرژی کل ذخیره شده در یک میدان مغناطیسی به ازای هر مقدار معین λ بدست می‌آید:

$$w = \frac{1}{2L} (\lambda^2) = \frac{1}{2} Li^2 \quad (36-2)$$

مثال ۲-۱۰- برای مدار مغناطیسی شکل (۷-۲) و با شرایط مثال (۸-۲)، \mathcal{R}_c ، \mathcal{R}_g ، L و انرژی را در حالتی که $B_c = 1T$ باشد، محاسبه کنید.

$$\mathcal{R}_c = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A_c} = \frac{0.3}{(4\pi \times 10^{-7})(70,000)(9 \times 10^{-4})} = 3.8 \times 10^3 \text{ AT/Wb} \quad \text{حل -}$$

$$\mathcal{R}_g = \frac{g}{\mu_0 A_g} = 44.2 \times 10^4 \text{ AT/Wb}$$

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{0.45}{0.8} = 0.56 \quad \text{H}$$

$$w = \frac{1}{2L} \lambda^2 = \frac{(0.45)^2}{2(0.56)} = 0.18 \text{ J}$$

• روابط معادل برای انرژی در مدار مغناطیسی

$$P = ie \Rightarrow \frac{dw}{dt} = i \frac{d\lambda}{dt} \Rightarrow dw = i d\lambda \quad (37-2)$$

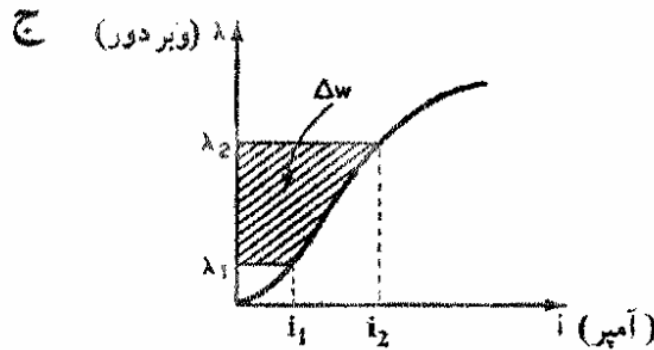
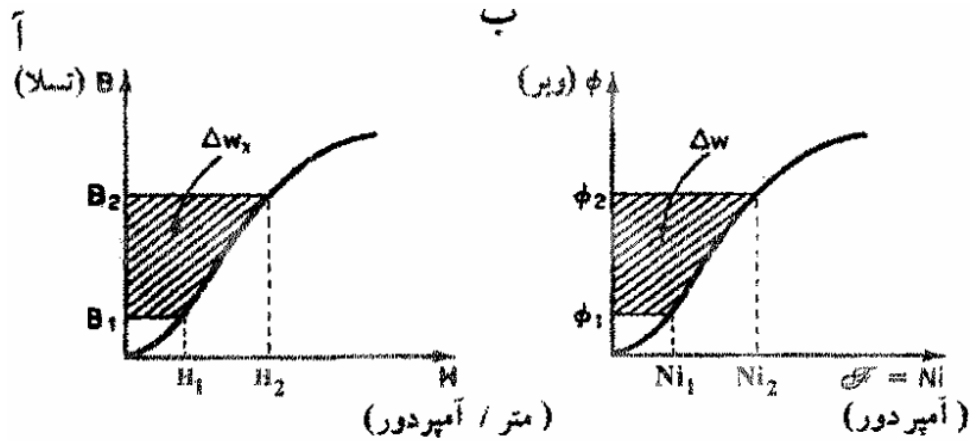
$$d\lambda = Nd\phi \quad \text{از طرفی داریم:}$$

$$dw = i d\lambda = iNd\phi = Fd\phi \quad (38-2) \quad \text{بنابراین:}$$

$$dw = H_i \cdot l_c d\phi = Fd\phi \quad \text{همچنین می‌توان نوشت:}$$

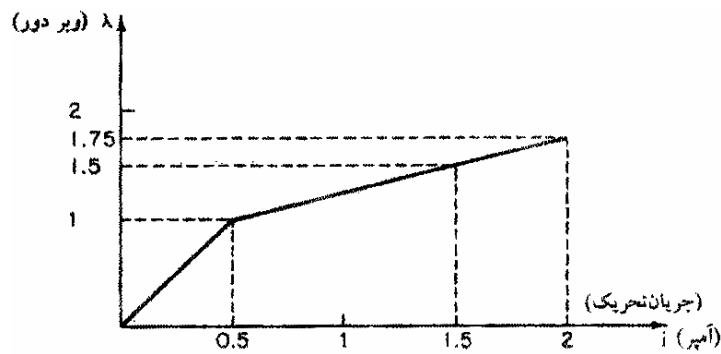
$$(\phi = B_c A_c \Rightarrow d\phi = A_c dB_c) \Rightarrow dw = H_c l_c A_c dB_c = V_c \cdot H_c dB_c \quad (39-2) \quad (V_c \text{ حجم هسته است})$$

هر یک از ۳ رابطه فوق را می‌توان برای محاسبه میزان انرژی میدان مغناطیسی بکار برد. هنگامی که مشخصه B-H هسته در دسترس باشد، از رابطه (۳۹-۲) و هنگامی که مشخصه $\phi - F$ معلوم باشد (یا $\phi - i$)، می‌توان از رابطه (۳۸-۲) استفاده کرد. رابطه (۳۷-۲) موقعی بکار می‌رود که مشخصه $\lambda - i$ هسته در اختیار باشد. یادآوری می‌شود که میزان انرژی ذخیره شده را می‌توان بصورت ترسیمی با استفاده از هر یک از ۳ منحنی فوق الذکر بدست آورد. در واقع، w با محاسبه انتگرال زیر سطح هر یک از این منحنیها قابل محاسبه است.



شکل (۱۷-۲) نحوه محاسبه انرژی در سیستم مغناطیسی با استفاده از مشخصه‌های مغناطیسی هسته

مثال ۱۱-۲- مشخصه $\lambda - i$ یک ماده مغناطیسی در شکل (۱۸-۲) داده شده است. کل انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی را هنگامی که جریان ثابت 1.75A از سیم پیچ می‌گذرد، بدست آورید.



شکل (۱۸-۲) مشخصه $\lambda - i$ برای یک سیستم مغناطیسی (با تقریب خطی - تکه‌ای)

$$w = \int_0^{\lambda_d} i d\lambda$$

حل -

$$\lambda_d = \lambda|_{i=1.75A} = 1.625$$

λ_d را با استفاده از شکل (۱۸-۲) بدست می‌آوریم:

$$\Rightarrow w = \int_0^1 i d\lambda + \int_1^{1.5} i d\lambda + \int_{1.5}^{1.75} i d\lambda = \Delta w_1 + \Delta w_2 + \Delta w_3 = \frac{(1)(0.5)}{2} + \frac{(1.5+0.5)0.5}{2} + \frac{(1.5+1.75)(0.125)}{2}$$

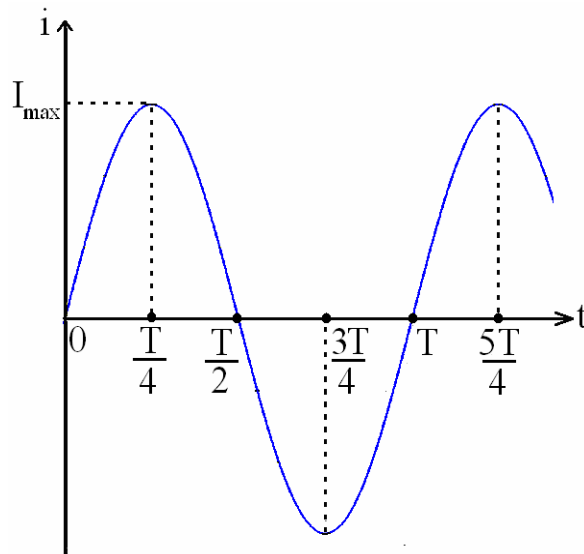
$$w = 0.953J$$

۲-۱۱) مدار مغناطیسی با تحریک ac

در مباحث پیشین جریان تحریک سیم پیچها در مدار مغناطیسی، dc (بدون تغییر در زمان) فرض می شد. در حالیکه در بسیاری از ماشینهای الکتریکی و در تمام ترانسفورماتورها، سیم پیچها با جریان متغیر - بویژه جریان متناوب سینوسی - تحریک می شوند. تحلیل مدارهای مغناطیسی با تحریک سینوسی ac هنگامی که مدار در محدوده کار خطی باشد، تفاوت چندانی با تحریک dc ندارد. اما غیرخطی شدن مشخصه و پدیده دیگری که آنرا پدیده هیستریزیس می نامیم - و مخصوص مواد مغناطیسی است - بر پیچیدگی تحلیل می افزاید.

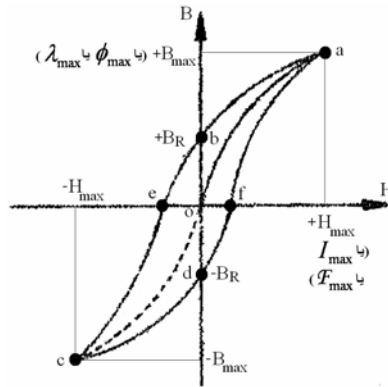
۲-۱۱-۱) منحنی مغناطیس شونده و پدیده هیستریزیس در مواد مغناطیسی

یک مدار مغناطیسی ساده همانند شکل (۲-۳) را در نظر بگیرید که با یک جریان متناوب سینوسی با دوره تناوب T تحریک می شود. فرض کنید هسته قبل از این تحریک تحت تاثیر هیچ میدان مغناطیسی قرار نداشته و شار مغناطیسی آن صفر است. بدیهی است که با تغییر i یا B یا ϕ در هسته شروع به تغییر خواهد نمود. منحنیهای $B-H$ یا $\phi-i$ یا $\lambda-i$ و یا $\phi-F$ که از آنها به مشخصه یا منحنی مغناطیسی شونده مدار یاد می کنیم، در این حالت، مسیر و شکل ویژه ای پیدا خواهد نمود. برای توصیف این روند شکل موج جریان در یک پریود را به چهار بازه زمانی مساوی (شکل ۲-۱۹) تفکیک و شار ایجاد شده در هسته در هر بازه را بررسی می نمائیم:



شکل (۲-۱۹) جریان تحریک متناوب سینوسی

(۱) در فاصله زمانی 0 تا $T/4$ همزمان با افزایش جریان تحریک از 0 تا I_{max} ، میدان H در هسته نیز همزمان و هم شکل با آن افزایش پیدا می کند (چرا؟). در این بازه چگالی شار در هسته (B) مسیر مشخصه $B-H$ ویژه ماده مغناطیسی هسته (همانند شکل ۲-۱) را طی می کند. با فرض اینکه I_{max} به اندازه کافی بزرگ است، B_{max} در محدوده غیرخطی (اشباع) منحنی $B-H$ هسته قرار می گیرد. در شکل (۲-۲۰) این مسیر با نام oa مشخص شده است.



شکل (۲-۲۰) مشخصه مغناطیس شوندگی هسته مغناطیسی در اثر جریان تحریک سینوسی متناوب

(۲) در بازه زمانی $T/4$ تا $T/2$ ، i دارای مقدار مثبت و روند نزولی است تا به صفر برسد. H نیز مقدار مثبت و روند نزولی خواهد داشت و در $t = T/2$ برابر با صفر خواهد شد. اما B در آخر این دوره به صفر نخواهد رسید و در $B, i = H = 0$ دارای یک مقدار مثبت B_R خواهد شد (مسیر تغییر B در این دوره با منحنی ab در شکل ۲۰-۲ نشان داده شده است). این مقدار را شار پسماند هسته می‌گوئیم. خاصیت پسماند (هیستریزیس = Hysteresis) در هسته‌های مغناطیسی متفاوت، شدت و ضعف متفاوت دارد. ولی در هر حال مختص مواد مغناطیسی است.

(۳) برای اینکه B_R به صفر رسد بایستی جریان در جهت منفی در سیم پیچ برقرار شود. در ادامه تزریق جریان به سیم پیچ در بازه زمانی $T/2$ تا $3T/4$ دیده می‌شود که i و H دارای روند نزولی و مقدار منفی هستند تا بترتیب به $-I_{max}$ (یا $-H_{max}$) می‌رسند. به ازای مقدار معینی از i یا H منفی، B به صفر رسیده و پس از آن شروع به منفی شدن می‌کند تا در $-H_{max}$ به $-B_{max}$ می‌رسد (این تغییر در شکل ۲۰-۲ با مسیر bc نشان داده می‌شود).

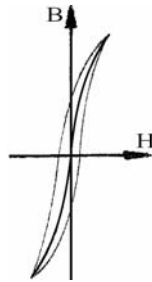
لازم به ذکر است که اگر هسته خام از ابتدا در معرض تحریک جریان منفی قرار می‌گرفت، مسیر oc را چنانچه با خط چین در شکل ۲۰-۲ نشان داده شده، طی می‌نمود.

(۴) در بازه زمانی چهارم که جریان i (و میدان H)، در یک روند افزایشی از $-I_{max}$ (یا $-H_{max}$) به صفر می‌رسد، شار یا B بر روی مسیر cdf حرکت می‌کند و در $i=0$ ($H=0$) به $-B_R$ می‌رسد. یعنی در اینجا نیز با صفر شدن میدان، مقداری شار پسماند در هسته باقی می‌ماند که البته در جهت معکوس شار پسماند B_R است.

(۵) بدیهی است در اینجا نیز برای صفر شدن شار هسته بایستی جریان مثبت با دامنه معین از سیم پیچ گذرانده شود. این پدیده در $1/4$ سیکل دوم جریان تحریک (بازه زمانی T تا $5T/4$ در شکل ۲-۱۹) اتفاق می‌افتد و با افزایش میدان و جریان به سمت H_{max} (یا I_{max}) ابتدا B در هسته صفر شده و سپس مجدداً به مقدار B_{max} (یا ϕ_{max}) می‌رسد (مسیر dfa در شکل ۲۰-۲). در پایان این بازه زمانی یک سیکل کامل هیستریزیس شکل گرفته و پس از آن، در صورتیکه جریان تحریک، مسیر منحنی سینوسی را تکرار نماید، مشخصه مغناطیس هسته نیز بر روی سیکل هیستریزیس (مسیر حلقه بسته $a \rightarrow b \rightarrow e \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow f \rightarrow a$) شکل خواهد گرفت.

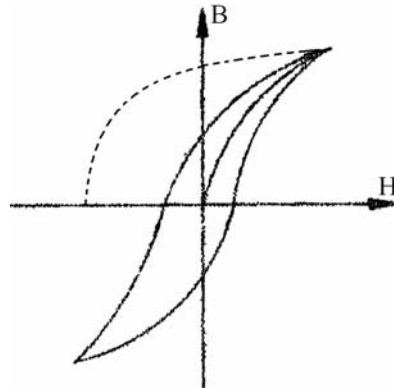
• همانطور که گفته شد، خاصیت پسماند در مواد مغناطیسی مختلف یکسان نیست. موادی که ویژگی پسماند کمتری از خود نشان می‌دهند، پس از قطع یا صفر شدن جریان تحریک خاصیت، مغناطیسی خود را سریعتر و بیشتر از دست می‌دهند به این مواد مغناطیسی، مواد آهن نرم می‌گویند. آهن خالص از این گروه است.

مشخصه هیستریزیس این مواد باریک بوده و در حالت حدی بصورت یک خط منحنی در می‌آید که بصورت متقارن در ربع اول و سوم قرار می‌گیرد. در شکل زیر این حالت حدی با خط پر رنگ نمایش داده شده است.



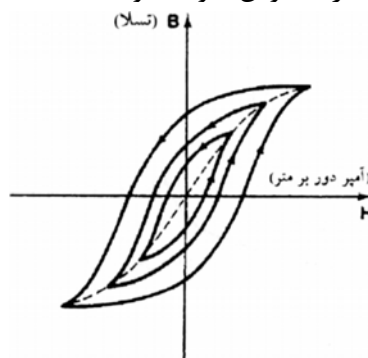
شکل (۲۱-۲) مشخصه (سیکل) هیستریزیس یک ماده مغناطیسی آهن نرم و حالت حدی آن (که با خط پر رنگ دیده می‌شود).

- در مقابل مواد مغناطیسی آهن نرم، آلیاژهایی از آهن وجود دارند که پسماند هسته در آنها زیاد است. این مواد را مغناطیسی آهن سخت می‌گویند. بنابراین با حذف یا صفر شدن جریان تحریک، ویژگی مغناطیسی باقیمانده در آنها پایدارتر و بزرگتر است. از این مواد برای ساخت آهنربای دائمی نیز استفاده می‌شود. مشخصه هیستریزیس این مواد بزرگتر (عریض‌تر) و در حالت حدی، بدون افت است. این مشخصه در شکل ۲۲-۲ نشان داده شده است و حالت حدی خط‌چین است که عملاً بیانگر مشخصه مغناطیسی یک آهنربای دائمی است.



شکل (۲۲-۲) سیکل هیستریزیس ماده مغناطیسی آهن سخت (مشخصه حدی با خط‌چین نشان داده شده است).

- اگر سیستم مغناطیسی شکل (۲۳-۲) با جریانهای ac و دامنه‌های گوناگون تحریک شود، حلقه‌های هیستریزیس مختلفی همچون شکل (۲۳-۲) تشکیل می‌شود. نکته جالب توجه اینست که مکان هندسی نوک حلقه‌های هیستریزیس ac یعنی مشخصه خط‌چین در این شکل همان مشخصه B-H حدی شکل (۲۱-۲) است و تفاوت این مشخصه با مشخصه B-H شکل (۱-۲) اینست که علاوه بر ربع اول صفحه مختصات B-H در ربع سوم نیز بصورت متقارن ترسیم شده و نشان می‌دهد که اگر یک هسته مغناطیسی با جریانهای ثابت و یکسان ولی پلاریته مختلف تحریک شود، چگالی شار از نظر دامنه یکسان، ولی از نظر جهت شار معکوس خواهد بود.



شکل (۲۳-۲) حلقه‌های هیستریزیس برای یک هسته که توسط جریانهای ac با دامنه‌های متفاوت تحریک می‌شود.

۲-۱۱-۲ هسته با مشخصه خطی با جریان تحریک ac

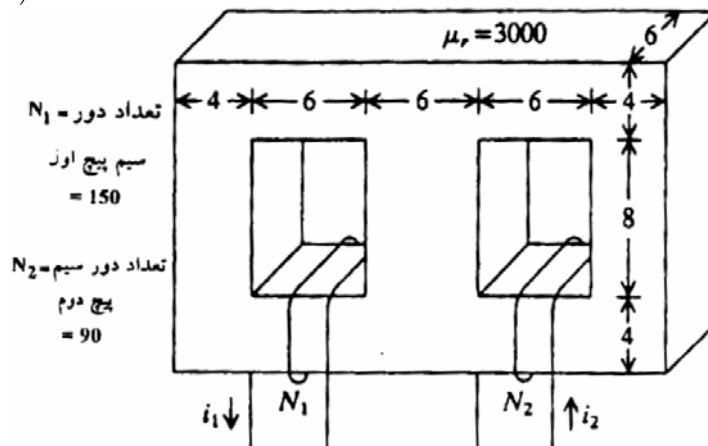
اگر جریان تحریک ac در حدی باشد که هسته به اشباع نرود و حلقه هیستریزس هسته هم به حالت حدی آن نزدیک باشد و بتوانیم مشخصه B-H هسته را بصورت یک خط راست گذرنده از مبدا که در ربع اول و سوم امتداد دارد، در نظر بگیریم. در این صورت تحلیل مدار، تفاوت زیادی با تحلیل مدار خطی با تحریک dc ندارد.

مثال ۲-۱۲- در یک مدار مغناطیسی مطابق شکل (۲-۲۴)، کل هسته از یک ماده مغناطیسی ساخته شده

است. اگر جریان‌های تحریک به ترتیب زیر باشند و بتوان هسته را خطی فرض نمود، شار را در ستون وسط بیابید.

$$i_1 = \sqrt{2} \cos \omega t$$

$$i_2 = 0.3\sqrt{2} \cos(\omega t + 45^\circ)$$

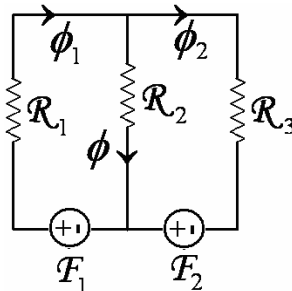


شکل (۲-۲۴-الف) مدار مغناطیسی با هسته خطی و تحریک ac

حل - مدل مداری این سیستم را به شکل زیر رسم می‌کنیم و عناصر آنرا بدست می‌آوریم.

$$\mathcal{R}_1 = \mathcal{R}_3 = \frac{2(0.03 + 0.06 + 0.02) + 0.12}{3000 \times \mu_0 \times 0.06 \times 0.04} = 37578$$

$$\mathcal{R}_2 = \frac{0.12}{3000 \times \mu_0 \times (0.06)^2} = 8842$$



شکل (۲-۲۴-ب)

$$F_1 = 150\sqrt{2} \cos \omega t \quad AT$$

$$F_2 = 27\sqrt{2} \cos(\omega t + 45^\circ) \quad AT$$

معادلات مش در شکل (۲-۲۴-ب) با روش تحلیلی حالت دائمی سینوسی (حوزه فازوری) نوشته و حل

$$\mathcal{R}_1 \phi_1 + \mathcal{R}_2 (\phi_1 - \phi_2) = F_1$$

می‌شوند:

$$\mathcal{R}_2 (\phi_2 - \phi_1) + \mathcal{R}_3 \phi_2 = F_2$$

$$F_1 = 150 \angle 0$$

$$F_2 = 27 \angle 45^\circ$$

پس از حل معادلات در حوزه فازوری

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= (3.343 + j0.081) \times 10^{-3} \quad Wb \\ \varphi_2 &= (1.065 + j0.427) \times 10^{-3} \quad Wb \\ \Rightarrow \varphi &= \varphi_1 - \varphi_2 = (2.369 - j0.346) \times 10^{-3} \quad Wb \\ &= (2.39 \times 10^{-3} \angle -8.3^\circ) \quad Wb\end{aligned}$$

با تبدیل فازور به سیگنال در حوزه زمان

$$\varphi = 2.39 \times 10^{-3} \sqrt{2} \cos(\omega t - 8.3^\circ) \quad Wb$$

چنانچه دیده می‌شود با تبدیل متغیرهای زمان به معادل‌های فازوری می‌توان مسئله را همانند یک مدار مغناطیسی با تحریک dc حل نمود و در آخر، متغیرهای مورد نظر را از صورت فازوری به صورت سیگنال‌های حوزه زمان تبدیل نمود.

• یادآوری

اگر پریود سیگنال سینوسی را T در نظر بگیریم، فرکانس آن f و برابر $\frac{1}{T}$ خواهد شد. با توجه به اینکه یک پریود کامل از موج سینوسی را می‌توان معادل 2π رادیان (یک دور کامل) در نظر گرفت و سرعت زاویه‌ای را که با ω نمایش می‌دهیم، بدست آورد:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (40-2) \quad (\omega \text{ را فرکانس زاویه‌ای نیز می‌نامند.})$$

یک کمیت سینوسی در حالت کلی بصورت: $y(\theta) = Y_{\max} \cos \theta$ (41-2) تعریف می‌شود θ زاویه برحسب رادیان است. هنگامی که θ با سرعت زاویه‌ای ω بصورت یک کمیت متغیر با زمان تعریف شود، در آن صورت سیگنال سینوسی در حوزه زمان بدست می‌آید:

$$\theta = \omega \tau + \theta_0 = \frac{2\pi}{T} t + \theta_0 \quad (42-2)$$

$$\Rightarrow y(t) = Y_{\max} \cos(\omega t + \theta_0) \quad (43-2)$$

برای تجزیه و تحلیل حالت دائمی مدارهای الکتریکی که با کمیت‌های سینوسی از نوع (43-2) سرو کار دارند، یک کمیت برداری معادل با کمیت سینوسی را بصورت زیر تعریف می‌کنند:

$$Y = \frac{Y_{\max}}{\sqrt{2}} \angle \theta_0 = Y_{rms} e^{j\theta_0} = \frac{Y_{\max}}{\sqrt{2}} (\cos \theta_0 + j \sin \theta_0) \quad (44-2)$$

۲-۱۱-۳) مدار مغناطیسی با تحریک ac و هسته بدون هیستریزیس

در این نوع تحلیل برای سادگی فرض می‌شود که حلقه هیستریزیس ماده مغناطیسی تشکیل نمی‌شود و در واقع از این منحنی صرف‌نظر می‌شود و تنها منحنی حدی شکل (2-21) به عنوان مشخصه مغناطیسی هسته در نظر گرفته می‌شود. البته محدودیتی برای عملکرد غیرخطی هسته وجود ندارد و هسته به منطقه اشباع نیز می‌رسد.

برای تحلیل می‌توان شار را سینوسی خالص در نظر گرفت. در واقع از آنجا که مدار معمولاً توسط یک منبع ولتاژ ac تحریک می‌شود ($v = V_{\max} \cos \omega t$) و در عمل ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ با این ولتاژ برابر است ($e \approx v$)

$$e = E_{\max} \cos \omega t \quad E_{\max} \approx V_{\max} \quad (45-2) \quad \text{بنابراین:}$$

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \quad \text{از طرف دیگر:}$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{e}{N} = \frac{E_{\max}}{N} \cos \omega t \quad (۴۶-۲)$$

بنابراین:

$$\Rightarrow \phi = \frac{E_{\max}}{N} \int \cos \omega t dt \quad (۴۷-۲)$$

$$\Rightarrow \phi = \frac{E_{\max}}{N\omega} \sin \omega t \quad (۴۸-۲)$$

یعنی ϕ نیز یک تابع سینوسی خالص (بدون هارمونیک) و با اختلاف فاز 90° نسبت به v و e است. اگر ϕ را

بصورت $\phi_{\max} \sin \omega t$ بنویسیم:

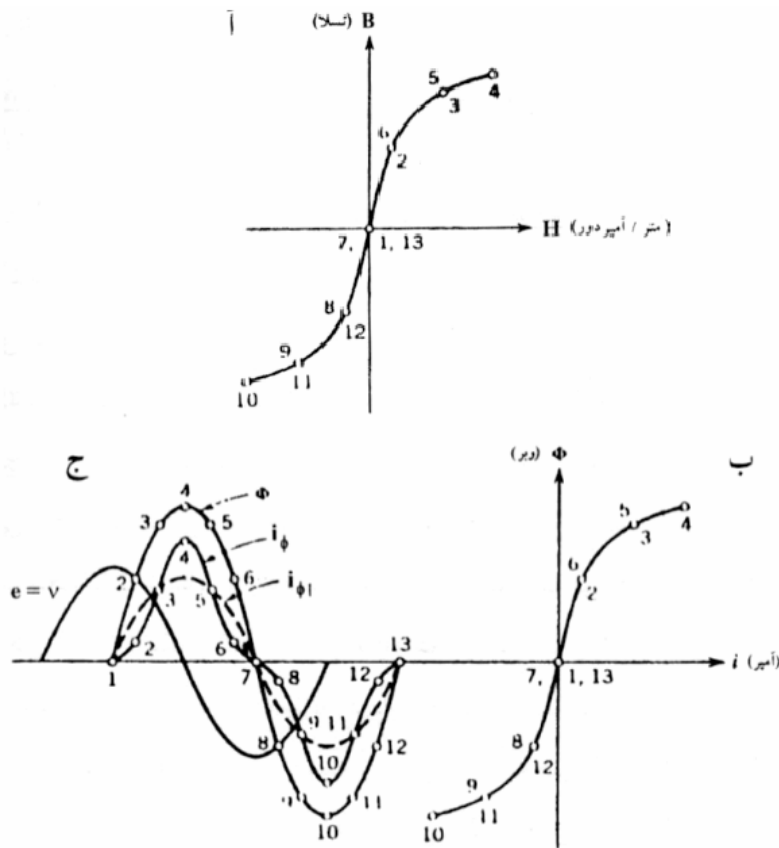
$$\phi_{\max} = \frac{E_{\max}}{N\omega} = \frac{E_{\max}}{2\pi \cdot f \cdot N} \quad (۴۹-۲)$$

$$E_{\max} = 2\pi f N \phi_{\max} \quad (۵۰-۲) \quad \text{و بنابراین:}$$

$$E_{rms} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi \cdot f \cdot N \cdot \phi_{\max}}{\sqrt{2}} \quad \text{و از آنجا:}$$

$$\Rightarrow E_{rms} = 4.44 f \cdot N \cdot \phi_{\max} \quad (۵۱-۲)$$

از آنجا که مشخصه B-H یا $\phi-i$ غیرخطی است، می‌توان به روش ترسیمی منحنی i (جریان تحریک) را برای هسته بدست آورد. در شکل (۲-۲۵-الف) مشخصه B-H و در شکل (۲-۲۵-ب) مشخصه $\phi-i$ هسته غیرخطی داده شده است. در شکل (۲-۲۵-ج) سیگنال ولتاژ و شار ϕ بصورت سینوسی بدون هارمونیک، و منحنی جریان متناوب تحریک با استفاده از مشخصه $\phi-i$ ، ترسیم شده که چنانچه دیده می‌شود، یک سینوسی همراه با اعوجاج است. این اعوجاجها طبق روش تبدیل فوریه می‌تواند بصورت هارمونیکهای موج اصلی تعریف شود. در این شکل، مولفه اصلی جریان تحریک بصورت خط چین داده شده است.



شکل (۲-۲۵)

چنانچه دیده می شود ϕ و i همفاز بوده و نسبت به e و v ، 90° پسفاز هستند.

۲-۱۱-۴) مدار مغناطیسی (بدون تقریب) با تحریک ac

در این بخش هسته مغناطیسی با مشخصه واقعی مغناطیس شوندگی، شامل حلقه هیستریزیس، در نظر گرفته می شود، همانطور که در بخش ۲-۱۱-۳ گفته شد معمولاً مدارهای مغناطیسی ac (همچون موتورها، ژنراتورهای ac و ترانسفورماتورها) با ولتاژ ac تحریک می شوند، که این ولتاژ با ولتاژ القا شده در سیم پیچ نیز تقریباً برابر است:

$$v = V_{max} \cos \omega t \quad \text{و} \quad e = E_{max} \cos \omega t \quad \text{و} \quad E_{max} \approx V_{max}$$

در اینجا نیز می توان دید که شار هسته نیز سینوسی و با اختلاف فاز 90° نسبت به ولتاژ و emf برقرار

$$\phi = \phi_{max} \sin \omega t$$

می شود. یعنی:

$$\phi_{max} = \frac{E_{max}}{N\omega_e}$$

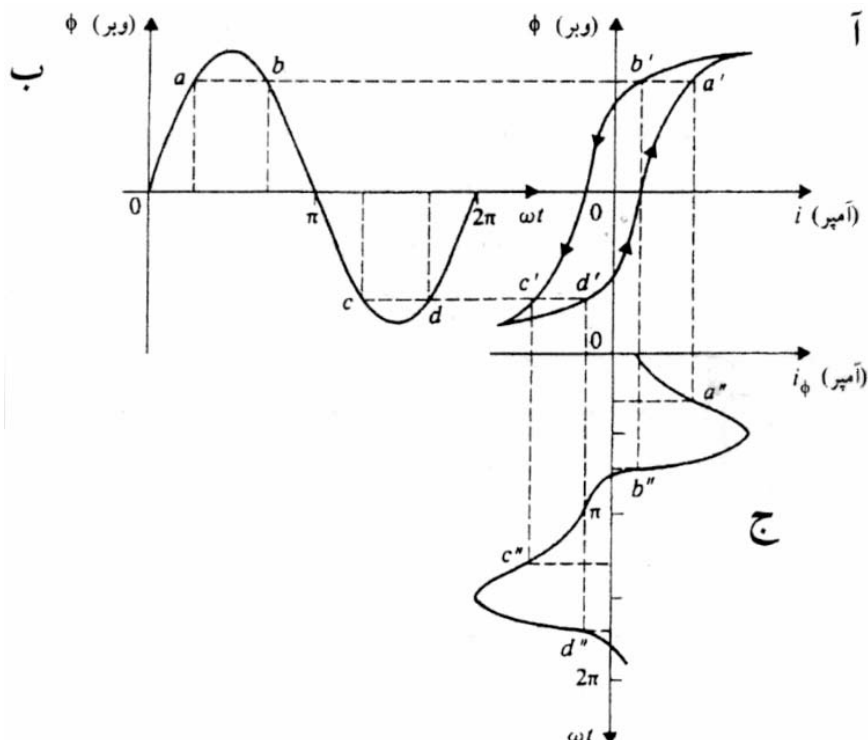
که در آن

و بنابراین رابطه ۲-۵۱ در مورد مقدار موثر ولتاژ القا شده در سیم پیچ به ازای شار تحریک معین (از نظر دامنه و فرکانس) و تعداد دور سیم پیچ در اینجا نیز بدست می آید. یعنی در این حالت نیز که هیچ تقریب و ساده سازی برای مشخصه B-H هسته اعمال نشده است، داریم:

$$E_{rms} = 4.44 f \cdot N \cdot \phi_{max} = 4.44 f \cdot N \cdot A_c B_{max} \quad (۲-۵۲)$$

برای تعیین جریان تحریک می توان حلقه هیستریزیس $i-\phi$ را از روی حلقه B-H بدست آورد و سپس به

روش ترسیمی شکل موج جریان تحریک را تعیین نمود (شکل ۲-۲۶).



شکل (۲-۲۶) تعیین جریان تحریک ac در هسته با حلقه هیستریزیس

از آنجا که حلقه هیستریزیس غیرخطی و چند مقداری است. لذا جریان تحریک i_ϕ ، علیرغم متناوب بودن،

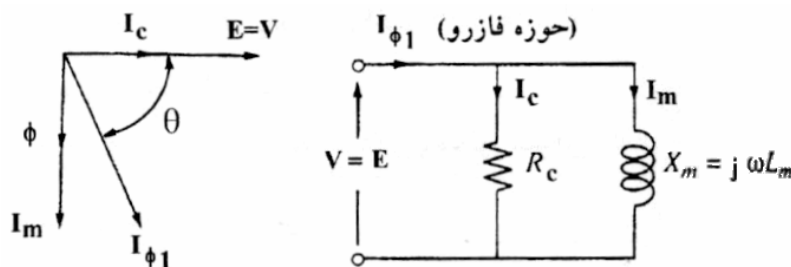
سینوسی خالص نخواهد بود و با روش فوریه قابل بسط به یک سری از توابع سینوسی است که دارای فرکانسهای $3f$ ، f

و ... هستند. این توابع را مولفه‌های هارمونیک شکل موج اصلی می‌گویند. مولفه با فرکانس f را هارمونیک اول یا مولفه اصلی و یا مولفه اول می‌نامند:

$$i_{\phi} = i_{\phi_1} + i_{\phi_3} + i_{\phi_5} + \dots \quad (2-53)$$

استفاده از هارمونیک اول به ترتیب هارمونیک‌های اول، سوم و پنجم جریان تحریک هستند. برای بسیاری از مقاصد محاسباتی تقریب قابل قبولی خواهد بود.

نکته حائز اهمیت در مورد مولفه اصلی جریان تحریک هسته اینست که اختلاف فاز این مولفه با ولتاژ القایی کمتر از 90° است. در واقع i_{ϕ_1} را می‌توان متشکل از دو جزء دانست که یک جزء همفاز با e و یک جزء با اختلاف 90° نسبت به e می‌باشد. با یادآوری قوانین مدارهای الکتریکی می‌توان دید که مولفه جریان همفاز با e مولفه اهمی بوده و باعث تلف توان در سیستم مغناطیسی می‌شود. دیاگرام فازوری و معادل مداری سیستم مغناطیسی در این حالت، ترکیب موازی یک اندوکتور و یک مقاومت را نشان می‌دهد. در شکل (2-27) این دو مولفه بترتیب I_c و I_m نامیده شده‌اند. I_m را جریان مغناطیس‌کنندگی هسته و I_c را جریان تلفات هسته نیز نامیده‌اند. دلیل این نام‌گذاری را در قسمت بعد خواهید یافت.



شکل (2-27) نمودار فازوری و مدار معادل سیستم مغناطیسی با تحریک ac

2-12) انرژی و تلفات هسته در تحریک با جریان ac

در بخش 2-10 دیدیم که هرگاه جریان در سیم‌پیچ مدار مغناطیسی از i_1 به i_2 و در نتیجه ϕ از ϕ_1 به ϕ_2 تغییر کنند، تغییر انرژی در سیستم برابر است با:

$$\Delta w = \int_{\phi_1}^{\phi_2} N i d\phi \quad (2-54)$$

که این مقدار را با استفاده از سطح زیر منحنی مشخصه B-H یا مشخصه‌ها همچون $F-\phi$ و یا $\lambda-i$ می‌توان بدست آورد. حال اگر بطور کلی i را تابعی از زمان در نظر بگیریم $(i(t))$ ، طبیعی است که Δw و W نیز تابعی از زمان خواهد بود. بنابراین بدون اینکه کلیات مبحث بخش (2-10) (بحث انرژی در میدان مغناطیسی) را تغییر بدهیم، می‌توانیم انتگرال فوق را برای یک سیکل کامل از تحریک ac بر روی مشخصه هیستریزس ماده مغناطیسی مرحله به مرحله محاسبه کنیم. اینکار بصورت ترسیمی در شکل 2-28 انجام شده است.

2-12-1) تلفات هیستریزس

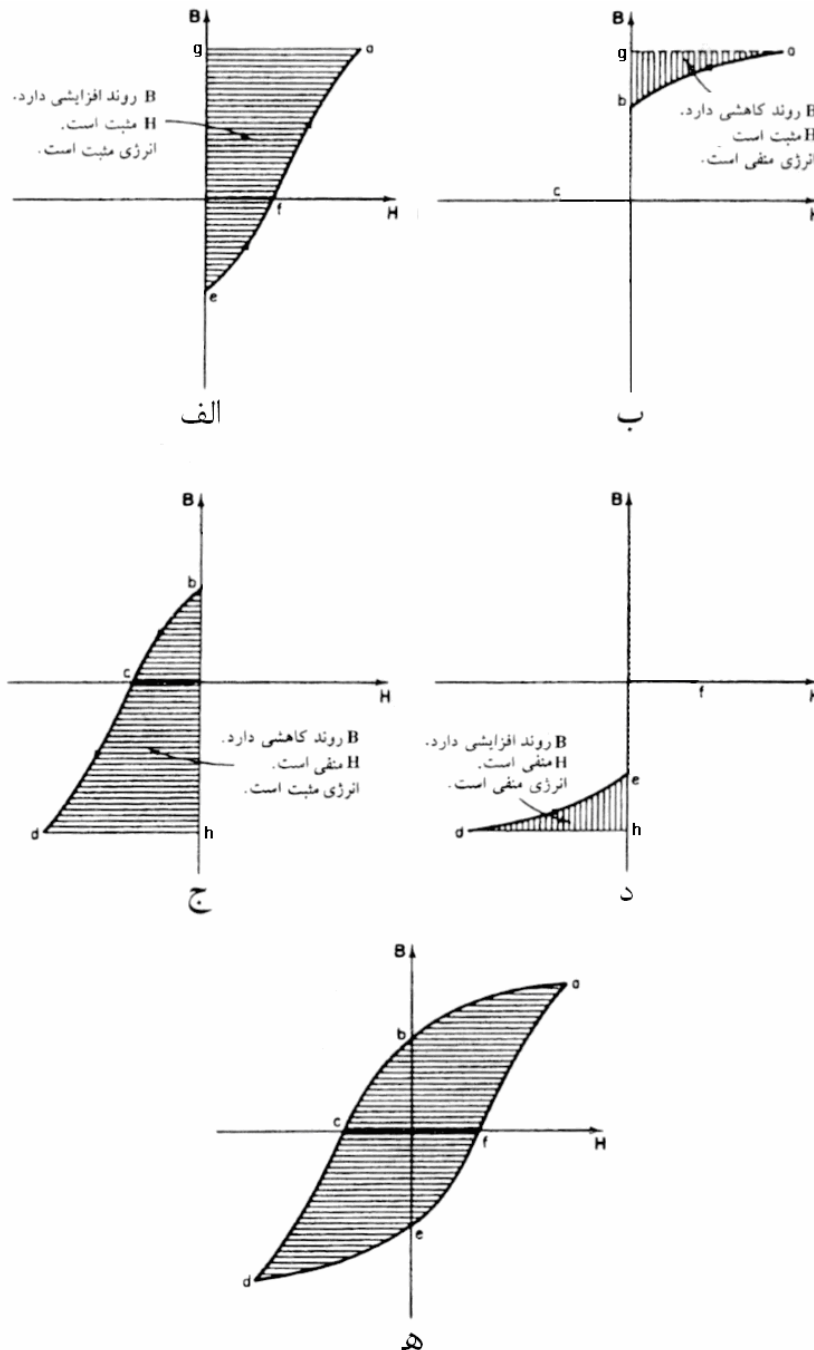
1- مرحله اول: تغییر جریان از 0 به I_{max} (حرکت بر مسیر efa) ← انرژی ذخیره شده در سیستم: سطح هاشور خورده efa (شکل 2-28 الف).

2- مرحله دوم: کاهش جریان از I_{max} به صفر (حرکت بر مسیر ab) ← بازگشت انرژی از سیستم به منبع به میزان سطح abga (شکل 2-28 ب).

۳- مرحله سوم: کاهش جریان از صفر تا $-I_{max}$ (حرکت بر مسیر bcd) ← دریافت انرژی از سیستم (چرا؟):
 سطح هاشور خورده bcdhb (شکل ۲-۲۸-ج).

۴- مرحله چهارم: افزایش جریان از $-I_{max}$ تا 0 (حرکت بر مسیر de) ← بازگشت انرژی به منبع الکتریکی
 به میزان سطح هاشور خورده dehd (شکل ۲-۲۸-د)

به راحتی دیده می‌شود که در هر سیکل مقداری انرژی معادل سطح داخل سیکل هیستریزس از منبع دریافت می‌شود. این انرژی بصورت حرارت در هسته تلف می‌گردد. (شکل ۲-۲۸-ه)



شکل (۲-۲۸) ه

مقدار این انرژی در هر سیکل را می‌توان برحسب مشخصات هسته چنین نوشت:

$$W_{\text{cycle}} = \oint i_{\phi} d\lambda = \oint \frac{H_c l_c}{N} A_c N dB_c = A_c l_c \oint H_c dB_c = V_c \oint H_c dB_c \quad (۲-۵۵)$$

از فرمول اخیر می‌توان نتیجه گرفت که اتلاف انرژی ناشی از پدیده هیستریزیس در هر سیکل با سطح حلقه هیستریزیس (که از مشخصات ماده مغناطیسی است) حجم هسته و میزان شار هسته، نسبت مستقیم دارد. تلف هیستریزیس بصورت سرعت اتلاف انرژی (یا توان تلف شده) تعریف می‌شود:

$$P_h = W_{\text{cycle}} \times f \quad (56-2)$$

محاسبه W_{cycle} بجز از راه ترسیم کار ساده‌ای نیست، با این وجود بسیاری از سازندگان با انجام اندازه‌گیریهای متعدد، سعی کرده‌اند که یک رابطه تحلیلی برای W_{cycle} بدهند. یکی از معتبرترین فرمولها، بصورت زیر توسط شرکت جنرال الکتریک ارائه شده است.

$$W_{h_v} = KB_{\text{max}}^n \quad (57-2)$$

K: ضریب ثابتی که به جنس ماده بستگی دارد.

B_{max} : چگالی شار ماکزیمم در هسته

n: با توجه به جنس ماده بین 1.5 تا 2.5 تغییر می‌کند.

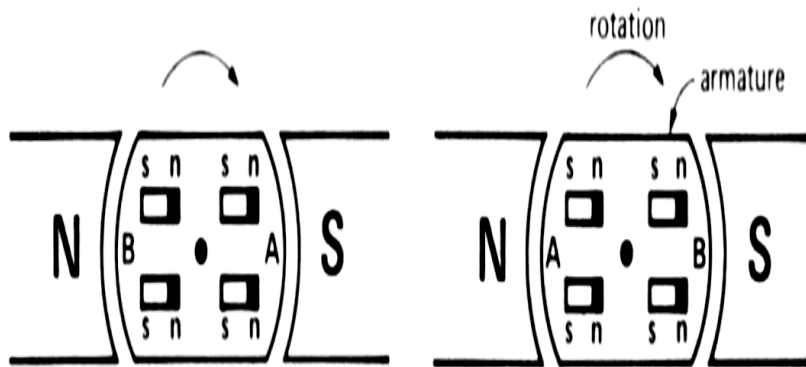
W_{h_v} : تلف انرژی در واحد حجم هسته

بنابراین برای تلف هیستریزیس در هسته‌ای با حجم معین V_c می‌توان نوشت:

$$P_h = V_c \times K \times B_{\text{max}}^n \times f = K_h \times B_{\text{max}}^n \times f \quad (58-2)$$

پس برای کاهش تلفات هیستریزیس باید از مواد مغناطیسی با حلقه هیستریزیس باریک در ساخت مدارهای مغناطیسی که با تحریک ac سر و کار دارند (همچون ماشینهای الکتریکی ac و ترانسفورماتورها)، استفاده کرد. مواد مغناطیسی ویژه با نام grain – oriented steel یا grain – oriented silicon steel علاوه بر ویژگی حلقه هیستریزیس باریک، دارای نفوذپذیری نسبی (μ_r) بسیار بزرگی بوده و بدین لحاظ از بهترین مواد مغناطیسی بشمار می‌روند.

* هنگامی که یک قطعه مغناطیسی (آهنی) در یک میدان ثابت مغناطیسی حرکت می‌کند، بازهم تلفات هیستریزیس بوجود خواهد آمد. به عنوان مثال فرض کنید یک قطع آهن از روتور یک ماشین الکتریکی در بین دو قطب یک آهنربای ثابت در حال دوران باشد. در هر حال و بدون توجه به وضعیت روتور دو قطبهای مغناطیسی موجود در آهن روتور بایستی با میدان مغناطیسی بیرونی همراستا شوند. در نتیجه، هر بار که روتور 180° می‌چرخد، دو قطبهای آهن یکبار تغییر جهت می‌دهند (شکلهای ۲-۲۸ الف و ب را ببینید). این دقیقاً همان وضعیتی را ایجاد می‌کند که یک میدان مغناطیسی ac برای یک هسته ساکن آهنی بوجود می‌آورد. بنابراین در این حالت نیز تلفات هیستریزیس متناسب با سرعت دوران هسته بوجود می‌آید.



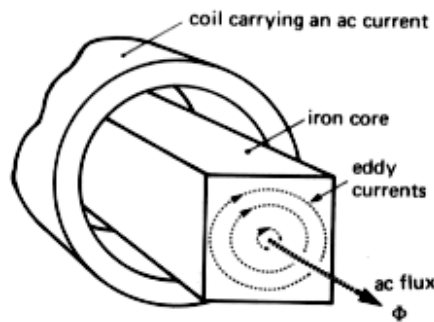
شکل (۲-۲۹) تلف هیستریزیس در اثر چرخش هسته آهنی در میدان مغناطیسی ثابت

۲-۱۲-۲) تلفات جریان گردابی (Eddy Currents)

هنگامی که از هسته آهنی در مدار مغناطیسی شار متغیری می‌گذرد، نه تنها در سیم‌پیچ روی هسته، بلکه در هر هادی دیگری نیز که این شار متغیر را تجربه می‌کند، ولتاژ القا می‌شود. این مسئله در مورد خود هسته نیز صادق است. یعنی در اثر عبور شار متغیر، در هسته ولتاژ القا می‌شود. از آنجا که هسته یک هادی یکپارچه است. در واقع یک مسیر بسته الکتریکی را تشکیل داده و ولتاژ القایی به راحتی قادر به برقراری جریان در هسته خواهد بود. این جریانه‌ها به نام جریانه‌های گردابی یا Eddy Currents خوانده می‌شوند. تلفات ناشی از این جریان با توجه به مقاومت مسیر و ولتاژ القا شده برابر با V^2/R و RI^2 است که باعث گرم شدن هسته می‌شود.

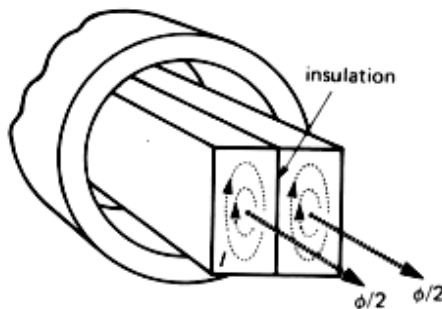
مسئله جریانه‌های گردابی بویژه در مواردی که هسته حامل شار ac است همچون ترانسفورماتورها و ماشینهای ac با اهمیت می‌شود.

در شکل (۲-۳۰-الف) یک سیم‌پیچ حامل جریان ac که باعث ایجاد شار ac در هسته آهنی‌اش می‌شود، نشان داده شده است. هسته آهنی یکپارچه فرض شده و همانطور که در شکل دیده می‌شود جریانه‌های گردابی در هادی هسته براه می‌افتد و مسیر آنها کل طول هسته را در بر می‌گیرد. یک هسته بزرگ (حتی در فرکانس معمولی ۵۰ یا ۶۰ هرتز) ممکن است در اثر عبور این جریانه‌ها تا حد سرخ شدن، گرم شود.



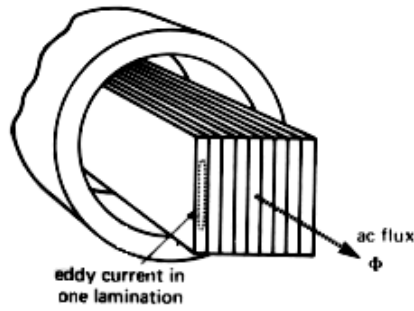
شکل (۲-۳۰) هسته یکپارچه آهنی و جریانه‌های گردابی داخل آن

برای کاهش این تلفات هسته را در طول به دو تکه مجزا تقسیم کرده‌ایم که نسبت به هم عایق هستند (شکل ۲-۳۰-ب). ولتاژ القا شده در هر بخش نسبت به حالت قبل نصف شده و جریان گردابی نیز در هر بخش کوچکتر می‌شود. بدیهی است که تلفات نیز به میزان قابل ملاحظه‌ای کم می‌شود.



شکل (۲-۳۰-ب)

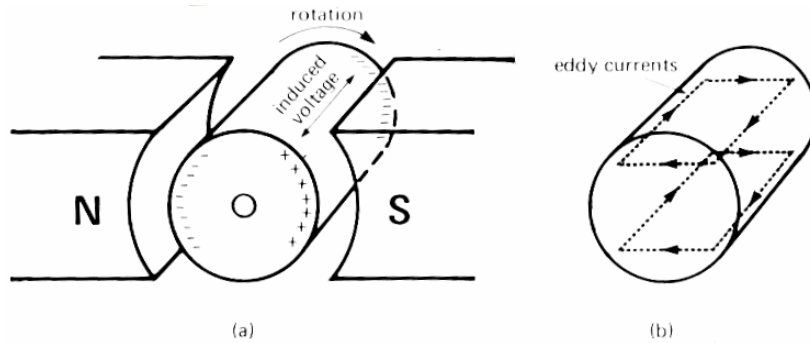
اگر تقسیم هسته را به بخشهای ایزوله ادامه دهیم، تلفات کمتر و کمتر خواهد شد. در عمل، هسته‌ها را کلاً به شکل مورق (ورقه - ورقه) می‌سازند و بین هر ورقه یک لایه نازک عایق قرار داده می‌شود. سپس به کمک پیچ و مهره و یا پرچ ورق‌ها نسبت به هم محکم شده و یک هسته یکپارچه را ایجاد می‌کنند.



شکل (۲-۳۰-ج)

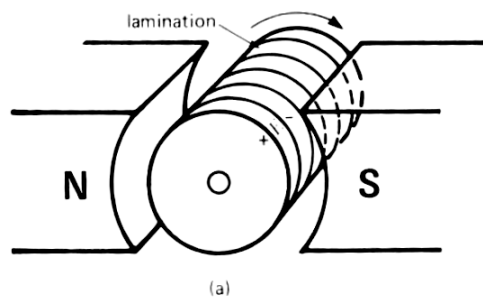
• تلف جریان گردابی در هسته چرخنده

میدان مغناطیسی ساکن در موتورها و ژنراتورهای dc یک شار ثابت dc در فضا ایجاد نماید. اما همین شار ساکن و ثابت در آمیچر (قسمت دوار ماشین) جریان گردابی القا می نماید. در شکل (۲-۳۰-الف) نمای ساده ای از یک روتور یکپارچه استوانه ای که در فضای بین دو قطب یک آهنربای دائم می چرخد، دیده می شود. قطع شار مغناطیسی توسط استوانه ای هادی باعث القای ولتاژی در روتور می شود، که پلاریته آن در شکل نشان داده شده است. این ولتاژ، جریانهای گردابی نشان داده شده در شکل (۲-۳۰-ب) را در هسته ایجاد می نماید.

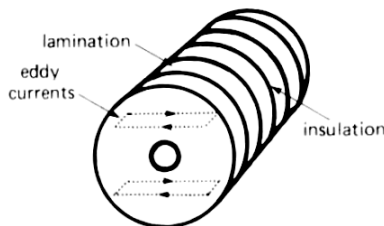


شکل (۲-۳۱-الف و ب) یک روتور یکپارچه در میدان مغناطیسی ثابت و جریانهای گردابی آن

برای کاهش ولتاژ القایی و محدود کردن جریانهای گردابی و تلفات ناشی از آنها بایستی روتور نیز مورق ساخته شود. نمای ساده یک روتور مورق و جریانهای گردابی کاهش یافته در شکلهای (۲-۳۲-الف و ب) نشان داده شده است.



(a)



(b)

شکل (۲-۳۲) آرمیچر (روتور) مورق و کاهش جریانهای گردابی در آن

برای محاسبه تلفات جریان گردابی از رابطه تجربی زیر استفاده می‌شود.

$$P_e = K_e B_{\max}^2 f^2 \quad (۵۹-۲)$$

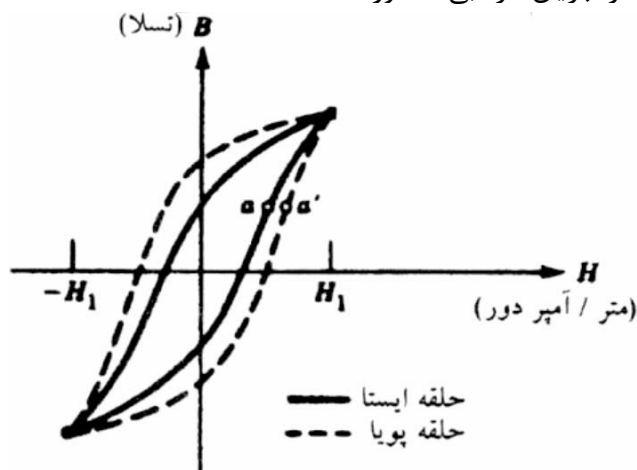
K_e : ضریبی که به جنس هسته، ضخامت ورقهای هسته و حجم کل هسته بستگی دارد.
 B_{\max} : چگالی شار ماکزیمم در هسته
 f : فرکانس جریان تحریک

۲-۱۲-۳) تلفات هسته

در یک هسته مغناطیسی تلفات هسته P_{core} از مجموع تلف هیستریزیس و تلف جریان گردابی بدست می‌آید.

$$P_{core} = P_h + P_e \quad (۶۰-۲)$$

وجود جریان گردابی را می‌توان معادل پهن شدن حلقه هیستریزیس دانست چرا که جریان گردابی شاری در هسته پدید می‌آورد که شار اصلی را تضعیف می‌کند. بنابراین برای تثبیت شار اصلی در مقدار معین بایستی جریان سیم‌پیچ تحریک افزایش یابد (یعنی به عنوان مثال در شکل ۲-۳۳ منحنی از نقطه a به نقطه a' می‌رسد) و این به معنای پهن‌تر شدن حلقه هیستریزیس است. حلقه هیستریزیسی که بدین ترتیب بدست می‌آید، حلقه هیستریزیس پویا (دینامیک) می‌نامند که در آن اثر جریان گردابی منظور شده است.



شکل (۲-۳۳) حلقه هیستریزیس ایستا (خط پر) و پویا (خط چین)

توجه شود که در حالت دینامیک نیز مدل الکتریکی هسته مرکب از یک اندوکتور و یک مقاومت موازی است

که مقاومت موازی مدل تلفات گرمایی در هسته ناشی از هیستریزیس و فوکو (جریان گردابی) را نشان می‌دهد.

مثال (۲-۱۳) - سیستمی شبیه شکل (۲-۳) با هسته مورق مفروض است. این سیستم یکبار توسط منبع

این دو ولتاژ برقرار باشد تا چگالی شار ماکزیمم در هسته تغییر نکند.

حل - با فرض $v \approx e$ برای این دو حالت دو ولتاژ E_{rms} با استفاده از رابطه (۲-۵۲) بدست می‌آید:

$$E_{1_{rms}} = V_{1_{rms}} = \frac{V_{m_1}}{\sqrt{2}} = 4.44 f_1 N \phi_{1_{max}}$$

$$E_{2_{rms}} = V_{2_{rms}} = \frac{V_{m_2}}{\sqrt{2}} = 4.44 f_2 N \phi_{2_{max}}$$

$$\Rightarrow \phi_{1_{max}} = \frac{E_{1_{rms}}}{4.44 f_1 N} \quad \text{و} \quad \Rightarrow \phi_{2_{max}} = \frac{E_{2_{rms}}}{4.44 f_2 N}$$

با فرض ثابت و یکنواخت بودن سطح مقطع هسته:

$$B_{1_{\max}} = \frac{E_{1_{rms}}}{4.44 f_1 N A} \quad \text{و} \quad B_{2_{\max}} = \frac{E_{2_{rms}}}{4.44 f_2 N A}$$

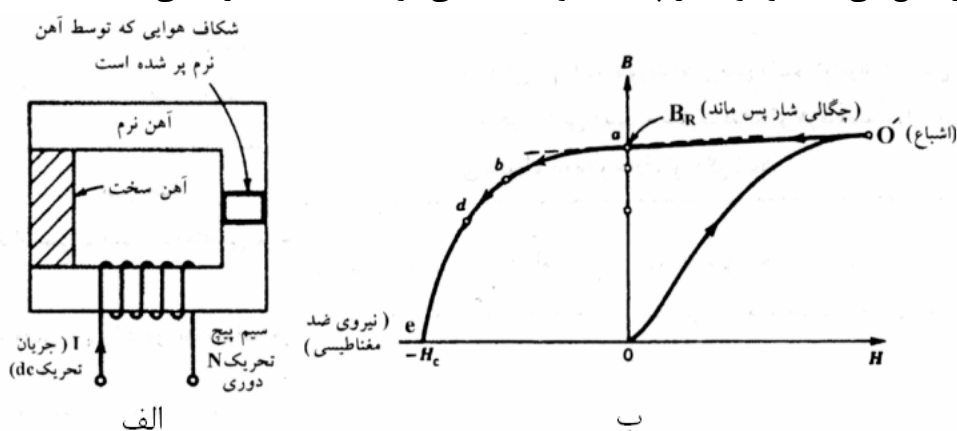
اگر بخواهیم شرط مسئله برقرار شود، یعنی $B_{1_{\max}} = B_{2_{\max}}$ باشد، باید:

$$\frac{E_{1_{rms}}}{f_1} = \frac{E_{2_{rms}}}{f_2} \Rightarrow \frac{V_{1_{rms}}}{V_{2_{rms}}} = \frac{f_1}{f_2} \quad (۲-۶۱)$$

یعنی برای اینکه چگالی شار ماکزیمم در فرکانسهای مختلف بدون تغییر بماند بایستی نسبت ولتاژها با نسبت فرکانسهای تغذیه برابر باشد. این شرط را می توان برای تعداد بیشتری از فرکانسها و ولتاژهای متفاوت تعمیم داد. یعنی در این مورد هم برای ثابت ماندن چگالی شار ماکزیمم باید نسبت $\frac{V_{i_{rms}}}{f_i}$ ثابت بماند.

۲-۱۳) آهنربای دائمی (Permanent Magnet)

در برخی از ماشینهای الکتریکی نسبتاً کوچک از آهنربای دائمی برای ایجاد میدان مغناطیسی استفاده می شود. ویژگی آهنربای دائمی اینست که بدون نیاز به mmf و به عبارت ساده تر بدون نیاز به پیچک تحریک قادر به تولید میدان است. اینگونه آهنرباها غالباً از جنس آهن سخت (آلیاژهای آهن، نیکل و کبالت) تشکیل شده و حلقه هیستریزیس آنها بگونه ای است که پسماند مغناطیسی (B_R) و نیروی ضد مغناطیسی (H_C) بزرگی دارند. برای تولید آهنربای دائم یک قطعه آهن سخت را در معرض میدان تحریک اولیه قرار می دهند و پس از اشباع هسته، جریان را قطع می کنند. وجود شار پسماند قوی باعث می شود که قطعه آهنربا باقی بماند.



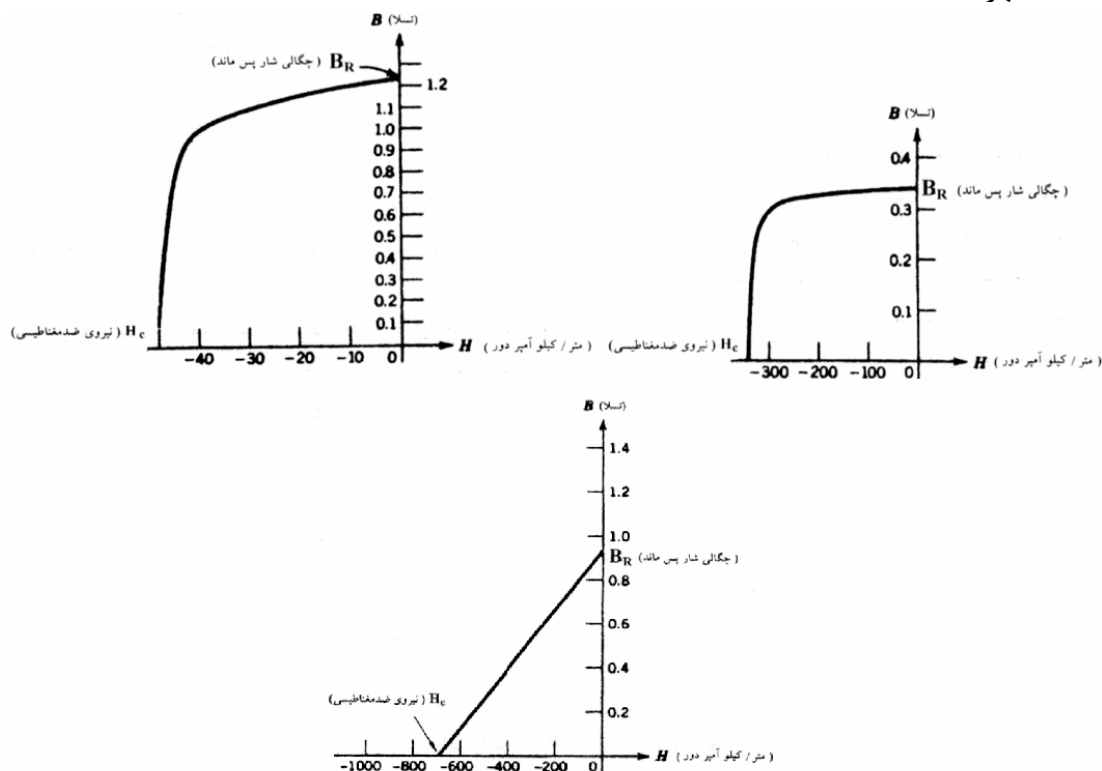
شکل (۲-۳۴) تولید آهنربای دائم

الف مدار مغناطیسی ب- مشخصه B-H

مدار مغناطیسی و مشخصه B-H آهن سخت در این فرآیند، در شکل (۲-۳۴) نشان داده شده اند. برای حذف خاصیت مغناطیسی آهن سخت باید جهت جریان تحریک معکوس شده و مقدار آن از صفر افزایش یابد تا به نقطه e (در محل تلاقی مشخصه B-H و نیمه منفی محور H) برسیم. در این نقطه میدان برابر H_C است که به نیروی ضد مغناطیسی معروف است. بدیهی است که مسیر abe بخشی از مشخصه هیستریزیس آهن سخت است.

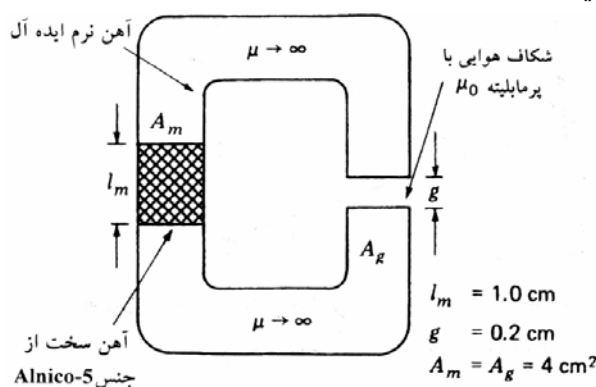
یک آهنربای دائم ایده آل بایستی B_R و H_C بسیار بزرگ داشته باشد. آهنرباهای که از آلیاژ آهن، کبالت، نیکل و آلومینیوم ساخته می شوند با نام تجاری Alnico چگالی شار پسماند بالایی دارند. آهنرباهای فریتی با B_R کمتر، دارای H_C بزرگتری هستند. گروه جدیدی از آلیاژهایی از آهن، نیکل، کبالت و یک یا چند عنصر کمیاب ساخته

شده که دارای B_R زیاد (همانند آلنیکو) و H_C بزرگ (همانند فریت) است و به Rare Permanent Magnet (آهنربای دائمی کمیاب) شهرت یافته‌اند.



شکل (۲-۳۵) مشخصه B-H مربوط Ferrite-D, Alnico و آلیاژ کبالت ساماریم

در تحلیل مدار مغناطیسی با آهنربای دائم از مشخصه B-H آهنربا در ربع دوم استفاده می‌شود. مثال (۲-۱۴) - فرض کنید در شکل زیر آهنربا از Alnico ساخته شده و آهن نرم دارای رلوکتانس صفر است. چگالی شار در فاصله هوایی را تعیین کنید.



شکل (۲-۳۶) مدار مغناطیسی مثال ۲-۱۴

$$F = mmf = 0 = H_m l_m + H_g l_g \quad (۲-۶۲)$$

حل - با استفاده از قانون آمپر:

H_m میدان در آهنربا و l_m طول آن است.

$$\Rightarrow H_g = \frac{-l_m}{g} H_m \quad (۲-۶۳)$$

$$B_g = \frac{\mu_0 - l_m}{l_g} H_m \quad (۲-۶۴)$$

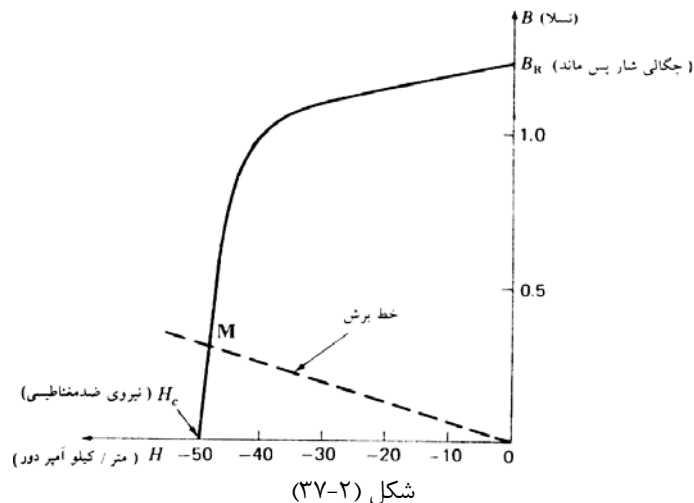
$$\Rightarrow B_m = -\mu_0 \frac{l_m}{g} H_M \quad (۶۵-۲)$$

$$= -6.28 \times 10^{-6} H_M$$

معادله (۶۵-۲) یک خط را در ربع دوم مشخصه B-H آهنربا نشان می‌دهد که به آن خط برش می‌گویند. از طرفی می‌دانیم که B_m و H_m باید یک نقطه روی مشخصه B-H آهنربای Alnicos باشد. بنابراین نقطه M از محل تلاقی این دو مشخصه بدست می‌آید. از روی شکل (۳۷-۲) برای نقطه M داریم:

$$B_M = 0.3T$$

$$\Rightarrow B_g = 0.3T$$



فصل سوم - تبدیل انرژی الکترومکانیکی

۳-۱) مقدمه

مطالبی که در فصل گذشته در مورد مدار مغناطیسی یاد گرفتیم برای تجزیه و تحلیل عملکرد ترانسفورماتور کافی است. در واقع ترانسفورماتورهای مختلف، علیرغم تفاوت در ساختار و کاربرد، مدارهای مغناطیسی بدون عنصر متحرک هستند. یعنی در ترانسفورماتور تبدیل انرژی به انرژی مکانیکی صورت نمی‌گیرد.

در مقابل، آن دسته از مدارهای مغناطیسی که بخشی از هسته آهنی آنها امکان جابجایی و حرکت (خطی، زاویه‌ای و یا دورانی) دارد، فرآیند تبدیل انرژی مغناطیسی به مکانیکی در آنها صورت می‌گیرد. از آنجا که میدان مغناطیسی در این وسایل توسط انرژی الکتریکی ایجاد شده است، این وسایل در واقع مبدل‌های الکترومکانیکی و یا به عبارت دقیقتر مبدل‌های الکترومغناطیسی مکانیکی هستند. وجود فاصله هوایی در ساختار مغناطیسی این دستگاهها یک ویژگی حتمی و ضروری است. به این ضرورت از دو دیدگاه می‌توان نگریست: ۱- وجود فاصله هوایی برای قابلیت حرکت مکانیکی بخشی از هسته، لازم است. ۲- بخش عمده انرژی میدان مغناطیسی در فاصله هوایی ذخیره می‌شود.

بنابراین بطور خلاصه می‌توان گفت که مبدل الکترومکانیکی، شرایط زیر را دارد.

۱- مدار مغناطیسی با فاصله هوایی هسته

۲- امکان حرکت (مکانیکی) بخشی از مدار

۳- تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی با واسطه میدان (انرژی) مغناطیسی

۳-۲) اصول حاکم بر عملکرد مبدل الکترومکانیکی

برای تحلیل عملکرد مبدل الکترومکانیکی، علاوه بر قوانینی که در مورد مدارهای مغناطیسی ساکن بکار می‌رود (قانون آمپر و قانون القای فارادی)، به قانون لورنتس و قوانین مکانیک کلاسیک نیاز داریم.

۳-۲-۱) قانون لورنتس

قانون لورنتس بیانگر ویژگی اصلی این مبدلها است. چرا که ایجاد نیروی مکانیکی در اثر میدانهای مغناطیسی (و الکتریکی) را بیان می‌دارد:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (1-3)$$

در این رابطه \vec{F} بردار نیروی مکانیکی وارد بر بار q و \vec{E} شدت میدان الکتریکی و \vec{B} میدان مغناطیسی در محلی است که q قرار گرفته و \vec{V} بردار سرعت مکانیکی q است.

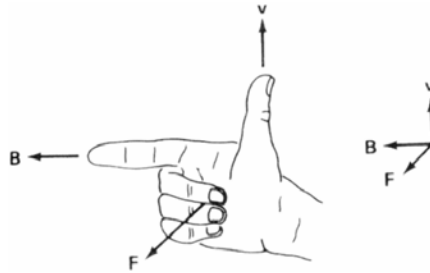
بدیهی است در صورتیکه q صرفاً در میدان الکتریکی واقع شده باشد نیروی وارد بر آن عبارتست از:

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (2-3)$$

و اگر میدان صرفاً مغناطیسی باشد:

$$\vec{F} = q(\vec{V} \times \vec{B}) \quad (3-3)$$

علامت ضرب برداری نشان می‌دهد که راستا و جهت \vec{F} در صفحه عمود بر صفحه \vec{V} و \vec{B} است.



شکل (۱-۳)

اگر تعداد زیادی از ذرات حامل بار الکتریکی در میدان \vec{B} در حال حرکت باشند، می‌توان معادله (۳-۳) را برای چگالی جریان i نوشت و چگالی نیرو را بدست آورد:

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (4-3)$$

بنابراین هنگامی که جریان در داخل هادی برقرار است و هادی در میدان مغناطیسی خارجی قرار گرفته، این نیرو بر هادی حامل جریان وارد می‌شود. اگر فرض کنیم هادی دارای حجم V باشد.

$$V = A \times l \quad (5-3)$$

(l طول هادی، A سطح مقطع آن است.)

در آنصورت جریان عبوری از هادی عبارت خواهد بود از:

$$\vec{I} = A \cdot \vec{j} \quad (6-3)$$

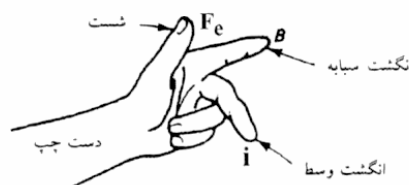
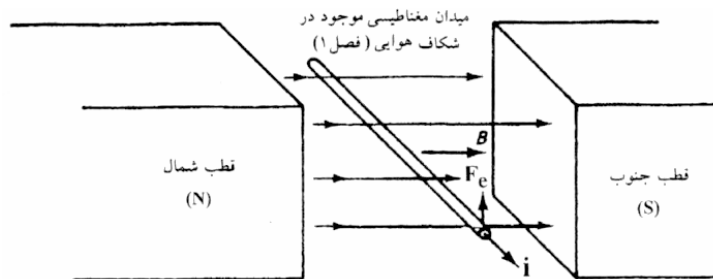
و نیروی وارد بر کل هادی:

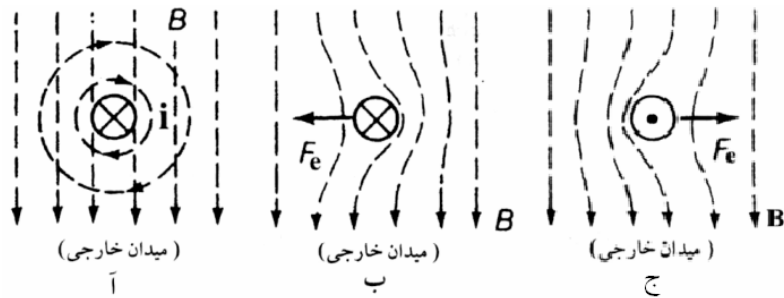
$$\vec{F} = v(\vec{j} \times \vec{B}) = lA(\vec{j} \times \vec{B}) = l(\vec{I} \times \vec{B}) \quad (7-3)$$

با استفاده از رابطه ضرب برداری می‌توان مقدار \vec{F} را (صرفنظر از راستا و جهت) با رابطه اسکالر زیر نشان داد.

$$F = IIB \sin \theta \quad (8-3)$$

که I و B به ترتیب مقادیر جریان و چگالی شار و θ زاویه بین راستای I و B است. توجه کنید که این قانون با قانون یا کشف اورستد که سیم حامل جریان میدان مغناطیسی در اطراف خود ایجاد می‌کند. از نظر نتیجه کار یکسان است. اگر چه دو مفهوم متفاوت را برای توجیه ایجاد نیرو در نظر گرفته‌اند.





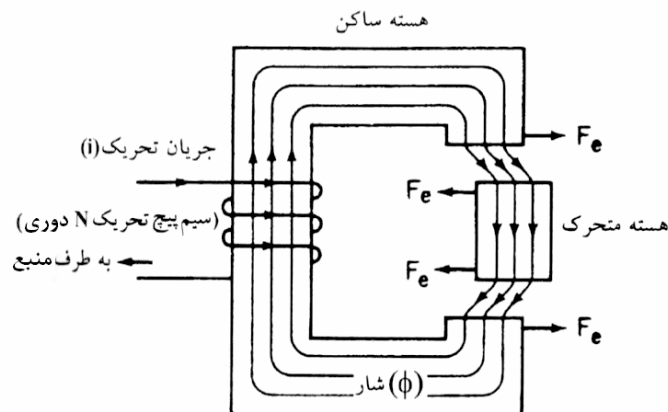
شکل ۲-۳ نیروی وارد بر هادی حامل جریان با بیان اورستد

از آنجا که این پدایش نیرو در اثر تعامل و تداخل آثار یک میدان مغناطیسی خارجی و یک سیم حامل جریان پیش می‌آید، آنرا "اصل تداخل" (Interference Principle) هم می‌نامند. براساس این اصل نیروی اعمال شده به سیم حامل جریان در یک میدان خارجی، بدلیل تداخل میدان خارجی و میدان ناشی از جریان سیم می‌باشد.

از آنجائیکه میدان توسط جریان ایجاد شده، می‌توان گفت نیرو در اثر تداخل میدان مغناطیسی و جریان سیم حاصل می‌شود (نظریه لورنتس). با توجه به اینکه میدان مغناطیسی خارجی هم معمولاً توسط یک آهنربای الکتریکی و در اثر عبور جریان ایجاد می‌شود می‌توان گفت که این نیرو از تعامل دو جریان الکتریکی ایجاد شده است. جریانی که میدان مغناطیسی خارجی را ایجاد می‌کند معمولاً **جریان تحریک** و مدار مغناطیسی ایجاد کننده این میدان را **مدار تحریک** می‌نامند.

۳-۲-۲) قانون حداقل رلوکتانس (اصل همسویی)

این قانون، در واقع همان پدیده جذب آهنربایی است. هنگامی که در یک مدار مغناطیسی جریان برقرار می‌شود. قسمت‌های متحرک مغناطیسی در جهتی حرکت می‌کنند که رلوکتانس مسیر کاهش یابد و خطوط شار تا حد امکان به جای عبور از فاصله هوایی، مسیر خود را از داخل هسته مغناطیسی ببندند. بنابراین، از پدیده جذب هسته مغناطیسی توسط آهنربا که نوعی تولید انرژی مکانیکی با استفاده از میدان مغناطیسی است، می‌توان در مبدل الکترومکانیکی استفاده نمود. بدیهی است که در این نوع مبدل، میدان مغناطیسی جذب کننده توسط جریان الکتریکی ایجاد می‌شود. شکل (۳-۳) تولید نیرو بر اساس اصل همسویی را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۳) نمایش نیرو در مبدل الکترومکانیکی براساس اصل همسویی

در اینجا برای سهولت درک تفاوت دو قانون فوق، متذکر می‌شویم که در قانون لورنتس در واقع دو آهنربا مورد توجه است. یکی از آنها میدان مغناطیسی خارجی B را ایجاد کرده و دیگری خود هادی حامل جریان است که در

اطراف خود میدان آهنربایی (مغناطیسی) ایجاد می‌کند و بنابراین نیروی ایجاد شده می‌تواند در جهت "جذب" یا "دفع" قطعه متحرک باشد. اما در مورد اصل همسویی با یک آهنربا (ی الکتریکی) و یک قطعه مغناطیسی (آهنی) روبرو هستیم که نیروی بین آنها فقط از نوع جذب است.

۳-۲-۳) قوانین حرکت مکانیکی

قوانین مکانیک کلاسیک کاملاً آشنا و شناخته شده هستند و در اینجا فقط به توصیف کاربرد آنها در مبدلهای الکتروپنایمی می‌پردازیم.

• قانون ماند یا اینرسی در یک مبدل الکتروپنایمی بیان می‌دارد که هنگامی که نیروهای وارده بر قسمت متحرک صفر (و یا برآیند آنها صفر) است، قسمت متحرک ساکن بوده و یا بدون تغییر سرعت حرکت می‌کند. در مورد حرکت دورانی نیز به جای نیرو، مفهوم گشتاور و به جای سرعت (خطی) بایستی سرعت زاویه‌ای مطرح شود. نیروهای (گشتاورهای) وارد بر قسمت متحرک در یک مبدل معمولاً عبارتند از:

- ۱- نیروی حاصل از میدان مغناطیسی (الکترومغناطیسی) ← اصل همسویی و/یا اصل تداخل
 - ۲- نیروی (گشتاور) اصطکاک (که در برابر حرکت مقاومت کرده و معمولاً با سرعت متناسب است).
 - ۳- نیروی (گشتاور) مکانیکی بیرونی این نیرو می‌تواند به عنوان محرک و یا مقاوم عمل کند. نوع کاربرد مبدل تعیین می‌نماید که نیروی مکانیکی بیرونی، نیروی محرک است یا مقاوم.
- وضعیت حرکت (و یا سکون) مبدل و نوع حرکت آن (شتابدار، دورانی، سرعت ثابت و ...) حاصل تعامل نیروهایی است که در بالا برشمرده شدند. تفاوت بین نیروهای محرک و مقاوم، باعث شتاب‌گیری ماشین می‌شود. این شتاب در حرکت خطی با استفاده از رابطه (۳-۹) بدست می‌آید.

$$\Delta F = F_e - F_d = F_a = ma \quad (۳-۹)$$

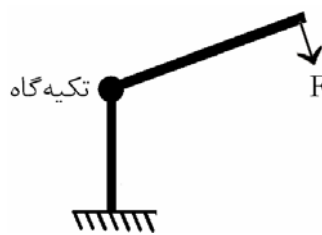
(که در آن F_e برآیند نیروهای محرک، F_d برآیند نیروهای مقاوم، F_a نیروی شتاب دهنده، m جرم قسمت متحرک (و احياناً سایر اجرام خارجی که به آن وصل شده‌اند) و a شتاب قسمت متحرک دستگاه است. در صورتیکه حرکت دورانی باشد:

$$\Delta T = T_e - T_d = T_a = J\alpha = J \frac{d\omega}{dt} = J \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (۳-۱۰)$$

در این رابطه T_e برآیند گشتاورهای محرک، T_d برآیند گشتاورهای مقاوم و T_a گشتاور شتاب‌دهنده است، J گشتاور ماند جسم متحرک (دوار) و α شتاب زاویه‌ای حرکت، ω سرعت زاویه‌ای و θ موقعیت زاویه‌ای جسم در حال حرکت (زاویه‌ای یا دورانی) است.

تبصره - ایجاد گشتاور به دو صورت امکان پذیر است.

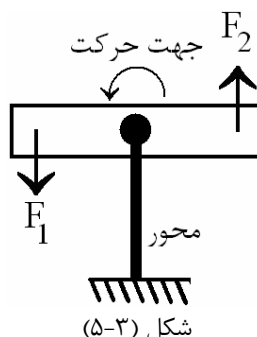
الف - اعمال نیرو به یک طرف جسم در حالیکه طرف دیگر ساکن بوده و تکیه‌گاه حالت لولا داشته باشد. در این حالت جسم حرکت زاویه‌ای خواهد داشت:



شکل (۳-۴)

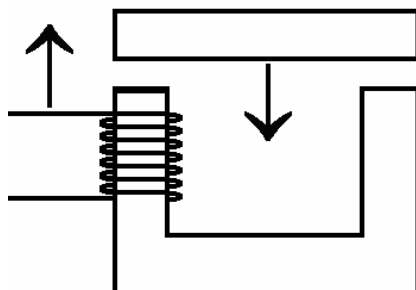
بدیهی است اعمال نیرو در راستای تکیه‌گاه باعث حرکت نخواهد شد.

ب - اعمال نیرو به دو طرف جسم در دو جهت مخالف و امکان حرکت جسم بر یک محور فرضی یا واقعی که بین آن واقع است. (حرکت دورانی محدود یا نامحدود). در اینحالت نیز مولفه‌هایی از نیروها که در راستای تکیه‌گاه باشند، در ایجاد حرکت نقشی ندارند.



اصل سوم مکانیک کلاسیک در مبدل‌های الکترو دینامیکی چه از دیدگاه طراحی و تحلیل و چه از جنبه‌های کاملاً حرفه‌ای در ساخت این مبدل‌ها دارای اهمیت فراوانی است. از دیدگاه تئوری، نیرو بین بخش متحرک و بخش ساکن دستگاه، بصورت عمل و عکس‌العمل وجود دارد. به عبارت دیگر، هدف اصلی در این دستگاه‌ها، ایجاد نیرو در اثر تعامل میدان‌های مغناطیسی است و لزومی ندارد که بخش ایجاد کننده ساکن و بخش دیگر متحرک باشد. این مفهوم را می‌توان بصورت دیگر نیز بیان کرد. وجود نیرو باعث حرکت نسبی بین دو قسمت دستگاه می‌شود و انتخاب بخش ساکن و متحرک بستگی به کاربرد مورد نظر و ملاحظات مختلف طراحی و فنی و اقتصادی دارد. در واقع بسیاری از انواع مختلف ماشین‌های الکتریکی فقط در انتخاب این دو بخش با هم تفاوت دارند. به عنوان یک مثال بسیار ساده یک قطعه آهن جذب آهن‌ربا می‌شود اما اگر قطعه آهن را ساکن نگهداریم و آهن‌ربا به اندازه کافی به آن نزدیک باشد، آهن‌ربا جذب آهن خواهد شد!

از دیدگاه حرفه‌ای و تکنولوژی ساخت، اعمال نیروی عکس‌العملی بر قسمت‌های ساکن ماشین باعث می‌شود آنها نیز در جای خود دچار حرکت و لرزش شوند. این امر به ویژه در مورد سیم‌پیچ‌هایی که در قسمت‌های ساکن ماشین قرار می‌گیرند، اتفاق می‌افتد. شکل (۳-۶) یک نمودار ساده را نشان می‌دهد. در ساخت دستگاه‌ها باید با روش‌های کاملاً دقیق و اطمینان بخش عدم لرزش و حرکت سیم‌پیچ‌های قرار گرفته روی هسته‌های آهنی بخش‌های ساکن و متحرک دستگاه تضمین شود.



نیروی عکس‌العملی بر هسته ساکن و از جمله سیم‌پیچ روی آن وارد می‌شود.

سؤال - اگر سیم حامل جریان بر روی یک هسته آهنی سوار شده باشد و مجموعه در داخل میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرد. آیا به هسته آهنی نیرویی وارد می‌شود؟ آیا می‌توانید آزمایشی را برای بررسی این پدیده پیشنهاد کنید؟ اگر جواب سؤال اول مثبت است چه توجیه فیزیکی برای آن دارید؟ آیا باید قانون جدیدی معرفی کنیم؟

۳-۲-۴) قانون بقای انرژی

بدیهی است که طبق این قانون انرژی خلق و یا نابود نمی‌شود، بلکه می‌تواند از شکلی به شکل دیگر تبدیل گردد. در یک دستگاه مبدل انرژی، همواره بخشی از انرژی ورودی به شکل مطلوب تبدیل و در خروجی دستگاه دریافت می‌گردد. بخشی هم احتمالاً در دستگاه ذخیره و بقیه آن تلف می‌شود. تلف انرژی معمولاً بصورت تبدیل انرژی به گرما و صوت است. در یک مبدل الکترومکانیکی، اگر توان ورودی از نوع الکتریکی و خروجی از نوع مکانیکی باشد رابطه زیر را می‌توان بعنوان رابطه تعادل (موازنه) انرژی نوشت:

$$E_{elec} = E_{mech} + E_{fld} + E_{loss} \quad (۱۱-۳)$$

در این رابطه E_{elec} انرژی الکتریکی (ورودی)، E_{mech} انرژی مکانیکی (خروجی)، E_{fld} انرژی ذخیره شده (از نوع مغناطیسی) و E_{loss} انرژی تلف شده بصورت گرما و صوت است. رابطه (۱۱-۳) برای تبدیلی که ورودی مکانیکی و خروجی الکتریکی دارد بصورت زیر در می‌آید:

$$E_{mech} = E_{elec} + E_{fld} + E_{loss} \quad (۱۲-۳)$$

در همین جا، با توجه به آشنایی مقدماتی که از قبل با مبدل‌های الکترومکانیکی پیدا کرده‌ایم، می‌توان گفت که انرژی در این مبدل‌ها در ۳ میدان بشرح زیر تلف می‌شود:

- انرژی در مدار الکتریکی بصورت تلفات اهمی
- انرژی در مدار مغناطیسی بصورت تلفات هسته (پسماند و فوکو)
- انرژی در سیستم مکانیکی (تلفات و اصطکاک تکیه‌گاهها و اصطکاک هوا (بادخوری))

توجه کنید که معادلات (۱۱-۳) و (۱۲-۳) یک قانون عام و کلی فیزیکی را بیان می‌کنند و بنابراین چه در وضعیت عملکرد پایدار (استاتیک) مبدل و چه در وضعیت انتقال و گذر از یک وضعیت به وضعیت دیگر، مثلاً شتاب‌گیری یک موتور، (دینامیک)، قابل استفاده می‌باشند.

استفاده از مفهوم انرژی میدان و کاربرد رابطه تعادل انرژی در تجزیه و تحلیل مبدل‌های الکترومکانیکی یک روش سودمند و وسیع است. زیرا برای هر نوع دستگاه که دارای حرکت دورانی، خطی، ارتعاش و یا انتقالی باشد، همچنین برای در نظر گرفتن شرایط غیر ایده‌آل و غیرخطی عملکرد مبدل‌ها (همانند تلفات، اشباع، پسماند و نظایر آن) توانمندی دارد و چنانچه گفته شد برای بررسی حالت‌های دائمی و گذرا نیز قابل استفاده است.

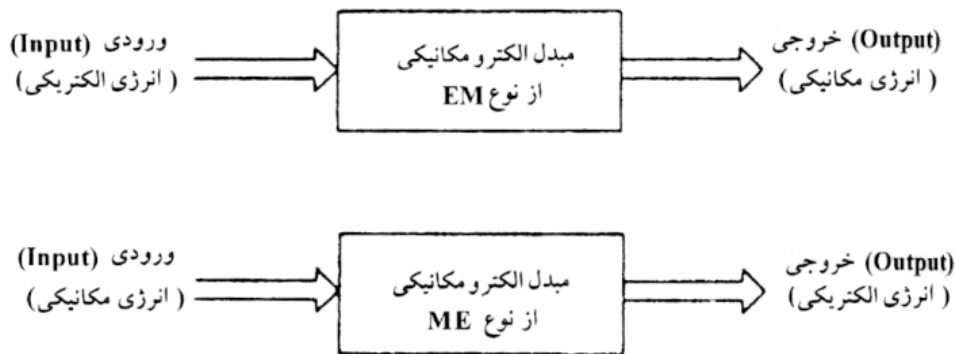
۳-۳) انواع مبدل‌های الکترومکانیکی

مبدل‌های الکترومکانیکی در یک تقسیم‌بندی کلی، دو گروه عمده را شامل می‌شوند.

۱- مبدلهایی که در آنها تبدیل انرژی از الکتریکی به مکانیکی انجام می‌شود و بنام مبدل‌های EM خوانده می‌شوند.

۲- مبدلهایی که در آنها انرژی مکانیکی به الکتریکی تبدیل می‌شوند و به آنها مبدل‌های ME می‌گویند.

این تبدیل انرژی همانطور که قبلاً نیز گفته شد با واسطه میدان مغناطیسی انجام می‌شود.



شکل (۳-۷) نمودار شماتیک دو گروه اصلی مبدل‌های الکترو دینامیکی

اصول کار وسایل تبدیل انرژی مشابه است اما جزئیات ساختمانی آنها، بسته به کاربرد شان متفاوت می‌باشد.

این وسایل را می‌توان با توجه به محدوده توان و انرژی ورودی/خروجی بصورت زیر دسته‌بندی نمود.

۱- دسته اول که با نام کلی ترانسدیوسر (مبدل) شناخته می‌شوند، تحت شرایط ورودی - خروجی خطی کار می‌کنند و کلاً با سیگنال‌های کوچک سر و کار دارند. از این جمله می‌توان وسایل کوچک اندازه‌گیری و کنترل، میکروفون، بلندگو و گوشی را نام برد.

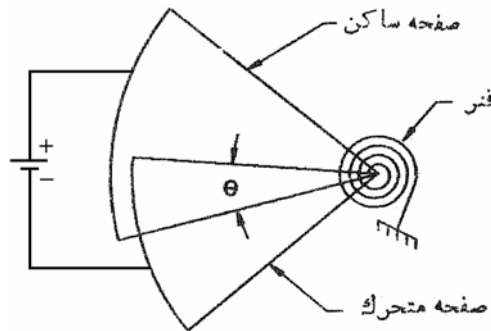
۲- دسته دوم شامل وسایل تولید نیرو یا گشتاور با حرکت محدود می‌باشد. نمونه این وسایل الکترومگنت‌ها رله‌ها و سولنوئیدها می‌باشد.

۳- گروه سوم وسایلی هستند که تبدیل انرژی در آنها بصورت پیوسته (دائم) انجام می‌شود و با مقادیر نسبتاً بزرگ انرژی سر و کار دارند. از مهمترین این وسایل می‌توان از موتورها و ژنراتورهای الکتریکی نام برد.

موتورها در واقع گسترده‌ترین و پرکاربردترین مبدل‌های EM و ژنراتورها نیز مهمترین وسایل ME می‌باشند. به همین دلیل همواره در مبحث ماشین‌های الکتریکی تنها در فصل‌های اول که مبانی فیزیکی و اصول عملکرد آنها مطرح است از سایر انواع مبدل‌های الکترومکانیکی هم صحبت می‌شود. در سایر فصول فقط موتورها و ژنراتورها مورد توجه و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. در واقع با اندکی تسامح می‌توان کلمه "ماشین الکتریکی" را مترادف "موتور و/یا ژنراتور" دانست. ماشین‌های الکتریکی از نظر نوع حرکت مکانیکی به ۳ گروه عمده ماشین‌های دوار Rotating Machines، ماشین‌ها (به ویژه موتورها) خطی (Linear Machines (motors)) و ماشین‌ها (به ویژه موتورها) ی پله‌ای تقسیم می‌شوند (Stepper Machines (Motors)). موتورها و ژنراتورها از دیدگاه منبع انرژی الکتریکی نیز تقسیم‌بندی ویژه خود را دارند: هنگامی که ماشین با منبع dc تغذیه شده و یا انرژی الکتریکی dc تولید نماید، به ترتیب موتور و ژنراتور dc خوانده می‌شود. اگر مولد، برق ac تولید کند و یا موتور از منبع ac تغذیه شود با ماشین ac مواجه هستیم که می‌تواند تکفاز یا سه‌فاز و یا حتی چندین فاز باشد.

* البته تقسیم‌بندی موتورها و ژنراتور به همین رده محدود نشده و انواع موتورها و ژنراتورهای dc، ac تکفاز و ac سه فاز و چند فاز نیز وجود دارند که در جای خود به آنها اشاره خواهد شد.

تبصره - تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی و بالعکس با واسطه **میدان‌های الکتریکی** نیز امکان‌پذیر بوده و از لحاظ تحلیل فیزیکی و حتی ساختاری شاید ساده‌تر از مبدل‌های الکترومغناطیسی مکانیکی باشند. اما چگالی انرژی در میدان الکتریکی بسیار کمتر از میدان مغناطیسی است. به بیان کمی، ظرفیت ذخیره انرژی در میدان مغناطیسی حدود ۲۵۰۰۰ برابر بیشتر از میدان الکتریکی است. به همین دلیل این وسایل کاربرد گسترده‌ای ندارند و به مقادیر بسیار کم انرژی ورودی / خروجی محدود می‌شوند. از جمله دستگاه‌های این گروه می‌توان به دستگاه اندازه‌گیری الکتروستاتیکی اشاره نمود.

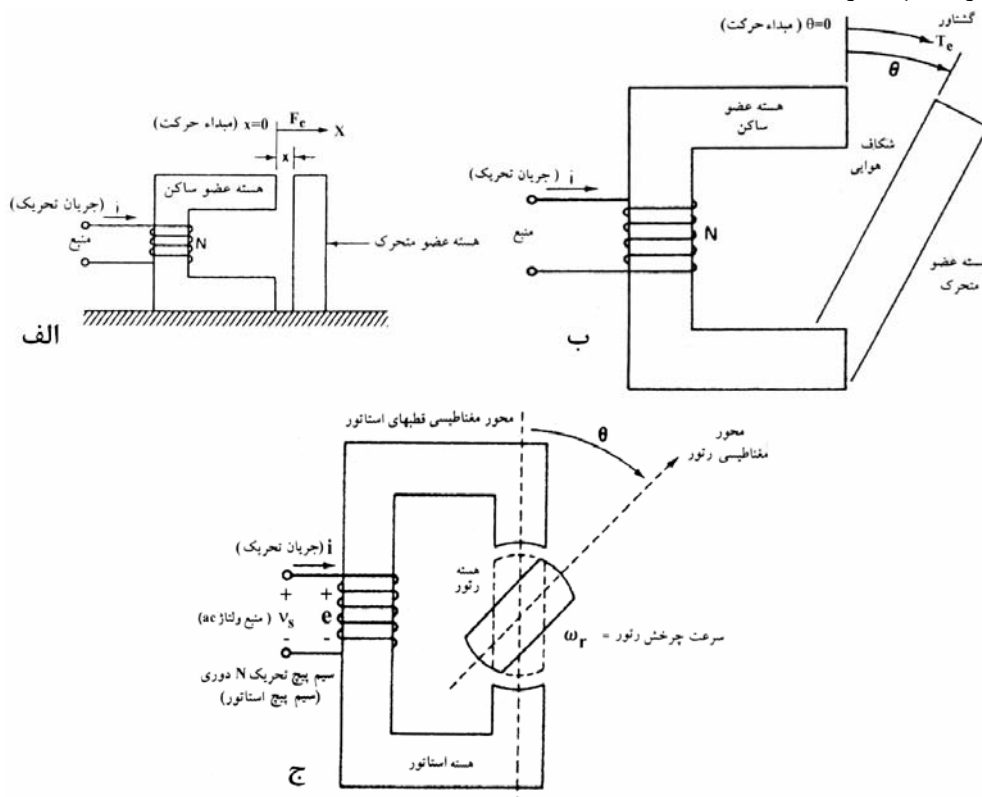


شکل (۳-۸) یک نوع مبدل (ترانسدیوسر) الکترومکانیکی با واسطه میدان الکتریکی

۳-۴ بررسی تبدیل انرژی در مبدل الکترومکانیکی تک تحریکه

۳-۴-۱ انواع مبدل تک تحریکه

در مبدل تک تحریک، یک سیم پیچ تغذیه شونده از منبع انرژی الکتریکی وجود دارد، در واقع یک آهنربای الکتریکی توسط منبع و سیم پیچ و هسته آهنی آن ایجاد می‌شود. این آهنربا بنابر اصل همسویی، قطعه مغناطیسی متحرک را جذب کرده و یا آنرا در جهتی می‌چرخاند که رلوکتانس مسیر کاهش و اندوکتانس مدار افزایش یابد. بنابراین مبدل تک تحریکه اصولاً از جنس مبدل EM (به ویژه مولد نیرو و یا موتور) می‌باشد و حالت ژنراتوری برای آن معمولاً تصور نمی‌شود. در شکل (۳-۹) سه نوع مبدل EM تک تحریکه بصورت شماتیک نشان داده شده است. نوعهای اول و دوم از دسته مبدلهای گروه اول و دوم (ترانسدیوسرها و مولدهای نیرو) هستند و نوع سوم هم می‌تواند بصورت موتور و هم بصورت سایر مبدلها کار کند.



شکل (۳-۹) سه نوع مبدل EM تک تحریکه

الف - حرکت خطی محدود ب - حرکت زاویه‌ای محدود ج - حرکت زاویه‌ای نامحدود (دورانی)

۳-۴-۲) تعادل انرژی‌های موثر در عملکرد مبدل تک تحریکه

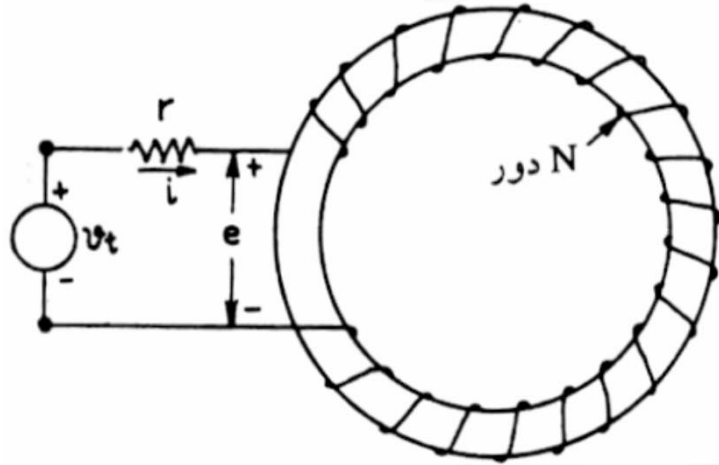
همانطور که می‌دانیم سه نوع انرژی در عملکرد مبدل موثرند: انرژی الکتریکی، انرژی مغناطیسی و انرژی مکانیکی

الف - انرژی الکتریکی ورودی: یک سیستم مغناطیسی ساده چنبره‌ای شکل را در نظر بگیرید که توسط

یک سیم‌پیچ تحریک شده است (شکل ۳-۱۰). در اینجا مقاومت اهمی سیم‌پیچ را بصورت یک مقاومت جداگانه و خارج

از مدار مغناطیسی مدل کرده‌ایم. رابطه ولتاژ لحظه‌ای برای مدار الکتریکی با استفاده از KVL نوشته می‌شود:

$$v(t) = i(t)r + e(t) \quad (۳-۱۳)$$



شکل (۳-۱۰)

که \$e\$ در این رابطه emf القایی در سیم‌پیچ ناشی از تغییر شار گردشی در هسته می‌باشد. طبق قانون القای

فارادی داریم:

$$e(t) = \frac{d\lambda}{dt} \quad (۳-۱۴)$$

در نتیجه:

$$v(t) = i(t)r + \frac{d\lambda}{dt} \quad (۳-۱۵)$$

اگر طرفین رابطه (۳-۱۵) را در \$i(t)dt\$ ضرب کنیم:

$$v(t)i(t)dt = ri^2(t)dt + id\lambda \quad (۳-۱۶)$$

$$\Rightarrow (v_{(\mp)}i(t)r)i(t)dt = i(t)d\lambda \quad (۳-۱۷)$$

$$e(t)i(t)dt = i(t)d\lambda \quad (۳-۱۸)$$

طرف چپ تساوی (۳-۱۸) بیانگر دیفرانسیل انرژی الکتریکی است. پس می‌توان نوشت:

$$dW_{elec} = e(t)i(t)dt = i(t)d\lambda \quad (۳-۱۹)$$

با فرض اینکه شار ناشی در حد صفر باشد و بتوانیم بنویسیم \$\lambda = N\phi\$:

$$dW_{elec} = id\lambda = Nid\phi = Fd\phi \quad (۳-۲۰)$$

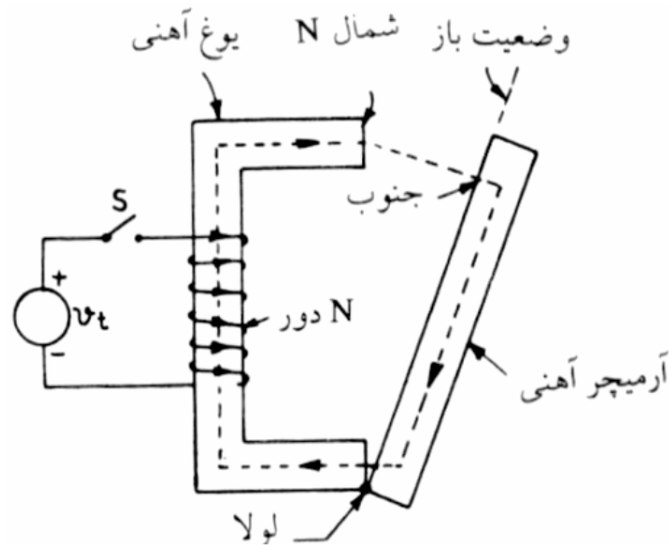
همانطور که در فصل ۲ دیدیم \$F = Ni\$، mmf لحظه‌ای سیم‌پیچ و \$\phi\$ مقدار لحظه‌ای شار هسته است. روابط

(۳-۱۹) و (۳-۲۰) نشان می‌دهند که شار پیوندی میدان بایستی تغییر کند تا چنبره بتواند از منبع تغذیه انرژی

دریافت کند. از آنجا که شار پیوندی داخل چنبره ناشی از جریان عبوری از سیم پیچ است، می توان گفت که در حالیکه i متغیر است، امکان تبادل انرژی بین چنبره و منبع انرژی الکتریکی وجود دارد.

ب- انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی: یک رله مغناطیسی ساده مطابق شکل (۱۱-۳) را در نظر

بگیرید. ابتدا قطعه متحرک (آرمیچر) در موقعیت باز قرار دارد. وقتی کلید S بسته می شود، جریان i در سیم پیچ برقرار شده و شار مغناطیسی بسته به نیروی محرکه که $F = Ni$ و مقاومت مغناطیسی مسیر (\mathcal{R}_{total}) ایجاد می شود. این میدان قطبهای شمال و جنوب مغناطیسی تولید می کند و در نتیجه نیروی مغناطیسی بوجود می آید که در صدد است طول فاصله هوایی (و رلوکتانس مسیر) را کم کند. اگر آرمیچر نتواند حرکت کند، کار مکانیکی انجام شده صفر است و بنابراین کل انرژی الکتریکی دریافتی از منبع در میدان مغناطیسی ذخیره می شود:



شکل (۱۱-۳) رله مغناطیسی ساده

$$dW_{elec} = dW_{fld} \quad (۲۱-۳)$$

که در این رابطه W_{fld} انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی است. با تلفیق رابطه اخیر و رابطه (۲۰-۳) خواهیم داشت:

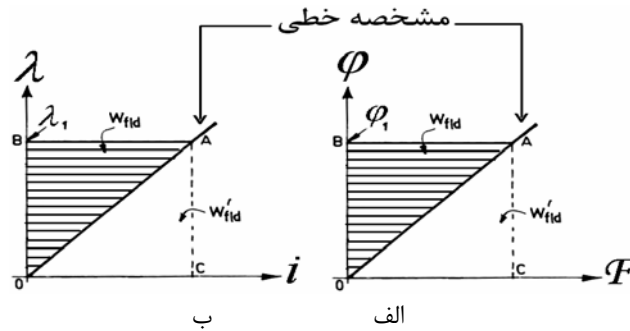
$$dE_{fld} = dE_{elec} = id\lambda = Fd\phi \quad (۲۲-۳)$$

اگر فرض کنیم تحریک هسته خام انجام شده یعنی شار اولیه قبل از بسته شدن کلید S صفر بوده است کل انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی تا زمانی که شار هسته به ϕ (و شار پیوندی به λ_1) برسد توسط رابطه زیر بدست می آید.

$$W_{fld} = \int_0^{\lambda_1} id\lambda = \int_0^{\phi_1} Fd\phi \quad (۲۳-۳)$$

بدیهی است در رابطه فوق، i باید به صورت تابعی از λ و یا F بصورت تابعی از ϕ تعریف شده باشد تا انتگرال گیری صورت پذیرد.

در اینجا توجه خود را به مشخصه مغناطیسی شونده هسته (و کل مدار) معطوف می داریم. چنانچه از شکل (۱۱-۳) به وضوح مشاهده می شود، فاصله هوایی نسبتاً بزرگی در مدار مغناطیسی وجود دارد و بر اساس مباحث فصل قبل به خوبی می توان مشخصه مدار را خطی فرض نمود (چرا؟). در شکل (۱۲-۳-الف) این مشخصه برحسب mmf و ϕ و در شکل (۱۲-۳-ب) این مشخصه برحسب i و λ داده شده است.



شکل (۳-۱۲) مشخصه مغناطیسی مدار با فاصله هوایی بزرگ

این دو مشخصه جداگانه داده شدند تا تأکیدی باشد بر اینکه انتگرال گیری جهت تعیین مقدار انرژی ذخیره شده (رابطه ۳-۲۳) با استفاده از هر کدام از مشخصه‌های مغناطیسی شونده مدار امکان پذیر است. سطوح هاشور خورده بالای خط مشخصه، بیانگر انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی است. سطح زیر مشخصه (بین مشخصه و محور افقی) به نام "شبه انرژی" (Co-energy) خوانده می شود. در مدارهایی که به اشباع نرسیده‌اند (مشخصه خطی دارند)، شبه انرژی با انرژی برابر است:

$$W'_{fld} = W_{fld} \quad (۳-۲۴)$$

در این رابطه W'_{fld} "شبه انرژی" را نشان می‌دهد.

البته دقت کنید که انتگرالی که W'_{fld} را محاسبه می‌کند اندکی با مورد انرژی متفاوت است:

$$W'_{fld} = \int_0^{F_1} \phi dF = \int_0^{i_1} \lambda di \quad (۳-۲۵)$$

در رابطه فوق باید ϕ برحسب F و یا λ برحسب i تعریف شده باشد. شبه انرژی در محاسبه نیروهای مغناطیسی مفید است و مفهوم فیزیکی ندارد.

در صورت خطی بودن مشخصه می‌توان نتیجه‌های دیگری نیز گرفت که از آن جمله:

$$W_{fld} = W'_{fld} = \frac{1}{2} \lambda i = \frac{1}{2} F \phi \quad (۳-۲۶)$$

همچنین با استفاده از مفهوم رلوکتانس (مقاومت مدار مغناطیسی) می‌توان انرژی و شبه انرژی را بیان نمود:

$$W_{fld} = W'_{fld} = \frac{1}{2} \phi^2 \mathcal{R} = \frac{1}{2} \frac{F^2}{\mathcal{R}} \quad (۳-۲۷)$$

در فصل قبل دیدیم که ضریب خود القایی L را می‌توان نسبت بین شار پیوندی و جریان تحریک دانست:

$$(L = \lambda/i) \text{ در آن صورت می‌توان انرژی و شبه انرژی را برحسب } L \text{ نوشت:}$$

$$W_{fld} = W'_{fld} = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} \frac{\lambda^2}{L} \quad (۳-۲۸)$$

از رابطه فوق می‌توان برای تعیین چگالی انرژی میدان مغناطیسی نیز استفاده کرد:

$$W_{fld} = \leftarrow \text{چگالی انرژی} = \frac{W_{fld}}{l.A} \quad (۳-۲۹)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{F \phi}{l.A} = \frac{1}{2} \frac{F \phi}{l A} = \frac{1}{2} H.B \quad (۳-۳۰)$$

$$\rightarrow \text{یا در حالت کلی تر} W_{fld} = \int_v \frac{1}{2} H.B dv \quad (۳-۳۱)$$

* واقعیتی که در رابطه (۳-۲۸) دیده می‌شود، ارتباط بین L و i که عناصر و پارامترهای مدار الکتریکی هستند با انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی است. این واقعیت مهم باعث می‌شود که قابلیت تحلیل ماشینهای الکتریکی با استفاده از "مدارهای الکتریکی" ایجاد شود. تبصره - هنگامی که مدار مغناطیسی شامل فاصله هوایی است، قسمت اعظم انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی در فاصله هوایی ذخیره می‌شود. برای روشن شدن این مطلب فرض کنید که در مدار شکل (۳-۱۱) شار ϕ برقرار شده و F_1 و F_2 بترتیب، mmfهای لازم برای عبور دادن شار از هسته مغناطیسی و فاصله هوایی باشند در این صورت انرژی ذخیره شده در هسته:

$$W_{fld_{core}} = \frac{1}{2} F_1 \phi \quad (3-32)$$

و انرژی ذخیره شده در فاصله هوایی:

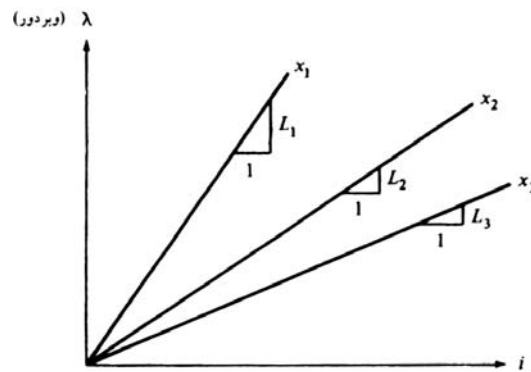
$$W_{fld_{airgap}} = \frac{1}{2} F_2 \phi \quad (3-33)$$

$$\Rightarrow \frac{W_{fld_{airgap}}}{W_{fld_{core}}} = \frac{F_2}{F_1} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3-34)$$

همانطور که در فصل قبل دیدیم رلوکتانس فاصله هوایی بسیار بالاتر از رلوکتانس هسته بوده (و حتی در حالت ایده‌آل می‌توانستیم رلوکتانس هسته را صفر فرض کنیم)، بنابراین در حالت حدی می‌توان گفت که انرژی صرفاً در فاصله هوایی ذخیره می‌شود.

ج - کار مکانیکی انجام شده: در قسمت قبل فرض کردیم که قطعه متحرک در وضعیت خود ثابت باقی

می‌ماند و رابطه‌ای را برای تبدیل انرژی الکتریکی ورودی به انرژی مغناطیسی بدست آوردیم. به ویژه در روابط (۳-۲۷) و (۳-۲۸) دیدیم که این انرژی با L و یا \mathcal{R} نسبت دارد. بدیهی است اگر آرمیچر اجازه و امکان حرکت داشته باشد به سمت یوغ (قسمت ساکن هسته) جذب می‌شود. در این فرآیند مرتباً \mathcal{R} کاهش یافته و L بزرگ می‌شود. معهداً مادامی که فاصله هوایی صفر نشده، می‌توان فرض کرد که مشخصه مغناطیسی مدار خطی مانده و فقط شیب آن با کم شدن فاصله هوایی زیاد می‌شود. (شکل ۳-۱۳)



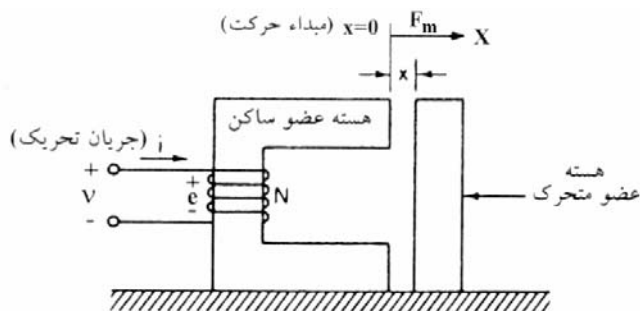
شکل (۳-۱۳) - تغییر مشخصه خطی مدار مغناطیسی با کوچک شدن فاصله هوایی

چنانچه در شکل دیده می‌شود، به تناسب نزدیک شدن آرمیچر به هسته و کاهش فاصله هوایی انرژی ذخیره شده در میدان (ناحیه محصور بین مشخصه و محور λ)، با فرض ثابت ماندن λ ، کوچک می‌شود. یعنی میدان بخشی از انرژی خود را از دست می‌دهد. این انرژی بصورت کار مکانیکی صرف حرکت دادن آرمیچر می‌شود. برای سهولت

تحلیل فرض می‌کنیم که آرمیچر فاقد جرم بوده و بنابراین ذخیره‌سازی انرژی مکانیکی در آن وجود ندارد. در این صورت کار مکانیکی انجام شده بر روی آرمیچر با رابطه زیر داده می‌شود.

$$dW_{mech} = f_{mech} \cdot dx \quad (3-35)$$

در رابطه فوق f_{mech} نیروی مکانیکی است که از طرف میدان مغناطیسی به آرمیچر اعمال شده و dx میزان جابجایی آرمیچر در راستای نیروی وارده است. (شکل ۳-۱۴)



شکل (۳-۱۴) - نمودار ساده مبدل تک تحریکه EM با حرکت خطی

اگر منبع تغذیه الکتریکی وجود نمی‌داشت، این انرژی صرفاً از محل میدان مغناطیسی تامین می‌گردید. اما در حالیکه انرژی از منبع الکتریکی نیز دریافت می‌شود، رابطه کلی حالت موتوری (۳-۱۱) برای حالت بدون تلفات را چنین می‌توان نوشت:

$$dW_{elec} = dW_{mech} + dW_{fld} \quad (3-36)$$

$$\Rightarrow dW_{fld} = dW_{elec} - dW_{mech} \quad (3-37)$$

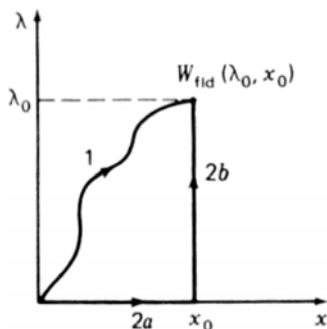
$$\Rightarrow dW_{fld} = i \cdot d\lambda - f_{mech} \cdot dx \quad (3-38)$$

اگر از طرفین رابطه قبل انتگرال بگیریم، می‌بینیم که:

$$W_{fld} = \int i \cdot d\lambda - \int f_{mech} \cdot dx \quad (3-39)$$

از آنجا که سیستم مغناطیسی بدون تلف فرض شده است، می‌توان مقدار انرژی ذخیره شده را صرفاً تابعی از وضعیت اولیه و نهایی λ و x دانست و نحوه تغییر λ و x تا رسیدن به وضعیت نهایی مهم نیست. اگر $x=0$ را برای حالتیکه فاصله هوایی بیشترین مقدار را دارد فرض کنیم در هر نقطه x_0 و λ_0 می‌توان مقدار انرژی را بصورت یگانه تعریف نمود. هنگامی که مقادیر i و f برحسب λ و x به صورت تحلیلی مشخص نیستند، از این ویژگی می‌توان در تسهیل محاسبه انرژی دستگاه استفاده کرد. به عنوان مثال در شکل (۳-۱۵) دو مسیر متفاوت برای رسیدن از نقطه $x=0$ و $\lambda=0$ به نقطه $x=x_0$ و $\lambda=\lambda_0$ در نظر گرفته شده است.

مسیر ۱ یک مسیر کلی است، اما برای انتگرال‌گیری مشکل ایجاد می‌کند. مگر اینکه i و f بطور صریح بصورت توابعی از λ و x تعیین شده باشند اما مسیر ۲ برای محاسبه آسانتر است:



شکل (۳-۱۵) - مسیرهای انتگرال‌گیری برای تعیین W_{fld}

$$W_{fld} = \int_{\text{مسیر 1a}} dW_{fld} + \int_{\text{مسیر 1b}} dW_{fld} \quad (40-3)$$

توجه داشته باشید که در مسیر 2a، $d\lambda = 0$ است. علاوه بر این $f_{mach} = 0$ است (چرا؟). بنابراین در کل این مسیر $dW_{fld} = 0$ بوده و انتگرال نیز صفر خواهد شد. در مسیر 2b، $dx = 0$ است و خواهیم داشت:

$$W_{fld}(\lambda_0, x_0) = \int_0^{\lambda_0} i(\lambda, x_0) d\lambda \quad (41-3)$$

د- محاسبه نیروی مکانیکی وارده بر قطعه متحرک: از آنجا که W_{fld} را فقط تابع x و λ دانستیم می‌توان دید که:

$$dW_{fld}(\lambda, x) = \frac{\partial W_{fld}}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial W_{fld}}{\partial x} dx \quad (42-3)$$

با مقایسه این رابطه با رابطه (38-3):

$$\frac{\partial W_{fld}}{\partial \lambda} = i \quad (43-3)$$

و

$$-\frac{\partial W_{fld}}{\partial x} = f_{mech} \quad (44-3)$$

بنابراین اگر W_{fld} به صورت تابعی از λ و x شناخته شده باشد می‌توان به راحتی رابطه‌ای برای i (به صورت تابعی از λ و x) و رابطه‌ای هم برای f_{mech} بدست آورد.

اگر i و x به صورت متغیرهای مستقل در نظر گرفته شوند می‌توان گفت:

$$dW_{fld}(i, x) = i d\lambda(i, x) - f_{mech} dx \quad (45-3)$$

اگر به جای $d\lambda$ از رابطه:

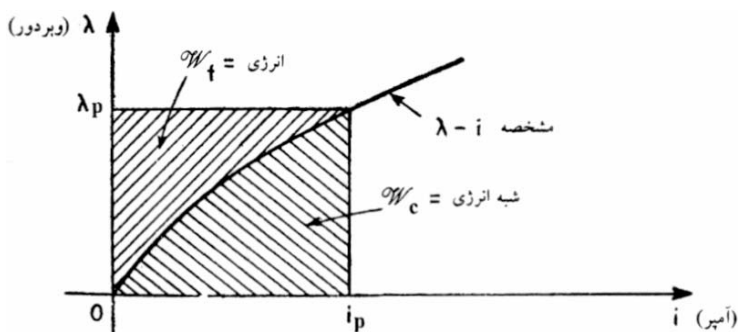
$$d\lambda = \frac{\partial \lambda}{\partial x} dx + \frac{\partial \lambda}{\partial i} di \quad (46-3)$$

قرار داده شود، در آن صورت می‌توان دید که:

$$f_{mech} = \frac{\partial}{\partial x} (i\lambda(i, x) - W_{fld}(i, x)) \quad (47-3)$$

بنابراین در حالیکه i معلوم باشد (و به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شود)، محاسبه f_{mech} کمی مشکلتر خواهد بود. راه دیگر در این وضعیت، استفاده از شبه انرژی است. با توجه به شکل کلی (3-16):

$$W'_{fld}(i, x) = i\lambda - W_{fld}(i, x) \quad (48-3)$$



شکل (3-16) - انرژی و شبه انرژی بر روی مشخصه کلی $\lambda - i$

در نتیجه:

$$dW'_{fld}(i, x) = d(i\lambda) - d(W_{fld}) \quad (49-3)$$

$$\Rightarrow dW'_{fld}(i, x) = \lambda di + f_{mech} \cdot dx \quad (50-3)$$

با در نظر گرفتن W'_{fld} به صورت تابعی از متغیرهای مستقل i و x :

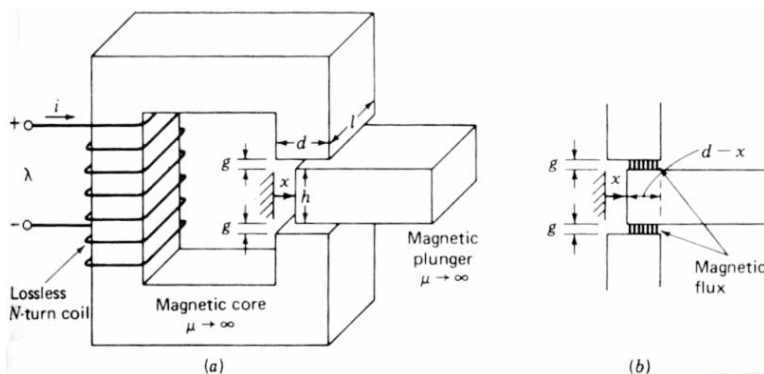
$$\lambda = \frac{\partial W'_{fld}(i, x)}{\partial i} \quad (51-3)$$

$$f_{mech} = \frac{\partial W'_{fld}(i, x)}{\partial x} \quad (52-3)$$

بنابراین رابطه (52-3) نیروی مکانیکی را مستقیماً بر حسب i و x می‌دهد. یعنی در صورتیکه i به عنوان متغیر مستقل باشد استفاده از رابطه شبه انرژی برای محاسبه نیروی مکانیکی حاصل از میدان، آسانتر خواهد بود. در واقع تعیین i یا λ به عنوان متغیرهای مستقل برای تعیین نیروی مکانیکی خروجی سیستم به اطلاعات (و احیاناً وسایل اندازه‌گیری) موجود بستگی دارد.

مثال 3-1- رله نشان داده شده در شکل (3-17) از یک هسته مغناطیسی و یک قطعه متحرک، هر دو با نفوذپذیری بینهایت، تشکیل شده است. ارتفاع قطعه متحرک بسیار بزرگتر از فاصله هوایی است ($h \gg g$). انرژی مغناطیسی ذخیره شده W_{fld} را بصورت تابعی از موقعیت ($0 < x < d$) بدست آورید. سایر مشخصات رله عبارتند از:

$$d=0.15\text{m} \quad g=0.002\text{m} \quad N=100 \text{ دور} \quad i=10\text{A} \quad l=0.1\text{m}$$



شکل (3-17) رله مغناطیسی با حرکت خطی

حل - از آنجا که می‌خواهیم W_{fld} به صورت تابعی از موقعیت قطعه متحرک تعریف شود، بایستی قطعه متحرک را در نقطه $x = x_0$ ثابت فرض کنیم و این انرژی را بدست آوریم. بنابراین از معادله (3-23) برای تعیین W_{fld} در حالیکه λ معلوم است، استفاده می‌کنیم.

$$W_{fld}(\lambda_1, x_1) = \int_0^{\lambda_1} i(\lambda, x_0) d\lambda$$

با داشتن رابطه بین λ و L در یک مدار که مشخصه مغناطیسی خطی دارد:

$$\lambda = L(x)i \quad (53-3)$$

و با جایگزینی رابطه اخیر در رابطه (3-23) داریم:

$$W_{fld} = \int_0^{\lambda_0} \frac{\lambda}{L(x_0)} d\lambda = \frac{1}{2} \frac{\lambda_0^2}{L(x_0)} = \frac{1}{2} L(x_0) i^2 \quad (54-3)$$

حال با توجه به ابعاد قطعه متحرک و فاصله هوایی $L(x)$ را محاسبه می‌کنیم. با توجه به ایده‌آل بودن هسته و با استفاده از رابطه (2-15) داریم:

$$L(x) = \frac{N^2 \mu_0 A}{2g}$$

A سطح مقطع فاصله هوایی است و با توجه به موقعیت قطعه متحرک محاسبه می‌شود:

$$A = l(d - x) = ld\left(1 - \frac{x}{d}\right)$$

$$\Rightarrow L(x) = \frac{N^2 \mu_0 ld \left(1 - \frac{x}{d}\right)}{2g} \quad (55-3)$$

$$W_{fld} = \frac{1}{2} \frac{N^2 \mu_0 ld}{2g} \left(1 - \frac{x}{d}\right) i^2 \quad (56-3)$$

به این ترتیب با جایگذاری مقادیر عددی، W_{fld} بدست خواهد آمد:

$$W_{fld} = \frac{1}{2} \frac{(1000)^2 (4\pi \times 10^{-7}) (0.15)(0.1)}{2(0.002)} \times 10^2 \left(1 - \frac{x}{0.15}\right)$$

$$\Rightarrow W_{fld} = 236 \left(1 - \frac{x}{0.15}\right)$$

مثال ۳-۲- برای رله مثال (۳-۱) نیروی اعمال شده بر قطعه متحرک را به صورت تابعی از x بدست آورید. جریان سیم پیچ را مقدار ثابت 10A در نظر بگیرید. یکبار از رابطه انرژی و بار دیگر از رابطه شبه انرژی استفاده نمائید. حل - به ترتیب از رابطه‌های (۳-۴۴) و (۳-۵۲) استفاده می‌کنیم:

$$f_{mech} = \frac{-\partial W_{fld}(\lambda, x)}{\partial x}$$

با جایگذاری از رابطه (۳-۵۴) و (۳-۵۵)

$$W_{fld}(\lambda, x) = \frac{1}{2} \frac{\lambda^2}{L(x)} = \frac{g\lambda^2}{N^2 \mu_0 ld \left(1 - \frac{x}{d}\right)}$$

$$f_{mech} = \frac{-g\lambda^2}{N^2 \mu_0 ld^2 \left(1 - \frac{x}{d}\right)^2} \quad (57-3)$$

اگر مجدداً به جای λ ، Li را قرار دهیم رابطه برحسب i بدست خواهد آمد.

$$f_{mech} = \frac{-g(L(x)) \cdot i^2}{N^2 \mu_0 ld^2 \left(1 - \frac{x}{d}\right)^2} = -\frac{N^2 \mu_0 l}{4g} i^2 \quad (58-3)$$

این رابطه (۳-۵۸) را می‌توان مستقیماً با مشتقگیری از (۳-۵۶) هم بدست آورد.

• دیده می‌شود که در اینجا نیرو، مستقل از وضعیت قطعه متحرک، مقداری است که با توان دوم جریان بستگی داشته و قطعه را به داخل فضای رله جذب می‌کند.

نیرو را از روی رابطه شبه انرژی نیز می‌توان بدست آورد: (در حالیکه قطعه در موقعیت x_0 ثابت است.) با

استفاده از رابطه (۳-۵۰) می‌توان نوشت:

$$W'_{fld} = \int_0^{i_0} \lambda(i, x_0) di \quad (59-3)$$

$$\Rightarrow W'_{fld} = \int_0^i L(x) i' di' = \frac{1}{2} L(x) i^2 \quad (60-3)$$

$$\Rightarrow W'_{fld} = \frac{N^2 \mu_0 l d (1 - \frac{x}{d})}{4g} i^2 \quad (61-3)$$

با استفاده از رابطه‌های (52-3) و (61-3) داریم:

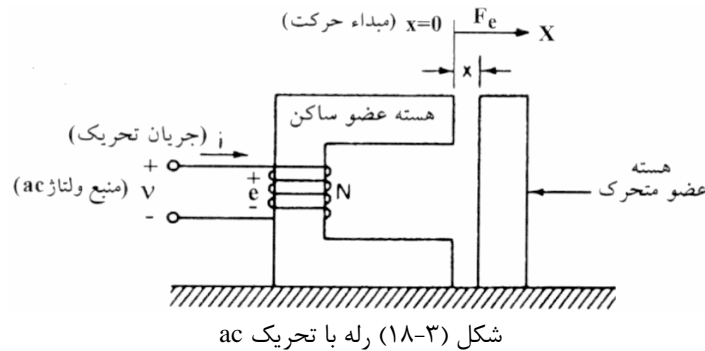
$$f_{mech} = \frac{\partial W'_{fld}(x_x)}{\partial x} = -\frac{N^2 \mu_0 l}{4g} i^2$$

که این رابطه دقیقاً رابطه‌ای است که از طریق انرژی نیز بدست آمد. البته از آنجا که برای تعیین f ، i و L را در اختیار داشتیم. روش شبه انرژی بسیار راحت‌تر و کوتاه‌تر است.

بهرحال با جایگذاری مقادیر داده شده در رابطه اخیر، نیروی وارده بر پلانچر محاسبه می‌شود.

$$f_{mech} = -\frac{(1000)^2 (4\pi \times 10^{-7}) (0.1) (10^2)}{4(0.002)} = -1570N$$

مثال 3-3- رله نشان داده شده در شکل (18-3) کلاً از مواد مغناطیسی ایده‌آل ساخته شده و مقاومت اهمی سیم‌پیچ تحریک آن نیز در حد صفر است. اگر سیم‌پیچ با منبع ولتاژ ac ($v = v_m \cos \omega t$) تحریک شود، رابطه‌ای کلی برای نیروی وارده به قطعه متحرک بیابید. مشخصه هسته را خطی فرض کنید.



حل: این سیستم نیز شبیه مثال (2-3) تحلیل می‌شود و بهتر است از رابطه شبه انرژی استفاده شود:

$$W'_{fld} = \frac{1}{2} L(x) i^2, f_{mech} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial}{\partial x} L(x) \quad (62-3)$$

حال تعیین $L(x)$ یعنی رابطه‌ای که L را بر حسب x بیان نماید:

$$L(x) = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{eq}(x)}$$

$$\mathcal{R}_{eq}(x) = \mathcal{R}_{core} + 2\mathcal{R}_g(x)$$

$$\mathcal{R}_g(x) = \frac{x}{\mu_0 A_g}$$

x : طول هر شکاف فاصله هوایی

A_g : سطح مقطع هر شکاف هوایی

پس اندوکتانس سیم‌پیچ چنین بدست می‌آید:

$$L(x) = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{core} + \frac{2x}{\mu_0 A_g}} \quad (63-3)$$

$$f_{mech} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial}{\partial x} \frac{N^2}{\mathcal{R}_{core} + 2 \frac{x}{\mu_0 A_g}} = \frac{N^2 i^2}{2} \times \frac{-2/\mu_0 A_g}{\left[\mathcal{R}_{core} + \frac{2x}{\mu_0 A_g} \right]^2} \quad (۶۴-۳)$$

با توجه به اینکه $\lambda = L(x)i$ می توان رابطه فوق را ساده تر نوشت:

$$f_{mech} = \frac{-\lambda^2}{N^2 \mu_0 A_g} \quad (۶۵-۳)$$

حال به محاسبه λ می پردازیم:

با صرف نظر از مقاومت اهمی سیم پیچ، $e \approx V = V_m \cos \omega t$ و سپس با استفاده از قانون القای فارادی می توان

نوشت:

$$d\lambda = e dt \Rightarrow \lambda = \lambda_0 + \int e dt = \lambda_0 + \int V_m \cos \omega t dt \Rightarrow \lambda = \lambda_0 + \frac{V_m}{\omega} \sin \omega t \quad (۶۶-۳)$$

با فرض خام بودن هسته در لحظه $t=0$ (یعنی $\lambda_0 = 0$) و قرار دادن رابطه $\lambda(t)$ در رابطه (۶۵-۳):

$$f_{mech} = \frac{-V_m^2 \sin^2 \omega t}{\omega^2 N^2 \mu_0 A_g} = \frac{-V_m^2 (1 - \cos 2\omega t)}{2\omega^2 N^2 \mu_0 A_g} \quad (۶۷-۳)$$

• نیروی مکانیکی اعمال شده به قطعه متحرک یک نیروی ثابت نبوده بلکه یک سینوسی با فرکانس دو برابر فرکانس تغذیه است. اما مقدار متوسط این نیرو صفر نیست و برابر است با:

$$f_{mech_{av}} = \frac{-V_m^2}{2\omega^2 N^2 \mu_0 A_g} \quad (۶۸-۳)$$

علامت منفی نشان دهنده این است که نیرو در خلاف جهت نشان داده شده در شکل (۱۸-۳) عمل کرده و

باعث جذب عضو متحرک به هسته می شود.

وجود مقدار متوسط نشان می دهد که رله مغناطیسی با تغذیه ac نیز عملکرد قابل قبولی داشته و در صورت

وجود اینرسی لازم، می تواند بدون لرزش پلانچر را جذب نماید.

ه - محاسبه نیروی مکانیکی در سیستم تک تحریکه با مشخصه غیرخطی: دیدیم که در یک سیستم

خطی، انرژی و شبه انرژی از لحاظ عددی برابر هستند. به عبارت دیگر در این سیستم ها $\frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} L$ اما در یک

سیستم غیرخطی که نسبت ثابتی بین H-B و λ و i وجود ندارد، تابع انرژی و شبه انرژی از لحاظ عددی نیز برابر

نیستند. همانطور که قبلاً گفته شد سطح محصور بین مشخصه $\lambda - i$ و محور عمودی (محور λ)، بیانگر انرژی و سطح

محصور بین مشخصه و محور افقی (محور i) معادل "شبه انرژی" می باشد.

از سوی دیگر می دانیم که نیروی مکانیکی اعمال شده به قطعه متحرک در مدارهای نشان داده شده (به عنوان

مثال مدار شکل (۱۷-۳) یا (۱۸-۳) برای مقادیر تعیین x و i یا x و λ بایستی صرف نظر از اینکه از روش انرژی و یا

شبه انرژی استفاده شود، مقدار یکسانی را بدست دهد. این مسئله برای سیستم های غیرخطی با استفاده از شکل های

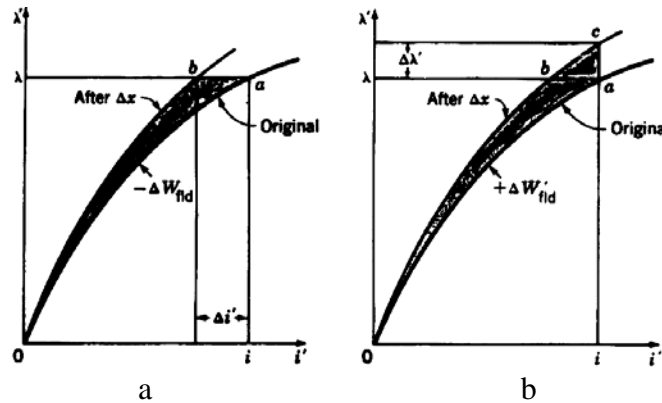
(۱۹-۳ الف) و (۱۹-۳ ب) روشن شده است. فرض کنید که آرمیچر (قطعه متحرک) در موقعیت x قرار دارد و نقطه a

نقطه کار وسیله در این شرایط است. اگر x به اندازه Δx تغییر پیدا کند، W_{fld} به اندازه $-\Delta W_{fld}$ تغییر خواهد کرد

(سطح سایه دار در شکل ۱۹-۳ الف) و بنابراین نیروی اعمال شده برابر خواهد بود با:

$$f_{mech} = \left. \frac{-\Delta W_{fld}}{\Delta x} \right|_{\Delta x \rightarrow 0} \quad (69-3)$$

از طرف دیگر اگر تغییر مشخصه را بر حسب تغییر در x از زاویه شبه انرژی در نظر بگیریم، سطح سایه‌دار شکل (۱۹-۳ب) نمایشگر $\Delta W'_{fld}$ خواهد بود. (تغییرات در x با ثابت ماندن i باعث تغییر در $W'(i, x)$ می‌شود).



شکل (۱۹-۳) تاثیر Δx بر انرژی و شبه انرژی در سیستم تک تحریک غیرخطی

با دقت در شکل‌های (۱۹-۳الف و ب) دیده می‌شود که در نتیجه f_{mech} تفاوت جزئی ایجاد شده است. در واقع سطح مثلث abc که آنرا با Δs نمایش می‌دهیم در حالت دوم اضافه شده است.

$$\Delta f = f_{mech_2} - f_{mech_1} = \frac{\Delta s}{\Delta x} \quad (70-3)$$

$$\Delta x \rightarrow 0$$

از آنجا که Δs با حاصل ضرب Δi و $\Delta \lambda$ نسبت دارد، پس یک متغیر بسیار کوچک از توان دو است که هر کدام با Δx به سمت صفر می‌روند.

$$\Delta f \approx \frac{\Delta i \cdot \Delta \lambda}{2\Delta x} \approx \frac{\Delta x \cdot \Delta x}{\Delta x} = 0 \quad (71-3)$$

$$\Delta x \rightarrow 0 \quad \Delta x \rightarrow 0$$

بنابراین دیده می‌شود که خوشبختانه محاسبه f_{mech} چه با مشتق‌گیری از $W_{fld}(\lambda, x)$ و چه با مشتق‌گیری از $W'_{fld}(i, x)$ اعم از اینکه سیستم خطی و یا غیرخطی باشد، نتیجه یکسانی خواهد داشت.

- بهر حال، یک تجربه قدیمی و شناخته شده را در اینجا با فرمول و علائم ریاضی مدلسازی و تحلیل نمودیم. بدیهی به نظر می‌رسد که نیروی وارد شده از طرف میدان به قطعه متحرک تابعی از شدت میدان (λ, i) و یا هر متغیر مرتبط با آنها) و فاصله قطعه تا قطبهای آهنربا (x) باشد.
- علامت جبری بدست آمده از روابط قبل برای نیرو نشان می‌دهد که نیرو در جهتی وارد می‌شود که انرژی ذخیره شده در میدان در شرایط شار ثابت (λ یا φ ثابت) کاهش یابد.

شبه انرژی سیستم در شرایط جریان ثابت (i ثابت) افزایش یابد.

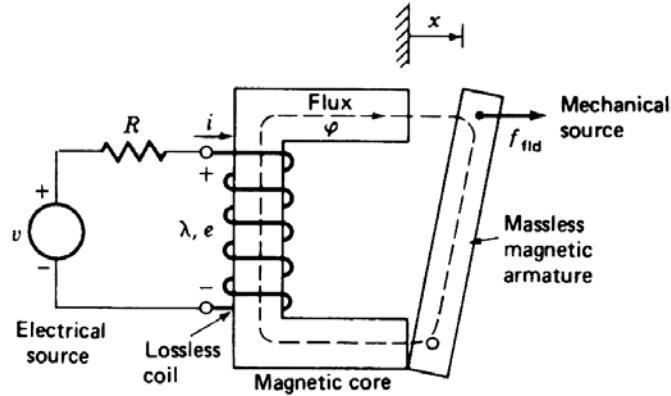
در یک سیستم تک تحریکه، همانطور که گفتیم نیرو در جهت کاهش رلوکتانس و افزایش اندوکتانس سیم پیچ بوده و با کشیدن هسته آهنی متحرک به داخل فاصله هوایی با کوتاه کردن مسیر شار در هوا این مهم را انجام می‌دهد.

۳-۴-۳) تبدیل انرژی در مبدل تک تحریکه EM با حرکت زاویه‌ای

در حرکت زاویه‌ای (و دورانی) به جای x با θ و به جای F (نیرو) با T (گشتاور) مواجه هستیم. بنابراین بدون از دست دادن کلیت روابط بدست آمده در بخش ۳-۴-۲ می‌توان جایگزینی ذیل را انجام داد.

$$dW_{mech} = f_{mech} dx = T_{mech} \cdot d\theta \quad (۷۲-۳)$$

همچنین می‌توان دید که انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی تابعی از وضعیت زاویه‌ای قطعه متحرک (θ) و پارامترهای تحریک یعنی i یا λ یا φ ... می‌باشد. (شکل ۳-۲۰)



شکل (۳-۲۰) - رله مغناطیسی با حرکت زاویه‌ای

بنابراین در مورد انرژی و شبه انرژی در این سیستم می‌توان نوشت:

$$W_{fld}(\lambda, \theta) = \int_0^{\lambda_0} i(\lambda, \theta) d\lambda \Big|_{\theta=cte} \quad (۷۳-۳)$$

$$W'_{fld}(i, \theta) = \int_0^{i_0} \lambda(i, \theta) di \Big|_{\theta=cte} \quad (۷۴-۳)$$

و گشتاور حاصله (گشتاور مکانیکی وارده بر آرمیچر) برابر است با:

$$T_{mech} = \frac{-\partial W_{fld}(\lambda, \theta)}{\partial \theta} \quad (۷۵-۳)$$

از طریق انرژی:

$$T_{mech} = \frac{\partial W'_{fld}(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (۷۶-۳)$$

و از روش شبه انرژی:

• در حالت خاص که سیستم خطی است، می‌توان نوشت:

$$\lambda = L(\theta)i \quad (۷۷-۳)$$

و $L(\theta)$:

$$L(\theta) = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{eq}(\theta)} \quad (۷۸-۳)$$

در نتیجه λ نیز به صورت تابعی از i و θ در می‌آید.

$$\lambda = \frac{N^2 i}{\mathcal{R}_{eq}(\theta)} \quad (۷۹-۳)$$

و i به صورت تابعی از λ و θ تعریف می‌شود.

$$i = \frac{\lambda \mathcal{R}_{eq}(\theta)}{N^2} \quad (۸۰-۳)$$

با جایگذاری روابط تحلیلی $i(\lambda, \theta)$ و $\lambda(i, \theta)$ در انتگرالهای مربوط به انرژی و شبه انرژی دیده می‌شود که:

$$W_{fld}(\lambda, \theta) = \frac{1}{2} \frac{\lambda^2}{L(\theta)} \quad (۸۱-۳)$$

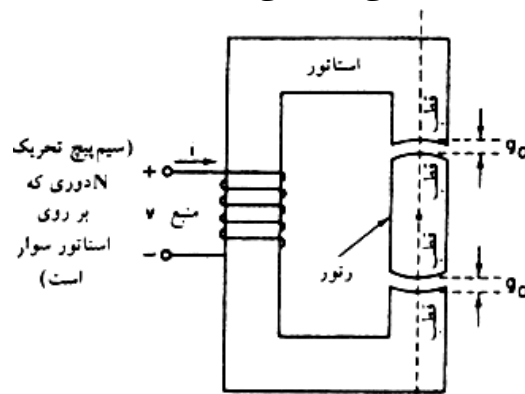
$$\Rightarrow T_{mech} = -\frac{\lambda^2}{2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{L(\theta)} \right) \quad (۸۲-۳)$$

$$W'_{fld}(i, \theta) = \frac{1}{2} i^2 L(\theta) \quad (۸۳-۳)$$

$$\Rightarrow T_{mech} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial}{\partial \theta} (L(\theta)) \quad (۸۴-۳)$$

۳-۴-۴) تبدیل انرژی در مبدل‌های EM تک تحریکه با حرکت دورانی

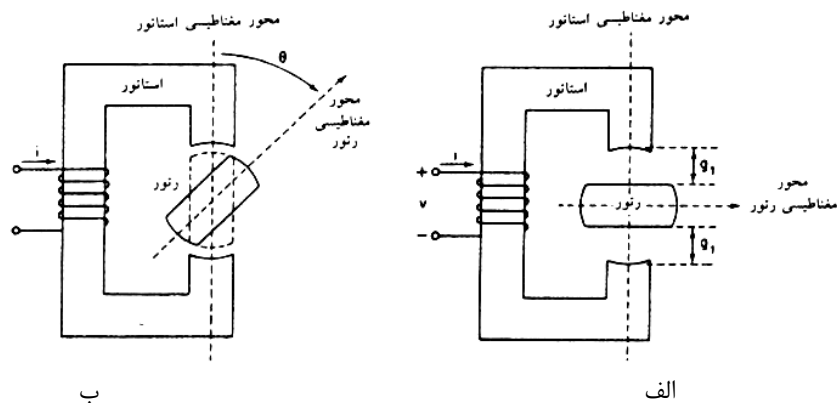
در این مبدل‌ها که معمولاً حرکت دورانی دائمی صورت می‌پذیرد، عضو ساکن، که سیم پیچ تحریک روی آن سوار است، را استاتور و عضو متحرک، که قادر به حرکت چرخشی مداوم است، را روتور می‌نامند. لبه‌های استاتور در مجاورت فاصله هوایی قطب‌های استاتور و لبه‌های دو سر روتور با فاصله هوایی قطب‌های روتور را تشکیل می‌دهند. شکل (۲۱-۳) یک مبدل نمونه از این گروه را نشان می‌دهد که به نام موتور رلوکتانسی شناخته می‌شود. همانطور که در شکل دیده می‌شود این مبدل یک موتور رلوکتانسی دو قطبی است.



محورهای مغناطیسی رتور و استاتور که بر هم منطبق اند

شکل (۲۱-۳) نمای ساده یک موتور رلوکتانسی دو قطبی

محورهای مغناطیسی استاتور و روتور در راستای قطب‌های آنها تعریف می‌شوند. اگر زاویه بین این دو محور را θ بنامیم در شکل (۲۱-۳) که محورهای مغناطیسی استاتور و روتور بر هم منطبق است، θ برابر صفر می‌باشد. با توجه به شکل‌های (۲۲-۳) الف و ب) می‌توان دید که با چرخش روتور θ از صفر تا 360° می‌تواند تغییر نماید.



شکل (۲۲-۳) تغییر θ در محور موتور رلوکتانسی

در وضعیتی که $\theta = 90^\circ$ یا $\theta = 270^\circ$ رلوکتانس مسیر شار بیشترین مقدار را داشته و در $\theta = 0^\circ$ ، $\theta = 180^\circ$ و $\theta = 360^\circ$ کمترین مقدار رلوکتانس وجود دارد. با تقریب قابل قبول می‌توان تغییرات رلوکتانس موتور را با رابطه زیر مدل کرد:

$$\mathcal{R}(\theta) = \mathcal{R}_0 - \mathcal{R}_2 \cos 2\theta \quad (۸۵-۳)$$

و از آنجا دید که

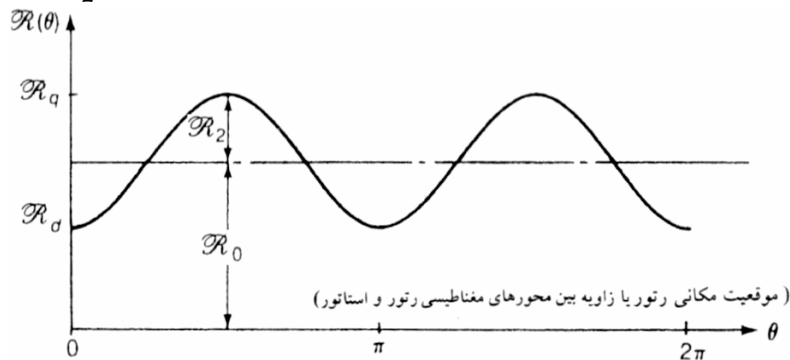
$$\mathcal{R}_d = \mathcal{R}(\theta) \Big|_{\substack{\theta=0 \\ \theta=180 \\ \theta=360}} = \mathcal{R}_0 - \mathcal{R}_2 \quad (۸۶-۳)$$

$$\mathcal{R}_q = \mathcal{R}(\theta) \Big|_{\substack{\theta=90 \\ \theta=270}} = \mathcal{R}_0 + \mathcal{R}_2 \quad (۸۷-۳)$$

و از آنجا

$$\mathcal{R}_0 = \frac{\mathcal{R}_d + \mathcal{R}_q}{2} \quad \mathcal{R}_2 = \frac{\mathcal{R}_q - \mathcal{R}_d}{2} \quad (۸۸-۳)$$

$$\Rightarrow \mathcal{R}(\theta) = \frac{\mathcal{R}_d + \mathcal{R}_q}{2} - \frac{\mathcal{R}_q - \mathcal{R}_d}{2} \cos 2\theta \quad (۸۹-۳)$$



شکل (۲۳-۳) تغییرات رلوکتانسی بر حسب θ در موتور رلوکتانس دو قطبی

اگر هسته را ایده‌آل فرض کنیم در آن صورت:

$$L(\theta) = \frac{N^2}{\mathcal{R}(\theta)} \quad (۹۰-۳)$$

توجه کنید که نقاط ماکزیمم و مینیموم $L(\theta)$ دقیقاً معکوس نقاط ماکزیمم و مینیموم $\mathcal{R}(\theta)$ است. بطور مشابه برای $L(\theta)$ می‌توان چنین نوشت:

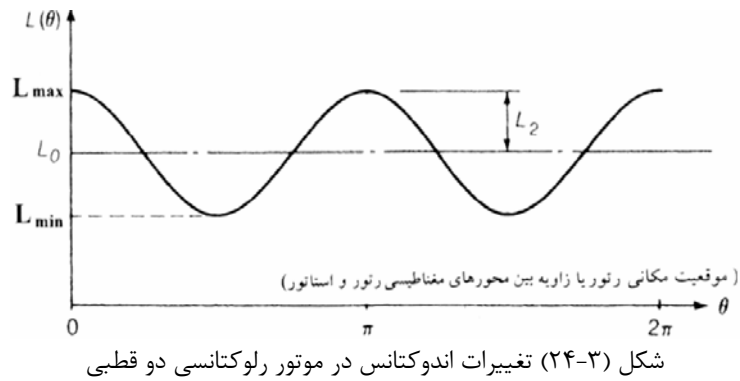
$$L(\theta) = L_0 + L_2 \cos 2\theta \quad (۹۱-۳)$$

$$L_{\max} = L(\theta) \Big|_{\theta=0} = L_0 + L_2 \quad (۹۲-۳)$$

$$L_{\min} = L(\theta) \Big|_{\theta=90} = L_0 - L_2 \quad (۹۳-۳)$$

$$\Rightarrow L_0 = \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2}, L_2 = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2} \quad (۹۴-۳)$$

$$\Rightarrow L(\theta) = \frac{1}{2} [(L_{\max} + L_{\min}) + (L_{\max} - L_{\min}) \cos 2\theta] \quad (۹۵-۳)$$



• روابط مربوط به حرکت روتور در موتور رلوکتانسی

با توجه به وجود دائمی فاصله هوایی، مشخصه $\lambda - i$ موتور را می‌توان خطی در نظر گرفت. در آن صورت:

$$W'_{fld}(i, \theta) = \frac{1}{2} L(\theta) i^2 \quad (۹۶-۳)$$

$$T_m = \frac{\partial W_{fld}}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial}{\partial \theta} L(\theta) \quad (۹۷-۳)$$

$$\Rightarrow T_m = \frac{-1}{2} i^2 (L_{\max} - L_{\min}) \sin 2\theta \quad (۹۸-۳)$$

تبصره: اگر $L_{\max} = L_{\min}$ باشد (در یک موتور با روتور استوانه‌ای و استاتور سیلندری چنین وضعیتی وجود دارد). گشتاور در این موتور ایجاد نمی‌شود. به گشتاور ایجاد شده ناشی از رلوکتانس متغیر، گشتاور رلوکتانسی گفته می‌شود. حال فرض کنیم روتور در شکل (۳-۲۱) یا (۳-۲۲) با سرعت زاویه‌ای ω_r در حال چرخش باشد:

$$\theta = \omega_r t + \theta_0 \quad (۹۹-۳)$$

ω_r سرعت زاویه‌ای روتور و θ موقعیت مکانی روتور در لحظه t می‌باشد. در نتیجه θ_0 زاویه بین محور روتور و محور استاتور در لحظه $t = 0$ است.

همچنین فرض کنیم جریان تحریک استاتور یک سینوسی با فرکانس ω_s باشد: $i = I_m \sin(\omega_s t)$ با استفاده از رابطه (۳-۹۸) می‌توان گشتاور رلوکتانسی را بدست آورد.

$$T_{mech} = \frac{1}{2} I_m^2 (L_{\max} - L_{\min}) \cdot \sin^2(\omega_s t) \cdot \sin(2\omega_r t + 2\theta_0) \quad (۱۰۰-۳)$$

$$\Rightarrow T_{mech} = \frac{-1}{4} I_m^2 (L_{\max} - L_{\min}) \cdot (K_1(t) + K_2(t) + K_3(t)) \quad (۱۰۱-۳)$$

که در آن:

$$\left. \begin{aligned} K_1(t) &= \sin 2(\omega_r t + \theta_0) \\ K_2(t) &= -\frac{1}{2} \sin 2[(\omega_r + \omega_s)t + \theta_0] \\ K_3(t) &= -\frac{1}{2} \sin 2[(\omega_r - \omega_s)t + \theta_0] \end{aligned} \right\} (۱۰۲-۳)$$

می‌بینیم که گشتاور در موتور رلوکتانسی از ۳ مولفه سینوسی تشکیل شده که متوسط هر کدام از آنها (در یک دوره زمانی معین) صفر است. یعنی در حالت کلی در یک موتور رلوکتانسی گشتاور متوسط غیر صفر به وجود نمی‌آید. اما برای حالت‌های خاصی $\omega_s = \omega_r$ یا $\omega_s = -\omega_r$ ، میانگین گشتاور صفر نمی‌شود:

$$\omega_r = \pm \omega_s \Rightarrow T_{mech_{ave}} = \frac{1}{8} I_m^2 (L_{\max} - L_{\min}) \sin 2\theta_0 \quad (۱۰۳-۳)$$

ω_s (فرکانس زاویه‌ای جریان تحریک) را "سرعت سنکرون" می‌نامند. بنابراین در یک موتور رلوکتانسی دو قطبی اگر سرعت چرخش روتور با سرعت سنکرون برابر باشد، گشتاور مکانیکی تولید خواهد شد. از این رو مبدل رلوکتانسی ارائه شده در این بخش را **موتور سنکرون رلوکتانسی** می‌نامند.

تبصره - از آنجا که موتور رلوکتانسی نمی‌تواند در حالت غیرسنکرون ایجاد گشتاور نماید، بنابراین دارای خاصیت خود راه‌اندازی نیست. (چرا؟)

ویژگی فوق برای کلیه موتورهای سنکرون وجود دارد و نحوه راه‌اندازی و رساندن این موتورها به سرعت سنکرون یکی از مباحث جالب تئوریک و تکنولوژیکی مهندسی برق است. می‌توان ثابت کرد که در یک موتور سنکرون رلوکتانسی اگر جریان تحریک کاملاً سینوسی باشد، ولتاژ تحریک یک سینوسی دارای هارمونیک سوم خواهد بود. همچنین در صورتیکه موتور با یک ولتاژ کاملاً سینوسی تحریک شود، جریان تحریک علاوه بر مولفه اول دارای مولفه (هارمونیک) سوم خواهد بود.

۳-۵) بررسی تبدیل انرژی در مبدل‌های الکترومکانیکی دو تحریکه

۳-۵-۱) مبدل EM دو تحریکه با حرکت خطی

در این مبدلها معمولاً دو سیم‌پیچ تحریک بر روی هسته ساکن (استاتور) قرار دادند و مبنای کار همان محاسبات و روابط بدست آمده برای مبدل‌های تک تحریکه با حرکت خطی است. بنابراین برای محاسبه انرژی ذخیره شده در میدان تزویج این مبدل از یکی از دو رابطه زیر می‌توان بهره جست:

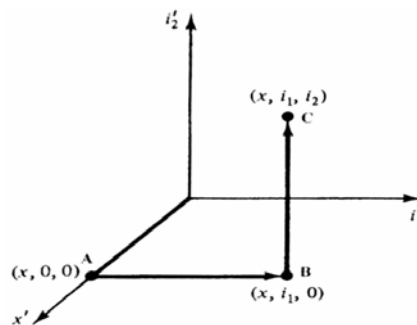
$$dW_{fld}(\lambda_1, \lambda_2, x) = i_1 d\lambda_1 + i_2 d\lambda_2 - f_{mech} dx \quad (3-104)$$

$$dW_{fld}(i_1, i_2, x) = i_1 d\lambda_1 + i_2 d\lambda_2 - f_{mech} dx \quad (3-105)$$

در رابطه (۳-۱۰۴) λ_1 و λ_2 و x به عنوان متغیرهای مستقل و در رابطه بعد i_1 و i_2 و x به این عنوان در نظر گرفته شده‌اند.

• محاسبه انرژی ذخیره شده در میدان تزویج

همانند مبدل تک تحریکه در اینجا نیز می‌توان در ابتدا قسمت متحرک را ثابت فرض نمود ($dx=0$) و مسیر انتگرال‌گیری را نیز به گونه‌ای انتخاب نمود که محاسبه آسانتر باشد. اگر رابطه (۳-۱۰۵) را مبنا بگیریم و $dx=0$ باشد، مسیر انتگرال‌گیری مناسب برای محاسبه W به گونه‌ای است که در شکل (۳-۲۵) نشان داده شده است.



شکل (۳-۲۵) مسیر انتگرال‌گیری برای dW (از رابطه ۳-۱۰۵)

با فرض وجود اندوکتانس‌های متقابل و خطی بودن هسته می‌توان دید که:

$$d\lambda_1 = L_{11} di_1 + L_{12} di_2 \quad \text{و} \quad d\lambda_2 = L_{21} di_1 + L_{22} di_2 \quad (3-106)$$

و با جایگذاری در رابطه (۳-۱۰۵) و انتگرال گیری طبق مسیر نشان داده شده در شکل (۳-۲۵) دیده می شود

که:

$$W'_{fld} = W_{fld} = \frac{1}{2} L_{11}(x) i_1^2 + i_1 i_2 L_{12}(x) + \frac{1}{2} L_{22}(x) i_2^2 \quad (۳-۱۰۷)$$

انرژی شبه انرژی

برای محاسبه نیروی وارد به عضو متحرک نیز چنانچه در مورد مبدل‌های تک تحریکه دیدیم، می توان از مشتق

جزئی $\frac{\partial W'_{fld}}{\partial x}$ استفاده نمود:

$$\Rightarrow f_m = \frac{i_1^2}{2} \frac{\partial L_{11}(x)}{\partial x} + i_1 i_2 \frac{\partial L_{12}(x)}{\partial x} + i_2^2 \frac{\partial L_{22}(x)}{\partial x} \quad (۳-۱۰۸)$$

رابطه (۳-۱۰۸) را بصورت ماتریسی هم می توان نوشت:

$$f_m = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_1 & i_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial L_{11}}{\partial x} & \frac{\partial L_{12}}{\partial x} \\ \frac{\partial L_{21}}{\partial x} & \frac{\partial L_{22}}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (۳-۱۰۹)$$

$$= \frac{1}{2} [I]^T \cdot \frac{\partial}{\partial x} [L] \cdot [I] \quad (۳-۱۱۰)$$

تبصره - این روابط برای یک مبدل n تحریک نیز صادق است.

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{11}(x) & L_{12}(x) & L_{1n}(x) \\ L_{21}(x) & L_{22}(x) & L_{2n}(x) \\ L_{n1}(x) & L_{n2}(x) & L_{nn}(x) \end{bmatrix} \quad (۳-۱۱۱)$$

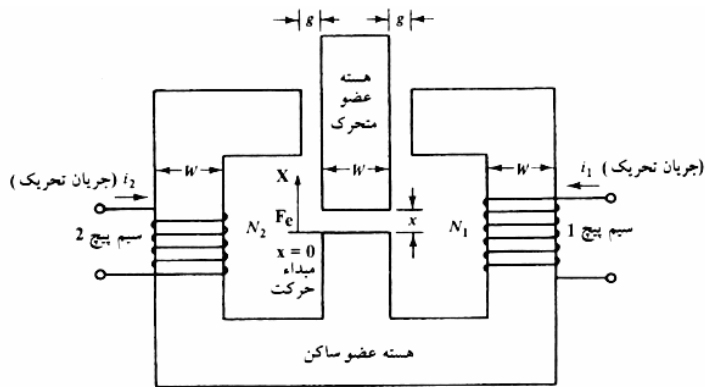
$$L_{ij} = L_{ji}$$

با شرط خطی بودن مشخصه B-H:

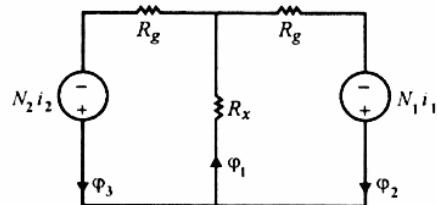
$$\Rightarrow F_e = \frac{1}{2} [I]^T \cdot \frac{\partial}{\partial x} [L] \cdot [I] \quad (۳-۱۱۲)$$

مثال ۳-۴ - یک مبدل EM دو تحریکه با حرکت خطی مطابق شکل (۳-۲۶) مفروض است. نیروی وارده بر عضو متحرک را بیابید.

حل - با فرض ایده آل بودن هسته ها مدل مدار مغناطیسی برای یک موقعیت خاص عضو متحرک (x معین) مطابق شکل (۳-۲۶-ب) می باشد:



الف



ب

شکل (۳-۲۶) مبدل دو تحریکه با حرکت خطی مربوط به مثال (۳-۴)

در این شکل داریم:

$$\mathcal{R}_g = \frac{g}{\mu_0 A_g} \quad \text{رلوکتانس هر یک از شکافهای فاصله هوایی کناری}$$

$$\mathcal{R}_x = \frac{x}{\mu_0 A_x} \quad \text{رلوکتانس شکاف هوایی ستون وسط}$$

برای مش‌های I و II در مدار معادل می‌توان نوشت:

$$\text{مش سمت راست: } \phi_2 \mathcal{R}_g + \phi_1 \mathcal{R}_x = N_1 i_1$$

$$\phi_1 = \phi_2 + \phi_3$$

$$\text{مش سمت چپ: } \phi_3 \mathcal{R}_g + \phi_1 \mathcal{R}_x = N_2 i_2$$

از حل دستگاه فوق:

$$\phi_2 = \frac{1}{\mathcal{R}_g (g + 2x)} [N_1 i_1 (x + g) - N_2 i_2 x]$$

$$\phi_3 = \frac{1}{\mathcal{R}_g (g + 2x)} [N_2 i_2 (x + g) - N_1 i_1 x]$$

$$\lambda_1 = N_1 \phi_2 \quad \lambda_2 = N_2 \phi_3 \quad (\text{چرا؟})$$

$$\Rightarrow L_{11}(x) = [N_1^2 (x + g)] \times \frac{1}{\mathcal{R}_g (g + 2x)}$$

$$L_{22}(x) = [N_2^2 (x + g)] \times \frac{1}{\mathcal{R}_g (g + 2x)}$$

$$L_{12} = L_{21} = \frac{-1}{\mathcal{R}_g (g + 2x)} [N_1 N_2 x]$$

با جایگزینی اندوکتانس‌ها در رابطه (۳-۸-۱۰) نیرو محاسبه می‌شود.

۳-۵-۲) مبدل EM دو تحریکه با حرکت دورانی

در این موتورها معمولاً یکی از سیم‌پیچها روی استاتور و دیگری روی روتور قرار می‌گیرد. برای محاسبه گشتاور اعمال شده به روتور همانطور که در مورد مبدل تک تحریکه از شبه انرژی نسبت به θ مشتق‌گیری شد، در اینجا هم می‌توان عمل نمود:

$$T_e = \partial W'_{fld}(i_1, i_2, \theta) / \partial \theta \quad (۳-۱۱۳)$$

i_1 و i_2 بترتیب جریانهای سیم‌پیچهای استاتور و روتور بوده و θ موقعیت خاصی از روتور است که علاقمند به محاسبه گشتاور در آن وضعیت هستیم. با خطی فرض کردن مشخصه B-H مواد مغناطیسی بکار رفته در ساختمان مبدل، می‌توان مقدار انرژی و شبه انرژی به ازای یک θ معین را یکسان دانست و آنرا چنین محاسبه نمود.

$$W_{fld} = W'_{fld}(i_1, i_2, \theta) = \frac{1}{2} L_{11}(\theta) i_1^2 + L_{12}(\theta) i_1 i_2 + \frac{1}{2} L_{22}(\theta) i_2^2 \quad (۳-۱۱۴)$$

با مشتق‌گیری از رابطه فوق، گشتاور بدست می‌آید:

$$T_e = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} + i_1 i_2 \frac{\partial L_{12}}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{\partial L_{22}}{\partial \theta} \quad (۳-۱۱۵)$$

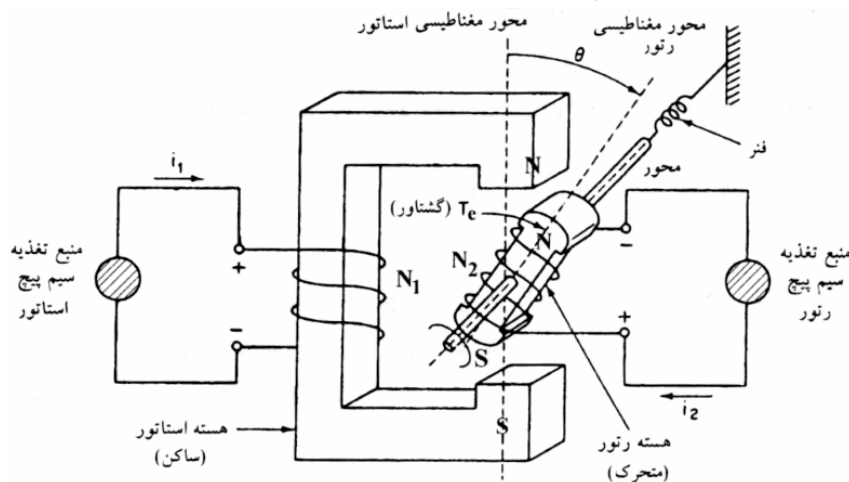
یادآوری می‌کنیم که:

$$L_{11}(\theta) = \frac{\lambda_1(i_1, i_2, \theta)}{i_1} \Big|_{i_2=0}$$

$$L_{22}(\theta) = \frac{\lambda_2}{i_2} \Big|_{i_1=0}$$

$$L_{12}(\theta) = L_{21}(\theta) \equiv M(\theta) = \frac{\lambda_1}{i_2} \Big|_{i_1=0} = \frac{\lambda_2}{i_1} \Big|_{i_2=0}$$

اکنون یک مبدل EM دو تحریکه با حرکت دورانی مطابق شکل (۳-۲۷) را معرفی می‌کنیم. این موتور دو قطبی با روتور قطب برجسته است و سیم‌پیچهای استاتور و روتور هر کدام تغذیه ویژه خود را دارند.



شکل (۳-۲۷) یک نمونه موتور دو تحریکه دو قطبی با روتور قطب برجسته

اندوکتانس خودی سیم‌پیچ استاتور (L_{11}) موقعی که جریان روتور صفر باشد، محاسبه می‌شود ($i_2 = 0$). بدیهی است که در این حالت موتور به یک موتور رلوکتانسی تبدیل شده و اندوکتانس آن مشابه اندوکتانس موتور رلوکتانسی است و داریم:

$$L_{11}(\theta) = L_{0_s} + L_{2_s} \cos 2\theta \quad (۳-۱۱۶)$$

(اندیس s برای تفکیک کمیت‌های استاتور از روتور است.)

همچنین اندوکتانس خودی روتور عبارت خواهد بود از:

$$L_{22}(\theta) = L_{0_r} + L_{2_r} \cos 2\theta \quad (۳-۱۱۷)$$

(اندیس r برای نمایش کمیت‌های روتور است.)

در ساختار موتورها معمولاً شرایط به گونه‌ای است که L_{22} به θ بستگی زیادی ندارد و می‌توان آنرا ثابت و

برابر L_{0_r} در نظر گرفت:

$$L_{2_r} \ll L_{0_r} \Rightarrow L_{22}(\theta) \cong L_{0_r} \quad (۳-۱۱۸)$$

اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچهای روتور و استاتور نیز چنین است.

$$L_{12}(\theta) = L_{21}(\theta) = M(\theta) = \frac{\lambda_2}{i_1} \Big|_{i_2=0} \quad (۳-۱۱۹)$$

با توجه به شکل (۳-۲۸) می‌توان دید که با شرط $i_2 = 0$ و $i_1 \neq 0$ در وضعیتهای $\theta = 0, \pi, 2\pi$

ماکزیمم و در وضعیتهای $\theta = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}$ صفر است.

پس اندوکتانس متقابل بین سیم پیچهای روتور و استاتور چنین است:

$$L_{12}(\theta) = L_{21}(\theta) \equiv M(\theta) = L_m \cos \theta \quad (120-3)$$

اگر روابط اخیر را در معادله (3-115) قرار دهیم، رابطه‌ای خلاصه شده‌ای برای T_e بدست خواهد آمد:

$$T_e = -[(i_1^2 L_{2s} + i_2^2 L_{2r}) \sin 2\theta + i_1 i_2 L_m \sin \theta] \quad (121-3)$$

$$T_e = -(T_R \sin 2\theta + T_M \sin \theta) = T_1 + T_2 \quad (122-3)$$

که در آن:

$$T_R = i_1^2 L_{2s} + i_2^2 L_{2r}, \quad T_M = i_1 i_2 L_m \quad (123-3)$$

مولفه اول گشتاور ($T_1 = -T_R \sin 2\theta$) همان گشتاور رلوکتانسی است. (چرا؟)

مولفه دوم ($T_2 = -T_M \sin \theta$) در موتور تک تحریکه وجود نداشت و به گشتاور اولیه (Initial Torque) موسوم است.

تمرین - در مورد مبدلهای دو تحریکه، بویژه موتور دوار دو تحریکه هیچ شرطی برای ایجاد گشتاور مطرح نشد. بررسی کنید که در صورتیکه:

الف - سیم پیچ استاتور با جریان dc تحریک شود.

ب - سیم پیچ استاتور با جریان ac تحریک شود.

آیا شرطی برای پیدایش گشتاور مطرح خواهد شد یا خیر؟

تبصره - در مورد اندوکتانس خودی استاتور و روتور می‌توان از رابطه کلی اندوکتانسها نیز استفاده نمود:

$$L_{11} = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_s(\theta)} \quad \text{و} \quad L_{22} = \frac{N_2^2}{\mathcal{R}_r(\theta)} \quad (124-3)$$

در این رابطه‌ها

N_1 و N_2 به ترتیب تعداد دور سیم پیچهای استاتور و روتور

L_{11} و L_{22} به ترتیب اندوکتانسهای خودی سیم پیچ استاتور و سیم پیچ روتور

$\mathcal{R}_s(\theta)$ رلوکتانس سیستم از دید سیم پیچ استاتور که تابعی از موقعیت روتور (θ) می‌باشد.

$\mathcal{R}_r(\theta)$ رلوکتانس سیستم از دید سیم پیچ روتور که در حالت کلی تابعی از موقعیت روتور (θ) است و در

عمل آنرا ثابت فرض می‌کنیم.

• موتور با روتور استوانه‌ای

هنگامی که به جای روتور قطب برجسته، روتور استوانه‌ای (همانند شکل 3-28) بکار رود، شکاف هوایی بین

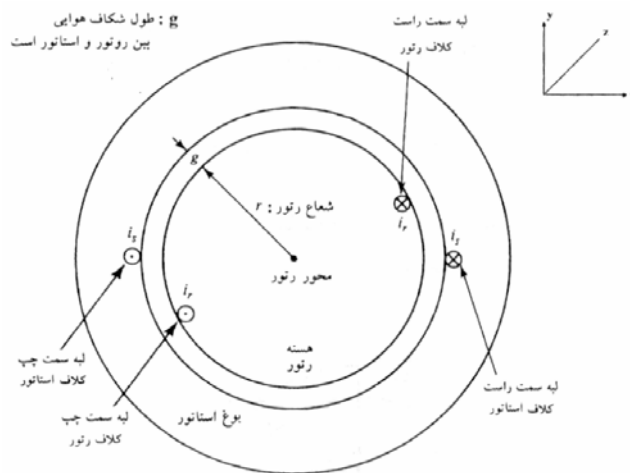
روتور و استاتور، علیرغم تغییر θ ، ثابت خواهد ماند. در نتیجه، $L_{11}(\theta)$ ، $\mathcal{R}_s(\theta)$ ، $L_{22}(\theta)$ مقادیر ثابتی

می‌شوند. به ویژه در مورد L_{11} و L_{22} می‌توان گفت که L_{2s} و L_{2r} صفر شده خواهیم داشت:

$$L_{11} = L_{0s}, \quad L_{22} = L_{0r} \quad (125-3)$$

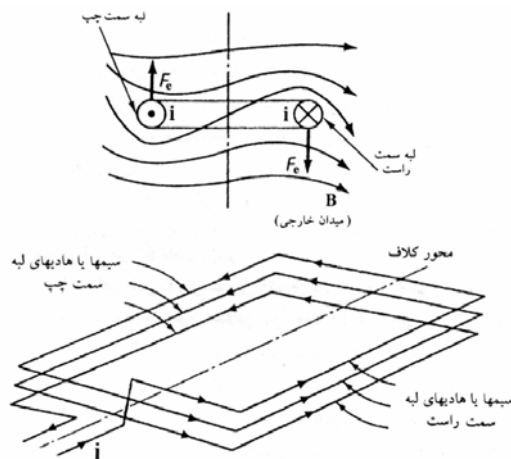
در این حالت T_R (و T_1) در رابطه‌های (3-122) و (3-123) صفر شده و T_e فقط یک جمله خواهد داشت:

$$T_e = -i_1 i_2 L_m \sin \theta = -T_M \sin \theta = T_2$$



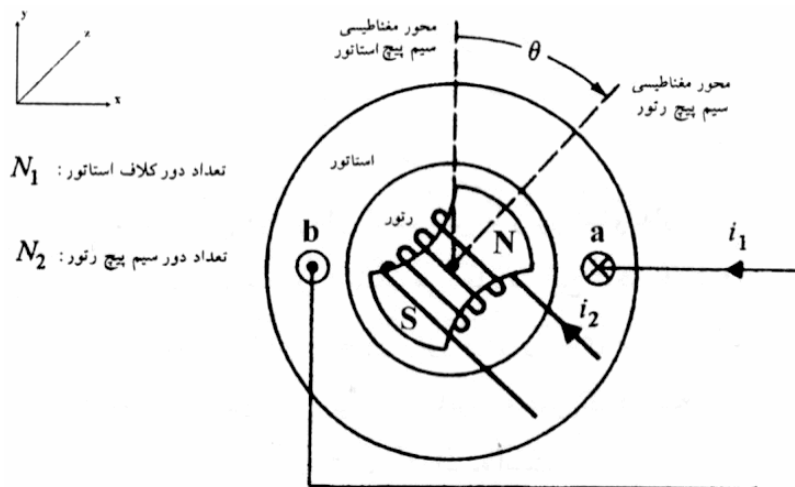
شکل (۳-۲۸) شمای کلی موتور الکتریکی با رتور استوانه‌ای

در شکل (۳-۲۹) نحوه ایجاد و اعمال گشتاور به قاب سیم‌پیچی رتور (یا استاتور) در میدان مغناطیسی حاصل از سیم‌پیچ دیگر (یا یک میدان مغناطیسی ثابت) نشان داده شده است.



شکل (۳-۲۹) پیدایش گشتاور در سیم‌پیچهای مستطیل شکل یک کلافه و چند کلافه

مثال - یک مبدل EM دو تحریکه با قطب برجسته مطابق شکل زیر مفروض است. ابتدا در مورد صحت تعریف محورهای مغناطیسی استاتور و رتور تحقیق کنید. سپس با ایده آل دانستن هسته‌های رتور و استاتور و در نظر گرفتن جریانهای تحریک زیر درباره گشتاور بدست آمده بحث کنید.



شکل (۳-۳۰) مبدل دو تحریکه قطب برجسته

جریان استاتور: $i_1 = I_{m_s} \cos \omega_s t$

جریان روتور: $i_2 = I_{m_r} \cos \omega_r t$

حل - با توجه به شکل می توان گفت که اندوکتانس خودی روتور تابعی از موقعیت مکانی آن (θ) نیست. (چرا؟) پس $L_{22} = L_{0_r}$ و $L_{2_r} = 0$ همچنین روابط (۳-۱۲۲) و (۳-۱۲۳) در اینجا معتبر است. یعنی داریم:

$$T_s = T_1 + T_2 = -T_R \sin 2\theta - T_M \sin \theta$$

$$T_R = i_1^2 L_{2_s} + i_2^2 L_{2_r} \quad T_M = i_1 i_2 L_M$$

با جایگزینی جریانهای فوق در این روابط و دانستن اینکه $\theta = \omega_m t + \theta_0$ (ω_m سرعت زاویه ای مکانیکی روتور است). چنین بدست خواهیم آورد:

$$T_1 = -\frac{I_{m_s}^2 L_{2_s}}{4} \{2 \sin(2\omega_m t + 2\theta_0) - \sin[2(\omega_m + \omega_s)t + 2\theta_0] - \sin[2(\omega_m - \omega_s)t + 2\theta_0]\}$$

که نشان می دهد T_1 (گشتاور رلوکتانسی) دارای ۳ مولفه سینوسی با متوسط صفر است. همچنین در مورد T_2 چهار مولفه سینوسی با متوسط صفر بدست می آید:

$$T_2 = -\frac{I_{m_s} I_{m_r} L_M}{4} \{ \sin[(\omega_m + \omega_s - \omega_r)t + \theta_0] + \sin[(\omega_m - \omega_s + \omega_r)t + \theta_0] \\ - \sin[(\omega_m + \omega_s + \omega_r)t + \theta_0] - \sin[(\omega_m - \omega_s - \omega_r)t + \theta_0] \}$$

دیده می شود برای اینکه **گشتاور اولیه** دارای مقدار متوسط غیر صفر باشد باید:

$$\omega_m = \pm \omega_s \pm \omega_r$$

به عنوان مثال اگر $\omega_m = \omega_s - \omega_r$ باشد:

$$T_{2_{av}} = \frac{-I_{m_s} I_{m_r} L_M}{4} \sin \theta_0$$

و اگر $\omega_m = \omega_s + \omega_r$ باشد:

$$T_{2_{av}} = \frac{I_{m_s} I_{m_r} L_M}{4} \sin \theta_0$$

در مورد **گشتاور رلوکتانسی** نیز همانطور که قبلاً گفته شد، شرط وجود متوسط غیر صفر، حرکت سنکرون روتور است. یعنی باید داشته باشیم:

$$\omega_m = \pm \omega_s$$

با جایگزینی این شرط، گشتاور رلوکتانسی متوسط بدست می آید:

$$T_{1_{av}} = \frac{I_{m_s}^2 L_{2_s}}{4} \sin 2\theta_0$$

فصل چهارم - اصول کار و ساختار کلی ماشینهای الکتریکی چرخان

Rotating Machines: Basic Concepts

۴-۱) مفاهیم اولیه

در فصل قبل دیدیم که مبدل‌های الکترومکانیکی عمدتاً از دو عضو، یکی ساکن و دیگری متحرک، هر دو شامل هسته‌های فرومغناطیسی، تشکیل شده‌اند و دو دسته عمده این مبدل‌ها یعنی مبدل‌های EM و مبدل‌های ME را شناختیم. همچنین گفتیم که مبدل‌های EM و ME با حرکت دائمی که هدف از ساخت و کاربرد آنها، تبدیل مداوم و پیوسته انرژی است، به ترتیب موتور و ژنراتور نامیده می‌شوند.

در همین جا تاکید می‌کنیم که اغلب موتورها و ژنراتورها از نوع چرخان (دوار) هستند. یعنی قسمت متحرک مبدل حرکت دورانی (چرخشی) دارد. این قسمت متحرک (چرخان) را روتور و بخش ساکن موتور یا ژنراتور، استاتور نامیده می‌شود. سرعت چرخش روتور معمولاً برحسب رادیان بر ثانیه و با نام ω_m (اندیس m به معنی مکانیکی) ارائه می‌شود.

ماشینهایی که در این فصل مطرح خواهد شد از نوع مبدل با دو تحریک هستند، یعنی پدیده تداخل، اصل حاکم بر عملکرد این ماشینها است. بنابراین دو میدان مغناطیسی در این سیستمها وجود دارد. این میدانها معمولاً توسط سیم‌پیچهایی که بر روی روتور و استاتور سوار هستند، ایجاد می‌شود. در حالت ژنراتوری، یکی از این سیم‌پیچها، میدان مغناطیسی اولیه (متغیر یا ثابت نسبت به زمان) را در فضای ماشین ایجاد می‌کند. حرکت نسبی بین استاتور و روتور باعث می‌شود که در سیم‌پیچ دوم و طبق قانون القای فارادی ولتاژ القا شود. به همین دلیل سیم‌پیچ اول را سیم‌پیچ تحریک و سیم‌پیچ دوم را سیم‌پیچ "آرمیچر" می‌نامند. در یک موتور الکتریکی گر چه در واقع، هر دو سیم‌پیچ از منبع تغذیه می‌شوند. اما به دلیل اینکه ساختار موتور و ژنراتور تفاوتی ندارند، همین تقسیم‌بندی برای سیم‌پیچها انجام می‌شود و یکی از آنها به عنوان ایجاد کننده میدان مغناطیسی و دیگری به عنوان سیم‌پیچی آرمیچر در نظر گرفته می‌شود.

بایستی توجه داشت که هر یک از سیم‌پیچهای تحریک و آرمیچر روی یکی از بخشهای ماشین (روتور و استاتور) قرار می‌گیرند. در صورتیکه سیم‌پیچ تحریک روی استاتور قرار گیرد (و در واقع سیم‌پیچ تحریک ساکن باشد)، قطبهای ایجاد شده توسط این سیم‌پیچ روی استاتور تعریف شده و به قطبهای استاتور یا قطبهای تحریک موسوم هستند. در این صورت سیم‌پیچ القا شونده (آرمیچر) روی روتور واقع شده و به روتور، آرمیچر نیز گفته می‌شود.

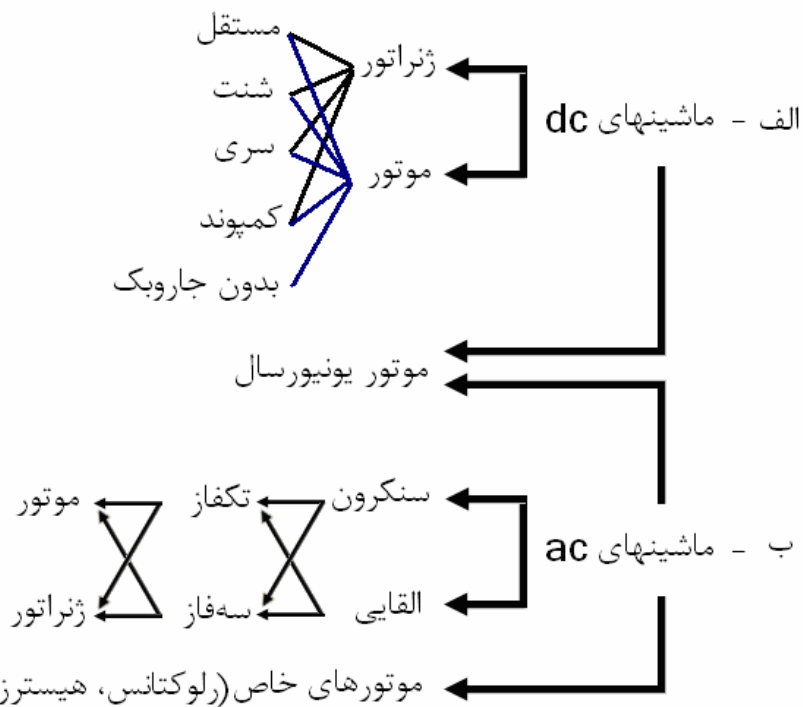
بدیهی است حالت معکوس این نوع ماشین نیز وجود دارد، یعنی حالتی که سیم‌پیچ تحریک روی روتور سوار شده و سیم‌پیچ آرمیچر در استاتور جاسازی شده باشد. یادآوری می‌شود که در برخی از ماشینهای کوچک میدان تحریک توسط آهنربای دائمی فراهم می‌شود. موتورهای کوچک جریان مستقیم عموماً از این نوع هستند و آهنربای دائم در استاتور آنها نصب شده است. موتورهای جریان متناوب با آهنربای دائم نیز در توانهای کوچک ساخته شده و کاربرد دارند.

سیم‌پیچهای تحریک به دو صورت قرقره‌ای و یا کلافی طراحی و ساخته می‌شوند. قرقره‌ها بر روی قطبهای برجسته (هسته‌های آهنی داخل قرقره) سوار می‌شوند. اما سیم‌پیچهای کلافی در شیارهای هسته آهنی جاسازی شده و با سری/موازی شدن آنها، یک سیم‌پیچ کلی تحریک بدست می‌آید. مدار تحریک می‌تواند دو قطبی (شامل یک قطب N و یک قطب S) یا چهار قطبی و یا بیشتر باشد. ماشینهای الکتریکی اکثراً دو قطبی یا چهار قطبی هستند و ماشینهای با تعداد قطب بیشتر برای مصارف ویژه صنعتی که سرعت موتور بایستی بسیار کم باشد، ساخته می‌شوند.

سیم‌پیچهای آرمیچر عموماً به صورت کلافی هستند. هر کلاف یک قاب مستطیلی با تعداد دور معینی سیم عایق‌دار است که در شیارهای روتور یا استاتور جاسازی می‌شود. با اتصال سرهای این کلافها به طریق مقتضی سیم‌پیچ آرمیچر با توزیع یکنواخت یا سینوسی، تکفاز یا سه‌فاز و ... ساخته می‌شود.

هسته‌های آهنی روتور و استاتور از ماده مغناطیسی مورق تشکیل شده و یکپارچگی هسته توسط پیچ یا پرچ تامین می‌گردد. سیم‌پیچها بایستی در داخل شیارها کاملاً جاسازی شده و امکان هیچگونه حرکت نسبی بین لبه کلاف و شیار هسته وجود نداشته باشد.

مرسوم‌ترین طبقه‌بندی ماشینهای الکتریکی دوار به شرح ذیل است.

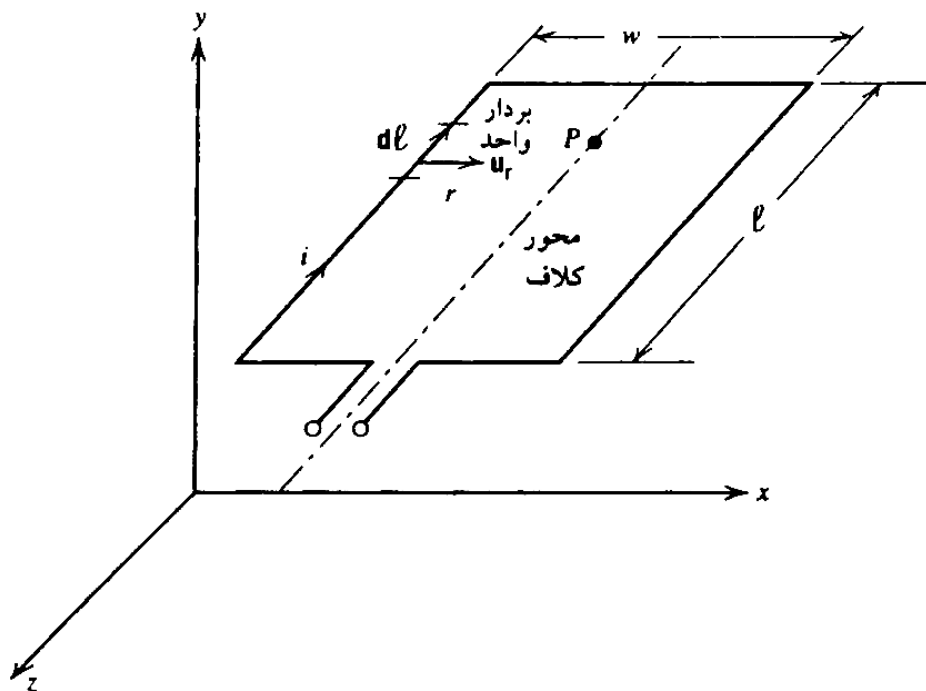


البته ژنراتور القایی در حال حاضر کاربرد گسترده‌ای ندارد و در عوض موتورهای القایی تکفاز و سه‌فاز از جمله پرکاربردترین موتورهای صنعتی هستند. در بخشهای بعدی این فصل کلیات ساختاری و عملکردی این ماشینها را بررسی خواهیم نمود. اما آنچه که از هم اکنون می‌توان پیش‌بینی نمود این است که اصول حاکم بر عملکرد این مبدلها یکسان بوده و تفاوت‌ها به نحوه کاربردی کردن این اصول مربوط می‌شود. به عنوان مثال، خواهیم دید که در اغلب انواع موتورهای الکتریکی، گشتاور مکانیکی از آنجا ناشی می‌شود که دو میدان مغناطیسی سعی می‌کنند نسبت به همدیگر ساکن بمانند. در موتورهای dc این دو میدان نسبت به فضا نیز ساکن هستند، اما در موتورهای ac با سرعت معینی در فضا در حال چرخش می‌باشند.

۲-۴) کاربرد قوانین الکترومغناطیس در ماشینهای الکتریکی دوار

اصول حاکم بر مبدلهای الکترومکانیکی در فصل ۳ بطور مشروح بررسی گردید. در اینجا فقط کاربرد این قوانین در مورد یک کلاف (قاب مستطیل شکل) در حال چرخش را بررسی می‌کنیم. در واقع این المان، بخش اصلی سیم‌پیچی روتور یک ماشین الکتریکی است.

❖ در حالت اول فرض می‌کنیم از سیم‌پیچ روتور برای ایجاد میدان تحریک استفاده شده است:



شکل (۱-۴)

در شکل فوق یک کلاف تک دوری حامل جریان i نشان داده شده است که می‌تواند حول محور خود بچرخد. در این شکل شدت میدان در نقطه P به قرار زیر است.

$$\vec{H} = \oint \frac{i d\vec{l} \times \vec{u}_r}{4\pi r^2} \quad (1-4)$$

محاسبه انتگرال فوق مشکل است. اما اگر l (طول کلاف) بسیار بزرگتر از w (عرض کلاف) باشد، در این صورت مقدار \vec{H} در امتداد محور کلاف بر اساس قانون آمپر چنین می‌شود.

$$|\vec{H}| = \frac{i}{2\pi w} \quad (2-4)$$

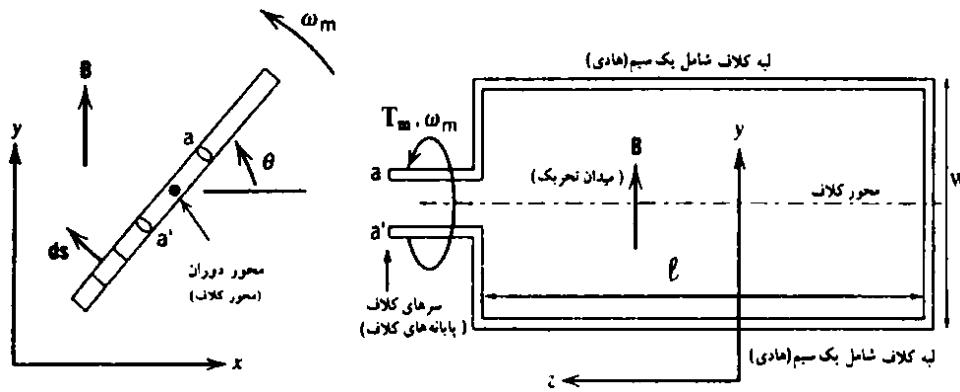
در این شرایط بردار \vec{H} در راستای محور y و جهت آن به سمت بخش منفی محور است و داریم:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \frac{-\mu i}{2\pi w} \vec{u}_y \quad (3-4)$$

μ پرمابیلیته محیطی است که کلاف در آن قرار دارد. \vec{u}_y بردار واحد محور y است.

بنابراین یک کلاف n دوری می‌تواند میدان مغناطیسی و شار n برابر مقدار فوق را در فضا ایجاد کند.

❖ در حالت دوم فرض می‌کنیم کلاف تک دوری مطابق شکل (۲-۴) درون یک میدان مغناطیسی ساکن با چگالی شار B با سرعت ω_m در حال چرخش باشد.



شکل (۲-۴)

طبق قانون القای فارادی ولتاژ القا شده در کلاف، که در پایانه‌های a' و a ظاهر می‌شود، چنین است:

$$e_{aa'} = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{Nd\phi}{dt} = \frac{d\phi}{dt} \quad (N=1) \quad (4-4)$$

در این رابطه ϕ شار گذر کرده از سطح کلاف بوده و از انتگرال سطحی زیر بدست می‌آید:

$$\phi = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (5-4)$$

اگر زاویه بین \vec{B} و $d\vec{s}$ را θ بنامیم:

$$\phi = \int B \cos \theta \cdot ds = Bwl \cos \theta \quad (6-4)$$

بدیهی است اگر کلاف در حال چرخش باشد θ تابعی از زمان بوده و داریم:

$$\theta = \omega_m t + \theta_0 \quad (7-4)$$

θ_0 موقعیت مکانی کلاف در لحظه $t=0$ است که اگر آنرا صفر فرض کنیم رابطه (۶-۴) به صورت زیر در

می‌آید:

$$\phi = Bwl \cos(\omega_m t) \quad (8-4)$$

و در نتیجه ولتاژ القایی بدست خواهد آمد:

$$e_{aa'} = Bwl\omega_m \cos(\omega_m t + 90^\circ) \quad (9-4)$$

$e_{aa'}$ را نیروی محرکه الکتریکی (emf) کلاف می‌نامند. اگر یک مقاومت R به دو سر a' و a وصل شود

جریانی را در مقاومت برقرار خواهد ساخت:

$$i = \frac{e_{aa'}}{R} \quad (10-4)$$

در این شرایط توان الکتریکی تحویل شده به بار برابر است با:

$$P_e = ie_{aa'} = Ri^2 \quad (11-4)$$

این انرژی از چرخش کلاف حاصل شده و تا زمانی که این چرخش ادامه یابد تحویل انرژی به بار نیز ادامه

خواهد یافت. توان مکانیکی لازم برای چرخش کلاف عبارتست از:

$$P_m = T_m \cdot \omega_m \quad (12-4)$$

T_m : گشتاور مکانیکی اعمال شده به محور کلاف و ω_m سرعت دوران کلاف است. اگر سیستم تبدیل ایده‌آل

(بدون تلف) باشد، خواهیم داشت:

$$P_e = P_m \Rightarrow T_m \cdot \omega_m = ie_{aa'} \quad (13-4)$$

عبور جریان از داخل سیم پیچ آرمیچر باعث می شود که گشتاوری بین میدان تحریک و کلافهای آرمیچر ایجاد شود (T_e) که با حرکت چرخشی کلاف مقابله می کند. در واقع هرگاه گشتاور مکانیکی محرک (T_m) با این گشتاور مقاوم مساوی باشد سرعت چرخش کلاف در ω_m ثابت می ماند و چون T_e با جریان بار متناسب است. بنابراین با افزایش جریان بار بایستی گشتاور مکانیکی محرک افزایش یابد تا فرآیند تبدیل انرژی ادامه پیدا کند.

❖ در حالت سوم فرض کنیم کلاف شکل (۴-۲) توسط یک منبع ولتاژ الکتریکی تغذیه شود در این صورت جریان i از هادیهای موجود در لبه های کلاف بگذرد. عبور این جریان یک میدان مغناطیسی جدید را (علاوه بر میدان تحریک) در اطراف هادیهای مزبور ایجاد می کند و بنابر اصل تداخل (فصل سوم) گشتاور T_e بین دو میدان ایجاد می گردد تا دو میدان را همراهی کند. اگر میدان تحریک با سرعت ω_m در فضا در حال دوران باشد، کلاف نیز با سرعت ω_m دوران پیدا خواهد کرد (یک نوع حالت موتوری) در حالت ایده آل گشتاور بین دو میدان عیناً به محور روتور منتقل شده و گشتاور مکانیکی ایجاد می کند و این گشتاور به بار مکانیکی متصل به روتور وارد می شود:

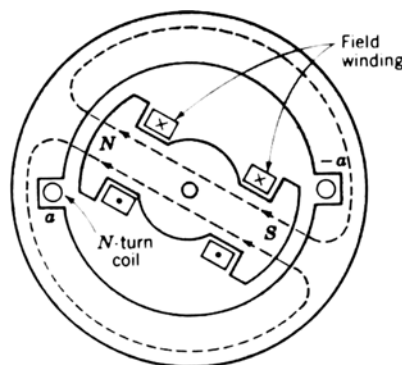
$$T_e = T_m, T_m = T_L \quad (4-14)$$

لازم به ذکر است که در حالت موتوری نیز ولتاژی در کلاف القا می شود که ناشی از چرخش آن در میدان مغناطیسی تحریک می باشد و به آن نیروی ضد محرکه الکتریکی (cemf) یا ولتاژ القایی ضد محرکه گفته می شود.

۴-۳) معرفی ماشینهای ac و dc

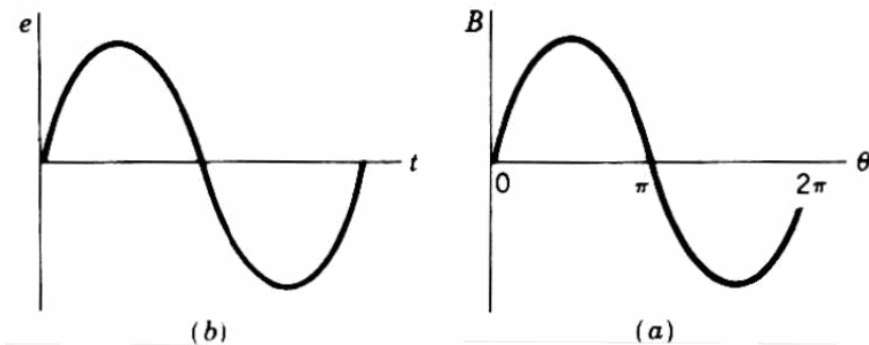
الف - ماشین سنکرون مقدماتی

دیدگاه مقدماتی در مورد عملکرد ژنراتور را می توان با بحث در مورد ولتاژ القا شده در آرمیچر ژنراتور سنکرون بسیار ساده شده شکل (۴-۳)، بدست آورد. بجز در موارد استثنایی، سیم پیچ آرمیچر یک ماشین سنکرون بر روی استاتور و سیم پیچ میدان بر روی روتور قرار می گیرد. سیم پیچ میدان توسط جریان مستقیم تغذیه می شود. این جریان از طریق جاروبکهای ذغالی که روی حلقه های لغزنده (Slip rings) قرار دارند، به پیچک می رسد. در واقع، به دلایل ساختاری ترجیح داده می شود که سیم پیچ توان کم میدان روی روتور قرار گیرد. سیم پیچ آرمیچر شامل یک پیچک N دوری است که در شیارهای باریک قطری واقع در استاتور، قرار گرفته اند. (مقطع این پیچک در شکل با a و $-a$ مشخص شده است. هادیهای تشکیل دهنده این پیچک بصورت موازی با محور ماشین قرار گرفته و بخشی از کویل که در دو سر استاتور قرار گرفته در شکل نشان داده نمی شود. هادیهای قرار گرفته در شیار با هم سری شده اند. برای عملکرد ژنراتوری ماشین فوق، روتور توسط یک منبع توان مکانیکی متصل به شفت با یک سرعت ثابت چرخانده می شود. مسیر شار توسط خطوط شکسته نشان داده شده است.



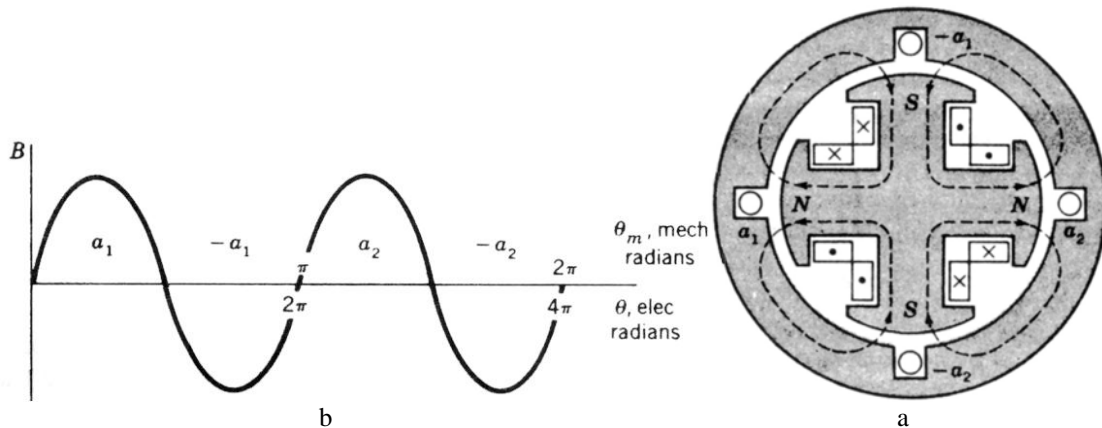
شکل (۴-۳)

توزیع مکانی چگالی شار B در فاصله هوایی در شکل (۴-۴-۱) بصورت تابعی از زاویه θ در اطراف فاصله هوایی نشان داده شده است. در صورتیکه سطوح قطبها به طور مقتضی شکل داده شده باشند می توان توزیع چگالی شار در فاصله هوایی را با یک سینوسی تقریب کرد. هنگامی که روتور می چرخد، شکل موج شار، توسط هادیهای a و -a روی پیچک استاتور جاروب می شود. ولتاژ القا شده در این پیچک یک تابع زمانی است که شکل آن همانند شکل موج توزیع مکانی چگالی شار B است.



شکل (۴-۴-۱) a: توزیع چگالی شار در فضای فاصله هوایی b: شکل موج متناظر ولتاژ القا شده

ولتاژ القا شده طی یک دوره گردش روتور، یک سیکل کامل را طی می کند. فرکانس آن بر حسب هرتز برابر با سرعت روتور بر حسب دور بر ثانیه است. به عبارت دیگر فرکانس الکتریکی با سرعت مکانیکی سنکرون است. بنابراین یک ماشین سنکرون دو قطب باید با سرعت 3000rpm بچرخد تا ولتاژی با فرکانس 50Hz تولید نماید. بسیاری از ماشینهای سنکرون بیش از دو قطب دارند. در شکل (۴-۵-۱) یک نمونه ابتدایی ماشین سنکرون ۴ قطب تکفاز را نشان می دهد. پیچکهای میدان به گونه ای بهم وصل شده اند که قطبهای مجاور دارای پلاریته مخالف باشند. بنابراین همانطور که در شکل (۴-۵-۲) دیده می شود شکل موج چگالی شار در فضای فاصله هوایی از دو سیکل کامل تشکیل می شود.



شکل (۴-۵-۱) a: زراتور سنکرون تکفاز ۴ قطب b: شکل موج توزیع چگالی شار در یک دور از فاصله هوایی

در اینجا سیم پیچ آرمیچر نیز از دو کویل ($a_1, -a_1$ و $a_2, -a_2$) تشکیل شده است که با هم سری می شوند. عرض هر کویل معادل $1/2$ طول موج شار است. در این حالت ولتاژ القا شده به ازای هر یک دور روتور دارای دو سیکل کامل خواهد بود. بنابراین فرکانس ولتاژ القایی دو برابر سرعت چرخش روتور می باشد.

هنگامی که ماشین بیش از یک زوج قطب دارد، راحت تر است که فقط یک جفت قطب آنرا در نظر بگیریم. چرا که شرایط الکتریکی، مغناطیسی و مکانیکی مربوط به سایر زوج قطبها نیز تکرار وضعیت زوج قطب مورد نظر

می‌باشد. در این حالت زوایا نیز بر حسب رادیان یا درجه الکتریکی بیان می‌شوند. هر زوج قطب از یک ماشین P قطب یا هر سیکل از منحنی توزیع شار، معادل ۳۶۰ درجه الکتریکی یا 2π رادیان الکتریکی است. از آنجا که در یک چرخش کامل روتور به تعداد $P/2$ سیکل کامل وجود خواهد داشت، بنابراین با فرض اینکه θ زاویه الکتریکی و θ_m زاویه مکانیکی باشد، می‌توان گفت:

$$\theta = \frac{P}{2} \theta_m \quad (۴-۱۵)$$

ولتاژ القا شده در هادیهای آرمیچر نیز پس از عبور هر زوج قطب یک سیکل کامل را طی خواهد کرد و بنابراین فرکانس ولتاژ القا شده برابر خواهد بود:

$$f = \frac{P}{2} \frac{n}{60} \text{ Hz} \quad (۴-۱۶)$$

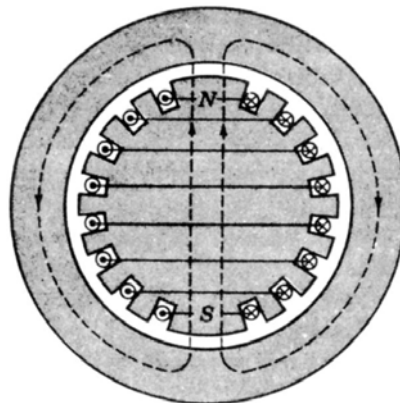
n سرعت روتور بر حسب دور در دقیقه است و اگر ω_m را سرعت زاویه‌ای (مکانیکی) روتور بدانیم می‌توان

نوشت:

$$\omega = \frac{P}{2} \omega_m \quad (۴-۱۷)$$

که ω فرکانس زاویه‌ای ولتاژ القا شده در هادیهای آرمیچر است.

روتورهایی که در شکل‌های قبل دیدیم، روتورهای قطب برجسته با سیم‌پیچ‌های متمرکز بودند. در شکل (۴-۶) یک روتور استوانه‌ای (یا غیر برجسته) دیده می‌شود. سیم‌پیچ میدان یک سیم‌پیچ توزیع شده (گسترده) است که در شیارهای روتور جاسازی شده و طوری مرتب شده که بتواند بطور تقریبی یک میدان سینوسی دو قطبی را ایجاد نماید.

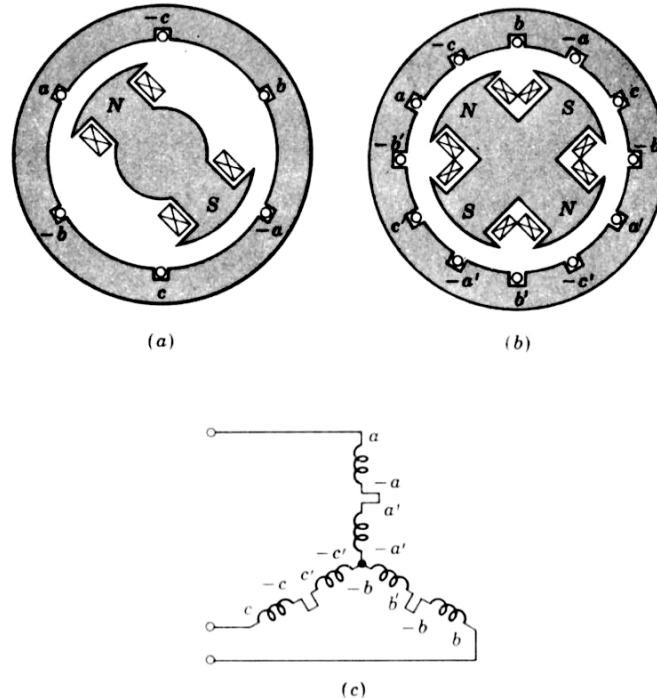


شکل (۴-۶) سیم‌پیچ میدان در یک روتور دو قطبی استوانه‌ای

انتخاب روتور قطب برجسته یا استوانه‌ای بستگی به کاربرد ژنراتور دارد. هنگامی که ژنراتور سنکرون در نیروگاه آبی بکار می‌رود، بدلیل سرعت کم چرخش توربین آبی، برای ایجاد فرکانس لازم می‌بایستی تعداد قطب‌های روتور افزایش یابد. این کار با استفاده از روتورهای قطب برجسته امکان‌پذیر است. در طرف دیگر توربین‌های بخاری و گازی قرار دارند که با سرعت بالایی می‌چرخند و روتورهای مرسوم این ژنراتور ۲ یا ۴ قطب استوانه‌ای هستند.

بدلیل مزایای سیستم سه‌فاز در تولید، انتقال و مصرف (بوئژه بارهای بزرگ)، اغلب ژنراتورهای سنکرون سه‌فاز هستند. برای تولید یک مجموعه ولتاژ سه‌فاز که نسبت به یکدیگر به اندازه ۱۲۰ درجه الکتریکی در زمان اختلاف دارند، حداقل ۳ پیچک که- درمکان- به اندازه ۱۲۰ درجه الکتریکی نسبت به هم دیگر فاصله دارند، مورد نیاز می‌باشد. یک ماشین مقدماتی ۳ فاز دو قطب با یک پیچک در هر فاز، در شکل (۴-۷-a) دیده می‌شود، سه فاز با حروف a, b و c مشخص شده‌اند. برای یک ماشین مقدماتی ۴ قطبی، حداقل ۲ مجموعه از چنین پیچک‌هایی مورد نیاز

می‌باشد. (شکل (۴-۷-b)) طبقاً در یک ماشین P قطب، از این مجموعه باید بکارگیری شود. هر دو سیم پیچ مربوط به هر فاز در شکل (۴-۷-b) با هم سری شده‌اند و بنابراین ولتاژهای آنها با هم جمع می‌شوند. پیچکهای سه فاز می‌توانند بصورت Y یا Δ به هم وصل شوند. شکل (۴-۷-c) نشان می‌دهد که برای تشکیل یک اتصال Y پیچکها چگونه بایستی بهم وصل شوند.



شکل (۴-۷) ژنراتور مقدماتی ۳ فاز a: دو قطب b: ۴ قطب c: اتصال ستاره سیم پیچها

هنگامی که ژنراتور سنکرون توان الکتریکی را به باری تحویل می‌دهد، جریان آرمیچر یک مولفه شار را در فاصله هوایی ایجاد می‌کند که با سرعت سنکرون می‌چرخد (در بخش ۴-۶ توضیح داده خواهد شد). این شار با شار میدان تحریک تعامل داشته و یک گشتاور الکترومکانیکی تولید می‌شود که در جهت هم راستا کردن دو میدان مغناطیسی مذکور است. در ژنراتور، این گشتاور در جهت مخالف چرخش روتور ایجاد می‌شود و باید گشتاور مکانیکی توسط محرک اولیه به روتور وارد شود تا چرخش روتور ادامه یابد. این گشتاور الکترومغناطیسی، عاملی است که به واسطه آن ژنراتور سنکرون انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نماید.

موتور سنکرون نیز از نظر ساختاری، همانند ژنراتور سنکرون است. سیم پیچ آرمیچر (معمولاً استاتور) با یک منبع ac تغذیه می‌شود و تحریک dc نیز به سیم پیچ روتور اعمال می‌گردد. میدان مغناطیسی حاصل از جریان آرمیچر با سرعت سنکرون می‌چرخد. به منظور ایجاد یک گشتاور الکترومغناطیسی ثابت، میدانهای مغناطیسی استاتور و روتور باید دارای دامنه ثابت بوده و نسبت بهم نیز ساکن باشند. در یک موتور سنکرون، سرعت حالت دائمی (پایدار) از روی تعداد قطبها و فرکانس جریان آرمیچر تعیین می‌شود. روابط دقیقاً همانند روابطی است که برای ژنراتور سنکرون بدست آمد (روابط ۴-۱۵ و ۴-۱۷). بنابراین یک موتور سنکرون که با منبع ac با فرکانس ثابت تغذیه می‌شود بایستی در حالت پایدار دارای یک سرعت ثابت و معین باشد.

در یک موتور، بر خلاف ژنراتور، گشتاور الکترومغناطیسی هم راستا با چرخش است و با گشتاور مقاوم که ناشی از حرکت بار مکانیکی است، در حالت تعادل قرار دارد. میدان حاصل از جریان آرمیچر جلوتر از میدان روتور می‌چرخد و روتور را به دنبال خود می‌کشد و بنابراین کار (مکانیکی) انجام می‌دهد. این وضعیت در ژنراتور سنکرون معکوس است.

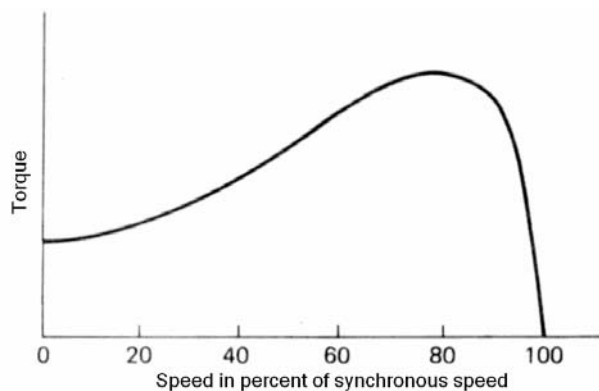
در آنجا روتور کار انجام می‌دهد و میدان آن، میدان استاتور را که پشت سر آن قرار گرفته با خود می‌کشد. بطور خلاصه هم در ژنراتور و هم در موتور سنکرون یک گشتاور الکترومکانیکی و یک ولتاژ چرخشی تولید می‌شود.

ب- ماشین القایی مقدماتی

نوع دوم ماشینهای ac، ماشین القایی است. در این ماشین، از سیم‌پیچهای روتور و استاتور جریان متناوب عبور می‌کند. مرسوم‌ترین نمونه، **موتور القایی** است که در آن یک منبع جریان متناوب، بطور مستقیم استاتور و از طریق القا (یا اثر ترانسفورمری) روتور را تغذیه می‌نماید. موتور القایی را می‌توان یک نمونه کلی از ترانسفورمر در نظر گرفت که در آن انرژی الکتریکی بین روتور و استاتور با یک تغییر در فرکانس و یک روند توان مکانیکی، مبادله می‌شود. موتور القایی پرکاربردترین موتور است. اما در عوض ژنراتور القایی به دلیل اینکه برای اغلب کاربردها مشخصه قابل قبولی ندارد، توسعه چندانی نیافته است. ماشین القایی را به عنوان مبدل فرکانس نیز می‌توان بکار برد.

سیم‌پیچ استاتور موتور القایی در اساس تفاوتی با استاتور ماشین سنکرون ندارد. اما سیم‌پیچ روتور آن اتصال کوتاه شده و اغلب به بیرون ارتباطی ندارد. در اثر عملکرد ترانسفورمری سیم‌پیچ استاتور، در این سیم‌پیچ جریان القا می‌شود. در برخی از موتورهای القایی سیم‌پیچ روتور، در واقع میله‌های آلومینیومی هستند که در شیارهای روتور ریخته‌گری شده‌اند و از طریق حلقه‌های آلومینیومی ریخته‌گری شده در بالا و پائین روتور به هم اتصال کوتاه شده و در حقیقت یک قفس استوانه‌ای را تشکیل می‌دهند (موتور القایی قفس سنجایی). این موتور دارای ساختار ساده و ارزان و قابلیت اطمینان بالا است که باعث شده کاربرد بسیار گسترده‌ای پیدا نماید.

همانند یک موتور سنکرون، میدان حاصل از آرمیچر جلوتر از میدان روتور و هر دو با سرعت سنکرون در حال چرخش هستند و میزان گشتاور تولیدی به فاصله نسبی بین این دو میدان مربوط می‌شود. اما تفاوت عمده در این حالت این است که برخلاف ماشین سنکرون، روتور موتور القایی با سرعت سنکرون نمی‌چرخد! در واقع تفاوت سرعت چرخش روتور با سرعت سنکرون است که باعث می‌شود شار چرخشی آرمیچر در روتور ولتاژ و جریان القا نماید تا نهایتاً گشتاور ایجاد شود. یک موتور القایی در سرعتی که اندکی کمتر از سرعت سنکرون است کار می‌کند. یک مشخصه نمونه گشتاور سرعت موتور القایی در شکل (۸-۴) نشان داده شده است.

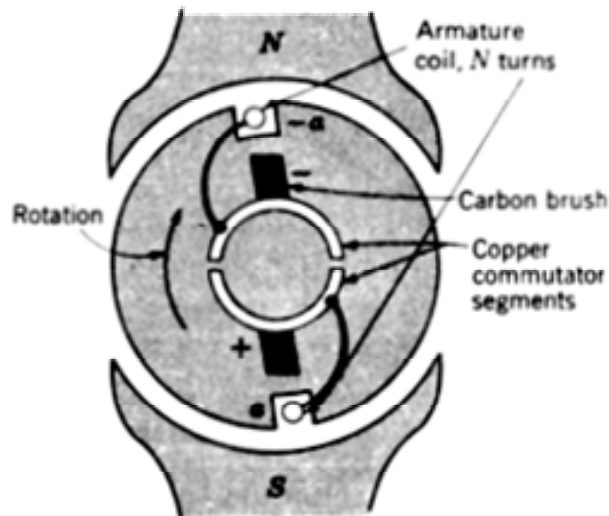


شکل (۸-۴) مشخصه نمونه گشتاور سرعت یک موتور القایی

ج - ماشین dc مقدماتی

سیم‌پیچ آرمیچر یک ماشین dc روی روتور آن قرار دارد و جریان توسط جاروبکهای کربنی به آن هدایت می‌شود. سیم‌پیچ میدان روی استاتور نصب شده و با جریان مستقیم تحریک می‌گردد. یک ژنراتور dc دو قطب بسیار

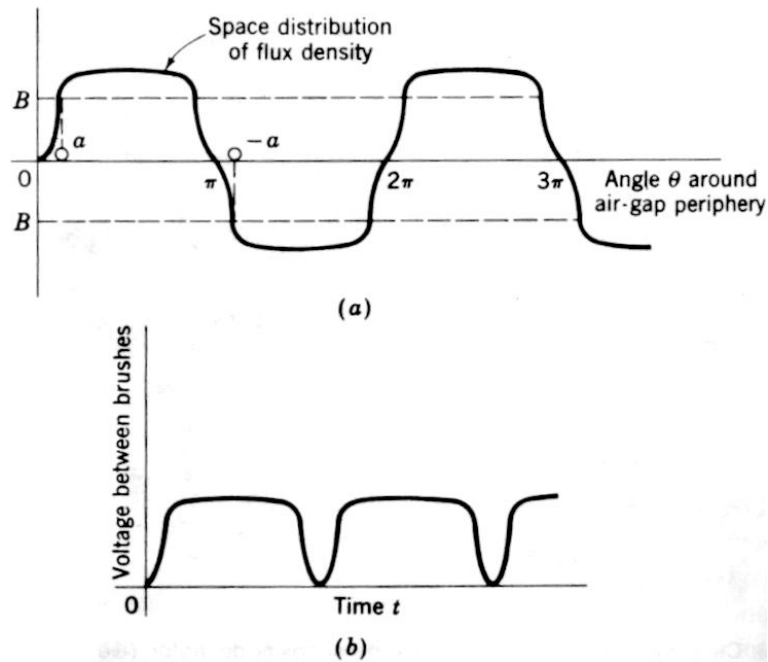
ابتدایی در شکل (۹-۴) ارائه شده است. سیم پیچ آرمیچر متشکل از یک پیچک N دوری، که در شیارهای دو طرف روتور قرار گرفته است. با مقاطع a و $-a$ دیده می شود.



شکل (۹-۴) ماشین dc مقدماتی با کموتاتور

هادیهای آرمیچر موازی با محور روتور هستند. روتور، توسط یک منبع توان مکانیکی که به محور آن نیرو وارد می کند با سرعت ثابت می چرخد. توزیع شار در فاصله هوایی در اینجا، معمولاً با یک موج مربعی (به جای موج سینوسی) تقریب می شود. همانطور که در شکل (۴-۱۰-a) می بینید چرخش پیچک آرمیچر باعث می شود که ولتاژ متغیر با زمان در آن القا شود که شکل آن در حوزه زمان همانند شکل موج توزیع شار در فاصله هوایی است (چرا؟). بنابراین برای ایجاد یک ولتاژ مستقیم بایستی ولتاژ القا شده در یک پیچک منفرد آرمیچر، به طریقه مناسب یکسو شود. یکسوسازی را می توان خارج از ژنراتور انجام داد (مثلاً توسط یکسوکننده های نیمه هادی) که در این صورت ماشین، یک ژنراتور ac خواهد بود. در ماشینهای سنتی و مرسوم dc، یکسوسازی با روش مکانیکی و بوسیله کموتاتور انجام می شود. کموتاتور، یک استوانه ساخته شده از قطعات مسی است که با قطعات میکا از همدیگر عایق شده اند و روی شفت روتور جاسازی می شود و نسبت به روتور نیز عایق است. هر یک از سرهای پیچک روتور به یکی از این قطعات مسی وصل می شود. جاروبکهای ذغالی ساکن بر روی سطح کموتاتور فشرده شده و ارتباط الکتریکی سیم پیچ آرمیچر را به ترمینالهای ساکن فراهم می کنند. در واقع نیاز به کموتاسیون است که باعث می شود سیم پیچهای آرمیچر ژنراتور (ماشین) dc را روی روتور آن قرار دهند.

چنانچه در شکل (۴-۱۰) دیده می شود کموتاتور در هر لحظه از زمان لبه ای از پیچک را که در زیر قطب S واقع است به جاروبک مثبت اتصال می دهد و لبه دیگر را که زیر قطب N قرار گرفته به جاروبک منفی وصل می کند. بنابراین کموتاتور یکسوسازی تمام موج را بر روی ولتاژ القایی انجام و شکل موج ولتاژی همانند شکل (۴-۱۰-b) را به ترمینالهای ژنراتور تحویل می دهد.



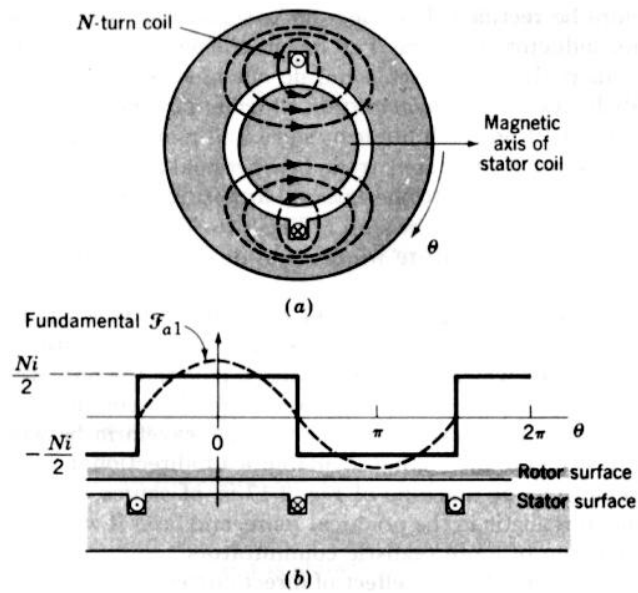
شکل (۴-۱۰) a: توزیع فضایی چگالی شار در یک ماشین dc مقدماتی b: شکل موج ولتاژ بین جاروبکها

دیده می‌شود که وظیفه سیستم تحریک ایجاد یک میدان مغناطیسی ساکن (نسبت به استاتور) است. اثر کموتاتور نیز به گونه‌ای است که اگر جریان مستقیم بین جاروبکها برقرار شود، آرمیچر میدان مغناطیسی (توزیع شار) ساکنی در فضا ایجاد نماید که محور آن توسط طراحی ماشین و موقعیت ذغالها معین می‌شود. این میدان، عموماً نسبت به میدان تحریک متعامد است. دقیقاً همانطور که در مورد ماشینهای ac گفته شد، تعامل بین این دو میدان (یا دو توزیع شار) است که گشتاور در ماشین dc را تولید می‌کند. اگر ماشین به صورت یک ژنراتور کار کند، این گشتاور با حرکت مخالف می‌کند و اگر موتور باشد، گشتاور الکترومغناطیسی با حرکت روتور همراستا می‌باشد.

۴-۴ MMF سیم پیچ‌های گسترده (توزیع شده)

در ماشینهای واقعی بر روی سطح بیرونی روتور و استاتور (در مجاورت فاصله هوایی) تعداد زیادی شیار وجود دارد که سیم پیچهای آرمیچر درون آنها قرار می‌گیرند. این سیم پیچها از تعداد زیادی پیچک تشکیل می‌شوند. پیچکهای مزبور به گونه‌ای به هم متصل می‌شوند که یک میدان مغناطیسی متناظر با میدان تحریک (و به همان تعداد قطب) ایجاد گردد. به این نوع سیم پیچ، سیم پیچ گسترده گفته می‌شود.

هرگاه فاصله بین دو بازوی یک پیچک (یا فاصله دو شیار) که پیچک در آنها قرار می‌گیرد) برابر با 180° درجه الکتریکی باشد به آن پیچک گام کامل می‌گویند. مطالعه میدان مغناطیسی سیم پیچ گسترده را می‌توان با مطالعه یک پیچک گام کامل آغاز نمود. این پیچک در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است. با فرض ایده‌آل بودن هسته روتور و استاتور، تمام رلوکتانس مدار مغناطیسی در فاصله‌های هوایی متمرکز شده است. مقدار H در هر θ زیر یک قطب، با مقدار آن در $\theta + \pi$ ، زیر قطب دیگر، برابر است. θ زاویه‌ای است که موقعیت مکانی نسبت به محور پیچک استاتور را نشان می‌دهد. در شکل (۴-۱۱-ب) نمای گسترده (باز شده) ماشین و توزیع H در فاصله هوایی ارائه شده است.



شکل (۴-۱۱) mmf حاصل از یک کلاف

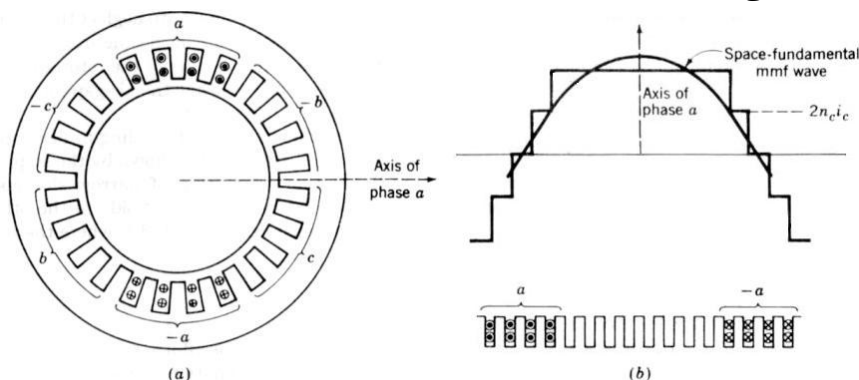
همانطور که دیده می‌شود mmf دارای یک شکل موج پله‌ای (مربعی) و متقارن است که می‌توان طبق تبدیل فوریه برای آن یک مولفه سینوسی اصلی (مبنا) در نظر گرفت.

الف - ماشینهای ac

در طراحی ماشینهای ac تلاش می‌شود سیم‌بندی استاتور طوری جاسازی شود که یک توزیع سینوسی mmf با تقریب مناسب در فاصله هوایی ایجاد گردد. اگر mmf حاصل از تک کلاف گام کامل شکل ۱۱ را به سری فوریه تجزیه کنیم مولفه اصلی عبارت خواهد بود از:

$$F_{a1} = \frac{4 Ni}{\pi} \cos \theta, \quad F_{a_{peak}} = \frac{4 Ni}{\pi} \quad (4-18)$$

حال اگر چند کلاف از این نوع در شیارهای استاتور جاسازی شده باشند هر کدام دارای یک موج مربعی mmf خواهند بود که در فضا نسبت به هم جابجا شده و اثر آنها با هم جمع می‌شود. همچنین مولفه اول هر کدام از آنها چنین وضعی را دارند. در شکل (۴-۱۲) این مسئله در مورد فاز a از یک ماشین ۳ فازه که در هر فاز دارای ۴ کلاف با گام کامل است، نشان داده می‌شود.



شکل (۴-۱۲) mmf یک فاز از ماشین ac دو قطب ۳ فاز با سیم‌پیچی گسترده گام کامل

از آنجا که پیک این مولفه‌ها نسبت به هم اختلاف فاز دارند، مولفه اصلی mmf برآیند از جمع مولفه‌های اصلی mmf کلافها کمتر است. بنابراین رابطه (۴-۱۸) برای این نوع کلاف‌بندی قابل تصحیح است:

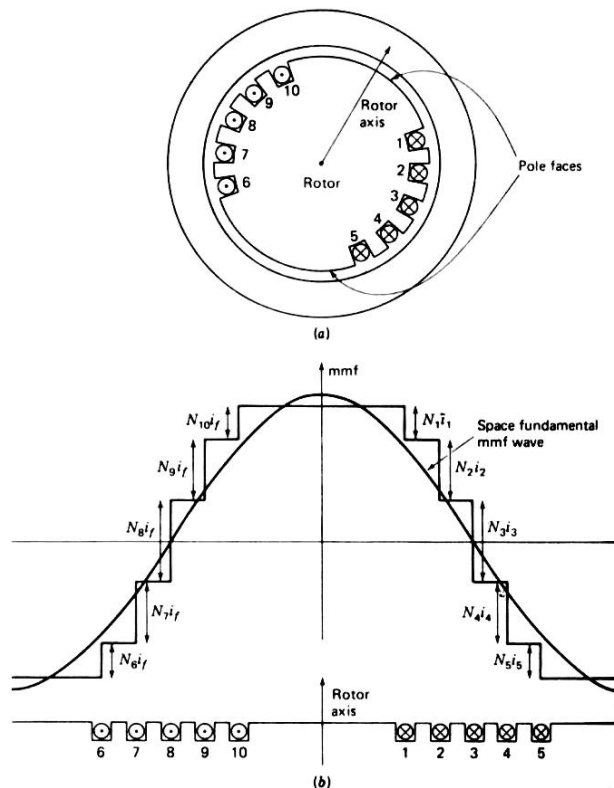
$$F_{a_1} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_{ph}}{P} i_a \cos \theta \quad (19-4)$$

P: تعداد قطبها، N_{ph} تعداد دور سیم پیچهای سری شده برای هر فاز، K_w ضریب سیم پیچی (تابعی از گام بندی پیچکها و تعداد پیچکها در هر فاز). بنابراین $K_w N_{ph}$ برای معادل سازی تمام کلافهای موجود در یک فاز و در نظر گرفتن یک کلاف معادل بکار می رود. یکی از راههای کاهش هارمونیکهای mmf (و تقریب هر چه بهتر یک mmf سینوسی)، علاوه بر استفاده از سیم پیچی توزیع شده، ناقص کردن گام کلافها است.

معادله (19-4) مولفه اصلی توزیع فضایی mmf را نشان می دهد. در واقع، در این رابطه در باره ثابت بودن i یا متغیر بودن آن نسبت به زمان صحبت نشده است. بنابراین mmf حاصله یک موج ایستا است که مقدار آن در هر نقطه محیطی فاصله هوایی با $\cos \theta$ نسبت دارد. حال اگر جریان i متغیر با زمان فرض شود mmf فاصله هوایی، علاوه بر مکان، تابع زمان نیز خواهد شد و پیک آن در راستای $\theta = 0$ و در لحظه ای که $i(t)$ بیشترین مقدار را دارد، ایجاد می شود. اگر فرض کنیم $i(t) = I_m \cos \omega t$ ماکزیمم زمانی mmf در نقطه $\theta = 0$ برابر خواهد شد با:

$$F_{\max} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_{ph}}{P} I_m \quad (20-4)$$

در مورد روتورهای استوانه ای نیز سیم پیچ گسترده بصورت کلافهای جاسازی شده در شیارهای روتور بکار می رود. این سیم پیچ نسبت به محور مغناطیسی روتور متقارن است. اما تعداد هادیها در شیارها و نیز فاصله شیارها لزوماً یکسان نیستند. همانطور که می توان حدس زد، این تمهیدات اضافی برای ایجاد یک mmf هر چه سینوسی تر (بدون هارمونیک) در فاصله هوایی، اندیشیده و بکار گرفته می شود. نمونه یک ژنراتور دو قطب با روتور استوانه ای در شکل (4-13) ارائه شده است.



شکل (4-13) mmf یک سیم پیچ توزیع شده روی روتور استوانه ای یک ژنراتور دو قطب

mmf یک روتور با سیم پیچ P قطبی با روشی همانند آنچه در مورد سیم پیچی استاتور گفته شد، بدست

می آید:

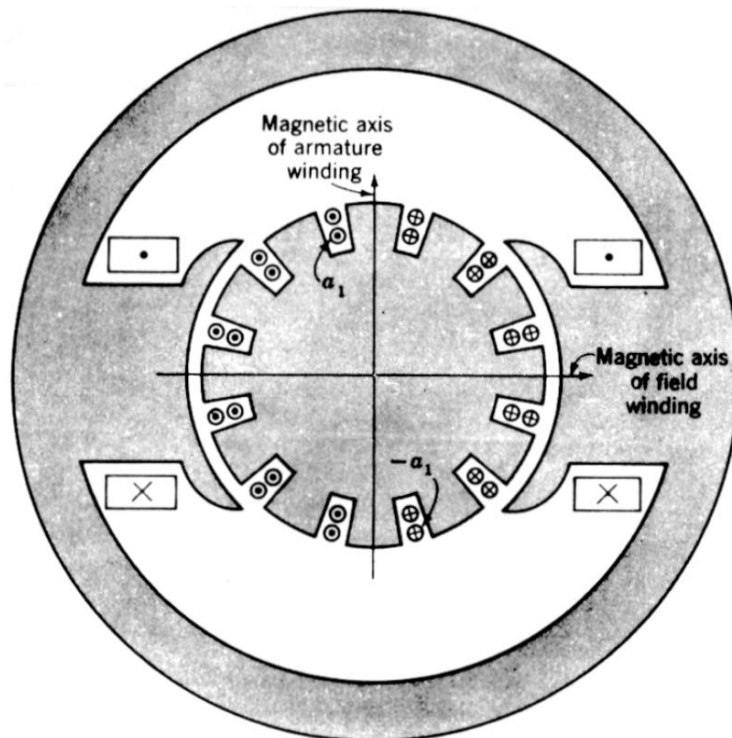
$$F_{r_1} = \frac{4}{\pi} K_r \frac{N_r}{P} I_r \cos \theta_r \quad (21-4)$$

در این رابطه K_r ضریب سیم‌پیچی روتور، N_r تعداد کل دورهای سیم‌پیچ روتور، I_r جریان سیم‌پیچ روتور و θ_r موقعیت نقطه نسبت به محور مغناطیسی روتور است. مقدار پیک این mmf نیز در $\theta_r = 0$ و برابر با:

$$F_{I_{r,peak}} = \frac{4}{\pi} K_r \frac{N_r}{P} I_r$$

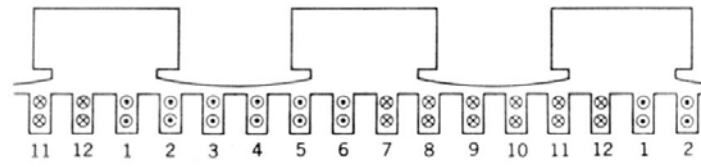
ب- ماشین dc

گفتیم که سیم‌بندی آرمیچر ماشین dc بر روی روتور قرار می‌گیرد و تغذیه آن (در حالت موتوری) و یا دریافت ولتاژ از آن (در حالت ژنراتوری) از طریق سیستمی به نام کموتاتور انجام می‌شود، محدودیتهای ناشی از کموتاتور بر روی سیم‌بندی آرمیچر به گونه‌ای است که mmf حاصله بیشتر به یک موج مثلثی شبیه است تا یک موج مربعی یا سینوسی. یک نمونه ساده آرمیچر ماشین dc دو قطبی در شکل (۴-۱۴) دیده می‌شود (در عمل تعداد شیارها بسیار بیشتر است).

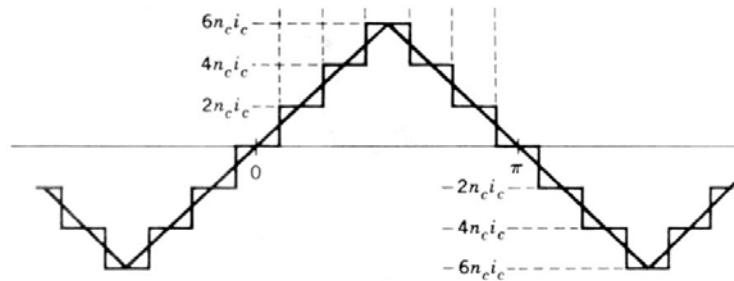


شکل (۴-۱۴) مقطع یک ماشین dc دو قطب

سیم‌پیچ گسترده آرمیچر یک میدان برآیند تولید می‌کند که محور آن بر محور مغناطیسی قطب‌های ماشین عمود است. با چرخش آرمیچر، اتصال کلافها به مدار بیرونی، توسط کموتاتور به گونه‌ای تغییر می‌کند که میدان مغناطیسی آرمیچر همیشه عمود بر محور قطبها باقی بماند و بنابراین یک گشتاور دائمی و ثابت همواره وجود داشته باشد. شکل گسترده و mmf حاصله از این نوع سیم‌پیچی در شکل (۴-۱۵) نشان داده شده است. با فرض باریک بودن شیارها mmf از تعدادی پله تشکیل شده که ارتفاع هر کدام برابر با آمپر دور هر شیار $(2n_c i_c)$ است. n_c تعداد دور هر کلاف و i_c جریان آن است. پیک این mmf در راستای محور مغناطیسی آرمیچر قرار دارد که عمود بر محور قطبهای استاتور است. این نوع سیم‌پیچی معادل یک کلاف با $12n_c i_c$ آمپر دور است که در محیط آرمیچر توزیع شده باشد. پیک موج مثلثی $6n_c i_c$ است و در زیر قطبهای آرمیچر قرار می‌گیرد. اگر تعداد شیارها بیشتر شود تقریب مثلثی بهتری برای mmf بدست می‌آید.



(a)



(b)

شکل (۱۵-۴) a: نمودار گسترده ماشین شکل ۴-۱۴ b: موج mmf

بایستی متذکر شد که شکل موج mmf فقط به ترکیب سیم پیچ و تقارن مدار مغناطیسی مربوط به هر پل، بستگی دارد، اما چگالی شار نه تنها به mmf بلکه به شرایط مرزی، طول فاصله هوایی، اثر فاصله هوایی شیارها و شکل پایه قطبها مربوط می شود که بایستی در طراحی در نظر گرفته شوند. ساختار مغناطیسی ماشینهای dc می توانند بیش از دو قطب را شامل شوند. یک نمونه ماشین dc چهار قطب همراه با نمودار گسترده و شکل موج mmf آن در شکل (۱۶-۴) دیده می شود. مقدار پیک موج مثلی mmf در یک ماشین dc با P قطب از رابطه زیر بدست می آید.

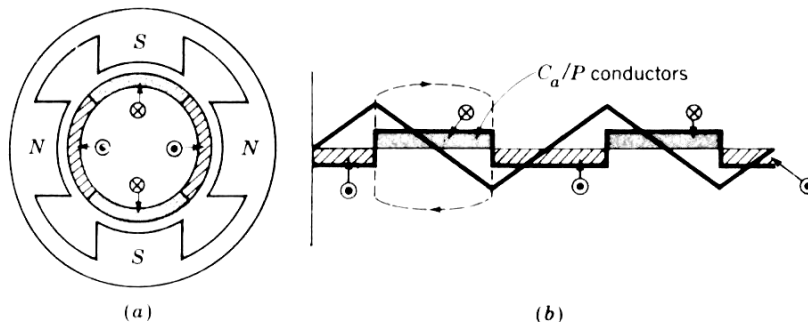
$$F_a = \frac{1}{2} \frac{C_a}{P} \frac{i_a}{m} \quad \text{قطب/آمپر دور} \quad (۲۲-۴)$$

که در آن C_a تعداد کل هادیهای موجود در سیم پیچی آرمیچر، P تعداد قطبها، i_a جریان آرمیچر و m تعداد مسیره های موازی در سیم بندی آرمیچر ($\frac{i_a}{m}$ جریان هر هادی) می باشد. این فرمول به سادگی از اعمال قانون آمپر بر مسیر بسته نشان داده شده در شکل (۱۶-۴) بدست می آید. با فرض $N_a = \frac{C_a}{2m}$ (= تعداد دورهای سری شده در سیم پیچ آرمیچر) شکل ساده تری از فرمول فوق بدست می آید:

$$F_a = \frac{N_a}{P} i_a \quad (۲۳-۴)$$

مولفه اصلی شکل موج mmf نیز از تبدیل فوریه قابل حصول است:

$$F_{a,1,peak} = \frac{8}{\pi^2} \frac{N_a}{P} i_a \cos \theta_r \quad (۲۴-۴)$$



(a)

(b)

شکل (۱۶-۴) مقطع و گسترده یک ماشین dc با چهار قطب

در بسیاری از تحلیلهای مربوط به ماشین ac و dc فرض وجود یک mmf توزیع شده با شکل سینوسی، قابل قبول بوده و تحلیل را بسیار آسان می کند. همچنین اصلاح روابط و فرمولها در مواردی که به تحلیل دقیقتر نیاز هست، به سادگی امکان پذیر خواهد بود. بنابراین در تحلیل های آتی این فصل یک ماشین دو قطب با توزیع سینوسی mmf در فاصله هوایی، در نظر گرفته خواهد شد.

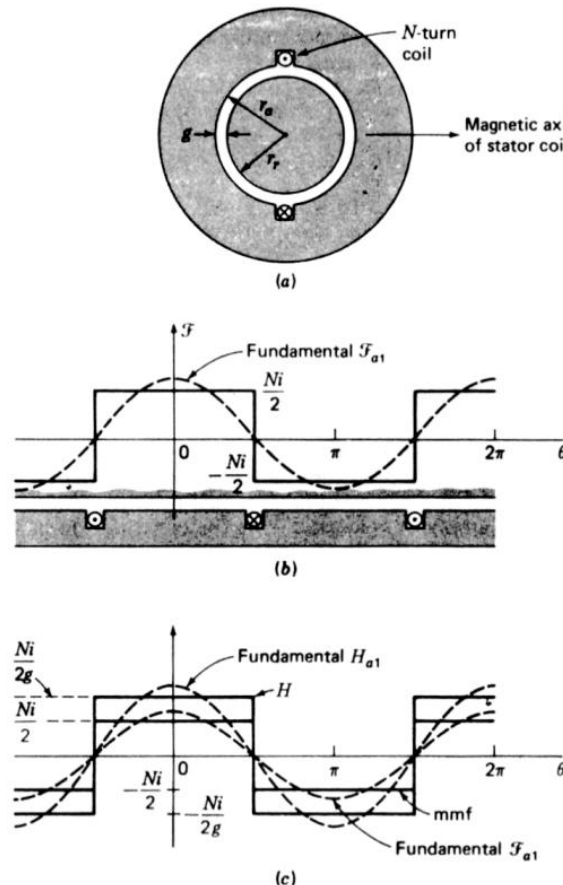
۴-۵) میدانهای مغناطیسی در ماشینهای چرخان

الف - ماشین با فاصله هوایی یکنواخت

در بخش قبل mmf فاصله هوایی در مورد ماشینهای با روتور و استاتور استوانه ای را بدست آوردیم و دیدیم که برای یک کلاف با گام کامل این موج دارای توزیع مکانی ثابت است. اگر فاصله هوایی به اندازه کافی کوچک باشد می توان دید که میدان مغناطیسی H در هر نقطه فاصله هوایی بصورت شعاعی و دارای دامنه ثابت F/g است. این مفهوم در مورد مولفه اصلی H نیز صادق است.

$$H_{a_1} = \frac{F_{a_1}}{g} = \frac{4Ni}{\pi 2g} \cos \theta \quad (۴-۲۵)$$

شکل (۴-۱۷) رابطه بین mmf و H را نشان می دهد.



شکل (۴-۱۷) mmf و میدان H حاصل از یک کلاف متمرکز با گام کامل در ماشین استوانه ای

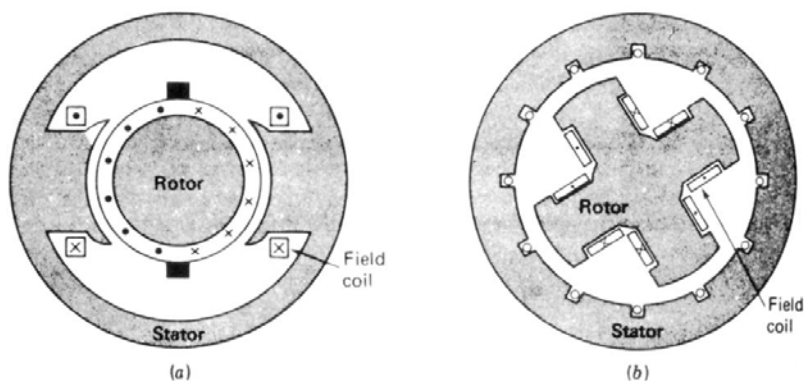
اگر سیم پیچ را بصورت توزیع شده در نظر بگیریم در کلیت رابطه فوق تغییری حاصل نمی شود و کافی است به جای کل کلافهای توزیع شده، یک کلاف معادل در نظر گرفته شود:

$$H_{a_1} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_{ph}}{Pg} i_a \cos \theta \quad (۲۶-۴)$$

که در آن N_{ph} تعداد دور سیمهای سری شده در هر فاز، θ زاویه الکتریکی نسبت به محور مغناطیسی سیم پیچ، K_w ضریب سیم پیچی و P تعداد قطبهای ماشین است. به عبارت دیگر، می توان گفت که شدت میدان حاصل از یک سیم پیچی گسترده با ضریب سیم بندی K_w و تعداد N_{ph}/P دور سیم پیچ سری شده برای هر قطب، برابر است با شدت میدانی که از یک کلاف فرضی با گام کامل و $K_w \frac{N_{ph}}{P}$ دور ایجاد شده باشد.

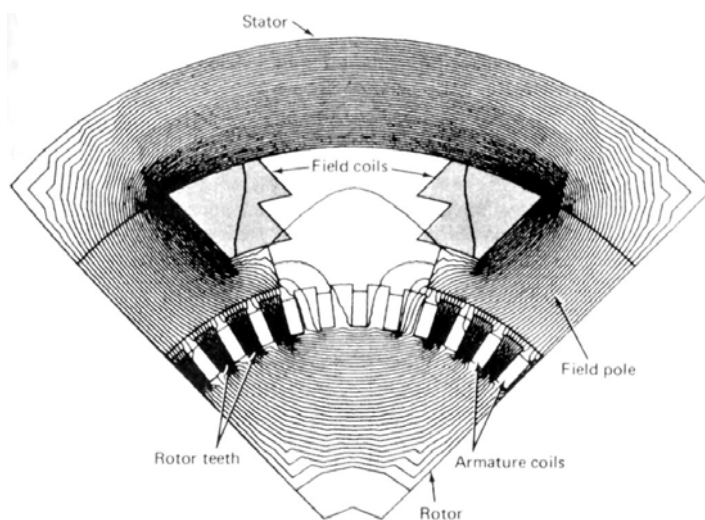
ب- ماشین با فاصله هوایی غیر یکنواخت

شکل (۴-۱۸-ا) یک نمونه ماشین dc و شکل (۴-۱۸-ب) یک نمونه ژنراتور سنکرون قطب برجسته را نشان می دهد. در این دو ماشین فاصله هوایی شدیداً غیر یکنواخت است. در واقع، در مورد ماشینهای با روتور و استاتور استوانه ای نیز اگر بخواهیم اثر شیارها را در نظر بگیریم با فاصله هوایی غیر یکنواخت مواجه خواهیم بود.



شکل (۴-۱۸) ساختار کلی ماشینهای قطب برجسته: a: ماشین dc b: ماشین سنکرون قطب برجسته

راهکار اصلی تحلیل میدان در این ماشینها استفاده از روشهای پیچیده ای است که ساده سازی زیادی نیز در آنها اعمال نمی شود. به عنوان مثال، تجزیه و تحلیل با استفاده از روش اجزاء محدود می تواند توزیع میدان مغناطیسی در ساختارهای با فاصله هوایی غیر یکنواخت را نشان دهد. نتیجه حل مسئله با این روش برای یک ژنراتور dc در شکل (۴-۱۹) دیده می شود.



شکل (۴-۱۹) تعیین میدان مغناطیسی در یک ژنراتور dc قطب برجسته با روش اجزای محدود

اما، تجربه نشان داده است که روشهای پیچیده تنها راه نیستند و روشهای تحلیلی با اعمال ساده‌سازیها متعدد، قادر به تعیین نتایج قابل قبول در مورد این ماشینها هستند.

۴-۶) MMF چرخان در ماشینهای AC

ثابت می‌شود که mmf ناشی از یک سیم‌پیچ که با جریان متناوب تحریک می‌شود را می‌توان به دو مولفه چرخان با سرعت ω (در حال حرکت در محیط فاصله هوایی) تجزیه نمود که جهت چرخش آنها نسبت به هم معکوس است. برآیند این دو میدان، در هر نقطه از فضای فاصله هوایی و هر لحظه از زمان، با رابطه (۴-۲۸) داده شده است.

در یک ماشین ۳ فاز، سیم‌پیچ یک فاز، نسبت به فاز دیگر، 120° الکتریکی در فضا فاصله دارد. از طرف دیگر جریانهای تحریک 120° نسبت به محور زمان اختلاف فاز دارند:

$$i_a = I_m \cos \omega t \quad , i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \quad , i_c = I_m \cos(\omega t - 240^\circ) \quad (۴-۲۷)$$

در مورد mmf فاز a می‌توان نوشت:

$$F_{a,1} = F_{a,1}^+ + F_{a,1}^- = \frac{1}{2} F_{max} (\cos(\theta - \omega t) + \cos(\theta + \omega t)) \quad (۴-۲۸)$$

که در آن

$$F_{max} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_{ph}}{P} I_m \cos \theta \quad (۴-۲۹)$$

به همین ترتیب برای mmfهای مربوط به فازهای b و c می‌توان دو مؤلفه در نظر گرفت:

$$F_{b,1} = \frac{1}{2} F_{max} [\cos(\theta - \omega t) + \cos(\theta + \omega t - 240^\circ)] \quad (۴-۳۰)$$

$$F_{c,1} = \frac{1}{2} F_{max} [\cos(\theta - \omega t) + \cos(\theta + \omega t - 240^\circ)] \quad (۴-۳۱)$$

mmf کلی جمع mmfهای حاصل از فازها است:

$$F(\theta, t) = F_{a,1} + F_{b,1} + F_{c,1} \quad (۴-۳۲)$$

با جایگذاری روابط (۴-۲۸)، (۴-۳۰)، (۴-۳۱) و (۴-۳۲) داریم:

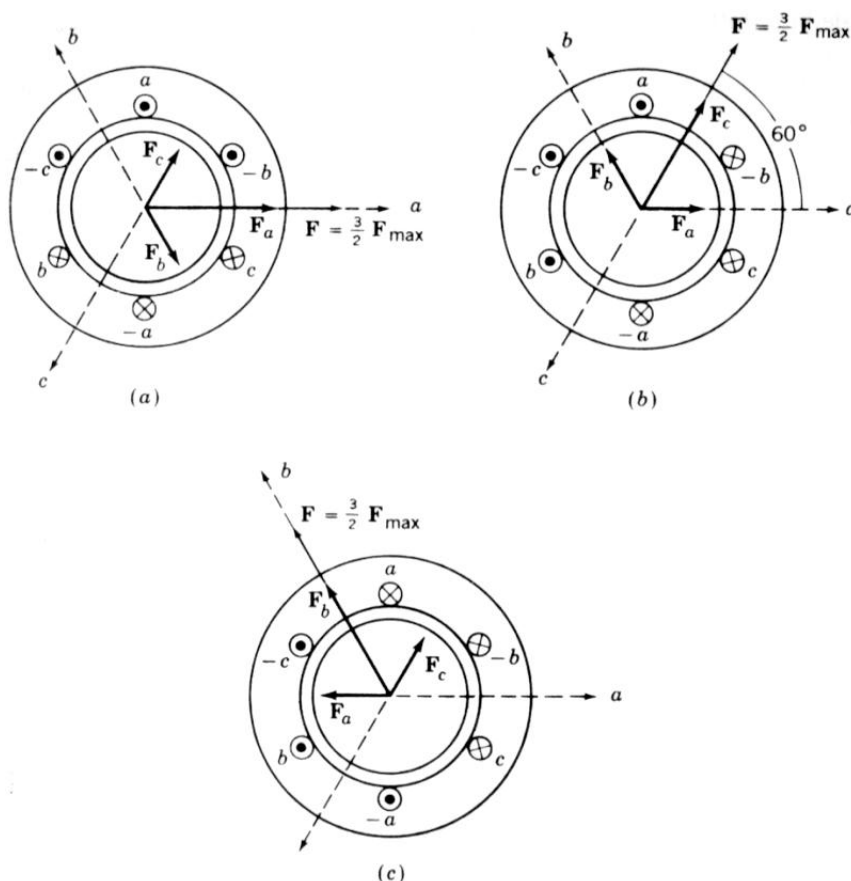
$$\Rightarrow F(\theta, t) = \frac{3}{2} F_{max} \cos(\theta - \omega t) \quad (۴-۳۳)$$

شکل موجی که توسط معادله (۴-۳۳) توصیف شده است یک تابع سینوسی از θ است که دارای دامنه ثابت و اختلاف فاز مکانی ωt می‌باشد. از آنجا که ωt با زمان تغییر می‌کند. بنابراین این موج سینوسی با گذشت زمان فاصله‌اش با محور ساکن سیم‌پیچ‌های استاتور زیاد می‌شود. در واقع، سرعت حرکت این موج ω است. بنابراین در هر لحظه t_x این شکل موج یک سینوسی است که پیک مثبت آن به اندازه زاویه ωt_x نسبت به محور ساکنی که مبنای θ را معین می‌کند، جابجا شده است. در لحظه $t=0$ جریان فاز a بیشترین مقدار را دارد و پیک مثبت mmf چرخان روی محور این فاز قرار دارد. پس از گذشت $\frac{1}{3}$ سیکل، جریان در فاز b بیشترین مقدار را داشته و پیک مثبت روی محور فاز b قرار می‌گیرد و به همین ترتیب این جابجایی ادامه می‌یابد. سرعت الکتریکی حرکت این موج $\omega = 2\pi f$ است و با توجه به تعداد قطبها سرعت حرکت آن بصورت مکانیکی برابر با $\omega_m = \frac{2}{P} \omega$ خواهد بود. در مورد یک سیم‌پیچ q فاز نیز می‌توان اثبات نمود که اگر سیم‌پیچهای هر فاز به فاصله $\frac{2\pi}{q}$ از یکدیگر در فضای اطراف فاصله

هوایی جاسازی شوند، دامنه ثابت mmf برابر $\frac{q}{2}$ هر یک از دامنه‌های فازها بوده و سرعت چرخش موج $\omega = 2\pi f$ رادیان الکتریکی بر ثانیه خواهد بود. بنابراین یک سیم پیچ متقارن چند فازه که با جریانهای متقارن چند فازه تحریک شود، رفتاری همانند یک آهنربای دائمی چرخان یا یک سیم پیچ چرخان تحریک شده با جریان dc نشان خواهد داد.

ب- تحلیل ترسیمی mmf سیستم چند فازه

در شکل (۴-۲۰)، سعی شده است به کمک ترسیم فازورهای mmf حاصل از هر فاز در شرایط مختلف جریانهای سه فاز، فازور mmf برآیند از نظر دامنه و فاز مشخص شود. چنانچه در شکل دیده می‌شود. دامنه mmf برآیند ثابت است اما فاز آن با تغییر وضعیت جریانهای سه فاز که تابعی از زمان هستند، تغییر می‌کند.



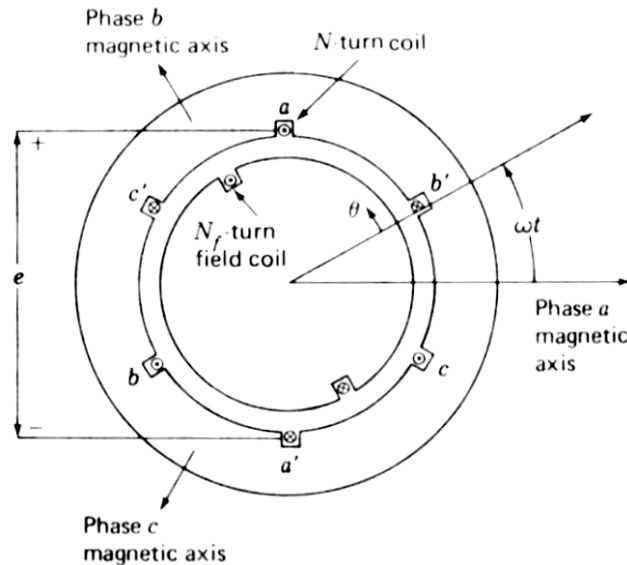
شکل (۴-۲۰) تولید mmf چرخان به وسیله جریانهای ۳ فاز

۴-۷) تولید ولتاژ

چگونگی ایجاد ولتاژ در سیم پیچهای ماشین قبلاً توصیف شده است در اینجا بررسی کمیت ولتاژ القایی مورد نظر است.

الف - ماشینهای AC

مقطع یک ماشین مقدماتی AC در شکل (۴-۲۱) دیده می‌شود. سیم‌پیچهای روتور و استاتور بصورت متمرکز و گام کامل نشان داده شده‌اند (این تحلیل به سادگی قابل تعمیم به سیم‌پیچ گسترده است). فرض می‌شود سیم‌پیچ روتور، یک میدان مغناطیسی سینوسی با چگالی شار B در مجاورت سطح استاتور ایجاد نماید. روتور با سرعت الکتریکی ω در حال چرخش است و ماشین دو قطب می‌باشد. هنگامی که قطبهای روتور با محور مغناطیسی سیم‌پیچ استاتور هم راستا می‌شوند، شار حلقه زنده سیم‌پیچ $N\phi$ دوری استاتور برابر $N\phi$ است. (ϕ شار فاصله هوایی در هر قطب است).



شکل (۴-۲۱) نمایش مقطع یک ماشین ac مقدماتی ۳ فاز

برای محاسبه شار قطب از فرض توزیع سینوسی شار شروع می‌کنیم:

$$B = B_{peak} \cos \theta \quad (۴-۳۴)$$

B_{peak} چگالی شار در مرکز قطب روتور است و θ فاصله (زاویه‌ای) الکتریکی نسبت به محور قطب را نشان می‌دهد. شار فاصله هوایی متناظر با هر قطب انتگرال چگالی شار بر روی سطح قطب است:

$$\phi = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} B_{peak} \cos \theta \cdot l \cdot r \cdot d\theta = 2B_{peak} \cdot l \cdot r \quad (۴-۳۵)$$

l طول محوری استاتور و r شعاع آن در مجاورت فاصله هوایی است. برای یک ماشین با P قطب:

$$\phi = \frac{2}{P} 2B_{peak} l \cdot r = \frac{4B_{peak}}{P} \cdot l \cdot r \quad (۴-۳۶)$$

(سطح قطب در ماشین P قطب $\frac{2}{P}$ برابر سطح آن در یک ماشین دو قطبی است)

حال اگر روتور به اندازه زاویه α بچرخد، شار پیوندی استاتور از مقدار ماکزیمم $N\phi$ به مقدار $N\phi \cos \alpha$ کاهش می‌یابد و اگر فرض کنیم سرعت چرخش روتور ω باشد (یعنی $\alpha = \omega t$) بنابراین:

$$\lambda = N\phi \cos \alpha \quad (۴-۳۷)$$

با استفاده از قانون القای فارادی می‌توان ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ را بدست آورد.

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = N \frac{d\phi}{dt} \cos \omega t - \omega N\phi \sin \omega t \quad (۴-۳۸)$$

پلاریته ولتاژ القایی طوری است که اگر سیم پیچ استاتور اتصال کوتاه شود جریانی در آن برقرار سازد که با تغییر شار پیوندی استاتور مقابله نماید.

گر چه در تحلیل حاضر ϕ را فقط حاصل جریان تحریک دانستیم اما بطور کلی ϕ شار برآیند متناظر با هر قطب است که می تواند حاصل تعامل شار روتور و استاتور باشد. جمله اول از طرف راست معادله (۴-۳۸) فقط هنگامی وجود دارد که شار نسبت به زمان متغیر باشد و به آن ولتاژ ترانسفورمری می گویند. جمله دوم ولتاژ حاصل از سرعت است و بدلیل حرکت نسبی بین شار فاصله هوایی و سیم پیچهای استاتور ایجاد می شود. هنگامی که ماشین دوار در حالت عملکرد پایدار خود است، دامنه شار فاصله هوایی ثابت بوده و تنها مولفه ولتاژ چرخشی (وابسته به سرعت) وجود خواهد داشت. این مولفه را emf (نیروی محرکه الکتریکی) نیز نامیده اند:

$$emf = \omega N \phi \sin \omega t \quad (4-39)$$

معادله دیگری که بیانگر ولتاژ القایی وابسته به سرعت است از مفهوم قطع خطوط شار بدست می آید: اگر هادی به طول l و با سرعت خطی v در میدان مغناطیسی با شدت B حرکت کند و B ، l و v دو بدو متعامد باشند ولتاژ القا شده در هادی عبارتست از:

$$e = Blv \quad (4-40)$$

به عنوان تمرین ثابت کنید که دو رابطه (۴-۳۹) و (۴-۴۰) یکسان هستند. با استفاده از رابطه (۴-۳۹) مقدار موثر ولتاژ القایی نیز قابل محاسبه است.

$$E_{\max} = \omega N \phi \Rightarrow E_{rms} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N \phi \Rightarrow E_{rms} = 4.44 f N \phi \quad (4-41)$$

معادله اخیر همانند معادله ای است که ولتاژ القا شده در سیم پیچ (ساکن) ترانسفورمر را در اثر تغییر زمانی شار مغناطیسی پیوندی آن نشان می دهد. بنابراین می توان گفت که چرخش نسبی بین پیچک و یک میدان مغناطیسی ثابت، همانند یک mmf متغیر، باعث القای ولتاژ در هادی می شود.

رابطه (۴-۴۱) نشان می دهد که ولتاژ القایی، تکفاز است. برای تولید ولتاژ ۳ فاز باید ۳ سیم پیچ با فاصله 120° الکتریکی در فضای استاتور جاسازی شوند. در آن صورت معادله (۴-۴۱) بیانگر rms ولتاژ هر یک از فازها است و N تعداد کل دور سیم پیچ فاز مربوطه می باشد. این معادلات با فرض سیم بندی متمرکز و با گام کامل بدست آمد، در مورد سیم پیچهای واقعی که علاوه بر گسترده بودن دارای گام کامل نیز نیستند، ضریب K_w تعداد معادل دور سیم پیچ هر فاز را بیان می کند. بنابراین می توان برای هر نوع سیم بندی، ولتاژ القایی هر فاز را بصورت زیر نوشت:

$$E_{rms} = 4.44 K_w N_{ph} f \phi \quad (4-42)$$

N_{ph} تعداد دورهای سری شده سیم پیچ در هر فاز می باشد.

مثال - یک ژنراتور سنکرون روتور استوانه ای ۳ فاز دو قطب ۶۰ هرتز که سیم بندی استاتور آن به صورت Y بسته شده با اطلاعات زیر مفروض است.

سیم بندی روتور: توزیع شده با ضریب $K_f = 0.9$ و تعداد دور $N_f = 46$

سیم بندی استاتور توزیع شده با $N_a = 24$ دور در هر فاز و ضریب $K_a = 0.833$

طول فاصله هوایی $g = 0.075m$ ، متوسط شعاع فاصله هوایی $r = 0.5m$ ، طول آرمیچر $l = 4.0m$

جریان میدان $I_f = 1500A$ dc

و روتور توسط یک توربین بخار با سرعت $3600rpm$ در حال چرخش است.

a مقدار پیک مولفه اصلی mmf حاصل از میدان تحریک ($F_{1,peak}$)

(b) مقدار پیک مولفه اصلی چگالی شار ($B_{1,peak}$) در فاصله هوایی

(c) شار مبنای هر قطب (ϕ)

(d) مقدار rms ولتاژ مدار باز القا شده در آرمیچر

را محاسبه نمائید.

حل: (a)

$$F_{1,peak} = \frac{4 k_f N_f}{\pi P} I_f = \frac{4 \cdot 0.90(46)}{\pi \cdot 2} (1500) = \frac{4}{\pi} \times 31000 \quad A/pole$$

(b)

$$B_{1,peak} = \frac{\mu_0 F_{1,peak}}{g} = 0.661 T$$

(c)

$$\phi = 2B_{1,peak} \cdot lr = 2(0.661)(4)(0.5) = 2.64 \quad Wb$$

(d)

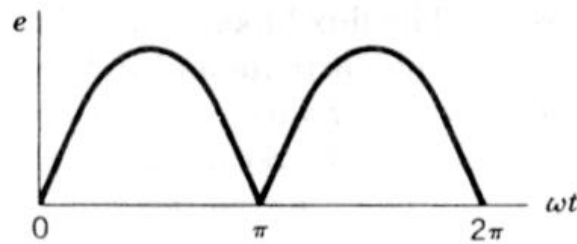
$$E_{rms} = 4.44 k_a N_a f \phi = 4.44(0.833)(24)(60)(2.64) = 14.1 \quad KV_{rms}/phase$$

در اتصال ستاره، این ولتاژ، ولتاژ فاز به نقطه خنثی است و بنابراین ولتاژ خط عبارتست از:

$$E_{rmsline} = \sqrt{3}(14.1 \text{ KV}) = 24.4 \text{ KV}$$

ب- ماشینهای DC

در هر ماشین اعم از dc یا ac ولتاژ القا شده ناشی از حرکت، یک موج متناوب (و سینوسی) است. بنابراین در یک ماشین dc باید این ولتاژ یکسو شود. کموتاتور در مورد ژنراتور dc یک یکسوکنده مکانیکی که کلیات عملکرد آن قبلاً توضیح داده شد. ولتاژ سینوسی القا شده در آرمیچر توسط کموتاتور به صورت ولتاژ یکسو شده شکل (۴-۲۲) بین ذغالهای جاروبک بدست می‌آید.



شکل (۴-۲۲) ولتاژ بین جاروبکها در یک ماشین مقدماتی dc

مقدار متوسط یا dc این موج عبارتست از:

$$E_a = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \omega N \phi \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2}{\pi} \omega N \phi \quad (4-43)$$

در ماشینهای dc مرسوم است که این ولتاژ را برحسب سرعت مکانیکی روتور بنویسند. با فرض اینکه ماشین

دارای P قطب است ($\omega_m = \frac{2}{P} \omega$) ولتاژ متوسط به صورت زیر در می‌آید.

$$E_a = \frac{PN}{\pi} \phi \omega_m \quad (4-44)$$

در یک موتور واقعی تر تعداد پیچکهای آرمیچر بسیار بیش از یک کلاف بوده و بایستی تعداد موثر هادیها را به جای N فرض کرد. همچنین به دلیل نحوه سیم‌بندی آرمیچر تمام هادیها با هم سری نمی‌شوند و چند مسیر موازی را تشکیل می‌دهد. اگر تعداد موثر هادیها را Z_a و تعداد مسیرهای موازی را a بنامیم:

$$E_a = \frac{PZ_a}{2\pi a} \phi \omega_m \quad (45-4)$$

۸-۴) گشتاور الکترومغناطیسی در ماشینهای با قطب غیر برجسته

• تحلیل بر اساس مدار مغناطیسی تزویج شده

همانطور که در فصل ۳ گفته شد اندوکتانس خودی استاتور و روتور در ماشینهای با قطب غیر برجسته تابعی از وضعیت نسبی روتور و استاتور نیست. اما اندوکتانس متقابل استاتور و روتور به θ وابسته است. ($L_M = L_{sr} \cos \theta$) در مورد شار پیوندی استاتور و روتور نیز داریم که:

$$\begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_M(\theta) \\ L_M(\theta) & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (46-4)$$

اگر برای پیچکهای روتور و استاتور مقاومت اهمی هم در نظر بگیریم:

$$V_s = R_s i_s + \frac{d\lambda_s}{dt} = R_s i_s + L_{ss} \frac{di_s}{dt} + L_M \frac{di_r}{dt} + \frac{\partial L_M}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} i_r \quad (47-4)$$

$$V_r = R_r i_r + \frac{d\lambda_r}{dt} = R_r i_r + L_{rr} \frac{di_r}{dt} + L_M \frac{di_s}{dt} + \frac{\partial L_M}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} i_s$$

در اینجا نیز نقش ولتاژهای ترانسفورمری و ولتاژ ناشی از چرخش دیده می‌شود.

گشتاور الکترومغناطیسی (گشتاور مکانیکی حاصل از تعامل میدانهای مغناطیسی بر آمده از جریان الکتریکی) را چنانچه در فصل ۳ دیدیم می‌توان با استفاده از شبه انرژی (و انرژی) بدست آورد که در مدارهای خطی این دو با هم برابرند.

$$W_{fld} = W'_{fld}(\theta, i_s, i_r) = \frac{1}{2} L_{ss} i_s^2 + \frac{1}{2} L_{rr} i_r^2 + L_{sr} i_s i_r \cos \theta \quad (48-4)$$

$$T = \frac{\partial W'_{fld}(\theta, i_s, i_r)}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{d\theta_m} \quad (49-4)$$

(در یک ماشین P قطب بین θ و θ_m تفاوت وجود دارد ($\theta_m = \frac{2}{P} \theta$))

$$\Rightarrow T = -\frac{P}{2} L_{sr} i_s i_r \sin \theta = -\frac{P}{2} L_{sr} i_s i_r \sin \left(\frac{P \theta_m}{2} \right) \quad (50-4)$$

• تحلیل بر اساس میدانهای مغناطیسی متداخل

استاتور و روتور را می‌توان معادل دو آهنربای الکتریکی میله‌ای در نظر گرفت. این دو آهنربا بر محورهای مغناطیسی استاتور و روتور منطبق هستند و با هم زاویه δ_{sr} را می‌سازند.

شکل (۴-۲۳) میدانهای حاصله از استاتور و روتور

گشتاوری که بین این دو آهنربا ایجاد می‌شود متناسب با حاصل ضرب دامنه mmf های روتور و استاتور و همچنین تابعی از زاویه δ_{sr} است. در عمل شار پراکنده (نشتی) نیز در ماشین وجود دارد. اما حدود ۹۰٪ شارها از دو هسته می‌گذرند و همین‌ها گشتاور را تولید می‌کنند.

ثابت می‌شود که با یک فاصله هوایی کوچک و فرض شعاعی بودن H در این فاصله:

$$T = \frac{\partial W'_{fld}}{\partial \delta_{sr}} = \frac{\mu_0 \pi D l}{2g} \cdot F_s \cdot F_r \cdot \sin(\delta_{sr}) \quad (4-51)$$

D : قطر متوسط ماشین (قطر دایره بین روتور و استاتور)

l : طول محوری ماشین

g : ضخامت فاصله هوایی

F_s : مقدار پیک mmf استاتور

F_r : مقدار پیک mmf روتور

برای یک سیستم با P قطب:

$$T = \frac{-P}{2} \cdot \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{\pi D l}{g} \cdot F_s \cdot F_r \cdot \sin(\delta_{sr}) \quad (4-52)$$

در نتیجه: گشتاور نسبت مستقیم با مقدار پیک mmf های استاتور و روتور و سینوس زاویه الکتریکی بین آنها دارد. علامت منفی نشان می‌دهد که میدانها در جهت همراستا شدن تلاش می‌کنند. گشتاورهای وارد شده به استاتور و روتور، مساوی و در جهت مخالف هستند، گشتاور وارد شده به استاتور از طریق پایه ماشین به فونداسیون منتقل می‌شود، اما روتور در اثر گشتاور وارده به چرخش در می‌آید.

مثال ۴-۲- فرض کنید روتور یک ماشین استوانه‌ای توسط جریان dc با دامنه I_r و استاتور آن فقط با یک جریان تکفاز ($i_s = I_s \cos \omega_s t$) تغذیه می‌شود.

(a) رابطه‌ای در مورد گشتاور مغناطیسی ایجاد شده توسط ماشین نسبت به سرعت روتور آن بدست آورید.

(b) با فرض اینکه فرکانس تغذیه استاتور 50Hz باشد، سرعتی را بیابید که در آن گشتاور متوسط وجود داشته باشد.

(c) با فرض وجود جریان تحریک روتور، ولتاژ القا شده در سیم‌پیچهای روتور در سرعت سنکرون را بدست آورید.

حل:

(a) از معادله (۴-۵۰) برای یک ماشین ۲ قطبی داریم:

$$T = -L_{sr} i_s i_r \sin \theta_m$$

و با توجه به شرایط مسئله:

$$T = -L_{sr} I_s I_r \cos(\omega_s t) \sin(\omega_m t + \delta)$$

(ω_m سرعت روتور و δ زاویه اولیه روتور در $t=0$ است)

با استفاده از رابطه مثلثاتی $\sin \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \sin(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \sin(\alpha - \beta)$ می‌توان نوشت:

$$T = -\frac{1}{2} L_{sr} I_s I_r \{ \sin[(\omega_m + \omega_s)t + \delta] + \sin[(\omega_m - \omega_s)t + \delta] \}$$

گشتاور دارای دو مولفه متغیر با زمان سینوسی با فرکانسهای $(\omega_m + \omega_s)$ و $(\omega_m - \omega_s)$ است. توجه کنید که قبلاً گفتیم یک تحریک تکفاز در استاتور دو موج گردان شار در فاصله هوایی به راه می‌اندازد که یکی با سرعت ω_s و دیگری با سرعت $-\omega_s$ در حال حرکت است. گشتاور فوق، در واقع، نتیجه تعامل میدان روتور با این دو میدان است. (b) بجز در حالت $\omega_m = \pm \omega_s$ متوسط گشتاور تولیدی صفر می‌شود (چرا؟). اما با فرض $\omega_m = +\omega_s$ روتور با همان سرعت مولفه راستگرد میدان استاتور، خواهد چرخید و گشتاور عبارت می‌شود از:

$$T = -\frac{1}{2} L_{sr} I_s I_r [\sin(2\omega_s t + \delta) + \sin \delta]$$

و گشتاور متوسط:

$$T_{av} = -\frac{1}{2} L_{sr} I_s I_r \sin \delta$$

سرعت محتمل دیگر $\omega_m = -\omega_s$ است. در آنصورت روتور هم سرعت با میدان چپگرد استاتور خواهد چرخید و گشتاور متوسط به وجود خواهد آمد. علامت منفی T به این معنی است که نیروی اعمال شده در جهت کاهش δ عمل می‌کند. ماشینی که به این ترتیب توصیف شد، یک ماشین تکفاز ایده‌آل سنکرون است. اگر فرکانس تغذیه 50Hz باشد:

$$\omega_s = \omega_m = 3000 \text{rpm} = 50 \text{ r/s}$$

بدیهی است موتور بایستی در سرعت ω_m در حال چرخش باشد تا گشتاور متوسط بوجود بیاید. یعنی این موتور، همچون سایر موتورهای سنکرون، خود راه‌انداز نیست. ویژگی دیگر این موتور قابلیت چرخش با سرعت سنکرون در هر دو جهت ساعتگرد و پاد ساعتگرد می‌باشد. موتور در هر جهتی که توسط راه‌انداز اولیه بچرخد و به سرعت سنکرون برسد، گردش در همان جهت را ادامه خواهد داد.

(c) با استفاده از معادله (۴-۴۷) می‌توان ولتاژهای القایی در سیم‌پیچهای استاتور و روتور را بدست آورد. ولتاژ القا شده در استاتور:

$$e_s = -\omega_s L_{ss} I_s \sin(\omega_s t) - \omega_s L_{sr} I_r \sin(\omega_s t + \delta)$$

ولتاژ القا شده در روتور

$$e_r = -\omega_r L_{sr} I_s [\sin(\omega_s t) \cos(\omega_s t + \delta) + \cos(\omega_s t) \sin(\omega_s t + \delta)]$$

$$\Rightarrow e_r = -\omega_r L_{sr} I_s \sin(2\omega_s t + \delta)$$

یعنی جریان استاتور یک ولتاژ با فرکانس دو برابر فرکانس جریان استاتور را در روتور القا می‌کند.

فصل پنجم - اصول کلی و ساختاری ماشینهای dc

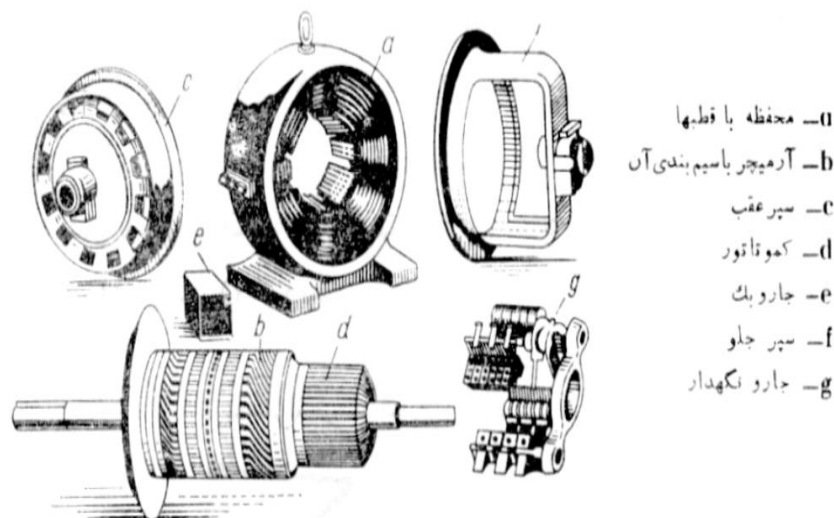
۵-۱) ساختمان ماشینهای dc

در این فصل ماشینهای dc از نوع چرخان مورد نظر هستند. هر ماشین dc از دو قسمت اصلی تشکیل می‌شود:

- **استاتور** که یک استوانه توخالی است و بر روی فونداسیون نصب می‌شود. **قطبهای تحریک** بر جداره داخلی استاتور نصب می‌گردند. **قطبهای کمکی** نیز در فواصل بین قطبهای اصلی و بر روی استاتور جاسازی می‌شوند

- **روتور** که شامل سیم‌پیچی **آرمیچر** و **کمو تاتور** است و به کمک محور خود در داخل ماشین می‌چرخد.

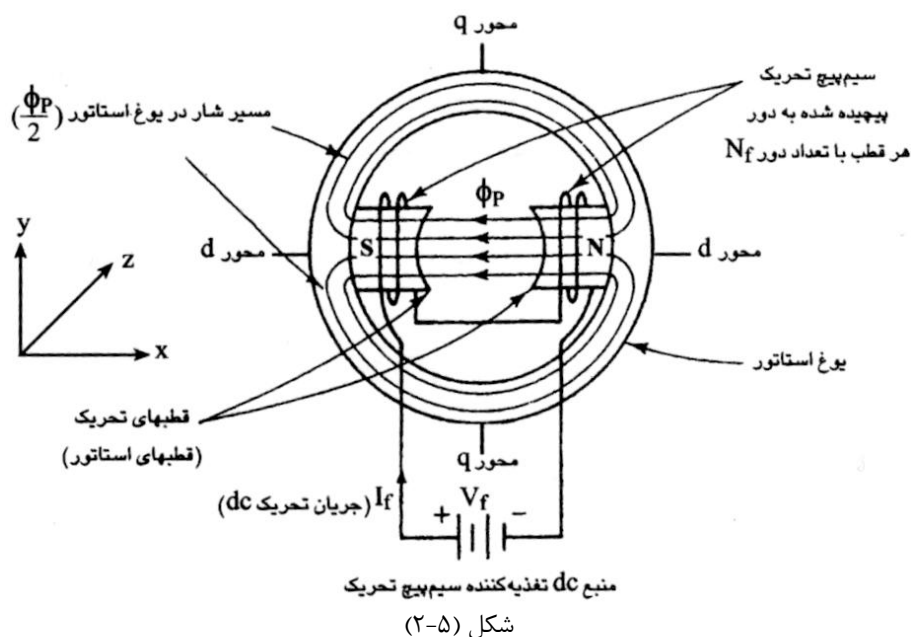
در پوشهای ماشین نیز در دو طرف استاتور نصب می‌شود. بخش مهمی که در داخل درپوش جلویی ماشین قرار گرفته **نگهدارنده جاروبکها** است. درپوشها معمولاً یا تاقان‌ها یا بیرینگهایی را در بر می‌گیرند که محور روتور و در واقع روتور را در فاصله هوایی معلق نگه می‌دارند و امکان چرخش آنرا فراهم می‌کنند.



شکل (۵-۱) اجزای ساختمانی ماشین dc

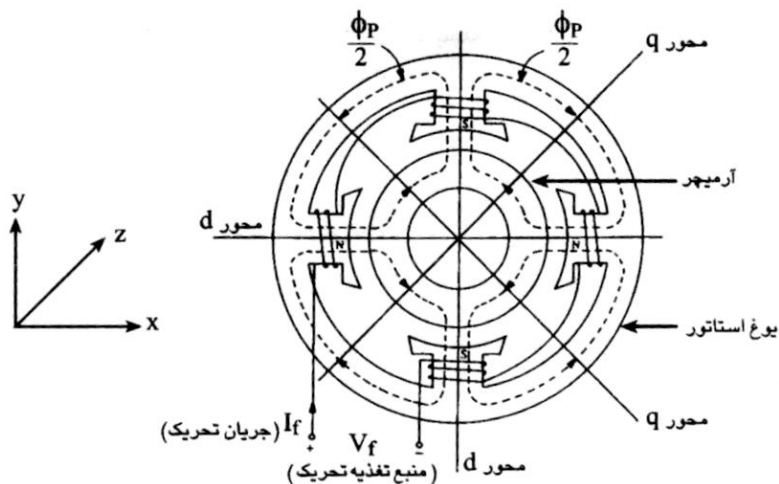
۵-۱-۱) ساختمان استاتور

استوانه توخالی استاتور که به آن یوغ (Yoke) نیز گفته می‌شود. معمولاً از آهن یکپارچه ساخته شده اما قطبهایی که در داخل آن قرار می‌گیرند از هسته موق ساخته می‌شوند. ماشین dc دارای قطبهای برجسته است و سیم‌پیچهای تحریک به صورت قرقره‌ای بر روی این قطبها قرار می‌گیرند. نمودار ساده یک ماشین دو قطب در شکل (۵-۲) دیده می‌شود. نیمی از سیم‌پیچ تحریک بر روی هر قطب سوار است و این دو نیمه با هم سری شده و توسط منبع ولتاژ تحریک، تغذیه می‌شوند.

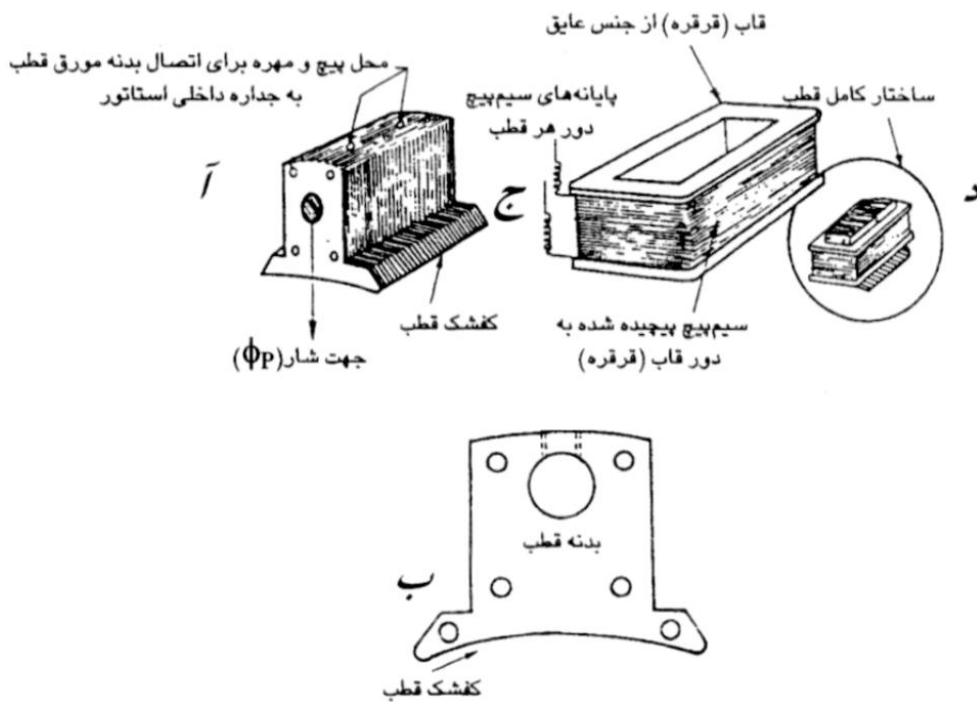


جریان عبوری از سیم پیچ تحریک I_f و برای هر دو نیمه یکسان است. جهت سیم پیچهای روی قطبها به گونه ای است که در اثر عبور جریان ثابت I_f میدان مغناطیسی فاصله قطبهای غیر همنام مغناطیسی ایجاد نماید. شار قطب ϕ_p ناشی از جریان تحریک در دو قسمت یوگ مسیر خود را می بندد و بنابراین از دو نیمه یوگ $\phi_p/2$ عبور می کند.

در حالت کلی همانطور که در شکل (۵-۳) برای یک ماشین ۴ قطب دیده می شود، سیم پیچی تحریک در یک ماشین P قطب، دارای P بخش است که با هم سری شده و جهت پیچش آنها طوری است که قطبهای مجاور روی استاتور به صورت قطبهای غیر همنام در بیایند.

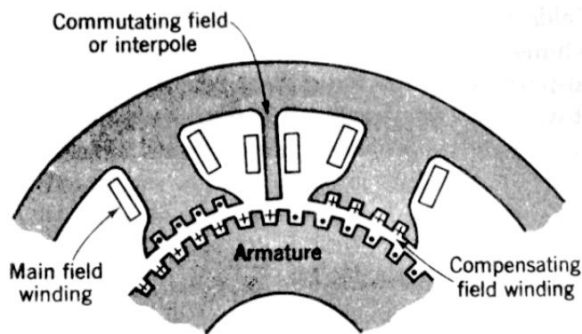


همانطور که در شکل های (۵-۲) و (۵-۳) دیده می شود برای استاتور محورهای فرضی متعامد d و q در نظر گرفته می شود. محور d همان محور مغناطیسی قطب است و محور q در فضای بین دو قطب تعریف می شود. قطبها دارای هسته مورق بوده و دارای شکل خاصی هستند که، علاوه بر نگهداری قرقره حامل جریان تحریک و توزیع سینوسی شار فاصله هوایی، یکسان سازی فاصله هوایی زیر قطب را انجام می دهند. بزرگ بودن کفشک قطب باعث کاهش رلوکتانس و افزایش شار فاصله هوایی نیز می شود.



شکل (۴-۵) ساختمان قطب استاتور ماشین dc

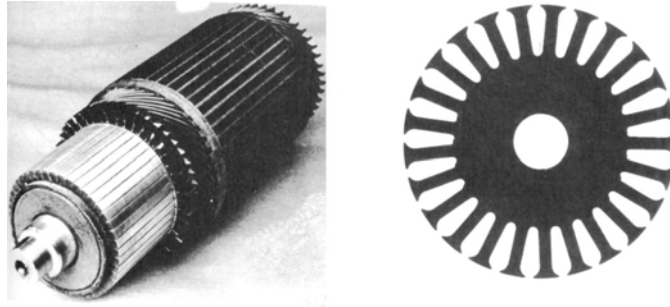
قطبهای کمکی، که بعداً از آنها صحبت خواهیم کرد، ساختمانی همانند قطبهای تحریک دارند و در فضای بین قطبهای اصلی بر روی استاتور نصب می‌شوند. این قطبها کوچکتر از قطبهای اصلی بوده و سیم پیچ روی آنها با سیم پیچ استاتور سری می‌شود. در برخی از ماشینهای dc سیم‌بندی دیگری در سطح بیرونی کفشک قطبهای استاتور جاسازی می‌شود که به آن سیم پیچی جبرانگر گفته می‌شود. نقش این سیم پیچ، که همانند قطب کمکی با سیم پیچ آرمیچر سری می‌شود، در بخشهای بعدی همین فصل بررسی خواهد شد.



شکل (۵-۵) شماتیک محل قطبهای کمکی و سیم پیچ جبرانگر

۵-۱-۲) ساختمان روتور (آرمیچر)

روتور در ماشین dc نقش آرمیچر را دارد. شکل روتور معمولاً استوانه‌ای است و سیم پیچهای آرمیچر در شیارهای روی آن قرار گرفته‌اند. سرهای سیم‌بندی به کموتاتور وصل شده و از طریق جاروبکهای ساکن فشرده شده به سطح کموتاتور به منبع وصل می‌شوند. جاروبکها توسط مکانیزم نگهدارنده‌ای که معمولاً بر درپوشهای ماشین قرار دارد در محل خود ثابت می‌شوند. هسته آرمیچر از آهن مورق ساخته شده است. یک نمونه ورقه هسته آرمیچر با ۲۵ شیار و تصویر یک آرمیچر واقعی در شکل (۶-۵) دیده می‌شود.

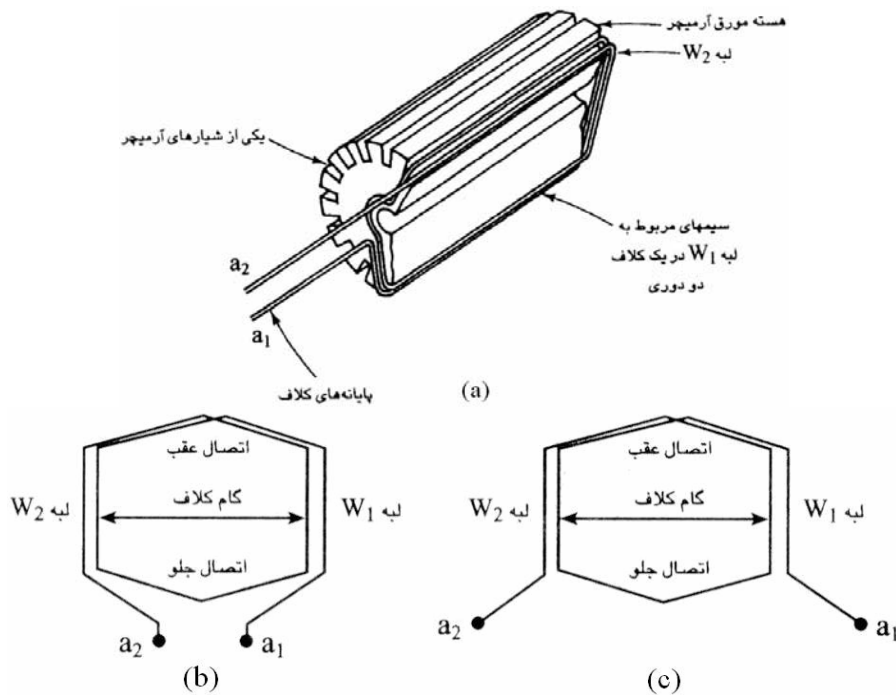


شکل (۵-۶) ساختار آرمیچر ماشین dc

۵-۲) سیم‌بندی آرمیچر

همانطور که قبلاً گفتیم سیم‌بندی قطبها پیچیدگی خاصی نداشته و به صورت قرقره‌ای بر روی هسته آهنی برجسته قرار می‌گیرد. اما در عوض سیم‌بندی آرمیچر یک سیم‌پیچی توزیع شده است که با جریان dc تحریک شده و بایستی علیرغم چرخش روتور، یک میدان مغناطیسی ساکن را در فضای ماشین ایجاد نماید. سیم‌بندی آرمیچر تنوع زیادی دارد که می‌توان تمام انواع آن را در دو گروه اصلی طبقه‌بندی نمود: سیم‌بندی حلقوی (مجاور) و سیم‌بندی موجی

جزء اصلی سیم‌بندی آرمیچر، کلاف است. کلافها معمولاً چند دوری هستند و دو ضلع موازی آنها در شیارهای آرمیچر قرار می‌گیرند. دو ضلع دیگر در دو طرف آرمیچر قرار داشته و در فرآیند تولید ولتاژ نقشی ندارند. به هر یک از دو ضلعی که در شیار قرار می‌گیرد یک بازوی کلاف و به دو ضلع دیگر کلاف، پیشانی کلاف گفته می‌شود. بنابراین هر کلاف دو بازو و دو پیشانی دارد. در شکل (۵-۷) نمای ساده‌ای از یک کلاف و همچنین سیم‌بندی حلقوی ساده و موجی ساده برای یک کلاف دو حلقه‌ای (دو دوری) دیده می‌شود.



شکل (۵-۷) نمای ساده یک کلاف آرمیچر

فاصله زاویه‌ای بین دو بازوی یک کلاف را گام (اول) سیم‌بندی می‌نامند. گام سیم‌بندی معمولاً با گام قطبی (فاصله زاویه‌ای دو قطب غیر همنام) برابر است، که در آن صورت کلاف و سیم‌بندی گام کامل نامیده می‌شود.

۵-۲-۱) سیم‌بندی حلقوی ساده Simplex Lap Winding

در سیم‌بندی حلقوی دو سر ابتدایی و انتهایی یک کلاف به دو تیغه مجاور کموتاتور متصل می‌شوند. در این حالت فاصله دو تیغه کموتاتور که ابتدای دو کلاف مجاور آنها وصل می‌شود برابر با ۱ است. در واقع انتهای کلاف اول و ابتدای کلاف مجاور هر دو به یک تیغه کموتاتور وصل می‌شوند. معمولاً در هر شیار آرمیچر دو بازو از دو کلاف متفاوت قرار می‌گیرد. یکی از بازوها در کف شیار و دیگری در بالای آن است. در واقع، از دو بازوی هر کلاف یکی در کف شیار و دیگری بالا قرار می‌گیرد. به این نوع سیم‌بندی، سیم‌بندی دو لایه گفته می‌شود. در این روش هر شیار معادل یک کلاف است و بنابراین تعداد شیارها با تعداد تیغه‌های کموتاتور برابر می‌شود.

$$S = C = Z_2 \quad (۱-۵)$$

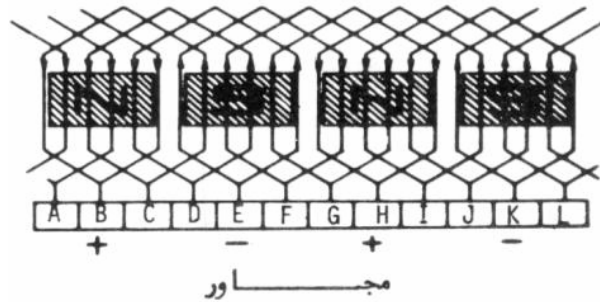
S: تعداد کلافها

C: عده تیغه‌های کموتاتور

Z₂: تعداد شیارهای دو لایه

با این فرض در هر گام قطبی $\frac{Z_2}{2P}$ شیار قرار دارد

ویژگی دیگر سیم‌بندی حلقوی (مجاور)، اینست که تمام کلافها از طریق تیغه‌های کموتاتور با هم سری می‌شوند. در شکل (۸-۵)، گسترده سیم‌پیچی آرمیچر با یک ماشین ۴ قطب نشان داده شده است. ۴ جاروبک که دو به دو موازی هستند واسطه اتصال کموتاتور به منبع dc می‌باشند. در واقع دو جاروبک به ولتاژ مثبت و دوتای دیگر به ولتاژ منفی وصل هستند. اگر مسیرهای ممکن جریان در این شکل دنبال شود، دیده خواهد شد که تعداد مسیرهای موازی برابر تعداد قطبهای ماشین است. یعنی از دیدگاه منبع بیرونی هادیهای آرمیچر به صورت P گروه موازی قرار گرفته‌اند. (P تعداد قطبها است). این مسئله در خصوص ولتاژ تولید شده توسط آرمیچر در یک ژنراتور dc نیز صادق است.



شکل (۸-۵) سیم‌بندی حلقوی در یک ماشین dc چهار قطب

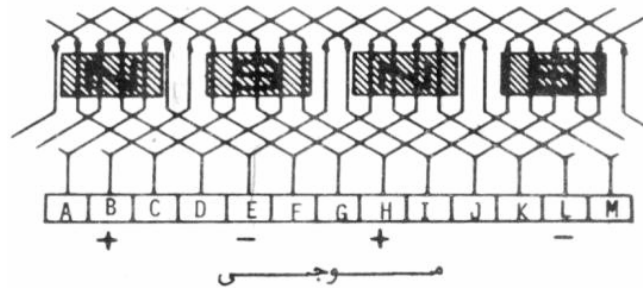
$\frac{2}{P}$ از جریان کلی ماشین از هر یک از دو جاروی مثبت یا منفی عبور می‌کند چون این جریان توسط هر تیغه

کموتاتور بین دو کلاف تقسیم می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که به تعداد قطبهای ماشین مسیر موازی وجود دارد

۵-۲-۲) سیم‌بندی موجی ساده Simplex Wave Winding

در این نوع سیم‌بندی دو سر کلاف به دو تیغه کموتاتور که به اندازه یک گام قطبی با هم فاصله دارند، بسته می‌شود (شکل ۵-۷-c). در اینجا هم معمولاً از سیم‌بندی دو لایه استفاده می‌شود و تعداد شیارها، تعداد کلافها و تعداد تیغه‌های کموتاتور یکسان می‌باشد. تعداد مسیرهای موازی در این سیم‌بندی همواره برابر ۲ است و با تعداد قطب

رابطه‌ای ندارد. در هر مسیر موازی نیمی از کلافها سری شده‌اند. این مطلب در مورد یک ماشین ۴ قطب در شکل (۹-۵) قابل مشاهده است.



شکل (۹-۵) گسترده سیم‌بندی موجی ساده در یک ماشین dc ۴ قطب

بنابراین می‌توان گفت سیم‌بندی مجاور برای ماشینهای جریان زیاد / ولتاژ کم و سیم‌بندی موجی برای حالت معکوس یعنی ولتاژهای بالاتر و جریانهای کمتر مناسب هستند.

مثال (۱-۵) - یک ماشین ۸ قطب دارای سیم‌بندی دو لایه، ۱۶ شیار در آرمیچر و هر یک از کلافها دارای ۲۰ دور سیم است. شار مغناطیسی تحریک و سرعت ماشین طوری انتخاب شده‌اند که ولتاژ متوسط القا شده در هر سیم آرمیچر ۲,۲۷ است و سیمهای آرمیچر قابلیت حمل جریان حداکثر ۱۰۰A را دارند.

الف - ولتاژ، جریان و توان ماشین را در حالیکه سیم‌بندی دارای اتصال حلقوی باشد حساب کنید.

ب- ولتاژ جریان و توان ماشین را در صورتیکه از اتصال موجی استفاده شده باشد حساب کنید.

حل: تعداد کل سیمهای (هادیهای) ماشین عبارتند از:

$$2 \times 16 \times 20 = 640$$

- اتصال حلقوی:

تعداد مسیره‌های موازی = تعداد قطبها = ۸

⇐ تعداد هادیهای که با هم سری می‌شوند تا ولتاژ را ایجاد نمایند:

$$\frac{640}{8} = 80$$

ولتاژ حاصله از هر دسته هادی سری شده:

$$v = 80 \times 2.2 = 176V$$

ماکزیمم جریان مجاز ماشین:

$$8 \times 100 = 800A$$

$$W = 800 \times 176 = 140.8KW$$

توان ماشین:

- اتصال موجی:

تعداد مسیره‌های موازی = ۲

تعداد سیمهایی که ولتاژ آنها با هم جمع می‌شود (سیمهای سری):

$$\frac{640}{2} = 320$$

ولتاژ ترمینال ماشین

$$v = 320 \times 2.2 = 704V$$

ماکزیمم جریان مجاز ماشین (چرا؟)

$$I = 2 \times 100 = 200$$

توان ماشین

$$W = 704 \times 200 = 140.8 \text{ KW}$$

از این مثال روشن می‌شود که برای ماشینها با یک توان داده شده (معین) آنهایی که اتصال حلقوی دارند جریان بالاتر و آنها که اتصال موجی دارند ولتاژ بالاتری دارند.

۳-۵) القای ولتاژ در آرمیچر

۱-۳-۵) القای ولتاژ در یک کلاف

القای ولتاژ در آرمیچر ماشین dc حاصل حرکت هادی در یک میدان ساکن و ثابت (تحریک dc) است.

$$(e = Blv \sin \alpha)$$

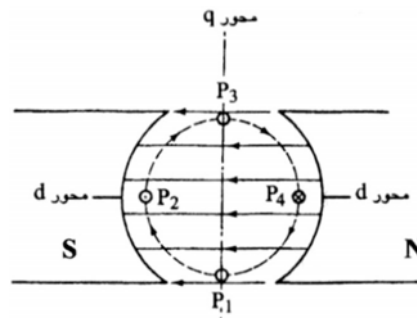
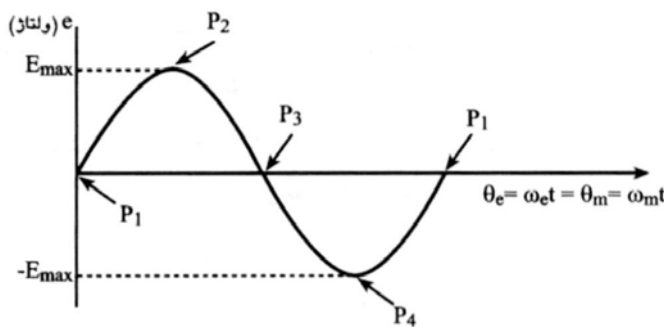
B شدت میدان

l طول هادی

v سرعت حرکت هادی در میدان

α زاویه‌ای است که هادی در حین حرکت با میدان می‌سازد

از آنجا که هادی در میدان قطبها دارای حرکت چرخشی است α دائماً در حال تغییر است. هنگامی که بردار سرعت خطی هادی در راستای خطوط میدان است α برابر صفر شده و در لحظه‌ای که حرکت هادی کاملاً عمود بر خطوط میدان است $\alpha = \pi/2$ می‌شود. در نتیجه ولتاژ القایی در یک دور کامل در هر هادی دوار یک شکل موج سینوسی خواهد داشت. (شکل ۵-۱۰)



شکل (۵-۱۰) القای ولتاژ در یک هادی چرخان در میدان ساکن و ثابت

طبیعی است که اگر تعداد قطبها $2P$ باشد، تعداد سیکلهای ولتاژ در یک دور مکانیکی کامل برابر با P خواهد بود.

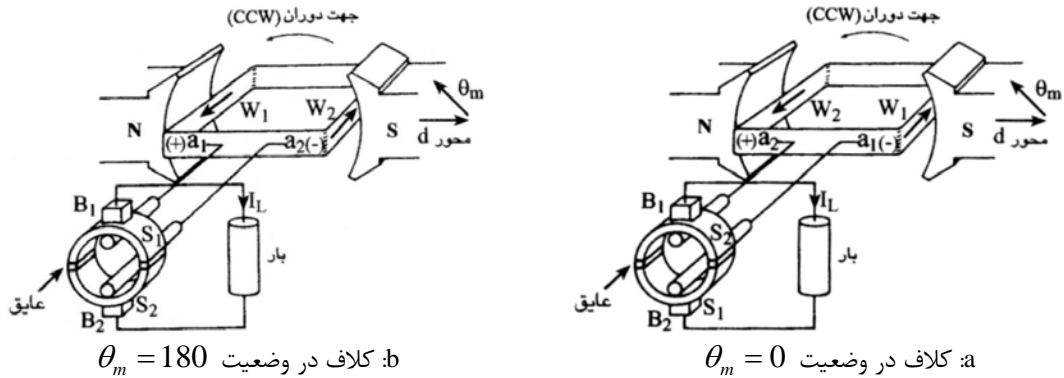
هنگامی که به جای یک هادی، یک کلاف در میدان می‌چرخد در دو بازوی آن دو ولتاژ سینوسی القا می‌شود که پلاریته آنها نسبت به هم معکوس است (چرا؟). این دو منبع ولتاژ از طریق سیم‌های پیشانی کلاف به هم وصل شده و ولتاژهایشان سری می‌شود. بنابراین شکل موج ظاهر شده در پایانه‌های کلاف نیز سینوسی (ac) است. اگر سرعت زاویه‌ای روتور ω_m باشد، زمان لازم برای طی کردن یک گام قطبی برابر با $2\pi/\omega_m P$ شده و ولتاژ متوسط القا شده در هر هادی برابر با $P\phi_P\omega_m/2\pi$ و ولتاژ متوسط در پایانه‌های کلاف N دوری عبارت خواهد بود از:

$$E = \frac{2NP\phi_P\omega_m}{2\pi} = \frac{ZP\phi_P\omega_m}{2\pi} \quad (۲-۵)$$

Z : تعداد هادیهای کلاف و N تعداد دورهای آن است ($Z = 2N$)
 ϕ_p شار هر قطب و ω_m سرعت زاویه‌ای مکانیکی حرکت کلاف و P تعداد قطبها است

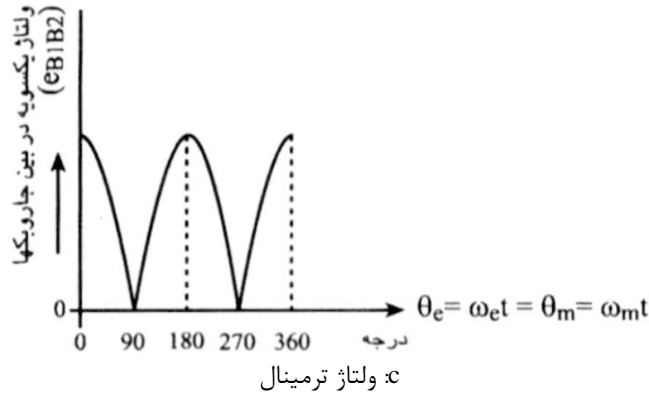
۵-۳-۲) یکسوسازی ولتاژ کلاف

اگر سرهای سیم‌بندی کلاف بطور ثابت به دو نیم استوانه عایق از هم وصل شود که به همراه کلاف می‌چرخند و ولتاژ القایی توسط دو جاروبک ذغالی ساکن که با سطح این نیم استوانه‌ها در تماسند دریافت شود. ولتاژی که در دو سر ذغالها دیده می‌شود، یک ولتاژ سینوسی یکسو شده تمام موج است. این استوانه دو تکه را کموتاتور می‌گویند.



b: کلاف در وضعیت $\theta_m = 180$

a: کلاف در وضعیت $\theta_m = 0$



c: ولتاژ ترمینال

شکل (۵-۱۱) کموتاتور در ژنراتور dc به عنوان یکسوکننده مکانیکی عمل می‌کند

در اینجا مقدار میانگین موج یکسو شده دقیقاً برابر با مقداری است که از رابطه (۵-۲) بدست می‌آید.

مثال (۵-۲) - یک کلاف ۲۰۰۰ دوری با گام کامل در یک میدان ۶ قطبی با سرعت 1200 rpm می‌چرخد. پایانه‌های

کلاف به دو تیغه کموتاتور وصل بوده و شار هر قطب $2 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ است

الف - برای یکسوسازی ولتاژ القا شده در کلاف به چند جاروبک نیاز داریم؟

ب- مقدار میانگین (مقدار dc) ولتاژ القا شده چقدر است؟

حل: الف - تعداد جاروبکها برابر تعداد قطبها (۶) است: ۳ جاروبک منفی و ۳ جاروبک مثبت که به صورت یک در

میان در محل محوره‌های q قطبها قرار گرفته‌اند. جاروبکهای مثبت با یکدیگر موازی شده و پایانه مثبت ولتاژ خروجی را

می‌سازند و جاروبکهای منفی نیز موازی شده و به ترمینال منفی وصل می‌شوند

$$\frac{\omega_m}{2\pi} = \frac{S_m}{60}$$

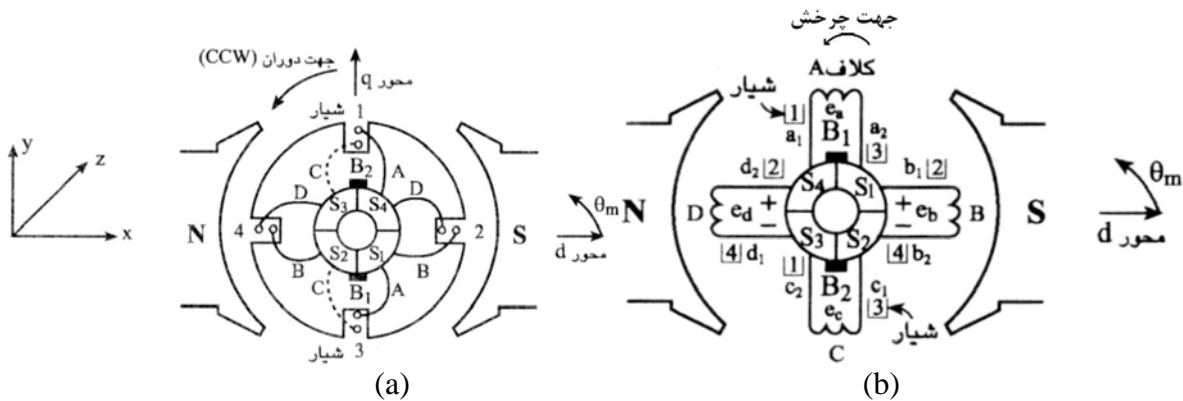
ب-

$$\Rightarrow E = \frac{PZ\phi_p S_m}{60} = \frac{6 \times 2 \times 2000 \times 10^{-3} \times 1200}{60} = 960 \text{ V}$$

با توجه به شکلهای (a-۱۲-۵) و (b-۱۲-۵) می‌توان گفت که در هر بار چرخش کلاف (و کموتاتور) دو بار تیغه‌های کموتاتور (و در نتیجه دو سر کلاف) توسط جاروبکها اتصال کوتاه می‌شوند. بنابراین لازم است که در این لحظه‌ها ولتاژ در دو سر کلاف القا نشده باشد تا جریان زیادی از سیم‌بندی آرمیچر و جاروبکها نگذرد و جرقه ایجاد نشود. این الزام به معنای لزوم قرار گرفتن جاروبکها بر روی محور q قطبها است (چرا؟). در واقع بطور دقیقتر می‌توان گفت اتصال کوتاه هر کلاف باید در دوره‌ای صورت پذیرد که ولتاژ ناشی از چرخش در آن کلاف وجود نداشته باشد. پلاریته ولتاژ القایی در هر کلاف قبل و بعد از کموتاسیون، متفاوت است.

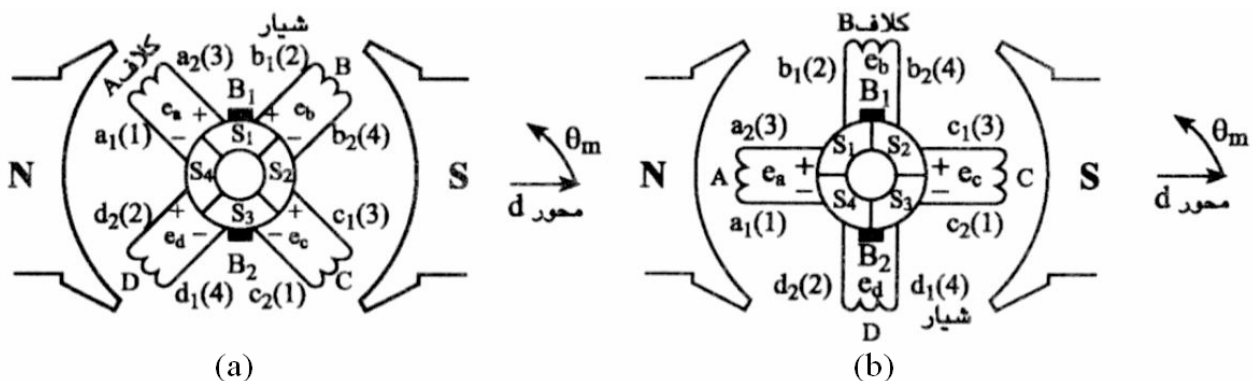
۵-۳-۳) ولتاژ القا شده در آرمیچرهای چند کلافه

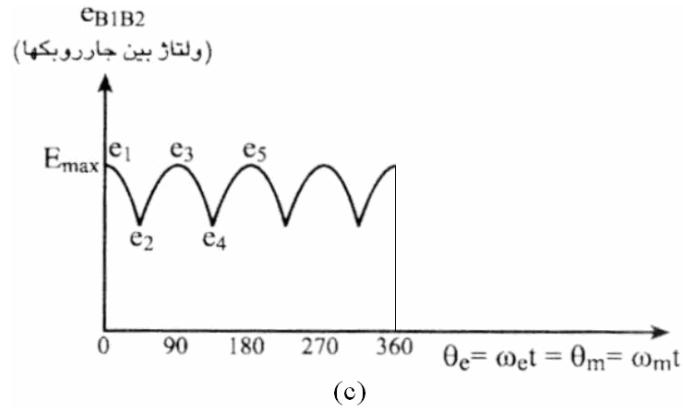
برای آشنایی بیشتر با عملکرد کموتاتور و ولتاژ ترمینال ماشین با آرمیچر چند کلافه، یک ماشین ساده دو قطب با ۴ کلاف در آرمیچر در شکل (۱۲-۵) نشان داده شده و فرض می‌شود ۴ کلاف نسبت به هم 90° مکانیکی فاصله دارند. کموتاتور ۴ تکه ساخته شده و سیم‌پیچهای کلافها از طریق کموتاتور به هم وصل می‌شوند. هر ۴ کلاف با گام کامل در نظر گرفته می‌شوند (با توجه به شکل بگوئید سیم‌بندی آرمیچر حلقوی است یا موجی).



شکل (۱۲-۵) شماتیک یک ماشین دو قطب با ۴ کلاف در آرمیچر

در این وضعیت ولتاژ القا شده در کلافهای B و D برابر E_{max} و ولتاژ القا شده در کلافهای A و C برابر صفر است. حال اگر روتور 45° در جهت CCW بچرخد. نماد کلافها به صورت (a-۱۳-۵) در می‌آید. در هر کلاف ولتاژی با دامنه $e/2$ ظاهر می‌شود که باعث می‌شود در جاروبکهای + و -، یک ولتاژ با دامنه e قرار گیرد. اگر آرمیچر 45° دیگر بچرخد نماد کلافها به صورت (b-۱۳-۵) در می‌آید و ولتاژ روی جاروبکها مجدداً E_{max} خواهد شد چون در کلاف ۱ ولتاژی القا نشده و ولتاژ القا شده در کلاف ۲ ماکزیمم است. نهایتاً شکل موج ولتاژ در هر دور مکانیکی ۴ سیکل خود را طی می‌کند و یک شکل موج یکسو شده خواهیم داشت که مقدار آن بر خلاف آرمیچر تک کلافه هیچگاه صفر نیز نخواهد شد. (شکل ۱۳-۵ c)





شکل (۵-۱۳)

مقدار متوسط ولتاژی که در این حالت در دو سر ترمینال بدست می‌آید.

$$E = \frac{P Z_A \phi_p \omega_m}{2\pi a} = k_a \phi_p \omega_m \quad (۳-۵)$$

که در آن

$$Z_A = N_{coil} \times Z$$

Z_A : کل هادیهای موثر در ولتاژسازی و N_{coil} تعداد کلایها

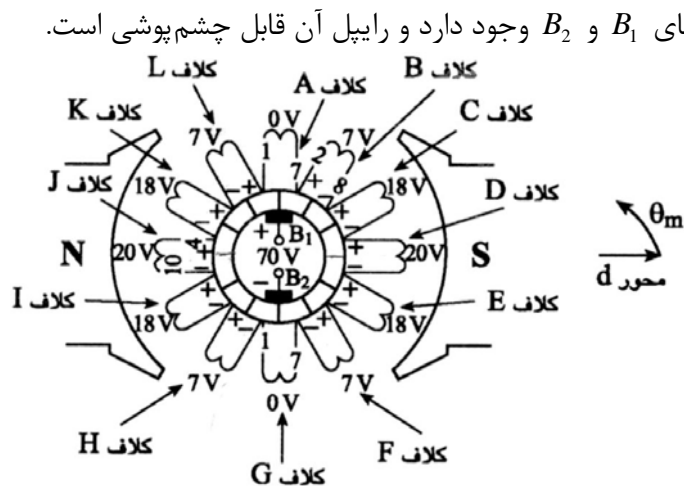
Z : تعداد کلایها

$Z = 2N_a$ و a : تعداد مسیره‌های موازی (در این مثال $a=2$)

k_a : ثابت آرمیچر و برابر است با $PZ_A/2\pi a$

در سیم‌پیچ مجاور ساده، چنانچه قبلاً گفته شد تعداد مسیره‌های موازی به تعداد قطبها است و در مثال حاضر چون $P=2$ است پس $a=2$ می‌شود.

بدیهی است هر چه تعداد کلایها زیادتر باشد علاوه بر افزایش سطح dc، رایپل ولتاژ خروجی نیز کاهش می‌یابد. به عنوان مثال یک آرمیچر با سیم‌بندی مجاور ساده با ۱۲ کلای، ۱۲ شیار و ۱۲ تیغه کموتاتور در شکل (۵-۱۴) دیده می‌شود. ولتاژهای کلایها در وضعیت مورد نظر بر روی آنها نوشته شده و ولتاژی که بین دو جاروبک دیده می‌شود حاصل جمع ولتاژهای ۶ کلای است که با هم سری شده‌اند. در اینجا هم به خوبی می‌توان دو مسیر موازی، هر یک متشکل از ۶ کلای سری شده با هم، را تشخیص داد. با تقریب مناسب می‌توان فرض نمود که در هر لحظه ولتاژ +70V بین دو سر جاروبکهای B_1 و B_2 وجود دارد و رایپل آن قابل چشم‌پوشی است.



شکل (۵-۱۴) یک آرمیچر با ۱۲ کلای با سیم‌بندی مجاور ساده

با توجه به شکل (۵-۱۴) می‌توان حدس زد که اگر جاروبکها به اندازه 30° نسبت به محور ساکن در جهت ساعتگرد جابجا شوند هر ذغال یک سیم پیچ با ولتاژ 7V را اتصال کوتاه می‌کند و باعث ایجاد جرقه و خوردگی سطح کموتاتور، خود ذغال و حتی آسیب به سیم‌بندی آرمیچر می‌شود.

❖ سیم‌پیچی موجی ساده

در این نوع سیم‌بندی نیز می‌توان رابطه (۵-۳) را بکار برد اما بایستی توجه کرد که در این نوع سیم‌بندی a همواره برابر ۲ است و به تعداد قطبها بستگی ندارد.

۵-۳-۴) کنترل و تنظیم سطح ولتاژ آرمیچر

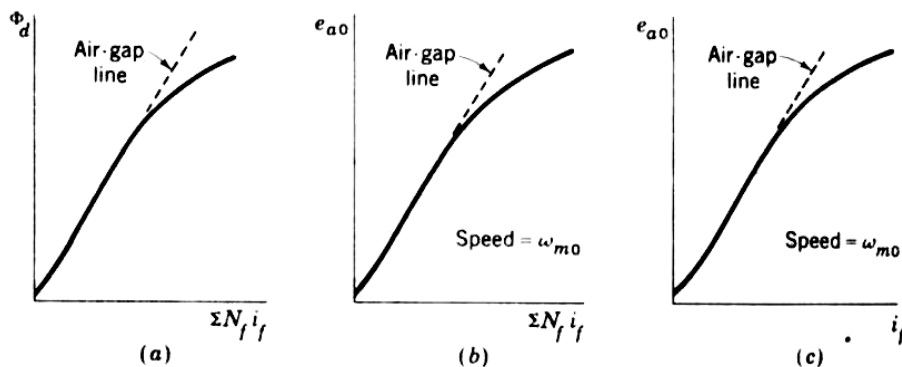
چنانکه از رابطه (۵-۴) به وضوح آشکار است ولتاژ القا شده در آرمیچر تابعی است از شار قطب تحریک (ϕ_p) و سرعت چرخش روتور (ω_m) و ثابتی که بستگی به ساختار روتور و نحوه سیم‌بندی آن دارد. بنابراین در کل می‌توان گفت:

$$E = k_A \phi \omega_m \quad (۴ - ۵)$$

رابطه فوق بیان می‌کند که برای کنترل و تنظیم ولتاژ می‌توان ϕ_p یا ω_m یا هر دو را تغییر داد. تغییر ϕ_p با تغییر جریان تحریک قطب و تغییر ω_m با تغییر و کنترل گشتاور مکانیکی اعمال شده به محور روتور امکان‌پذیر خواهد بود.

۵-۳-۵) منحنی مغناطیس شونده‌گی ماشین dc

شار مغناطیسی فاصله هوایی در راستای محور d حاصل ترکیب ترکیب mmfهای سیم‌پیچهای تحریک ($\sum N_f i_f$) است و بالطبع به مشخصه مغناطیسی هسته ماشین و شرایط هندسی خاص ماشین وابسته است. در یک تحلیل ساده، شار مغناطیسی آرمیچر نسبت به شار مغناطیسی تحریک متعامد فرض می‌شود و بنابراین تاثیری در شار محور d ندارد. با این فرض، منحنی مغناطیسی ماشین در شکل (۵-۱۵) دیده می‌شود.



شکل (۵-۱۵) منحنی مغناطیس شونده‌گی ماشین dc با فرض عدم تاثیرپذیری ϕ_d از شار آرمیچر

از آنجا که emf آرمیچر متناسب با حاصل ضرب سرعت و شار است (رابطه ۵-۴). مرسوم‌تر این است که منحنی مغناطیسی را برحسب emf (یا e_{a0}) در یک سرعت ثابت ω_{m0} ترسیم نمایند (شکل ۵-۱۵-b). بدیهی است که e_a در هر ω_m دیگر برای یک شار معین، متناسب با سرعت خواهد بود:

$$k_a \phi_d = \frac{e_{a0}}{\omega_{m0}} = \frac{e_a}{\omega_m} \quad (۵ - ۵)$$

$$e_a = \frac{\omega_m}{\omega_0} e_{a_0} \quad (۶-۵)$$

مشخصه مغناطیسی برای یک سیم پیچ تحریک که در شکل (۵-۱۵-c) نشان داده شده است. در اصل تفاوتی با شکل (۵-۱۵-b) ندارد. این منحنی را به سادگی به کمک آزمایش ماشین می توان بدست آورد. خطوط مقطع نشان داده در شکل‌های (۵-۱۵) "که خط فاصله هوایی" نامیده می‌شوند، نشان می‌دهد که به دلیل رلوکتانس کوچک هسته آهنی در مقابل فاصله هوایی، می‌توان شار را به صورت خطی با جریان تحریک متناسب دانست.

$$\phi_d = \mathcal{P}_d \sum N_f i_f \quad (۷-۵)$$

که \mathcal{P}_d پرمینانس فاصله هوایی در راستای محور d است.

۴-۵) فرآیند کموتاسیون

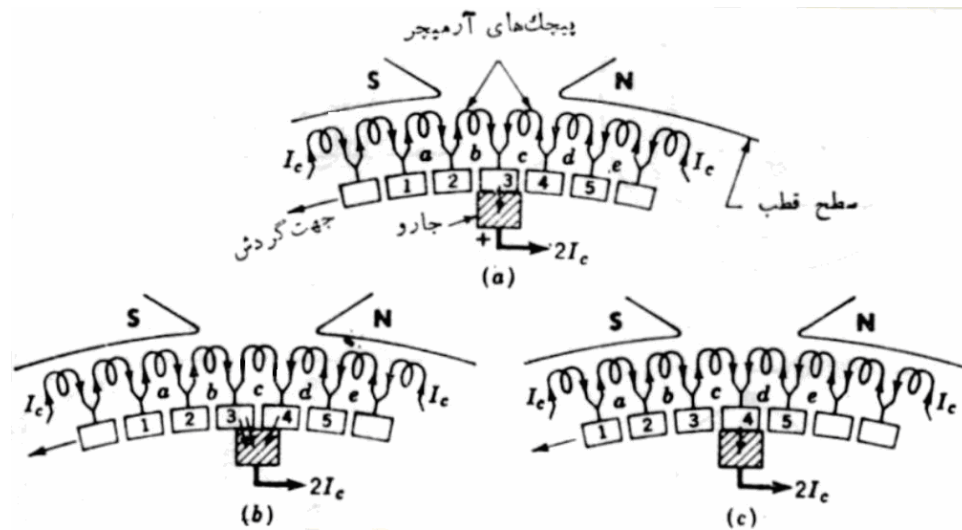
۵-۴-۱) عملکرد کموتاتور

وقتی که در آرمیچر ماشین dc جریان الکتریکی برقرار می‌شود (به صورت موتور یا ژنراتور) جهت جریان در تمام هادی‌هایی که در هر لحظه در زیر قطب N قرار می‌گیرند در یک جهت و در آنهایی که در زیر قطب S هستند در جهت معکوس می‌باشد. بنابراین هنگامی که یک هادی از محور q (محور خنثای بین قطبها) می‌گذرد جهت جریان آن برعکس می‌شود. این عمل کموتاسیون نامیده می‌شود و برای یکسو کردن جریان متناوب آرمیچر ضروری است. برای اینکه این فرآیند را تشریح کنیم. تصویر گسترده بخشی از یک ماشین را در شکل (۵-۱۶-a) نشان داده‌ایم. در این شکل هر یک از حلقه‌های آرمیچر به صورت یک سیم پیچ نشان داده شده است و اتصال آنها به تیغه‌های کموتاتور با روش حلقوی است. جهت گردش آرمیچر از راست به چپ و ماشین بصورت مولد (ژنراتور) فرض شده است. در شکل (۵-۱۶-a) جاروب با یکی از تیغه‌های کموتاتور تماس دارد (محل جارو در فضای خنثای بین قطبها است) جهت جریان سیم پیچ‌های آرمیچر نشان می‌دهد که دو جریان مساوی I_c از دو طرف سیم پیچ به سوی تیغه شماره ۳ می‌آیند. در این حالت جریان در کلاف C همانند تمام کلاف‌های سمت راست جاروب، از راست به چپ برقرار است. جهت جریان در کلاف b و سایر کلاف‌های سمت چپ برعکس (یعنی از چپ به راست) است.

شکل (۵-۱۶-b) موقعیت جارو را در لحظه دیگری نشان می‌دهد که کلاف c در منطقه خنثا قرار گرفته و خطوط شار را قطع نمی‌کند. دو سر این کلاف نیز در این موقعیت توسط جاروبک اتصال کوتاه شده است.

در واقع، هنگامی که آرمیچر با حرکت خود از وضعیت a به وضعیت b می‌رسد، رفته رفته جاروبک با قطعه ۴ کموتاتور تماس پیدا می‌کند و هر چه سطح تماس آن با تیغه بیشتر شود مقدار بیشتری از جریانی که از سمت راست ماشین می‌آید بعد از عبور از کلاف d از طریق تیغه ۴ به جاروبک می‌رسد در نتیجه جریان در کلاف c از I_c کمتر می‌شود. در لحظه‌ای که در شکل (۵-۱۶-b) نشان داده شده است سطح تماس جاروبک با دو قطعه ۳ و ۴ مساوی می‌شود در این حالت کلاف c بوسیله جاروبک اتصال کوتاه شده و جریان داخلی آن به صفر می‌رسد و شروع به معکوس شدن می‌نماید. به همین ترتیب هر چه تماس جاروبک با تیغه ۴ بیشتر و با تیغه ۳ کمتر می‌شود، جریان کلاف c که از چپ به راست است افزایش می‌یابد و لازم است تا وقتی که تماس جاروبک با تیغه ۳ قطع می‌شود به میزان I_c برسد. در این صورت قطع جاروبک از تیغه ۳ بدون جرقه صورت می‌گیرد. در وضعیت نهایی چنانچه در شکل

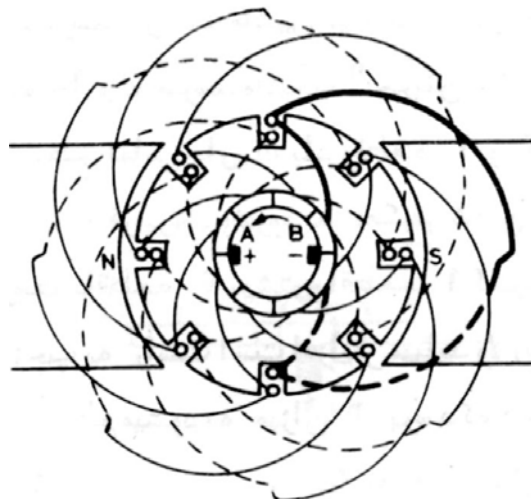
(۵-۱۶-c) دیده می‌شود جهت جریان در کلاف c کاملاً معکوس شده و مقدار ثابت I_c را دارد. جابجایی جریان در هر کلاف توسط عملکرد جاروبک و کموتاتور، بدون ایجاد جرقه، کموتاسیون موفق نامیده می‌شود.



شکل (۵-۱۶) نمایش مراحل سه‌گانه کموتاسیون در ماشین dc

۵-۴-۲) کموتاسیون موفق

همانطور که گفته شد کموتاسیون موفق به این معنا است که تغییر جهت جریان در کلاف در طول مدت اتصال کوتاه شدن کلاف، صورت پذیرد و به بعد از آن کشیده نشود. در این مدت باید ولتاژ القا شده در کلاف صفر باشد یعنی باید کموتاسیون در هنگامی انجام شود که دو بازوی کلاف در روی محور q واقع شده باشند. در واقع، چنین کاری در طراحی ماشین انجام شده است. یعنی سرهای کلافهای آرمیچر طوری به قطعات کموتاتور وصل شده و جاروبکها طوری قرار گرفته‌اند که در لحظه کموتاسیون، کلاف روی محور q باشد. شکل (۵-۱۷) این شرایط را نشان می‌دهد. در سیستم دو لایه در هر کموتاسیون برای دو پیچک جداگانه کموتاسیون انجام می‌شود.



شکل (۵-۱۷) نمایش کموتاتور با جاروبکها و عمل کموتاسیون

در این شکل سیمهای داخل آرمیچر اتصال سرهای کلافها به تیغه‌های کموتاتور را نشان می‌دهند، خطوط پیوسته اتصال سرهایی را که در بالای شیارها قرار دارند و خطهای شکسته اتصال سرهایی که لبه کلاف آنها کف شیارها قرار دارد را نمایش می‌دهند. خطهایی که در خارج از محیط آرمیچر رسم شده‌اند نمایانگر اتصال انتهای کلافها در عقب ماشین هستند. چنانچه دیده می‌شود جاروبکها در وسط قطبها قرار گرفته‌اند و در این لحظه دو کلاف آرمیچر

را که روی محور خنثی قرار دارند و در نتیجه ولتاژی در آنها القا نمی‌شود اتصال کوتاه نموده‌اند و این دو کلاف در حال کموتاسیون می‌باشند.

۵-۴-۳) تاثیر خود القایی پیچک در کموتاسیون (ولتاژ راکتانسی آرمیچر)

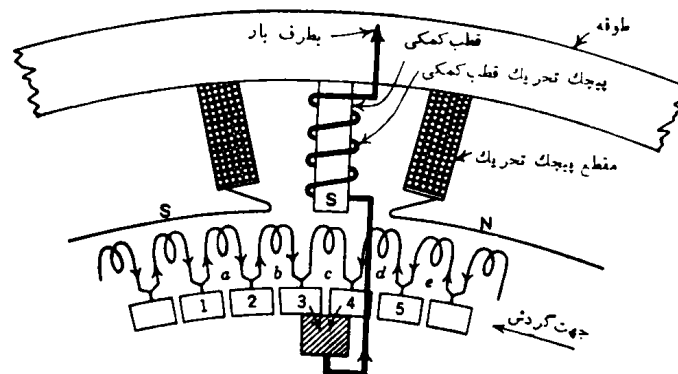
در عمل، به علت خاصیت خود القایی هر پیچک، تغییر جریان در آن (از I_c به صفر و از صفر به $-I_c$) باعث القای ولتاژهایی می‌شود که با تغییرات جریان مخالفت می‌کنند. مقدار (دامنه) این ولتاژ با سرعت معکوس شدن جهت جریان و مقدار I_c متناسب است. افزایش دامنه ولتاژ القایی باعث می‌شود که حتی پس از جدا شدن جاروبک از تیغه کموتاتور جریان در همان جهت و در فاصله هوایی بین آنها بصورت جرقه ادامه می‌یابد. ادامه جرقه‌ها باعث خراب شدن تیغه‌های کموتاتور و خورده شدن جاروبکها می‌شود.

در واقع می‌توان گفت حتی اگر ولتاژ ناشی از حرکت در یک کلاف در حال کموتاسیون القا نشود، ولتاژ حاصل از تغییرات جریان کلاف می‌تواند منجر به کموتاسیون ناموفق بشود. افزایش مقاومت محل اتصال جاروبکها به تیغه‌های کموتاتور می‌تواند تا حدودی به بهبود پدیده کموتاسیون کمک کند اما در عوض افت ولتاژ حالت دائمی روی ذغالها باعث افزایش تلفات توان و گرم شدن ماشین می‌شود.

یک روش مرسوم که در بیشتر ماشینهای dc (بویژه ماشینهای بالاتر از 1KW) به کار می‌رود، استفاده از قطبهای کمکی است. برای اینکه نقش قطب کمکی در بهبود فرآیند کموتاسیون روشن شود تذکر این نکته ضروری است که کموتاسیون موفق در زمانی که جریانی از سیم پیچهای آرمیچر نمی‌گذرد (مثلاً هنگامی که ژنراتور مدار باز است) بدون هیچگونه تمهید اضافه‌ای امکان پذیر است. در عوض هر چه جریان آرمیچر بزرگتر باشد ولتاژ القایی در کلاف‌های آرمیچر در لحظه کموتاسیون بزرگتر خواهد بود (این ولتاژ با سرعت حرکت ماشین نیز متناسب است). ضریب خودالقایی کلافها نیز که تابعی از توان دوم تعداد دور کلافها (N_a^2) است در ماشینهای بزرگ به شدت افزایش می‌یابد. بنابراین در ماشینهای بزرگ، پیر سرعت و با جریان زیاد ولتاژ القایی که با تغییر جریان مخالفت می‌کند، بزرگتر می‌شود. قطبهای کمکی با در نظر گرفتن عوامل موثر بر ایجاد ولتاژ راکتانسی، به گونه‌ای طراحی شده‌اند که در لحظه کموتاسیون ولتاژی را در جهت مخالف هم اندازه با ولتاژ راکتانسی آرمیچر در کلاف تحت کموتاسیون القا نمایند. بنابراین قطبهای کمکی اولاً روی محورهای q نصب می‌شوند (چرا؟) و ثانیاً جریان عبوری از آنها همان جریان آرمیچر است تا ولتاژی که در کلاف القا می‌کنند، همانند ولتاژ راکتانسی آرمیچر، متناسب با جریان آرمیچر باشد.

شکل و ویژگی قطبهای کمکی: قطبهای کمکی دارای هسته کوچکتر از قطبهای اصلی و پیچکهایی با تعداد

دور کمتر و هادی با سطح مقطع بزرگتر هستند.



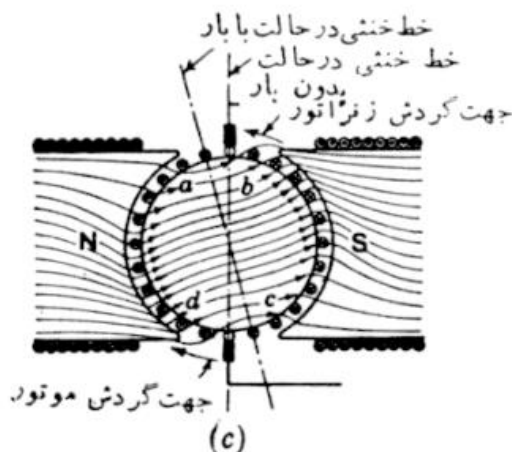
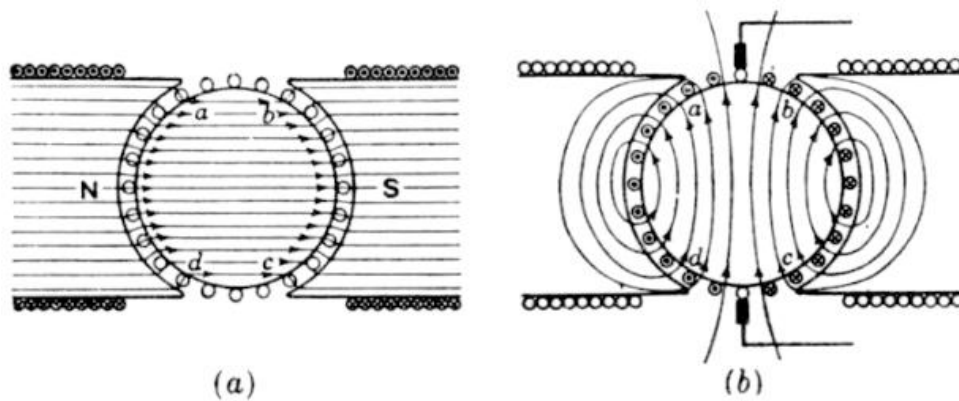
شکل (۵-۱۸) طرز قرار گرفتن قطب کمکی و سیم پیچ تحریک آن

راه دیگری که تا قبل از پیدایش طرح قطبهای کمکی مورد استفاده قرار می گرفت تغییر محل جاروبکها بود که در اینجا از تشریح آن خودداری می کنیم. فقط ذکر این نکته ضروری است که میزان جابجایی جاروبکها بایستی تابعی از جریان آرمیچر باشد و بنابراین اجرای آن با مشکلاتی همراه است. امروزه در ماشینهای کوچک که استفاده از قطب کمکی اقتصادی نیست، هنوز هم از جابجایی جاروبکها استفاده می کنند. در این ماشینها محل جاروبکها برای $\frac{2}{3}$ بار نامی ماشین تنظیم می شود و بدون تغییر باقی می ماند.

۵-۵) عکس العمل آرمیچر و راههای مقابله با آن

۵-۵-۱) توصیف پدیده عکس العمل آرمیچر

تاکنون شار مغناطیسی فاصله هوایی کلاً میدان مغناطیسی موجود در فضای ماشین را ناشی از جریان پیچکهای تحریک دانستیم. در حالیکه، بطور بدیهی، عبور جریان از کلافهای آرمیچر نیز میدان مغناطیسی جدیدی به وجود می آورد که بر شار مغناطیسی کلی ماشین اثر می گذارد. به این پدیده عکس العمل آرمیچر گفته می شود. مسئله ای که باید به آن پاسخ دهیم اینست که اثر عکس العمل آرمیچر بر شار قطب و شار فاصله هوایی چیست؟ برای این منظور یک ماشین دو قطبی را (طبق شکل ۵-۱۹) در نظر می گیریم. هنگامی که هیچ جریانی از سیم پیچ آرمیچر نمی گذرد مسیر خطوط میدان قطبهای بدون اعوجاج همانند شکل (۵-۱۹-a) از فاصله هوایی و هسته آرمیچر می گذرند. در شکل (۵-۱۹-b) فقط شار مغناطیسی ناشی از جریان سیم پیچی آرمیچر نشان داده شده است. جریان در سیم های زیر قطب N رو به بالا و در سیمهای زیر قطب S رو به داخل صفحه است. برآیند خطوط میدان حاصل از دو جریان (جریان تحریک و جریان آرمیچر) در شکل (۵-۱۹-c) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۹) عکس العمل آرمیچر و انحراف شار مغناطیسی قطب

چنانچه دیده می‌شود در نقاط a و c جهت این دو شار مخالف یکدیگر است در صورتی که در نقاط b و d جهت خطوط شار یکی است. در نتیجه جریان آرمیچر باعث تضعیف شار در نقاط a و c و تقویت آن در نقاط b و d می‌گردد. این پدیده چندین تاثیر را به همراه خواهد داشت:

الف - تضعیف شار قطب - در صورتیکه بتوان از اشباع هسته در نقاطی که میدان تقویت می‌شود، صرفنظر کنیم، افزایش میدان در نصف قطب، کاهش آن در نیمه دیگر را جبران می‌کند و در نتیجه شار قطب تغییر نخواهد کرد. اما در عمل به دلیل اشباع هسته در نقاطی که میدان قوی می‌شود، شار قطب در کل، دچار کاهش می‌گردد.

ب - جابجایی محور خنثی - محور خنثی یا صفر در حالتیکه فقط جریان تحریک مورد نظر است درست عمود بر محور طولی قطبها قرار می‌گیرد (محور q). اما در حالتیکه ماشین زیر بار است و جریان آرمیچر وجود دارد، محور خنثی دچار چرخش می‌شود. انحراف محور خنثی در حالت ژنراتوری در جهت گردش آرمیچر و در حالت موتوری در جهت عکس چرخش آن است. و با جریان آرمیچر متناسب می‌باشد.

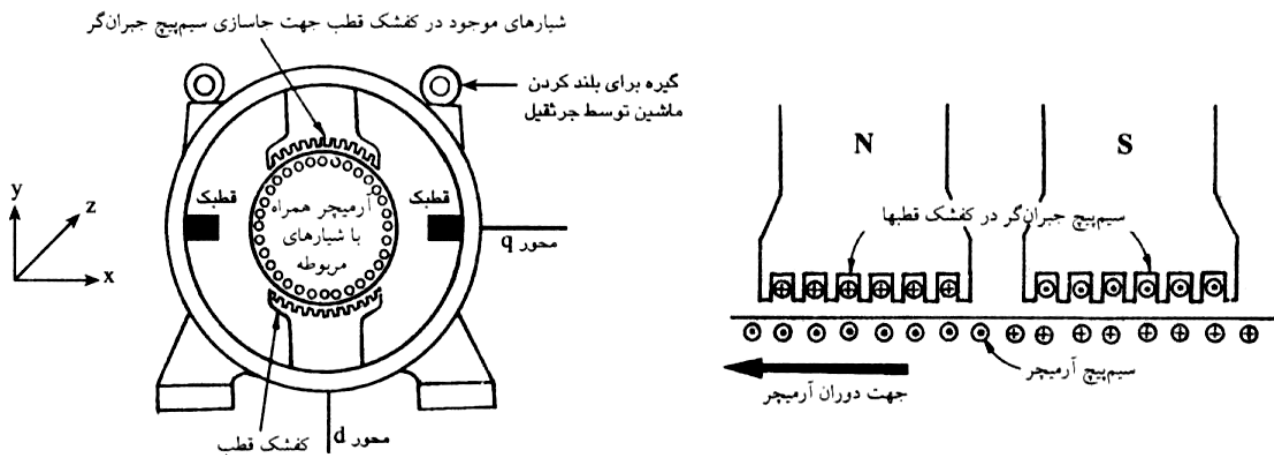
ج - اثر ضد مغناطیسی - اگر ژنراتور فاقد قطب کمکی باشد، پس از زیر بار رفتن ماشین، جاروبکها باید در راستای چرخش ماشین منحرف شوند تا کموتاسیون کامل صورت پذیرد. در این حالت mmf آرمیچر را می‌توان به دو مولفه تجزیه نمود که یکی از این مولفه‌ها درست در جهت معکوس mmf قطب عمل می‌کند و به تضعیف شار قطب می‌انجامد. این تضعیف با میزان جابجایی زاویه‌ای جاروبکها نسبت به محور q (زاویه θ) متناسب است و در نهایت منجر به کاهش ولتاژ القایی و ولتاژ ترمینال ماشین می‌شود.

۵-۵-۲) قطبهای کمکی

مقابله با عکس العمل آرمیچر یکی از مزایای قطبهای کمکی است. در واقع، شار مغناطیسی که در اثر عبور جریان از سیم پیچی آرمیچر تولید می‌شود در جهت عکس شار مغناطیسی قطب کمکی است. چون جهت جریانها در این دو سیم پیچ معکوس است. با این حال این مسئله در کار قطبهای کمکی تاثیری ندارد. زیرا قدرت این قطبها با در نظر گرفتن عکس العمل آرمیچر تعیین می‌شود. با زیاد یا کم شدن جریان، اثر این دو شار به یک نسبت کم یا زیاد می‌شود. بنابراین در صورتیکه ماشین دارای قطب کمکی باشد می‌توان همواره جاروها را همانند حالت بی‌باری روی محور خنثای قطب قرار داد و کموتاسیون بدون مشکل انجام خواهد شد. البته در این حالت نیز شار مغناطیسی به دلیل عکس العمل آرمیچر انحراف خواهد داشت یعنی شار قطب تا حدودی تضعیف خواهد شد.

۵-۵-۳) عکس العمل آرمیچر در بارهای متغیر و نقش سیم پیچ جبرانگر

گفتیم که عکس العمل آرمیچر باعث تغییرات چگالی شار مغناطیسی در ماشین شده و محور صفر میدان را می‌چرخاند. بنابراین اگر ماشینی دارای باری باشد که با زمان تغییرات سریع داشته باشد، تغییرات سریع چگالی شار و محور میدان ولتاژهای بزرگی را در سیم پیچهای آرمیچر القا می‌کند که می‌تواند باعث خرابی عایق‌های ماشین و ایجاد جرقه بر روی کموتاتور بشود. اینگونه ماشینها را به سیم پیچ جبرانگر (یا تعدیل کننده) مجهز می‌کنند که کار آن خنثی کردن عکس العمل آرمیچر است. این سیم پیچ در شیارهایی که در کفشک قطبها جاسازی شده قرار می‌گیرد و با جریان آرمیچر تغذیه می‌شود.



شکل (۲۰-۵) سیم پیچ جبران گر در کفشک قطبها

جریان سیم پیچ جبران گر مساوی و در خلاف جهت جریان آرمیچر است و بنابراین عکس العمل آنرا تا حدود زیادی خنثی می کند. البته تجهیز ماشینها به سیم پیچ جبران گر مستلزم مخارج اضافی است و تلفات اهمی ماشین را دو برابر می کند. در ژنراتورهای بزرگ با بارهای شدیداً متغیر و یا موتورهای که کارهای سنگین صنعتی را انجام می دهند از این سیم پیچ استفاده می شود.

۵-۶) ایجاد گشتاور در ماشینهای dc

همانطور که در فصل چهارم دیدیم گشتاور ایجاد شده در ماشینهای گردان را می توان حاصل تعامل دو میدان مغناطیسی حاصل از mmf استاتور و mmf روتور دانست. همچنین ثابت شد که این گشتاور با مقدار این دو mmf و سینوس زاویه بین آن متناسب است:

$$T = \frac{P}{2} \times \frac{\mu_0}{2} \times \frac{\pi D l}{g} F_s F_r \sin \delta_{sr} \quad (۸-۵)$$

D : قطر متوسط فاصله هوایی

l : طول محوری فاصله هوایی (در راستای محور Z)

g : فاصله هوایی

F_s : mmf حاصل از سیم پیچی استاتور

F_r : mmf حاصل از روتور

آخرین رابطه ای که در فصل پیش بدست آمد رابطه گشتاور را با شار قطب (شار منتهی قطب) ϕ_{rs} و mmf روتور (آرمیچر) به صورت زیر بیان می نماید.

$$T = \pi/2 \left(\frac{P}{2} \right)^2 Q_{sr} F_r \sin \delta_{sr} \quad (۹-۵)$$

اگر رابطه فوق را در مورد ماشین dc در نظر بگیریم می بینیم که زاویه بین دو محور مغناطیسی همواره 90° است. یعنی $\sin \delta_{sr}$ همواره برابر با یک است. از طرف دیگر ϕ_{rs} همان شار قطب در راستای محور d یعنی ϕ_d است و به جای F_r می توان مولفه اصلی mmf مکانی حاصل از آرمیچر (یعنی F_{a1}) را قرار داد. بنابراین با انجام تغییرات لازم معادله (۹-۵) به شکل زیر در خواهد آمد:

$$T = \pi/2 \left(\frac{P}{2} \right)^2 \phi_d F_{a1} \quad (۱۰-۵)$$

در فصل چهارم برای یک ماشین P قطب F_{a1} و پیک آن بدست آمده است که با جاگذاری در رابطه (۵-۱۰) به رابطه (۵-۱۱) می‌رسیم.

$$T = \pi/2 \left(\frac{P}{2} \right)^2 \phi_d \left(\frac{8}{\pi^2} \times \frac{N_a}{P} i_a \right) = \frac{PZ_a}{2\pi a} \phi_d i_a \quad (5-11)$$

$$k_a = \frac{PZ_a}{2\pi a} \quad (5-12)$$

و با فرض

خواهیم داشت:

$$T = k_a \phi_d i_a \quad (5-13)$$

i_a : جریان آرمیچر

Z_a : تعداد کل هادیهای آرمیچر

a : تعداد مسیرهای موازی در سیم‌بندی آرمیچر

k_a : عددی که از روی طرح سیم‌بندی، تعیین می‌شود.

همانطور که در بخش (۵-۳) همین فصل دیدیم متوسط (مقدار یکسو شده) ولتاژ القایی در سیم‌پیچی آرمیچر را نیز می‌توان به صورت $e_a = k_a \phi_d \omega_m$ نوشت (رابطه ۵-۳) از ترکیب این رابطه با رابطه (۵-۱۳) می‌توان دید که:

$$e_a i_a = T \omega_m \quad (5-14)$$

یعنی حاصل ضرب مقدار لحظه‌ای جریان آرمیچر در ولتاژ القایی حاصل از چرخش، (یا همان مقدار لحظه‌ای

توان الکتریکی) با مقدار لحظه‌ای توان مکانیکی روی محور ماشین برابر است. اگر با توجه به مبحث بخش (۵-۳-۵) بتوان ϕ_d را تابعی خطی از i_f دانست در آن صورت:

$$T = k_f i_f \cdot k_a i_a = k_m i_a i_f \quad (5-15)$$

یعنی از یک دیدگاه دیگر می‌توان گشتاور تولیدی را متناسب با حاصل ضرب جریان تحریک و جریان آرمیچر

دانست.

۷-۵) مدار معادل ماشین dc در حالت پایدار (Steady State)

۷-۵-۱) مدار معادل سیستم تحریک

گر چه سیستم تحریک ماشین یک مدار مغناطیسی تک تحریک را تشکیل می‌دهد و در واقع معادل یک سلف اندوکتور و یک مقاومت است اما از آنجا که در حالت مانا فقط جریان dc از سیستم تحریک می‌گذرد رابطه:

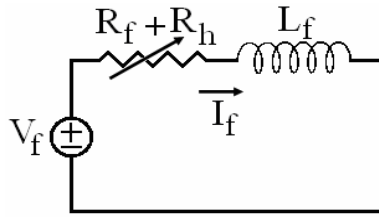
$$V_f = R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \quad (5-16)$$

به صورت زیر خلاصه می‌شود.

$$V_f = R_f I_f \quad (5-17)$$

بنابراین مدار تحریک در حالت پایدار در واقع فقط یک مقاومت خواهد بود. البته در ترسیم، مدار تحریک را به

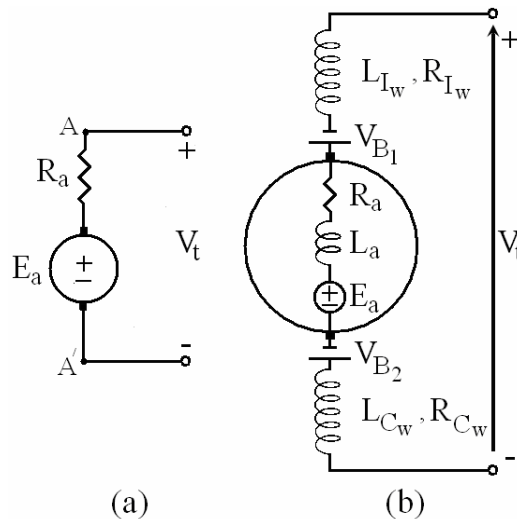
صورت یک سیم‌پیچ نمایش می‌دهیم:



شکل (۲۱-۵) مدل مداری سیستم تحریک ماشین dc

۵-۷-۲) مدار معادل آرمیچر

سیم‌های آرمیچر نیز ترکیبی از یک مقاومت و یک سلف اندوکتور را در هر مسیر موازی ارائه می‌دهند و می‌توان با توجه به تعداد مسیرهای موازی یک سلف و یک مقاومت معادل برای کل مدار آرمیچر در نظر گرفت اما گردش هادیهای آرمیچر و القای ولتاژ در آن که توسط جاروبکها با پلاریته ثابت به بیرون منتقل می‌شود. آرمیچر را به صورت یک منبع ولتاژ dc در می‌آورد. علاوه بر این بایستی مقاومت اهمی سیم‌پیچی را به صورت سری با منبع در نظر گرفت. قطبهای کمکی و سیم‌بندی جبرانگر که سری با آرمیچر بسته می‌شوند در برخی از ترسیمها در دو طرف آرمیچر نشان داده می‌شوند.



شکل (۲۲-۵) مدل مداری آرمیچر ماشین dc

(a) مدل ساده (b) مدل کامل با در نظر گرفتن مقاومتها و سلفها و افت ولتاژ جاروبکها

E_a : منبع ولتاژ dc (ولتاژ القایی در آرمیچر طبق رابطه ۵-۳)

R_a و L_a به ترتیب خاصیت خود القایی و مقاومتی سیم‌پیچی آرمیچر

V_{B1} و V_{B2} : افت ولتاژ روی ذغالها (جاروبکها) معمولاً در حد ۱ تا ۲ ولت

L_{I_w} و R_{I_w} : سلف اندوکتانس و مقاومت اهمی پیچک قطب کمکی

L_{C_w} و R_{C_w} : سلف اندوکتانس و مقاومت اهمی پیچک جبرانگر

البته از آنجا که در حالت پایدار و به خصوص با عملکرد مناسب سیم‌پیچی جبرانگر و قطبهای کمکی اثر راکتانسی و عکس‌العمل آرمیچر حذف می‌شود می‌توان به همان مدار ساده شکل (۵-۲۲-a) اکتفا نمود و مقاومت پیچکهای جبرانگر و قطب کمکی را نیز با R_a جمع نمود و به صورت مقاومت کلی r_a نمایش داد. برای مدل‌سازی افت ولتاژ روی جاروبکها نیز در صورت محدود بودن جریان آرمیچر، می‌توان به مقاومت r_a مقدار متناسبی را اضافه نمود.

فصل ششم - ژنراتورهای جریان مستقیم (Direct Current Generators)

۶-۱) تحلیل عملکرد ژنراتور dc

در این ماشین جریان تحریک (I_f) باعث ایجاد شار ثابت و ساکن در فاصله هوایی می‌شود. قطبهای تحریک، همانطور که در فصلهای پیشین گفته شد، بر روی استاتور نصب شده‌اند. حرکت روتور در فضای داخلی ماشین بوسیله یک محرک مکانیکی، مثلاً توربین، که به آن محرک اولیه می‌گویند، انجام می‌شود. سرعت حرکت معمولاً توسط کنترل‌کننده‌های اضافی، ثابت نگه داشته می‌شود. ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ آرمیچر به کمک کموتاتور و جاروبکهای ذغالی، یکسو شده و به ترمینال (پایانه خروجی) ماشین می‌رسد. (رابطه ۴-۵)

در صورتیکه بار الکتریکی به پایانه ژنراتور وصل شود، جریان مستقیم در بار برقرار می‌شود. این جریان (که همان جریان آرمیچر خواهد بود) باعث ایجاد یک میدان مغناطیسی جدید در فضای ماشین می‌شود که با میدان تحریک تعامل پیدا می‌نماید. تاثیر این دو میدان بر یکدیگر باعث پیدایش یک گشتاور مکانیکی می‌شود که با گشتاور محرک اولیه مقابله کرده و مانع چرخش روتور می‌شود. رابطه (۴-۵) در فصل قبل نشان می‌دهد که این گشتاور با جریان بار نسبت مستقیم دارد. در نتیجه، می‌توان گفت که با افزایش بار، برای اینکه سرعت ماشین ثابت بماند و ماشین از حرکت باز نایستد، بایستی گشتاور مکانیکی محرک با همان نسبت افزایش یابد. بنابراین برای انجام فرآیند تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی وجود میدان ناشی از جریان آرمیچر ضروری است. در فصل قبل دیدیم که میدان آرمیچر اثرات نامطلوبی نیز دارد که به کمک سیم‌پیچ جبرانگر و قطبهای کمکی می‌توان تا حدود زیادی آنها را خنثی کرد.

۶-۲) مشخصه و مقادیر نامی

برای ژنراتور dc معمولاً دو مشخصه مورد بررسی قرار می‌گیرد. مشخصه اول رابطه بین ولتاژ خروجی در حالت بی‌باری ($I_a = 0$) را، به ازای جریانهای تحریک متفاوت، بیان می‌کند. همانطور که قبلاً دیده شد (رجوع کنید به فصل پنجم) این مشخصه، در واقع مشخصه مغناطیسی هسته ماشین است. در نتیجه، می‌توان انتظار داشت که شکل آن نیز شبیه مشخصه مغناطیسی بوده و در منطقه اشباع هسته، ولتاژ خروجی نسبتاً ثابت بماند.

مشخصه دیگری که در ژنراتورها مورد توجه است، تغییرات ولتاژ خروجی در اثر تغییرات جریان آرمیچر ($I_a \neq 0$) می‌باشد. این منحنی در شرایط جریان تحریک ثابت (معمولاً جریان تحریک نامی) و سرعت روتور ثابت (معمولاً سرعت نامی) ترسیم و تحلیل می‌شود.

دو مشخصه اصلی ژنراتور را می‌توان با استفاده از روابط تحلیلی و یا آزمایش ترسیم نمود. برای استفاده از روابط تحلیلی، برخی از ویژگیهای ماشین (مثلاً مقاومت اهمی سیم‌پیچ آرمیچر) بایستی معلوم باشند. این ویژگیها نیز از طریق آزمایش و یا در دست داشتن پارامترهای فیزیکی ماشین قابل تعیین است.

لازم به ذکر است که مشخصه‌های دینامیکی نیز در تحلیل رفتار ماشین مورد توجه قرار می‌گیرند. اما در ژنراتور dc به دلیل وجود ولتاژ و جریانهای dc، مشخصه‌های استاتیک اهمیت بیشتری دارند. در این فصل، منحصراً ماشین و مشخصه‌ها از دیدگاه استاتیک بررسی خواهند شد. بنابراین اثر خود القایی سیم‌پیچها در مقابل جریانهای متغیر با زمان و / یا شرایط ماشین در دوره گذار از یک حالت پایدار به حالت پایدار دیگر در نظر گرفته نخواهند شد. با توجه به مباحث فوق، مقادیر نامی ژنراتور نیز برای حالت پایدار در نظر گرفته می‌شوند. مهمترین مقادیر نامی، که احیاناً بر روی پلاک ماشین هم حک شده‌اند، عبارتند از: ولتاژ نامی (در حالت بی‌باری با سرعت نامی و جریان تحریک نامی)، سرعت نامی (معمولاً به صورت دور در دقیقه)، جریان تحریک نامی، جریان نامی (آرمیچر)، توان نامی (حاصلضرب جریان نامی و ولتاژ نامی)، مقاومت اهمی مدار آرمیچر، ولتاژ نامی تحریک، بازده ماشین در شرایط کار نامی و درصد تنظیم ولتاژ (نسبت افت ولتاژ ترمینال ماشین در حالت بار کامل)

۳-۶) روشهای اتصال آرمیچر و مدار تحریک

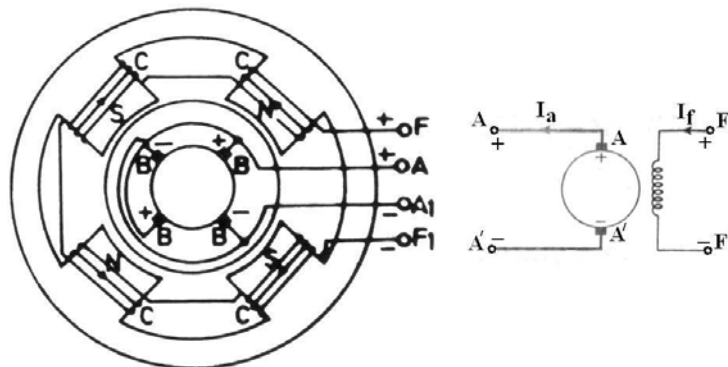
در ژنراتور dc، قبل از اینکه بتوان ولتاژی در پایانه‌های خروجی بدست آورد، بایستی میدان تحریک و شار قطب در فضای ماشین ایجاد شده باشد. بجز در مورد ژنراتورهای کوچک dc (همانند دینام دوچرخه)، میدان و شار قطب توسط سیم‌پیچ تحریک تولید می‌شود. بنابراین، سیم‌پیچ میدان را باید با جریان مستقیم تحریک کرد تا عملکرد ماشین به صورت ژنراتور امکان پذیر گردد.

به طور کلی دو روش جهت تغذیه سیم‌پیچ تحریک ژنراتورها (و موتورها)ی dc وجود دارد:

- تحریک جداگانه (مستقل)
- تحریک خودی

۱-۳-۶) مدار تحریک مستقل ژنراتور

پیچک تحریک مستقل شامل صدها دور سیم نازک می‌باشد که به منبع خارجی (مستقل) متصل شده است. ولتاژ این منبع کاملاً از ولتاژ آرمیچر مستقل است و می‌توان با سری کردن یک رئوستا در مدار تحریک، جریان تحریک را به خوبی کنترل و تنظیم نمود. سیم‌پیچ تحریک مستقل معمولاً با ولتاژی در حد ولتاژ نامی ماشین تحریک می‌شود و به دلیل مقاومت اهمی بزرگی که دارد، جریان نامی تحریک بسیار کمتر از جریان نامی ماشین خواهد بود. نمایش ساده شده یک ماشین dc با ۴ قطب در شکل (۱-۶-a) و نمودار طرحواره‌ای مدارهای الکتریکی ماشین در حالت تحریک مستقل در (۱-۶-b) دیده می‌شود.



شکل (۱-۶) مدار الکتریکی ژنراتور با تحریک مستقل
 (a) نمایش ساختاری (b) نمایش مداری

۶-۳-۲) مدار تحریک خودی ژنراتور

هنگامی که برای تحریک قطب از ولتاژ تولید شده توسط آرمیچر ماشین استفاده می‌شود، به چنین ماشینی، ماشین dc خود تحریک گفته می‌شود. از آنجا که برای تولید ولتاژ چرخشی، وجود شار قطب ضروری است، در اینگونه ماشینها، قطبهای میدان باید قبل از تحریک توسط جریان I_f ، دارای خاصیت مغناطیسی، گرچه بسیار کم، باشند. این شرط با استفاده از خاصیت پسماند (هیستریزیس) هسته قطب محقق می‌شود. در واقع، هسته قطب، همواره قبل از شروع به کار ژنراتور، چگالی شار ضعیفی را در فاصله هوایی برقرار می‌کند. با شروع چرخش روتور، این شار ولتاژی را در آرمیچر القا می‌نماید که به آن "ولتاژ پسماندی" گفته می‌شود. این ولتاژ باعث عبور جریان از پیچک تحریک شده و شارقطب را تقویت می‌نماید. در نتیجه ولتاژ بزرگتری در آرمیچر القا شده و دامنه جریان تحریک و شار قطب مرتباً افزایش می‌یابند. در حالت عادی، این فرآیند تا رسیدن ماشین به شرایط نامی ادامه خواهد یافت.

اتصال الکتریکی بین پیچک تحریک و سیم پیچ آرمیچر در ژنراتورهای خود تحریک به ۳ شکل متفاوت انجام می‌شود. این ۳ نوع اتصال عبارتند از اتصال سری، اتصال موازی (شنت) و اتصال مرکب (کمپوند)

مدار تحریک سری ژنراتور

در این نوع اتصال، سیم پیچ تحریک با سیم پیچ آرمیچر سری می‌شود و جریان آرمیچر از درون سیم پیچ تحریک باید بگذرد. در نتیجه سیم پیچ سری با تعداد دور کم سیم ضخیم ساخته می‌شود. بدیهی است که در صورت مدار باز بودن ژنراتور، جریانی از سیم پیچ آرمیچر عبور نکرده و ولتاژ ترمینال در این حالت از ولتاژ پسماندی بیشتر نخواهد شد. به عبارت دیگر، تولید ولتاژ در ژنراتور سری، مشروط به اتصال بار به پایانه‌های خروجی آن است.

مدار تحریک شنت ژنراتور

اگر سیم پیچ روی قطب تحریک با مدار آرمیچر موازی شود، ماشین با تحریک شنت بدست می‌آید. از آنجا که ولتاژ نامی آرمیچر بر روی پیچک تحریک قرار می‌گیرد، این پیچک، همانند پیچک تحریک مستقل، با تعداد دور زیاد سیم نازک ساخته می‌شود. سیم پیچ تحریک شنت در مقایسه با سیم پیچ تحریک سری دارای مقاومت زیاد و جریان نامی کم است. اما چگالی شار ایجاد شده توسط این دو نوع پیچک در شرایط نامی ماشین، می‌تواند یکسان باشد. (چرا؟)

در واقع، شرایط و ساختار پیچک تحریک شنت همانند پیچک تحریک جداگانه است و در یک ماشین dc با یک سیم پیچ می‌توان هر یک از تحریکهای شنت یا مستقل را ایجاد نمود. برای کنترل جریان تحریک در حالت اتصال شنت، می‌توان از یک رئوستای سری با آن، بهره جست.

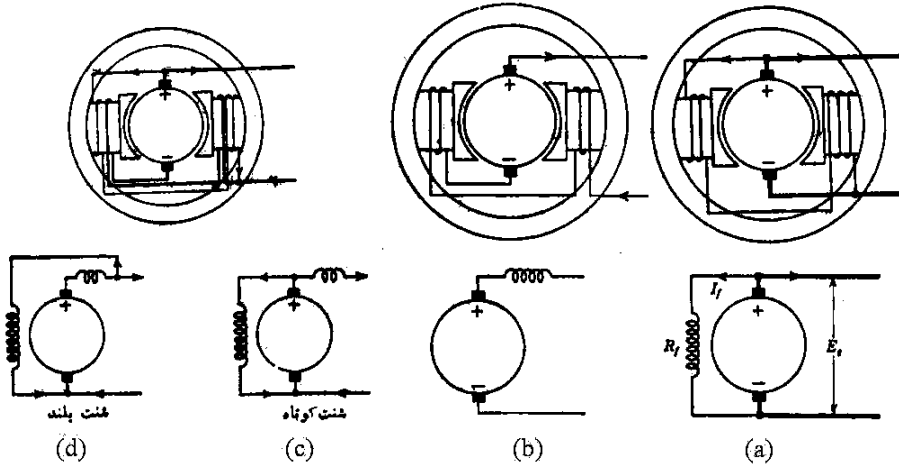
مدار تحریک کمپوند ژنراتور

تحریک کمپوند شامل هر دو نوع سیم پیچ (سری و شنت) است و قطبهای ماشین دارای دو نوع پیچک هستند. مدار تحریک کمپوند به چند صورت مختلف ممکن است بسته شود:

- اگر شار حاصل از سیم پیچ سری در جهت شار سیم پیچ شنت باشد (و آن را تقویت کند). مدار تحریک را "کمپوند اضافی" می‌نامند.
- اگر جهت جریان در سیم پیچ سری طوری باشد که شار حاصل از آن با شار حاصل از سیم پیچ تحریک شنت مقابله کند، مدار تحریک "کمپوند نقصانی" بدست می‌آید.

- در هر دو نوع تحریک کمپوند (اضافی یا نقصانی)، سیم پیچ شنت را می توان موازی با آرمیچر و یا موازی با اتصال متوالی آرمیچر و پیچک تحریک سری بست. حالت اول "کمپوند با شنت کوتاه" و حالت دوم "کمپوند با شنت بلند" خواهد بود.

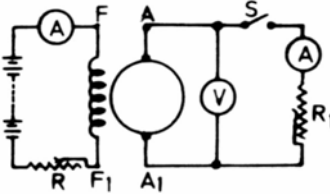
بنابراین، چهار حالت مدار تحریک کمپوند عبارتند از: کمپوند اضافی با شنت کوتاه، کمپوند اضافی با شنت بلند، کمپوند نقصانی با شنت کوتاه و بالاخره کمپوند نقصانی با شنت بلند. شکلهای مختلف اتصال تحریک در ژنراتور خود تحریک dc در شکل (۲-۶) ارائه شده است.



شکل (۲-۶) انواع اتصالهای مدار تحریک در ژنراتور dc خود تحریک
 (a) اتصال شنت (b) اتصال سری (c) اتصال کمپوند با شنت کوتاه (d) اتصال کمپوند با شنت بلند

۴-۶ ژنراتور dc با تحریک جداگانه

مدار الکتریکی این ژنراتور در شکل (۳-۶) دیده می شود. جریان مدار تحریک با رئوستای تحریک (R_f) کنترل می شود و بار توسط کلید S به آرمیچر وصل می گردد. همانطور که قبلاً گفته شد، برای این ژنراتور دو مشخصه اصلی در حالت کارکرد پایدار مورد توجه است که عبارتند از مشخصه بی باری و مشخصه بارداری.



شکل (۳-۶) مدار الکتریکی ژنراتور با تحریک مستقل به همراه بار و دستگاههای اندازه گیری لازم

۱-۴-۶ ژنراتور تحریک مستقل در وضعیت بی باری

اگر مدار خارجی آرمیچر را باز نگهداشته و روتور را با سرعت معینی بچرخانیم، بسته به میزان جریان تحریک، ولتاژی در پایانه های آرمیچر ظاهر می شود که به ولتاژ مدار باز یا بی باری موسوم است. این ولتاژ از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$E = k_A \phi_p \omega_m \quad (1-6)$$

و چون ϕ_p در این وضعیت صرفاً تابع جریان تحریک (I_f) است. می توان نوشت:

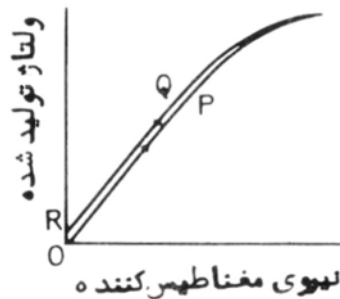
$$E = k_A \phi(I_f) \omega_m \quad (2-6)$$

و اگر ω_m را ثابت فرض کنیم، با توجه به اینکه k_A ثابت ساختاری ماشین است. خواهیم داشت:

$$E = f_{(I_f)} \approx kI_f \quad (۳-۶)$$

یعنی با توجه به فرضیات مسئله، ولتاژ بی‌باری فقط تابعی از جریان تحریک ژنراتور است. در واقع، تا وقتی که هسته به اشباع نرفته است رابطه E و I_f خطی بوده و سپس به علت اشباع هسته، مشخصه به تدریج افقی می‌شود. (شکل ۴-۶)

مسئله‌ای که در اینجا بایستی مورد تاکید قرار گیرد اینست که هرگاه جریان تحریک را که روند افزایشی داشته، کم کنیم، منحنی E در حالت بازگشت با منحنی حالت رفت (منحنی متناظر با افزایش I_f) کاملاً منطبق نخواهد بود. به ویژه، وقتی که جریان تحریک صفر می‌شود، ولتاژ به صفر نمی‌رسد. دلیل این پدیده، این است که هسته آهنی که آهنربا شده است پس از حذف جریان تحریک مقداری از خاصیت آهنربایی خود را حفظ کرده است (شار پسماند) و بنابراین ولتاژ ایجاد شده در این حالت همان ولتاژ پسماندی است که در ژنراتورهای خود تحریک، وجود آنها را لازم دانستیم. (V_R در شکل ۴-۶)



شکل (۴-۶) مشخصه بی‌باری ژنراتور dc با تحریک مستقل

بدیهی است در صورتیکه تغییرات E برحسب ω_m (در شرایط شار ثابت یعنی I_f ثابت) را بررسی کنیم یک خط راست با شیب $k_A \phi_p$ بدست خواهد آمد که اهمیت زیادی در تحلیل رفتار ماشین ندارد و معمولاً به عنوان یک مشخصه در نظر گرفته نمی‌شود.

مثال ۶-۱- در یک ژنراتور dc با تحریک مستقل ولتاژ بی‌باری ماشین در شرایط آزمایش ۳۰۰۷ است. اگر سرعت ماشین را $۱/۵$ برابر کرده و جریان تحریک را به نصف تقلیل دهیم، ولتاژ ژنراتور در حالت بی‌باری چقدر خواهد شد؟ از اشباع آهن صرف‌نظر کنید.
حل:

$$E_1 = k_A \phi_1 \omega_1 \quad E_2 = k_A \phi_2 \omega_2$$

$$E_2 = E_1 \left(\frac{\phi_2}{\phi_1} \cdot \frac{\omega_2}{\omega_1} \right) = E_1 \left(\frac{I_{f2}}{I_{f1}} \cdot \frac{\omega_2}{\omega_1} \right) = 300(0.5)(1.5) = 225v$$

سؤال - اگر بخواهیم علی‌رغم $۱/۵$ برابر شدن سرعت، ولتاژ بی‌باری در همان ۳۰۰۷ ثابت بماند، جریان تحریک بایستی به چه نسبتی تغییر نماید؟

۴-۶-۲) ژنراتور تحریک مستقل در وضعیت بارداری

هنگامی که پایانه آرمیچر به بار وصل می‌شود جریانی در مدار متشکل از آرمیچر و بار برقرار می‌شود که کاملاً مستقل از جریان تحریک است. اگر شرایط اولیه (قبل از وصل کلید S در شکل (۳-۶)) شرایط نامی باشد و ولتاژ نامی

E در حالت بی‌باری در ترمینالهای آرمیچر پدید آمده باشد، با توجه به وجود مقاومت سیم‌بندی آرمیچر (R_a) و مقاومت بار (R_L) می‌توان نوشت:

$$V_L = V_t = E - R_a I_a = R_L I_L \quad (۴-۶)$$

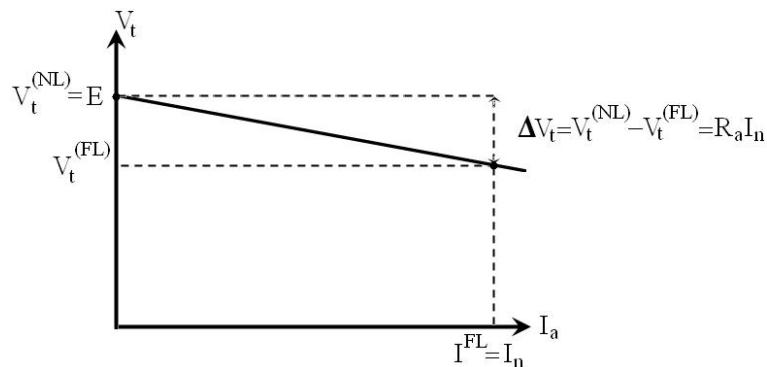
که در این رابطه، V_L ولتاژ دو سر بار، V_t ولتاژ ترمینال ماشین در حالت بارداری، I_a جریان آرمیچر و I_L جریان بار است. بدیهی است که در این اتصال I_a با I_L برابر است.

تفاوت بین ولتاژ مدار باز و ولتاژ بارداری ماشین ناشی از وجود مقاومت آرمیچر است. قبلاً دانستیم که این مقاومت می‌تواند مدلی از مقاومت‌های سیم‌بندی آرمیچر، سیم‌پیچ قطبهای کمکی، سیم‌پیچ جبرانگر و مقاومت محل اتصال جاروبکها به کموتاتور باشد. بهر حال، دیده می‌شود که با افزایش جریان بار، فاصله ولتاژ ترمینال ژنراتور با ولتاژ مدار باز بیشتر و بیشتر می‌شود. این تفاوت را درصد تنظیم ولتاژ می‌نامند (Percent of voltage Regulation = PVR) که با تغییر جریان بار، تغییر می‌کند. معمولاً PVR را برای بار نامی مشخص می‌کنند و آنرا با $PVR^{(FL)}$ ، یعنی PVR در شرایط بار کامل (Full Load)، نمایش می‌دهند:

$$PVR^{(FL)} = \frac{V_t^{(NL)} - V_t^{(FL)}}{V_t^{(FL)}} \times 100 \quad (۵-۶)$$

در این رابطه $V_t^{(FL)}$ ولتاژ ترمینال در حالت بی‌باری (مدار باز) یا همان E است، در حالی که $V_t^{(NL)}$ نمایانگر ولتاژ ترمینال در حالتی است که جریان نامی از ژنراتور کشیده می‌شود.

مشخصه خروجی ژنراتور یا همان منحنی ($V_t - I_a$) دومین مشخصه‌ای است که مورد توجه قرار می‌گیرد. با توجه به روابط (۴-۶) و (۵-۶) می‌توان این مشخصه را برای ژنراتوری که با جریان تحریک نامی تحریک شده و در سرعت نامی می‌چرخد بدست آورد. (شکل ۵-۶)

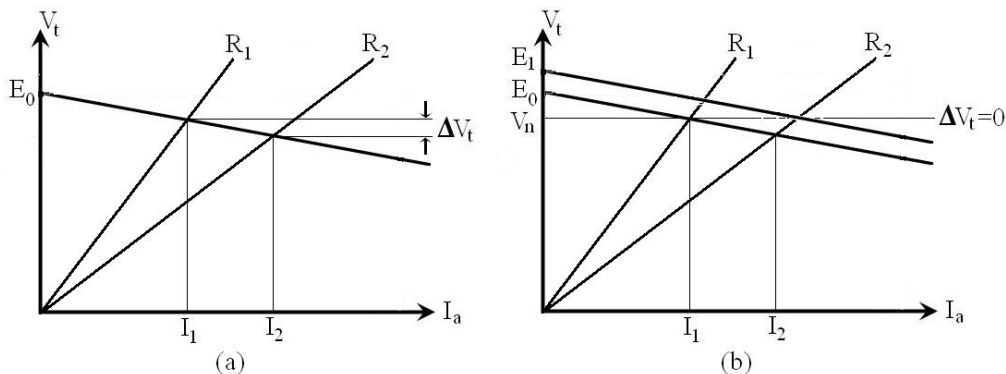


شکل (۵-۶) مشخصه بارداری ژنراتور dc با تحریک مستقل در سرعت و جریان تحریک نامی

کنترل ولتاژ ژنراتور

در بسیاری از کاربردهای صنعتی، لازم است که دامنه ولتاژ خروجی ژنراتور در تغییرات جریان بار ثابت بماند. هنگامی که ژنراتور با جریان تحریک ثابت و سرعت ثابت در حال کار است، مشخصه ($V_t - I_a$) آن ثابت بوده و مشخصه ($V-I$) بار است که نقطه کار و در نتیجه افت ولتاژ $R_a I_a$ و درصد تنظیم ولتاژ را تعیین می‌نماید. بنابراین، برای ثابت ماندن V_t لازم است که مشخصه ($V_t - I_a$) ژنراتور متناسب با تغییرات جریان I_a تغییر نماید تا ولتاژ ثابتی در ترمینال آن وجود داشته باشد. صرفنظر از حالت گذرای ماشین، این امر با توجه به معادلات (۱-۶) و (۴-۶) با کنترل جریان تحریک یا کنترل سرعت (و یا هر دو) به سادگی امکان‌پذیر است. اما به دلیل سهولت و سرعت پاسخ ماشین و کنترلر، معمولاً کنترل تحریک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این سیستم، جریان تحریک، متناسب با افزایش جریان بار، افزایش می‌یابد. در نتیجه E (یا ولتاژ مدار باز ژنراتور) زیاد می‌شود. اگر R_a را ثابت فرض کرده و از حالت گذرا (افت

ولتاژ روی راکتانس آرمیچر) صرفنظر کنیم، مشخصه $(V_t - I_a)$ جدید بدون تغییر شیب و موازی با مشخصه اصلی ولی با عرض از مبدا بزرگتر خواهد بود. افزایش عرض از مبدا خط جدید توسط کنترلر و با توجه به بار تعیین می‌شود تا ولتاژ ترمینال در محدوده مطلوب باقی بماند.



شکل (۶-۶) تنظیم ولتاژ حالت بارداری با تنظیم جریان تحریک

چنانچه در شکل (۶-۶) دیده می‌شود، اگر جریان بار تغییر کند ولتاژ ماشین به اندازه ΔV_t افت پیدا می‌کند. برای جبران‌سازی این افت لازم است که مشخصه خروجی ماشین به سمت بالا شیفت نماید. این شرط با تغییر (افزایش) I_f ارضا شده است. افزایش I_f در حدی انجام شده که افت ولتاژ در تغییر جریان بار از I_1 به I_2 کاملاً جبران‌سازی شده و ولتاژ ترمینال ماشین ثابت باقی بماند.

مثال ۶-۲- در یک ژنراتور dc با تحریک مستقل، مقاومت مدار آرمیچر 0.15Ω است. وقتی که جریان تحریک $1A$ ، سرعت روتور 1200 rpm و جریان آرمیچر $50A$ است، ولتاژ ترمینال ماشین $300V$ است. اگر در همین سرعت بخواهیم یک مقاومت 3Ω اهمی را تغذیه کنیم و ولتاژ ترمینال همان $300V$ باقی بماند، جریان تحریک را باید روی چه آمپراژی تنظیم کنیم؟ این کار چگونه انجام می‌شود؟ (از اثر اشباع هسته صرفنظر نمائید).
حل: در حالت اول با توجه به رابطه (۴-۶) می‌توانیم بنویسیم:

$$E_0 = V_t + R_a I_a = 300 + (0.15)(50) = 307.5V$$

اگر یک مقاومت 3Ω به ترمینال ژنراتور وصل شده و ولتاژ ترمینال $300V$ باشد. جریان آرمیچر عبارتست از:

$$I_a = I_L = \frac{300}{3} = 100A$$

حال اگر رابطه (۴-۶) را برای این حالت بنویسیم، ولتاژ مدار باز جدید بدست می‌آید:

$$E_1 = V_t + R_a I_{a_2} = 300 + (0.15)(100) = 315V$$

چون سرعت را ثابت فرض کرده‌ایم، تغییر E ، حاصل تغییر در I_f است، از آنجا که از اثر اشباع صرفنظر شده و

رابطه I_f با ϕ_p خطی است، پس خواهیم داشت:

$$\frac{E_1}{E_0} = \frac{I_{f_2}}{I_{f_1}} \Rightarrow I_{f_2} = \frac{E_0}{E_1} I_{f_1} = \frac{307.5}{315} \times 1 = 0.976A$$

تغییر جریان تحریک، به سادگی با تغییر در رئوستایی که با پیچک تحریک، سری شده است امکان‌پذیر می‌باشد.

سؤال - اگر با کنترل جریان تحریک بتوانیم ولتاژ ترمینال ماشین ارائه شده در مثال فوق را در محدوده $I_a = 0$ تا $I_a = 100A$ ثابت نگهداریم، درصد تنظیم ولتاژ ماشین در چه محدوده‌ای تغییر خواهد نمود؟

۳-۴-۶) تلفات و بازده در ژنراتورهای dc با تحریک مستقل

اگر تمام توان (و انرژی) تحویل داده شده به روتور و سیستم تحریک ماشین، تبدیل به انرژی الکتریکی خروجی بشود، ماشین ایده‌ال و بدون تلفات بوده و بازده آن صددرصد خواهد بود. اما، ماشین‌های واقعی همواره مقداری تلفات دارند. این تلفات گر چه در نهایت به صورت انرژی گرمایی ظاهر می‌شود، اما مبدا و عامل ایجاد آنها متفاوت است و بایستی جداگانه تحلیل و بررسی شوند.

تلفات مسی

این تلفات به عبور جریان dc از سیم‌پیچهای ماشین مربوط می‌شود. بنابراین مقاومت اهمی این سیم‌پیچها و جریان عبوری از آنها، میزان این تلفات را معین می‌کنند. در یک ژنراتور تحریک مستقل تلفات اهمی (یا مسی) سیم‌پیچ تحریک و سیم‌پیچ آرمیچر بترتیب عبارت خواهند بود از:

$$P_{cu_f} = R_f I_f^2 \quad (۶-۶)$$

$$P_{cu_a} = R_a I_a^2 \quad (۷-۶)$$

بدیهی است که در حالت بی‌باری تلفات مسی آرمیچر صفر خواهد شد.

تلفات مکانیکی

این تلفات از دو مولفه اصلی تشکیل می‌شود. یکی از این مولفه‌ها حاصل اصطکاک مکانیکی تکیه‌گاهها با محور چرخان روتور است. این اصطکاک را به کمک بیرینگهای ساچمه‌ای و یاتاقانهای گرافیتی یا روغنکاری شده کاهش می‌دهند. همچنین یک اصطکاک مکانیکی کوچک بین ذغالها و تیغه‌های کموتاتور، در اثر حرکت روتور ایجاد می‌شود که تلفات اصطکاکی را افزایش می‌دهد. این تلفات را گاهی با P_{fr} نمایش می‌دهند.

مولفه دیگر تلفات مکانیکی، حاصل اصطکاک قسمتهای چرخان موتور با هوا است. به این تلفات، تلفات حاصل از تهویه (بادخوری) می‌گویند. در صورتیکه ماشین به پنکه انتهایی جهت خنک‌سازی مجهز باشد، تلفات این بخش نیز در مجموعه تلفات بادخوری محسوب می‌شود. این تلفات را با P_{wi} می‌توان نمایش داد. اگر تلفات مکانیکی را با P_{mech} نمایش دهیم، خواهیم دید که:

$$P_{mech} = P_{fr} + P_{wi} \quad (۸-۶)$$

تلفات مکانیکی در کل ناشی از چرخش روتور ماشین است. البته تلفات ناشی از چرخش منحصر به تلفات مکانیکی نیست بلکه، بخشی از تلفات چرخشی است. بخش دیگر تلفات چرخشی، تلفاتی است که در هسته آهنی ماشینهای dc به دلیل پدیده هیستریزس و جریانهای گردابی پیش می‌آید.

تلفات هسته آرمیچر

هسته آرمیچر نیز همانند سیم‌پیچهای آرمیچر، هادی است. بنابراین چرخش روتور در فضای ماشین باعث القای ولتاژ در قسمتهای آهنی آن می‌شود. این ولتاژ جریانهایی را در هسته ایجاد می‌نماید که به جریانهای گردابی یا فوکو شهرت دارند. بسته به مقاومت مسیر و دامنه این جریانها، تلفات در هسته ایجاد شده و به صورت گرما ظاهر می‌شود. گفتیم که موقر ساختن هسته به کاهش این تلفات کمک می‌کند. این تلفات را با P_{ed} نمایش می‌دهیم.

حرکت هسته آرمیچر به صورت چرخشی است بنابراین قطبهای مغناطیسی آرمیچر دائماً در حال تغییر هستند. این پدیده دقیقاً همان اثری را در هسته دارد که هسته ساکن در معرض شار متناوب ac قرار گیرد. یعنی تلفات هیستریزس در این حالت هم در هسته ایجاد می‌گردد. تلفات هیستریزس بخش دوم تلفات هسته آرمیچر ناشی از چرخش روتور در فضای بین قطبهای تحریک است و با P_{hy} نمایش داده می‌شود.

تلفات هسته قطبها و یوغ استاتور ناچیز هستند (چرا؟) و در محاسبه تلفات هسته نقش چندانی ندارند. در نتیجه "تلفات آهنی" ماشین منحصر به تلفات هسته آرمیچر شده و آنرا با P_{core} نشان می‌دهیم:

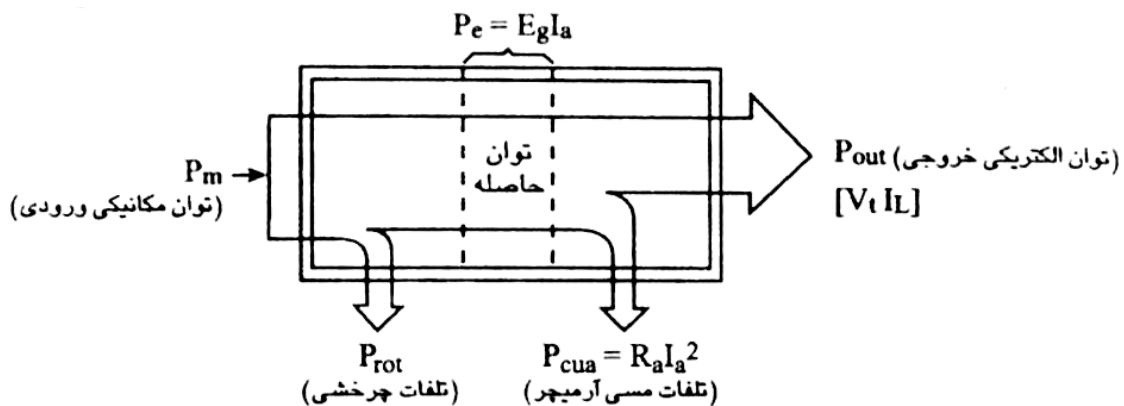
$$P_{core} = P_{ed} + P_{hy} \quad (۹-۶)$$

"تلفات چرخشی" یا "سرگردان" جمع تلفات هسته و تلفات مکانیکی است:

$$P_{rot} = P_{mech} + P_{core} \quad (۱۰-۶)$$

نمودار پخش توان

اگر تلفات پیچک تحریک را در نظر نگیریم، اساساً می‌توان فرض کرد که کل توان ورودی به ماشین، توان مکانیکی اعمال شده بر محور روتور است. توان خروجی ژنراتور نیز توانی است که به صورت الکتریکی در پایانه‌های ماشین دریافت می‌گردد. مراحل انتقال توان و تلفات آن در این مسیر تبدیل و انتقال را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:



شکل (۷-۶) نمودار پخش توان برای ژنراتور dc تحریک مستقل در حالت بارداری

بازده

بازده ماشین را در شرایط بارداری و با جریان تحریک معین چنین تعریف می‌کنیم:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (۱۱-۶)$$

P_{out} : توان الکتریکی خروجی P_{in} : توان مکانیکی ورودی

تفاوت بین توان ورودی و توان خروجی، همان تلفات ماشین است (P_{loss}) و می‌توان نوشت:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100 = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{rot} + P_{cua}} \times 100 \quad (۱۲-۶)$$

و بالاخره با قرار دادن ولتاژها و جریانها به جای توانها:

$$\eta = \frac{V_t I_L}{V_t I_L + R_a I_a^2 + P_{rot}} \times 100 \quad (۱۳-۶)$$

تلفات چرخشی را می‌توان تقریباً مستقل از جریان آرمیچر دانست. در واقع این تلفات به سرعت چرخش و به شار قطب بستگی دارند و بنابراین در شرایط کار عادی ماشین ثابت هستند. در مقابل $R_a I_a^2$ قرار دارد که مستقیماً به I_a مربوط بوده و در بی‌باری صفر می‌شود. به این دلیل تلفات چرخشی را "تلفات ثابت" و تلفات آرمیچر را "تلفات متغیر" هم نامیده‌اند.

بازده ماکزیمم

رابطه (۶-۱۳) نشان می‌دهد که بازده ماشین به ولتاژ ترمینال (V_t) و جریان بار (I_L) وابسته است. در شرایط سرعت نامی و جریان تحریک نامی که P_{rot} ثابت است، برای تعیین شرایط بازده ماکزیمم بایستی تغییرات بازده نسبت به تغییرات V_t و I_L محاسبه شود. در عمل، می‌توان V_t را نیز ثابت فرض نمود. (و یا با کنترل مناسب آنرا ثابت نگه داشت.) در این صورت بازده ماکزیمم با مشتقگیری از رابطه (۶-۱۳) نسبت به I_L بدست می‌آید:

$$\frac{\partial \eta}{\partial I_L} = 0 \Rightarrow R_a I_L^2 = P_{rot} \quad (۶-۱۴)$$

یعنی بازده ماکزیمم در شرایطی حاصل می‌شود که تلفات ثابت و تلفات متغیر ماشین برابر باشند. در این

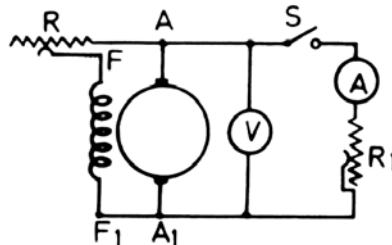
حالت:

$$I_L = \sqrt{\frac{P_{rot}}{R_a}} \quad (۶-۱۵)$$

$$\eta_{max} = \frac{V_t}{V_t + 2\sqrt{R_a P_{rot}}} \times 100 = \frac{V_L}{V_L + 2R_a I_L} \times 100 \quad (۶-۱۶)$$

۵-۶) ژنراتور dc با تحریک شنت

نحوه اتصال مدار الکتریکی آرمیچر و تحریک این ماشین در شکل (۶-۸) دیده می‌شود. در اینجا هم یک مقاومت متغیر با پیچک تحریک سری شده تا کنترل جریان تحریک امکان‌پذیر باشد. در این اتصال، بدون نیاز به منبع خارجی و بدون اینکه لزوماً باری به ترمینال ژنراتور وصل باشد، امکان تولید ولتاژ وجود دارد.



شکل (۶-۸) مدار الکتریکی ژنراتور dc با تحریک شنت

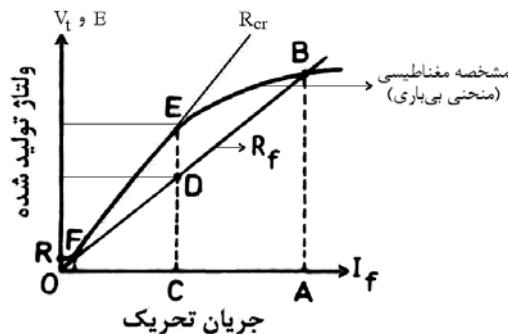
قبلاً ذکر کردیم که تولید ولتاژ در این ژنراتور مشروط به وجود شار پسماند قطب است. توانی که سیستم تحریک ماشین خواهد گرفت از ۲ تا ۳ درصد ظرفیت ژنراتور تجاوز نمی‌کند. بنابراین مقاومت مدار تحریک در این ژنراتورها زیاد است و سیم‌پیچ مدار تحریک معمولاً از تعداد دور زیاد سیم نازک تشکیل می‌شود.

۶-۵-۱) ژنراتور dc تحریک شنت در حالت بی‌باری

فرآیند ولتاژسازی (Voltage Build-Up=VBU)

در شرایطی که ژنراتور همانند شکل (۶-۸) بسته شده و کلید S باز است، اگر روتور با سرعت نامی چرخانده شود. در لحظه اول که $I_f = 0$ است تنها ولتاژ حاصل از پسماند در آرمیچر القا می‌شود. این ولتاژ به دلیل اینکه مستقیماً با مدار تحریک موازی شده است جریان کوچکی را در این سیم‌پیچ به راه می‌اندازد و در نتیجه شار قطب افزایش می‌یابد. افزایش شار قطب در سرعت ثابت افزایش ولتاژ القایی در آرمیچر می‌شود و این ولتاژ به نوبه خود I_f را افزایش می‌دهد. این فرآیند در ژنراتور شنت بی‌بار دائماً تکرار می‌شود تا بالاخره ولتاژ بی‌باری متناسبی در خروجی

ترمینال حاصل گردد. در طی فرآیند ولتاژسازی، رنوستای مدار تحریک در مقدار معینی تثبیت می‌شود. نقطه کار نهایی این فرآیند محل تلاقی منحنی مغناطیسی ماشین با مشخصه V-I مقاومت مدار تحریک است. شکل (۹-۶) این مطلب را واضح می‌سازد.



شکل (۹-۶) مشخصه بی‌باری ژنراتور dc با تحریک شنت و نقطه کار پایدار آن

چنانچه در این شکل دیده می‌شود، مشخصه حالت پایدار مدار تحریک بصورت یک خط راست در صفحه V-I نشان داده شده است:

$$V_t = R_f I_f \quad (۱۷-۶)$$

از طرف دیگر، مشخصه مغناطیسی هسته، رابطه بین ولتاژ القایی و جریان تحریک را نشان می‌دهد. در حالت پایدار (پس از طی دوره VBU) و در حالت بی‌باری، تنها جریان گذرنده از آرمیچر، همان جریان تحریک خواهد بود که طبق رابطه (۳-۶) ولتاژ E را در آرمیچر القا می‌نماید. بنابراین در حالت پایدار و بی‌بار رابطه زیر برقرار است:

$$V_t = E - R_a I_f = V_f = R_f I_f \quad (۱۸-۶)$$

$$(E = k_A \phi_p \omega_m = k_0 I_f)$$

تفاوت بین ولتاژ تولیدی (مشخصه مغناطیسی) با ولتاژی که روی R_f افت پیدا می‌کند، در دوره‌ای که I_f هنوز به مقدار A نرسیده است، متناظر با ولتاژ راکتansı مدار تحریک می‌باشد. بعنوان مثال برای حالتی که I_f در نقطه C (شکل ۹-۶) است خواهیم دید که:

$$CD = R_f I_f \quad \text{و} \quad DE = L_f \frac{dI_f}{dt} \quad (۱۹-۶)$$

به هر حال، منحنی مشخصه $E - I_f$ تقریباً همانند مشخصه $E - I_f$ ژنراتور تحریک مستقل است و کلاً به مشخصه مغناطیسی ماشین بستگی دارد. تنها تفاوت این دو مشخصه در این است که در حالت تحریک شنت، به علت وجود شار پسماند، ولتاژ تولید شده در $I_f = 0$ برابر صفر نمی‌باشد.

نقش شار پسماند و پلاریته ولتاژ القایی پسماندی

اگر نحوه اتصال سیم‌پیچ تحریک شنت به ترمینالهای آرمیچر و یا جهت گردش روتور متناسب نباشند، پلاریته ولتاژ القایی پسماند طوری خواهد بود که جریان عبوری از پیچک تحریک شار پسماند را به صفر می‌رساند در نتیجه پس از آن ولتاژی در آرمیچر القا نشده و فرآیند VBU متوقف خواهد شد. در این حالت بایستی ابتدا ماشین را، فرضاً با روش تحریک مستقل، راه‌اندازی نمود تا شار پسماند در آن ایجاد شود و سپس با رعایت پلاریته مناسب سرهای سیستم تحریک را با آرمیچر موازی کرد.

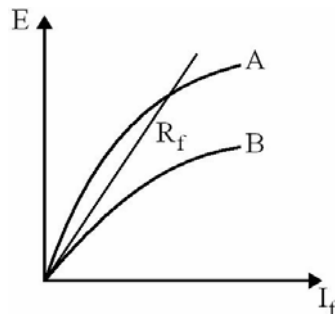
اثر مقاومت تحریک در فرآیند ولتاژسازی و مقاومت بحرانی

با مراجعه به شکل (۹-۶) می‌توان دید که اگر شیب خط OB (مقاومت R_f) از خط مماس بر منحنی مشخصه در نقطه F بیشتر باشد، ولتاژ القایی پسماندی جریانی را در پیچک تحریک برقرار می‌نماید که شار حاصل از آن نسبت

به شار پسماند افزایشی ندارد. در واقع، اگر نقطه تلاقی مشخصه R_f و مشخصه مغناطیسی در محدوده R-F منحنی باشد، فرآیند افزایش ولتاژ، اتفاق نخواهد افتاد. به همین دلیل مقاومت رئوستای تحریک در هنگام راه‌اندازی ژنراتور تحریک نبایستی بیش از حد بزرگ باشد. به مقاومت متناظر با خط مماس بر منحنی بی‌باری، "مقاومت بحرانی" گفته می‌شود و برای امکان کار ماشین، بایستی R_f کوچکتر از مقاومت بحرانی (R_{cr}) انتخاب شود.

اثر سرعت چرخش و سرعت بحرانی

دیدیم که مشخصه بی‌باری ماشین تابعی از ثابتهای ماشین (k_A)، شار قطب (ϕ_p) و سرعت چرخش (ω_m) است. حال در شرایطی که مدار تحریک شنت با R_f ثابت به دو سر آرمیچر وصل است، می‌توان شرایطی را پیش‌بینی نمود که با تغییر سرعت و کاهش آن، امکان VBU از بین برود. این وضعیت در شکل (۶-۱۰) نشان داده شده است. در این شکل، مشخصه A برای سرعت معین (فرضاً ω_m) و مشخصه B برای سرعت $\frac{\omega_m}{2}$ ترسیم شده است. دیده می‌شود که حالت اول امکان VBU وجود دارد (چرا؟). در وضعیت دوم، بدون تغییر R_f ، این امکان وجود ندارد. بر همین اساس، برای هر R_f معین یک سرعت حداقلی وجود دارد که با سرعت کمتر از آن، VBU اتفاق نخواهد افتاد. این سرعت را سرعت بحرانی (ω_{cr}) گویند.



شکل (۶-۱۰) تاثیر سرعت روتور در فرآیند VBU

۶-۵-۲) ژنراتور dc با تحریک شنت در حالت بارداری

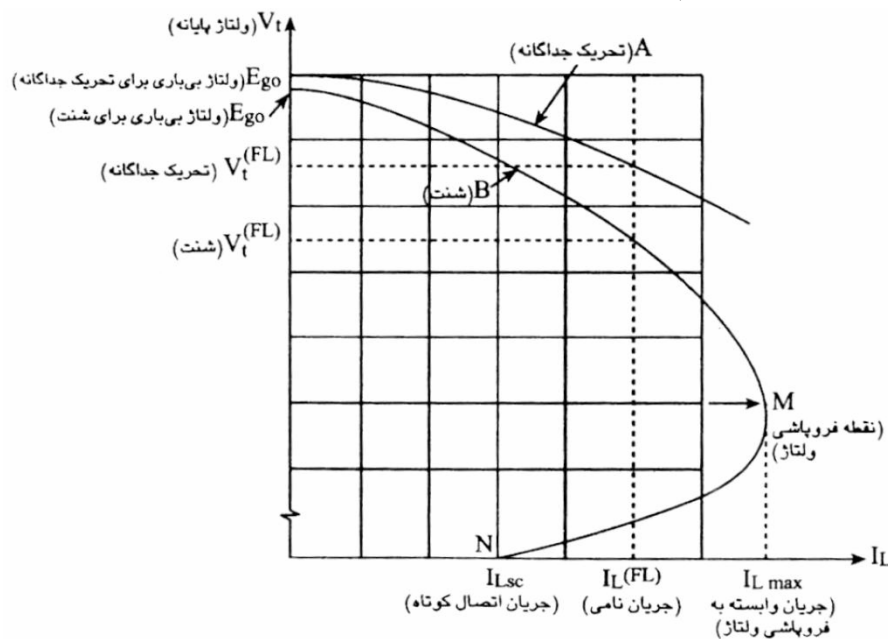
بهره‌برداری از ژنراتور شنت پس از VBU امکان‌پذیر است. اساساً برای تسریع در فرآیند ولتاژسازی، ماشین را به صورت بی‌باری راه‌اندازی می‌کنند و سپس بار را به ماشین متصل می‌نمایند. فرض کنید این روند در مورد ژنراتور شکل (۶-۸) انجام شده و کلید S بسته می‌شود. بررسی شرایط افت ولتاژ ماشین در این حالت به سادگی حالت تحریک مستقل نیست. چرا که هرگونه افت ولتاژ در ترمینالهای ماشین به کاهش جریان تحریک نیز منجر خواهد شد. اولین نتیجه‌ای که می‌توان از این بحث گرفت این است که افت ولتاژ ژنراتور شنت، در شرایط یکسان بارگیری، از افت ولتاژ ژنراتور تحریک مستقل بیشتر است:

$$V_t = R_f I_f = R_L I_L = E - R_a I_a = E - R_a (I_f + I_L) \quad (۶-۲۰)$$

مسئله دیگر و مهمتر این است که E در این رابطه ثابت نیست و تابعی از I_f می‌باشد. لذا منحنی تغییرات ولتاژ ترمینال ماشین با تغییرات جریان آرمیچر را باید با توجه به منحنی بی‌باری ماشین ترسیم نمود. این روش ترسیمی در شکل (۶-۱۱) ارائه شده است:

باعث می‌شود که جریان بار نیز کم شده و در نتیجه افت ولتاژ بر روی مقاومت آرمیچر کم شده و ولتاژ ترمینال بازسازی شود و جریان تحریک در یک نقطه کار جدید تثبیت گردد. اما اگر مقاومت بار بیش از حد کوچک باشد، حتی با کاهش ولتاژ ترمینال نیز جریانی خواهد کشید که با احتساب افت ولتاژ روی R_a ، I_f کمتر از لحظه قبل شود. این فرآیند فیدبک مثبت تا صفر شدن ولتاژ ترمینال (و در نتیجه I_f و در نتیجه E) ادامه خواهد یافت. (شکل ۶-۱۲)

یکی از ویژگیهای مهم ژنراتور شنت با توجه به شکل (۶-۱۲) و توضیحات فوق این است که این ژنراتور در برابر اتصال کوتاه پایانه‌های خروجی دارای حفاظت ذاتی است. در واقع به محض اینکه در پایانه‌ها اتصال کوتاهی رخ دهد ولتاژ مدار تحریک صفر شده و ژنراتور ولتاژی تولید نخواهد کرد. در این شکل مشخصه V-I ژنراتور تحریک مستقل نیز ارائه شده است. چنانکه مشاهده می‌شود افت ولتاژ برای I_a معین در ژنراتور شنت بزرگتر است و هر چه I_a (و I_L) بزرگتر باشد این اختلاف چشمگیرتر خواهد بود.



شکل (۶-۱۲) مشخصه V-I (خروجی) ژنراتور شنت و ژنراتور مستقل

تنظیم ولتاژ

با توجه به رابطه (۶-۲۰) و همانطور که در شکل (۶-۱۲) مشاهده می‌شود درصد تنظیم ولتاژ در یک بار مفروض I_L برای ژنراتور شنت بزرگتر از PVR یک ژنراتور تحریک مستقل است. رابطه تنظیم ولتاژ در این ژنراتور نیز همانند ژنراتور مستقل تعریف می‌شود:

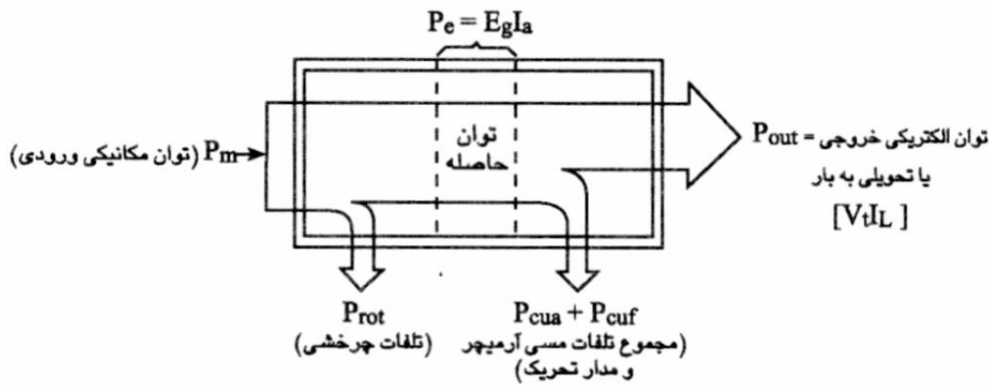
$$PVR = \frac{V_t^{NL} - V_t^{FL}}{V_t^{FL}} \times 100 \quad (۶-۲۲)$$

نکته قابل ذکر این است که در ژنراتور شنت نیز می‌توان با کنترل I_f درصد تنظیم ولتاژ را بهبود بخشید و از این نظر تفاوت چندانی با ژنراتور تحریک مستقل وجود ندارد.

۶-۵-۳ تلفات و بازده ژنراتور شنت

تلفات در ژنراتورهای شنت تقریباً همانند تلفات در ژنراتورهای تحریک مستقل است، با این تفاوت که در ژنراتور تحریک مستقل، تلفات مسی آرمیچر در حالت بی‌باری صفر است. این تلفات برای ژنراتور شنت بی‌بار گرچه صفر نیست اما مقدار ناچیزی دارد که قابل صرف‌نظر است. تفاوت دیگر این است که در ژنراتور شنت تلفات اهمی سیستم

تحریک نیز توسط توان ورودی مکانیکی تامین می‌شود. در ژنراتور مستقل منبع تحریک V_f این تلفات را متحمل می‌شود. نمودار پخش توان در ژنراتور شنت در شکل (۶-۱۳) دیده می‌شود.



شکل (۶-۱۳) نمودار پخش توان و تلفات در ژنراتور شنت

بازده

با توجه به نکات گفته شده، بازده ژنراتور شنت باردار تحت تحریک مفروض چنین تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} = \frac{V_t I_L}{V_t I_L + R_a I_a^2 + R_f I_f^2 + P_{rot}} \quad (۶-۲۳)$$

$$(I_a = I_L + I_f \approx I_L)$$

مثال ۶-۳- در یک ژنراتور dc، منحنی بی‌باری در سرعت 1500 rpm با رابطه زیر تقریب زده می‌شود:

$$E = 60 + 150\sqrt{I_f}$$

مقاومت مدار تحریک 90Ω و مقاومت مدار آرمیچر 0.5 اهم است. مطلوبست محاسبه مقادیر ذیل در حالیکه مدار تحریک به صورت شنت بسته شده و سرعت روتور 1500 rpm باشد.

الف - ولتاژ ترمینال در حالت بی‌باری

ب - ولتاژ تولید شده و ولتاژ ترمینال در جریان $I_a = 120 \text{ A}$

ج - حداکثر جریان آرمیچر

د - جریان اتصال کوتاه ژنراتور

حل:

$$E \approx V_t = R_f I_f$$

الف- در حالت بی‌باری:

$$\Rightarrow 60 + 150\sqrt{I_f} = 90I_f \Rightarrow I_f = 4 \text{ A}$$

$$\Rightarrow V_t = 60 + 150\sqrt{4} = 360 \text{ V}$$

$$E - R_a I_a = V_t$$

ب-

$$\Rightarrow 60 + 150\sqrt{I_f} - (120)(0.5) = 90I_f \Rightarrow I_f = \left(\frac{150}{90}\right)^2 \text{ A}$$

$$V_t = V_f = 90I_f = (90)\left(\frac{150}{90}\right)^2 = 250 \text{ V}$$

$$\Rightarrow E = 60 + 150\left(\frac{150}{90}\right) = 310 \text{ V}$$

$$R_a I_a = E - V = 60 + 150\sqrt{I_f} - 90I_f$$

ج-

$$\frac{d(R_a I_a)}{dI_f} = 0 \Rightarrow \frac{75}{\sqrt{I_f}} - 90 = 0 \Rightarrow I_f = \left(\frac{75}{90}\right)^2$$

$$R_a I_a = 60 + 150 \left(\frac{75}{90}\right)^2 - 90 \left(\frac{75}{90}\right) = 122.5$$

$$I_a = \frac{122.5}{0.5} = 245A$$

$$\text{در این نوع اتصال کوتاه } I_f = 0 \Rightarrow E = 60V, V_t = 0$$

$$R_a I_a = E - V = 60 + 0 = 60V$$

$$I_a = \frac{60}{0.5} = 120A$$

-۵

۶-۶) ژنراتور dc با تحریک سری

در این نوع اتصال که در شکل (۶-۱۴) نشان داده می‌شود، مدار تحریک برخلاف مدار تحریک شنت یا جداگانه دارای تعداد دور کم سیم ضخیم است تا در عبور دادن جریان آرمیچر افت ولتاژ زیادی روی آن ایجاد نشود. به وضوح می‌توان دید که در این ژنراتور جریان آرمیچر، جریان تحریک و جریان بار برابرند:

$$I_a = I_f = I_L \quad (۶-۲۴)$$

۶-۶-۱) فرآیند ولتاژسازی در ژنراتور سری

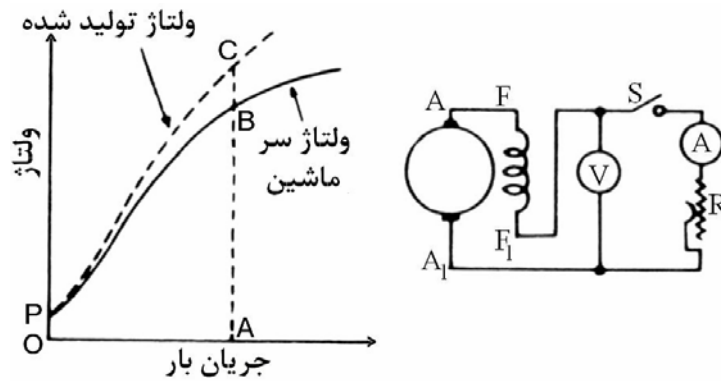
در اینجا نیز فرآیند تولید ولتاژ مستلزم وجود شار تحریک و چرخش روتور است و شار اولیه قطبها شرط لازم برای شروع پدیده VBU است. اما وجود شار پسماند به تنهایی برای تولید ولتاژ در این مدار کافی نیست. به بیان واضح‌تر، در صورتیکه ولتاژ پسماندی از طریق یک مدار سری متشکل از بار، آرمیچر و پیچک تحریک جریانی را از داخل مدار تحریک عبور ندهد ولتاژ تولیدی اولیه افزایش نخواهد داشت. بنابراین، برای تحقق پدیده VBU بایستی مدار ژنراتور سری بسته باشد وگرنه ژنراتور سری در حالت مدار باز قادر به ایجاد ولتاژ نخواهد بود. نتیجه دیگری که از این مبحث می‌توان گرفت این است که در ژنراتور سری مشخصه بی‌باری نمی‌توان داشت. گرچه می‌توان منحنی مغناطیسی هسته ماشین را با تحریک مستقل بدست آورد.

۶-۶-۲) مشخصه‌های ژنراتور dc سری

تنها مشخصه‌ای که در ژنراتور سری مورد بحث قرار می‌گیرد مشخصه V-I (رابطه ولتاژ ترمینال با جریان بار) است. در این ماشین رابطه بین جریان و ولتاژ را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$V_t = E - (R_a + R_f)I_L = R_L I_L \quad (۶-۲۵)$$

از طرفی می‌دانیم که در سرعت ثابت $E \approx kI_f = kI_L$ یعنی ولتاژ تولید شده تابع جریان بار است و با افزایش آن، بطور نسبتاً خطی افزایش خواهد یافت. (این مشخصه با مشخصه یک ژنراتور ایده‌آل بسیار فاصله دارد). افت ولتاژ بر روی مقاومت آرمیچر نیز همانند سایر ژنراتورها تابع جریان آرمیچر (و جریان بار) است. بنابراین مشخصه تقریبی ولتاژ جریان ماشین را می‌توان به شکل زیر نشان داد:



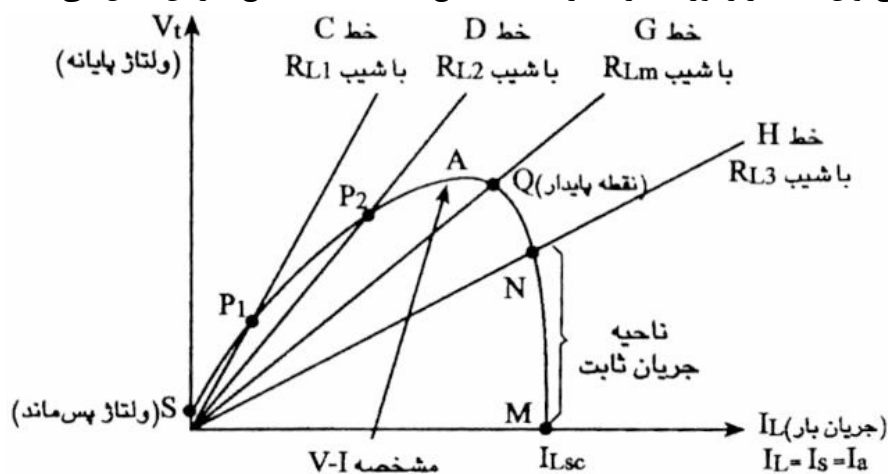
شکل (۶-۱۴) نحوه اتصال سیستم و مشخصه ژنراتور سری dc

مقاومت بحرانی

مقاومت متغیر مدار تحریک در ژنراتور سری، در واقع همان مقاومت بار است. بزرگ یا کوچک بودن این مقاومت بر جریان عبوری از میدان تحریک تاثیر می‌گذارد. این تاثیر به ویژه در هنگام ولتاژسازی دارای اهمیت می‌شود. چرا که، اگر این مقاومت به حدی بزرگ باشد که ولتاژ پسماندی نتواند جریان حداقلی را در مدار سری برقرار کند، شار تحریک افزایش نیافته و ولتاژی تولید نخواهد شد. بنابراین در مورد ژنراتور سری نیز مقاومت بحرانی تعریف شده و مقاومت بار در هنگام راه اندازی نباید از مقدار بحرانی بزرگتر باشد.

نقطه بازگشت مشخصه V-I

منحنی ولتاژ تولید شده ماشین سری همانند مشخصه سایر ماشینها نمایانگر رابطه $E = k_f(I_f)$ است که یک منحنی مغناطیس شونده با قابلیت اشباع را شامل می‌شود. مشخصه خروجی نیز مطابق رابطه (۶-۲۵) رابطه ولتاژ ترمینال با I_L را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه این است که در یک محدوده معین، با افزایش E ، افت ولتاژی روی پیچک تحریک و سیم‌های آرمیچر با همان سرعت E رشد نمی‌کنند و در نتیجه V_t روند افزایشی خواهد داشت. اما در یک مقاومت بار معین جریان بار (همان جریان تحریک) به حدی می‌رسد که مدار تحریک به اشباع رفته و با افزایش جریان، شار مغناطیسی افزایش قابل ملاحظه‌ای ندارد. در این وضعیت ولتاژ القایی ماشین ثابت می‌ماند. پس از این اگر مقاومت بار کاهش بیشتری داشته باشد سقوط ولتاژ ترمینال ماشین آغاز می‌شود. (ناحیه QM در شکل ۶-۱۵) این افزایش بار (کاهش R_L) می‌تواند تا $R_L = 0$ (اتصال کوتاه ماشین) ادامه یابد. در محدوده QM جریان بار تقریباً ثابت می‌ماند. بنابراین می‌توان گفت ژنراتوری سری در حالت اشباع همانند یک منبع جریان عمل می‌کند.



شکل (۶-۱۵) مشخصه کاملتر V-I یک ژنراتور سری

دیورتور Divertor

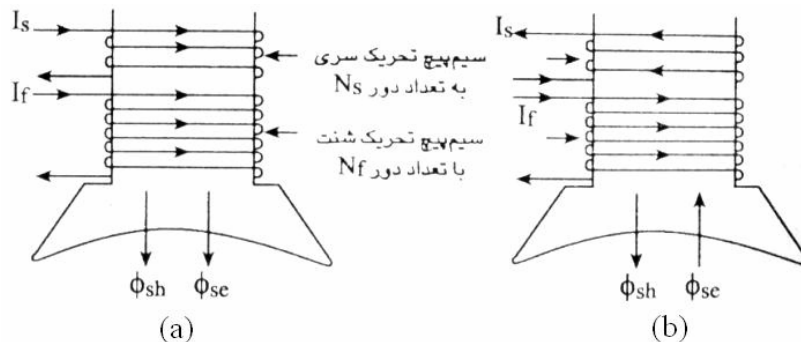
برای کنترل جریان تحریک در ژنراتور سری می‌توان یک مقاومت را با آن سری نمود. اما این راه‌حل منجر به افزایش شدید افت ولتاژ در پایانه ژنراتور خواهد گردید و تلفات ژنراتور را نیز بطور قابل ملاحظه‌ای زیاد خواهد کرد. راه‌حل مرسوم، استفاده از یک مقاومت متغیر است که با سیم‌پیچ تحریک سری، موازی می‌شود. به این مقاومت دیورتور می‌گویند. در بررسی دقیق تلفات توان در ژنراتور، تلف در مقاومت دیورتور هم باید در نظر گرفته شود.

۶-۷ ژنراتور dc با تحریک کمپوند

تحریک کمپوند، ترکیبی از تحریک شنت و سری است و بنابراین در شرایط بی‌باری همانند ژنراتور شنت عمل می‌کند (چرا؟) و در حالت بارداری، منحنی آن ترکیبی از دو منحنی ژنراتور شنت و ژنراتور سری خواهد بود. چنانکه گفته شد شار قطب پیچک سری می‌تواند در جهت شار پیچک شنت یا مخالف با آن باشد که در حالت اول کمپوند اضافی و در حالت دوم کمپوند نقصانی حاصل می‌شود:

$$\phi_p = \phi_{sh} \pm \phi_{se} \quad (۶-۲۶)$$

هر دوی این سیم‌پیچها بر روی قطبهای اصلی ماشین بسته شده و ترمینال‌بندی آنها بستگی به نوع کمپوندی دارد که مورد نظر طراح می‌باشد. طرحواره پیچکهای سری و شنت بر روی پایه قطب در شکل‌های (۶-۱۶a) و (۶-۱۶b) دیده می‌شود.

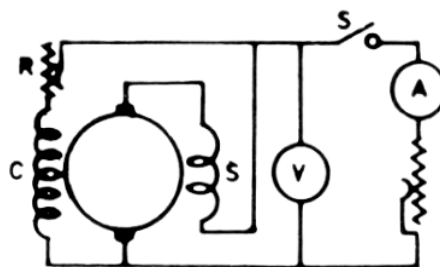


شکل (۶-۱۶) نحوه قرار گرفتن و جریان عبوری پیچکهای سری و شنت در ژنراتور کمپوند اضافی (a) و ژنراتور کمپوند نقصانی (b) همچنین، برای ژنراتور شنت بلند (نقصانی و اضافی) رابطه جریانه‌ها و ولتاژها را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$I_a = I_{f_{se}} = I_{f_{sh}} + I_L \quad (۶-۲۷)$$

$$V_L I_L = V_t = V_{f_{sh}} = E - (R_a + R_{se}) I_a \quad (۶-۲۸)$$

مدار الکتریکی یک ژنراتور با شنت بلند در شکل (۶-۱۷) ارائه شده است.



شکل (۶-۱۷) مدار الکتریکی ژنراتور کمپوند با شنت بلند

در ژنراتور کمپوند شنت کوتاه خواهیم داشت:

$$I_a = I_{f_{sh}} + I_L = I_{f_{sh}} + I_{f_{se}} \quad (۲۹-۶)$$

$$V_L I_L = V_t = V_{f_{sh}} + V_{f_{se}} = E - (R_a + R_{se}) I_a \quad (۳۰-۶)$$

۶-۷-۱) فرآیند ولتاژسازی در ژنراتور کمپوند و مشخصه بی باری ژنراتور

ژنراتور کمپوند شنت کوتاه

تولید ولتاژ در حالت مدار باز در این ژنراتور کاملاً شبیه ژنراتور شنت معمولی است و پیچک تحریک سری هیچ نقشی در این فرآیند ندارد (چرا؟). بنابراین، نقصانی یا اضافی بودن ماشین، مزیت یا محدودیت اضافه‌ای را فرآیند ایجاد نکرده و شرایطی همچون مقاومت بحرانی، سرعت بحرانی باید رعایت شوند.

ژنراتور کمپوند شنت بلند

در این نوع اتصال و در حالت مدار باز (بی باری) از پیچک تحریک سری هم جریان خواهد گذشت. طبیعی است که اگر دو سیم پیچ تحریک بصورت اضافی بسته شده باشند، شار تحریک تقویت شده و فرآیند VBU تسهیل می‌گردد. اما بایستی توجه داشت که در حالت بی باری جریان تحریک شنت (که مقدار کمی است) از پیچک سری نیز عبور کرده و بنابراین نقش mmf این بخش به دلیل تعداد کم دورهای آن قابل چشم پوشی است. به عبارت دیگر، مشخصه بی باری ژنراتور کمپوند شنت بلند نیز تفاوت زیادی با مشخصه بی باری ژنراتور شنت ندارد و نکاتی که در مورد مقاومت بحرانی و سرعت بحرانی در VBU برای ژنراتور شنت گفته شد در اینجا نیز اعتبار دارد.

۶-۷-۲) ژنراتور کمپوند در حالت بارداری

به تعبیری می‌توان گفت که ژنراتور کمپوند، نوع بهبود یافته‌ای از ژنراتور شنت است که برای کاهش PVR و ثابت نگهداشتن V_t در محدوده بی باری تا بار کامل، از سیم پیچ سری در تحریک آن بهره گرفت شده است. بنابراین، انتظار می‌رود که شار سیم پیچ سری در حالت بارداری، شار پیچک شنت را تقویت کرده و مانع از افت ولتاژ شود. یعنی ژنراتور از نوع کمپوند اضافی باشد.

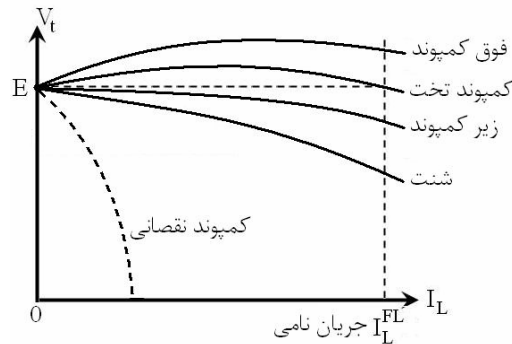
ژنراتور کمپوند اضافی در حالت بارداری

به عنوان مثال اگر ژنراتور شنت بلند شکل (۶-۱۷) را در حالت اضافی در نظر بگیریم، در حالت بارداری، روابط (۶-۲۷) و (۶-۲۸) را خواهیم داشت. دیده می‌شود که با افزایش بار (افزایش I_L)، I_a و سپس $I_a(R_a + R_{se})$ افزایش می‌یابند و این مسئله به کاهش V_t می‌انجامد. اما بایستی توجه داشت با افزایش I_L ، I_{se} زیاد شده و E نیز بزرگتر خواهد شد. در اینجا ۳ حالت ممکن است پیش آید:

- حالت اول: اگر تعداد دورهای مدار تحریک سری کم باشد، mmf آن کوچک بوده و شار حاصل از جریان سری نیز کم می‌باشد. در نتیجه افزایش دامنه E ناشی از افزایش I_{se} در حدی نیست که افزایش $I_a(R_a + R_{se})$ را جبران کرده و ولتاژ V_t را در بارداری ثابت نگه دارد. در این وضعیت گفته می‌شود تحریک ژنراتور در حالت "زیر کمپوند" است. البته وجود تحریک سری باعث خواهد شد که مشخصه ژنراتور حتی در وضعیت زیر کمپوند از مشخصه ژنراتور شنت افت کمتری داشته باشد. (به شکل ۶-۱۸ توجه کنید)

- حالت دوم: اگر تعداد دور سیم پیچ سری در حدی باشد که افت ولتاژ بین حالت بی‌باری و بار کامل، صفر باشد یعنی ولتاژ ترمینال در بار کامل با ولتاژ بی‌باری یکسان باشد، گفته می‌شود که ژنراتور از نوع "کمپوند تخت" است. این وضعیت نیز در شکل (۶-۱۸) نشان داده شده است.

- حالت سوم: اگر تعداد دور سیم پیچ سری بیش از حالت کمپوند تخت طراحی و انتخاب شده باشد، با افزایش بار ولتاژ تحریک سری نه تنها افت ولتاژ تحریک شنت را جبران‌سازی کرده بلکه باعث می‌شود که V_t از ولتاژ بی‌باری نیز بیشتر شود. این وضعیت، "فوق کمپوند" نامیده می‌شود.



شکل (۶-۱۸) مشخصه‌های بارداری انواع ژنراتور کمپوند اضافی در مقایسه با ژنراتور شنت (مشخصه کمپوند نقصانی با خط-نقطه نشان داده شده است).

ژنراتور کمپوند نقصانی در حالت بارداری

این نوع سیم‌بندی به وضوح عملکرد ژنراتور در حالت بارداری را بدتر می‌نماید و بنابراین کاربرد عملی برای ژنراتور کمپوند نقصانی وجود ندارد. مشخصه این ژنراتور برای مقایسه بر روی شکل (۶-۱۸) نشان داده شده و تحلیل آن به دانشجویان محترم واگذار می‌گردد.

۶-۷-۳) تلفات و بازده در ژنراتور dc کمپوند اضافی

برای این ژنراتور، در حالت بارداری، تلفات مسی از ۳ بخش تشکیل می‌شود: تلفات در آرمیچر، در پیچک تحریک سری و در پیچک تحریک شنت و رابطه بازده ماشین به صورت زیر در می‌آید:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100 = \frac{V_t I_L}{V_t I_L + P_{rot} + P_{cu_a} + P_{cu_{sh}} + P_{cu_{se}}} \quad (۶-۳۱)$$

اگر مدار تحریک سری به همراه دیورتور باشد، باید کل تلفات مسی مدار مزبور در نظر گرفته شود.

۶-۸) موارد استفاده از ژنراتورهای dc

با پیشرفت تکنولوژی نیمه‌هادیها، از اهمیت ژنراتورهای dc به شدت کاسته شده است. تولید برق متناوب ارزانتر و آسانتر از برق مستقیم و انتقال و توزیع آن نیز امکان‌پذیرتر است. بنابراین برای تهیه برق dc به جای ژنراتور dc از یکسوکننده‌های نیمه هادی استفاده می‌شود. در برخی از نیروگاههای برق، هنوز هم از ژنراتورهای dc شنت برای تغذیه مدار تحریک ژنراتور سنکرون (مولد اصلی نیروگاه) استفاده می‌شود. ژنراتورهای سری در دوره‌ای که از برق مستقیم برای برق رسانی شهرها استفاده می‌شده است، کاربرد داشته و امروز کاملاً منسوخ شده‌اند. در واقع می‌توان گفت ژنراتورهای dc از مدتها پیش جای خود را به ژنراتورهای ac داده‌اند و یکسوکننده‌ها نیز وظیفه تبدیل ac به dc برای بارهایی که نیاز به برق dc دارند را انجام می‌دهند.

فصل هفتم - موتورهای جریان مستقیم و اصول راه اندازی و کنترل دور آنها

۱-۷) تحلیل عملکرد موتور dc

موتور dc یک نوع مبدل EM دو تحریکه با حرکت دورانی است. جریان مدار تحریک (میدان مغناطیسی قطب) و جریان مدار آرمیچر هر دو توسط منبع ولتاژ بیرونی ایجاد می‌شوند. مدار تحریک یک شار ثابت و ساکن در فاصله هوایی ایجاد می‌نماید. هنگامی که آرمیچر توسط منبع بیرونی تغذیه شده و جریان در هادیهای آن به راه افتاد، نیرو (و گشتاور) وارده از طرف میدان تحریک به هادی‌های حامل جریان آرمیچر باعث چرخش آرمیچر می‌شود. این نیرو همانطور که در فصل ۵ گفته شد با شار تحریک و جریان آرمیچر متناسب است:

$$T_m = k_A \phi_p I_a \quad (1-7)$$

چرخش آرمیچر در میدان حاصل از جریان تحریک، باعث القای ولتاژ در آن می‌شود که طبق رابطه (۴-۵) می‌توان آنرا با شار قطب و سرعت چرخش آرمیچر متناسب دانست:

$$E = k_A \phi_p \omega_m \quad (2-7)$$

پلاریته E طوری است که با ولتاژ منبع dc بیرونی که جریان I_a را در آرمیچر برقرار کرده مخالفت می‌کند. تفاوت بین E و V در حالت دائمی باعث برقراری جریان پایدار I_a در آرمیچر می‌شود:

$$V - E = R_a I_a \quad (3-7)$$

معمولاً به ولتاژ القا شده در آرمیچر موتور dc، ولتاژ ضد محرکه القایی (control, emf) گفته می‌شود و دلیل آن نیز با توجه به رابطه (۳-۷) روشن است.

مثال ۱-۷-۱ - آرمیچر یک موتور dc دارای مقاومت 0.1Ω است و موتور به برق $230V$ وصل شده است و $60A$ جریان دریافت می‌نماید. ولتاژ تولید شده (ضد محرکه) موتور چقدر است؟

$$E = 230 - [60(0.1)] = 224V \quad \text{حل:}$$

این مثال نشان می‌دهد که از ولتاژی که به ماشین داده می‌شود قسمت بزرگی از آن صرف خنثی کردن ولتاژ القایی آرمیچر و قسمت کوچکی از آن صرف برقراری جریان در مدار آرمیچر می‌گردد. از زاویه دیگری نیز می‌توان به نقش E نگاه کرد. در صورتیکه E وجودند داشت جریان آرمیچر به $2300A$ می‌رسید که قطعاً برای مدار الکتریکی ماشین مخرب است.

توان الکتریکی ورودی به ماشین در نهایت به صورت توان مکانیکی باعث چرخش روتور و بار مکانیکی متصل به روتور می‌شود. با افزایش گشتاور مقاوم (بار مکانیکی) سرعت موتور کاهش یافته و E نیز طبق رابطه (۲-۷)، با فرض ثابت ماندن شار هسته، کاهش خواهد داشت. کاهش E، به همراه ثابت بودن دامنه منبع ولتاژ خارجی، باعث افزایش جریان آرمیچر (در واقع، جریان موتور) می‌شود. در نتیجه گشتاور مکانیکی تولید شده (رابطه ۱-۷) بزرگتر می‌شود. این فرآیند بطور خودکار تا تنظیم و تولید گشتاور مورد نیاز بار ادامه پیدا خواهد کرد. فرآیند معکوسی نیز در هنگام

برداشتن بار از روی روتور اتفاق می‌افتد. در آنجا شرایط پایدار جدید، در سرعت بالاتر از سرعت اولیه بدست می‌آید. (چرا؟)

۲-۷) مشخصه‌های موتورهای dc

برای موتورهای dc، با توجه به وظیفه این ماشینها که تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی است، مشخصه‌های متعددی تعریف می‌شود. مهمترین این مشخصه‌ها در وضعیت پایدار (استاتیکی) عبارتند از:

مشخصه سرعت جریان ($\omega - I$)، مشخصه گشتاور جریان ($T - I$) و مشخصه گشتاور سرعت ($T - \omega$) لازم به ذکر است که این مشخصه‌ها محدوده عملکرد ماشین (از بی‌باری تا بار کامل) را در بر گرفته‌اند و بنابراین نیازی به تفکیک مشخصه‌های بی‌باری و بارداری وجود ندارد.

- **مشخصه سرعت - جریان:** در واقع نمایانگر تغییرات سرعت موتور در برابر تغییرات بار مکانیکی است. چرا که اگر از تلفات ماشین صرف‌نظر کنیم و ولتاژ منبع را ثابت فرض نمائیم، افزایش توان مکانیکی خروجی (که در حالت موتوری به آن افزایش بار می‌گوئیم) متناظر با افزایش توان الکتریکی ورودی و به طور مشخص‌تر، متناسب با جریان ورودی آرمیچر است.
- **مشخصه گشتاور - جریان:** با توجه به توصیف فوق، مشخصه گشتاور- بار است یعنی تغییرات گشتاور مکانیکی ماشین را به ازای تغییرات توان مکانیکی بیرونی نشان می‌دهد.
- **مشخصه گشتاور - سرعت:** مشخصه‌ای است که برای تعیین نقطه کار مکانیکی ماشین، در شرایطی که پارامترها و متغیرهای مدار الکتریکی ماشین معین است، بکار می‌رود. با این مشخصه می‌توان دریافت که گشتاور مکانیکی تولید شده توسط ماشین در سرعت‌های مختلف چگونه تغییر می‌کند.

۳-۷) روشهای اتصال آرمیچر و مدار تحریک

بر خلاف حالت ژنراتوری، برای راه‌اندازی موتور، حداقل به یک منبع dc نیاز است. بنابراین بحث تحریک خودی یا جداگانه در اینجا موضوعیت ندارد. اما نحوه اتصال سری یا موازی مدار تحریک، بر مشخصه‌های موتور تاثیر دارد. از اینرو، موتورهای dc نیز براساس نوع اتصال تحریک دسته‌بندی می‌شوند:

تحریک مستقل (و شنت)

در این نوع تحریک، مدار تحریک بطور مستقل از مدار آرمیچر به منبع وصل می‌شود. از آنجا که معمولاً از همین منبع برای تغذیه آرمیچر استفاده می‌شود، می‌توان گفت موتور dc تحریک مستقل در واقع همان موتور شنت است. پیچک تحریک در این موتورها از تعداد دور زیاد سیم نازک ساخته شده است.

تحریک سری

در موتور تحریک سری، سیم‌پیچ میدان از جنس سیم قطور و با تعداد دور کم است که بر روی قطب اصلی قرار گرفته و با سیم‌پیچ آرمیچر سری می‌شود. ویژگی‌های مذکور باعث می‌شود که ضمن کاهش افت ولتاژ روی مدار تحریک و کاهش تلفات آن و امکان عبور جریان آرمیچر از این سیم‌پیچ، شار قطب با دامنه لازم برای عملکرد موتور فراهم گردد.

تحریک کمپوند

همانند آنچه در مورد ژنراتورهای کمپوند گفته شد، در این نوع تحریک می‌توان چهار ترکیب متفاوت را برشمرد. کمپوند شنت بلند اضافی، کمپوند شنت بلند نقصانی، کمپوند شنت کوتاه اضافی و کمپوند شنت کوتاه نقصانی.

یادآور می‌شویم که شنت بلند با ترکیب آرمیچر و تحریک سری، موازی می‌شود. اما شنت کوتاه فقط با آرمیچر موازی شده و تحریک سری به اتصال موازی این دو وصل می‌شود. همچنین، در حالت نقصانی شار تحریک سری در جهت مخالف شار تحریک شنت ایجاد می‌شود و حالت کمپوند اضافی بیانگر وضعیتی است که شار تحریک سری، شار تحریک شنت را تقویت می‌نماید.

سیم پیچهای تحریک سری و تحریک شنت در ماشینهای کمپوند همان ویژگیهای متناظر با سیم پیچهای تحریک در ماشینهای سری و شنت را دارند.

۴-۷) سرعت موتورهای dc

در ژنراتور dc سرعت مکانیکی روتور حاصل توان مکانیکی محرکی است که به روتور ماشین وارد می‌شود و ولتاژ و جریان خروجی ماشین دو متغیری هستند که ویژگیهای ماشین را تبیین می‌نمایند. اما در موتورهای dc توان الکتریکی ورودی (به ویژه جریان آرمیچر) متغیر مستقل ورودی است و سرعت و گشتاور مکانیکی بدست آمده روی محور روتور، متغیرهای خروجی ماشین محسوب می‌شوند. رابطه (۷-۱) که قبلاً نیز با آن آشنا شده بودیم، ارتباط گشتاور تولیدی را با سایر پارامترها و ورودیهای ماشین نشان می‌دهد. برای تعیین رابطه سرعت موتور با سایر پارامترها، رابطه (۷-۲) و (۷-۳) را ترکیب می‌کنیم تا رابطه زیر بدست آید:

$$V_t = k_A \phi_p \omega_m + R_a I_a \quad (4-7)$$

و بنابراین:

$$\omega_m = \frac{V_t - R_a I_a}{k_A \phi_p} \quad (5-7)$$

همانطور که در مثال (۷-۱) نشان داده شد، معمولاً بسیار کوچکتر از V است. بنابراین بطور تقریبی می‌توان گفت:

$$\omega_m = \frac{V_t}{k_A \phi_p} \quad (6-7)$$

معادله (۷-۶) نشان می‌دهد که سرعت ماشین با ولتاژ تغذیه آن نسبت مستقیم و با شار مغناطیسی قطب نسبت معکوس دارد. در واقع با تغییر این دو پارامتر می‌توان سرعت موتورهای dc را کنترل کرد. این سهولت عمل، دلیل اصلی کاربرد موتورهای dc در صنعت است.

مثال ۷-۲- یک موتور چهار قطبی برق مستقیم (dc)، با ولتاژ $440V$ تغذیه می‌شود و جریان آرمیچر آن $50A$ است. مقاومت مدار آرمیچر 0.28Ω و آرمیچر دارای 888 سیم با اتصال موجی است. اگر مقدار شار مغناطیسی قطب $0.23Wb$ باشد سرعت موتور چقدر است؟

حل -

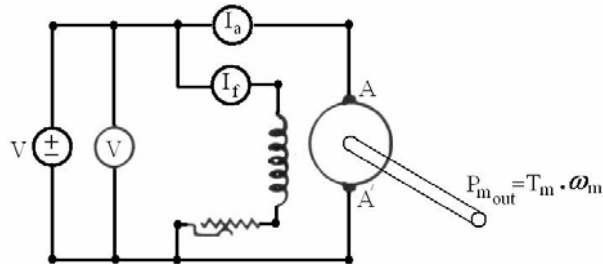
$$E = V_t - R_a I_a = 440 - (0.28)(50) = 426V$$

$$E = \frac{Z_A}{a} \cdot \frac{NP \phi_p}{60} \Rightarrow 426 = \frac{888}{2} \left(\frac{4 \times 0.023}{60} \right) N$$

$\Rightarrow N = 626rpm$ (دور در دقیقه)

۵-۷) موتور dc شنت

نمودار ساده اتصال الکتریکی این موتور در شکل (۱-۷) دیده می‌شود. این اتصال تفاوت زیادی با اتصال ژنراتور شنت ندارد. تفاوت اصلی وجود منبع ولتاژ خارجی به جای بار الکتریکی در ترمینال ماشین است.



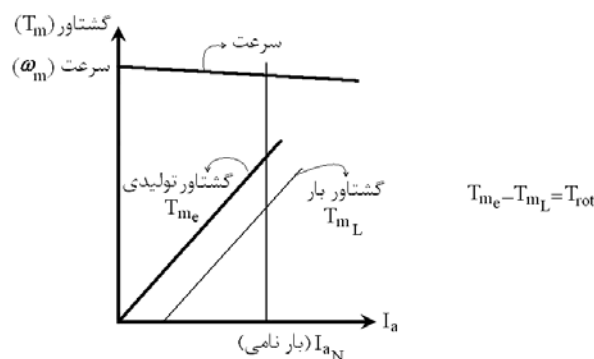
شکل (۱-۷) اتصال الکتریکی موتور dc شنت

۱-۵-۷) مشخصه سرعت-جریان موتور dc شنت

با استفاده از رابطه (۵-۷) می‌توان گفت که با زیاد شدن جریان (زیاد شدن بار) و با فرض ثابت ماندن V_t و جریان تحریک (که هر دو فرض، واقعی و مرسوم هستند) سرعت ماشین کاهش می‌یابد. میزان این تغییر از بی‌باری تا بار کامل چندان زیاد نیست. به ویژه اگر اثر عکس‌العمل آرمیچر را در موتورهای فاقد قطب کمکی، منظور نمائیم، تضعیف شار قطب ناشی از عکس‌العمل آرمیچر (کاهش ϕ_d در مخرج کسر در رابطه ۵-۷) باعث می‌شود که عملاً ω_m ثابت بماند. بنابراین در همین جا می‌توان به یک مزیت مهم موتور شنت اشاره کرد و آن مزیت، ثابت ماندن تقریبی سرعت در کل محدوده کارکرد ماشین (از بی‌باری تا بار کامل) می‌باشد.

۲-۵-۷) مشخصه گشتاور-جریان موتور dc شنت

اگر رابطه (۱-۷) را به همراه نحوه اتصال موازی تحریک در نظر بگیریم، خواهیم دید که ϕ_p در اتصال موازی، با جریان آرمیچر تغییر نمی‌کند. بنابراین گشتاور مکانیکی تولیدی ماشین با افزایش بار بطور خطی افزایش می‌یابد (در $I_a = 0$ این گشتاور مساوی صفر و در $I_a = I_{a_n}$ گشتاور ماکزیمم تولید خواهد شد). اگر تلفات مکانیکی ماشین را ناچیز فرض کنیم، این گشتاور دقیقاً به بار تحویل می‌شود. در غیر این صورت بایستی گفته شود که گشتاور تحویل شده به بار تقریباً با این گشتاور برابر است. مشخصه‌های سرعت-جریان و گشتاور-جریان موتور dc شنت در شکل (۲-۷) ارائه شده‌اند.



شکل (۲-۷) مشخصه‌های $(\omega - I_a)$ و $(T - I_a)$ برای موتور dc شنت

۷-۵-۳) مشخصه گشتاور-سرعت موتور dc شنت

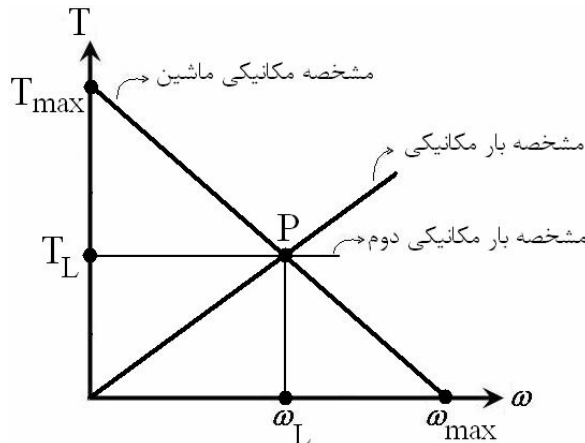
در شرایط تحریک ثابت (جریان تحریک نامی) می‌توان رابطه بین گشتاور و سرعت ماشین را با تلفیق روابط قبل بدست آورد:

$$\left. \begin{aligned} T &= kI_a \\ E &= k\omega_m \\ V_t &= E + R_a I_a \end{aligned} \right\} \Rightarrow T = \frac{kV_t - k^2\omega_m}{R_a} \quad (7-7)$$

با توجه به ثابت بودن k و R_a و V_t می‌توان گفت:

$$T_m = k_{1T} - k_{2T} \omega_m \quad (8-7)$$

که بیانگر یک خط با شیب منفی در صفحه $T - \omega$ است. این خط بطور نمونه در شکل (۷-۳) ترسیم شده است. در این شکل، همچنین فرض شده است که موتور یک بار مکانیکی با مشخصه $T - \omega$ خطی را می‌چرخاند و نقطه کار ماشین، محل برخورد مشخصه $T - \omega$ بار با مشخصه متناظر آن در ماشین است.



شکل (۷-۳) مشخصه‌های مکانیکی ماشین و بار و تعیین نقطه کار مکانیکی ماشین

حال اگر فرض کنیم بار متصل به ماشین دارای یک مشخصه گشتاور ثابت ($T_L = k_L$) باشد و نقطه کار P، حالت پایدار موتور و بار را نشان دهد، با افزایش بار، سرعت موتور نسبت به نقطه P کمتر می‌شود. افزایش بیشتر و بیشتر بار مکانیکی سرعت را هم به حدی کاهش خواهد داد تا در نقطه T_{max} که سرعت به صفر می‌رسد. در واقع موتور همواره بایستی با تقاضایی کمتر از T_{max} مواجه باشد تا بتواند به چرخش ادامه دهد. از طرف دیگر کاهش T_L منجر به سرعت‌گیری موتور شده تا در حالت بی‌باری که سرعت ماکزیمم موتور بدست خواهد آمد.

انواع بارهای مکانیکی

مشخصه‌های گشتاور-سرعت بارهای مکانیکی مبنای تقسیم‌بندی آنها است. بر این اساس، حداقل ۴ گروه بار مکانیکی را می‌توان نام برد:

الف - بارهای گشتاور ثابت: مشخصه این بارها در صفحه $T - \omega$ یک خط افقی است: $T_L = k_L$

ب - بارهای خطی: رابطه سرعت و گشتاور این بارها بیانگر یک خط راست است: $T_L = A_1\omega_L + A_2$

ج - بارهای غیرخطی: گشتاور مقاوم این گونه از بارها با توانهای دوم و سوم و ... سرعت متناسب است:

$$T_L = k_1\omega_L^2 + \dots$$

د - بارهای توان ثابت: در این گونه بارها توان مکانیکی ($P_m = \omega_m T_m$) ثابت است و می توان گفت: $T_L = \frac{k_L}{\omega_L}$

[یادآوری: توان مکانیکی حاصل ضرب گشتاور در سرعت زاویه ای مکانیکی است: $P_m = \omega_m T_m$]

۷-۵-۴) بازده موتور dc شنت

تلفات موتور

تلفات در موتورهای dc همانند تلفات در ژنراتورها، شامل تلفات مکانیکی (اصطکاک و تهویه)، تلفات مسی ($R_a I_a^2$ و $R_f I_f^2$)، تلفات هسته (هیستریزیس و فوکو) و تلفات جاروبکها است. تلفات جاروبکها معمولاً در تلفات مسی آرمیچر ($R_a I_a^2$) مدل می شود. همچنین اگر موتور دارای قطب کمکی و سیم پیچ جبرانگر باشد تلفات آنها در تلفات آرمیچر لحاظ می گردد. در محاسبات دقیقتر تلفات اضافی در هسته بر اثر عکس العمل آرمیچر در حدود ۱٪ توان نامی ماشین برآورد می گردد.

بازده

بازده ماشین با در نظر گرفتن توان الکتریکی ورودی و توان مکانیکی خروجی و یا محاسبه توان تلفاتی نسبت به توان ورودی تعیین می شود:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_m}{P_e} \times 100 = \frac{T_{m_L} \omega_{m_L}}{V_t I_s} \times 100 \quad (9-7)$$

$T_{m_L} \omega_{m_L}$: توان مکانیکی تحویل شده به بار

I_s : جریان منبع

V_t : ولتاژ ترمینال موتور

اگر از تلفات مدار تحریک در برابر تلفات آرمیچر صرف نظر شود می توان نوشت:

$$\eta = \frac{V_t I_s - R_a I_a^2 - P_{rot}}{V_t I_s} \times 100 \quad (10-7)$$

دیده می شود که در مورد موتور شنت، بازده ماکزیمم هنگامی حاصل خواهد شد که تلفات ثابت و متغیر ماشین برابر شوند. این ویژگی در مورد ژنراتورهای dc نیز مشاهده شد و بنابراین برای کلیه ماشینهای dc عمومیت دارد.

۷-۵-۵) راه اندازی موتور شنت

همانطور که در مثال (۷-۱) دیدیم با اتصال ولتاژ منبع به ماشین، هنگامی که ماشین در حال سکون است، به دلیل عدم تولید نیروی ضد محرکه القایی، جریان بسیار زیادی به موتور وارد می شود که به احتمال بسیار زیاد به آن آسیب جدی خواهد زد. بنابراین، روشهایی برای راه اندازی ماشین ابداع شده است که باعث می شوند در طول فرآیند راه اندازی و ولتاژسازی آرمیچر ماشین، جریان آرمیچر از حد معینی فراتر نرود.

الگوی مشترک تمام روشهای راه اندازی این است که در طول دوره راه اندازی، قسمتی از ولتاژ منبع روی سیم پیچ آرمیچر افت کند و همراه با سرعت گیری موتور و افزایش دامنه ولتاژ ضد محرکه، ولتاژ افت داده شده روی آرمیچر افزایش یابد. به موازات این عمل، معمولاً کل ولتاژ منبع باید به مدار تحریک برسد تا ولتاژسازی در ماشین سرعت کافی داشته باشد.

راه اندازه‌های مقاومتی از مرسوم‌ترین راه‌اندازهای موتور dc هستند. در این سیستم‌ها یک مقاومت چند تکه وجود دارد که کل آن در شروع راه‌اندازی با آرمیچر سری شده و هماهنگ با سرعت‌گیری موتور، مرحله به مرحله از مدار خارج می‌شود. این راه‌اندازها علاوه بر کنترل جریان راه‌اندازی، به تجهیزات و مکانیزم‌های اضافه‌ای نیز مجهز می‌شوند که از موتور در برابر اضافه بار (افزایش غیر مجاز I_a) و اضافه سرعت (در اثر کاهش یا قطع جریان تحریک) حفاظت نمایند.

یادآوری می‌شود که طبق رابطه (۷-۵) در صورتیکه جریان تحریک کم شود سرعت موتور زیاد می‌شود. این ویژگی، بخصوص اگر I_f صفر بشود، متناظر با بینهایت شدن سرعت ماشین است. در عمل، با قطع جریان تحریک، سرعت ماشین آنقدر بالا خواهد رفت که تمام سیستم‌های مکانیکی آن از بین برود مگر اینکه رله‌های حفاظتی، تغذیه ماشین را قطع نمایند. امروزه سیستم‌های راه‌اندازی مدرن‌تر با استفاده از مبدل‌های الکترونیکی توان (Power Electronic Convertors) ساخته شده و کاربرد فراوانی هم پیدا کرده‌اند. ویژگی این سیستم‌ها کنترل و تنظیم سطح ولتاژ منبع است و بنابراین بر خلاف راه‌اندازهای سنتی، تلفات توان در مقاومت‌های راه‌انداز را ندارد.

۷-۵-۶) کنترل سرعت موتور شنت

در قسمت (۷-۵-۳) دیدیم که مشخصه $T - \omega$ ماشین در شرایط معین الکتریکی، یک مشخصه ثابت است و بنابراین نقطه کار مکانیکی ماشین نیز برای هر بار مکانیکی معین، یک نقطه ثابت خواهد بود. به عبارت دقیق‌تر، اگر پارامترها و متغیرهای الکتریکی ماشین تغییر نکنند، نمی‌توان یک بار مکانیکی معین را با سرعت‌های متفاوتی به حرکت در آورد. معادل این محدودیت، آن است که به ازای بارهای مختلف، سرعت‌های مختلفی بدست خواهد آمد. خوشبختانه، مشخصه $T - \omega$ موتور dc را به راحتی می‌توان تغییر داد و جابجا کرد. رابطه (۷-۷) نشان می‌دهد که با تغییر V_t یا ϕ_p می‌توان مشخصه‌های جدید $T - \omega$ را بدست آورد. طراحی کنترل‌کننده‌های سرعت موتور dc با استفاده از رابطه مذکور انجام می‌شود. هنگامی که کنترل‌کننده مواجه با تفاوت سرعت واقعی با سرعت مطلوب می‌شود فرمان‌های لازم برای تغییر V_t یا ϕ_p (یا هر دوی آنها) را صادر می‌کند.

۷-۵-۷) ویژگی‌های عملکردی موتور شنت

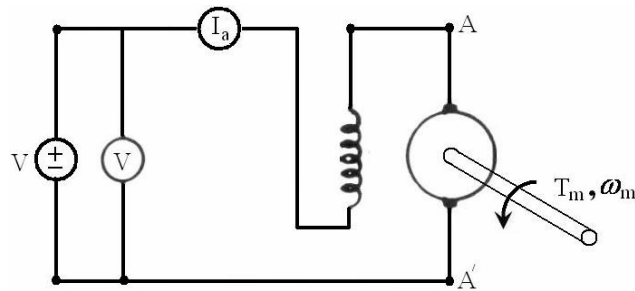
بطور خلاصه می‌توان گفت موتور شنت دارای مشخصه بار-سرعت نسبتاً ثابت است. گشتاور راه‌اندازی ماشین (گشتاور حالت سکون و $I_a = 0$) نیز نسبتاً مناسب است. قابلیت کارکرد پایدار در حالت بی‌باری یا کم‌باری از دیگر ویژگی‌های این موتور است. در واقع این موتور برای کاربردهای معمولی صنعتی و مواردی که کنترل سرعت لازم است، یک موتور ایده‌آل به حساب می‌آید. گرچه، با پیشرفتهای PE و سیستم‌های راه‌اندازی و کنترل موتورهای ac (Adjustable AC Drives)، محرکه‌ها ac به تدریج جایگزین موتورهای گران، پر حجم، سنگین و پر هزینه dc شده و خواهند شد.

۷-۵-۸) مقادیر نامی موتور شنت

مقادیری که معمولاً در پلاک موتور شنت ذکر می‌شود شامل ولتاژ تغذیه (V_t)، جریان مجاز آرمیچر، توان نامی (الکتریکی ورودی $P_e =$)، سرعت نامی (دور در دقیقه)، مقاومت مدار آرمیچر، جریان مجاز تحریک (I_f) و مقاومت مدار تحریک (R_f) می‌باشد.

۶-۷) موتور dc با تحریک سری

اتصال مدارهای الکتریکی این موتور در شکل (۴-۷) ارائه می‌شود. در این موتورها نیز همانند موتورهای شنت باید هنگام راه‌اندازی موتور، جریان راه‌اندازی کنترل شود.



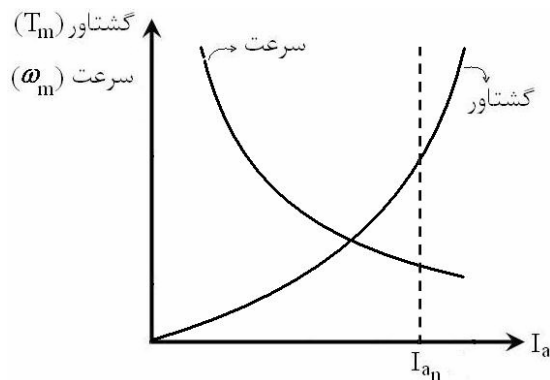
شکل (۴-۷) مدار موتور سری

۱-۶-۷) مشخصه سرعت-جریان موتور dc سری

رابطه (۵-۷) در این موتور نیز معتبر است. اما بایستی توجه کرد که با افزایش بار ماشین، جریان مدار تحریک و در نتیجه شار تحریک هم زیاد می‌شود. زیاد شدن شار تحریک به معنی کاهش سرعت موتور است. این کاهش علاوه بر کاهشی که حاصل $R_a I_a$ است باعث می‌شود که مشخصه سرعت جریان موتور سری به شدت کاهشی باشد. از سوی دیگر با صفر شدن I_a ، سرعت به سمت $+\infty$ می‌رود!

۲-۶-۷) مشخصه گشتاور-جریان موتور dc سری

در اینجا نیز همانند موتور شنت می‌توان رابطه (۷-۱) را مبنا قرار داد. طبق این رابطه، گشتاور با حاصلضرب جریان آرمیچر و شار تحریک متناسب است. در موتور سری شار تحریک نیز با I_a متناسب است. بنابراین گشتاور تولیدی موتور سری متناسب با I_a^2 است (یک سهمی است) و با افزایش I_a به سرعت زیاد می‌شود. (شکل ۵-۷ را ببینید).



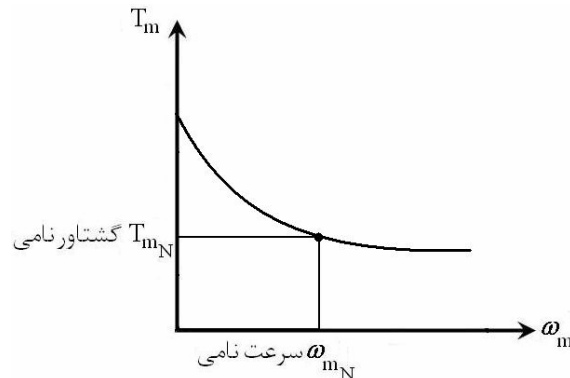
شکل (۵-۷) مشخصه‌های $(\omega - I)$ و $(T - I)$ موتور dc سری

۳-۶-۷) مشخصه گشتاور - سرعت موتور dc سری

تفاوتی که در این ماشین با ماشین شنت وجود دارد در گشتاور تولیدی ظاهر خواهد شد. در واقع، جریان تحریک همان جریان آرمیچر است. پس:

$$\left. \begin{aligned} T &= k_T I_a^2 \\ E &= k_E \omega_m I_a \\ V_t &= E + (R_a + R_s) I_a \end{aligned} \right\} \Rightarrow T = \frac{k_T V_t^2}{[(R_a + R_s) + k_E \omega_m]^2} \quad (11-7)$$

این مشخصه را بصورت نمونه‌ای در شکل (۶-۷) می‌توان دید.



شکل (۶-۷) یک نمونه مشخصه $T - \omega$ برای موتور سری

بدیهی است که کنترل سرعت و تغییر نقطه کار مکانیکی ماشین به ازای یک بار معین و یا کنترل سرعت برای بارهای متفاوت در این نوع موتور نیز با تغییر مشخصه $T - \omega$ امکان پذیر است. در اینجا مهمترین پارامترهایی که می‌توانند در کنترل سرعت موثر باشند ولتاژ منبع (V_t) و جریان تحریک هستند. از آنجا که تغییر جریان تحریک در موتور سری معمولی مستلزم تغییر در جریان آرمیچر است، مدار تحریک سری بایستی به گونه‌ای طراحی شود که تغییر جریان تحریک بدون تاثیر گذاری بر I_a انجام شود. دو روش متداول برای کنترل سرعت موتور سری از طریق کنترل شار تحریک، عبارتند از:

۱- کاربرد مقاومت متغیر موازی با پیچک تحریک سری (این مقاومت موازی را Divertor می‌نامند).

۲- اتصال کوتاه کردن بخشی از پیچک تحریک

برای راه‌اندازی موتور سری می‌توان از مقاومت‌های راه‌انداز و یا مبدلهای PE استفاده کرد. علاوه بر این، برای جلوگیری از اشباع هسته، در هنگام راه‌اندازی هم مقاومت دیورتور باید با مدار تحریک موازی باشد تا بخشی از جریان آرمیچر از داخل آن عبور کند.

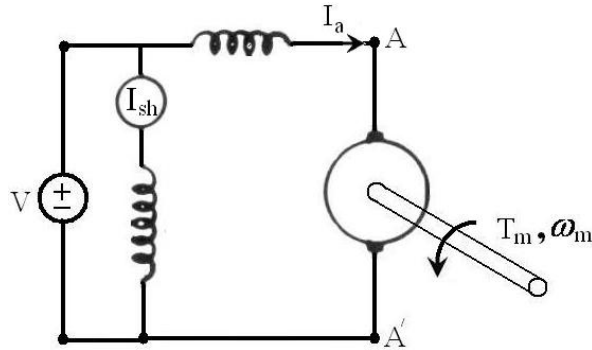
۷-۶-۴ ویژگیهای عملکردی موتور سری

موتور سری دارای گشتاور راه‌اندازی بسیار بالا است. بطور کلی، گشتاور ماشین در سرعت‌های کم، زیاد است. بنابراین از این موتور برای حرکت دادن بارهایی که در راه‌اندازی گشتاور زیادی لازم دارند، مثل قطارهای برقی، استفاده می‌شود. کاهش بار روی موتور باعث کاهش I_a و در نتیجه کاهش شار تحریک شده و سرعت آنرا افزایش می‌دهد. بنابراین استفاده از این موتورها در مواردی که احتمال کم شدن بار و یا قطع بار از روی موتور وجود داشته باشد خطرناک است. زیرا سرعت موتور بسیار زیاد شده و به از بین رفتن آن می‌انجامد.

مقادیر نامی موتور سری، همانند موتور شنت، شامل مشخصات منبع، بار، جریانهای مجاز و مقاومت‌های آرمیچر و تحریک می‌شود. سرعت موتور (به صورت دور در دقیقه) یکی دیگر از مقادیر مهم موتور است.

۷-۷) موتور dc با تحریک کمپوند

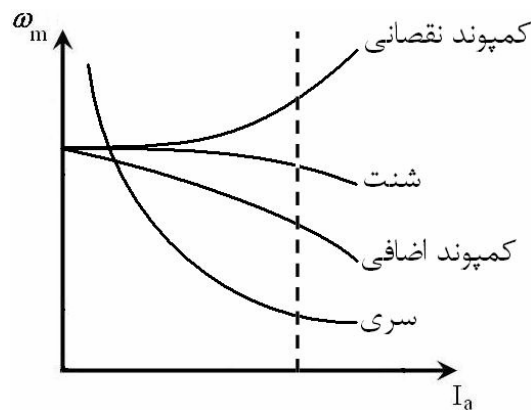
موتور کمپوند، همانند ژنراتور کمپوند، برای تلفیق مشخصه‌های مطلوب و حذف و یا کاهش محدودیتهای ماشین‌های سری و شنت ابداع شده است. سیم‌پیچ شنت یک موتور کمپوند تعداد دور زیاد و مقطع کوچک دارد. در مقابل سیم‌پیچ تحریک سری با دور کم و مقطع بزرگ است. مدار ساده‌ای از یک موتور کمپوند با شنت بلند را در شکل (۷-۷) می‌توان دید.



شکل (۷-۷) مدار الکتریکی موتور dc کمپوند

۱-۷-۷) مشخصه سرعت-جریان موتور کمپوند

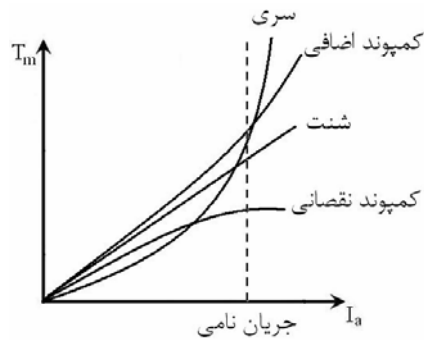
این مشخصه بستگی زیادی به نحوه اتصال کمپوند (اضافی یا نقصانی بودن آن) دارد: موتور کمپوند اضافی دارای مشخصه‌ای است که بین موتور شنت و موتور سری قرار می‌گیرد. در موتور کمپوند نقصانی این مشخصه افزایشی است و با افزایش I_a می‌تواند به ناپایداری (و تخریب مکانیکی) ماشین منجر شود. چرا که با افزایش بار و I_a شار سری زیاد شده و چون شار سری در جهت تضعیف شار شنت است، شار برآیند قطب به سرعت کاهش پیدا می‌کند که همانطور که قبلاً هم دیدیم کاهش شار قطب برای ماشینهای dc به منزله افزایش سرعت مکانیکی و خطرناک است. (شکل ۸-۷)



شکل (۸-۷) مقایسه مشخصه $\omega - I$ برای موتورهای مختلف

۲-۷-۷) مشخصه گشتاور-جریان موتور کمپوند

مشخصه موتور کمپوند اضافی یک حالت تعادلی بین موتور سری و موتور شنت را نشان می‌دهد. موتور کمپوند نقصانی مشخصه‌ای دارد که از مشخصه شنت هم پائین‌تر قرار می‌گیرد. برای مقایسه، این مشخصه‌ها را در شکل (۹-۷) ارائه نموده‌ایم.



شکل (۹-۷) مقایسه مشخصه‌های T-I موتورهای مختلف dc

۳-۷-۷) مشخصه گشتاور-سرعت موتور کمپوند

اگر روابط مربوط به گشتاور و ولتاژ را برای موتورهای کمپوند بازنویسی و مرتب کنیم مجدداً به این نتیجه خواهیم رسید که موتور کمپوند اضافی یک مشخصه میانگین را دارد که مشکل خطرساز بودن حالت بی‌باری یا کم‌باری موتور سری را مرتفع می‌سازد. در عوض موتور کمپوند نقصانی این مشکل را در حالت بار نامی می‌تواند ایجاد نماید!

۴-۷-۷) کاربرد موتور کمپوند

چنانچه دیده شد موتور کمپوند اضافی می‌تواند مزایای موتور dc سری را بدون مشکلات حالت بی‌باری آن ارائه دهد. از زاویه دید دیگر می‌توان گفت موتور کمپوند یک موتور شنت با گشتاور راه‌اندازی بزرگ است. بدیهی است که مشخصه‌های ژنراتور کمپوند نقصانی نه تنها مزیتی را ایجاد نمی‌کند بلکه احتمال سرعت گرفتن ناخواسته و تخریب مکانیکی موتور را به شدت بالا می‌برد. بنابراین در اتصال موتورهای کمپوند باید دقت شود که مدار به صورت نقصانی بسته نشود.