بسم الله الرحمن الرحیم

ماشین‌های الکتریکی DC

رشتهٔ الکتروتکنیک

زمینهٔ صنعت

شاخهٔ آموزش فنی و حرفه‌ای

شمارهٔ درس ۲۱۳۴

۶۲۱ ترکمانی، امیرحسین

/۳۱ ماشـــین‌های الکتریکی DC/ مؤلف: امیرحسین ترکمانی. ـ تهران: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی

۱۴۶ م ایران، ۱۳۹۴.

۱۳۹۴ ۲۳۴ ص. : مصور. ـ (آموزش فنی و حرفه‌ای؛ شماره درس ۲۱۳۴)

متون درسی رشتهٔ الکتروتکنیک، زمینهٔ صنعت.

برنامه‌ریزی و نظارت، بررســـی و تصویب محتوا: کمیســـیون برنامه‌ریزی و تألیف کتاب‌های درسی رشته الکتروتکنیک دفتر تألیف کتاب‌های درسی فنی و حرفه‌ای و کاردانش وزارت آموزش و پرورش.

۱. ماشـــین‌آلات برقی. ۲. برق ـ جریان مســـتقیم. الف. ترکمانی، امیرحسین. ب. ایران. وزارت آموزش و پرورش. کمیسیون برنامه‌ریزی و تألیف کتاب‌های درسی رشتهٔ الکتروتکنیک. ج. عنوان. د. فروست.

۱۳۹۴

همکاران محترم و دانش‌آموزان عزیز :

پیشنهادات و نظرات خود را دربارهٔ محتوای این کتاب به نشانی تهران ـ صندوق پستی شمارهٔ ۴۸۷۴/۱۵ دفتر تألیف کتابهای درسی فنی و حرفه‌ای و کاردانش، ارسال فرمایند.

پیام‌نگار (ایمیل) **info@tvoccd.ir**

وب‌گاه (وب‌سایت) **www.tvoccd.sch.ir**

پیام‌نگار (ایمیل) کمیسیون تخصصی رشتهٔ الکترو تکنیک

tech@tvoccd.sch.ir

جدول هدف محتوای کتاب ماشین‌های الکتریکی DC در سال ۱۳۸۸ با توجه به فناوری‌های جدید، نیازهای جامعه و درخواست هنرآموزان و گروه‌های آموزشی سراسر کشور و تأیید کمیسیون تخصصی رشتهٔ الکتروتکنیک، مورد بازنگری و اصلاحات کلی قرار گرفت و سپس در سال ۱۳۹۱ به طور کامل تألیف مجدد شد.

وزارت آموزش و پرورش

سازمان پژوهش و برنامه ریزی آموزشی

برنامه ریزی محتوا و نظارت بر تألیف: **دفتر تألیف کتاب‌های درسی فنی و حرفه‌ای و کاردانش**

عنوان و کد کتاب: **ماشین‌های الکتریکی DC - ۴۹۰/۱**

شماره درس: **۲۱۳۴**

مؤلف: **امیرحسین ترکمانی**

ویراستار فنی : **محمد حیدری**

اعضای کمیسیون تخصصی : **علی‌اکبر مطیع بیرجندی، شهرام خدادادی، محمدحسن اسلامی، مجتبی انصاری‌پور** و **نقی اصغری**

آماده‌سازی و نظارت بر چاپ و توزیع: **ادارهٔ کلّ نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی**

تهران: خیابان ایرانشهر شمالی- ساختمان شمارهٔ ۴ آموزش و پرورش(شهید موسوی)

تلفن: ۹-۸۸۸۳۱۱۶۱ دورنگار: ۸۸۳۰۹۲۶۶ صندوق پستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹

وب‌سایت: www.chap.sch.ir

رسامی و تصویرسازی رایانه‌ای: **محمد سیاحی**

صفحه آرا: **محمد سیاحی، غزاله نجمی**

طراح جلد: **حامد موسوی**

امور فنی رایانه‌ای: **ناهید خیام باشی و مریم دهقان‌زاده**

ناشر: **شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران**

تهران- کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروپخش)

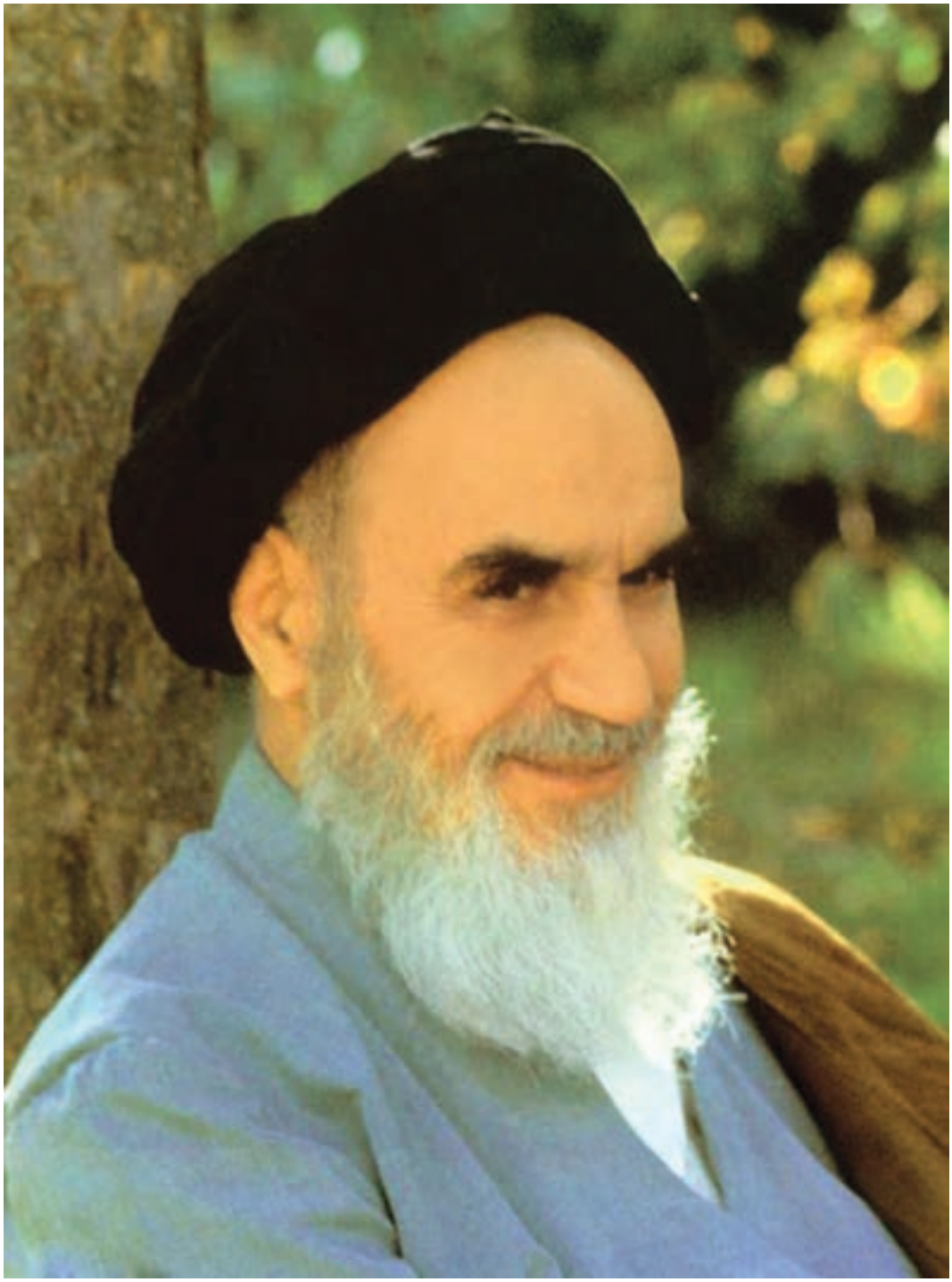
تلفن ۵-۴۴۹۸۵۱۶۱ - دورنگار ۴۴۹۸۵۱۶۰ - صندوق پستی ۱۳۹- ۳۷۵۱۵

چاپخانه: **شرکت چاپ و نشر کتابهای درسی ایران « سهامی خاص»**

سال انتشار و نوبت چاپ: **چاپ چهارم ۱۳۹۴**

حقّ چاپ محفوظ است.

شابک ۱-۲۰۷۴-۰۵-۹۶۴-۹۷۸ **ISBN 978-964-05-2074-1**



شما عزیزان کوشش کنید که از این وابستگی بیرون آیید و احتیاجات کشور خودتان را برآورده سازید، از نیروی انسانی ایمانی خودتان غافل نباشید و از اتّکای به اجانب بپرهیزید.

امام خمینی «قدّس سرّه الشّریف»

فهرست

فصل اول ـ الکترومغناطیس ۹

هدف‌های رفتاری ۹

مقدمه ۱۰

۱ ـ ۱ ـ میدان مغناطیسی ۱۱

۱ ـ ۲ ـ فوران مغناطیسی ۱۲

۱ ـ ۳ ـ چگالی فوران مغناطیسی ۱۴

پرسش ۱ ـ ۱ ..... ۱۶

تمرین ۱ ـ ۱ ..... ۱۶

۱ ـ ۴ ـ میدان مغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی ۱۶

۱ ـ ۵ ـ جهت میدان الکترو مغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی ۱۷

۱ ـ ۶ ـ چگالی فوران مغناطیسی اطراف یک هادی حامل جریان الکتریکی ۱۸

۱ ـ ۷ ـ مقدار چگالی فوران مغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی ۱۸

۱ ـ ۸ ـ میدان الکترو مغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی ۱۹

۱ ـ ۹ ـ جهت میدان الکترو مغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی ۲۰

پرسش ۲ ـ ۱ ..... ۲۱

تمرین ۲ ـ ۱ ..... ۲۲

۱ ـ ۱۰ ـ نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی ۲۲

۱ ـ ۱۱ ـ شدت میدان مغناطیسی ۲۲

پرسش ۳ ـ ۱ ..... ۲۴

تمرین ۳ ـ ۱ ..... ۲۴

۱ ـ ۱۲ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی ۲۴

۱ ـ ۱۳ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی سیم‌پیچ با هسته فرومغناطیس ۲۶

۱ ـ ۱۴ ـ نواحی منحنی مغناطیسی مواد فرومغناطیس ۲۹

۱ ـ ۱۵ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی سیم‌پیچ بدون هسته در خلأ ۳۰

۱ ـ ۱۶ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی ۳۲

پرسش ۴ ـ ۱ ..... ۳۳

تمرین ۴ ـ ۱ ..... ۳۴

۱ ـ ۱۶ ـ ۱ ـ مواد دیامغناطیس ۳۵

۱ ـ ۱۶ ـ ۲ ـ مواد پارامغناطیس ۳۵

۱ ـ ۱۶ ـ ۳ ـ مواد فرومغناطیس ۳۵

۱ ـ ۱۷ ـ حلقه هیسترزیس ۳۶

پرسش ۵ ـ ۱ ..... ۴۰

۱ ـ ۱۸ ـ مدارهای مغناطیسی ۴۰

۱ ـ ۱۹ ـ مدار مغناطیسی با شکاف هوایی ۴۴

پرسش ۶ ـ ۱ ..... ۴۷

تمرین ۶ ـ ۱ ..... ۴۷

۱ ـ ۲۰ ـ قانون نیروی محرکه مغناطیسی ۴۸

تمرین ۷ ـ ۱ ..... ۵۰

فصل دوم ـ مبانی ماشین‌های الکتریکی جریان مستقیم ۵۲

هدف‌های رفتاری ۵۲

مقدمه ۵۴

۲ ـ ۱ ـ طبقه‌بندی ماشین‌های الکتریکی ۵۵

۲ ـ ۲ ـ قانون القای الکترومغناطیسی فاراده ۵۵

۳ ـ ۲ ـ قانون لنز ۶۰
۴ ـ ۲ ـ قانون دست راست ۶۲
پرسش ۱ ـ ۲ ..... ۶۳
۵ ـ ۲ ـ ژنراتورهای جریان مستقیم ۶۴
پرسش ۲ ـ ۲ ..... ۶۶
پرسش ۳ ـ ۲ ..... ۷۷
۶ ـ ۲ ـ نیروی مغناطیسی وارد بر هادی حامل جریان الکتریکی ۷۸
۷ ـ ۲ ـ قانون دست چپ ۷۹
۸ ـ ۲ ـ گشتاور نیروی مغناطیسی وارد بر حلقه حامل جریان ۸۰
پرسش ۴ ـ ۲ ..... ۸۲
تمرین ۴ ـ ۲ ..... ۸۲
۹ ـ ۲ ـ موتورهای جریان مستقیم ۸۲
پرسش ۵ ـ ۲ ..... ۸۸
۱۰ ـ ۲ ـ ساختمان ماشین‌های جریان مستقیم ۸۸
پرسش ۶ ـ ۲ ..... ۹۳
۱۱ ـ ۲ ـ سیم‌پیچی آرمیچر ماشین‌های جریان مستقیم ۹۴
۱۲ ـ ۲ ـ روش‌های ترسیم سیم‌پیچی آرمیچر ۹۵
۱۳ ـ ۲ ـ گام‌های سیم‌پیچی آرمیچر ۹۸
پرسش ۷ ـ ۲ ..... ۱۰۰
تمرین ۷ ـ ۲ ..... ۱۰۰
۱۴ ـ ۲ ـ روش‌های سیم‌پیچی آرمیچر ۱۰۱
پرسش ۸ ـ ۲ ..... ۱۰۷
تمرین ۸ ـ ۲ ..... ۱۰۷
پرسش ۹ ـ ۲ ..... ۱۱۳
تمرین ۹ ـ ۲ ..... ۱۱۳
۱۵ ـ ۲ ـ کمیت‌های الکتریکی سیم‌پیچی آرمیچر ۱۱۳
تمرین ۱۰ ـ ۲ ..... ۱۱۸
۱۶ ـ ۲ ـ عکس‌العمل آرمیچر ۱۱۹
۱۷ ـ ۲ ـ روش های مقابله با عکس‌العمل آرمیچر ۱۲۱
پرسش ۱۱ ـ ۲ ..... ۱۲۳
۱۸ ـ ۲ ـ کموتاسیون ۱۲۴
پرسش ۱۲ ـ ۲ ..... ۱۲۷
فصل سوم ـ ژنراتورهای جریان مستقیم ۱۲۸
هدف‌های رفتاری ۱۲۸
مقدمه ۱۲۹
۱ ـ ۳ ـ پخش توان و تلفات در ژنراتورهای جریان مستقیم ۱۳۰
۲ ـ ۳ ـ تلفات کل ژنراتورهای جریان مستقیم ۱۳۲
۳ ـ ۳ ـ بازده ژنراتورهای جریان مستقیم ۱۳۳
پرسش ۱ ـ ۳ ..... ۱۳۴
تمرین ۱ ـ ۳ ..... ۱۳۴
۴ ـ ۳ ـ علامت اختصاری و مدار الکتریکی معادل ژنراتور جریان مستقیم ۱۳۵
۵ ـ ۳ ـ مشخصات ژنراتورهای جریان مستقیم ۱۳۶
پرسش ۲ ـ ۳ ..... ۱۳۷
۶ ـ ۳ ـ طبقه‌بندی ژنراتورهای جریان مستقیم ۱۳۷
۷ ـ ۳ ـ ژنراتور جریان مستقیم با تحریک مستقل ۱۳۸
۸ ـ ۳ ـ راه‌اندازی ژنراتور تحریک مستقل ۱۳۹
۹ ـ ۳ ـ مدار الکتریکی معادل ژنراتور تحریک مستقل ۱۳۹
پرسش ۳ ـ ۳ ..... ۱۴۲
تمرین ۲ ـ ۳ ..... ۱۴۳
۱۰ ـ ۳ ـ منحنی مشخصه بی‌باری ژنراتور تحریک مستقل ۱۴۳
۱۱ ـ ۳ ـ منحنی مشخصه بارداری ژنراتور تحریک مستقل ۱۴۷

۱۲ ـ ۳ ـ کاربرد ژنراتور تحریک مستقل ۱۵۰
پرسش ۴ ـ ۳ ..... ۱۵۰
تمرین ۳ ـ ۳ ..... ۱۵۱
۱۳ ـ ۳ ـ ژنراتور جریان مستقیم با تحریک شنت... ۱۵۱
۱۴ ـ ۳ ـ راه‌اندازی ژنراتور شنت ۱۵۳
۱۵ ـ ۳ ـ مدار الکتریکی معادل ژنراتور شنت ۱۵۴
پرسش ۵ ـ ۳ ..... ۱۵۶
تمرین ۴ ـ ۳ ..... ۱۵۷
۱۶ ـ ۳ ـ منحنی مشخصه بی‌باری ژنراتور شنت.... ۱۵۸
۱۷ ـ ۳ ـ منحنی مشخصه بارداری ژنراتور شنت.... ۱۵۸
۱۸ ـ ۳ ـ کاربرد ژنراتور شنت ۱۶۰
پرسش ۶ ـ ۳ ..... ۱۶۰
تمرین ۵ ـ ۳ ..... ۱۶۰
۱۹ ـ ۳ ـ ژنراتورهای جریان مستقیم با تحریک سری ۱۶۱
۲۰ ـ ۳ ـ راه‌اندازی ژنراتور سری ۱۶۱
۲۱ ـ ۳ ـ مدار الکتریکی معادل ژنراتور سری ۱۶۲
پرسش ۷ ـ ۳ ..... ۱۶۴
تمرین ۶ ـ ۳ ..... ۱۶۵
۲۲ ـ ۳ ـ منحنی مشخصه بی‌باری ژنراتور سری.... ۱۶۵
۲۳ ـ ۳ ـ منحنی مشخصه بارداری ژنراتور تحریک سری ۱۶۵
۲۴ ـ ۳ ـ کاربرد ژنراتور سری ۱۶۸
پرسش ۸ ـ ۳ ..... ۱۶۸
تمرین ۷ ـ ۳ ..... ۱۶۸
۲۵ ـ ۳ ـ ژنراتورهای جریان مستقیم با تحریک کمپوند ۱۶۹
۲۶ ـ ۳ ـ مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند اضافی با شنت بلند ۱۷۰
۲۷ ـ ۳ ـ مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند اضافی با شنت کوتاه ۱۷۲
۲۸ ـ ۳ ـ مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند نقصانی ۱۷۴
۲۹ ـ ۳ ـ راه‌اندازی و شرایط راه‌اندازی ژنراتور کمپوند ۱۷۴
۳۰ ـ ۳ ـ بهره‌برداری از ژنراتور کمپوند اضافی ۱۷۴
۳۱ ـ ۳ ـ بهره‌برداری از ژنراتور کمپوند نقصانی ۱۷۵
پرسش ۹ ـ ۳ ..... ۱۷۵
تمرین ۸ ـ ۳ ..... ۱۷۶
۳۲ ـ ۳ ـ منحنی مشخصه بارداری ژنراتور کمپوند اضافی ۱۷۶
۳۳ ـ ۳ ـ کاربرد ژنراتور کمپوند اضافی ۱۷۸
۳۴ ـ ۳ ـ منحنی مشخصه بارداری ژنراتور کمپوند نقصانی ۱۷۸
۳۵ ـ ۳ ـ کاربرد ژنراتور کمپوند نقصانی..... ۱۸۰
پرسش ۱۰ ـ ۳ ..... ۱۸۰
۳۶ ـ ۳ ـ تنظیم ولتاژ ژنراتورهای جریان مستقیم... ۱۸۰
پرسش ۱۱ ـ ۳ ..... ۱۸۲
فصل چهارم ـ موتورهای جریان مستقیم ۱۸۳
هدف‌های رفتاری..... ۱۸۳
مقدمه..... ۱۸۴
۱ ـ ۴ ـ پخش توان و تلفات در موتورهای جریان مستقیم ۱۸۵
۲ ـ ۴ ـ تلفات کل موتورهای جریان مستقیم..... ۱۸۷
۳ ـ ۴ ـ بازده موتورهای جریان مستقیم ۱۸۷
۴ ـ ۴ ـ گشتاور موتورهای جریان مستقیم..... ۱۸۸
پرسش ۱ ـ ۴ ..... ۱۸۹
تمرین ۱ ـ ۴ ..... ۱۹۰

۵ ـ ۴ ـ پدیـــده مهـــار گسســـتگی در موتورهـــای جریان مستقیم. ۱۹۱
۶ ـ ۴ ـ علامت اختصاری و مدار الکتریکی معادل موتورهای جریان مستقیم ۱۹۱
۷ ـ ۴ ـ مشخصات موتورهای جریان مستقیم. ۱۹۲
پرسش ۲ ـ ۴ ۱۹۳
تمرین ۲ ـ ۴ ۱۹۴
۸ ـ ۴ ـ طبقه‌بندی موتورهای جریان مستقیم ۱۹۴
۹ ـ ۴ ـ موتورهای جریان مستقیم با آهن‌ربای دائم ۱۹۴
پرسش ۳ ـ ۴ ۱۹۵
۱۰ ـ ۴ ـ موتورهای جریان مستقیم با تحریک مستقل ۱۹۶
تمرین ۳ ـ ۴ ۱۹۸
پرسش ۴-۴ ۲۰۲
۱۱ ـ ۴ ـ موتورهای جریان مستقیم با تحریک شنت ۲۰۳
تمرین ۴ ـ ۴ ۲۰۵
پرسش ۵ ـ ۴ ۲۰۶
۱۲ ـ ۴ ـ موتورهای جریان مستقیم با تحریک سری ۲۰۷
تمرین ۵ ـ ۴ ۲۰۹
پرسش ۶ ـ ۴ ۲۱۲
۱۳ ـ ۴ ـ موتورهای جریان مستقیم با تحریک کمپوند ۲۱۳
تمرین ۶ ـ ۴ ۲۱۹
پرسش ۷ ـ ۴ ۲۲۲
۱۴ ـ ۴ ـ راه‌اندازی موتورهای جریان مستقیم ۲۲۳
پرسش ۸ ـ ۴ ۲۲۵
۱۵ ـ ۴ ـ کنترل سرعت موتورهای جریان مستقیم. ۲۲۶
پرسش ۹ ـ ۴ ۲۲۷
۱۶ ـ ۴ ـ تغییر جهت گردش موتورهای جریان مستقیم ۲۲۸
۱۷ ـ ۴ ـ ترمز در موتورهای جریان مستقیم ۲۳۰
پرسش ۱۰ ـ ۴ ۲۳۲
منابع. ۲۳۴

مقدمه

ماشین‌های الکتریکی نقش ارزنده‌ای در زندگی بشر و گرداندن چرخ صنعت ایفا می‌کنند . هدف اصلی این کتاب ایجاد پایه‌ای قوی در اصول بنیادی ماشـــین‌های الکتریکی جریان مســـتقیم مبتنی بر شـــواهد فیزیکی و روش‌های تحلیل مدار الکتریکی معادل ماشین است.

تســـلط بر مطالب ارائه شده، اساس درک بســـیاری از کاربردهای واقعی ماشین‌های الکتریکی را فراهم می‌سازد؛ هر تکنسین برق در کارهای صنعتی خود با ماشین‌های الکتریکی سر و کار خواهد داشت به طوری که یا می‌بایست ماشین‌های الکتریکی را راه‌اندازی کند یا تعمیرات آنها را انجام دهد. از این رو این درس اهمیت ویژه‌ای دارد.

در ضمن در فصل‌های ســـوم و چهارم آزمایش‌های ماشـــین‌های الکتریکی جریان مســـتقیم ارائه شـــده است تا هنرجویان در دوره کاردانی در انجام آنها دچار مشـــکل نشـــوند. بر خود لازم می‌دانم از زحمات اعضای کمیســـیون تخصصی رشـــته برق تشـــکر نمایم. همچنین از رهنمودهای اســـاتید محترم آقایان دکتر مطیع بیرجندی، مهندس حیدری، مهندس عراقی و مهندس خدادادی کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم. همچنین همکاران محترم می‌توانند نظرات و پیشنهادات خود را به آدرس الکترونیکی Torkamani-44@yahoo.com ارسال نمایند.

مؤلف

هدف کلی: تحلیل ماشین‌های الکتریکی جریان مستقیم

فصل اول

الکترومغناطیس

هدف‌های رفتاری

پس از پایان این فصل از فراگیر انتظار می‌رود که:

- الکترومغناطیس را تعریف کند.
- میدان مغناطیسی اطراف سیم حامل جریان را تعریف کند.
- رابطه میدان مغناطیسی اطراف سیم حامل جریان را توضیح دهد.
- میدان مغناطیسی اطراف سیم‌پیچ حامل جریان را تعریف کنید.
- رابطه میدان مغناطیسی اطراف سیم‌پیچ حامل جریان را توضیح دهد.
- کمیت‌های مغناطیسی را نام ببرد.
- نیروی محرکه مغناطیسی را تعریف کند.
- رابطه نیروی محرکه مغناطیسی را توضیح دهد.
- شدت میدان مغناطیسی را تعریف کند.
- رابطه شدت میدان مغناطیسی را توضیح دهد.
- فوران مغناطیسی را تعریف کند و واحدهای آن را نام ببرد.
- چگالی میدان مغناطیسی را تعریف کند و رابطه آن را توضیح دهد.
- ضریب نفوذ میدان مغناطیسی و رابطه آن را توضیح دهد.
- ضریب نفوذ میدان مغناطیسی در خلأ را تعریف کند و عدد خاص آن را بیان کند.
- ضریب نفوذ میدان مغناطیسی نسبی را تعریف کند و رابطه آن را توضیح دهد.
- ضریب نفوذ نسبی را در مواد مختلف با یکدیگر مقایسه کند.
- منحنی مغناطیسی مواد را توضیح دهد و با استفاده از آن، اطلاعات مورد نیاز را استخراج کند.
- پس‌ماند مغناطیسی را تعریف کند.
- اثر و منحنی هیسترزیس را توضیح دهد.
- منحنی هیسترزیس را در مواد مغناطیسی سخت، نرم و فریت توضیح دهد.

- منحنی‌های هیسترزیس را در مواد مغناطیسی سخت، نرم و فریت مقایسه کند.
- مدارهای مغناطیسی را تعریف کند و اجزای آن را نام ببرد.
- مقاومت مغناطیسی را تعریف کند و رابطه آن را توضیح دهد.
- مقاومت مغناطیسی یک مدار مغناطیسی با فاصله هوایی را تعریف کند و رابطه آن را توضیح دهد.
- اجزای یک مدار مغناطیسی ساده را با یک مدار الکتریکی ساده مقایسه کند.
- روابط حاکم بر مدار مغناطیسی ساده را با مدار الکتریکی ساده مقایسه کند.
- یک مدار مغناطیسی ساده را به یک مدار الکتریکی ساده تبدیل و شکل آن را رسم کند.
- روابط حاکم بر مدار مغناطیسی ساده را با کمک قانون نیروی محرکه مغناطیسی تحلیل نماید.
- روابط حاکم بر مدار مغناطیسی ساده با فاصله هوایی را به کمک قانون نیروی محرکه مغناطیسی تحلیل نماید.
- کاربردهایی از الکترومغناطیس را بیان کند.
- پرسش‌های مربوط به این فصل را پاسخ دهد.
- تمرین‌های مربوط به این فصل را حل نماید.

مقدمه

در جهان امروز، بشر به طرز عجیبی به الکتریسته وابسته می‌باشد و بدون آن، زندگی بشر متمدن تقریباً غیرممکن است. اما باید خاطر نشان ساخت که پدیده جادویی مغناطیس نیز نقش بسیار عمده‌ای در زندگی بشر ایفا می‌کند. بدون پدیده مغناطیس لوازم الکتریکی و الکترومکانیکی از قبیل موتورهای الکتریکی، ترانسفورمرها و ژنراتورها قادر به کار نخواهند بود. به‌طور کلی می‌توان گفت با آن که بشر به الکتریسیته وابستگی شدید پیدا کرده است ولی در بیشتر موارد بدون پدیده مغناطیس قادر به استفاده از الکتریسیته نخواهد بود و بدون پدیده مغناطیس زندگی بشر متمدن غیرممکن خواهد بود.

در سال ۱۸۲۰ میلادی فیزیک‌دان دانمارکی به نام اورستد[1] برای اولین بار متوجه شد که جریان الکتریکی می‌تواند آثار مغناطیسی بوجود آورد. این کشف مهم دو علم الکتریسیته و مغناطیس را به یکدیگر مربوط ساخت. برای تشریح رابطه بین جریان الکتریکی و مغناطیس نظریه‌ای به‌وجود آمده است که به آن نظریه الکترو مغناطیس[2] می‌گویند. تأثیر میدان مغناطیسی اطراف یک هادی حامل جریان بر عقربه قطب‌نما در شکل (۱ ـ ۱) نشان داده شده است.

شکل ۱ـ۱

مشاهده می‌شود عقربه قطب‌نما، عمود بر هادی

۱. Oersted
۲. Electro Magnets

جریان قرار می‌گیـــرد. وقتی جهت جریان الکتریکی در هادی تغییر داده شـــود عقربه نیز می‌گردد و جهت آن تغییر می‌کند.

یکی از حوزه‌هایی که انتظار می‌رود فناوری نانو[1] اثر فراوانی بر پیشرفت آن داشته باشد، مغناطیس‌ها و مواد مغناطیسی اســـت. با ورود فناوری نانو به علم و صنعت مغناطیس، بهبود زیادی در کیفیت مغناطیس‌ها ایجاد شـــده اســـت و مغناطیس‌هایی با ابعاد کوچک و نیروی مغناطیسی بزرگ ساخته شده‌اند.

هانس کریستن اورستد

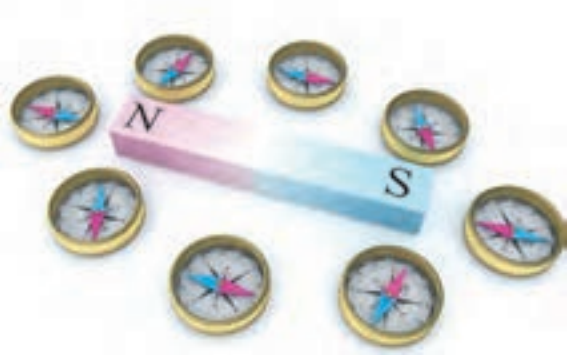
داروساز، فیزیک‌دان و اندیشمند نابغه دانمارکی در سال ۱۷۷۷ دیده به جهان گشـــود. پدرش داروخانه داشت، بنابراین او در کودکی با بسیاری از مواد آشنایی پیدا کرد که این آشـــنایی سبب تحصیل در همین رشته شد. وی در سال ۱۷۹۹ در ســـن ۲۲ ســـالگی به اخذ درجه دکترا در داروشناسی نایل گردید. و در سال ۱۸۰۶ با ســـمت استاد عالی استخدام شد و در ســـال ۱۸۲۹ به ریاست مؤسسه پلی‌تکنیک کپنهاگن منصوب گردید.

منبع: کتاب زندگی‌نامه دانشمندان جهان

۱ ـ ۱ ـ میدان مغناطیسی

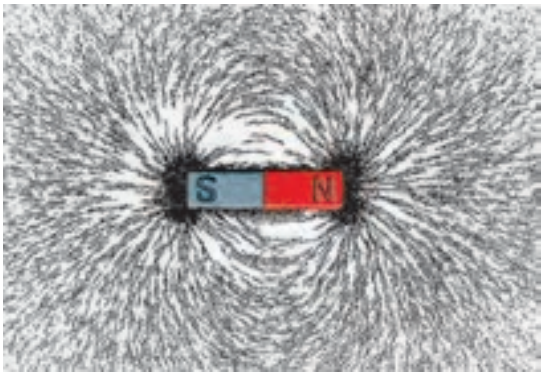
در فضای اطراف یـــک آهن‌ربا یا مغناطیس طبیعی خاصیتـــی وجود دارد که ذرات آهـــن را به خود جذب می‌کند. به این فضا «میدان مغناطیسی»[2] می‌گویند.

میدان مغناطیسی بر قطب‌نما تأثیر می‌گذارد و باعث انحراف آن می‌شود پس با حرکت دادن یک قطب‌نما در اطراف یک آهن‌ربا می‌توان به وجود میدان مغناطیسی پی برد (شکل۲ ـ ۱).



شکل ۲ ـ ۱

با قرار دادن یک مقوا بر روی یک آهن‌ربا و پاشیدن براده‌هـــای آهن به روی مقوا می‌توان خطوط نـــیروی میـــدان مغناطـــیسی را مشاهـــده کـــرد. شکل (۳ ـ ۱)



شکل ۳ ـ ۱

هر خط نیروی میدان مغناطیســـی را یک ماکسول[3] (max) می‌گویند.

۱. Nano Technology ۲. Magnetic Field ۳. Max well

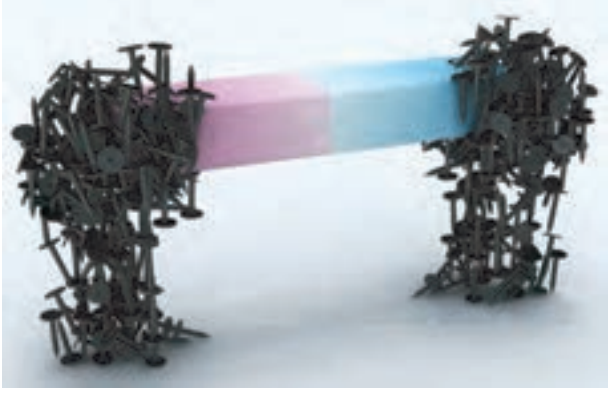
ماکسول

جیمز کلارک ماکسـول در ۱۳ نوامبر سال ۱۸۳۱ در ادینبرای اسکاتلند متولد شـد. از کودکی به ریاضیات و فیزیک علاقه فراوان داشـت، در سال ۱۸۴۷ وارد دانشـگاه ادینبرا شـد و در ۱۸۵۰ به دانشـگاه کمبریج رفت و در سال ۱۸۵۴ از تحصیل فراغت یافت.

ماکسـول از سال ۱۸۵۶ تا ۱۸۶۵ استاد کالج مارشال در آبردین و کالج کینگ لندن بود، وی در سال ۱۸۷۳ کتابی به نام دوره الکتریسیته و مغناطیس منتشر کرد و بلافاصله به سمت استاد کرسی فیزیک دانشگاه انتخاب شد. ولی عمر وی کوتاه بود و در سال ۱۸۷۹ در سن ۴۹ سالگی وفات یافت.

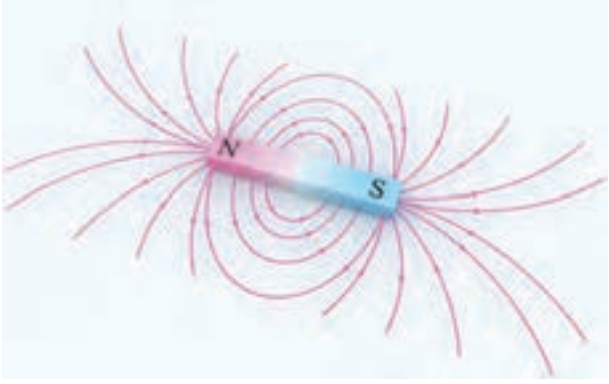
منبع www.roshd.ir

خطوط نیروی میدان مغناطیسی در دو نقطه معین از میدان مغناطیسی دارای فشـردگی بیشتری نسبت به سـایر نقاط است این نقاط را قطب‌های مغناطیسی[۱] می‌نامند و با حروف N و S آنها را نشـان می‌دهند. اثر جذب در قطب‌های میدان مغناطیسـی بسیار قوی‌تر از سایر نقاط میدان مغناطیسی است (شکل ۴ ـ ۱).



شکل ۴ ـ ۱

خطوط نیروی میدان مغناطیسی هیچگاه یکدیگر را قطع نمی‌کنند. بنا به قرارداد از قطب N بیرون می‌آیند و پس از امتداد در فضای اطراف آهن‌ربا به قطب S وارد می‌شوند (شکل ۵ ـ ۱).



شکل ۵ ـ ۱ خطوط نیروی میدان مغناطیسی

۲ ـ ۱ ـ فوران مغناطیسی

در شـکل (۳ ـ ۱) خطوط نیروی میدان مغناطیسی اطراف یک آهـن‌ربا نمایش داده شده است. به مجموع خطوط نیروی میدان مغناطیسی اطراف یک مغناطیس یا آهن‌ربا «فوران» یا «شـار مغناطیسی[۲]» می‌گویند و آن را با φ نشان می‌دهند[۳].

واحد فوران مغناطیسی ولت.ثانیه ($v.sec$) است که اصطلاحاً به آن وِبر wb می‌گویند. یک وبر[۴] برابر با 10^8

۱. Magnetic poles ۲. Magnetic Flux ۳. در برخی کتب آن را Flow می‌نامند. ۴. Weber

خط نیروی میدان مغناطیسی یا ماکسول است. پس:

$$۱[v.sec] = ۱[wb] = ۱۰^{۸}[max] \qquad (۱-۱)$$

واحد رایج فوران مغناطیسی وبر wb است و واحد کوچک‌تر آن میلی وبر mwb می‌باشد. یک وبر برابر با $۱۰^{۳}$ میلی وبر است. یعنی:

$$۱[wb] = ۱۰^{۳}[mwb] \qquad (۱-۲)$$

ویلهم وبر

ویلهم وبر در سال ۱۷۹۵ میلادی در آلمان به دنیا آمد. وی فیزیک‌دان بود و شهرتش به مطالعات در زمینه مغناطیس مربوط می‌شود. وبر در سال ۱۸۷۸ میلادی دیده از جهان فرو بست.

نیکولا تسلا

نیکولا تسلا در سال ۱۸۵۶ در امپراتوری اتریش ـ مجارستان متولد شد و در سال ۱۸۸۴ به عنوان یک فیزیک‌دان به ایالات متحده آمریکا مهاجرت کرد. او پیشگام تولید، انتقال و استفاده از جریان الکتریکی متناوب شد. در سال ۱۸۸۸ شرکت وستینگ‌هاوس امتیاز تسلا شامل موتور و ژنراتور الکتریکی را خرید و این شرکت از سیستم جریان متناوب تسلا برای روشنایی استفاده کرد.

تسلا در طی زندگی‌اش یک میراث حقیقی از اختراعات به جای گذاشت که امروزه هنوز جذاب هستند. جهان به افتخار نام او نام واحد چگالی شار مغناطیسی را تسلا گذاشت. نیکولا تسلا در سال ۱۹۴۳ در اتاق یک هتل در شهر نیویورک دیده از جهان فرو بست.

مثال ۱ ـ ۱ ـ فوران مغناطیسی یک آهن‌ربا ۲/۵ میلی وبر $[mwb]$ است. فوران این آهن‌ربا چند ماکسول $[max]$ است؟

حل:

ـ با استفاده از تناسب، واحد فوران را به وبر تبدیل می‌کنیم.

$$\frac{۱wb}{\varphi} = \frac{۱۰^{۳}mwb}{۲/۵mwb}$$

$$\varphi = \frac{۲/۵ \times ۱}{۱۰^{۳}}$$

$$\varphi = ۲/۵ \times ۱ \times ۱۰^{-۳}$$

$$\varphi = ۲/۵ \times ۱۰^{-۳}[wb]$$

ـ یک وبر برابر با 10^8 خط نیروی میدان مغناطیسی یا ماکسول max است.

$$\frac{1\,wb}{2/5\times10^{-3}}=\frac{10^8\,max}{\varphi}$$

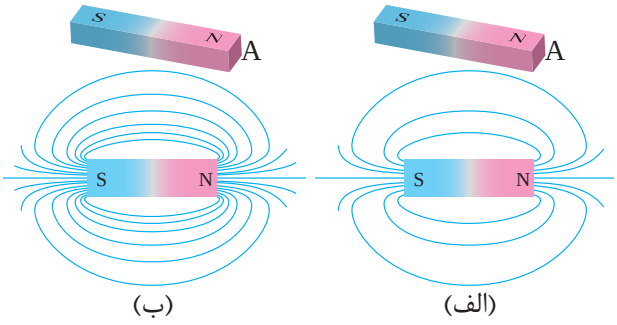
$$\varphi=\frac{2/5\times10^{-3}\times10^8}{1}$$

$$\varphi=2/5\times10^5=250000\,[max]$$

یا بـــه عبارتی در اطراف این آهن‌ربا ۲۵۰۰۰۰ خط نیروی میدان مغناطیسی وجود دارد.

۳ ـ ۱ ـ چگالی فوران مغناطیسی

دو آهن‌ربـــا بـــا ابعاد مشـــابه و فوران‌های ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ماکسول که سطح مقطع قطب آنها با A مشخص می‌باشد در شکل (۶ ـ ۱) نشان داده شده است.



شکل ۶ ـ ۱

میدان مغناطیسی آهن‌ربای شکل (الف ـ ۶ ـ ۱) در ســـطح مقطع قطب خود ۱۰۰۰ و میدان مغناطیســـی آهن‌ربای شکل (ب ـ ۶ ـ ۱) در سطح مقطع قطب خود ۲۰۰۰ خط نیرو جای داده اســـت. سطح مقطع قطب A هـــر دو آهـــن‌ربـــا برابر است، اما آهـــن‌ربـــای شـــکل (ب ـ ۶ ـ ۱) خطوط نیروی مغناطیسی یا فوران مغناطیسی بیشتری در سطح مقطع قطب A خود جای داده است. به عبارتی فوران مغناطیسی در سطح مقطع قطب A آهن‌ربای شـــکل (ب ـ ۶ ـ ۱) نسبت به شکل (الف ـ ۶ ـ ۱) فشـــرده و متراکمتر می‌باشد، لذا میدان مغناطیسی آن قوی‌تر است. در واقع میدان مغناطیسی این دو آهن‌ربا با یکدیگر تفاوت دارند. برای نشان دادن این تفاوت، کمیتی به نام «چگالی فوران مغناطیســـی»[1] تعریف می‌شود و آن را با B نشان می‌دهند.

چگالی فوران مغناطیسی B کمیتی است که تراکم یا فشـــردگی خطوط میدان مغناطیسی در سطح مقطع A را نشـــان می‌دهد. اگر سطح مورد نظر واحد انتخاب شـــود، «فوران عبوری از واحد ســـطح را چگالی فوران مغناطیسی» تعریف می‌کنند.

چگالی فوران مغناطیســـی از رابطه (۳ ـ ۱) به‌دست می‌آید.

$$B=\frac{\varphi}{A} \qquad (1\text{-}3)$$

در این رابطه:

φ فوران مغناطیسی بر حسب وبر wb

A مســـاحت مقطعی که فوران مغناطیسی φ از آن می‌گذرد بر حسب مترمربع m^2

B چـــگـــالی فـــوران مـــغناطیسی بـــر حـــســـب وبر بر مترمربع $\left[\frac{wb}{m^2}\right]$

واحد چگالی فوران مغناطیســـی B وبر بر مترمربع $\left[\frac{wb}{m^2}\right]$ است که اصطلاحاً به آن تسلا[2] [T] می‌گویند و واحد کوچک‌تر آن ماکسول بر سانتی‌مترمربع $\left[\frac{max}{cm^2}\right]$ اســـت که اصطلاحاً به آن گاوس[3] [G] گفته می‌شـــود.

پس:

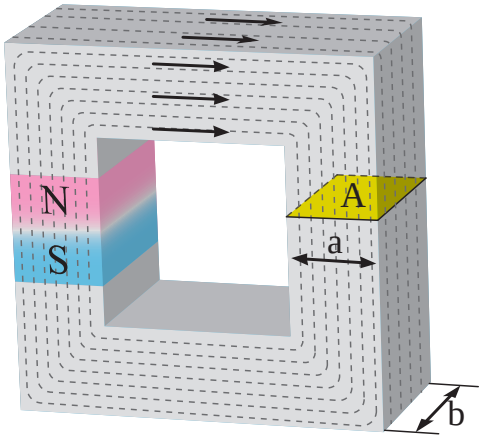
$$1\left[\frac{wb}{m^2}\right]=1\,[T]=10^4\,[G] \qquad (1\text{-}4)$$

۱. Magnetic flux Density
۲. Tesla
۳. Gauss

گاوس

کارل فردریش گاوس در سال ۱۷۷۷ میلادی در آلمان به دنیا آمد. معاصرانش او را سلطان ریاضیدانان می‌نامیدند. استعداد ریاضی گاوس از دوران کودکی ظاهر شـــد. خود او، وقتی دوران کودکی‌اش را به یاد می‌آورد، به شوخی می‌گفت: «من شـــمردن را پیش از حـــرف زدن یاد گرفتم» او آموزش عالی خود را در دانشـــگاه گوتینگن گذراند. بعدها به مدت ۵۰ ســـال، کرســـی استادی همین دانشگاه را به عهده داشت. گاوس در سال ۱۸۵۵ درگذشت.

مثال ۲ ـ ۱ ـ آهـــــن‌ربایی با فوران مغناطیســـی $0/02\ mwb$ مطابق شکل (۷ ـ ۱) در نظر است. چگالی فوران مغناطیسی در سطح مقطع A هسته چند گاوس می‌باشـــد؟ در صورتی‌کـــه $b=20\ mm$ و $a=10\ mm$ باشد.



شکل ۷ ـ ۱

حل:

ـ سطح مقطع A برابر است با:

$$A = a.b = 10 \times 20 = 200\ \left[mm^2\right]$$

ـ واحد سطح مقطع به متر مربع تبدیل می‌شود:

$$\frac{1m^2}{A} = \frac{10^6\ mm^2}{200\ mm^2}$$

$$A = \frac{200 \times 1}{10^6} = 200 \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-4}\left[m^2\right]$$

ـ واحد فوران مغناطیسی به وبر تبدیل می‌شود:

$$\frac{1wb}{\varphi} = \frac{10^3\ mwb}{0/02\ mwb}$$

$$\varphi = \frac{0/02 \times 1}{10^3} = 0/02 \times 10^{-3} = 2 \times 10^{-5}\ [wb]$$

ـ از رابطه (۳ ـ ۱) چگالی فوران مغناطیسی به‌دست می‌آید:

$$B = \frac{\varphi}{A} = \frac{2 \times 10^{-5}}{2 \times 10^{-4}} = 0/1\left[\frac{wb}{m^2}\right] = [T]$$

ـ واحد چگالی فوران مغناطیســـی به گاوس تبدیل می‌شود:

$$\frac{1T}{0/1T} = \frac{10^4\ G}{B}$$

$$B = \frac{0/1 \times 10^4}{1} = 0/1 \times 10^4 = 1000\ [G]$$

پرسش ۱ ـ ۱

پرسش‌های کامل کردنی

۱ـ نظریه الکترومغناطیس رابطه ..... و ..... را تشریح می‌کند.

۲ـ میدان مغناطیسی بر قطب‌نما تأثیر ..... .

۳ـ به مجموع خطوط نیروی مغناطیسی اطراف یک مغناطیس ..... یا ..... گویند.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ـ در فضای اطراف یک آهن‌ربا خاصیتی وجود دارد که ذرات آهن را به خود جذب می‌کند.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ـ واحد فوران ولت ثانیه یا تسلا است.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ـ قطب‌های مغناطیسی را تعریف کنید.

۲ـ چگالی فوران مغناطیسی را تعریف کنید.

۳ـ واحد هر یک از کمیت‌های زیر را بنویسید.

الف ـ فوران

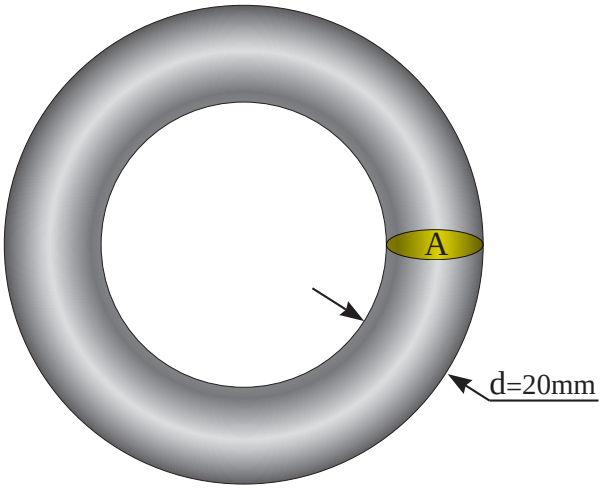
ب ـ چگالی فوران مغناطیسی

ج ـ خطوط نیروی مغناطیسی

تمرین ۱ ـ ۱

۱ـ یک آهن‌ربا ۴۰۰۰۰۰ خط نیروی میدان مغناطیسی دارد. فوران این آهن‌ربا چند میلی وبر است؟

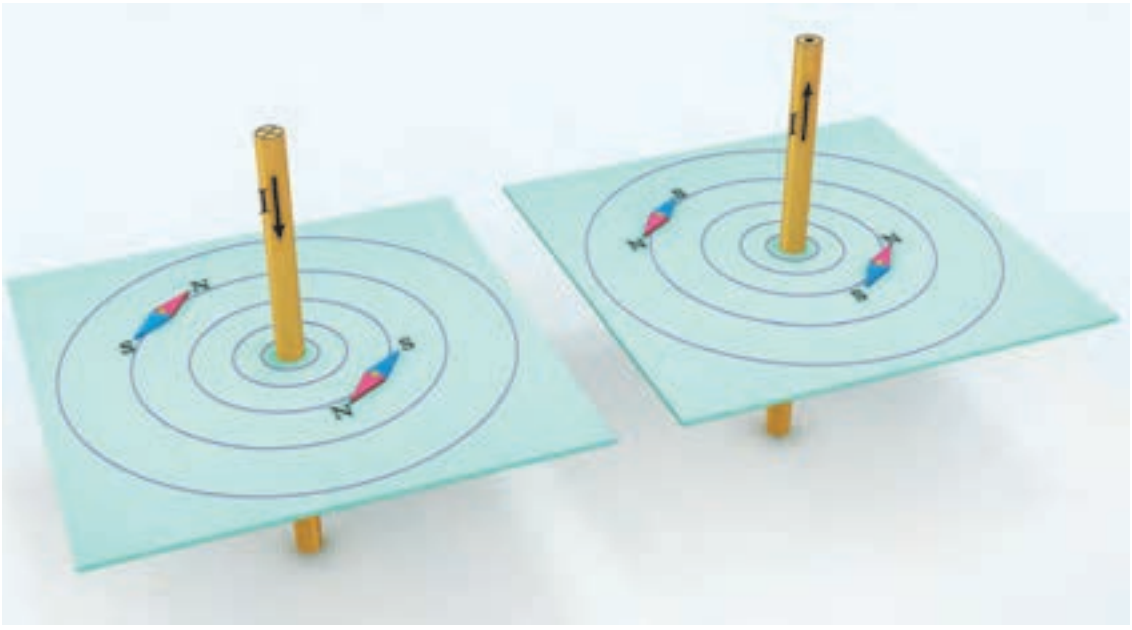
۲ـ آهن‌ربایی با چگالی فوران مغناطیسی G ۱۰۰۰۰ مطابق شکل (۸ ـ ۱) در نظر است. فوران مغناطیسی در سطح مقطع A هسته چند میلی وبر است؟



شکل ۸ ـ ۱

۴ ـ ۱ ـ میدان مغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی

جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی تولید می‌کند. اورستد اولین کسی بود که به بررسی ارتباط بنیادی میان جریان الکتریکی و مغناطیس پرداخت و نظریه الکترومغناطیس را ارائه کرد. وی برای تشریح این نظریه با قرار دادن یک عقربه مغناطیسی در تمام نقاط مختلف اطراف یک هادی حامل جریان مطابق شکل (۹ ـ ۱) مشاهده کرد عبور جریان الکتریکی باعث انحراف عقربه مغناطیسی می‌شود و با تغییر جهت جریان الکتریکی در هادی، جهت عقربه‌های مغناطیسی تغییر می‌کند.



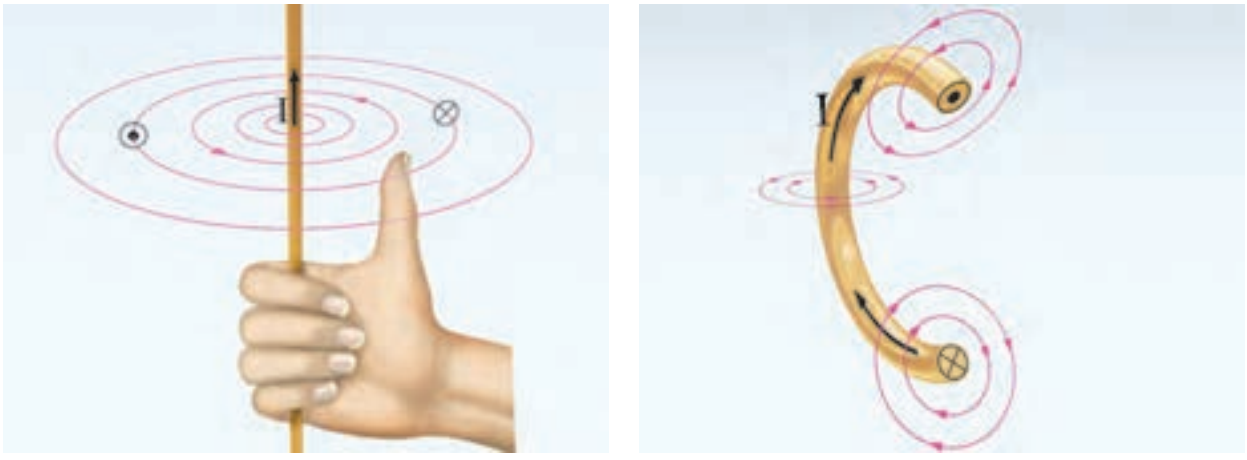
شکل ۹ ـ ۱

جهت میدان الکترومغناطیسی به جهت جریان الکتریکی بستگی دارد.

۵ ـ ۱ ـ جهت میدان الکترو مغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی

برای تعیین جهت میدان الکترومغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی علاوه بر استفاده از عقربه مغناطیسی مطابق شکل (۹ ـ ۱) می‌توان از قانون شست[۱] نیز استفاده کرد. برای این منظور مطابق شکل (۱۰ ـ ۱) باید شست دست راست را در جهت جریان الکتریکی هادی قرار داد تا بقیه انگشتان به‌صورت بسته، جهت میدان الکترومغناطیسی را نشان دهند.

مشاهده می‌کنید مانند جهت جریان می‌توان جهت میدان مغناطیسی را نیز به کمک نقطه (•) و ضربدر(×) مشخص کرد.

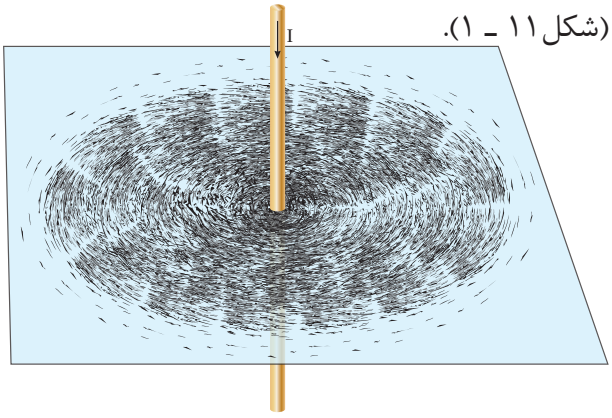


شکل ۱۰ ـ ۱

۱. Thumb Rule

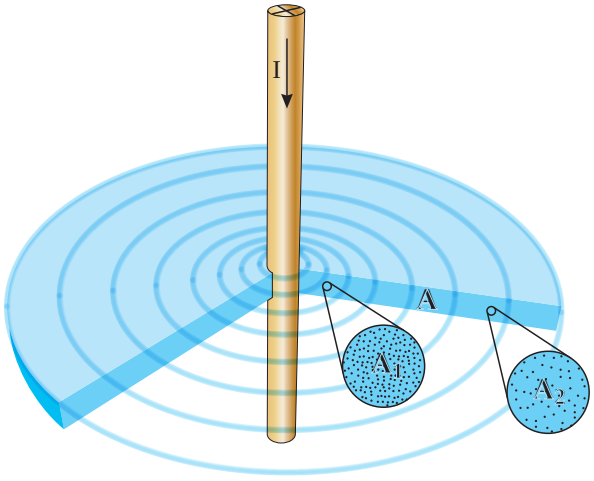
۶ ـ ۱ ـ چگالی فوران مغناطیسی اطراف یک هادی حامل جریان الکتریکی

اورستد در ادامه آزمایش‌های خود، هادی حامل جریان الکتریکی را از میان یک صفحه‌ی مقوایی عبور داد و بر روی صفحه مقوایی براده‌های آهن پاشید (شکل ۱۱ ـ ۱).



شکل ۱۱ ـ ۱

وی مشاهده کرد براده‌های آهن در مسیرهای دایره‌ای منظم شدند و هرچه از هادی فاصله می‌گیرند از فشردگی آنها کاسته می‌شود و این پدیده، در سرتاسر طول هادی صادق است. برای درک این پدیده برشی از فضای اطراف هادی در سطح مقطع A در شکل (۱۲ ـ ۱) نشان داده شده است.

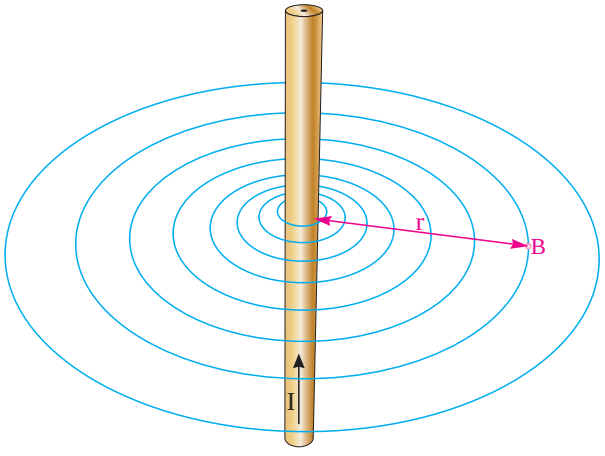


شکل ۱۲ ـ ۱

دو ناحیه A_1 و A_2 با مقاطع مساوی به فاصله r_1 و r_2 از هادی در سطح مقطع A بزرگ‌نمایی شده‌اند. چگالی فوران مغناطیسی ناحیه A_2 که در فاصله دورتری نسبت به ناحیه A_1 از هادی واقع است کمتر می‌باشد. پس با افزایش فاصله از هادی حامل جریان، میدان مغناطیسی ضعیف‌تر می‌شود و چگالی فوران مغناطیسی B کاهش می‌یابد.

۷ ـ ۱ ـ مقدار چگالی فوران مغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی

آمپر[۱] و ماکسول دانشمندانی بودند که ثابت کردند چگالی فوران مغناطیسی B اطراف هادی حامل جریان با شدت جریان الکتریکی هادی نسبت مستقیم و با فاصله از هادی نسبت عکس دارد و رابطه (۵ ـ ۱) را برای تعیین مقدار چگالی فوران مغناطیسی B در نقطه‌ای به فاصله r از یک هادی حامل جریان به شدت I را بر اساس شکل (۱۳ ـ ۱) ارائه کردند.



شکل ۱۳ ـ ۱

۱. Ampere

$$B = k\frac{I}{r} \qquad (۱-۵)$$

در این رابطه:

B چگالی فوران میدان مغناطیسی بر حسب $\left[\frac{wb}{m^۲}\right]$

K ضریبی است که به محیط اطراف هادی بستگی دارد و برای هوا مقدار آن ۲×۱۰^{-۷} بر حسب $\left[\frac{wb}{A.m}\right]$ است.

I شدت جریان الکتریکی هادی بر حسب [A]

r فاصله از هادی بر حسب [m]

مثال ۳ ـ ۱ـ چگالی فوران میدان مغناطیسی در نقطه‌ای به فاصله ۱ cm از هادی حامل جریان ۱۰ A چند گاوس است؟

حل:

ـ واحد فاصله بر حسب متر تبدیل می‌شود.

$$\frac{۱m}{r} = \frac{۱۰۰cm}{۱cm}$$

$$r = \frac{۱\times۱}{۱۰۰} = ۰/۰۱m$$

ـ چگالی میدان مغناطیسی از رابطه (۵ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$B = k\frac{I}{r}$$

$$B = ۲\times۱۰^{-۷}\times\frac{۱۰}{۰/۰۱} = ۲\times۱۰^{-۴}\left[\frac{wb}{m^۲}\right] = [T]$$

ـ واحد چگالی فوران مغناطیسی به گوس تبدیل می‌شود:

$$\frac{۱T}{۲\times۱۰^{-۴}T} = \frac{۱۰^۴G}{B}$$

$$B = \frac{۲\times۱۰^{-۴}\times۱۰^۴}{۱} = ۲[G]$$

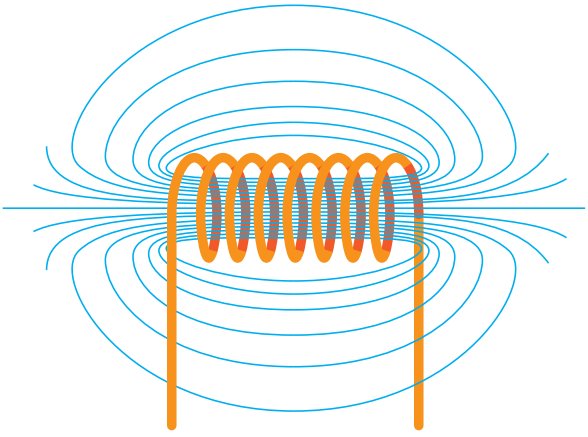
آمپر

آندره آمپر در سال ۱۷۷۵ در شهر لیون فرانسه به دنیا آمد. در سال ۱۸۰۹ سمت استادی آنالیز و مکانیک پلی‌تکنیک را به‌دست آورد. وی در سال ۱۸۳۶ به دنبال کار مداوم که روح و تن او را خسته و فرسوده کرده بود در گذشت.

۸ ـ ۱ ـ میدان الکترومغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی

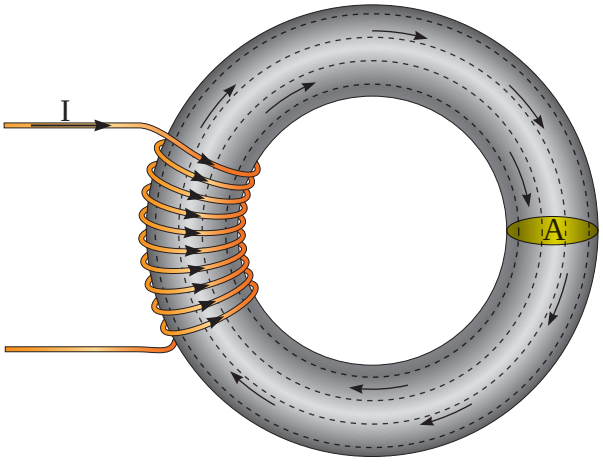
میدان الکترومغناطیسی هادی حامل جریان الکتریکی در سرتاسر دو طرف هادی توزیع می‌شود و متمرکز نیست و مقدار چگالی فوران مغناطیسی B در هر نقطه از اطراف هادی متغیر و کم است. اگر هادی حامل جریان الکتریکی به صورت سیم‌پیچ[۱] در آورده شود ضمن اینکه میدان الکترو مغناطیسی در درون سیم‌پیچ متمرکز می‌شود، چگالی فوران مغناطیسی B نیز افزایش می‌یابد (شکل ۱۴ ـ ۱).

۱. Winding



شکل ۱۴ ـ ۱

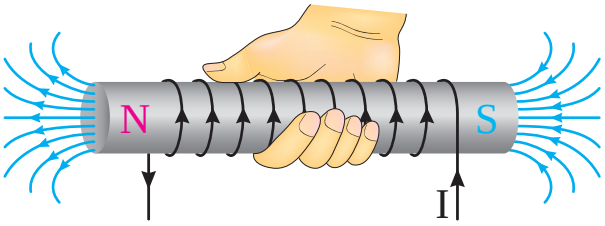
با قرار دادن سیم‌پیچ بر روی یک هسته از جنس مواد فرومغناطیس[1] مطابق شکل (۱۵ ـ ۱) و عبور جریان الکتریکی از آن، میدان الکترومغناطیسی با چگالی B بیشتری نسبت به سیم‌پیچ با هسته هوا ایجاد می‌شود. هسته فرومغناطیس باعث می‌شود، میدان الکترومغناطیسی درون سیم‌پیچ متمرکزتر شود، لذا چگالی فوران مغناطیسی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۵ ـ ۱

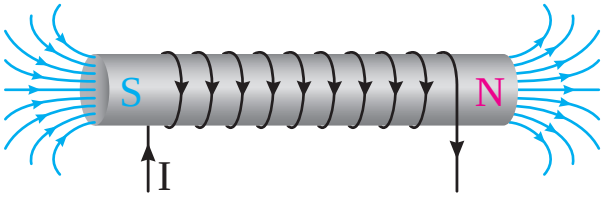
۹ ـ ۱ ـ جهت میدان الکترو مغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی

جهت میدان الکترومغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی از قاعده دست راست[2] تعیین می‌شود. بدین منظور مطابق شکل (۱۶ ـ ۱) اگر انگشتان دست راست در جهت جریان الکتریکی سیم‌پیچ قرار گیرد شست، جهت میدان الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد. با تعیین جهت میدان الکترومغناطیسی محل قطب‌های N و S مشخص می‌شود. طبق قرارداد محل خروج فوران مغناطیسی را با حرف N و محل ورود آن را با حرف S نشان می‌دهند.



شکل ۱۶ ـ ۱

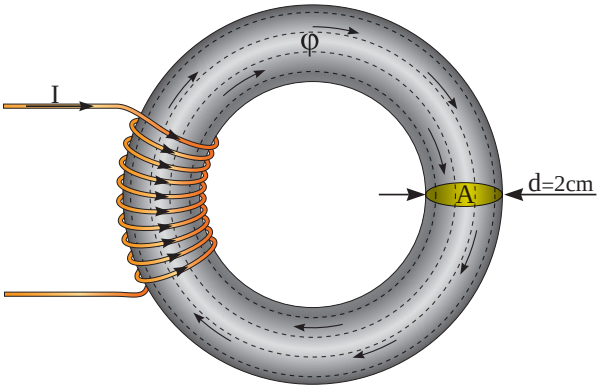
جهت میدان مغناطیسی سیم‌پیچ نیز تابع جهت جریان سیم‌پیچ است و با تغییر جهت جریان، جهت میدان مغناطیسی تغییر می‌کند (شکل ۱۷ ـ ۱).



شکل ۱۷ ـ ۱

مثال ۴ ـ ۱ـ سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی شکل (۱۸ ـ ۱) میدان الکترو مغناطیسی با فوران mwb ۳/۱۴ در هسته تولید می‌کند. چگالی فوران مغناطیسی در هسته چند تسلا است؟

۱. مواد فرومغناطیسی خواص آهن‌ربایی از خود نشان می‌دهند. آهن و آلیاژهای آهن، مواد فرومغناطیس هستند.
۲. Right-Hand Rule



شکل ۱۸ ـ ۱

حل:

ـ چگالی فوران از رابطه $B=\frac{\varphi}{A}$ به‌دست می‌آید. ابتدا واحد فوران را به وبر تبدیل می‌کنیم و سپس مساحت سطح مقطع A را محاسبه می‌کنیم:

$$\frac{1wb}{\varphi}=\frac{10^{3}mwb}{3/14}\Rightarrow\varphi=\frac{3/14\times1}{10^{3}}=3/14\times10^{-3}\left[wb\right]$$

$$A=\frac{\pi d^{2}}{4}$$

$$A=\frac{\pi(2)^{2}}{4}=3/14\left[cm^{2}\right]$$

$$\frac{1m^{2}}{A}=\frac{10^{4}cm^{2}}{3/14}\Rightarrow A=\frac{1\times3/14}{10^{4}}=3/14\times10^{-4}\left[m^{2}\right]$$

$$B=\frac{\varphi}{A}$$

$$B=\frac{3/14\times10^{-3}}{3/14\times10^{-4}}=10\left[\frac{wb}{m^{2}}\right]=\left[T\right]$$

پرسش ۲ ـ ۱

پرسش‌های کامل کردنی

۱ـ جریان الکتریکی میدان ..... تولید می‌کند.

۲ـ برای تعیین جهت میدان الکترومغناطیسی اطراف هادی حامل جریان علاوه بر استفاده از ..... می‌توان از قانون ..... نیز استفاده کرد.

۳ـ جهت میدان الکترومغناطیس سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی از ..... تعیین می‌شود.

۴ـ محل خروج فوران مغناطیسی را با حرف..... نشان می‌دهند.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ـ جهت میدان الکترومغناطیس به جهت جریان الکتریکی بستگی دارد.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ـ محل ورود فوران مغناطیسی را با حرف N نشان می‌دهند.

صحیح ☐ غلط ☐

۳ـ جهت میدان الکترومغناطیس سیم‌پیچ، تابع جهت جریان الکتریکی است.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ـ رابطه محاسبه چگالی فوران مغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی را بنویسید و اجزای آن را تعریف کنید.

۲ـ جهت میدان الکترو مغناطیسی اطراف هادی‌های شکل‌های (۱۹ ـ ۱) و (۲۰ ـ ۱) را به‌دست آورید.

شکل ۱۹ ـ ۱

شکل ۲۰ ـ ۱

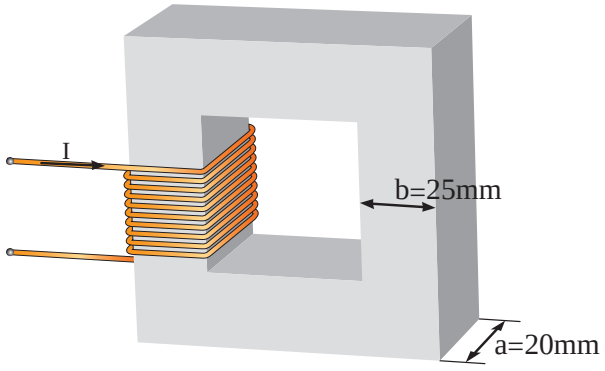
۳ـ میدان مغناطیسی هادی حامل جریان الکتریکی و سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی را با یکدیگر مقایسه کنید.

۴ـ نقش هسته فرومغناطیس را در سیم‌پیچ شرح دهید.

تمرین ۲ ـ ۱

۱ـ چگالی فوران مغناطیسی در فاصله ۲ cm از یک هادی حامل جریان ۳ T است. جریان الکتریکی هادی چند آمپر است؟

۲ـ سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی شکل (۲۱ ـ ۱) چگالی فوران مغناطیسی ۱ تسلا در هسته ایجاد کرده است. فوران مغناطیسی هسته چند میلی وبر است؟



شکل ۲۱ ـ ۱

۱۰ ـ ۱ ـ نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی

علت ایجاد میدان الکترومغناطیسی شکل (۱۴ ـ ۱) عبور شدت جریان الکتریکی از حلقه‌های سیم‌پیچ است. میدان الکترومغناطیسی حلقه‌ها با یکدیگر جمع می‌شود و میدان الکترومغناطیسی قوی تولید خواهد شد. حاصل‌ضرب شدت جریان الکتریکی در تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ را نیروی محرکه مغناطیسی[۱] گویند و از رابطه (۶ ـ ۱) به‌دست می‌آید.

$$\theta = NI \qquad (۱\text{-}۶)$$

در این رابطه:

θ نیروی محرکه مغناطیسی بر حسب آمپر دور[۲] [A.T]

N تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ بر حسب دور

I شدت جریان الکتریکی سیم‌پیچ بر حسب آمپر [A]

مقدار نیروی محرکه مغناطیسی تابع شدت جریان الکتریکی سیم‌پیچ و تعداد حلقه‌های آن است.

مثال ۵ ـ ۱ـ از یک سیم‌پیچ با ۵۰۰۰ دور، جریان الکتریکی ۰/۱ آمپر می‌گذرد. نیروی محرکه مغناطیسی آن چند آمپر است؟

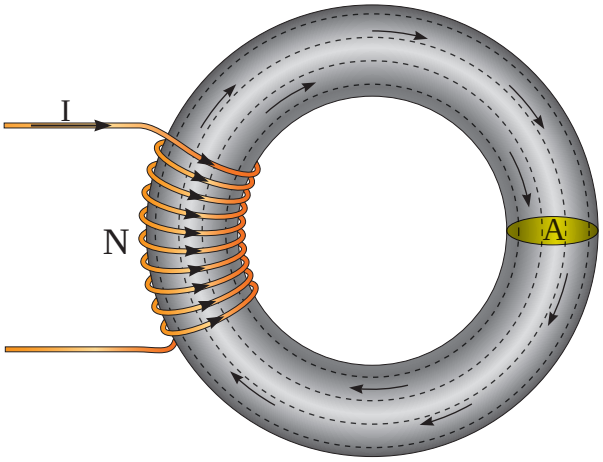
حل:

$$\theta = NI$$
$$\theta = ۵۰۰۰ \times ۰/۱ = ۵۰۰ \left[A.turn\right]$$

۱۱ ـ ۱ ـ شدت میدان مغناطیسی[۳]

فوران میدان مغناطیسی یک سیم‌پیچ حامل جریان از تمام نقاط سطح مقطع هسته آن می‌گذرد. خطوط نیروی میدان مغناطیسی به موازات یکدیگر، طول مسیر هسته را طی می‌کنند و یکدیگر را قطع نمی‌کنند. شکل (۱ ـ ۲۲)

۱. Magneto Motive Force
۲. در برخی کتب دور را به عنوان واحد نمی‌پذیرند و واحد نیروی محرکه مغناطیسی را [A] معرفی می‌کنند.
۳. Magnetic Field Intensity



شکل ۲۲ ـ ۱

نسبت نیروی محرکه مغناطیسی θ به طول متوسط هسته ℓ_C را «شدت میدان مغناطیسی» گویند و آن را با H نمایش می‌دهند و از رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید.

$$H = \frac{\theta}{\ell_C} = \frac{NI}{\ell_C} \qquad (۱ ـ ۷)$$

در این رابطه:

H شدت میدان مغناطیسی بر حسب آمپر دور بر متر $\left[\frac{A.turn}{m}\right]$

N تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ

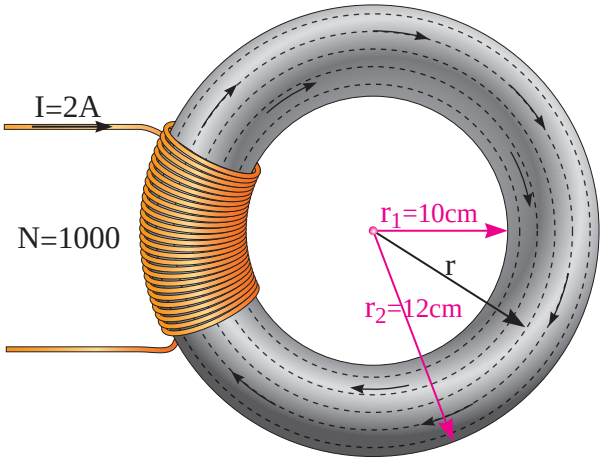
طول متوسط هسته بر حسب متر [m]

در رابطه (۷ ـ ۱) تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ N و طول متوسط هسته ℓ_C مقادیر ثابت هستند و معمولاً این رابطه به‌صورت (۸ ـ ۱) نوشته می‌شود:

$$H = \frac{N}{\ell_C}.I \qquad (۱ ـ ۸)$$

با توجه به رابطه (۸ ـ ۱) در واقع شدت میدان مغناطیسی H معیاری از اثر جریان الکتریکی برای ایجاد میدان مغناطیسی است.

مثال ۶ ـ ۱ ـ شدت میدان مغناطیسی شکل (۲۳ ـ ۱) را به‌دست آورید.



شکل ۲۳ ـ ۱

حل:

ـ شدت میدان مغناطیسی H از رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$H = \frac{NI}{\ell_C}$$

ـ طول متوسط هسته ℓ_C به شکل دایره است؛ برای محاسبه آن باید ابتدا شعاع متوسط هسته را به‌دست آورد:

$$r = \frac{r_۱ + r_۲}{۲} = \frac{۱۰+۱۲}{۲} = ۱۱cm$$

ـ محیط دایره از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\ell = ۲\pi r$$

$$\ell_C = ۲\times ۳/۱۴\times ۱۱ = ۶۹/۰۸cm$$

ـ واحد طول متوسط را به متر تبدیل می‌کنیم:

$$\frac{۱m}{\ell_C} = \frac{۱۰۰cm}{۶۹/۰۸cm}$$

$$\ell_C = \frac{۶۹/۰۸\times ۱}{۱۰۰} = ۰/۶۹۰۸m$$

ـ اکنون شـــدت میدان مغناطیسی از رابطه (۷ ـ ۱) قابل محاسبه است.

$$H = \frac{NI}{\ell_C} = \frac{۱۰۰۰ \times ۲}{۰/۶۹۰۸} = ۲۸۹۵/۱۹ \left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

پرسش ۳ ـ ۱

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ نیروی محرکه مغناطیسی تابع ..... و ..... سیم‌پیچ است.

۲ ـ خطوط نیروی میدان مغناطیسی به ..... طول مسیر هسته را طی می‌کنند و یکدیگر را قطع ..... .

۳ ـ شـــدت میدان مغناطیســـی از رابطه ..... به‌دست می‌آید.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ حاصل‌ضرب شـــدت جریان الکتریکی در تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ را نیروی محرکه مغناطیسی گویند.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ نســـبت نیروی محرکه مغناطیســـی به جریان الکتریکی سیم‌پیچ، شدت میدان مغناطیسی نام دارد.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش تشریحی

۱ ـ رابطه نیروی محرکه مغناطیســـی را بنویسید و کمیت‌های آن را شرح دهید.

۲ ـ شدت میدان مغناطیسی را تعریف کنید.

تمرین ۳ ـ ۱

۱ ـ نیروی محرکه مغناطیسی یک سیم‌پیچ ۱۰۰۰ دوری، ۲۰۰ [A.turn] اســـت. شدت جریان الکتریکی سیم‌پیچ چند آمپر است؟

۲ ـ شدت میـــدان مغناطیسی در هسته بـــه طول ۲۰ cm برابر $\left[\frac{A.turn}{m}\right]$ ۲۰۰۰ اســـت. اگر سیم‌پیچ ایـــن هســـته دارای ۴۰۰۰ دور باشـــد شـــدت جریان الکتریکی آن چند آمپر است؟

۱۲ ـ ۱ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی

نســـبت چگالی فوران مغناطیسی B به شدت میدان مغناطیســـی H را «ضریب نفوذ مغناطیســـی»[۱] تعریف مـــی‌کنند و آن را با μ نمایـــش مـــی‌دهند و از رابـطه (۹ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mu = \frac{B}{H} \qquad (۹ - ۱)$$

در این رابطه:

μ ضریب نفوذ مغناطیسی بر حسب وبر بر آمپر دور متر $\left[\frac{wb}{A.turn.m}\right]$

B چگالی فـــوران مـــغناطیسی بر حسب وبر بر مترمربع $\left[\frac{wb}{m^۲}\right]$

H شـــدت میدان مغناطیسی بر حسب آمپر دور بر متر $\left[\frac{A.turn}{m}\right]$

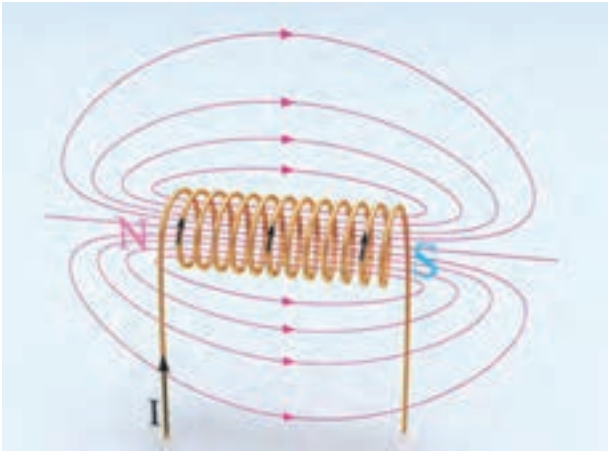
واحد ضریب نفوذ مغناطیســـی μ از نســـبت واحدِ چگالی میدان مغناطیســـی $\left[\frac{wb}{m^۲}\right]$ به واحدِ شـــدت میدان مغناطیسی $\left[\frac{A.turn}{m}\right]$ به‌دست می‌آید.

۱. Permeability

$$[\mu]=\frac{\frac{wb}{m^2}}{\frac{A.turn}{m}}=\frac{wb.m}{A.turn.m^2}=\left[\frac{wb}{A.turn.m}\right]$$

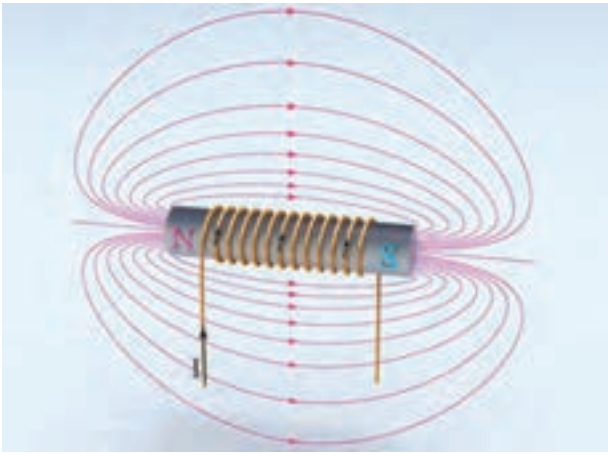
ضریب نفوذ مغناطیسی μ معیاری است که میزان گذردهی هسته را در مقابل خطوط نیروی مغناطیسی نشان می‌دهد. در یک شدت میدان مغناطیسی ثابت، هسته با ضریب نفوذ بزرگ‌تر، خطوط نیروی میدان مغناطیسی بیشتری در خود جای می‌دهد. هرچه ضریب نفوذ هسته بزرگ‌تر باشد شدت میدان مغناطیسی H، چگالی فوران مغناطیسی B قوی‌تری در هسته تولید می‌کند.[1]

میدان مغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان I با هسته هوا در شکل (۲۴ ـ ۱) نشان داده شده است.



شکل ۲۴ ـ ۱

اگر درون این سیم‌پیچ هسته فرومغناطیس قرار داده شود چگالی فوران مغناطیسی B در هسته به شدت افزایش می‌یابد (شکل ۲۵ ـ ۱).



شکل ۲۵ ـ ۱

از مقایسه شکل‌های (۲۴ ـ ۱) و (۲۵ ـ ۱) می‌توان نتیجه گرفت هسته فرومغناطیس نسبت به هسته هوا ضریب نفوذ مغناطیسی μ بزرگ‌تری دارد. فایده استفاده از هسته فرومغناطیس این است که به ازای یک شدت میدان مغناطیسی معین، چگالی فوران مغناطیسی بزرگ‌تری به‌دست می‌آید.

مثال ۷ ـ ۱ ـ چگالی فوران مغناطیسی در هسته فولادی به طول متوسط ۰/۲ متر که روی آن سیم‌پیچ ۱۰۰۰ دوری حامل جریان ۰/۰۰۱ آمپر قرار دارد ۰/۵ وبر بر مترمربع است. ضریب نفوذ مغناطیسی هسته فولادی چقدر است؟

حل:

شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$H=\frac{NI}{\ell_C}=\frac{۱۰۰۰\times ۰/۰۰۱}{۰/۲}=۵\left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

ضریب نفوذ مغناطیسی برای هسته فولادی از رابطه (۹ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mu=\frac{B}{H}=\frac{۰/۵}{۵}=۰/۱\left[\frac{wb}{A.turn.m}\right]$$

۱. برای درک بهتر ضریب نفوذ مغناطیسی مناسب است مقایسه‌ای بین عبور نور خورشید از شیشه ساده و رنگی داشته باشید.

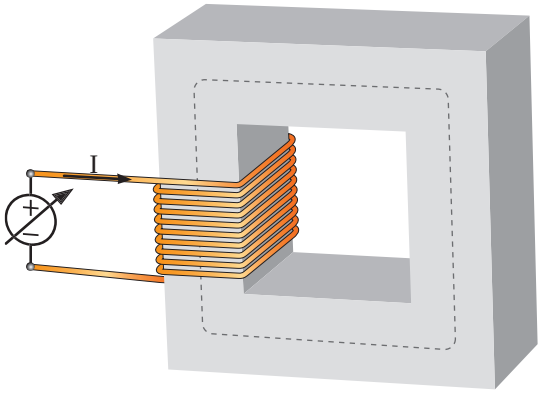
مثال ۸ ـ ۱ ـ اگر هسته سیم‌پیچ مثال ۷ ـ ۱ از هوا انتخاب شود، چگالی فوران مغناطیسی به ۶×۱۰^{-۶} وبر بر مترمربع کاهش می‌یابد. ضریب نفوذ مغناطیسی هوا چقدر است؟ ضریب نفوذ مغناطیسی فولاد را با هوا مقایسه کنید.

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{۶\times۱۰^{-۶}}{۵} = ۱/۲\times۱۰^{-۶}\left[\frac{wb}{A.turn.m}\right]$$

با مقایسه پاسخ‌های مثال ۷ ـ ۱ و ۸ ـ ۱ مشاهده می‌شود ضریب نفوذ مغناطیسی فولاد خیلی بزرگ‌تر از ضریب نفوذ هوا می‌باشد.

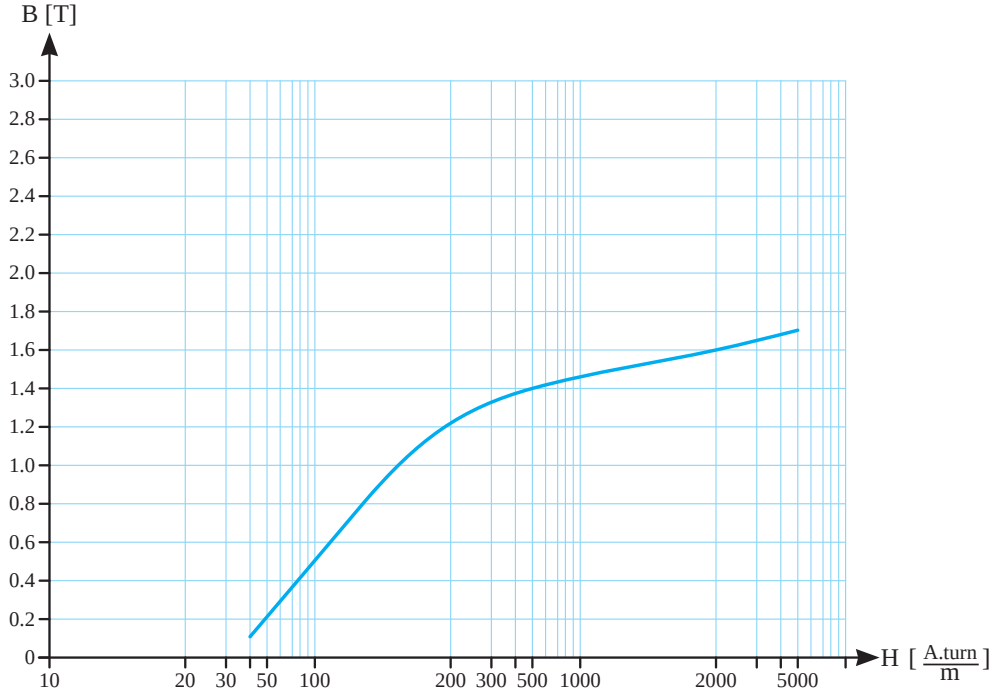
۱۳ ـ ۱ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی سیم‌پیچ با هسته فرومغناطیس

برای نشان دادن چگونگی رفتار ضریب نفوذ مغناطیسی μ در هسته فرومغناطیس، جریان مستقیم DC از سیم‌پیچ با هسته فرومغناطیسی از جنس فولاد ورق شکل (۲۶ ـ ۱) عبور داده شده است.



شکل ۲۶ ـ ۱

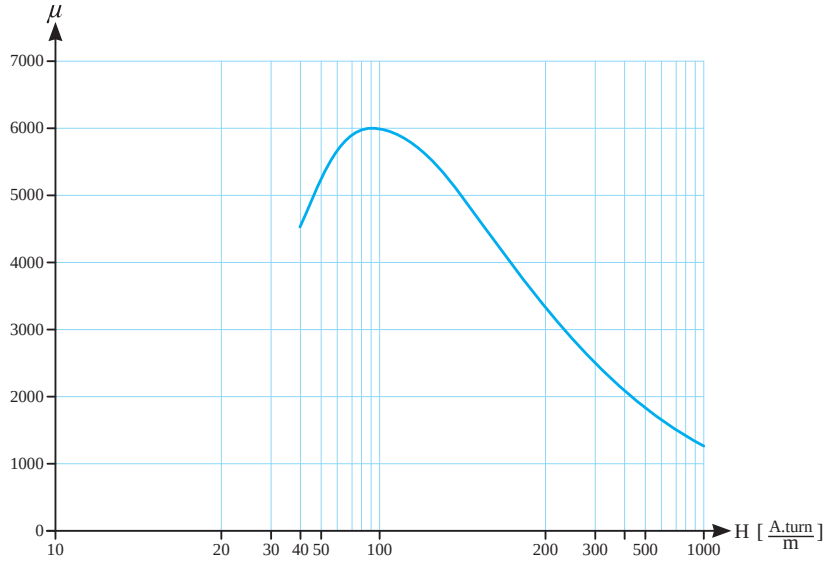
جریان سیم‌پیچ به آهستگی تا حداکثر مجاز افزایش داده می‌شود. افزایش جریان I شدت میدان مغناطیسی H را افزایش می‌دهد. اگر تغییرات چگالی فوران مغناطیسی B نسبت به شدت میدان مغناطیسی H هسته رسم شود، منحنی شکل (۲۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید. این منحنی، «منحنی مغناطیسی[۱]» یا «منحنی اشباع» نام دارد.



شکل ۲۷ ـ ۱ منحنی مغناطیسی فولاد ورق

۱. Magnetization Curve
۲. Gran – Oriented Steel

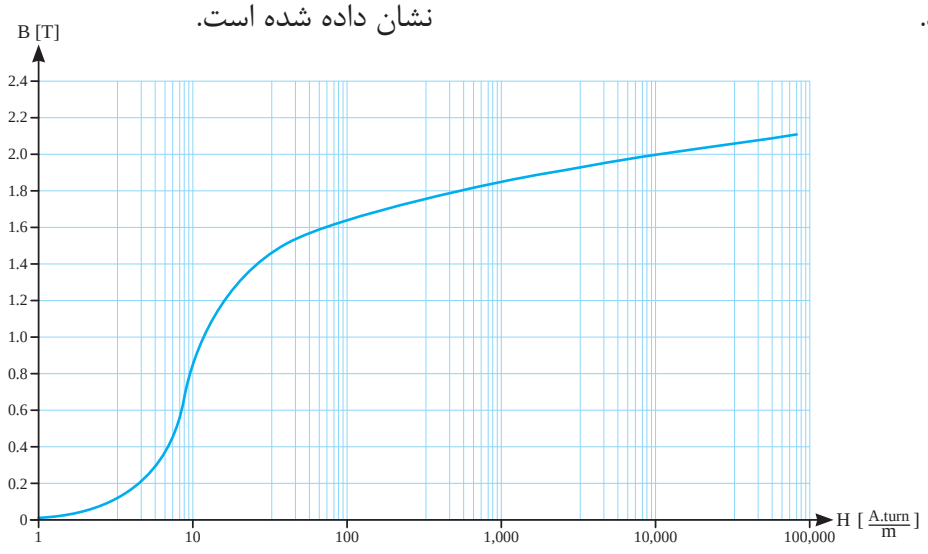
منحنی مغناطیسی تاثیر شدت میدان مغناطیسی H بر چگالی فوران مغناطیسی B هسته را نشان می‌دهد. در هر نقطه از منحنی مغناطیسی مواد فرومغناطیسی نسبت B به H، یعنی ضریب نفوذ مغناطیسی هسته μ عددی ثابت نیست. تاثیر شدت میدان مغناطیسی H بر ضریب نفوذ مغناطیسی μ هسته فرومغناطیس در شکل (۲۸ ـ ۱) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد ضریب نفوذمغناطیسی مواد فرومغناطیس مقدار ثابتی ندارد. منظور از مقدار ضریب نفوذ مغناطیسی μ مواد فرومغناطیس مقدار حداکثر آن μ_{max} است.



شکل ۲۸ ـ ۱

متداول‌ترین مواد فرومغناطیس معمولاً از آهن و آلیاژهای آهن و کبالت، تنگستن، نیکل و فلزات دیگر ساخته می‌شوند و با نام‌های تجاری فولاد الکتریکی[۱] عرضه می‌شوند.

فولاد الکتریکی *M-5* ماده فرومغناطیس متداولی است که در ماشین‌های الکتریکی به کار می‌رود که منحنی مشخصه مغناطیسی آن در شکل (۲۹ ـ ۱) نشان داده شده است.



شکل ۲۹ ـ ۱ منحنی مشخصه مغناطیسی فولاد الکتریکی M-5

۱. Gran – Oriented Steel

در عمل از منحنی مغناطیسی برای تعیین B بر حسب H یا H بر حسب B می‌توان استفاده کرد. مثال‌های زیر این موضوع را روشن می‌کند.

مثال ۹ ـ ۱ ـ یک سیم‌پیچ ۱۰۰حلقه‌ای حامل جریان الکتریکی ۱ آمپر بر روی یک هسته از جنس فولاد ورق به طول متوسط ۱۰ سانتی‌متر قرار دارد. چگالی فوران مغناطیسی در هسته چند تسلا است؟

حل:

ـ شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$H=\frac{NI}{\ell_C}=\frac{۱۰۰\times ۱}{۱۰\times ۱۰^{-۲}}=۱۰۰۰\left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

ـ از منحنی مغناطیسی شکل (۲۷ ـ ۱) به ازای H=۱۰۰۰ مقدار B به‌دست می‌آید.

$$H=۱۰۰۰\left[\frac{A.turn}{m}\right]\xrightarrow[\text{شکل (۲۷ ـ ۱)}]{\text{منحنی مغناطیسی}}B=۱/۵[T]$$

مثال ۱۰ ـ ۱ ـ اگر هسته سیم‌پیچ مثال ۹ ـ ۱ از جنس فولاد الکتریکی *M-5* انتخاب شود، چگالی فوران مغناطیسی هسته چند تسلا می‌شود؟ از مقایسه جواب‌های این دو مثال چند نتیجه‌ای به‌دست می‌آید؟

حل:

ـ تعداد حلقه، جریان الکتریکی سیم‌پیچ و طول هسته تغییر نکرده است؛ لذا شدت میدان مغناطیسی ثابت می‌ماند. یعنی:

$$H=۱۰۰۰\left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

ـ از منحنی مغناطیسی (۲۹ ـ ۱) به ازای H=۱۰۰۰ مقدار B به‌دست می‌آید:

$$H=۱۰۰۰\left[\frac{A.turn}{m}\right]\xrightarrow[\text{شکل (۲۹ ـ ۱)}]{\text{منحنی مغناطیسی}}B=۱/۸۵[T]$$

چگالی فوران مغناطیسی هسته از جنس فولاد الکتریکی *M-5* بیشتر از فولاد ورق شده است. در صورتی‌که شدت میدان مغناطیسی در هر دو برابر است. این موضوع مؤید آن است که ضریب نفوذ مغناطیسی فولاد الکتریکی *M-5* نسبت به فولاد ورق بزرگ‌تر است.

مثال ۱۱ ـ ۱ ـ شدت جریان الکتریکی سیم‌پیچ ۱۰۰۰ حلقه‌ای با هسته فولاد ورق به طول متوسط ۱۰ سانتی‌متر و چگالی میدان مغناطیسی ۱/۲ وبر به مترمربع چند آمپر است؟

حل:

ـ از منحنی شکل (۲۷ ـ ۱) شدت میدان مغناطیسی لازم برای تولید چگالی فوران مغناطیسی ۱/۲ وبر بر مترمربع به‌دست می‌آید:

$$B=۱/۲\ [T]\xrightarrow[\text{شکل (۲۷ ـ ۱)}]{\text{منحنی مغناطیسی}}H=۲۰۰\left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

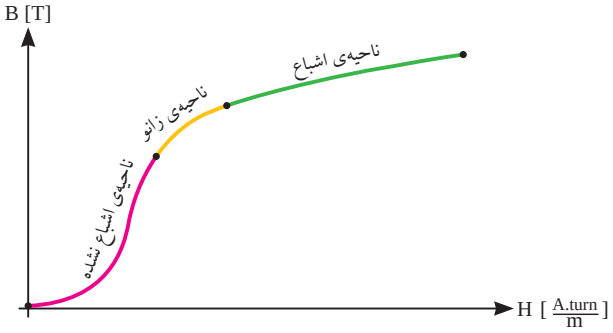
ـ جریان سیم‌پیچ از رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید.

$$H=\frac{NI}{\ell_C}$$

$$I=\frac{H.\ell_C}{N}=\frac{۲۰۰\times ۱۰\times ۱۰^{-۲}}{۱۰۰۰}=۰/۰۲\ [A]$$

۱۴ ـ ۱ ـ نواحی منحنی مغناطیسی مواد فرومغناطیس

منحنی مغناطیسی دارای سه ناحیه است؛ این نواحی در شکل (۳۰ ـ ۱) نشان داده شده است.



شکل ۳۰ ـ ۱

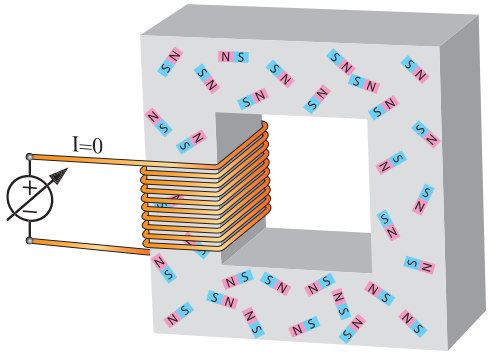
ناحیه اشباع نشده[۱]: در این ناحیه منحنی مغناطیسی تقریباً شکل خطی دارد و با تغییر اندک شدت میدان مغناطیسی H، چگالی فوران مغناطیسی B سریع تغییر می‌کند. در این ناحیه ضریب نفوذ مغناطیسی μ هسته زیاد است.

ناحیه اشباع[۲]: در این ناحیه تغییر شدت میدان مغناطیسی H تاثیر چندانی بر چگالی فوران مغناطیسی B نمی‌گذارد و منحنی مغناطیسی تقریباً تخت می‌شود. در ناحیه اشباع ضریب نفوذ مغناطیسی μ کاهش می‌یابد و به سمت عدد ثابت $۴\pi \times ۱۰^{-۷} \left[\frac{wb}{A.turn.m}\right]$ میل می‌کند.

ناحیه زانو[۳]: ناحیه گذر بین ناحیه اشباع نشده و ناحیه اشباع شده را ناحیه «زانو» منحنی می‌نامند. در این ناحیه به تدریج تاثیر تغییر شدت میدان مغناطیسی H بر چگالی فوران مغناطیسی B کمتر می‌شود. معمولاً مدارهای مغناطیسی برای کار در این ناحیه طراحی می‌شوند.

دلایل ایجاد ناحیه‌های اشباع نشده، زانو و اشباع در منحنی مغناطیسی مواد فرومغناطیس را باید در ساختار مولکولی هسته جستجو کرد. مولکول‌های مواد فرومغناطیس را می‌توان مانند آهن‌رباهای کوچکی با قطب‌های N و S تشبیه کرد. این مولکول‌ها، «مولکول‌های مغناطیسی» نام دارند.

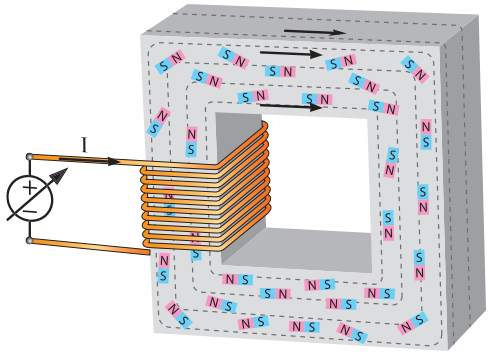
هسته فرومغناطیسی که سیم‌پیچ آن فاقد جریان الکتریکی است در شکل (۳۱ ـ ۱) نشان داده شده است.



شکل ۳۱ ـ ۱

مولکول‌های مغناطیسی هسته، بدون نظم، هر کدام در یک جهت قرار دارند.

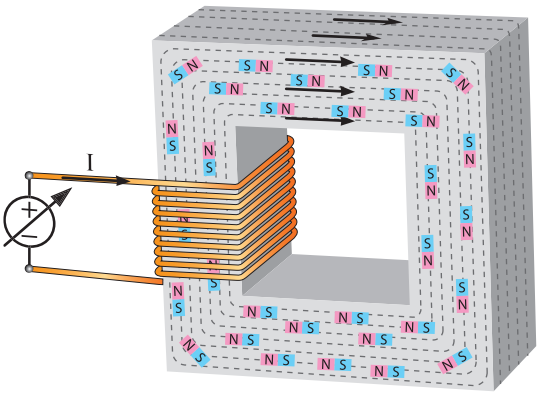
با عبور جریان الکتریکی مستقیم I از سیم‌پیچ، شدت میدان مغناطیسی H، باعث نظم گرفتن تعدادی از مولکول‌های مغناطیسی هسته در جهت میدان مغناطیسی سیم‌پیچ می‌شود. لذا چگالی فوران مغناطیسی B در هسته زیاد می‌شود. شکل (۳۲ ـ ۱)



شکل ۳۲ ـ ۱

۱. Unsaturation Region ۲. Saturation Region ۳. Knee Region

با افزایش بیشتر جریان الکتریکی سیم‌پیچ، شدت میدان مغناطیسی H بیشتر می‌شود و مولکول‌های مغناطیسی بیشتری در هسته منظم می‌شوند تا این‌که لحظه‌ای فرا می‌رسد که تمام مولکول‌های مغناطیسی هسته نظم می‌گیرند. در این لحظه تمام مولکول‌های مغناطیسی در جهت میدان مغناطیسی سیم‌پیچ قرار می‌گیرند و چگالی فوران مغناطیسی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در این حالت هسته در ناحیه اشباع است (شکل ۳۳ ـ ۱).



شکل ۳۳ ـ ۱

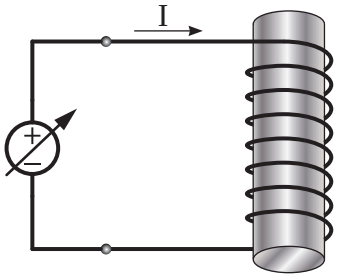
پس از اشباع هسته در صورتی‌که جریان الکتریکی سیم‌پیچ زیاد شود، شدت میدان مغناطیسی H افزایش می‌یابد، اما چگالی فوران مغناطیسی B هسته زیاد نمی‌شود؛ زیرا کلیه مولکول‌های مغناطیسی هسته منظم شده‌اند.

افزایش جریان الکتریکی سیم‌پیچ بعد از اشباع هسته باعث گرم شدن سیم‌پیچ و ایجاد تلفات حرارتی در آن می‌شود.

اگر پس از اشباع هسته جریان الکتریکی سیم‌پیچ به تدریج تا صفر کم شود، شدت میدان مغناطیسی H در هسته صفر می‌شود و چگالی فوران مغناطیسی B کم می‌شود، اما به صفر نمی‌رسد؛ زیرا تعدادی از مولکول‌های مغناطیسی نظم خود را حفظ می‌کنند. به چگالی فوران مغناطیسی B که پس از صفر شدن شدت میدان مغناطیسی H در هسته باقی می‌ماند «پس‌ماند» می‌گویند.

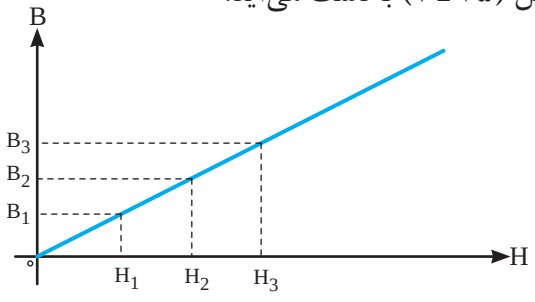
۱۵ ـ ۱ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی سیم‌پیچ بدون هسته در خلأ

برای نشان دادن ضریب نفوذ مغناطیسی در خلأ، جریان مستقیم dc از سیم‌پیچ بدون هسته شکل (۳۴ ـ ۱) در خلأ عبور داده شده است.



شکل ۳۴ ـ ۱

جریان الکتریکی سیم‌پیچ از صفر به آهستگی تا حداکثر مجاز افزایش داده می‌شود. افزایش جریان I، شدت میدان مغناطیسی سیم‌پیچ را طبق رابطه $I = \frac{NI}{\ell_c}$ افزایش می‌دهد. اگر تغییرات چگالی فوران مغناطیسی B درون سیم‌پیچ نسبت به افزایش شدت میدان مغناطیسی H سیم پیچ رسم شود، نمودار خطی شکل (۳۵ ـ ۱) به‌دست می‌آید.



شکل ۳۵ ـ ۱

در شکل (۳۵ ـ ۱) مشاهده می‌شود تغییرات چگالی فوران مغناطیسی B نسبت به تغییر شدت میدان مغناطیسی H خطی است. شیب این خط مقداری ثابت دارد و بیانگر «ضریب نفوذ مغناطیسی در خلأ» می‌باشد. طبق تعریف، نسبت چگالی فوران مغناطیسی B به شدت میدان مغناطیسی H در هر نقطه از این نمودار را «ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ» گویند و آن را با «μ_o» نشان می‌دهند و از رابطه (۱۰ ـ ۱) به‌دست می‌آید.

$$\mu_\circ = \frac{B_\circ}{H_\circ} \qquad (۱۰ ـ ۱)$$

در این رابطه:

$B_\circ$ چگالی فوران مغناطیسی در خلأ

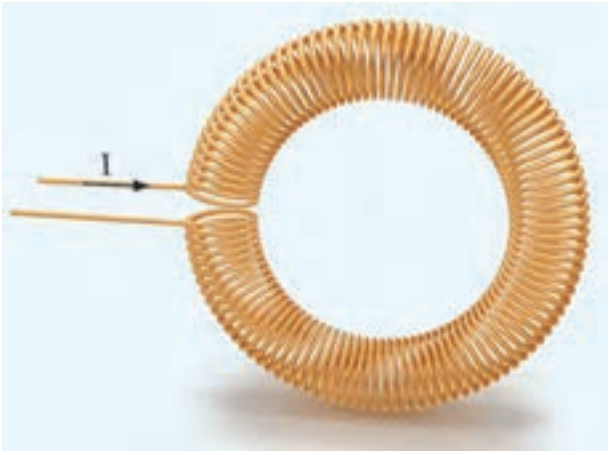
$H_\circ$ شدت میدان مغناطیسی در خلأ

$\mu_\circ$ ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ

ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ همواره مقداری ثابت دارد و برابر است با:

$$\mu_\circ = ۴\pi \times ۱۰^{-۷} \left[\frac{wb}{A.turn.m}\right] \qquad (۱۱ ـ ۱)$$

مثال ۱۲ ـ ۱ ـ سیم‌پیچی بدون هسته در خلأ دارای ۱۰۰۰ حلقه و طول متوسط ۱۰ سانتی‌متر در شکل (۳۶ ـ ۱) نشان داده شده است. چگالی فوران مغناطیسی درون این سیم‌پیچ در خلأ ۰/۶ وبر بر متر مربع اندازه‌گیری شده است. جریان الکتریکی سیم‌پیچ چند آمپر است؟



شکل ۳۶ ـ ۱

حل:

ـ شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۱۰ ـ ۱) به‌دست می‌آید.

$$\mu_\circ = \frac{B_\circ}{H_\circ}$$

$$H_\circ = \frac{B_\circ}{\mu_\circ} = \frac{۰/۶}{۴\pi \times ۱۰^{-۷}} = ۵۰۰۰۰۰ \left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

ـ جریان سیم‌پیچ از رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید.

$$H = \frac{NI}{\ell_C}$$

$$I = \frac{H.\ell_C}{N} = \frac{۵۰۰۰۰۰ \times ۱۰ \times ۱۰^{-۲}}{۱۰۰۰} = ۵۰ \left[A\right]$$

مثال ۱۳ ـ ۱ ـ اگر هسته سیم‌پیچ مثال (۱۲ ـ ۱) از فولاد الکتریکی $M\text{-}5$ فرض شود، جریان الکتریکی سیم‌پیچ چند آمپر می‌شود؟

حل:

ـ ابتدا از منحنی شکل (۲۹ ـ ۱) شدت میدان مغناطیسی برای تولید چگالی میدان ۱/۶ وبر بر مترمربع به‌دست می‌آید.

$$B = ۱/۶ \frac{wb}{m^۲} \xrightarrow[\text{شکل (۲۷ ـ ۱)}]{\text{منحنی مغناطیسی}} H = ۶۰ \left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

ـ جریان الکتریکی سیم‌پیچ از رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید.

$$H = \frac{NI}{\ell_C}$$

$$I = \frac{H.\ell_C}{N} = \frac{۶۰\times۱۰\times۱۰^{-۲}}{۱۰۰۰} = ۰/۰۰۶\ [A]$$

فعالیت

درباره اختلاف نتایج در جریان الکتریکی سیم‌پیچ مثال‌های (۱۱ ـ ۱) و (۱۲ ـ ۱) بحث کنید.

۱۶ ـ ۱ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی

ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ $\mu_\circ = ۴\pi\times۱۰^{-۷}\left[\frac{wb}{A.turn.m}\right]$ می‌باشد و مقدار آن ثابت است. لذا به‌عنوان شاخص انتخاب شده است و نفوذپذیری مغناطیسی مواد با نفوذپذیری مغناطیسی خلأ مقایسه می‌شود و نسبت به آن سنجیده خواهد شد.

نسبت ضریب نفوذ مغناطیسی μ به ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ $\mu_\circ$ را «ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی[۱]» گویند و آن را با μ_r نمایش می‌دهند که از رابطه (۱۲ ـ ۱) به‌دست می‌آید.

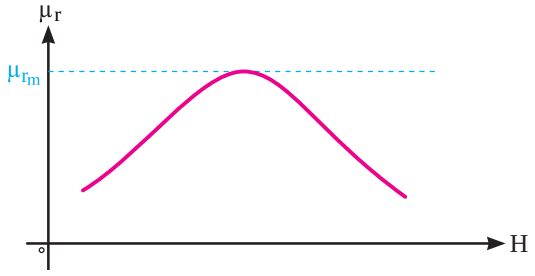
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_\circ} \qquad (۱۲ ـ ۱)$$

ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی، نسبت دو ضریب نفوذ مغناطیسی است و بدون واحد است. معمولاً کارخانه‌های تولیدکننده فولاد مغناطیسی، منحنی ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r بر حسب شدت میدان مغناطیسی H تولیدات خود را ارائه می‌کنند تا مصرف‌کننده با استفاده از آن ضریب نفوذ مغناطیسی μ را از رابطه (۱۳ـ۱) به‌دست آورد.

$$\mu = \mu_\circ \mu_r \qquad (۱۳ ـ ۱)$$

ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r نشان می‌دهد جسم چند برابر خلأ نفوذپذیری مغناطیسی دارد.

منحنی ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r بر حسب شدت میدان مغناطیسی H برای فولاد ورق در شکل (۳۷ ـ ۱) نشان داده است.



شکل ۳۷ ـ ۱

منحنی شکل (۳۷ ـ ۱) نشان می‌دهد ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r در ناحیه اشباع نشده بزرگ و تقریباً ثابت است و با افزایش شدت میدان مغناطیسی به تدریج کاهش می‌یابد و در ناحیه اشباع کوچک می‌شود.

ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r علاوه بر این‌که به شدت میدان مغناطیسی H وابسته است به فرکانس جریان الکتریکی سیم‌پیچ و دمای هسته نیز بستگی دارد. در یک شدت میدان مغناطیسی H ثابت، افزایش فرکانس جریان الکتریکی سیم‌پیچ و دمای هسته، ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r را کاهش می‌دهد.

ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r معیار مناسبی برای شناخت رفتار مواد در میدان مغناطیسی است. مواد بر اساس ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی در سه گروه دسته‌بندی می‌شوند:

۱. Relative Permeability

ـ مواد دیامغناطیس[1]

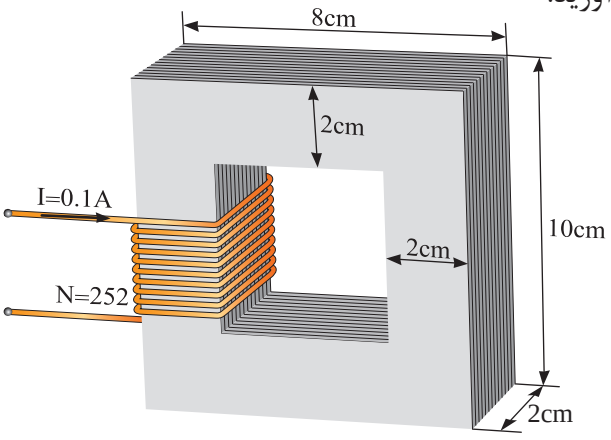
ـ مواد پارامغناطیس[2]

ـ مواد فرومغناطیس[3]

فعالیت

۱ ـ افزایش دمای هسته و فرکانس جریان سیم‌پیچ چگونه باعث کاهش ضریب نفوذ مغناطیسی هسته می‌شوند؟

مثال ۱۴ ـ ۱ ضریب نفوذ مغناطیسی μ هسته شکل (۳۸ ـ ۱) که از جنس فولاد ورق است را به‌دست آورید.



شکل ۳۸ ـ ۱

حل:

محیط بیرونی هسته برابر است با:

$$\ell_{C_1} = ۲(۱۰+۸) = ۳۶\ [cm]$$

محیط درونی هسته برابر است با:

$$\ell_{C_2} = ۲(۶+۴) = ۲۰\ [cm]$$

محیط متوسط برابر است با:

$$\ell_C = \frac{۳۶+۲۰}{۲} = ۲۸\ [cm]$$

شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۷ ـ ۱) برابر است با:

$$H = \frac{NI}{\ell_C} = \frac{۲۵۲\times ۰/۱}{۲۸\times ۱۰^{-۲}} = ۹۰\left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

از منحنی شکل (۲۸ ـ ۱) ضریب نفوذ نسبی برابر است با:

$$H = ۹۰\left[\frac{A.turn}{m}\right] \xrightarrow{\text{منحنی شکل (۲۸ ـ ۱)}} \mu_r = ۶۰۰۰$$

از رابطه (۱۳ ـ ۱) ضریب نفوذ مغناطیسی برابر است با:

$$\mu = \mu_\circ \mu_r$$

$$\mu = ۴\pi\times ۱۰^{-۷}\times ۶۰۰۰ = ۷/۵\times ۱۰^{-۳}\left[\frac{wb}{A.turn.m}\right]$$

پرسش ۴ ـ ۱

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ با قرار دادن هسته فرومغناطیس در سیم‌پیچ حامل جریان الکتریکی ..... در هسته ..... می‌یابد.

۲ ـ در ناحیه اشباع تغییر ..... تاثیر چندانی بر ..... نمی‌گذارد.

۳ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ همواره مقدار ..... دارد و برابر است با ..... .

۴ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی معیار مناسبی برای شناخت ..... در ..... است.

۵ ـ واحد ضریب نفوذ مغناطیسی ..... است.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی مواد فرومغناطیس مقدار ثابتی دارد.

☐ صحیح ☐ غلط

۱. Diamagnetic ۲. Paramagnetic ۳. Ferromagnetic

۲ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی معیاری است که میزان گذردهی هسته را در مقابل خطوط نیروی مغناطیسی نشان می‌دهد.

صحیح ☐ غلط ☐

۳ ـ ناحیه زانو منحنی مغناطیسی، ناحیه گذر بین ناحیه اشباع نشده و ناحیه اشباع شده است.

صحیح ☐ غلط ☐

۴ ـ تغییرات چگالی فوران مغناطیسی نسبت به تغییر شدت میدان مغناطیسی خطی است.

صحیح ☐ غلط ☐

۵ ـ افزایش فرکانس جریان الکتریکی سیم‌پیچ و دمای هسته، ضریب نفوذ نسبی را کاهش می‌دهد.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی را تعریف کنید.

۲ ـ رابطه ضریب نفوذ مغناطیسی را بنویسید. کمیت‌های آن را شرح دهید.

۳ ـ متداول‌ترین مواد فرومغناطیس از چه فلزاتی ساخته می‌شوند؟

۴ ـ منحنی مغناطیسی مواد فرومغناطیسی را رسم کنید و نواحی آن را مشخص کنید.

۵ ـ ناحیه اشباع نشده منحنی مغناطیسی را تعریف کنید.

۶ ـ منحنی مغناطیسی سیم‌پیچ بدون هسته در خلأ را رسم کنید.

۷ ـ رابطه ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ را بنویسید و کمیت‌های آن را تعریف کنید.

۸ ـ مواد بر اساس ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی به چند دسته تقسیم‌بندی می‌شوند؟

تمرین ۴ ـ ۱

۱ ـ هسته فرومغناطیسی با ضریب نفوذ مغناطیسی $۰/۵ \frac{wb}{A.turn.m}$ و طول ۲۰ cm در نظر است. اگر روی این هسته سیم‌پیچ ۲۰۰۰ دوری با شدت جریان الکتریکی ۲۰ mA قرار داده شده باشد، چگالی شار هسته چند تسلا خواهد شد؟

۲ ـ شدت جریان الکتریکی سیم‌پیچ ۵۰۰ حلقه‌ای که بر روی هسته‌ای به طول ۲۰ cm و چگالی فوران ۱ تسلا قرار دارد را در دو حالت زیر محاسبه کنید:

الف ـ هسته با جنس فولاد ورق

ب ـ هسته با جنس فولاد الکتریکی $M\text{-}5$

ج ـ از مقایسه نتایج بندهای الف و ب چه نتیجه‌ای به‌دست می‌آید؟

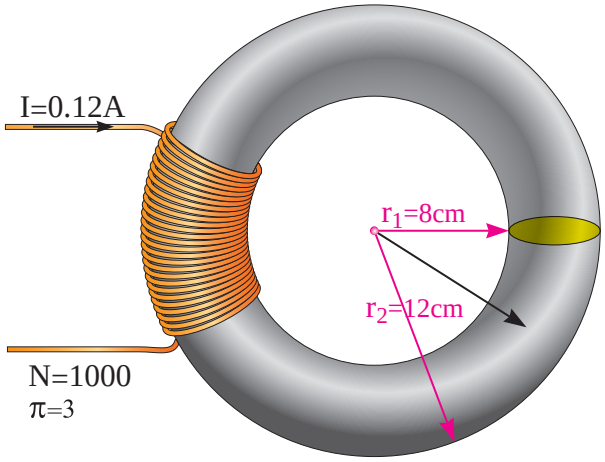
۳ ـ سیم‌پیچی مطابق شکل (۳۸ ـ ۱) دارای ۵۰۰ حلقه و طول متوسط ۲۰ cm و شدت جریان الکتریکی ۴A در نظر است. مطلوب است چگالی فوران مغناطیسی در دو حالت زیر:

الف ـ بدون هسته در خلأ

ب ـ با هسته از جنس فولاد الکتریکی $M\text{-}5$

ج ـ از مقایسه نتایج بندهای الف و ب چه نتیجه‌ای به‌دست می‌آید؟

۴ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی μ هسته شکل (۳۹ ـ ۱) که از جنس فولاد ورق است را به‌دست آورید.



شکل ۳۹ ـ ۱

۱ ـ ۱۶ ـ ۱ ـ مواد دیامغناطیس

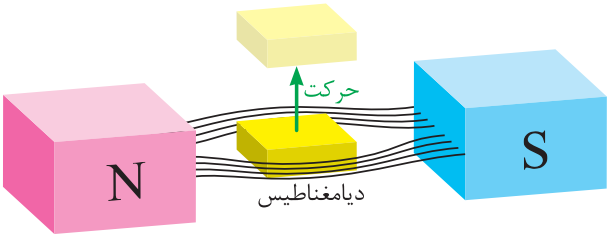
ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r مواد دیامغناطیس کمی کمتر از یک می‌باشد. جیوه، نقره، قلع و آب از این مواد هستند.

در مـــواد دیامغناطیـــس مولکول‌های مغناطیســـی بوجود نمی‌آید. هنگامی که مواد دیامغناطیس در میدان مغناطیســـی آهن‌ربای قوی مطابق شکل (۴۰ ـ ۱) قرار می‌گیرند:

ـ فوران مغناطیسی را از خود عبور نمی‌دهند.

ـ میدان مغناطیسی را غیر یکنواخت می‌کنند.

ـ از طرف میدان مغناطیسی دفع می‌شوند.



شکل ۴۰ ـ ۱

۲ ـ ۱۶ ـ ۱ ـ مواد پارامغناطیس

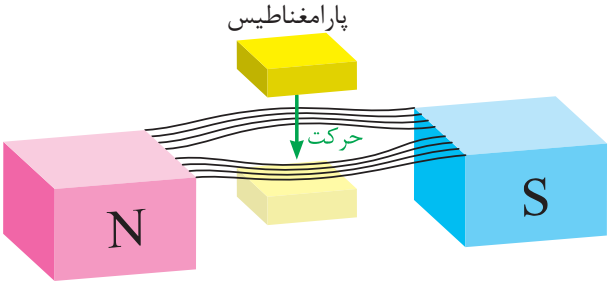
ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r مواد پارامغناطیس کمی از یک بیشـــتر است. آلومینیم، هوا و پلاتین از این مواد هستند.

مواد پارامغناطیس، مولکول‌های مغناطیسی ضعیفی دارنـــد؛ هنگامـــی که مـــواد پارامغناطیـــس در میدان مغناطیســـی آهن‌ربای قوی مطابق شکل (۴۱ ـ ۱) قرار می‌گیرند:

ـ مولکول‌های مغناطیسی آنها می‌کوشند تا در جهت میدان مغناطیسی منظم شوند.

ـ به طرف ناحیه قوی میدان مغناطیســـی کشـــیده می‌شوند. عامل این حرکت نیروی جاذبه بین مولکول‌های مغناطیسی این مواد و میدان مغناطیسی است.

ـ به آهن‌ربا تبدیل می‌شـــوند و با خـــروج از میدان مغناطیســـی، خاصیـــت آهن‌ربایـــی خود را از دســـت می‌دهند.



شکل ۴۱ ـ ۱

۳ ـ ۱۶ ـ ۱ ـ مواد فرومغناطیس

ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r مواد فرومغناطیس بین ۲۰۰۰ تا ۸۰۰۰۰ است. آهن و آلیاژهای آن از این مواد هستند.

مواد فرومغناطیســـی مولکول‌های مغناطیسی بسیار قوی دارند. هنگامی که مـــواد فرومغناطیس در میدان مغناطیسی آهن‌ربای قوی قرار می‌گیرند:

ـ مولکول‌های مغناطیسی آنها در جهت میدان مغناطیسی منظم می‌شوند و به بالاترین درجه هم‌سویی می‌رسند.

ـ به طرف ناحیه قوی میدان مغناطیسی کشیده می‌شوند و جذب قطب‌ها می‌شوند.

ـ به آهن‌ربا تبدیل می‌شوند و با خروج از میدان مغناطیسی، خاصیت آهن‌ربایی خود را از دست نمی‌دهند.

اگر دمای مواد فرومغناطیس از یک مقدار معین که دمای «کوری[1]» نامیده می‌شود بالاتر برود هم‌سویی مولکول‌های مغناطیسی از بین می‌رود و این مواد پارامغناطیس می‌شوند.[2]

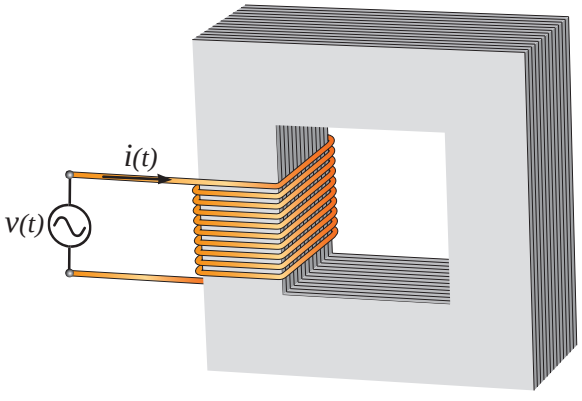
در جدول (۱ ـ ۱) ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r چند نمونه از مواد در ناحیه اشباع نشده با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

مواد فرومغناطیس		مواد پارامغناطیس		مواد دیامغناطیس	
ماده	μ_r	ماده	μ_r	ماده	μ_r
آهن بدون آلیاژ	تا ۶۰۰۰	هوا	۱/۰۰۰۰۰۰۴	جیوه	۰/۹۹۹۷۵
فولاد الکتریکی	تا ۶۵۰۰	اکسیژن	۱/۰۰۰۰۰۰۳	نقره	۰/۹۹۹۹۸۱
آهن نیکل آلیاژ	۳۰۰۰۰۰	آلومینیم	۱/۰۰۰۰۲۲	قلع	۰/۹۹۹۸۸
فریت مغناطیسی	۱۰۰۰۰	پلاتین	۱/۰۰۰۳۶	آب	۰/۸۹۹۹۱

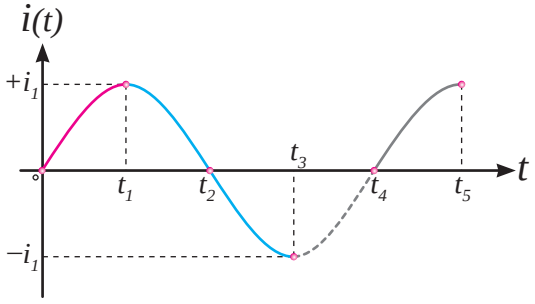
جدول ۱ ـ ۱

۱۷ ـ ۱ ـ حلقه هیسترزیس

سیم‌پیچی با هسته فرومغناطیس متصل به یک منبع متناوب سینوسی در شکل (۴۲ ـ ۱) نشان داده شده است، که از آن جریان الکتریکی متناوب $i(t)$ به شکل موج (۴۳ ـ ۱) می‌گذرد.



شکل ۴۲ ـ ۱

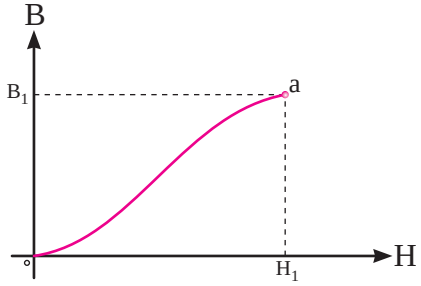


شکل ۴۳ ـ ۱

با فرض اینکه هسته در ابتدا مغناطیس نشده است، شدت میدان H توسط جریان الکتریکی $i(t)$ که به‌آرامی افزایش می‌یابد، زیاد می‌شود؛ لذا چگالی فوران مغناطیسی B هسته مطابق منحنی مغناطیسی oa در شکل (۴۴ ـ ۱) تغییر خواهد کرد. B_1 چگالی فوران مغناطیسی نقطه a مربوط به شدت میدان مغناطیسی H_1 متناظر با i_1 است.

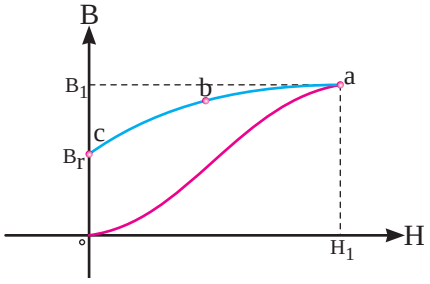
۱. Curie

۲. برای آهن دمای کوری ۱۰۴۳ درجه کلوین است.



شکل ۴۴ ـ ۱

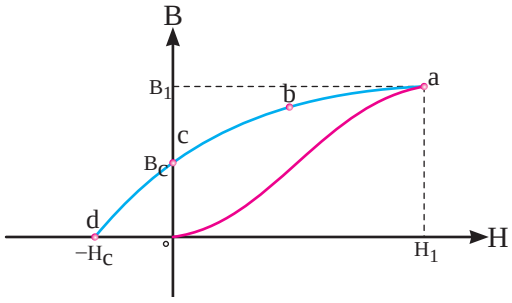
بعد از زمان t_1 جریـــان الکتریکی $i(t)$ رو به کاهش می‌گذارد و متناظر با آن شـــدت میدان مغناطیسی H نیز کاهش می‌یابد و منحنی مغناطیســـی مسیر abc را مطابق شکل (۴۵ ـ ۱) دنبال خواهد کرد.



شکل ۴۵ ـ ۱

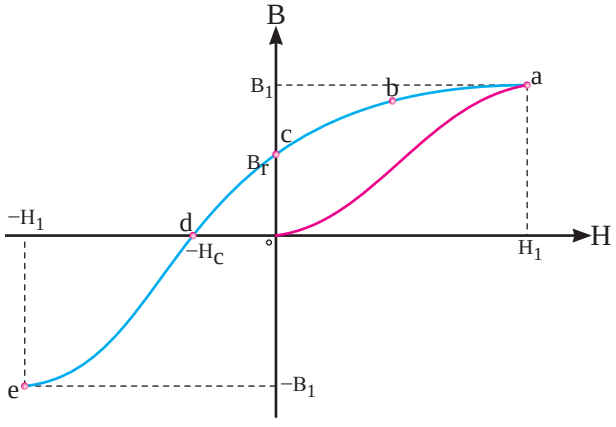
با صفر شدن جریان در t_2، شدت میدان مغناطیسی H صفر می‌شـــود اما چگالی فوران مغناطیسی هسته به B_r می‌رســـد. چگالی فوران مغناطیسی B_r، «پس‌ماند» هسته نامیده می‌شود.

بعد از زمان t_2 جهت جریان الکتریکی $i(t)$ سیم‌پیچ معکوس می‌شود؛ لذا شدت میدان مغناطیسی H وارونه می‌گردد. چگالی فوران مغناطیسی B_r در هسته کاهش می‌یابد و در مقداری از H مثـــلاً $-H_c$ از میان خواهد رفت و صفر می‌شـــود. شـــدت میدان مغناطیسی $-H_c$ که پس‌ماند هســـته B_r را از بین می‌برد، « شدت میدان مغناطیسی خنثی کننده[1]» نـــامیده می‌شود. شـــکل (۴۶ ـ ۱)



شکل ۴۶ ـ ۱

با افزایش شـــدت میدان مغناطیســـی H در جهت وارونـــه، چگالی فوران مغناطیســـی B هســـته مطابق منحنی de در شکل (۴۷ ـ ۱) تغییر خواهد کرد.

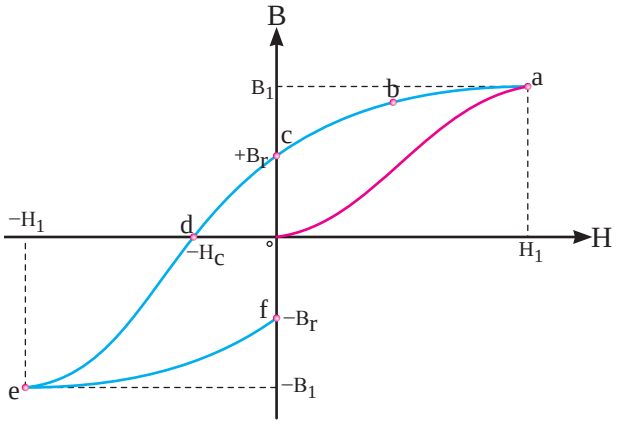


شکل ۴۷ ـ ۱

چگالی فوران مغناطیسی $-B_1$ در نقطه e مربوط به شدت میدان مغناطیسی $-H_1$ متناظر با $-i_1$ است.

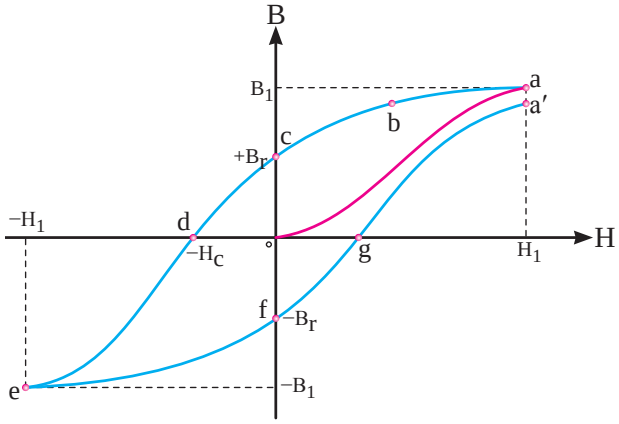
بعد از زمان t_3 با تغییر جریان الکتریکی $i(t)$ شدت میدان مغناطیسی H تغییر خواهد کرد و منحنی B-H مســـیر ef را مطابق شکل (۴۸ ـ ۱) دنبال خواهد کرد. تا با صفر شـــدن جریان الکتریکی در t_4، شـــدت میدان مغناطیسی H صفر می‌شود و چگالی فوران مغناطیسی به $-B_r$ می‌رسد.

۱. Coercive Force



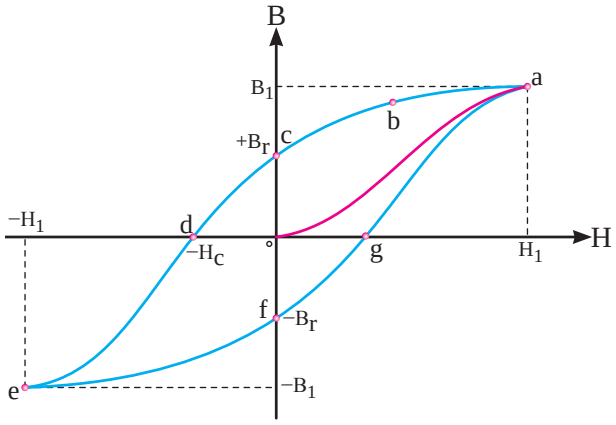
شکل ۴۸ ـ ۱

بعد از زمان t_4 جهت جریان الکتریکی $i(t)$ در سیم‌پیچ معکوس می‌شود و شدت میدان مغناطیسی H نیز وارونه می‌گردد و افزایش می‌یابد در این صورت منحنی B-H مسیر fga′ را طی خواهد کرد (شکل ۴۹ ـ ۱).



شکل ۴۹ ـ ۱

باید دانست حلقه منحنی مغناطیسی بسته نمی‌شود و پس از چند سیکل مغناطیس شدن هسته حلقه تقریباً بسته می‌شود. این شکل به «حلقه پس‌ماند» یا «حلقه هیسترزیس[1]» معروف است (شکل ۵۰ ـ ۱).



شکل ۵۰ ـ ۱

حلقه پس‌ماند یا هیترزیس نشان می‌دهد:

ـ رابطه بین چگالی فوران مغناطیسی B و شدت مغناطیسی H غیر خطی و چند مقداری است.

ـ اگرچه جریان الکتریکی سیم‌پیچ در نقاط C و F صفر است، اما هسته مغناطیس می‌باشد و دارای پس‌ماند مغناطیسی است.

ـ به ازای یک حلقه هیسترزیس، جهت شدت میدان مغناطیسی هسته عوض می‌شود؛ لذا مولکول‌های مغناطیسی هسته می‌گردند و جهت میدان مغناطیسی در هسته تغییر می‌کند.

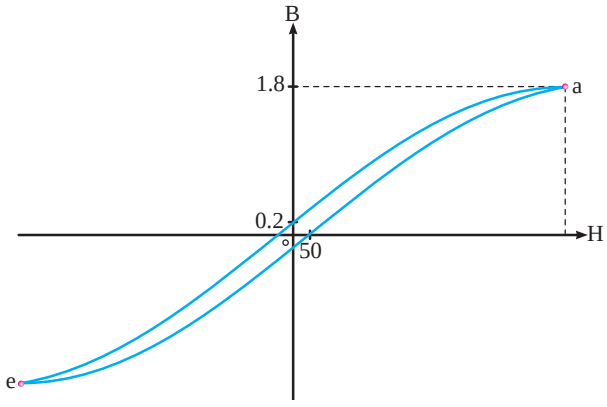
به ازای هر سیکل جریان الکتریکی سیم‌پیچ، یک بار حلقه هیسترزیس تکرار می‌شود. بنابراین در هر ثانیه تعداد حلقه‌های هیسترزیس با فرکانس جریان سیم‌پیچ برابر خواهد شد. بدین ترتیب متناسب با فرکانس جریان سیم‌پیچ، جهت میدان مغناطیسی در هسته تغییر می‌کند. مقدار انرژی که در یک ثانیه صرف تغییر جهت میدان مغناطیسی در هسته می‌شود را «تلفات‌هیسترزیس» تعریف می‌کنند. تلفات هیسترزیس به‌صورت حرارت در هسته ظاهر می‌شود و تابع فرکانس

۱. Hystersis Loop

جریان الکتریکی سیم‌پیچ است و متناسب با مساحت حلقه هیسترزیس می‌باشد. بدیهی است در جریان الکتریکی مستقیم هسته تلفات هیسترزیس ندارد. چرا؟

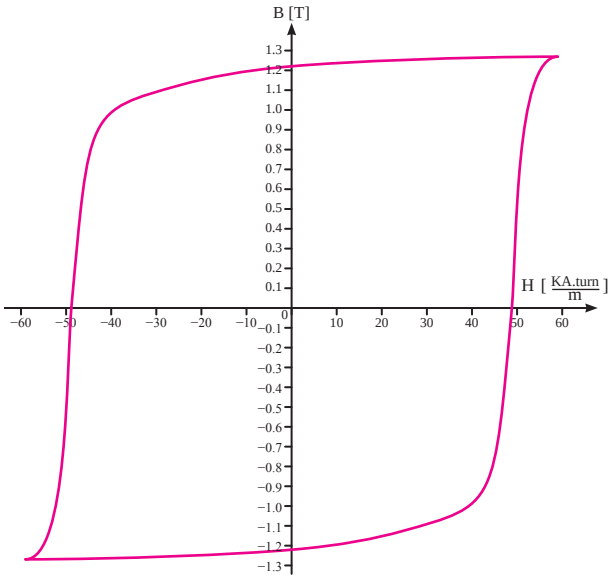
در ماشین‌های الکتریکی، ترانسفورمرها و آهن‌رباهای موقتی جنس هسته از مواد فرومغناطیسی موسوم به «آهن نرم[1]» انتخاب می‌شود.

چگالی فوران مغناطیسی پس‌ماند B_r در آهن نرم بسیار کم است، لذا تلفات هیسترزیس در آنها کاهش می‌یابد. حلقه هیسترزیس آهن نرم وسیع نیست و شدت میدان خنثی‌کننده H_c نسبتاً کوچکی دارند. شکل (۵۱ ـ ۱).



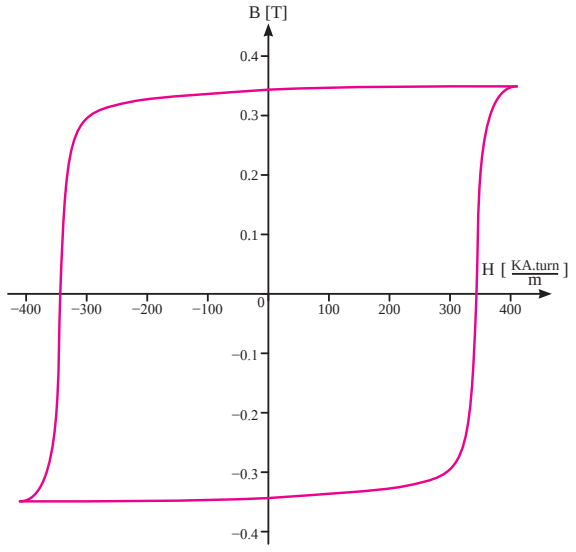
شکل ۵۱ ـ ۱

در آهن‌رباهای دائم[2] جنس هسته غالباً آلیاژی از آهن، نیکل و کبالت موسوم به «آهن سخت»[3] انتخاب می‌شود. یک دسته از این آلیاژها «النیکو»[4] است که چگالی فوران مغناطیسی پس‌ماند B_r آنها بسیار زیاد می‌باشد. حلقه هیسترزیس آهن سخت وسیع است و شدت میدان خنثی‌کننده H_c نسبتاً بزرگی دارند. حلقه هیسترزیس النیکو ۵ در شکل (۵۲ ـ ۱) نشان داده شده است.



شکل ۵۲ ـ ۱

در مدارهای مغناطیسی که در فرکانس‌های رادیویی و مخابراتی کار می‌کنند، جنس هسته از مواد فرومغناطیس سرامیکی موسوم به «فریت[5]» انتخاب می‌شود. فریت از ترکیب اکسید آهن و پودرهای کربنات باریم یا استرونسیوم ساخته می‌شود. چگالی فوران مغناطیسی پس‌ماند B_r در فریت کمتر از النیکو است، اما شدت میدان خنثی‌کننده H_c در فریت بیشتر از النیکو می‌باشد. حلقه هیسترزیس فریت استرونسیوم در شکل (۵۳ ـ ۱) نشان داده شده است.



شکل ۵۳ ـ ۱

۱. Soft Iron ۲. Permanent Magnet ۳. Hard Iron ۴. Alnico ۵. Ferrite

پرسش ۵ ـ ۱

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی مواد فرومغناطیسی بین ..... تا ..... است.

۲ ـ در ماشین‌های الکتریکی جنس هسته از ..... موسوم به ..... انتخاب می‌شود.

۳ ـ در آهن‌رباهای ..... جنس هسته از ..... انتخاب می‌شود.

۴ ـ در مدارهای مغناطیسی مخابراتی جنس هسته از ..... موسوم به ..... انتخاب می‌شود.

۵ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی مواد دیامغناطیس ..... است.

۶ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی مواد پارامغناطیس ..... است.

۷ ـ تلفات هیسترزیس تابع ..... و ..... سیم‌پیچ است.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ در مواد دیامغناطیس مولکول‌های مغناطیسی به‌وجود نمی‌آیند.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ مواد پارامغناطیس، مولکول‌های مغناطیسی ضعیفی ندارند.

صحیح ☐ غلط ☐

۳ ـ تلفات هیسترزیس به‌صورت حرارت در هسته ظاهر می‌شود.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ رفتار مواد پارامغناطیس در میدان مغناطیسی را شرح دهید.

۲ ـ رفتار مواد فرومغناطیس در میدان مغناطیسی را شرح دهید.

۳ ـ چند نمونه از مواد دیا، پارا و فرومغناطیس را نام ببرید.

۴ ـ دمای کوری را تعریف کنید.

۵ ـ شدت میدان خنثی‌کننده را تعریف کنید.

۶ ـ چگالی فوران مغناطیسی پس‌ماند را تعریف کنید.

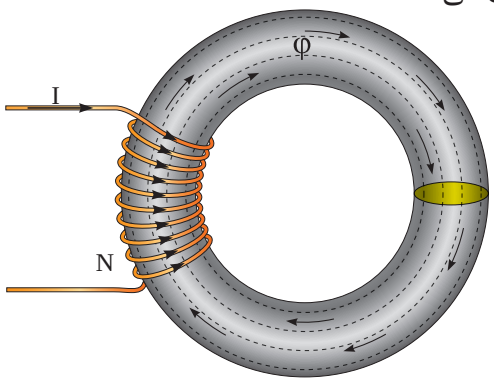
۷ ـ تلفات هیسترزیس را تعریف کنید.

۸ ـ ویژگی‌های مغناطیسی آهن سخت را بنویسید.

۹ ـ حلقه هیسترزیس در مواد مغناطیسی را با یکدیگر مقایسه کنید.

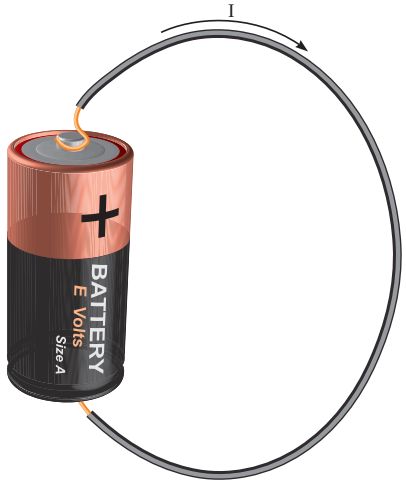
۱۸ ـ ۱ ـ مدارهای مغناطیسی

در شکل (۵۴ ـ ۱) شدت جریان الکتریکی I سیم‌پیچی در هسته فرومغناطیس فوران مغناطیسی φ جاری می‌کند.



شکل ۵۴ ـ ۱ـ مدار مغناطیسی

این پدیده از بعضی‌جهات مشابه جریان الکتریکی است که یک باتری در هادی جاری می‌کند (شکل۵۵ ـ ۱).



شکل ۵۵ ـ ۱ مدار الکتریکی

همان‌طور که اتصال هادی به باتری، مسیر بسته‌ای برای جاری شدن جریان فراهم می‌کند را «مدار الکتریکی[۱]» می‌نامند، مسیر بسته‌ای که فوران مغناطیسی در آن برقرار می‌شود «مدار مغناطیسی[۲]» نامیده می‌شود.

وجه تشابه مدار مغناطیسی شکل (۵۴ ـ ۱) با مدار الکتریکی شکل (۵۵ ـ ۱) عبارت است از:

- «نیروی محرکه الکتریکی[۳]» باتری E عامل جاری شدن جریان الکتریکی در هادی است و «نیروی محرکه مغناطیسی[۴]» سیم‌پیچ θ عامل جاری شدن فوران مغناطیسی در هسته است. بنابراین عملکرد نیروی محرکه مغناطیسی و نیروی محرکه الکتریکی شبیه به یکدیگر است؛ یعنی:

θ مدار مغناطیسی $\xleftarrow{\text{مشابه}}$ E مدار الکتریکی

- جریان الکتریکی I، در هادیِ مدار الکتریکی جاری می‌شود و فوران مغناطیسی φ در هسته مدار مغناطیسی جاری می‌شود. بنابراین رفتار فوران مغناطیسی و جریان الکتریکی نیز شبیه به یکدیگر است؛ یعنی:

φ مدار مغناطیسی $\xleftarrow{\text{مشابه}}$ I مدار الکتریکی

- هادی در مدار الکتریکی مسیری برای عبور جریان الکتریکی است و از خود در مقابل عبور جریان الکتریکی «مقاوت الکتریکی[۵]» نشان می‌دهد و هسته در مدار مغناطیسی نیز مسیری برای عبور فوران مغناطیسی است و از خود در مقابل عبور فوران مغناطیسی «مقاومت مغناطیسی[۶]» نشان می‌دهد. بنابراین مقاومت مغناطیسی $\mathcal{R}$ و مقاومت الکتریکی R شبیه به یکدیگر می‌باشند؛ یعنی:

$\mathcal{R}$ مدار مغناطیسی $\xleftarrow{\text{مشابه}}$ R مدار الکتریکی

بین کمیت‌های ولتاژ، جریان و مقاومت در یک مدار الکتریکی قانون اُهم رابطه (۱۴ ـ ۱) را ارایه کرده است:

$$R = \frac{E}{I} \qquad (۱ - ۱۴)$$

با توجه به شباهت‌های میان کمیت‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌توان قانون اهم را برای یک مدار مغناطیسی به‌صورت رابطه (۱۵ ـ ۱) نوشت:

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\varphi} \qquad (۱ - ۱۵)$$

در این رابطه:

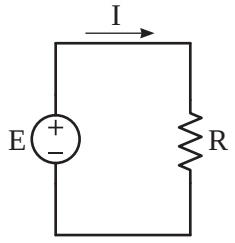
θ نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ بر حسب [A.turn]

φ فوران مغناطیسی هسته بر حسب [wb]

$\mathcal{R}$ مقاومت مغناطیسی هسته بر حسب $\left[\frac{A.turn}{wb}\right]$

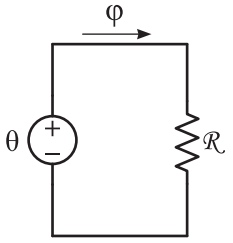
۱. Electric Circuits
۲. Magnetic Circuit
۳. Electro Motive Force (EMF)
۴. Magneto Motive Force(MMF)
۵. Resistance
۶. Reluctance

برای مدار الکتریکی شکل (۵۵ ـ ۱) مدار الکتریکی معادل شکل (۵۶ ـ ۱) ارائه شده است.



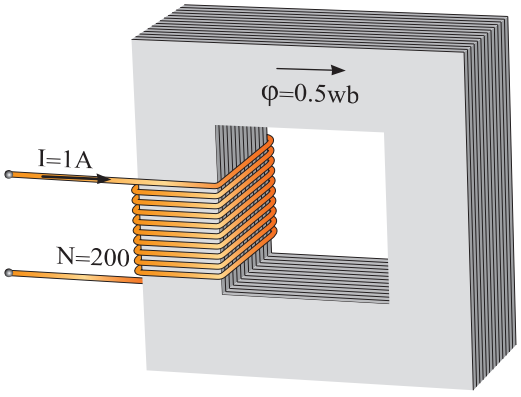
شکل ۵۶ ـ ۱

با توجه به وجه تشـــابه میان مدارهای مغناطیسی با مدارهای الکتریکی می‌توان مدار الکتریکی معادل شکل (۵۷ ـ ۱) را با تقریب مناســـبی برای مدار مغناطیســـی شکل (۵۴ ـ ۱) در نظر گرفت.



شکل ۵۷ ـ ۱

مثال ۱۵ ـ ۱ ـ فوران مغناطیســـی در هسته شکل (۵۸ ـ ۱) برابر ۰/۵ wb اســـت. مقاومت مغناطیســـی هسته چقدر می‌باشد؟



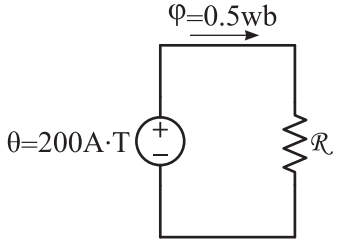
شکل ۵۸ ـ ۱

حل:

ـ نیروی محرکه مغناطیســـی از رابطه (۶ ـ ۱) برابر است با:

$$\theta = NI = ۲۰۰ \times ۱ = ۲۰۰ \left[A.turn\right]$$

ـ مدار الکتریکی معادل با درج مقادیر مغناطیسی بر روی آن به‌صورت شکل زیر است.



مقاومت مغناطیسی از رابطه (۱۵ ـ ۱) برابر است با:

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\varphi} = \frac{۲۰۰}{۰/۵} = ۴۰۰ \left[\frac{A.turn}{wb}\right]$$

برای تعیین رابطه مقاومت مغناطیســـی $\mathcal{R}$ به روش زیر عمل می‌شود:

ـ از رابطه (۳ ـ ۱) مقدار φ برابر است با:

$$B = \frac{\varphi}{A} \Rightarrow \varphi = B.A \qquad (۱ ـ ۱۶)$$

ـ از رابطه (۹ ـ ۱) مقدار B برابر است با:

$$\mu = \frac{B}{H} \Rightarrow B = \mu H \qquad (۱ ـ ۱۷)$$

ـ بـــا جایگزینی مقدار μ از رابطه (۱۳ ـ ۱) در رابطه (۱۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mu = \mu_{\circ} \mu_{r}$$

$$B = \mu_{\circ} \mu_{r} . H \qquad (۱ ـ ۱۸)$$

ـ با جایگزینی رابطه (۱۸ ـ ۱) در (۱۶ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\varphi = \mu_{\circ}\mu_{r}.H.A \qquad (۱۹ ـ ۱)$$

ـ با جایگزینی رابطه (۱۹ ـ ۱) و (۶ ـ ۱) در رابطه (۱۵ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\varphi} \Rightarrow \mathcal{R} = \frac{NI}{\mu_{\circ}\mu_{r}.H.A} \qquad (۲۰ ـ ۱)$$

ـ از رابطه رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$H = \frac{NI}{\ell_C} \Rightarrow \ell_C = \frac{NI}{H} \qquad (۲۱ ـ ۱)$$

ـ با جایگزینی رابطه (۲۱ ـ ۱) در رابطه (۲۰ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mathcal{R}_C = \frac{\ell_C}{\mu_{\circ}\mu_{r}A} \qquad (۲۲ ـ ۱)$$

در این رابطه:

ℓ_C طول متوسط هسته بر حسب [m]

μ_o ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ بر حسب $\left[\frac{wb}{A.turn.m}\right]$

μ_r ضریب نفوذ نسبی هسته بدون واحد

A سطح مقطع هسته بر حسب [m^۲]

$\mathcal{R}$ مقاومت مغناطیسی هسته بر حسب $\left[\frac{A.turn}{wb}\right]$

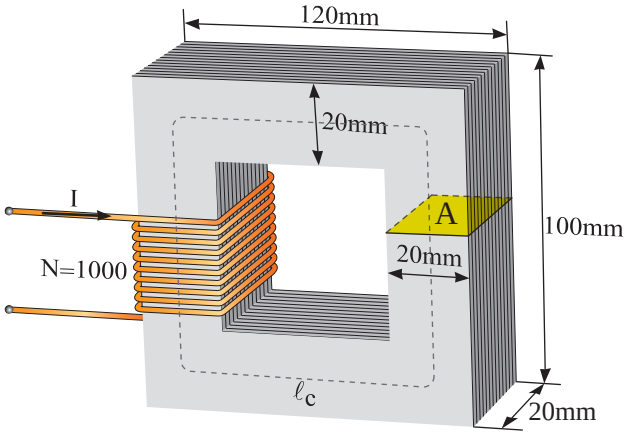
اگر حاصل $\mu_o\,\mu_r$ از رابطه (۱۳ ـ ۱) با μ نشان داده شود رابطه (۲۲ ـ ۱) به‌صورت رابطه (۲۳ ـ ۱) در می‌آید.

$$\mathcal{R} = \frac{\ell_C}{\mu.A}$$

فعالیت

وجه تشابه رابطه مقاومت مغناطیسی $\mathcal{R} = \frac{\ell_C}{\mu.A}$ با رابطه مقاومت الکتریکی $R = \frac{\ell}{x.A}$ چیست؟

مثـــال ۱۶ ـ ۱ ـ اگـــر فوران مغناطیســـی در مدار مغناطیســـی شـــکل (۵۹ ـ ۱) برابر با ۴ mwb باشـــد جریان سیم‌پیچ چند آمپر است؟ در صورتی که $\pi = ۳$ و $\mu_r = ۶۰۰۰$ باشد.



شکل ۵۹ ـ ۱

حل:

ـ محیط بیرونی هسته برابر است با:

$$\ell_۱ = (۱۲۰+۱۰۰)\times ۲ = ۴۴۰\,mm$$

ـ محیط درونی هسته برابر با:

$$\ell_۲ = (۸۰+۶۰)\times ۲ = ۲۸۰\,mm$$

ـ محیط متوسط برابر است با:

$$\ell_C = \frac{\ell_۱ + \ell_۲}{۲} = \frac{۴۴۰+۲۸۰}{۲} = ۳۶۰\,mm$$

سطح مقطع بازوی هسته A که به شکل مربع است برابر است با:

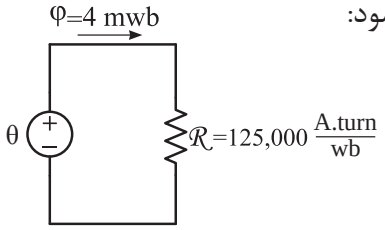
$A_C = ۲۰\times ۲۰ = ۴۰۰\,mm^۲$ سطح مقطع هسته

مقاومت مغناطیسی هسته از رابطه (۲۲ ـ ۱) برابر است با:

$$\mathcal{R}_C = \frac{\ell_C}{\mu_\circ \mu_r A} = \frac{۳۶۰\times۱۰^{-۳}}{۴\pi\times۱۰^{-۷}\times۶۰۰۰\times۴۰۰\times۱۰^{-۶}}$$

$$= ۱۲۵۰۰۰ \left[\frac{A.turn}{wb}\right]$$

ـ مدار الکتریکی معادل رسم و مقادیر بر روی آن درج می‌شود:



ـ نیروی محرکه مغناطیسی از رابطه (۱۵ ـ ۱) برابر است با:

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\varphi}$$

$$\theta = \mathcal{R}_C . \varphi = ۱۲۵۰۰۰\times۴\times۱۰^{-۳} = ۵۰۰ \left[A\right]$$

ـ جریان سیم‌پیچ از رابطه (۶ ـ ۱) برابر است با:

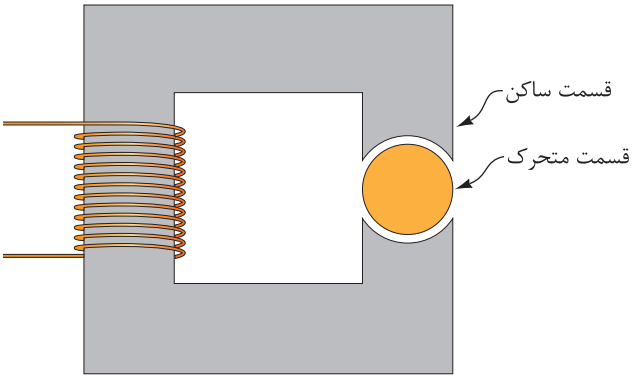
$$\theta = NI$$

$$I = \frac{\theta}{N} = \frac{۵۰۰}{۱۰۰۰} = ۰/۵ \left[A\right]$$

۱۹ ـ ۱ـ مدار مغناطیسی با شکاف هوایی

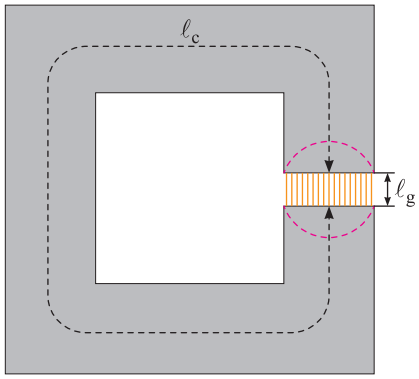
مدارهای مغناطیسی مقدمه تحلیل ماشین‌های الکتریکی اعم از ترانسفورمر و وسایل تبدیل انرژی از قبیل ژنراتورها و موتورهای الکتریکی می‌باشند.

ترانسفورمرها ساختمانی شبیه هسته فرومغناطیسی شکل (۶۰ ـ ۱) دارند. وسایل تبدیل انرژی مانند ژنراتورها و موتورهای الکتریکی که دارای اجزای متحرک می‌باشند، بین قسمت متحرک و ساکن در هسته فرومغناطیس «شکاف هوایی[۱]» ایجاد می‌شود.



شکل ۶۰ ـ ۱

اگر قسمت متحرک به دو نیمه متحرک تقسیم شود و هر یک از این نیمه‌ها به سمت قسمت ساکن سوق داده شود شکل (۶۱ ـ ۱) به‌دست می‌آید.



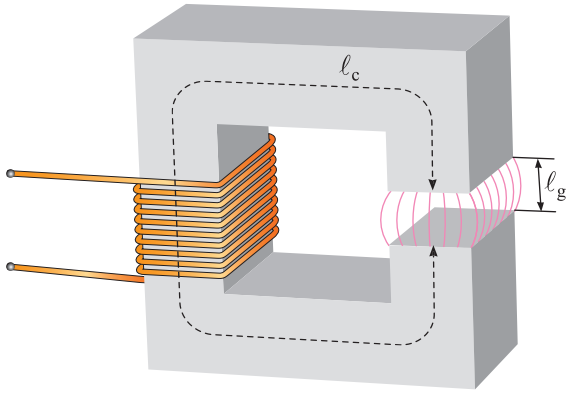
شکل ۶۱ ـ ۱

این شکل یک مدار مغناطیسی با شکاف هوایی را نشان می‌دهد که فوران مغناطیسی φ مسیر هسته و شکاف هوایی را طی می‌کند.

اگر در مدار مغناطیسی طول شکاف هوایی ℓ_g از ابعاد سطح مقطع هسته مغناطیسی بسیار کوچک‌تر باشد، می‌توان با روش مدار الکتریکی معادل آن را تحلیل کرد. در صورتی‌که طول شکاف هوایی ℓ_g از ابعاد سطح مقطع هسته مغناطیسی بزرگ‌تر باشد، فوران مغناطیسی مطابق شکل (۶۲ ـ ۱) به بیرون «نشت»

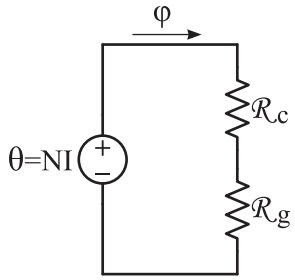
۱. Air Gap

می‌کند و سطح مقطع موثر شکاف هوایی بزرگ‌تر از سطح مقطع هسته مغناطیسی دو طرف آن می‌شود، لذا نمی‌توان با روش مدار الکتریکی معادل آن را تحلیل کرد.



شکل ۶۲ ـ ۱

اکنون با فرض این‌که طول شکاف هوایی ℓ_g در شکل (۶۱ ـ ۱) به حد کافی کوچک است و چگالی فوران مغناطیسی B هسته نیز یکنواخت می‌باشد، می‌توان مدار الکتریکی معادل شکل (۶۳ ـ ۱) را برای تحلیل آن در نظر گرفت. از آنجایی که فوران مغناطیسی، مسیر هسته و شکاف هوایی را طی می‌کند، لذا مقاومت مغناطیسی آنها در مدار الکتریکی معادل با هم سری می‌شوند.



شکل ۶۳ ـ ۱

در شکل (۶۳ ـ ۱) مقاومت مغناطیسی هسته $\mathcal{R}_c$ از رابطه (۲۳ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mathcal{R}_C = \frac{\ell_C}{\mu_\circ \mu_r A} \qquad (۱ - ۲۳)$$

و مقاومت مغناطیسی شکاف هوایی $\mathcal{R}_g$ از رابطه (۲۴ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mathcal{R}_g = \frac{\ell_g}{\mu_\circ \mu_r A} \qquad (۱ - ۲۴)$$

در این رابطه:

ℓ_g طول شکاف هوایی بر حسب [m]

$\mu_\circ = ۴\pi \times ۱۰^{-۷}$ ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ بر حسب $\left[\frac{wb}{A.turn.m}\right]$

μ_r ضریب نفوذ نسبی هوا[۱]

A سطح مقطع هسته بر حسب [$m^۲$]

$\mathcal{R}_g$ مقاومت مغناطیسی بر حسب $\left[\frac{A.turn}{wb}\right]$

قوانین سری و موازی شدن مقاومت‌های مغناطیسی همانند مقاومت‌های الکتریکی است. به‌طوری که مقاومت مغناطیسی معادل[۲]، n مقاومت مغناطیسی سری از رابطه (۲۵ ـ ۱) به‌دست می‌آید[۳]:

$$\mathcal{R}_{eq} = \mathcal{R}_۱ + \mathcal{R}_۲ + \ldots + \mathcal{R}_n \qquad (۱ - ۲۵)$$

مثال ۱۷ ـ ۱ ـ در مدار مغناطیسی شکل (۵۹ ـ ۱) شکاف هوایی به طول ۰/۴۸ mm مطابق شکل (۶۴ ـ ۱) ایجاد شده است. با فرض این‌که طول

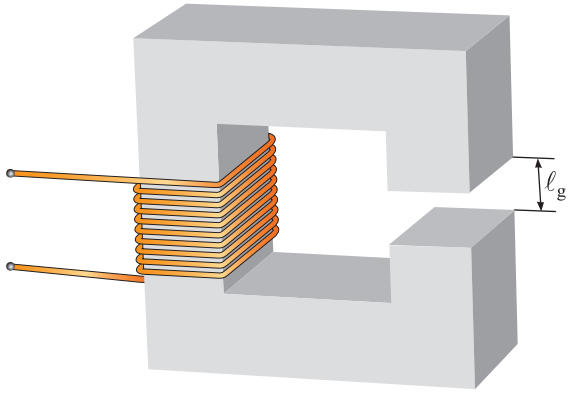
---

۱. برای سهولت در محاسبات معمولاً برای هوا μ_r برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود.

۲. Equal Reluctance

۳. مقاومت مغناطیسی معادل، n مقاومت مغناطیسی موازی از رابطه مقابل به‌دست می‌آید: $\mathcal{R}_{eq} = \frac{۱}{\frac{۱}{\mathcal{R}_۱} + \frac{۱}{\mathcal{R}_۲} + \ldots + \frac{۱}{\mathcal{R}_n}}$

متوسط هسته تغییر نکرده است برای داشتن فوران مغناطیسی ۴ mwb جریان سیم‌پیچ چند آمپر است؟



شکل ۶۴ ـ ۱

حل:

ـ مقاومت مغناطیسی هسته تغییر نمی‌کند و برابر است با:

$$\mathcal{R}_C = \frac{\ell_C}{\mu_\circ \mu_r A} = ۱۲۵۰۰۰ \left[\frac{A.turn}{wb}\right]$$

ـ طول شکاف هوایی بر حسب متر برابر است با:

$$\ell_g = ۰/۴۸ \times ۱۰^{-۳} \left[m\right]$$

ـ طول شکاف هوایی بسیار کوچک‌تر از ابعاد سطح مقطع هسته می‌باشد؛ لذا سطح مقطع شکاف هوایی با هسته برابر است؛ یعنی:

$$A_g = A_C = ۴۰۰ \times ۱۰^{-۶} \left[m^۲\right]$$

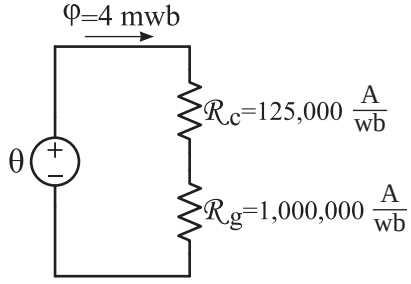
ـ برای سهولت در محاسبات ضریب نفوذ نسبی هوا برابر با: $\mu_r = ۱$

ـ مقاومت مغناطیسی هوا از رابطه (۲۴ ـ ۱) برابر است با:

$$\mathcal{R}_g = \frac{\ell_g}{\mu_\circ \mu_r A} = \frac{۰/۴۸ \times ۱۰^{-۳}}{۴\pi \times ۱۰^{-۳} \times ۱ \times ۴۰۰ \times ۱۰^{-۶}}$$

$$= ۱۰۰۰۰۰۰ \left[\frac{A.turn}{wb}\right]$$

ـ مدار الکتریکی معادل رسم می‌شود و مقادیر در آن نوشته خواهد شد:



ـ مقاومت مغناطیسی معادل از رابطه (۲۵ ـ ۱) برابر است با:

$$\mathcal{R}_{eq} = \mathcal{R}_C + \mathcal{R}_g = ۱۲۵۰۰۰ + ۱۰۰۰۰۰۰$$

$$= ۱۱۲۵۰۰۰ \left[\frac{A.turn}{wb}\right]$$

ـ نیروی محرکه مغناطیسی از رابطه (۱۵ ـ ۱) برابر است با:

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\varphi} \Rightarrow \theta = \mathcal{R}.\varphi$$

$$\theta = ۱۱۲۵۰۰۰ \times ۴ \times ۱۰^{-۳} = ۴۵۰۰ \left[A.turn\right]$$

ـ جریان سیم‌پیچ از رابطه (۶ ـ ۱) برابر است با:

$$\theta = NI \Rightarrow I = \frac{\theta}{N} = \frac{۴۵۰۰}{۱۰۰۰} = ۴/۵ \left[A\right]$$

فعالیت

چرا با ایجاد شکاف هوایی جریان سیم‌پیچ افزایش یافته است؟

هرچند تحلیل مدارهای مغناطیسی با استفاده از مفهوم مدار الکتریکی معادل، غالباً نتایج رضایت بخشی دارد اما این نتایج به دلایل زیر تقریبی است:

۱ ـ در مدار مغناطیسی فرض می‌شود تمام فوران مغناطیسی در هسته محبوس است. اما جزءِ کوچکی از فوران مغناطیسی هسته به هوای اطراف می‌گریزد. این فوران در بیرون هسته «شار نشتی[۱]» نام دارد.

۲ ـ در محاسبه مقاومت مغناطیسی، برای هسته یک طول مسیر متوسط و یک سطح مقطع مشخص فرض می‌شود. این فرض‌ها، مخصوصاً در مورد گوشه‌ها فرض‌های خیلی خوبی نیستند.

۳ ـ در مواد فرومغناطیسی، با تغییر شدت میدان مغناطیسی هسته، ضریب نفوذ مغناطیسی هسته تغییر می‌کند اما در مدار معادل مغناطیسی ضریب نفوذ مغناطیسی ثابت فرض شده است.

۴ ـ اگر در مسیر فوران مغناطیسی هسته، شکاف هوایی وجود داشته باشد، سطح مقطع موثر فاصله هوایی بزرگ‌تر از سطح مقطع هسته دو طرف آن است که در مدار معادل مغناطیسی سطح مقطع شکاف هوایی برابر سطح مقطع هسته فرض می‌شود.

روش‌های دیگری در تحلیل مدارهای مغناطیسی وجود دارد که به نتایج دقیق‌تری می‌انجامد. تحلیل مدارهای مغناطیسی به کمک « قانون نیروی محرکه مغناطیسی» یکی از این روش‌ها است.

پرسش ۶ ـ ۱

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ مسیر بسته‌ای که فوران مغناطیسی در آن برقرار می‌شود ..... نامیده می‌شود.

۲ ـ نیروی محرکه مغناطیسی، مشابه ..... در مدار الکتریکی است.

۳ ـ مقاومت مغناطیسی مشابه..... در مدار الکتریکی است.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ هسته از خود در مقابل فوران مغناطیسی «مقاومت مغناطیسی» نشان می‌دهد.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ جریان الکتریکی مشابه نیروی محرکه مغناطیسی است.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ مدار الکتریکی و مدار مغناطیسی را تعریف کنید.

۲ ـ چرا نتایج تحلیل مدارهای مغناطیسی با استفاده از مدار الکتریکی معادل تقریبی است؟

تمرین ۶ ـ ۱

۱ ـ مقاومت و فوران مغناطیسی در هسته یک مدار مغناطیسی به ترتیب $۵۰۰\frac{A.turn}{wb}$ و $۱۰\,mwb$ می‌باشد. اگر جریان سیم‌پیچ روی هسته $۲۰\,mA$ باشد تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ را به‌دست آورید.

۲ ـ بر روی یک هسته فرومغناطیسی مشابه شکل (۲۳ ـ ۱)، ۲۰۰ دور سیم پیچیده شده است. اگر جریان ۲ آمپر از سیم‌پیچ عبور کند. فوران مغناطیسی هسته را محاسبه نمایید. در صورتی که $r_۱=۳۰\,cm$، $r_۲=۴۰\,cm$ و $\mu_r=۱۰۰۰$ باشد.

---

۱. Flux Leakage

۳ ـ اگر در مدار مغناطیسی تمرین ۲ شکاف هوایی به طول ۰/۵ mm ایجاد شود با فرض این‌که طول متوسط هسته تغییر نکرده باشد، فوران مغناطیسی هسته را محاسبه کنید.

۴ ـ بر روی اختلاف نتایج تمرین ۲ و ۳ بحث کنید.

۲۰ ـ ۱ ـ قانون نیروی محرکه مغناطیسی

در مدارهای مغناطیسی فوران مسیر بسته هسته را طی می‌کند. طبق قانون نیروی محرکه مغناطیسی در یک مدار مغناطیسی «حاصل جمع جبری نیروهای محرکه مغناطیسی هسته، برابر نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ است».

قانون نیروی محرکه مغناطیسی با رابطه (۲۶ ـ ۱) نشان داده می‌شود:

$$\theta = \sum_{i=1}^{n} H_i . \ell_i \qquad (۱ - ۲۶)$$

در این رابطه:

θ نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ بر حسب $[A.turn]$

H_i شدت میدان مغناطیسی قسمت i ام مدار مغناطیسی بر حسب $\left[\frac{A.turn}{m}\right]$

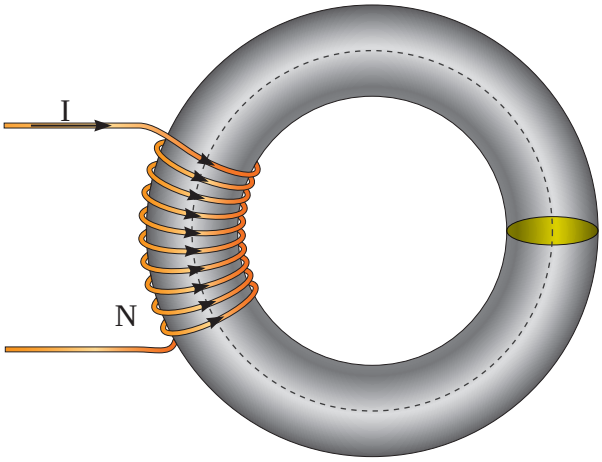
ℓ_i طول متوسط قسمت i ام مدار مغناطیسی برحسب [m]

در حالت کلی اگر مدار مغناطیسی از n قسمت تشکیل شده باشد رابطه قانون نیروی محرکه مغناطیسی به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\theta = H_1\ell_1 + H_2\ell_2 + \ldots + H_n\ell_n \qquad (۱ - ۲۷)$$

تحلیل مدارهای مغناطیسی با قانون نیروی محرکه مغناطیسی یکی از روش‌هایی است که غالباً نتایج دقیقی از آن به‌دست می‌آید.

قانون نیروی محرکه مغناطیسی برای مدار مغناطیسی شکل (۶۵ ـ ۱) به‌صورت رابطه (۲۸ ـ ۱) در می‌آید.



شکل ۶۵ ـ ۱

$$\theta = H_C . \ell_C \qquad (۱ - ۲۸)$$

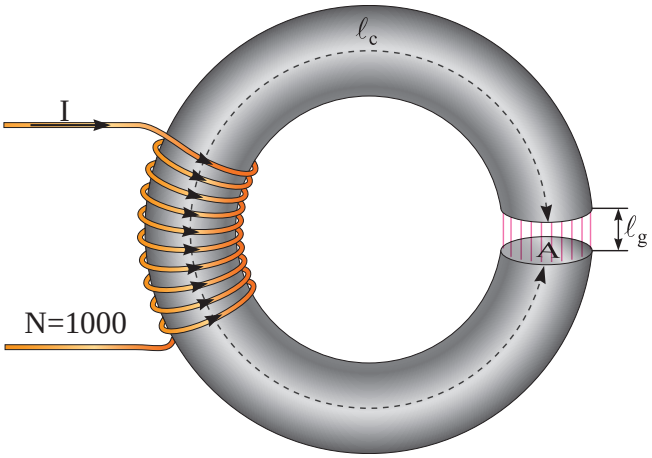
در این رابطه:

H_C شدت میدان مغناطیسی هسته برحسب $\left[\frac{A.turn}{m}\right]$

ℓ_C طول متوسط هسته بر حسب m

θ نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ بر حسب $[A.turn]$

اگر چنانچه هسته مدار مغناطیسی دارای شکاف هوایی به طول ℓ_g و شدت میدان مغناطیسی H_g و ماده فرومغناطیس به طول ℓ_C و شدت میدان مغناطیسی H_C مطابق شکل (۶۶ ـ ۱) باشد رابطه قانون نیروی محرکه مغناطیسی به‌صورت رابطه (۲۹ ـ ۱) نوشته می‌شود.



شکل ۶۶ ـ ۱

$$\theta_{eq} = H_g \ell_g + H_C \ell_C \qquad (۱ ـ ۲۹)$$

شدت میدان مغناطیسی هسته فرومغناطیسی H_C از منحنی مغناطیسی شکل‌های (۲۷ ـ ۱) و (۲۹ ـ ۱) باتوجه به جنس هسته و شدت میدان مغناطیسی شکاف هوایی H_g از رابطه (۱۰ ـ ۱) به‌صورت $H_g = \frac{B_\circ}{\mu_\circ}$ پس از تعیین B به‌دست می‌آیند. مقادیر ℓ_g و ℓ_C با توجه به شکل هندسی مدار مغناطیسی محاسبه می‌شوند.

مثال ۱۸ ـ ۱ ـ مدار مغناطیسی مطابق شکل (۶۶ ـ ۱) دارای هسته فرومغناطیسی از جنس فولاد ورق به طول متوسط ℓ_C=۵۰cm و سطح مقطع A_C=۶۴cm^۲ دارای یک شکاف هوایی به‌طول ℓ_g=۱/۱mm و فوران مغناطیسی هسته φ_C =۹/۲۸ mwb می‌باشد. جریان سیم‌پیچ را به کمک قانون نیروی محرکه مغناطیسی تعیین کنید.

حل:

فوران مغناطیسی هسته فرومغناطیسی و شکاف هوایی برابر است زیرا این دو قسمت با یکدیگر سری هستند.

$$\varphi = \varphi_C = \varphi_g = ۸ \left[mwb\right]$$

سطح مقطع هسته A_C با سطح مقطع شکاف هوایی A_g با هم برابر فرض می‌شوند؛ زیرا طول شکاف هوایی در مقابل سطح مقطع هسته بسیار کوچک‌تر است. چگالی فوران مغناطیسی هسته از رابطه (۳ ـ ۱) برابر است با:

$$A = A_C = A_g = ۶۴ \left[cm^۲\right]$$

$$B = \frac{\varphi}{A}$$

$$B = \frac{۹/۲۸ \times ۱۰^{-۳}}{۶۴ \times ۱۰^{-۴}} = ۱/۴۵ \left[T\right]$$

با توجه به مقدار B از منحنی مغناطیسی شکل (۲۷ ـ ۱) تعداد H_C برای فولاد ورق به‌دست می‌آید:

$$B = ۱/۴۵ \xrightarrow[\text{شکل (۲۷ ـ ۱)}]{\text{منحنی مغناطیسی}} H_C = ۸۰۰ \left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

با فرض اینکه هوا مشابه خلأ است، شدت میدان مغناطیسی شکاف هوایی از رابطه (۱۰ ـ ۱) برابر است با:

$$H_g = \frac{B}{\mu_\circ} = \frac{۱/۴۵}{۴\pi \times ۱۰^{-۷}} = ۱۱۵۴۴۵۸ \left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

نیروی محرکه مغناطیسی از رابطه (۲۹ ـ ۱) محاسبه می‌شود:

$$\theta = H_g \ell_g + H_C \ell_C$$

$$\theta = ۱۱۵۴۴۵۸ \times ۱/۱ \times ۱۰^{-۳} + ۸۰۰ \times ۵۰ \times ۱۰^{-۲}$$

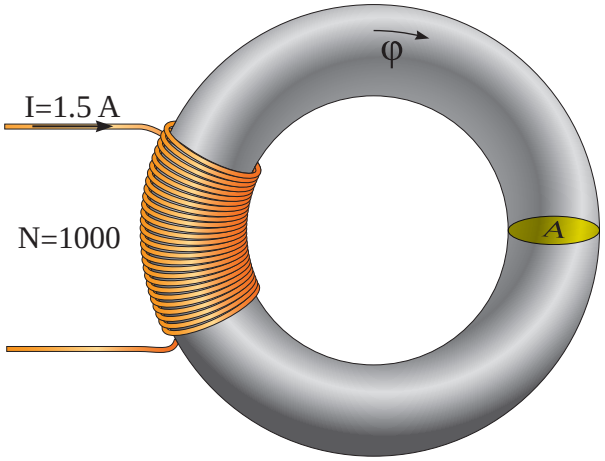
$$= ۱۶۷۰ \left[A\right]$$

از رابطه (۶ ـ ۱) شدت جریان به‌دست می‌آید.

$$\theta = NI$$

$$I = \frac{\theta}{N} = \frac{۱۶۷۰}{۱۰۰۰} = ۱/۶ \left[A.turn\right]$$

مثال ۱۹ ـ ۱ ـ اگر در مثال ۱۸ ـ ۱ شکاف هوایی مدار مغناطیسی با به هم رساندن هسته مغناطیسی مطابق شکل (۶۷ ـ ۱) از بین برود و جریان سیم‌پیچ ثابت بماند، فوران مغناطیسی هسته چند میلی وبر می‌شود؟



شکل ۶۷ ـ ۱

حل:

ـ نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ از رابطه (۶ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\theta = NI = ۱۰۰۰ \times ۱ = ۱۰۰۰\,[A.turn]$$

ـ شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$H_C = \frac{\theta}{\ell_C} = \frac{۱۰۰۰}{۵۰ \times ۱۰^{-۲}} = ۲۰۰۰ \left[\frac{A.turn}{m}\right]$$

ـ با توجه به مقدار H_C از منحنی مغناطیس شکل (۲۷ ـ ۱) مقدار B برای فولاد ورق به‌دست می‌آید:

$$H_C = ۲۰۰۰ \xrightarrow[\text{شکل (۲۷ ـ ۱)}]{\text{منحنی مغناطیس}} B = ۱/۶[T]$$

ـ فوران مغناطیسی از رابطه (۳ ـ ۱) محاسبه می‌شود:

$$B = \frac{\varphi}{A}$$

$$\varphi = B.A = ۱/۶ \times ۶۴ \times ۱۰^{-۴} = ۰/۰۱wb$$

ـ واحد فوران مغناطیسی به میلی وبر تبدیل می‌شود:

$$\frac{۱wb}{۰/۰۱} = \frac{۱۰۰۰mwb}{\varphi} \Rightarrow \varphi = \frac{۰/۰۱ \times ۱۰۰۰}{۱}$$

$$= ۱۰\,[mwb]$$

ـ با از بین رفتن شکاف هوایی، مقاومت مغناطیسی کمتر می‌شود و فوران مغناطیسی هسته افزایش می‌یابد.

مدارهای مغناطیسی به گونه‌ای طراحی می‌شوند که دارای حداقل فاصله شکاف هوایی یا در صورت امکان فاقد شکاف هوایی باشند تا با جریان الکتریکی کمتر، فوران مغناطیسی بیشتری تولید شود.

تمرین ۷ ـ ۱

۱ ـ هسته مغناطیسی از جنس فولاد الکتریکی *M-5* بدون فاصله هوایی به طول متوسط ۴۰ cm و سطح مقطع ۵۰ cm^2 دارای فوران مغناطیسی ۱۰mwb می‌باشد. به روی این هسته یک سیم‌پیچ با ۴۰۰۰ حلقه قرار دارد. مطلوب است:

الف ـ شدت جریان سیم‌پیچ

ب ـ اگر یک فاصله هوایی ۱ mm در هسته ایجاد شود شدت جریان سیم‌پیچ چند آمپر خواهد شد؟ درصورتی‌که بخواهیم فوران هسته ثابت بماند.

۲ ـ یک مدار مغناطیسی با مقاومت مغناطیسی $۴۵۰۰۰\left[\frac{A.turn}{wb}\right]$ دارای فوران مغناطیسی ۱۰ mwb می‌باشد. اگر تعداد دور سیم‌پیچ ۱۰۰۰ و طول متوسط

هسته cm ۹۰ باشد مطلوب است:

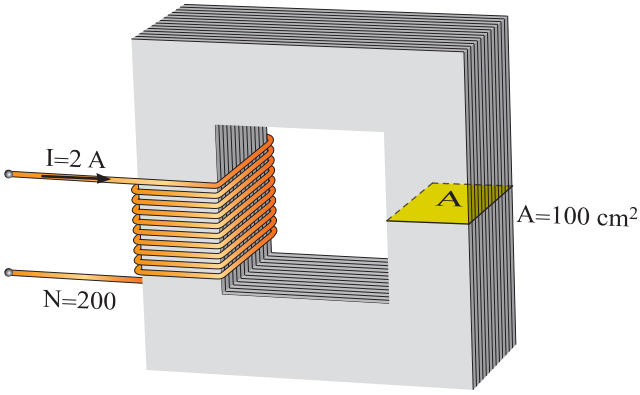
الف ـ جریان سیم‌پیچ

ب ـ شدت میدان هسته

۳ ـ در مـــدار مغناطیســـی شـــکل (۶۸ ـ ۱) فوران مغناطیسی هسته mwb ۱۰ است؛ مطلوب است:

الف ـ مقاومت مغناطیسی هسته

ب ـ اگر یک فاصله هوایی ۱/۲mm در هسته ایجاد شـــود و بخواهیم فوران هسته همان مقدار قبلی بماند، جریان سیم‌پیچ را چند آمپر باید افزایش دهیم.(π=۳)

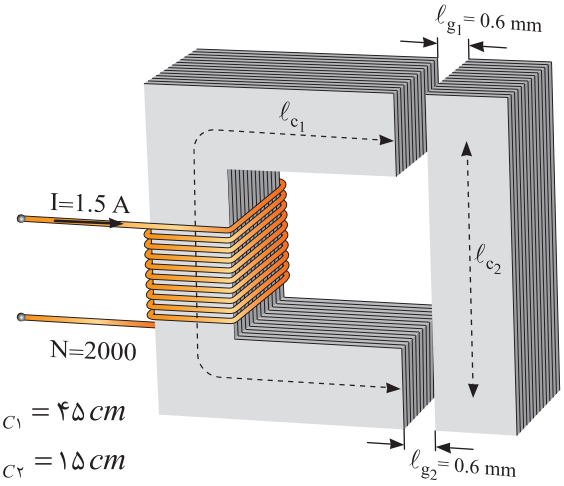


شکل ۶۸ ـ ۱

۴ ـ در مدار مغناطیســـی شـــکل (۶۹ ـ ۱) مطلوب است محاسبه:

الـــف ـ مقاومـــت مغناطیســـی در صورتی‌که فوران مغناطیسی هسته mwb ۱۲ باشد.

ب ـ ضریب نفوذ نسبی هسته



$\ell_{C_1} = ۴۵\,cm$

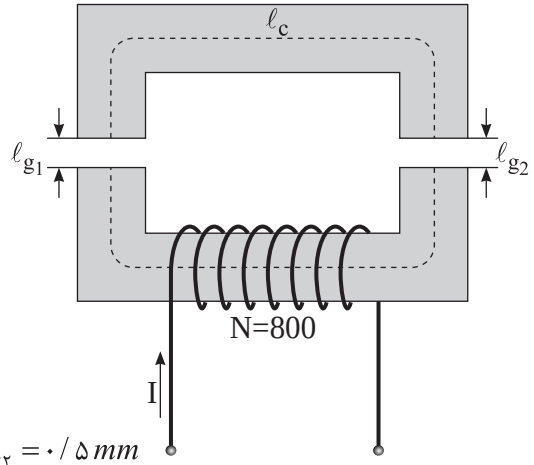
$\ell_{C_2} = ۱۵\,cm$

$A = ۵۰\,cm^۲$

$\pi = ۳$

شکل ۶۹ ـ ۱

۵ ـ یک هسته مغناطیسی از جنس فولاد الکتریکی $M\text{-}5$ مطابق شکل (۷۰ ـ ۱) مفروض است. در صورتی‌که بخواهیم فوران مغناطیسی mwb ۰/۴ در هسته برقرار شود شدت جریان سیم‌پیچ باید چند آمپر باشد؟



$\ell_{g_1} = \ell_{g_2} = ۰/۵\,mm$

$A_g = A_C = ۴\,cm^۲$

$\ell_C = ۳۰\,cm$

شکل ۷۰ ـ ۱

فصل دوم

مبانی ماشین‌های الکتریکی جریان مستقیم

هدف‌های رفتاری

پس از پایان این فصل از فراگیر انتظار می‌رود که:

- ماشین‌های الکتریکی را تعریف کند.
- ماشین‌های الکتریکی را از نظر نوع تبدیل انرژی تعریف کند.
- ماشین‌های الکتریکی را از نظر نوع تبدیل انرژی طبقه‌بندی کند.
- قانون فاراده را تعریف کند.
- پدیده القا را شرح دهد.
- رابطه قانون فاراده را توضیح دهد.
- مولد ساده جریان مستقیم را تعریف کند.
- اجزای تشکیل‌دهنده مولد ساده جریان مستقیم را نام ببرد.
- طرز کار مولد ساده جریان مستقیم را توضیح دهد.
- اثر افزایش تعداد هادی‌ها در مولد جریان مستقیم را توضیح دهد.
- روش تعیین پلاریته ولتاژ در مولد جریان مستقیم را توضیح دهد.
- قانون لورنس را توضیح دهد.
- رابطه قانون لورنس را تشریح کند.
- موتور ساده جریان مستقیم را تعریف کند.
- اجزای تشکیل‌دهنده موتور جریان مستقیم را نام ببرد.
- گشتاور را تعریف کند.
- رابطه گشتاور را توضیح دهد.
- طرز کار موتور ساده جریان مستقیم را توضیح دهد.
- اثر افزایش تعداد هادی‌ها در موتور ساده جریان مستقیم را توضیح دهد.
- روش تغییر جهت گردش در موتور ساده جریان مستقیم را توضیح دهد.

- اجزای تشکیل دهنده یک ماشین جریان مستقیم را نام ببرد.
- وظیفه قسمت ساکن در یک ماشین جریان مستقیم را توضیح دهد.
- وظیفه قسمت گردان در یک ماشین جریان مستقیم را توضیح دهد.
- وظیفه مجموعه جاروبک و جاروبک نگه‌دار را توضیح دهد.
- سیم‌بندی آرمیچر را تعریف کند.
- خصوصیات سیم‌بندی آرمیچر را توضیح دهد.
- گام‌های سیم‌بندی آرمیچر را تعریف کند.
- گام‌های سیم‌بندی را بر روی شکل آرمیچر مشخص کند.
- روابط حاکم بر گام‌های سیم‌بندی را بیان کند.
- انواع سیم‌بندی آرمیچر را توضیح دهد.
- انواع دیاگرام‌های سیم‌بندی را از روی شکل تمیز دهد.
- اطلاعات انواع سیم‌بندی آرمیچر را از روی شکل مربوطه استخراج کند.
- ولتاژ جریان و مقاومت اهمی سیم‌بندی آرمیچر را تعریف کند.
- روابط حاکم بر ولتاژ، جریان و مقاومت اهمی سیم‌بندی آرمیچر را توضیح دهد.
- نیروی محرکه القایی و گشتاور تولیدی در ماشین واقعی را توضیح دهد.
- سیم‌بندی آرمیچر از نظر ولتاژ، جریان و توان را با یک‌دیگر مقایسه کند.
- کاربرد هر یک از انواع سیم‌بندی آرمیچر را توضیح دهد.
- عکس‌العمل آرمیچر را تعریف کند.
- اثرات ناشی از عکس‌العمل آرمیچر را توضیح دهد.
- راه‌های مقابله با اثر عکس‌العمل آرمیچر را توضیح دهد.
- کموتاسیون را تعریف کند.
- اثرات ناشی از کموتاسیون را توضیح دهد.
- راه‌های مقابله با کموتاسیون را توضیح دهد.
- به پرسش‌های این فصل پاسخ دهد.
- تمرین‌های این فصل را حل نماید.

مقدمه

انرژی الکتریکی یک منبع انرژی تمیز و کارآمد است و به راحتی در منازل، ادارات و کارخانجات قابل استفاده است. برخی از مصرف‌کننده‌ها مثل لامپ یا بخاری برقی به انرژی الکتریکی نیاز دارند و برخی دیگر مانند قطارهای مترو یا آسانسور به انرژی مکانیکی نیاز دارند.

وسایلی که انرژی الکتریکی را مصرف یا تولید می‌کنند در مقایسه با دیگر وسایل که با سوخت‌های فسیلی مانند بنزین یا گازوییل کار می‌کنند آلودگی زیست محیطی کمتری دارند، ضمن اینکه از مزایا و راندمان بالاتری برخوردار هستند.

شکل ۱ ـ ۲

انرژی الکتریکی می‌تواند به انرژی مکانیکی تبدیل شود و همچنین تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی نیز میسر است. دستگاه‌هایی که این دو انرژی را به هم تبدیل می‌کنند، «ماشین‌های الکتریکی[۱]» نام دارند. فرایند تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی و بالعکس «تبدیل انرژی الکترومکانیکی» نامیده می‌شود.

ماشین‌های الکتریکی رابطی بین سیستم الکتریکی و سیستم مکانیکی محسوب می‌شوند که این ارتباط در ماشین‌های الکتریکی بر مبنای «میدان الکترومغناطیسی[۲]» صورت می‌گیرد.

شکل ۲ ـ ۲

ماشین‌های الکتریکی در زندگی روزمره امروزی حضور فراوانی دارند. «موتورهای الکتریکی[۳]» در لوازم خانگی مانند یخچال، جاروبرقی، همزن، پنکه، تهویه مطبوع و در بسیاری از وسایل الکتریکی مشابه دیگر حضور دارند و در راه‌اندازی آنها نقش مؤثر دارند. در مراکز صنعتی و کارخانجات، عامل حرکت بیش‌تر ابزارها موتورهای الکتریکی هستند. «ژنراتورهای الکتریکی[۴]» نیز با تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی نقش اصلی را در تأمین برق مورد نیاز مصرف‌کننده‌های الکتریکی ایفا می‌کنند.

در بررسی ماشین‌های الکتریکی همواره سعی بر آن است با ارایه روابط و مدل ریاضی مناسب، رابطه بین ورودی و خروجی آنها تبیین و طرز کارشان تحلیل شود.

در این فصل ضمن آشنایی با ساختمان داخلی ماشین‌های الکتریکی جریان مستقیم به طرز کار آنها نیز پرداخته می‌شود.

۱. Electrical Machines ۲. Magnetic Field ۳. Electric Motors ۴. Electric Generators

۱ ـ ۲ ـ طبقه‌بندی ماشین‌های الکتریکی

ماشـــین‌های الکتریکی از دو دیـــدگاه «نوع تبدیل انرژی» و «نوع جریان الکتریکی» طبقه‌بندی می‌شوند.

از دیـــدگاه انـــرژی، اگر ماشـــین الکتریکـــی انرژی الکتریکـــی را به انـــرژی مکانیکی تبدیـــل کند «موتور الکتریکی» نامیده می‌شود. و اگر این ماشین الکتریکی، انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل کند «ژنراتور الکتریکی» نامیده می‌شود.

ماشـــین‌های الکتریکـــی اعـــم از موتور یـــا ژنراتور الکتریکـــی، از دیدگاه نوع جریان در دو دســـته «جریان متنـــاوب AC» و «جریان مســـتقیم DC» طبقه‌بندی می‌شـــوند. اگر ماشـــین الکتریکی برای کار در جریان متناوب AC طراحی شـــود آن را «ماشـــین الکتریکی جریان متنـــاوب[1]» می‌نامنـــد و در صورتی‌که برای کار در جریان مســـتقیم DC طراحی شـــود آن را «ماشین الکتریکی جریان مستقیم[2]» می‌نامند.

در ماشـــین‌های الکتریکـــی فرایند تبدیـــل انرژی برگشت‌پذیر[3] است. بدین معنی که با رعایت یک سری ملاحظات عملی، هر ماشین الکتریکی می‌تواند به‌عنوان یک موتور الکتریکـــی، انرژی الکتریکی را به مکانیکی و یا به‌عنوان یـــک ژنراتور، انرژی مکانیکی را به الکتریکی تبدیل کند و مورد استفاده قرار گیرد.

مایکل فاراده

در سال ۱۷۹۱ در یک خانواده فقیر انگلیسی به دنیا آمد. مایکل فاراده پسری بسیار کنجکاو بود و علاقه زیادی به پرسیدن در مورد مطالب علمی داشت. وی به مباحث انرژی علاقه داشـــت و مطالعات و آزمایش‌های فراوانی در این حوزه انجام داد. این آزمایش‌ها منجر به کشف الکترومغناطیس شد. مایکل فاراده یکی از بزرگ‌ترین فیزیکدانانی بود که توجه زیادی به تجربه و آزمایش کردن نظریات و افکارش داشت. وی در سال ۱۸۶۷ وفات یافت.

منبع www.tavanir.org.ir

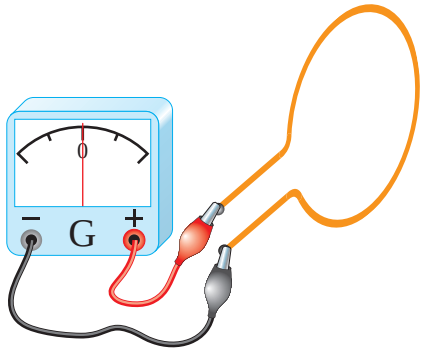
۲ ـ۲ ـ قانون القای الکترومغناطیسی فاراده[4]

«قانـــون القای الکترومغناطیســـی فـــاراده» یکی از اساسی‌ترین قوانین مغناطیســـی در فیزیک است. طرز کار وســـایل الکتریکی که الکترومغناطیس در آنها نقش دارد به کمک قانون القای الکترومغناطیسی فاراده قابل فهم است؛ به خصوص در تحلیل طرز کار وسایل تبدیل انـــرژی الکترومکانیکی اعم از موتور یـــا ژنراتور کاربرد فراوان دارد.

قانون القای الکترومغناطیسی فاراده و روابط حاکم بر آن را می‌توان با انجام چند آزمایش به‌دست آورد.

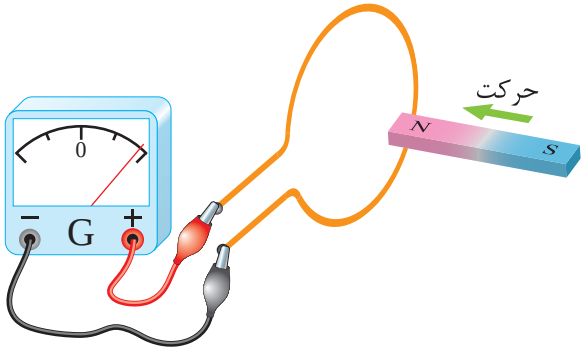
آزمایش ۱ ـ مداری متشکل از یک حلقه[5] هادی که دو سر آن به یـــک گالوانومتر[6] متـــصل اســـت در شکل (۳ ـ ۲) نشان داده شده است.

۱. Alternating Current Machine ۲. Direct Current Machine ۳. Reversile Energy
۴. Faraday's law of electromagnetic induction ۵. Turn
۶. گالوانومتر یک آمپرمتر بسیار دقیق است که با کم‌ترین جریان الکتریکی منحرف می‌شود.



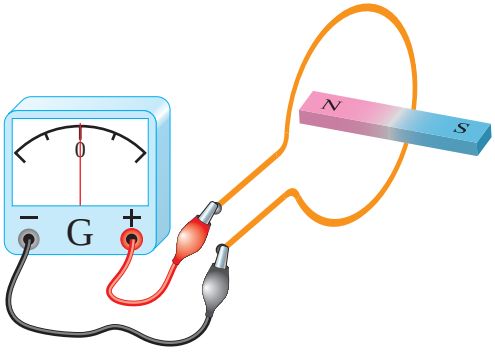
شکل ۳ ـ ۲

اگر یک آهن‌ربای دائم از طرف قطب شـــمال N آن مطابق شکل (۴ ـ ۲) داخل حلقه شود، عقربه گالوانومتر منحرف می‌شـــود. انحراف عقربـــه گالوانومتر به معنای عبور جریان از گالوانومتر است.



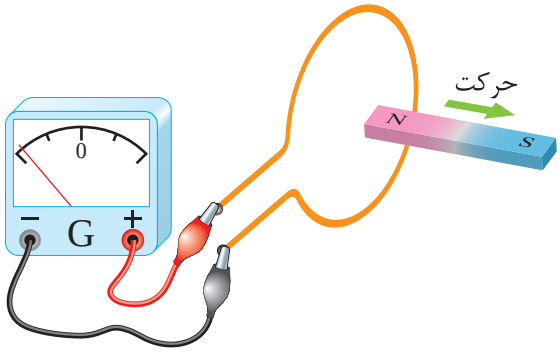
شکل ۴ ـ ۲

در صورتی‌که آهن‌ربای دائم نســـبت به حلقه مطابق شکل (۵ ـ ۲) حرکتی نداشـــته باشد، عقربه گالوانومتر منحرف نخواهد شد.



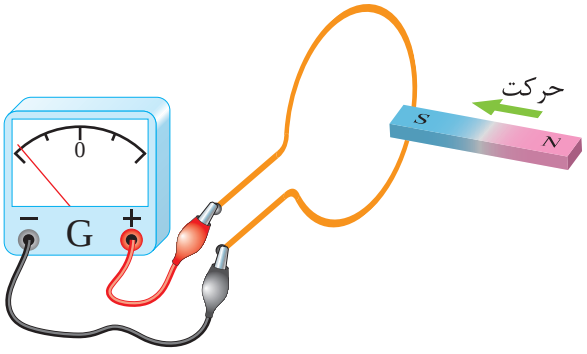
شکل ۵ ـ ۲

وقـــتی‌کـــه آهـــن‌ربای دائـــم از حـــلقه مـــطابق شکل (۶ ـ ۲) دور شـــود، عقربه گالوانومتـــر در جهت عکس حالت قبل منحرف می‌شود. یعنی جهت جریان در حلقه تغییر کرده است.



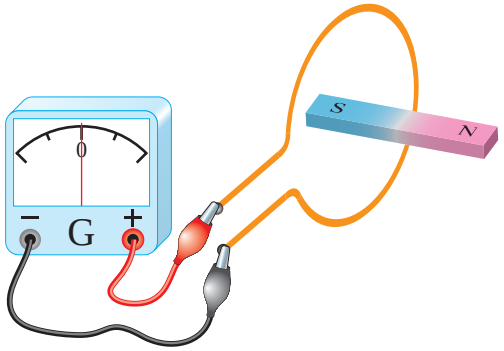
شکل ۶ ـ ۲

در ادامـــه آزمایش اگر قطب جنوب S آهن‌ربای دائم مطابق شکل (۷ ـ ۲) داخل حلقه شود، عقربه گالوانومتر بـــر خلاف حالتی که قطب شـــمال N وارد حلقه شـــد منحرف می‌گردد.



شکل ۷ ـ ۲

در این حالت نیز در صورتی‌که آهن‌ربای دائم نسبت به حلقه مطابق شـــکل (۸ ـ ۲) حرکتی نداشـــته باشد، عقربه‌ی گالوانومتر منحرف نخواهد شد.



شکل ۸ ـ ۲

بدیـــن ترتیب در ایـــن آزمایش پدیده‌ای مشـــاهده می‌شود که در اثر حرکت آهن‌ربای دائم نسبت به حلقه به‌وجود آمده است.

در آزمایش ۱ جریانی که در حلقه برقرار می‌شود را «جریان القایی[۱]» می‌نامند. می‌دانید عامل جاری شـــدن جریان در هر مدار الکتریکی نیروی محرکه (E) اســـت. جریان القایی نیز ناشـــی از یک نیروی محرکه است که آن را «نیـــروی محرکه القایی EMF[۲]» می‌نامند. نیروی محرکه القایی را به اختصار با e نشان می‌دهند.

فـــاراده بـــا آزمایش‌هایـــی نظیـــر ایـــن آزمایش، توانســـت قانونی به دســـت آورد که به «قانـــون القای الکترومغناطیســـی فاراده» مشهور شـــد. وی بر اساس این آزمایش‌ها متوجه شـــد که تغییر فوران مغناطیسی مهم‌ترین عامل ایجاد نیروی محرکه القایی اســـت؛ لذا قانون القای الکترومغناطیس فاراده را چنین تعریف کرد:

«مقدار نیروی محرکه‌ی القایی در هر مدار با آهنگ تغییر فوران متناسب است».

فاراده به کمک این قانون برای محاسبه مقدار نیروی محرکـــه القایی رابطه ریاضـــی (۱ ـ ۲) را ارائه کرد. این رابطه بیان ریاضی قانون القای الکترومغناطیسی فاراده است.

$$e \propto \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \qquad (۲-۱)$$

در این رابطه:

$\Delta\varphi$ تغییرات فوران مغناطیسی بر حسب وبر [wb]

Δt مدت زمـــان وقوع تغییرات فوران مغناطیســـی برحسب ثانیه (s)

e نیروی محرکه القایی بر حسب ولت [V]

نیروی محرکه القایی e در عمل بســـیار حائز اهمیت اســـت. جای خوشبختی است که چراغ‌های اتاقی که در آن این کتاب را می‌خوانید با استفاده از نیروی محرکه‌ی القایی حاصل از یک ژنراتور روشن می‌شوند.

اگر به‌جای استفاده از یک حلقه سیم، از سیم‌پیچی با N حلقـــه، آزمایش فاراده تکرار شـــود، در هر حلقه ســـیم‌پیچ نیروی محرکه القایی ایجاد می‌شـــود و این نیروهـــای محرکه با یک‌دیگر جمع می‌شـــوند تا نیروی محرکه القایی سیم‌پیچ به‌دســـت آید؛ لذا مقدار نیروی محرکه القایی در ســـیم پیچ از رابطـــه (۲ ـ ۲) تعیین می‌شود.

$$e = \mathrm{N}\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \qquad (۲-۲)$$

نیروی محرکه القایی e جریان القایی در سیم‌پیچ جاری می‌کند که از رابطه (۳ ـ ۲) به‌دست می‌آید:

$$i = \frac{e}{\mathrm{Z}} \qquad (۲-۳)$$

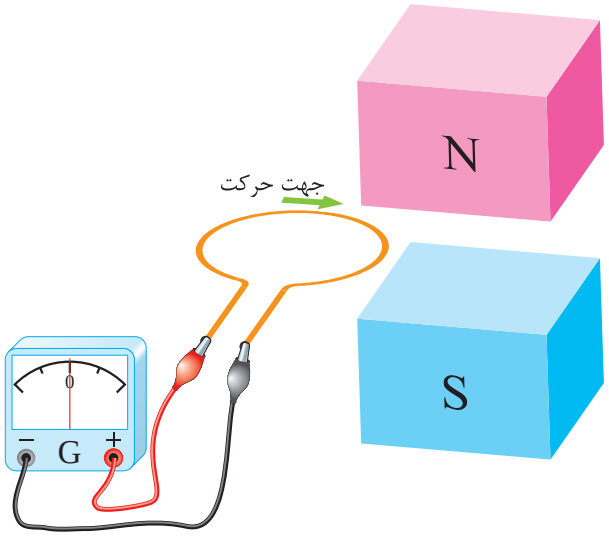
در این رابطه:

Z مقاومت ظاهری[۳] سیم‌پیچ بر حسب اهم [Ω]

i شدت جریان القایی سیم‌پیچ بر حسب آمپر [A]

۱. Induced Current ۲. Electromotive Force ۳. Impedance

آزمایش ۲ ـ حلقه هادی مستطیل شکل متصل به یک گالوانومتر در بیرون میدان مغناطیسی B ناشی از دو قطب N و S یک آهن‌ربای قوی در شکل (۹ ـ ۲) نشان داده شده است. حلقه در جهت نشان داده شده از درون میدان مغناطیسی عبور داده می‌شود.

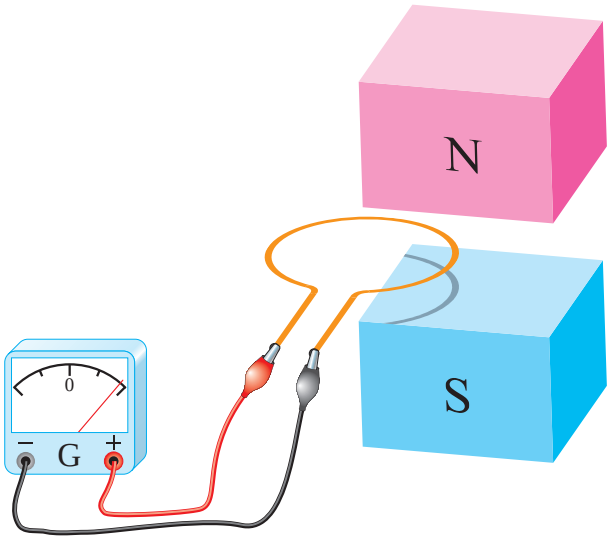


شکل ۹ ـ ۲

با حرکت حلقه در هنگام ورود به میدان مغناطیسی، فورانی که از سطح حلقه می‌گذرد افزایش می‌یابد و هنگام خروج از میدان مغناطیسی، فورانی که از سطح حلقه می‌گذرد کاهش می‌یابد و به صفر می‌رسد. این تغییر فوران طبق قانون القای الکترومغناطیسی فاراده در حلقه نیروی محرکه القا می‌کند و گالوانومتر منحرف می‌شود.

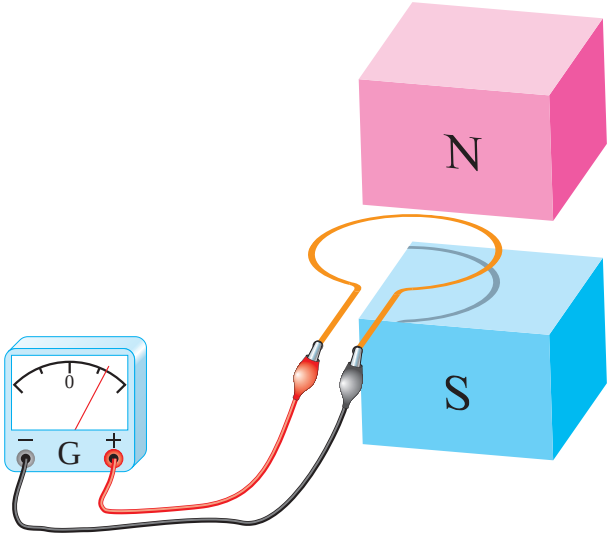
لحظه ورود حلقه به درون میدان مغناطیسی را شکل (۱۰ ـ ۲) نشان می‌دهد.

در این لحظه فوران مغناطیسی بخشی از سطح حلقه را می‌پوشاند. تصویر حلقه روی قطب S این موضوع را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ ـ ۲

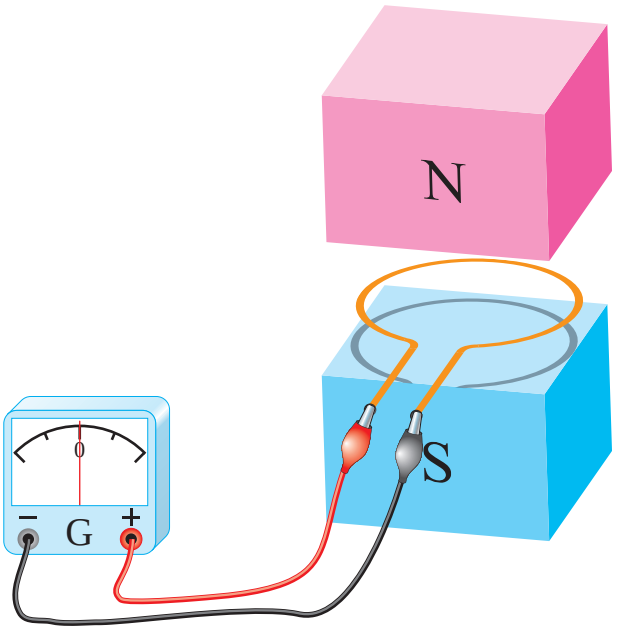
هرچه حلقه بیشتر وارد میدان مغناطیسی می‌شود فوران بیش‌تری سطح حلقه را می‌پوشاند. شکل (۱۱ ـ ۲).



شکل ۱۱ ـ ۲

این تغییر فوران طبق قانون فاراده نیروی محرکه القایی در حلقه ایجاد می‌کند. لذا گالوانومتر منحرف می‌شود.

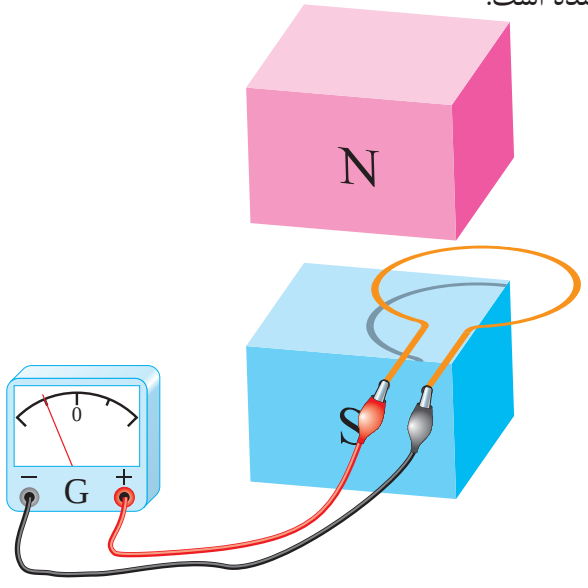
شکل (۱۲ ـ ۲) لحظه‌ای را نشان می‌دهد که حلقه به‌صورت کامل وارد میدان مغناطیسی شده است.



شکل ۱۲ ـ ۲

تصویر حلقه روی قطب S این موضوع را نشان می‌دهد. با اینکه تمام فوران مغناطیسی سطح حلقه را پوشانده است اما حرکت حلقه در این لحظه موجب تغییر فوران در سطح حلقه نخواهد شد. لذا در آن نیروی محرکه القا نمی‌شود و گالوانومتر صفر را نشان می دهد.

لحظه‌ی خروج حلقه در شکل (۱۳ ـ ۲) نشان داده شده است.

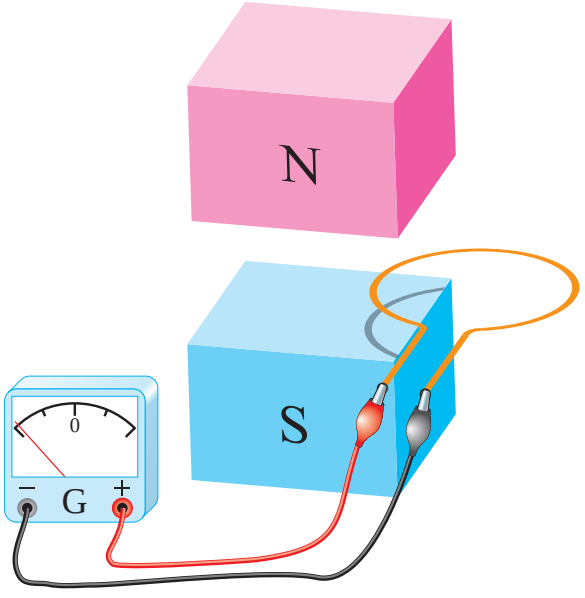


شکل ۱۳ ـ ۲

در این لحظه فوران مغناطیسی بخشی از سطح حلقه را می‌پوشاند و دوباره تغییرات فوران در سطح حلقه ایجاد می‌شود. بنابراین در حلقه نیروی محرکه القا می‌شود و گالوانومتر را در جهت مخالف منحرف می‌کند.

در لحظه خروج حلقه از میدان مغناطیسی فورانی که سطح حلقه را می‌پوشاند رو به کاهش است در صورتی‌که در زمان ورود حلقه به میدان مغناطیسی فورانی که سطح حلقه را می‌پوشاند رو به افزایش بوده است. لذا گالوانومتر به هنگام خروج حلقه از میدان مغناطیسی، برخلاف جهت ورود حلقه به میدان مغناطیسی، منحرف می‌شود.

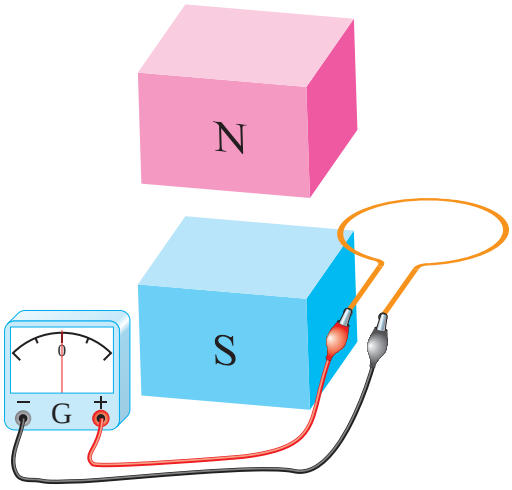
لحظه خروج حلقه از میدان مغناطیسی در شکل (۱۴ ـ ۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۴ ـ ۲

مشاهده می‌شود سطحی از حلقه که توسط فوران پوشانده شده است رو به کاهش است. لذا تغییرات فوران در سطح حلقه، در آن نیروی محرکه القا می‌کند و عقربه گالوانومتر را منحرف خواهد کرد.

خروج کامل حلقه از میدان مغناطیسی در شکل (۱۵ ـ ۲) نشان داده شده است. در این لحظه فورانی از سطح حلقه نمی‌گذرد و تغییرات فوران آن به صفر رسیده است لذا در آن نیروی محرکه القا نمی‌شود و گالوانومتر صفر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵ ـ ۲

هاینریش لنز

هاینریش فردریش امیل لنز در سال ۱۸۰۴ میلادی به دنیا آمد. وی یک فیزیک‌دان روسی ـ آلمانی ـ استونیایی بود که قانون لنز را در سال ۱۸۳۳ میلادی فرمول‌بندی کرد. لنز تحصیلاتش را در سال ۱۸۲۰ میلادی در دانشگاه دوریت تکمیل کرد و سپس در دانشگاه سن پطرزبورگ روسیه مشغول به کار شد. وی در سال ۱۸۶۵ میلادی در رم ایتالیا درگذشت.

۳ ـ ۲ ـ قانون لنز

در پدیده القای الکترومغناطیسی پلاریته نیروی محرکه القایی و جهت جریان القایی مشخص نشد. پلاریته نیروی محرکه القایی و جهت جریان القایی با استفاده از «اصل بقای انرژی» تعیین خواهد شد. در این مبحث اصل بقای انرژی به‌صورت «قانون لنز[۱]» بیان می‌شود که توسط آقای لنز در سال ۱۸۳۴ میلادی ارایه گردید. طبق این قانون:

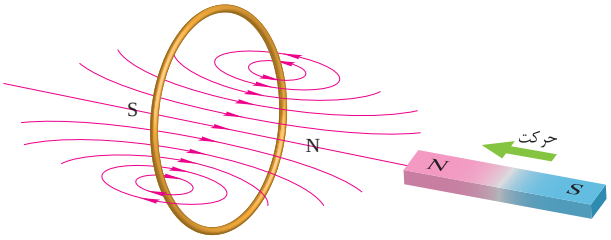
«جریان القایی در جهتی برقرار می‌شود که با عامل به‌وجود آورنده خود مخالفت کند».

قانون لنز در مورد جریان‌های القایی به کار می‌رود. از آنجایی که جریان در مدار بسته جاری می‌شود، لذا قانون لنز در مدارهای بسته کاربرد پیدا می‌کند.

در شکل (۱۶ ـ ۲) مقطع یک حلقه هادی و یک آهن‌ربا نشان داده شده است. هنگامی که قطب N آهن‌ربا به طرف حلقه «حرکت» داده می‌شود، مطابق آزمایش ۱ فاراده، جریان القایی در حلقه جاری می‌شود. این جریان، میدان مغناطیسی در اطراف حلقه تولید خواهد نمود. طبق قانون لنز جهت جریان القایی به گونه‌ای است که با عامل به‌وجودآورنده‌اش مخالفت می‌کند؛ بدین معنی که میدان مغناطیسی ناشی از جریان القایی با حرکت آهن‌ربا به سمت حلقه مخالفت

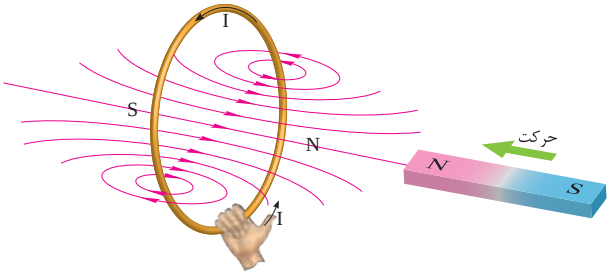
۱. Lenz's Law

خواهد کرد. یعنی قطب N میدان حلقه مقابل قطب N آهن‌ربا قرار می‌گیرد تا با ایجاد نیروی دافعه مانع حرکت آهن‌ربا به سمت حلقه شود.



شکل ۱۶ ـ ۲

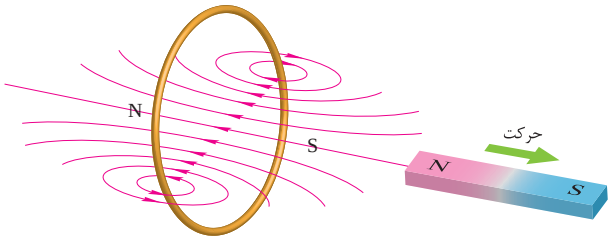
با مشخص شدن محل قطب‌های N و S اطراف حلقه جهت میدان مغناطیسی آن تعیین می‌شود. اکنون بنا به قانون شست بخش (۵ ـ ۱) مطابق شکل (۱۷ ـ ۲) جهت جریان القایی تعیین می‌شود.



شکل ۱۷ ـ ۲

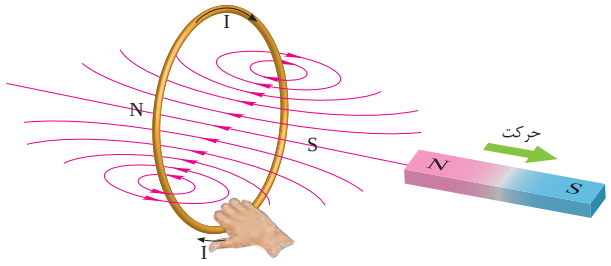
وقتی آهن‌ربا به طرف حلقه «حرکت» می‌کند، جریان القایی ظاهر می‌شود. به بیان قانون القای الکترومغناطیسی فاراده، این «حرکت دادن» همان «تغییر فوران» است که جریان القایی را تولید می‌کند و طبق قانون لنز میدان مغناطیسی ناشی از جریان القایی با این «حرکت دادن» مخالفت خواهد کرد.

اگر آهن‌ربا مطابق شکل (۱۸ ـ ۲) به عقب حرکت داده شود، مطابق آزمایش ۱ فاراده نیز در این حالت جریان القایی در حلقه جاری می‌شود و طبق قانون لنز، میدان مغناطیسی ناشی از این جریان القایی نیز با عامل به‌وجود آورنده‌اش که همان «حرکت رو به عقب» آهن‌ربا است مخالفت خواهد کرد. یعنی میدان حلقه، قطب S خود را در مقابل قطب N آهن‌ربا قرار می‌دهد تا با ایجاد نیروی جاذبه مانع حرکت آهن‌ربا شود.



شکل ۱۸ ـ ۲

با مشخص شدن محل قطب‌های N و S اطراف حلقه، جهت میدان مغناطیسی آن تعیین می‌شود. اکنون بنا به قانون شست بخش (۵ ـ ۱) مطابق شکل (۱۹ ـ ۲) جهت جریان القایی حلقه تعیین می‌شود.



شکل ۱۹ ـ ۲

با توجه به شکل‌های (۱۷ ـ ۲) و (۱۹ ـ ۲) مشاهده می‌شود جهت میدان مغناطیسی حلقه ناشی از جریان القایی همواره به گونه‌ای است که با «حرکت» آهن‌ربا مخالفت می‌کند.

«حرکت» آهن‌ربا به سمت حلقه یا دور شدن از حلقه همیشه تحت تاثیر نیروی مقاوم میدان مغناطیسی حلقه قرار می‌گیرد. از این رو لازم است نیرویی که صرف حرکت آهن‌ربا می‌گردد کار انجام دهد.

فعالیت ۱ ـ ۲

به نظر شـــما کار انجام شده برای حرکت آهن ربا به چه انرژی تبدیل می‌شود؟

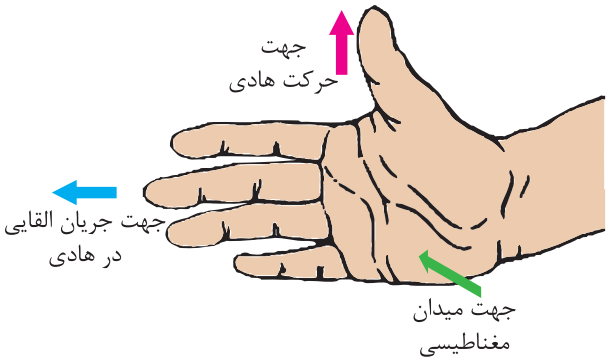
جهت میدان مغناطیســـی جریان القایی به گونه‌ای اســـت که همواره با عامل به‌وجـــود آورنده‌اش، «حرکت آهن‌ربا» مخالفـــت می‌کند. این مخالفت در رابطه قانون القـــای الکترومغناطیســـی فاراده با یـــک علامت منفی به‌صورت رابطه (۴ ـ ۲) نشان داده می‌شود.

$$e = -N\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \qquad (۲-۴)$$

علامـــت منفی بیانگر همان قانون لنز اســـت که در محاسبات دخالت داده نمی‌شود. لذا e به‌عنوان «نیروی ضد محرکه القایی[۱]» معرفی می‌شـــود تا مخالفت آن بر اســـاس قانون لنز در نام آن گنجانیده شده باشد. نیروی ضد محرکه القایی را به اختصار با $Cemf$ نشان می‌دهند.

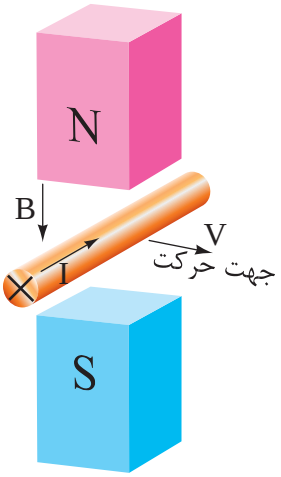
۴ ـ ۲ ـ قانون دست راست

تعیین جهـــت جریان القایی با قانون بقای انرژی که به‌صورت قانون لنز در بخش ۳ ـ ۲ مطرح شد در برخی مواقع دشـــوار است. روش ســـاده‌تر برای تعیین جهت جریان القایی «قانون دســـت راست[۲]» است که آن را نیز می‌توان به‌کار برد. طبق این قانون اگر دســـت راســـت را مطابق شـــکل (۲۰ ـ ۲) طـــوری نگهداریم که فوران مغناطیسی از قطب N به کف دست وارد شود و شست جهت حرکت هادی را نشان دهد، انگشتان جهت جریان القایی هادی را نشان خواهند داد.

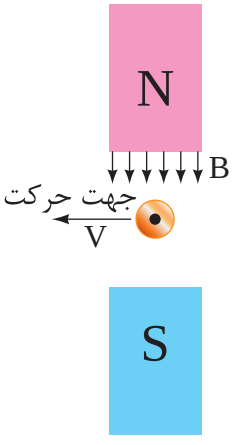


شکل ۲۰ ـ ۲ قانون دست راست

جهت جریان القایی یـــک هادی متحرک در میدان مغناطیسی تـــوسط قانون دست راست در شکل‌های (۲۱ ـ ۲) و (۲۲ ـ ۲) تعیین شده است.



شکل ۲۱ ـ ۲



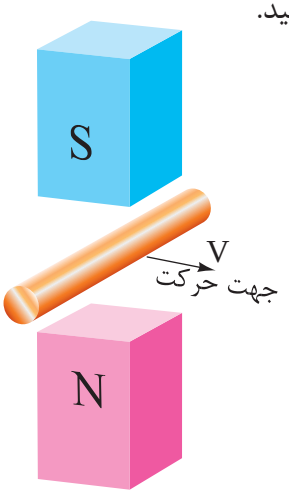
شکل ۲۲ ـ ۲

۱. Counter Electromotive Force

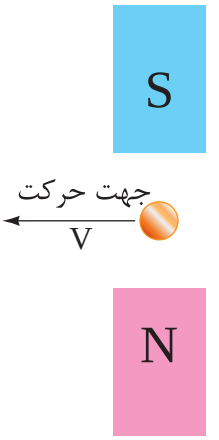
۲. Right Hand Rule

فعالیت ۲ ـ ۲

۱ ـ جهت جریان القایی هادی شـــکل‌های (۲۳ ـ ۲) و (۲۴ ـ ۲) را با اســـتفاده از قانون دست راست تعیین کنید.



شکل ۲۳ ـ ۲



شکل ۲۴ ـ ۲

۲ ـ از جـــواب‌های بـــــه‌دست آمـده در شکل‌های (۲۱ ـ ۲) الی (۲۴ ـ ۲) چه نتیجه‌ای به‌دست می‌آید؟

پرسش ۱ ـ ۲

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ تبدیل انـــرژی الکتریکی به مکانیکی و بالعکس ..... نامیده می‌شود.

۲ ـ طرز کار وسایل الکتریکی که ..... در آنها نقش دارد به کمک قانون القای الکترومغناطیس فاراده قابل فهم است.

۳ ـ طبق قانون لنز ..... به گونه‌ای اســـت که با عامل به‌وجود آورنده‌اش ..... می‌کند.

۴ ـ برای تعیین جهت جریان القایی از روش ..... استفاده می‌شود.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ ماشـــین‌های الکتریکی رابطی بین سیستم‌های الکتریکی و مکانیکی محسوب می‌شوند.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ قانون لنـــز در مورد جریان‌هـــای القایی به کار می‌رود.

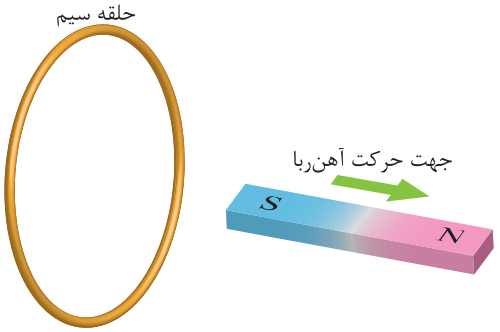
صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ ماشین الکتریکی را تعریف کنید.

۲ ـ ماشـــین‌های الکتریکی را چگونـــه طبقه‌بندی می‌کنند؟ توضیح دهید.

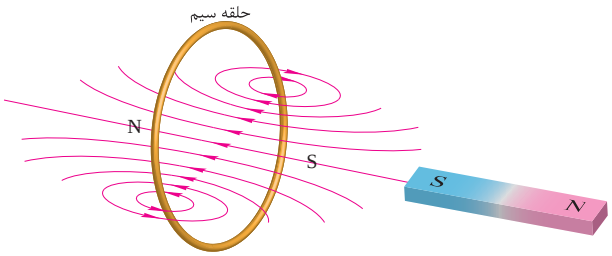
۳ ـ با توجه به شـــکل زیر جهـــت جریان القایی در حلقه را مشخص کنید.



۴ ـ برگشت‌پذیری فرآیند تبدیل انرژی در ماشین‌های الکتریکی یعنی چه؟

۵ ـ قانون لنز را تعریف کنید.

۶ ـ با توجه به شکل زیر جهت حرکت آهن‌ربا را مشخص کنید.



۷ ـ قانون دست راست را توضیح دهید و کاربرد آن را بنویسید.

۵ ـ ۲ ـ ژنراتورهای جریان مستقیم

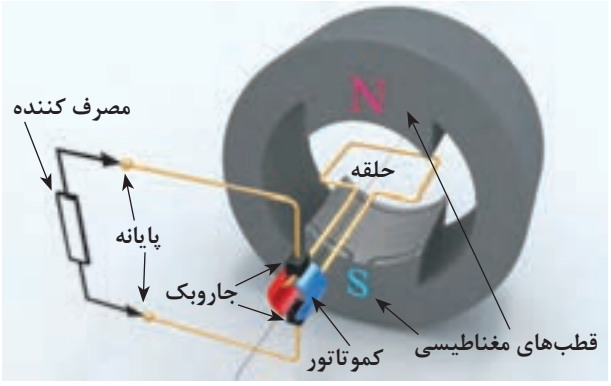
ژنراتورهای جریان مستقیم[۱]، انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. پلاریته ولتاژ در پایانه‌های آنها ثابت است لذا جهت جریان در مصرف‌کننده عوض نمی‌شود (شکل ۲۵ ـ ۲).

شکل ۲۵ ـ ۲ ژنراتور جریان مستقیم

به منظور آشنایی با ژنراتورها، ابتدا به توضیح ژنراتور ساده پرداخته می‌شود. این ژنراتور ساختمانی بسیار ساده دارد. مقدار ولتاژ و جریان القایی در آن بسیار کم است و کاربرد عملی ندارد، اما برای آشنایی با طرز کار ژنراتورهای واقعی، مطالعه آن بسیار مفید است.

۱ ـ ۵ ـ ۲ ـ ساختمان ژنراتور ساده جریان مستقیم

ژنراتور ساده جریان مستقیم در شکل (۲۶ ـ ۲) نشان داده شده است.



شکل ۲۶ ـ ۲ ژنراتور ساده جریان مستقیم با آهنربای دایم

ساختمان آن متشکل از چهار قسمت می‌باشد که عبارتند از:

۱ ـ حلقه هادی

۲ ـ کموتاتور[۲]

۳ ـ جاروبک[۳]

۴ ـ قطب‌های مغناطیسی[۴]

حلقه هادی حول محورش، در میان میدان مغناطیسی قوی دو قطب N و S یک آهن‌ربا، آزادانه می‌تواند گردش کند. سرهای حلقه هادی به دو نیم استوانه مسی لحیم شده است. این دو نیم استوانه مسی با عایقی از جنس میکا از یک‌دیگر جدا شده‌اند. به هر یک از این نیم استوانه مسی «تیغه[۵]» می‌گویند. مجموعه تیغه‌ها و عایق میان آن‌ها را «کموتاتور» نامیده‌اند.

۱. Direct Current Generators ۲. Commutator ۳. Brush ۴. Magnetic Pole ۵. Lamel

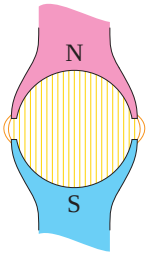
در این ژنراتور از دو جاروبک استفاده شده است. جاروبک‌ها بر روی کموتاتور قرار می‌گیرند. با گردش حلقه، کموتاتور متصل به آن در حال چرخش است و جاروبک‌ها با سایش به تیغه‌های کموتاتور، ارتباط الکتریکی حلقه هادی با مدار خارجی را برقرار می‌سازند و جریان القایی در آن را به مصرف‌کننده می‌رسانند.

جنس جاروبک‌ها معمولاً از گرافیت یا گرافیت فلزی است تا:

- مقاومت الکتریکی آنها تا حد امکان کم باشد. لذا در اثر عبور جریان، تلفات حرارتی در جاروبک‌ها به حداقل می‌رسد.
- ضریب اصطکاک آنها کم است تا علاوه بر کاهش تلفات مکانیکی، باعث فرسایش سریع کموتاتور نشوند.

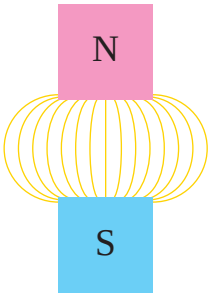
حلقه هادی از جنس مس انتخاب می‌شود. با گردش حلقه درون میدان مغناطیسی قطب‌ها، در آن نیروی محرکه القا می‌شود تا ولتاژ و جریان مورد نیاز مصرف‌کننده تامین شود.

نقش قطب‌ها ایجاد میدان مغناطیسی است که می‌توان توسط آهن‌ربای دایم به‌وجود آید. سطح قطب‌ها دارای انحنا می‌باشد. این انحنا باعث می‌شود چگالی فوران مغناطیسی B در هر نقطه از میدان مغناطیسی ثابت شود. میدان مغناطیسی با این خصوصیت را میدان مغناطیسی «یکنواخت» یا «همگن» می‌نامند (شکل ۲۷ـ ۲).



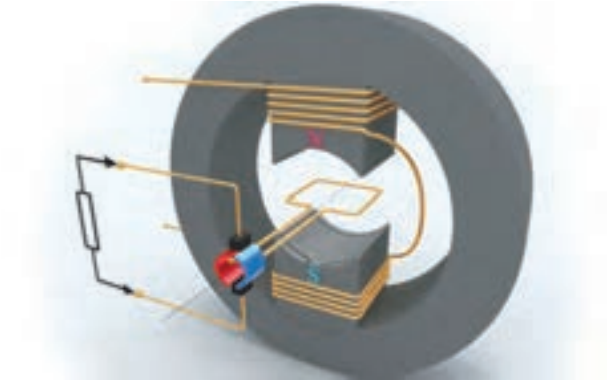
شکل ۲۷ ـ ۲ میدان مغناطیسی یکنواخت

اگر سطح قطب‌ها تخت باشد چگالی فوران مغناطیسی B در هر نقطه از میدان مغناطیسی ثابت نیست و فاصله میان خطوط نیروی مغناطیسی برابر نمی‌باشد. میدان مغناطیسی با این خصوصیت را میدان مغناطیسی «غیریکنواخت» یا «ناهمگن» می‌نامند (شکل ۲۸ ـ ۲).



شکل ۲۸ ـ ۲ میدان مغناطیسی غیریکنواخت

برای تولید میدان مغناطیسی می‌توان به‌جای استفاده از آهن‌ربای دایم، سیم‌پیچی بر روی قطب‌ها پیچید تا با عبور جریان از آن، میدان مغناطیسی ایجاد شود. این سیم‌پیچی را «سیم‌پیچی میدان[۱]» یا «سیم پیچی تحریک[۲]» می‌نامند (شکل ۲۹ ـ ۲).

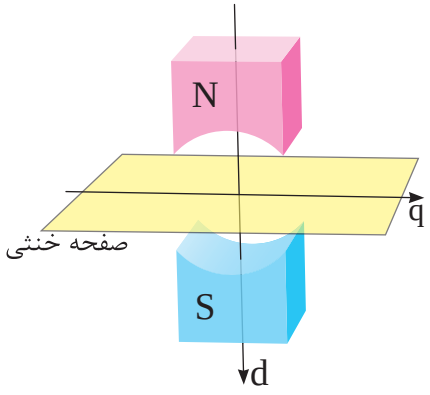


شکل ۲۹ ـ ۲ ژنراتور ساده جریان مستقیم با سیم‌پیچی تحریک

میدان مغناطیسی میان دو قطب غیرهمنام «میدان طولی[۳]» نام دارد. راستای این میدان را با «محور مستقیم[۴]» نشان می دهند و آن را «محور d» می‌نامند. راستای عمود بر محور مستقیم را با «محور متعامد[۵]»

۱. Field Winding ۲. Exciter Winding ۳. Direct Field ۴. Direct Axis ۵. Qudrature Axis

نشـــان می‌دهند و آن را «محور q» می‌نامند. مماس بر محور متعامد عمود بر محور مســـتقیم صفحه‌ای فرضی در نظـــر می‌گیرند که «صفحه خنثی» نام دارد (شـــکل ۳۰ ـ ۲).



شکل ۳۰ ـ ۲ محورهای d و q

پرسش ۲ ـ ۲

پرسش های کامل کردنی

۱ ـ ژنراتورهای جریان مســـتقیم انرژی ..... را به انرژی ..... تبدیل می‌کنند.

۲ ـ مجموعـــه ..... و ..... کموتاتـــور نامیـــده می‌شود.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ نقش قطب‌ها ایجاد میدان مغناطیسی است.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ اجزای ســـاختمانی ژنراتور ساده جریان مستقیم را نام ببرید.

۲ ـ جنـــس جاروبک از چه موادی اســـت و باید چه ویژگی‌هایی داشته باشد؟

۳ ـ میـــدان مغناطیســـی غیر یکنواخـــت را تعریف کنید.

۴ ـ میدان مغناطیســـی یکنواخت و غیریکنواخت را ترسیم کنید.

۵ ـ مفاهیم زیر را تعریف کنید؟

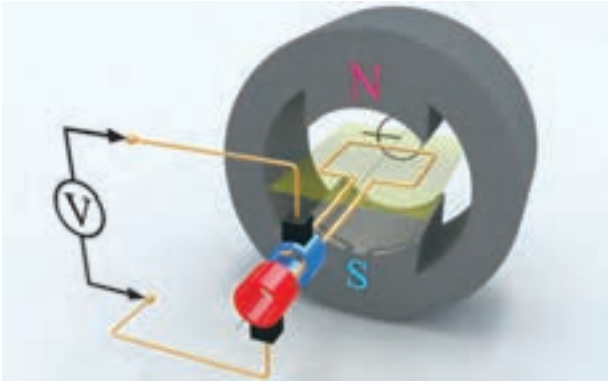
الف) میدان طولی ب) محور مستقیم

پ) محور متعامد ت) صفحه خنثی

۲ ـ ۵ ـ ۲ ـ طرز کار ژنراتور ساده جریان مستقیم

اســـاس کار ژنراتورهای الکتریکـــی، بر مبنای قانون القای الکترومغناطیســـی فاراده اســـت. برای آشنایی با طرز کار ژنراتورها ابتدا به طرز کار ژنراتور ســـاده جریان متناوب پرداخته می‌شود.

با جایگزینـــی دو عدد «رینگ[۱]» به‌جـــای کموتاتور، ژنراتور ساده جریان مستقیم شکل (۲۶ ـ ۲) به ژنراتور ساده جریان متناوب تبدیل می‌شود (شکل ۳۱ ـ ۲).



شکل ۳۱ ـ ۲ ژنراتور ساده جریان متناوب

در ژنراتور شـــکل (۳۱ ـ ۲) با گردش حلقه، رینگ‌ها نیز به همراه آن می‌گردند و با ایجاد تغییر فوران نسبت به زمان طبق قانون القای الکترومغناطیســـی فاراده، در حلقه نیروی محرکه القا می‌شود.

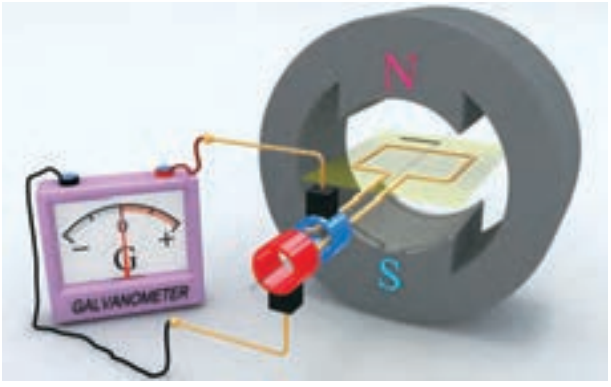
۱. Ring

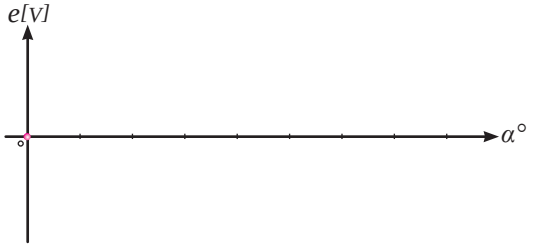
برای آشنایی با چگونگی القای نیروی محرکه، حلقه حول محورش در جهت حرکت عقربه ساعت دوران داده می‌شود و در چند لحظه، وضعیت آن بررسی خواهد شد و با اتصال گالوانومتر به پایانه‌های ژنراتور، نیروی محرکه القایی در هر لحظه اندازه‌گیری می‌شود.

در اولیـــن گام زمانی را کـــه حلقه، در صفحه خنثی قرار دارد انتخاب شـــده است (شـــکل ۳۲ ـ ۲). در این شکل مشاهده می‌شود فوران قطب‌ها تمام سطح حلقه را می‌پوشاند. اندازه تصویر فرضی حلقه که بر روی سطح قطب S تشکیل شده است این موضوع را تأیید می‌کند.

در این لحظه فوران، در ســـطح حلقـــه تغییرات ندارد. لذا طبق قانون القای الکترومغناطیســـی فاراده در حلقه نیروی محرکه القا نمی‌شـــود و گالوانومتر صفر را نشان می‌دهد.

برای نشـــان دادن مقدار نیروی محرکه القایی در هر لحظه از دســـتگاه مختصات اســـتفاده شده است که در آن محور افقی α نامیده شده است. این محور بر اساس زاویه بین صفحه حلقه با صفحه خنثی مدرج می‌شـــود. محور عمودی e نامیده شـــده اســـت و بر اساس مقدار نیروی محرکه القایی بر حسب ولت مدرج می‌شود.



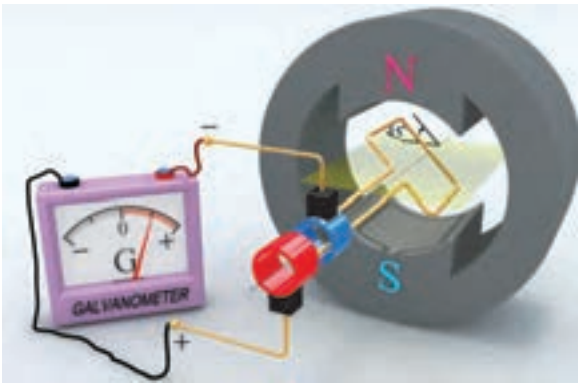


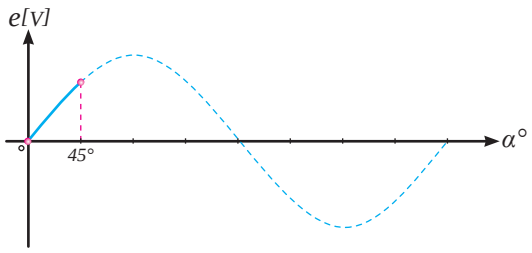
شکل ۳۲ ـ ۲

با شـــروع دوران حلقه، سطح حلقه نسبت به صفحه خنثـــی زاویه پیدا می‌کند و فورانی که در ســـطح حلقه محصور می‌شود کاهش می‌یابد. لحظه‌ای که $\alpha = ۴۵^\circ$ اســـت در شکل (۳۳ ـ ۲) نشان داده شده است. در این شکل مشـــاهده می‌شـــود فوران کمتری سطح حلقه را می‌پوشاند. تصویر فرضی سطح حلقه روی قطب S این موضـــوع را تأیید می‌کند. بنابراین در فاصله $۰ \langle \alpha \langle ۴۵^\circ$ فوران نسبت به زمان در حلقه تغییر کرده است و طبق قانون القـــای الکترومغناطیس فـــاراده در حلقه نیروی محرکه القا می‌شود.

در طی دورانِ حلقه زاویه α افزایش می‌یابد و فورانی که ســـطح حلقه را می‌پوشاند متناسب با $\sin\alpha$ تغییر خواهد کرد؛ لذا شـــکل نیروی محرکه القایی، سینوسی خواهد بود و مقدار آن نیز متناسب با $\sin\alpha$ است.

از آنجایـــی که در فاصله $۰ \langle \alpha \langle ۴۵^\circ$ «تغییرات فوران نسبت به زمان» برای سطح حلقه زیاد شده است مقدار نیروی محرکه القایی در حلقه نیز افزایش می‌یابد. شکل مـــوج ولتاژ القایی در این فاصلـــه روی محور مختصات نشان داده شده است.

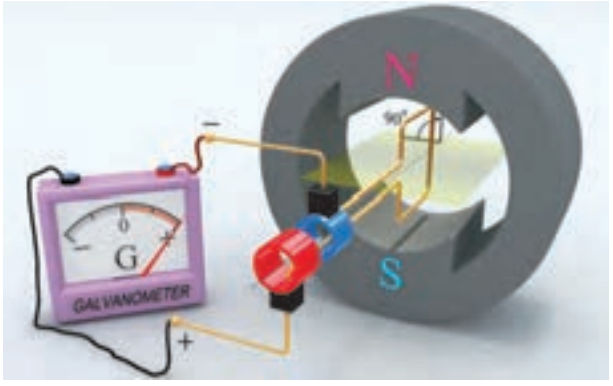


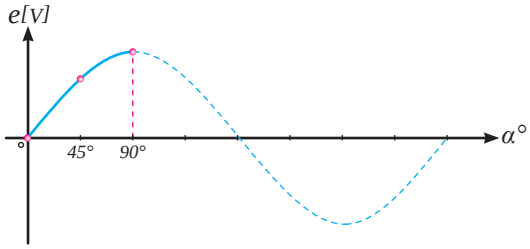


شکل ۳۳ ـ ۲

در ادامه دَوران حلقه در فاصله $۴۵^\circ < \alpha < ۹۰^\circ$ فورانی که در سطح حلقه محصور می‌شود هم‌چنان رو به کاهش است تا این‌که در $\alpha = ۹۰^\circ$ به صفر می‌رسد (شکل ۳۴ ـ ۲). این موضوع را عدم تشکیل تصویر حلقه روی سطح قطب S نیز تایید می‌کند. بنابراین در فاصله $۴۵^\circ < \alpha < ۹۰^\circ$ همانند فاصله $۰ < \alpha < ۴۵^\circ$ فوران نسبت به زمان در حلقه تغییر کرده است و طبق قانون القای الکترومغناطیس فاراده، نیروی محرکه القایی در حلقه ایجاد می‌شود.

از زمانی که حلقه صفحه خنثی را در شکل (۳۲ ـ ۲) ترک کرد، تغییرات فوران در سطح حلقه رو به افزایش بوده است. بنابراین مقدار نیروی محرکه القایی نیز زیاد شده است. تا در $\alpha = ۹۰^\circ$ لحظه‌ای که سطح حلقه عمود بر صفحه خنثی می‌شود، بیشترین تغییرات فوران نسبت به زمان در سطح حلقه ایجاد می‌شود. لذا در این لحظه حداکثر نیروی محرکه در حلقه القا می‌شود.

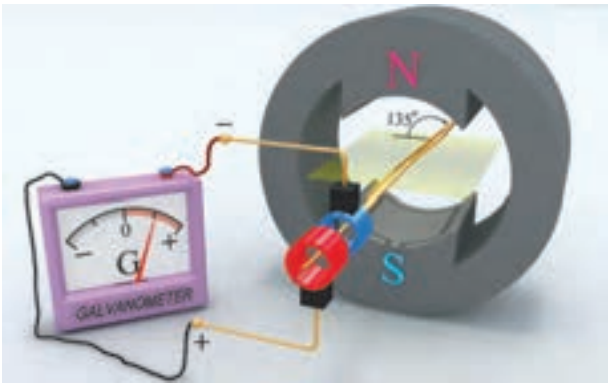


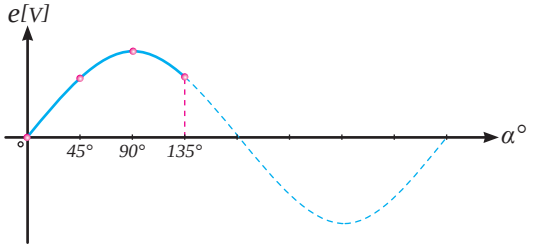


شکل ۳۴ ـ ۲

با ادامه دَوران حلقه زمانی فرا می‌رسد که صفحه حلقه مجدداً با صفحه خنثی مماس می‌شود. در این فاصله زاویه α از ۹۰° به ۱۸۰° می‌رسد. وضعیت حلقه در $\alpha = ۱۳۵^\circ$ و $\alpha = ۱۸۰^\circ$ در شکل‌های (۳۵ ـ ۲) و (۳۶ ـ ۲) نشان داده شده است. با مقایسه شکل‌های (۳۴ ـ ۲)، (۳۵ ـ ۲) و (۳۶ ـ ۲) مشاهده می‌شود در فاصله $۹۰^\circ < \alpha < ۱۸۰^\circ$ فورانی که توسط سطح حلقه محصور می‌شود به تدریج افزایش می‌یابد و در $\alpha = ۱۸۰^\circ$ به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این موضوع را بزرگ شدن تصویر فرضی سطح حلقه روی قطب S تایید می‌کند. بنابراین در فاصله $۹۰^\circ < \alpha < ۱۸۰^\circ$ همانند فاصله $۰ < \alpha < ۹۰^\circ$ فوران نسبت به زمان در حلقه

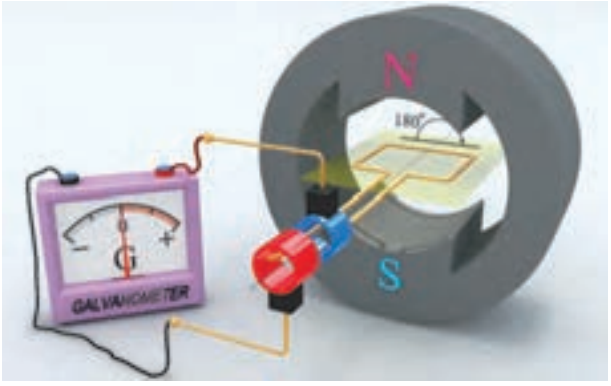
تغییر کرده اســت و طبق قانون القای الکترومغناطیسی فاراده نیروی محرکه در حلقه القا می‌شود.

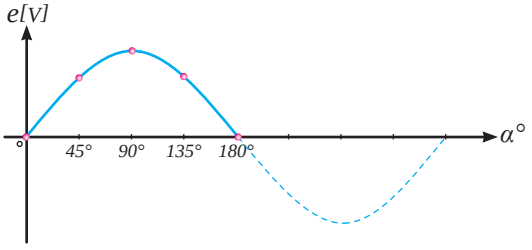




شکل ۳۵ ـ ۲

در فاصلــه $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ «تغییرات فوران نســبت به زمان» برای ســطح حلقه رو به کاهش بوده اســت. بنابرایــن مقدار نیروی محرکه القایی نیز کم می‌شــود تــا در $\alpha = 180^\circ$ هنگامی که ســطح حلقه در صفحه خنثی قرار می‌گیرد تغییرات فوران نسبت به زمان صفر می‌شود. لذا نیروی محرکه در حلقه القا نمی‌شود.

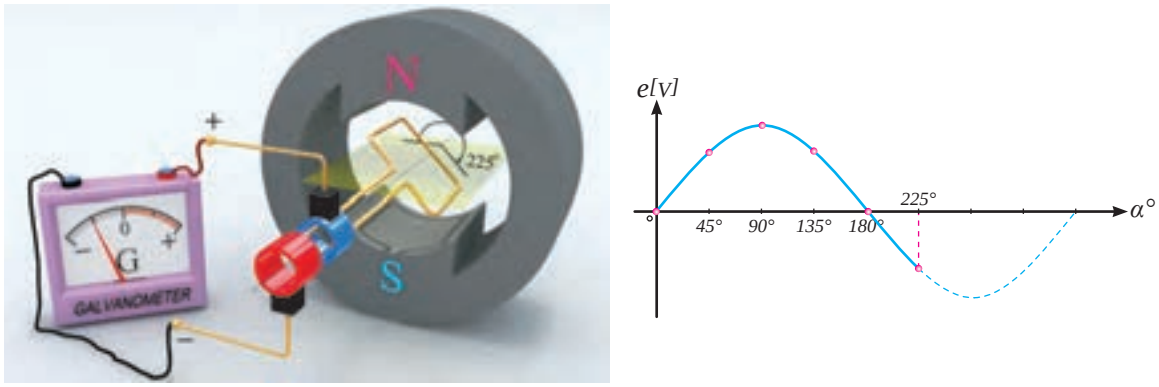




شکل ۳۶ ـ ۲

با ادامه دَوران حلقه، زاویه بین سطح حلقه و صفحه خنثی زیاد می‌شــود. وضعیت حلقه در $\alpha = 225^\circ$ در شــکل (۳۷ ـ ۲) و در $\alpha = 270^\circ$ در شــکل (۳۸ ـ ۲) نشان داده شده است.

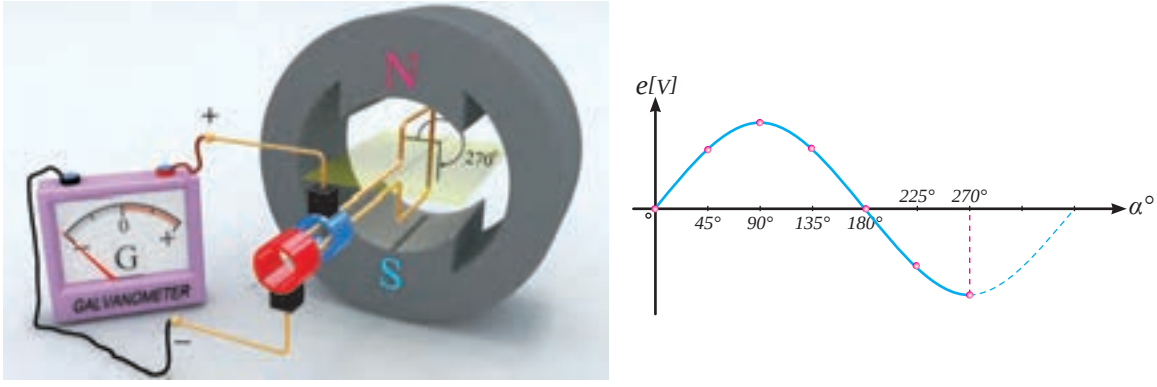
بــا مــقایسه شــکل‌های (۳۶ ـ ۲)، (۳۷ ـ ۲) و (۳۸ ـ ۲) مشــاهده می‌شود در فاصله $180^\circ < \alpha < 270^\circ$ فورانی که در ســطح حلقه محصور می‌شــود به تدریج کاهش می‌یابد و از بیشــترین مقدار در $\alpha = 180^\circ$ به کمترین مقدار در $\alpha = 270^\circ$ می‌رســد و در این زوایه صفر می‌شــود. کوچک شدن تصویر فرضی سطح حلقه روی قطب S این موضــوع را تأیید می‌کند. بنابراین در این فاصله «فوران نسبت به زمان» در حلقه تغییر کرده اســت؛ لذا طبق قانون القای الکترومغناطیســی فاراده، نیروی محرکه در حلقه القا می‌شود.



شکل ۳۷ ـ ۲

«تغییرات فوران نسبت به زمان» در فاصله $180^\circ < \alpha < 270^\circ$ در سطح حلقه افزایش یافته است. بنابراین مقدار نیروی محرکه القایی زیاد می‌شود. اما در این فاصله نسبت به فاصله $0 < \alpha < 90^\circ$ به علت گردش حلقه فوران قطب N از سمت دیگر سطح حلقه وارد حلقه می‌شود. لذا پلارتیه نیروی محرکه القایی در حلقه معکوس می‌شود و پلاریته ولتاژ القایی در زیر جاروبک‌ها نیز عوض می‌شود. تعویض پلاریته ولتاژ القایی در جاروبک‌ها باعث تغییر جهت جریان القایی در ولت‌متر می‌شود و جهت حرکت عقربه ولت‌متر عکس حالت قبل می‌شود. بنابراین شکل موج در زیر محور α جایی که E منفی است رسم می‌شود.

بیشترین «تغییرات فوران نسبت به زمان» در $\alpha = 270^\circ$ مانند $\alpha = 90^\circ$ در سطح حلقه ایجاد می‌شود؛ لذا در این لحظه نیز حداکثر نیروی محرکه در حلقه القا می‌شود (شکل ۳۸ ـ ۲).

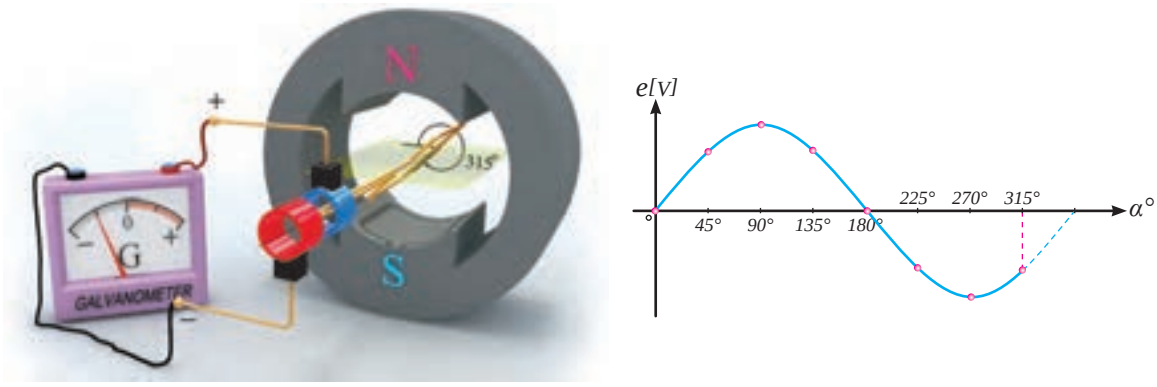


شکل ۳۸ ـ ۲

با ادامه دَوران حلقه زمانی فرا می‌رسد که صفحه حلقه مجدداً با صفحه خنثی مماس می‌شود. در این فاصله زاویه α از 270° به 360° می‌رسد. وضعیت حلقه در $\alpha = 315^\circ$ در شکل (۳۹ ـ ۲) و در $\alpha = 360^\circ$ در شکل (۳۶ ـ ۲) نشان داده شده است.

با مقایسه شکل‌های (۳۸ ـ ۲)، (۳۹ ـ ۲) و (۴۰ ـ ۲) مشاهده می‌شود در فاصله $270^\circ < \alpha < 360^\circ$ فورانی که توسط سطح حلقه محصور می‌شود به تدریج افزایش می‌یابد و در $\alpha = 360^\circ$ به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این موضوع را بزرگ شدن تصویر فرضی سطح

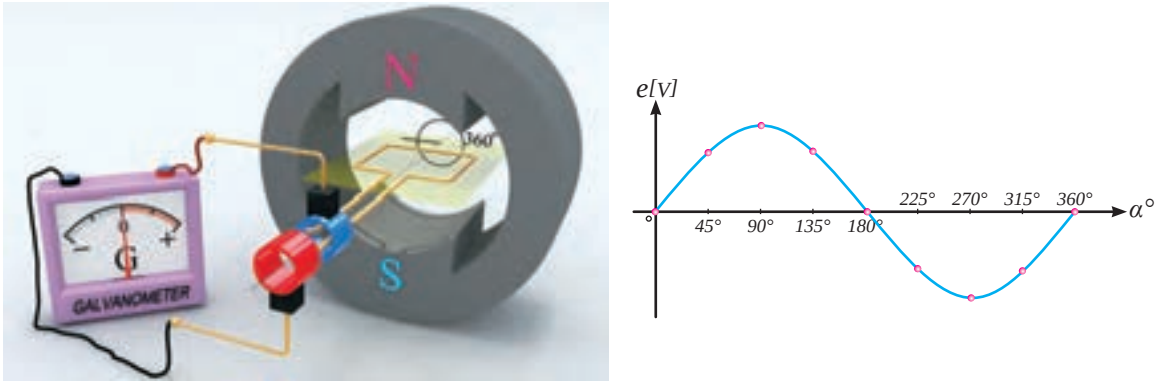
حلقه روی قطب S تأیید می‌کند. بنابراین در این فاصله «فوران نسبت به زمان» در حلقه تغییر کرده است؛ لذا طبق قانون القای الکترومغناطیسی فاراده نیروی محرکه، در حلقه القا می‌شود.



شکل ۳۹ ـ ۲

«تغییرات فوران نسبت به زمان» در فاصله $270^\circ < \alpha < 360^\circ$ در سطح حلقه کاهش می‌یابد. بنابراین مقدار نیروی محرکه القایی کم می‌شود. در این فاصله نیز نسبت به فاصله $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ به علت گردش حلقه فوران قطب N از سمت دیگر سطح حلقه وارد حلقه می‌شود. لذا پلاریته ولتاژ القایی در حلقه معکوس می‌شود و شکل موج در قسمت منفی دستگاه مختصات e و α رسم می‌شود.

هنگامی که سطح حلقه در صفحه خنثی قرار می‌گیرد تغییرات فوران نسبت به زمان صفر می‌شود؛ لذا نیروی محرکه القایی در حلقه صفر می‌شود.



شکل ۴۰ ـ ۲

موقعیت حلقه در شکل (۴۰ ـ ۲) همان موقعیت حلقه در شکل (۳۲ ـ ۲) می‌باشد که با یک دور گردش کامل، حلقه به موقعیت اول خود رسیده است. بدیهی است در صورت ادامه حرکت حلقه مجدداً پدیده القا در حلقه صورت می‌گیرد و موج سینوسی تکرار خواهد شد.

با توجه به توضیحاتی که برای یک دور گردش حلقه در شکل‌های (۳۲ ـ ۲) الی (۴۰ ـ ۲) ارائه شد می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

- با گردش حلقه «تغییرات فوران نسبت به زمان» در سطح حلقه ایجاد می‌شود و طبق قانون القای الکترومغناطیسی فاراده نیروی محرکه در حلقه القا می‌شود.

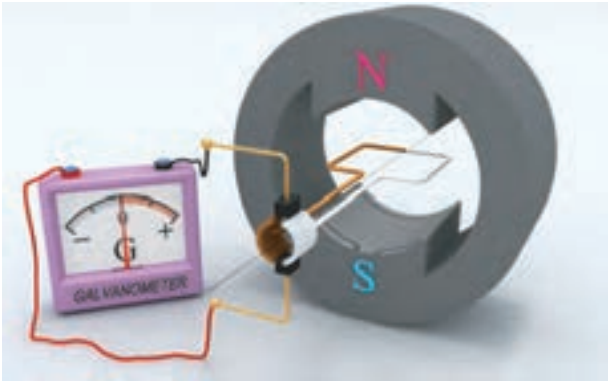
- تغییرات فوران در سطح حلقه متناسب با $\sin\alpha$ است، لذا شکل موج نیروی محرکه القایی، سینوسی است.
- هر بار که سطح حلقه وارد صفحه خنثی می‌شود نیروی محرکه القایی آن صفر می‌شود.
- هرگاه سطح حلقه عمود بر صفحه خنثی می‌شود حداکثر نیروی محرکه در حلقه، القا می‌شود.
- با عبور حلقه از صفحه خنثی پلاریته نیروی محرکه القایی در حلقه عوض می‌شود.
- در هر دور گردش حلقه پلاریته ولتاژ القایی جاروبک‌ها یک بار عوض می‌شود و جهت جریان القایی تغییر می‌کند.

پس از آشنایی با طرز کار ژنراتور ساده جریان متناوب اکنون با جایگزینی کموتاتور به جای رینگ‌ها به طرز کار ژنراتور ساده جریان مستقیم می‌پردازیم.

کموتاتور باعث می‌شود پلاریته ولتاژ القایی در زیر هر جاروبک ثابت بماند و همیشه یکی از جاروبک‌ها دارای پلاریته مثبت و دیگری دارای پلاریته منفی باشد تا جهت جریان القایی در مصرف کننده یکسو باشد. در واقع جریان متناوب القایی داخل ژنراتور، توسط کموتاتور برای مصرف‌کننده یکسو می‌شود.

یک ژنراتور ساده جریان مستقیم متصل به یک گالوانومتر در شکل (۴۱ ـ ۲) نشان داده شده است. گالوانومتر ضمن این‌که مقدار ولتاژ القایی و جهت جریان القایی را نشان می‌دهد، نقش مصرف کننده را نیز ایفا می‌کند.

با دَوران حلقه حول محورش، کموتاتور نیز به همراه آن می‌گردد و مانند ژنراتور ساده جریان متناوب در سطح حلقه «تغییر فوران نسبت به زمان» ایجاد می‌شود و طبق قانون القای الکترومغناطیسی فاراده، نیروی محرکه در حلقه القا می‌شود.



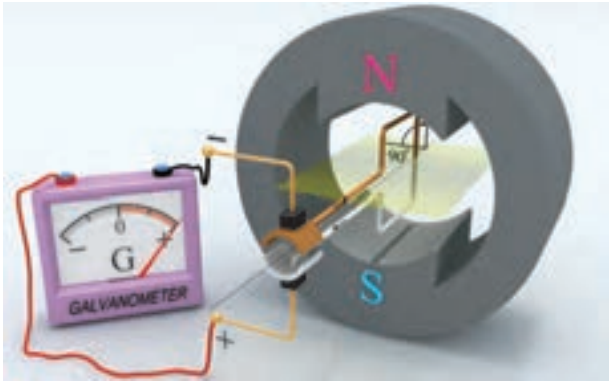
شکل ۴۱ ـ ۲

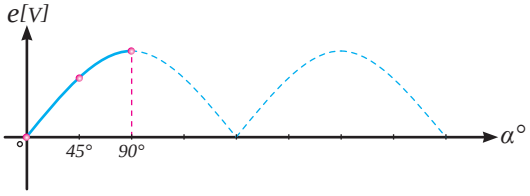
برای آشنایی با طرز کار ژنراتور ساده جریان مستقیم، حلقه حول محورش در جهت حرکت عقربه‌های ساعت دَوران داده شده است و در چند لحظه، جهت جریان القایی در حلقه و هم‌چنین جاروبک‌ها بررسی می‌شود.

با شروع دَوران، حلقه شکل (۴۱ ـ ۲) از صفحه خنثی خارج می‌شود و تغییر فوران نسبت به زمان در حلقه ایجاد خواهد شد و طبق قانون القای الکترومغناطیسی فاراده در آن نیروی محرکه القا می‌شود.

لحظه‌ای را که بازوی قهوه‌ای حلقه در مقابل قطب N و بازوی سفید حلقه در مقابل قطب S قرار دارد در شکل (۴۲ ـ ۲) نشان داده شده است. با به کار بردن قانون دست راست جهت جریان القایی این دو بازو تعیین می‌شود. لذا برای بازوی قهوه‌ای کف دست راست در مقابل قطب N قرار می‌گیرد تا میدان قطب N به آن وارد شود و شست در جهت حرکت این بازو قرار داده می‌شود، بنابراین انگشتان جهت جریان القایی در

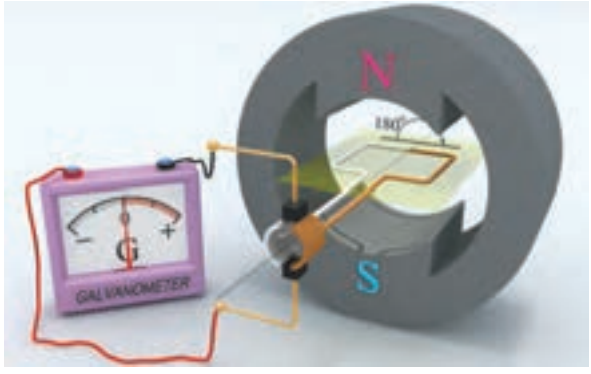
این بازو را نشان می‌دهند. همین کار برای بازوی سفید تکرار می‌شود تا جهت جریان القایی آن تعیین شود. مشاهده می‌شود جریان بازوی سفید توسط تیغه سفید کموتاتور به جاروبک پایین منتقل می‌شود و پس از عبور از گالوانومتر، عقربه آن منحرف می‌شود، و از طریق جاروبک بالا به تیغه قهوه‌ای کموتاتور منتقل می‌شود و به بازوی قهوه‌ای حلقه می‌رسد. جاروبک پایین که جریان القایی از آن خارج می‌شود دارای پلاریته مثبت و جاروبک بالا که جریان القایی به آن وارد می‌شود دارای پلاریته منفی می‌شود.

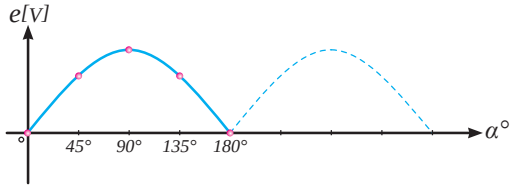




شکل ۴۲ ـ ۲

در ادامه دوران حلقه، زمانی فرا می‌رسد که سطح حلقه دوباره در صفحه‌ی خنثی قرار می‌گیرد. شکل (۴۳ ـ ۲). در این لحظه تغییرات فوران نسبت زمان در حلقه به صفر می‌رسد و در آن نیروی محرکه القا نمی‌شود. بنابراین در حلقه جریان القایی جاری نمی‌شود. گالوانومتر صفر را نشان می‌دهد.

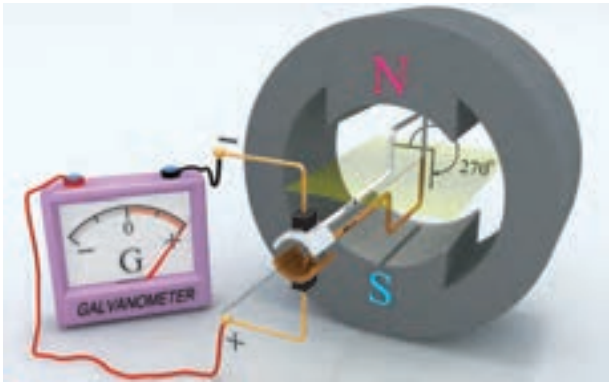


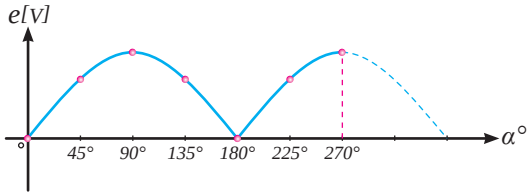


شکل ۴۳ ـ ۲

با ادامه دَوران حلقه زمانی فرا می‌رسد که بازوی سفید حلقه در مقابل قطب N و بازوی قهوه‌ای حلقه در مقابل قطب S قرار می‌گیرد. شکل (۴۴ ـ ۲) با به‌کار بردن قانون دست راست، جهت جریان القایی این دو بازو تعیین می‌شود. بدین منظور برای بازوی قهوه‌ای کف دست راست در مقابل قطب N قرار می‌گیرد تا میدان قطب N به آن وارد شود و شست در جهت حرکت این بازو قرار داده می‌شود. بنابراین انگشتان جهت جریان القایی در این بازو را نشان می‌دهند. همین کار برای بازوی سفید تکرار می‌شود تا جهت جریان القایی آن تعیین شود. مشاهده می‌شود هم‌چنان جهت جریان القایی بازوی سفید برخلاف بازوی قهوه‌ای است. در این وضعیت جریان بازوی قهوه‌ای توسط تیغه قهوه‌ای کموتاتور به جاروبک پایین منتقل شده و پس از عبور از گالوانومتر، باعث انحراف عقربه آن می‌شود، سپس از طریق جاروبک بالا به تیغه سفید کموتاتور منتقل

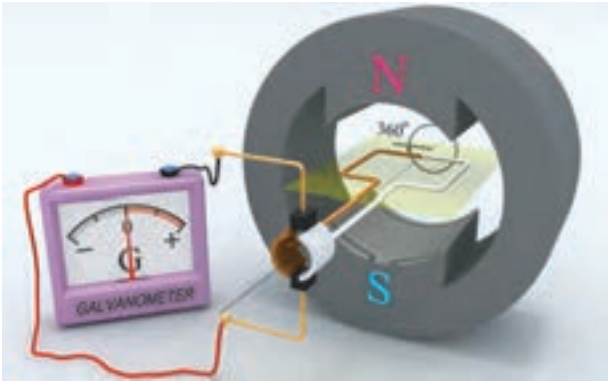
می‌شود و به بازوی سفید حلقه می‌رسد. جاروبک پایین که هم‌چنان جریان القایی از آن خارج می‌شـــود دارای پلاریته مثبت و جاروبک بالا که هم‌چنان جریان القایی به آن وارد می‌شود دارای پلاریته منفی است. عدم تغییر جهـــت جریان در گالوانومتر باعث شـــد تا عقربه آن در همان جهت قبلی انحراف پیدا کند. بنابراین شکل موج نیروی محرکه القایی نیز در همان جهت قبلی ترســـیم می‌شود.

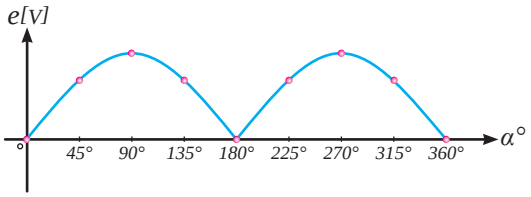




شکل ۴۴ ـ ۲

در ادامه دَوران حلقه، زمانی فرا می‌رســـد که سطح حلقـــه دوباره در صفحه خنثی قرار می‌گـــیرد (شکل ۴۵ ـ ۲). در این لحظه تغییرات فوران نســـبت به زمان در حلقه به صفر می‌رســـد و در آن طبـــق قانون القای الکترومغناطیســـی فاراده، نیروی محرکه القا نمی‌شود. بنابراین در حلقه جریان القایی جاری نخواهد شـــد. در ایـــن حالت حلقه یک دور کامل دَوران کرده اســـت و با پیمودن 360° به موقعیت اول خود رسیده است. بدیهی است در صورت ادامه حرکت، مجدداً پدیده القا در حلقه صورت می‌گیرد و شکل موج نیروی محرکه القایی تکرار خواهد شد.





شکل ۴۵ ـ ۲

در ژنراتور ساده جریان مستقیم با هر نیم دور گردش حلقه، شکل موج نیروی محرکه القایی یک سیکل کامل را طی می‌کند. در هر سیکل مقدار لحظه‌ای نیروی محرکه القایی از صفر به حداکثر مقدار خود می‌رســـد و سپس دوباره به صفر بر می‌گردد. برای بیان اندازه واقعی نیروی محرکه القایی «مقدار متوســـط[1]» آن محاسبه می‌شود. مقدار متوسط، میانگین مقادیر لحظه‌ای نیروی محرکه القایی است که چیزی بین صفر و حداکثر می‌باشد. برای شکل موج (۴۵ ـ ۲) مقدار متوسط برابر است با:

$$E_{av} = \frac{2E_m}{\pi} = 0/637E_m \qquad (۲-۵)$$

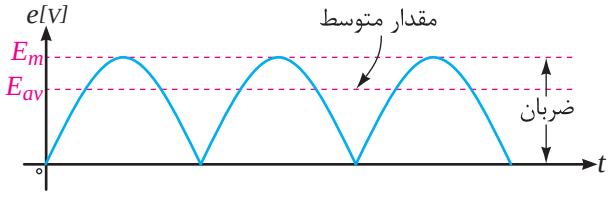
۱. Average Value

در این رابطه:

E_m حداکثر نیروی محرکه القایی بر حسب [V]

E_{av} مقدار متوسط نیروی محرکه القایی بر حسب [V]

حداکثر مقدار نیروی محرکه القایی در ژنراتور ساده جریان مستقیم بسیار کم و در حد میکرو ولت است. لذا مقدار متوسط آن نیز بسیار کم می‌شود. از طرفی مقدار نیروی محرکه القایی بین صفر و حداکثر تغییر می‌کند و «دامنه تغییرات» یا «ضربان[1]» آن بسیار زیاد است (شکل ۴۶ ـ ۲). بنابراین مقدار کمِ متوسطِ نیروی محرکه القایی E_{av}، و ضربان زیاد آن باعث شده است تا ژنراتور ساده جریان مستقیم غیرقابل استفاده بوده و کاربردی نداشته باشد.



شکل ۴۶ ـ ۲

پیرامون ژنراتور ساده جریان مستقیم می‌توان به نکات مهم زیر اشاره کرد:

- با عبور حلقه از صفحه خنثی جهت جریان القایی در حلقه عوض می‌شود و جاروبک‌ها از یک تیغه به تیغه دیگر کموتاتور می‌روند تا از تغییر جهت جریان در مصرف کننده جلوگیری کنند.
- با قرار گرفتن سطح حلقه در صفحه خنثی، نیروی محرکه القایی در حلقه صفر می‌شود.
- هنگامی‌که سطح حلقه عمود بر صفحه خنثی قرار می‌گیرد حداکثر نیروی محرکه در آن القا می‌شود.
- در حین گردش حلقه پلاریته ولتاژ جاروبک‌ها همواره ثابت است.
- مقدار متوسط نیروی محرکه القایی کوچک است.
- ضربان نیروی محرکه القایی زیاد است.

۳ ـ ۵ ـ ۲ ـ اثر افزایش تعداد حلقه‌ها و تعداد دور آن در ژنراتور ساده جریان مستقیم

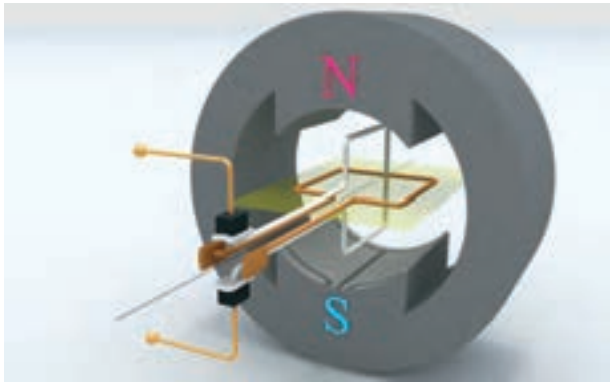
الف ـ اثر افزایش تعداد حلقه‌ها

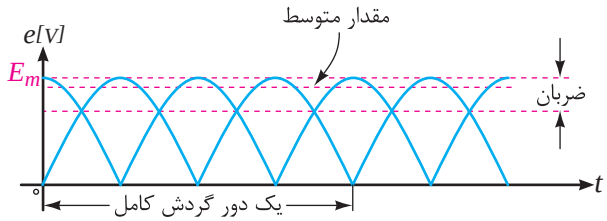
برای کاهش ضربان و افزایش مقدار متوسط نیروی محرکه القایی به‌جای استفاده از یک حلقه می‌توان از دو حلقه که نسبت به یکدیگر اختلاف فاز مکانی دارند استفاده کرد. در این صورت نیروی محرکه القایی این دو حلقه نیز نسبت به یکدیگر اختلاف فازی معادل اختلاف فاز مکانی حلقه‌ها پیدا می‌کند (شکل ۴۷ ـ ۲).

---

۱. Ripple

مقدار لحظه‌ای نیروی محرکه القایی e در ژنراتور ساده جریان مستقیم از رابطه $e = 2NBLV\sin\alpha$ به‌دست می‌آید.
در این رابطه:
N تعداد دور حلقه
B چگالی فوران مغناطیسی قطب‌ها بر حسب [T]
L طول موثر هر بازوی حلقه در میدان مغناطیسی بر حسب [m]
V سرعت حلقه بر حسب $\left[\frac{m}{s}\right]$
α زاویه بین سطح حلقه با صفحه خنثی بر حسب درجه
e نیروی محرکه القایی بر حسب [V]



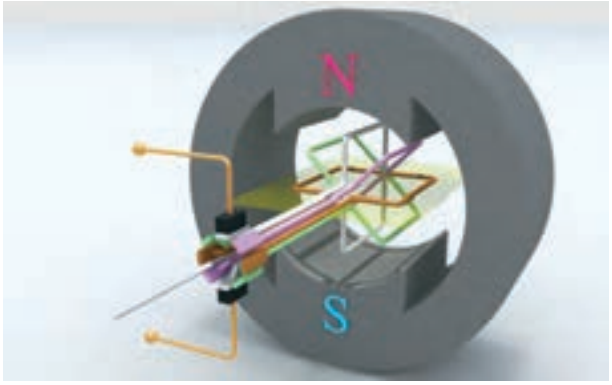


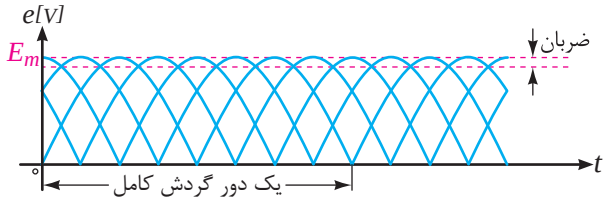
شکل ۴۷ ـ ۲

بدیـــن ترتیب ضربان نیروی محرکـــه القایی کاهش پیدا می‌کند و مقدار متوسط آن افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل (۴۷ ـ ۲) مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد حلقه‌ها، تعداد تیغه‌های کموتاتور افزایش می‌یابد. در این شکل نســـبت تیغه‌ها به حلقه‌ها «دو به یک» است.

برای کاهش ضربان و بیش‌تر شـــدن متوسط نیروی محرکـــه القایی می‌تـــوان از تعداد حلقه‌های بیشـــتری اســـتفاده کرد (شـــکل ۴۸ ـ ۲). با افزایش بیشتر تعداد حلقه‌هـــا، ضربان نیروی محرکه القایـــی تقریباً به صفر می‌رسد و مقدار متوســـط نیروی محرکه القایی E_{av} به حداکثر آن E_m نزدیک می‌شـــود. بدیهی است افزایش تعـــداد حلقه‌ها تا جایی که فضـــای میان قطب‌ها اجازه دهد امکان‌پذیر خواهد بود.



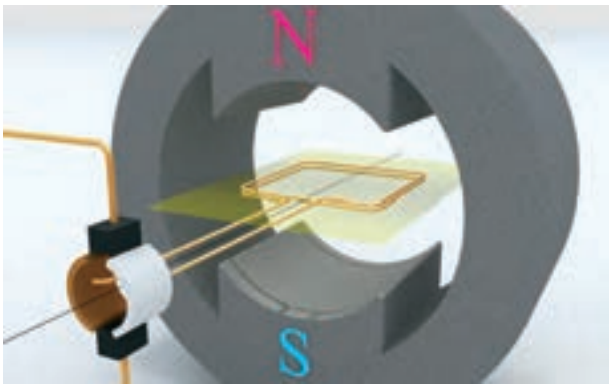


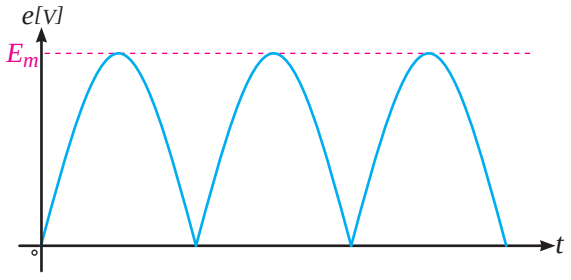
شکل ۴۸ ـ ۲

ب ـ اثر افزایش تعداد دور حلقه

همان‌طور که گفته شد حداکثر مقدار نیروی محرکه القایی E_m در ژنراتور ســـاده جریان مستقیم بسیار کم و در حد میکرو ولت می‌باشـــد. بـــرای افزایش حداکثر مقدار نیروی محرکه القایی E_m می‌توان به‌جای «حلقه» از «کلاف[۱]» که از چندین حلقه ســـری با هم تشـــکیل شـــده است استفاده کرد (شـــکل ۴۹ ـ ۲). طبق رابطه قانون القـــای الکترومغناطیســـی فاراده $\left(e = N\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}\right)$ افزایش تعداد دور حلقه N باعث افزایش نیروی محرکه القایی e در آن می‌شود. در واقع در هر دور حلقه، نیروی محرکه‌ای، القا می‌شود. از آنجایی که حلقه‌ها با یکدیگر سری شـــده‌اند، نیروی محرکه القایی حلقه‌ها با یکدیگر جمع می‌شـــود و در نتیجه نیروی محرکه القایی کلاف افزایش می‌یابد.

۱. Coil

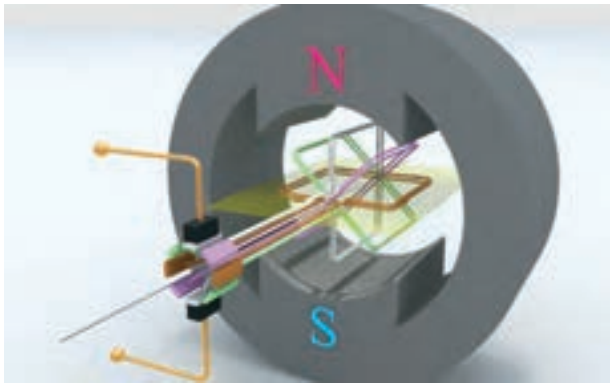


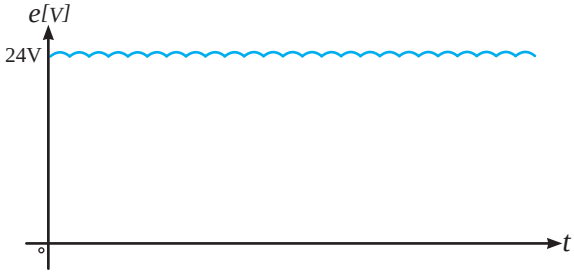


شکل ۴۹ ـ ۲

ج ـ نتیجه‌گیری

در عمل بـا جایگزینی «کلاف‌هـا» به‌جای «حلقه» در ژنراتور سـاده جریان مسـتقیم، ضمن اینکه مقدار متوسط نیروی محرکه القایی افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند، ضربـان آن نیز کاهش می‌یابد. در این صورت ژنراتور کاربرد عملی پیدا می‌کند و ولتاژ پایانه‌های آن بـرای مصـرف‌کننده قـابل استفاده می‌شود (شـکل ۵۰ ـ ۲).





شکل ۵۰ ـ ۲

پرسش ۳ ـ ۲

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ در ژنراتور سـاده با گردش حلقـه ..... در سطح حلقه ایجاد می‌شـود و طبق قانون ..... نیروی محرکه در حلقه ..... می‌شود.

۲ ـ در ژنراتور سـاده با عبور حلقه از صفحه خنثی پلاریته ..... در حلقه ..... می‌شود.

۳ ـ در واقـع جریان متناوب القایـی داخل ژنراتور توسط ..... برای مصرف کننده ..... می‌شود.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ در ژنراتور سـاده هر بار کـه حلقه وارد صفحه خنثی می‌شود نیروی محرکه القایی آن صفر می‌شود.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ بـا جایگزینی کموتاتور به جـای رینگ ژنراتور سـاده جریان متناوب به ژنراتور ساده جریان مستقیم تبدیل می‌شود.

صحیح ☐ غلط ☐

۳ ـ کموتاتور باعث می‌شـود پلاریته ولتاژ القایی در

زیر هر جاروبک ثابت بماند.

صحیح ☐ غلط ☐

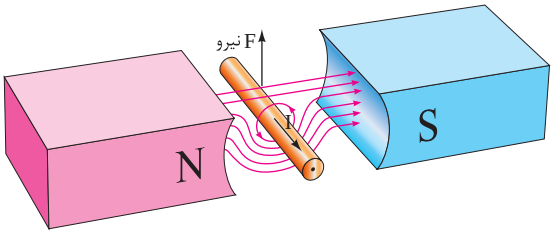
پرسش‌های تشریحی

۱ ـ معایب ژنراتور ساده جریان مستقیم را بنویسید.

۲ ـ تأثیر افزایش تعداد حلقه‌ها و تعداد دور حلقه بر کار ژنراتور ساده را توضیح دهید.

۶ ـ ۲ ـ نیروی مغناطیسی وارد بر هادی حامل جریان الکتریکی

یک هادی حامل جریان الکتریکی در میدان مغناطیسی قطب‌های N و S آهن‌ربایی قوی در نظر گرفته شده است (شکل ۵۱ ـ ۲).



شکل ۵۱ ـ ۲

جهت میدان مغناطیسی قطب‌ها از سوی قطب N به سمت قطب S می‌باشد. میدان مغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی با قانون شست تعیین شده است. مشاهده می‌شود در پایین هادی، جهت میدان مغناطیسی قطب‌ها و جهت میدان مغناطیسی اطراف هادی هم جهت می‌باشد و یکدیگر را تقویت می‌کنند؛ اما در بالای هادی جهت میدان مغناطیسی آن‌ها مخالف یکدیگر می‌باشد و همدیگر را تضعیف می‌کنند. لذا «نیروی مغناطیسی» به هادی از سوی میدان قوی‌تر به سمت میدان ضعیف‌تر وارد می‌شود و هادی را به‌سمت بالا حرکت می‌دهد.

فعالیت ۳ ـ ۲

اگر جهت جریان الکتریکی هادی شکل (۵۱ ـ ۲) عوض شود با رسم خطوط میدان مغناطیسی قطب‌ها و اطراف هادی، جهت نیروی مغناطیسی وارد به هادی را تعیین کنید.

همان‌طور که توضیح داده شد می‌توان نتیجه گرفت:

«به هر هادی حامل جریان در میدان مغناطیسی، نیروی مغناطیسی وارد می‌شود»، به‌طوری که «نیروی مغناطیسی سعی به بیرون راندن هادی از درون میدان مغناطیسی دارد».

به نیروی مغناطیسی وارد به هادی حامل جریان الکتریکی به احترام «لورنس[1]» که مفاهیم میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را شرح و تفصیل داده است، «نیروی لورنس[2]» می‌گویند.

مقدار نیروی مغناطیسی از رابطه (۶ ـ ۲) به‌دست می‌آید:

$$F = BIL \qquad (۶-۲)$$

در این رابطه:

F نیروی مغناطیسی بر حسب نیوتن [N]

B چگالی فوران مغناطیسی بر حسب $\left[\frac{wb}{m^2}\right]$

I شدت جریان الکتریکی هادی بر حسب [A]

L طول مؤثر هادی که تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد بر حسب [m]

مثال ۱ ـ ۲ ـ هادی به طول مؤثر ۲۰ [cm] در میدان مغناطیسی با چگالی فوران $۰/۸\left[\frac{wb}{m^2}\right]$ به طور عمود بر خطوط میدان مغناطیسی مطابق شکل

۱. Lorentz ۲. Lorentz Force

(۴۵ ـ ۲) قـــرار دارد. اگر از این هادی جریان $I = 10\ [A]$ عبـــور کند، نیروی مغناطیســـی وارد بر این هادی چند نیوتن است؟

حل:

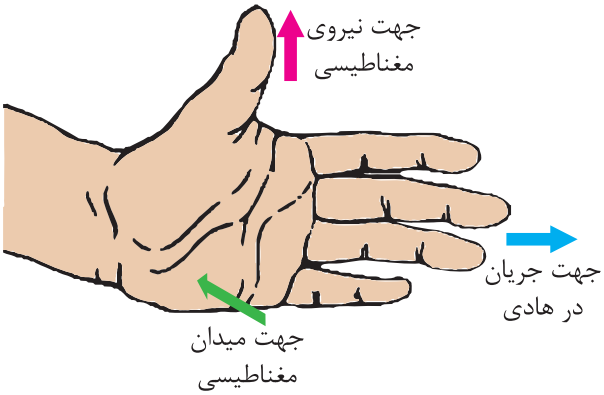
از رابطه (۶ ـ ۲) به‌دست می‌آید:

$$F = BIL$$

$$F = 0/8 \times 10 \times 20 \times 10^{-2} = 1/6[N]$$

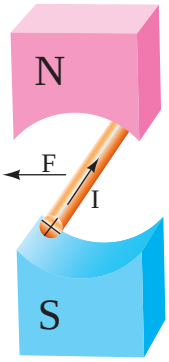
۷ ـ ۲ ـ قانون دست چپ

برای تعیین جهت نیروی مغناطیسی، «قانون دست چپ[1]» ارائه شـــده است. طبق این قانون اگر دست چپ خود را مطابق شـــکل (۵۲ ـ ۲) به گونه‌ای نگه دارید که فوران مغناطیســـی از قطب N به کف دست وارد شود و انگشـــتان، جهت جریان الکتریکی هادی را نشان دهند، انگشت شست جهت نیروی مغناطیسی وارد به هادی را نشان می‌دهد.

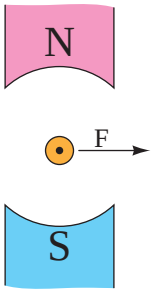


شکل ۵۲ ـ ۲

جهت نیروی مغناطیسی هادی حامل جریان، درون میدان مغناطیسی، توسط قانون دست چپ در شکل‌های (۵۳ ـ ۲) و (۵۴ ـ ۲) تعیین شده است.



شکل ۵۳ ـ ۲



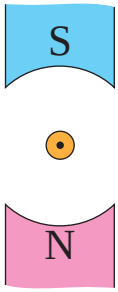
شکل ۵۴ ـ ۲

فعالیت ۴ ـ ۲

۱ ـ جـــهت نـــیروی مغناطیسی شـــکل‌هـــای (۵۵ ـ ۲)، (۵۶ ـ ۲) را با اســـتفاده از قانون دست چپ تعیین کنید.

شکل ۵۵ ـ ۲

۱. Left Hand Rule



شکل ۵۶ ـ ۲

۲ ـ با مقایسه جهت نیروی مغناطیسی شکل‌های زیر، چه نتیجه‌ای به‌دست می‌آید:

الف ـ شکل (۵۳ ـ ۲) با شکل (۵۴ ـ ۲):

.....

.....

.....

ب ـ شکل (۵۳ ـ ۲) با شکل (۵۵ ـ ۲):

.....

.....

.....

پ ـ شکل (۵۳ ـ ۲) با شکل (۵۶ ـ ۲):

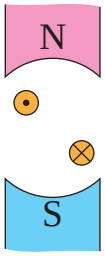
.....

.....

.....

۳ ـ جهت نیروی مغناطیسی وارد به هادی‌های حامل جریان شکل‌های (۵۷ ـ ۲) و (۵۸ ـ ۲) را با کمک قانون دست چپ تعیین کنید.

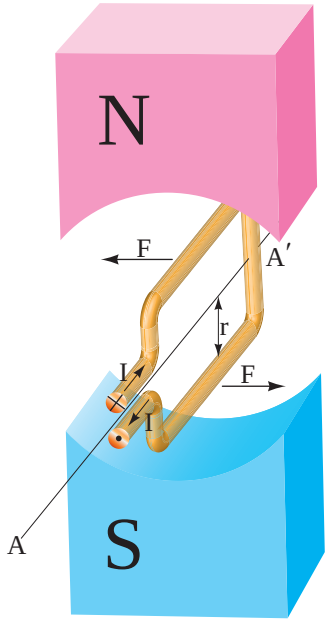
شکل ۵۷ ـ ۲



شکل ۵۸ ـ ۲

۸ ـ ۲ ـ گشتاور نیروی مغناطیسی وارد بر حلقه حامل جریان

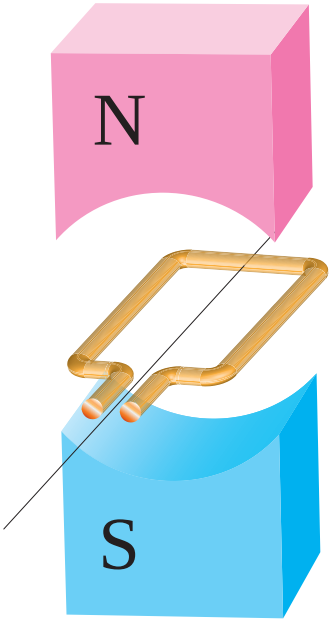
حلقه حامل جریان الکتریکی، معلق در میان میدان مغناطیسی دو قطب آهن‌ربایی قوی که می‌تواند آزادانه حول محور AA' بگردد، فرض شده است. شکل (۵۹ ـ ۲). به بازوهای حامل جریان این حلقه، نیروی مغناطیسی در دو جهت مخالف، با مقدار مساوی وارد می‌شود. این نیروها در حلقه حامل جریان الکتریکی، «گشتاور[1]» ایجاد می‌کنند[2] و آن را حول محور می‌گردانند، لذا حلقه جابه‌جا می‌شود (شکل ۶۰ ـ ۲).



شکل ۵۹ ـ ۲

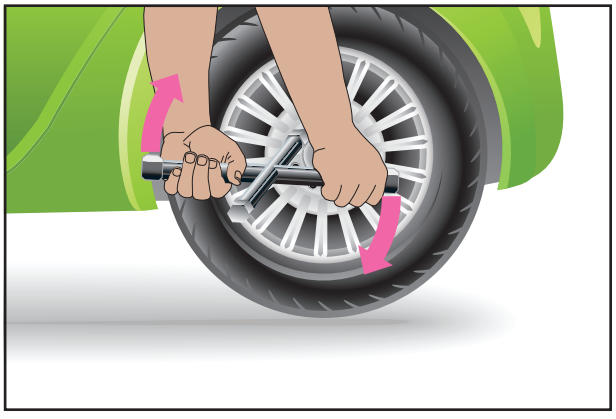
۱. Torque

۲. گشتاور از حاصل‌ضرب نیروی مغناطیسی هر بازو در شعاع حلقه r به‌دست می‌آید و از رابطه $T=F\times r$ محاسبه می‌شود. واحد گشتاور نیوتن متر است.



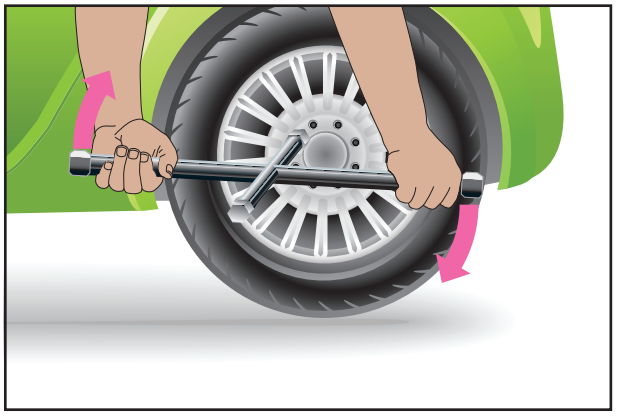
شکل ۶۰ ـ ۲

گشتاور عامل گردش است. به‌طور مثال هنگامی‌که مکانیک بـــرای بازکردن پیچ‌های چرخ اتومبیل از «آچار چرخ» اســـتفاده می‌کند، وی با دستان خود، دو نیرو در جهت مخالف به آچار چـــرخ اعمال می‌کند. این نیروها حول محور آچار چرخ گشـــتاور ایجـــاد می‌کنند تا آن بگردد (شکل ۶۱ ـ ۲).



شکل ۶۱ ـ ۲

در صورتی‌کـــه مکانیـــک نتواند این آچـــار چرخ را بگردانـــد، آچاری که طول بازوهای آن بلندتر اســـت را به‌کار می‌برد تا گشتاور آچار افزایش یابد و بگردد (شکل ۶۲ ـ ۲).



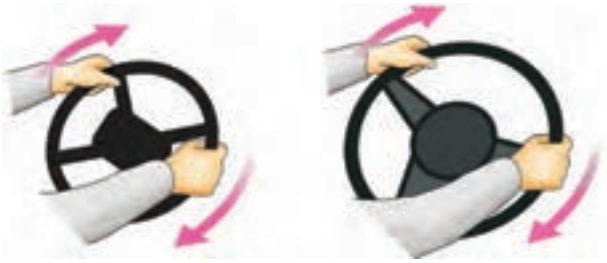
شکل ۶۲ ـ ۲

فعالیت ۵ ـ ۲

۱ ـ چگونگی گشـــتاور در شکل (۶۳ ـ ۲) را بررسی کنید.

شکل ۶۳ ـ ۲

۲ ـ دو فرمان اتومبیل در شکل (۶۴ ـ ۲) نشان داده شده اســـت. گرداندن کدام‌یک راحت است؟ برای پاسخ خود دلیل بیاورید.



شکل ۶۴ ـ ۲

پرسش ۴ ـ ۲

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ مقدار نیروی مغناطیسی از رابطه ..... به‌دست می‌آید.

۲ ـ برای تعیین ..... قانون دست چپ ارائه شده است.

پرسش صحیح، غلط

۱ ـ به هر هادی حامل جریان در میدان مغناطیسی،نیروی مغناطیسی وارد می‌شود.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش تشریحی

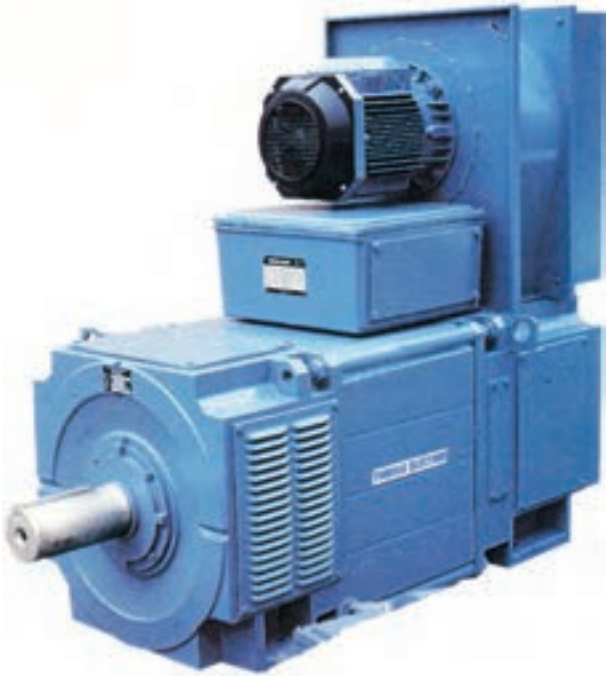
۱ ـ قانون دست چپ را توضیح دهید. کاربرد آن را بنویسید.

تمرین ۴ ـ ۲

۱ ـ نیروی وارد به یک هادی حامل جریان الکتریکی ۲ آمپر در میدان مغناطیسی ۰/۵ تسلا برابر ۰/۱ نیوتن است. طول مؤثر هادی چند متر است؟

۹ ـ ۲ ـ موتورهای جریان مستقیم

موتورهای جریان مستقیم[۱]، انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند. این موتورها بر اساس تأثیر میدان مغناطیسی قطب‌ها بر میدان مغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی کار می‌کنند (شکل ۶۵ ـ ۲).



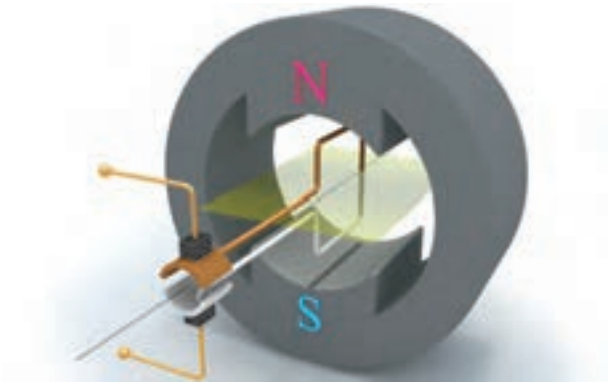
شکل ۶۵ ـ ۲ موتور جریان مستقیم

به منظور آشنایی با موتورهای جریان مستقیم ابتدا به توضیح موتور ساده جریان مستقیم پرداخته می‌شود. این موتور ساختمانی مشابه ساختمان ژنراتور ساده جریان مستقیم دارد. گشتاور آن بسیار کم و کاربرد عملی ندارد. اما برای آشنایی با طرز کار موتورهای واقعی جریان مستقیم، مطالعه آن بسیار مفید است.

۱ ـ ۹ ـ ۲ ـ طرز کار موتور ساده جریان مستقیم

موتور ساده جریان مستقیم در شکل (۶۶ ـ ۲) نشان داده شده است.

۱. Direct Current Motors

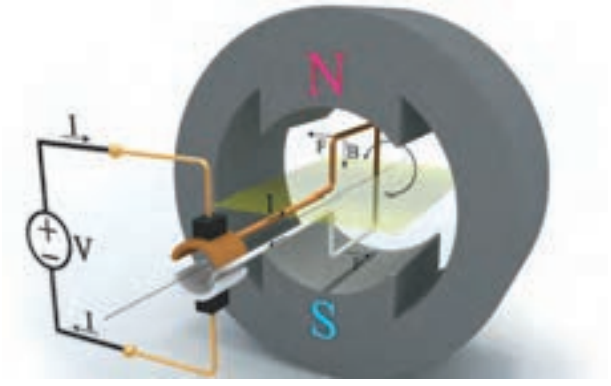


شکل ۶۶ ـ ۲

ســـاختمان آن مشابه ساختمان ژنراتور ساده جریان مستقیم می‌باشد و از چهار قسمت حلقه هادی، جاروبک، کموتاتور و قطب‌های مغناطیسی تشکیل شده است.

با اتصال منبع ولتاژ با جریان مستقیم به موتور ساده جریان مســـتقیم، جریان از قطب مثبت منبع، از طریق جاروبک به تیغه قهوه‌ای کموتاتور می‌رسد و وارد بازوی قهوه‌ای حلقه می‌شود و با عبور از بازوی سفید از طریق تیغه ســـفید کموتاتور و جاروبک بـــه قطب منفی منبع می‌رسد.

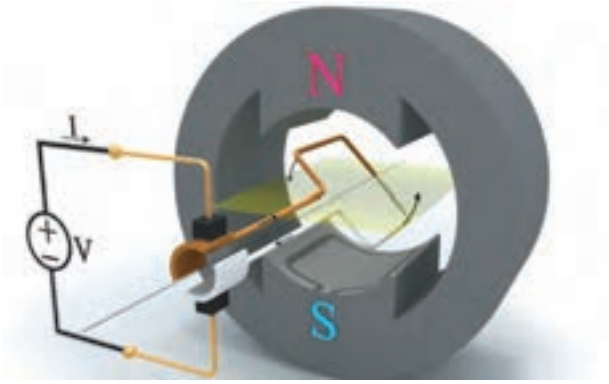
به بازوهای حامل جریان حلقه، نیروی مغناطیســـی وارد می‌شـــود که با قانون دست چپ جهت آنها تعیین می‌شود (شکل ۶۷ ـ۲).



شکل ۶۷ ـ ۲

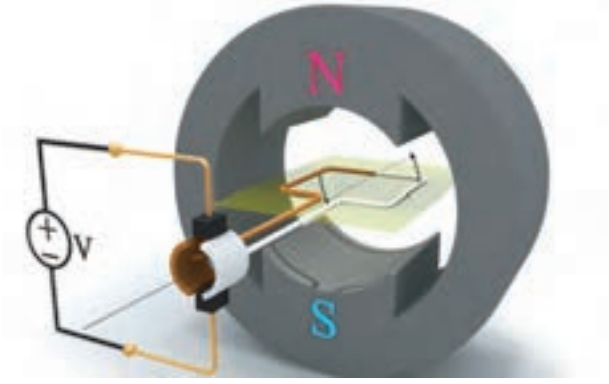
این دو نیروی مغناطیسی در دو جهت مخالف یکدیگر بـــه هر دو بازوی حلقه وارد می‌شـــوند و گشـــتاور ایجاد می‌کنند و باعث گردش حلقه حول محورش خواهند شد.

مادامی‌که جریـــان از بازوهای حلقه عبور می‌کند به آن‌ها نیروی مغناطیسی وارد می‌شود و حلقه تحت تأثیر گشتاور این نیروها به گردش خود ادامه می‌دهد (شکل ۶۸ ـ ۲).



شکل ۶۸ ـ ۲

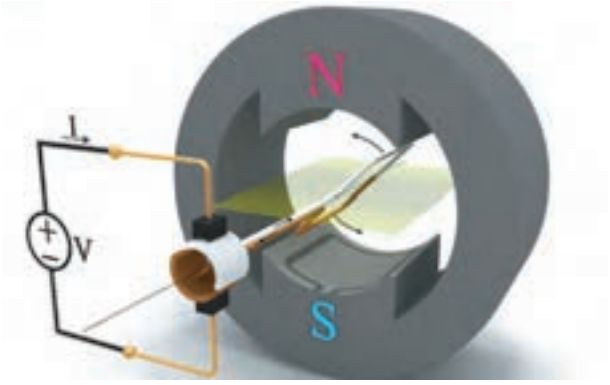
با گردش حلقه زمانی فرا می‌رسد که حلقه در صفحه خنثی قـــرار می‌گیرد. در این وضعیت اتصال جاروبک‌ها به کموتاتور قطع می‌شـــود و جریانی از حلقه نمی‌گذرد و با قطع جریان حلقه، نیروی مغناطیســـی بازوهای آن صفر می‌شـــود. بنابراین در حلقه گشتاور ایجاد نمی‌شود (شکل ۶۹ ـ ۲).



شکل ۶۹ ـ ۲

اما ســـرعت اولیه حلقـــه باعث می‌شـــود که حلقه همچنان به حرکت خـــود ادامه دهد و صفحه خنثی را تـــرک کند. در این حالت مجدداً اتصـــال جاروبک‌ها به

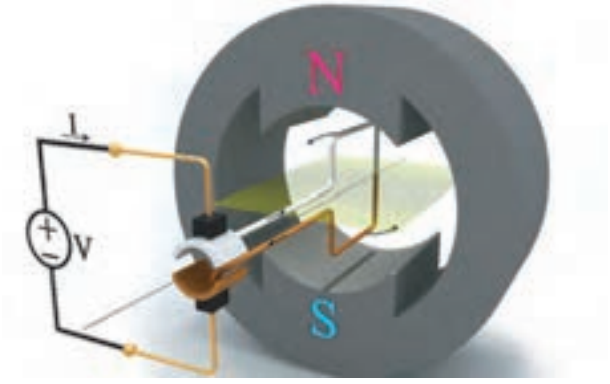
تیغه‌های کموتاتور برقرار می‌شود (شکل ۷۰ ـ ۲).



شکل ۷۰ ـ ۲

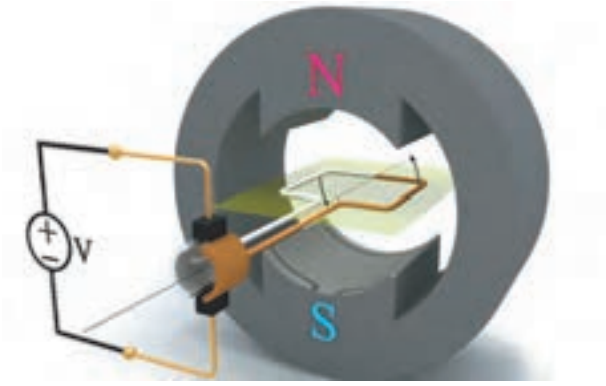
مشاهده می‌شود تیغه‌های کموتاتور نسبت به جاروبک‌ها تعویض شده‌اند و جهت جریان در حلقه تغییر کرده است. با توجه به جهت نیروهای مغناطیسی وارد به هر بازو که به کمک قانون دست چپ تعیین می‌شود، گشتاور در همان جهت قبلی در حلقه ایجاد می‌شود و همچنان حلقه می‌گردد.

گردش حلقه ادامه می‌یابد تا که سطح حلقه عمود بر صفحه خنثی می‌شود. در این حالت بیشترین گشتاور در حلقه ایجاد می‌شود (شکل ۷۱ ـ ۲).



شکل ۷۱ ـ ۲

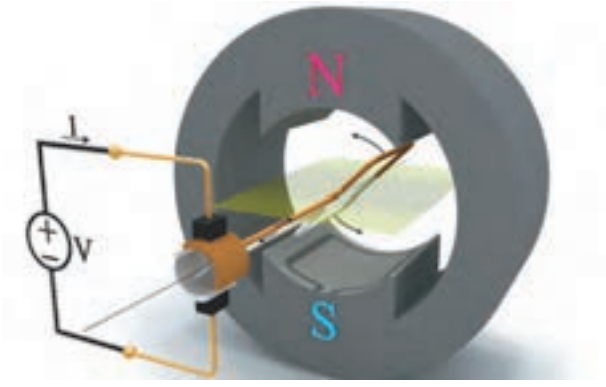
گردش حلقه ناشی از گشتاور نیروهای مغناطیسی بازوهای آن ادامه می‌یابد تا این‌که حلقه مجدداً در صفحه خنثی قرار می‌گیرد (شکل ۷۲ ـ ۲).



شکل ۷۲ ـ ۲

اتصال جاروبک‌ها به کموتاتور قطع می‌شود و جریانی از حلقه نمی‌گذرد و در حلقه گشتاور ایجاد نمی‌شود و گشتاور آن صفر می‌شود.

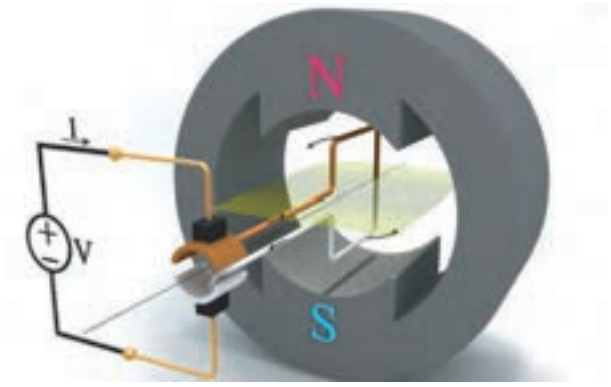
اما همچنان که توضیح داده شد، سرعت اولیه حلقه، آن را از صفحه خنثی خارج می‌کند تا اتصال جاروبک‌ها به تیغه‌های کموتاتور برقرار شود (شکل ۷۳ ـ ۲).



شکل ۷۳ ـ ۲

مشاهده می‌شود دوباره تیغه‌های کموتاتور نسبت به جاروبک‌ها تعویض می‌شوند و جهت جریان حلقه را عوض می‌کنند تا گشتاور در همان جهت قبلی در حلقه ایجاد شود و همچنان حلقه می‌گردد.

گردش حلقه ادامه می‌یابد تا سطح حلقه مجدداً عمود بر صفحه خنثی قرار می‌گیرد (شکل ۷۴ ـ ۲).



شکل ۷۴ ـ ۲

در ایـــن حالت بیشـــترین گشـــتاور در حلقه ایجاد می‌شـــود. در این جا حلقه بـــا 360° درجه گردش به موقعیت اول خود در شکل (۶۷ـ۲) رسیده است. بدیهی است که گردش حلقه ادامه می‌یابد.

در موتور ســـاده جریان مستقیم با قرار گرفتن حلقه در صفحه خنثی گشتاور وارد به آن صفر می‌شود. هرگاه حلقه عمود بر صفحه خنثی قرار می‌گیرد گشـــتاور وارد به آن حداکثر می‌شـــود. بنابراین در حین گردش حلقه، مقدار لحظه‌ای گشتاور تغییر می‌کند و یکنواخت نیست[1]. همچنین مقدار گشتاور بسیار کم و غیر کاربردی است و یکنواخت نبودن آن باعث شـــده است تا موتور ساده جریان مستقیم غیرقابل استفاده شود.

همچنین اگر حلقه در صفحه خنثی قرار داشته باشد و به منبـــع ولتاژ متصل شـــود، جاروبک‌ها به کموتاتور اتصال ندارند و جریان از حلقه عبور نمی‌کند و گشـــتاور در آن ایجـــاد نمی‌شـــود. لذا حلقه گـــردش نمی‌کند و اصطلاحاً «راه‌اندازی» نمی‌شود.

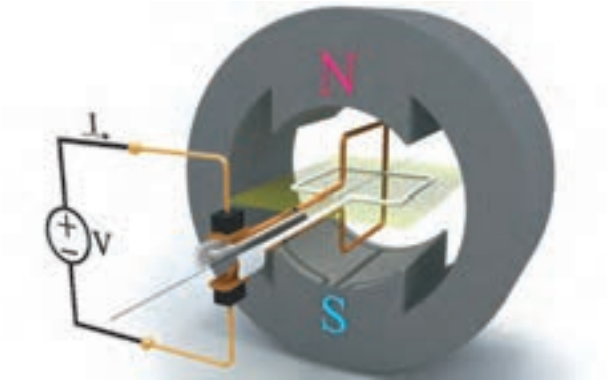
گشـــتاورِ بســـیار کم و یکنواخت نبودن گشـــتاور و همچنیـــن عدم راه‌اندازی هنگامی‌کـــه حلقه در صفحه خنثی اســـت، از معایب موتور ســـاده جریان مســـتقیم محسوب می‌شود و باعث شده است تا این موتور غیرقابل استفاده باشد.

۲ ـ ۹ ـ ۲ ـ اثر افزایش تعداد حلقه‌ها و تعداد دور آن در موتور ساده جریان مستقیم

الف ـ اثر افزایش تعداد حلقه

برای یکنواخت شـــدن گشـــتاور و راه‌اندازی در هر وضعیتی، تعداد حلقه‌ها را در موتور ساده جریان مستقیم افزایش می‌دهند.

موتور جریان مســـتقیم بـــا دو حلقه عمود بر هم که روی یک محور قرار گرفته‌اند در شـــکل (۷۵ ـ ۲) نشان داده شده است.



شکل ۷۵ ـ ۲

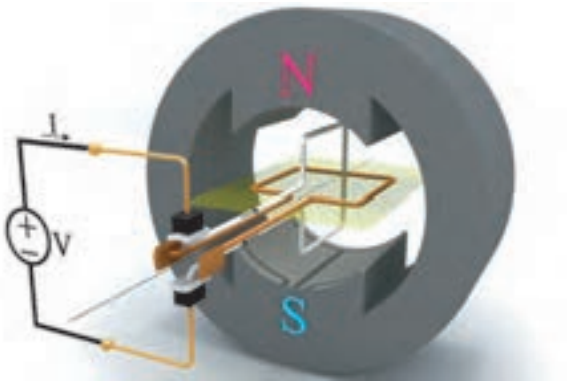
در این شـــکل جاروبک‌ها به کموتاتور حلقه قهوه‌ای

---

۱. مقدار لحظه‌ای گشتاور در موتور ساده جریان مستقیم از رابطه $T = 2NBLIr\sin\alpha$ به‌دست می‌آید.
در این رابطه:
N تعداد دور حلقه
B چگالی فوران مغناطیسی قطب‌ها بر حسب [T]
L طول مؤثر هر بازوی حلقه در میدان مغناطیسی بر حسب [m]
I شدت جریان حلقه بر حسب [A]
r شعاع حلقه بر حسب [m]
α زاویه بین سطح حلقه با صفحه خنثی بر حسب درجه
T گشتاور بر حسب [N.m]

اتصـــال دارند، لذا با اتصال منبـــع ولتاژ، جریان از حلقه قهوه‌ای می‌گذرد و در آن گشتاور ایجاد می‌شود. در این شرایط کموتاتور حلقه سفید به جاروبک‌ها اتصال ندارد و از حلقه ســـفید جریانی نمی‌گذرد و در آن گشـــتاور ایجاد نمی‌شـــود. حلقه‌ها در اثر گشـــتاور حلقه قهوه‌ای شروع به گردش می‌کنند.

با گردش حلقه‌ها، کموتاتور نیز می‌گردد و جاروبک‌ها از کموتاتور حلقه قهوه‌ای جدا می‌شـــوند و به جاروبک حلقه سفید اتصال می‌یابند (شکل ۷۶ ـ ۲).

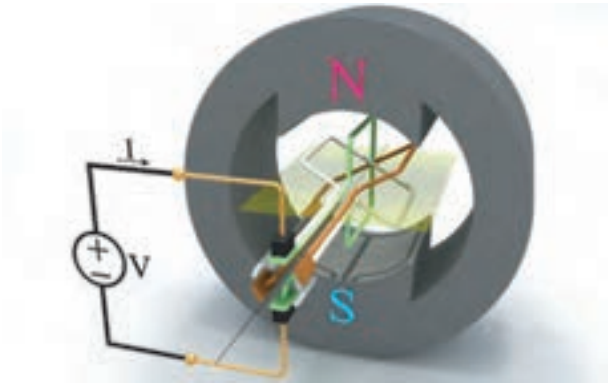


شکل ۷۶ ـ ۲

در این شـــرایط جریان از حلقه سفید می‌گذرد و در آن گشـــتاور ایجاد می‌شـــود. حلقه قهوه‌ای فاقد جریان می‌شود و در آن گشتاور ایجاد نمی‌شود. این بار حلقه‌ها به سبب گشـــتاور ایجاد شـــده در حلقه سفید گردش می‌کنند.

به‌طوری که مشاهده شد با قرار دادن دو حلقه عمود بـــر هم، که بر روی یک محور قرار دارند لحظه‌ای وجود نخواهد داشـــت که هر دو حلقه فاقد جریان شـــوند. لذا گشتاور هیچ‌گاه صفر نمی‌شود. بنابراین تغییرات گشتاور کاهـــش می‌یابد و موتـــور در هر وضعیتـــی راه‌اندازی می‌شود.

یک موتور جریان مستقیم با سه حلقه در شـــکل (۷۷ ـ ۲) نشان داده شده است.



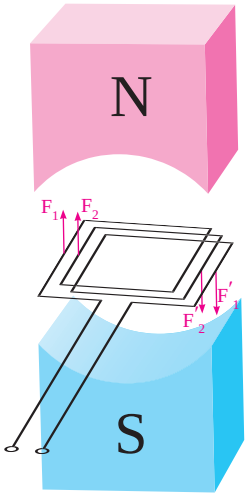
شکل ۷۷ ـ ۲

جاروبک‌ها همواره به کموتاتوری اتصال می‌یابند که حلقه مربـــوط به آن در وضعیت گشـــتاور حداکثر قرار دارد.

ب ـ افزایش تعداد دور حلقه

گشتاور ایجاد شـــده در موتور ساده جریان مستقیم تک حلقه‌ای شـــکل (۶۶ ـ ۲) بسیار کم بوده و کاربردی نمی‌باشـــد؛ این عیب بزرگی برای موتور ساده محسوب می‌شود.

به منظور افزایش گشتاور از حلقه با تعداد دور بیشتر (کلاف) استفاده می‌شود (شکل ۷۸ ـ ۲).



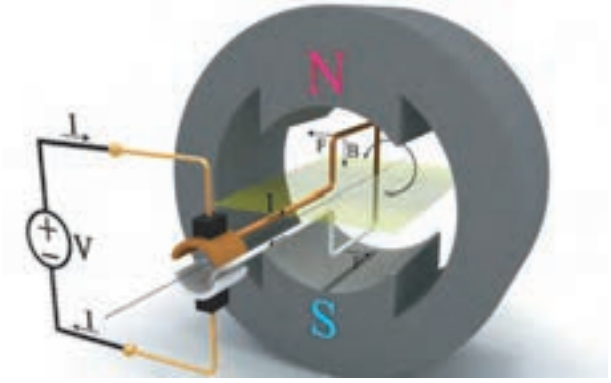
شکل ۷۸ ـ ۲

در این صورت در هر دور حلقه گشتاور ایجاد می‌شود و گشتاور افزایش می‌یابد[1].

۱. با توجه به رابطه گشتاور $T=F\times r$ به هر یک از بازوی حلقه‌ها نیرویی وارد می‌شود. این نیروها با یکدیگر جمع می‌شوند و به‌صورت یک نیروی واحد گشتاور بزرگ‌تری ایجاد می‌کنند.

۳ ـ ۹ ـ ۲ ـ تغییر جهت گردش

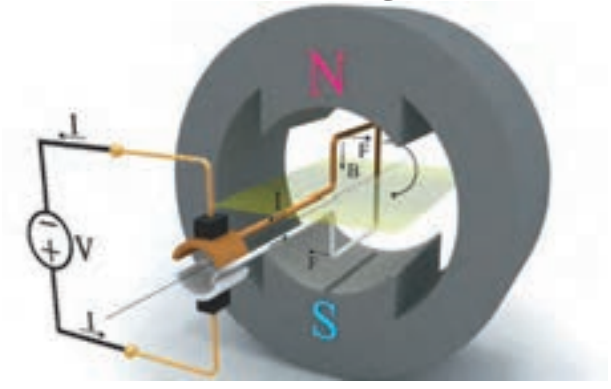
موتور ساده جریان مستقیم متصل به منبع ولتاژ در شکل (۷۹ ـ ۲) نشان داده شده است.



شکل ۷۹ ـ ۲

جریان الکتریکی پس از خروج از پلارتیه مثبت منبع از طریق جاروبک و تیغه کموتاتور به حلقه می‌رسد و با عبور از آن از طریق تیغه کموتاتور و جاروبک به پلاریته منفی منبع می‌رسد. جهت نیروی مغناطیسی هر بازو با به‌کار بردن قانون دست چپ مطابق شکل تعیین می‌شود. گشتاور ناشی از این نیروها، حلقه را حول محورش در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت می‌گرداند.

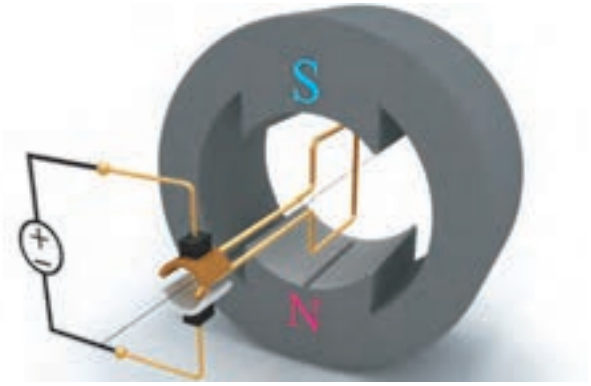
با تعویض پلاریته‌های منبع ولتاژ، جهت جریان در حلقه عوض می‌شود. لذا جهت نیروهای مغناطیسی وارد به هر بازوی حلقه نیز عوض می‌شود و گشتاور ناشی از این نیروها، حلقه را حول محورش در جهت حرکت عقربه‌های ساعت می‌گرداند. شکل (۸۰ ـ ۲).



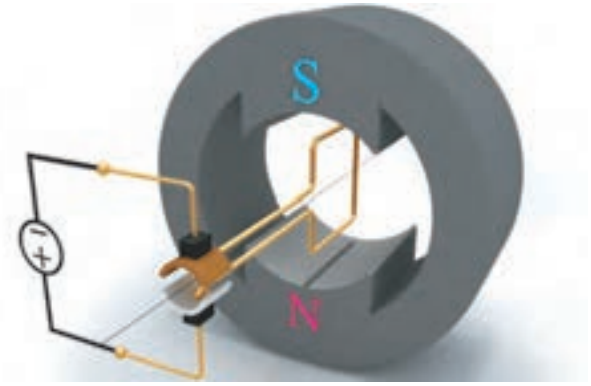
شکل ۸۰ ـ ۲

فعالیت ۶ ـ ۲

۱ ـ جهت گردش حلقه در شکل‌های (۸۱ ـ ۲) و (۸۲ ـ ۲) را تعیین کنید.



شکل ۸۱ ـ ۲



شکل ۸۲ ـ ۲

۲ ـ از مقایسه شکل (۷۹ ـ ۲) با شکل (۸۰ ـ ۲) چه نتیجه‌ای به‌دست می‌آید؟

.....

.....

.....

۳ ـ از مقایسه شکل (۷۹ ـ ۲) با شکل (۸۱ ـ ۲) چه نتیجه‌ای به‌دست می‌آید؟

.....

.....

.....

۴ ـ از مقایسه شکل (۷۹ ـ ۲) با شکل (۸۲ ـ ۲) چه نتیجه‌ای به‌دست می‌آید؟

.....

.....

.....

بنابرایـــن با دو روش جهت گـــردش حلقه در موتور ساده جریان مستقیم تغییر می‌یابد این روش‌ها عبارتند از:

۱ ـ تعویض پلاریته منبع ولتاژ به منظور تغییر جهت جریان حلقه

۲ ـ تعویـــض محل قطب‌ها به منظـــور تغییر جهت میدان مغناطیسی

در موتورهـــای جریان مســـتقیم عملاً تعویض محل قطب‌ها به دلایلی که بعداً شرح داده می‌شود امکان‌پذیر نیست! لذا تغییر جهت گردش تنها با تغییر جهت جریان حلقه فراهم می‌شود.

پرسش ۵ ـ ۲

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ موتورهای جریان مســـتقیم، انرژی ..... را به انرژی ..... تبدیل می‌کنند.

۲ ـ برای یکنواخت شدن گشتاور و راه‌اندازی در هر وضعیتی ..... را در موتور ســـاده جریان مستقیم ..... می‌دهند.

۳ ـ بـــه منظور افزایش ..... از حلقه با ..... بیشتر استفاده می‌شود.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ در موتور ساده جریان مستقیم با قرار گرفتن حلقه در صفحه خنثی گشتاور وارد به آن صفر می‌شود.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ در موتور ســـاده جریان مستقیم گشتاور بسیار زیاد و یکنواخت است.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ طرز کار موتور ســـاده جریان مســـتقیم را شرح دهید.

۲ ـ وظیفه کموتاتور در موتور ساده جریان مستقیم را بنویسید.

۳ ـ معایب موتور ساده جریان مستقیم را بنویسید.

۴ ـ اثـــر افزایش تعداد حلقه‌ها و تعداد دور حلقه در موتور ساده جریان مستقیم را شرح دهید.

۵ ـ برای تغییر جهت گردش در موتور ساده جریان مستقیم چه باید کرد؟

۱۰ ـ ۲ ـ ساختمان ماشین‌های جریان مستقیم

پس از آشـــنایی با طرز کار ماشین‌های ساده جریان مســـتقیم (ژنراتور و موتـــور) اینک به ســـاختمان آنها پرداخته می‌شود.

ماشین‌های جریان مستقیم در عمل دارای ساختمان پیچیده‌تری می‌باشـــند و به لحاظ شکل ظاهری کمی متفاوت هستند. این پیچیدگی و تفاوت در مقایسه آنها با ماشین‌های جریان متناوب محسوس می‌باشد، تصویر ظاهری یک ماشین جریان مستقیم در شکل (۸۳ ـ ۲) نشان داده شده است.

شکل ۸۳ ـ ۲ ماشین جریان مستقیم

ساختمان ماشین‌های جریان مستقیم از دو قسمت اصلی تشکیل شده است:

قسمت ساکن یا استاتور[۱]

قسمت متحرک یا رتور[۲]

قسمت‌های ساکن و متحرک دارای اجزائی می‌باشند که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

۱ ـ ۱۰ ـ ۲ ـ اجزای قسمت ساکن

قسمت ساکن یا استاتور یک ماشین جریان مستقیم در شکل (۸۴ ـ ۲) نشان داده شده است. اجزای آن عبارتند از:

- بدنه
- قطب‌های مغناطیسی
- سیم پیچی میدان
- جاروبک و جاروبک نگه‌دار

بدنه

بدنه[۳] نقش تکیه‌گاه و حفاظت از سایر اجزای ماشین را ایفا می‌کند. بر روی بدنه پایه‌ها قرار دارند تا بوسیله پیچ و مهره، ماشین در محل مورد نظر نصب شود.

شکل ۸۴ ـ ۲

بر روی بدنه تخته کلم قرار دارد. با هدایت سرهای سیم‌پیچی‌های ماشین به سوی تخته کلم، امکان اتصال به مدار خارجی فراهم می‌شود. در ماشین‌هایی که ارزانی نقش مهم‌تری در مقابل وزن دارد، بدنه را از جنس چدن می‌سازند؛ در غیر این صورت بدنه را از جنس فولاد انتخاب می‌نمایند.

قطب‌های مغناطیسی

تامین میدان مغناطیسی مورد نیاز ماشین جریان مستقیم وظیفه قطب‌های مغناطیسی است، قطب‌های مغناطیسی در بدنه ماشین جاسازی می‌شوند و در صورت نیاز با پیچ محکم خواهند شد. تعداد قطب‌های مغناطیسی همواره زوج است و جنس آن از ورقه‌های

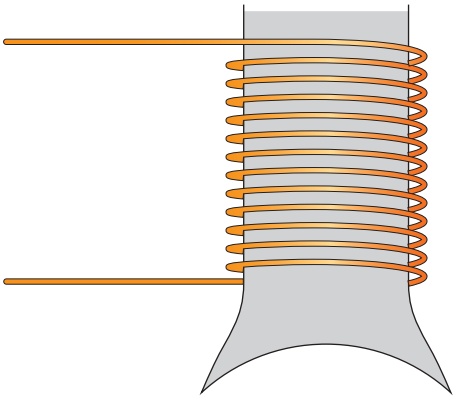
۱. Stator ۲. Rotor ۳. Yoke

فولاد الکتریکی می‌باشد.

در برخی از ماشین‌های جریان مستقیم در بین قطب‌های مغناطیسی، قطب‌هایی به‌نام «قطب کموتاسیون[1]» یا «میان قطب[2]» تعبیه می‌شود که به وظایف آن‌ها بعداً پرداخته می‌شود.

سیم‌پیچی میدان

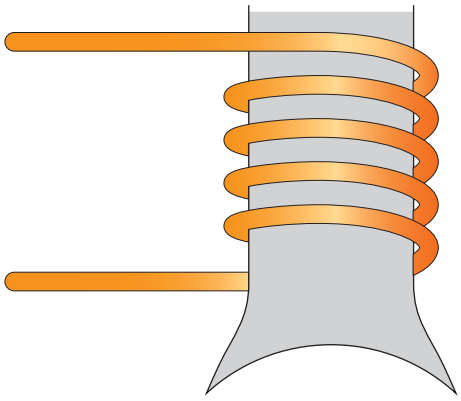
با اعمال جریان dc به سیم‌پیچی میدان[3]، میدان مغناطیسی اصلی ماشین جریان مستقیم فراهم می‌شود. برای ایجاد میدان مغناطیسی در قطب‌های ماشین نیاز به آمپر دور مشخصی است. برای جریان‌های کم بایستی تعداد دور سیم‌پیچی میدان زیاد باشد ولی چون مقدار جریان کم است، سطح مقطع سیم کم می‌باشد. شکل (۲ ـ ۸۵)



شکل ۸۵ ـ ۲ سیم‌پیچی میدان برای جریان کم

در جریان‌های زیاد تعداد دور کمی برای سیم‌پیچی میدان لازم است، ولی چون جریان زیاد است بایستی سطح مقطع سیم بزرگ باشد (شکل ۸۶ ـ ۲).

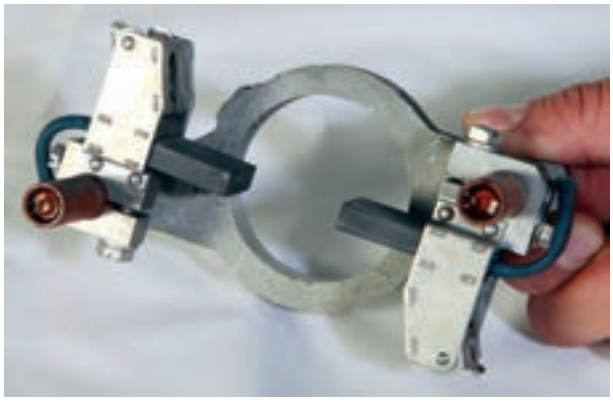
از آنجایی که «سیم‌پیچی میدان» در قسمت ساکن ماشین‌های جریان مستقیم قرار دارد آن را «سیم‌پیچی استاتور» نیز خطاب می‌کنند. و به‌طور کلی اصطلاح «سیم‌پیچی» به آن اطلاق می‌شود.



شکل ۸۶ ـ ۲ سیم‌پیچی میدان برای جریان زیاد

جاروبک و جاروبک نگه‌دار

در قسمت ساکن ماشین‌های جریان مستقیم وسیله‌ای به نام جاروبک نگه‌دار[4] نصب شده است. وظیفه جاروبک نگه‌دار، قرار دادن صحیح جاروبک‌ها روی تیغه‌های کموتاتور است. جاروبک‌ها در جاروبک‌نگه‌دار قرار می‌گیرند و توسط فنری با فشار قابل تنظیم بر روی کموتاتور فشار داده می‌شوند (شکل ۸۷ ـ ۲).



شکل ۸۷ ـ ۲ جاروبک نگه‌دار

۲ ـ ۱۰ ـ ۲ ـ اجزای قسمت متحرک

قسمت متحرک یا رتور یک ماشین جریان مستقیم در شکل (۸۸ ـ ۲) نشان داده شده است.

۱. Commutating Pole ۲. Inter Pole ۳. Field Winding ۴. Brush Holder

شکل ۸۸ ـ ۲ رتور ماشین جریان مستقیم

اجزای آن عبارت است از:

- هسته رتور
- سیم‌پیچی رتور
- کموتاتور
- محور
- پروانه خنک‌کننده

وظیفه هر یک از این اجزا به شرح زیر است.

هسته رتور

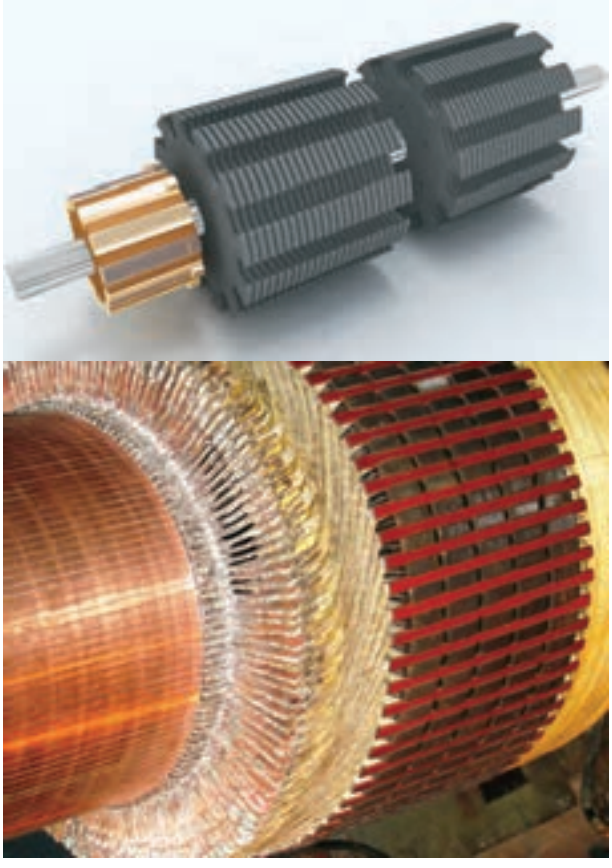
هســـته رتور از ورقه‌های فولادی سیلیس‌دار ساخته می‌شود که با یک لایه نازک از هم عایق شده‌اند بر روی هسته رتور شـــیارهایی[1] تعبیه شده است تا سیم‌پیچ‌ها در داخل آن‌ها قرار گیرند. این شـــیارها ممکن است به صورت باز یا نیمه باز باشند.

در هنگام کار ماشین‌های جریان مستقیم هسته رتور گرم می‌شود. برای خنک شدن هسته، معمولاً رتورها را به‌صورت «تهویه محوری» یا «تهویه شعاعی» می‌سازند.

در رتورهای با تهویه محوری، سوراخ‌هایی در امتداد هســـته ایجاد می‌کنند تا در اثر نفوذ جریان هوا به این سوراخ‌ها هسته خنک شود (شکل ۸۹ ـ ۲).

شکل ۸۹ ـ ۲ هسته رتور با تهویه محوری

در رتورهای با تهویه شـــعاعی هســـته از چند دسته ورق با طول ۴ تا ۱۰ ســـانتی‌متر که با یکدیگر ۸ تا ۱۰ میلی‌متر فاصله دارند تشکیل می‌گردد (شکل ۹۰ ـ ۲).



شکل ۹۰ ـ ۲ هسته با تهویه شعاعی

سیم‌پیچی رتور

ســـیم‌پیچی رتور از کلاف‌های مشابهی تشکیل شده

۱. Slots

است. این سیم‌پیچی مبتنی بر اصول فنی می‌باشد و از طراحی ماشین‌های جریان مستقیم تبعیت می‌کند. در بخش ۱۱ ـ ۲ در حد مورد نیاز، سیم‌پیچی رتور مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

از آنجایی‌که در ماشین‌های جریان مستقیم ولتاژ اصلی در «سیم‌پیچی رتور» القا می‌شود اصطلاح «سیم‌پیچی آرمیچر» نیز به آن اطلاق می‌شود. «رتور» ماشین‌های جریان مستقیم نیز به «آرمیچر» موسوم است.

کموتاتور

کموتاتور[1] از تیغه‌های مسی که توسط عایق میکا نسبت به یکدیگر و محور ماشین عایق شده‌اند تشکیل می‌شود. ابتدا و انتهای کلاف‌های سیم‌پیچی رتور توسط لحیم و یا پرس کردن به تیغه کموتاتور وصل می‌شود (شکل ۹۱ ـ ۲).

شکل ۹۱ ـ ۲ کموتاتور

محور

محور[2] رتور ماشین‌های جریان مستقیم تکیه‌گاهی برای سایر اجزای رتور می‌باشد. محور باید از فولادی تهیه شود که خاصیت مغناطیسی آن کم، اما استحکام مکانیکی کافی در مقابل تنش‌های برشی، خمشی، کششی و پیچشی را دارا باشد.

پروانه خنک کننده

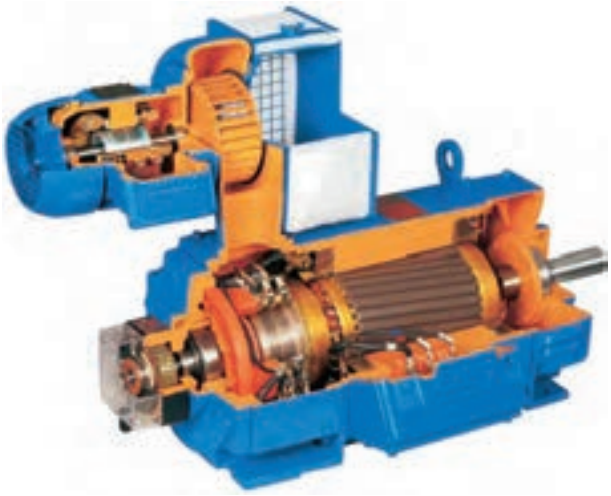
پروانه خنک‌کننده[3] یا «فن» با ایجاد جریان هوا در داخل ماشین، موجب انتقال سریع‌تر گرمای ایجاد شده به خارج از ماشین می‌شود. لذا دمای کار ماشین در یک حد مشخص محدود می‌شود و سبب ازدیاد عمر مفید ماشین خواهد شد.

پروانه خنک‌کننده ماشین‌های جریان مستقیم با قدرت کم روی محور رتور نصب می‌شود و با گردش رتور می‌گردد و جریان هوا را به‌وجود می‌آورد. (شکل ۸۸ ـ ۲) اما ماشین‌های با قدرت متوسط و زیاد فاقد پروانه خنک‌کننده روی محور رتور می‌باشند و تهویه ماشین توسط فن جداگانه‌ای که دارای فیلتر هوا به منظور جذب ذرات گرد و غبار می‌باشد و توسط یک موتور سه فاز به گردش در می‌آید صورت می‌پذیرد. تصویر یک ماشین جریان مستقیم مجهز به فن جداگانه در شکل (۹۲ ـ ۲) نشان داده شده است.

شکل ۹۲ ـ ۲ ماشین جریان مستقیم مجهز به فن جداگانه

۱. Commutator ۲. Shaft ۳. Fan

تصویر برش خورده یک ماشـــین جریان مستقیم با فن جداگانه در شـــکل (۹۳ ـ ۲) نشان داده شده است. در این شکل فیلتر و فن را مشاهده می‌کنید.



شکل ۹۳ ـ ۲

پرسش ۶ ـ ۲

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ تأمیـــن میدان مغناطیســـی مورد نیاز ماشـــین جریان مستقیم وظیفه ..... است.

۲ ـ ســـیم‌پیچی میدان، برای جریان‌های کم دارای تعداد دور ..... و سطح مقطع سیم ..... می‌باشد.

۳ ـ وظیفه جاروبک نگه‌دار، قرار دادن صحیح ..... روی تیغه‌های ..... است.

۴ ـ روش تهویه رتور ماشـــین‌های جریان مستقیم به‌صورت ..... و ..... است.

۵ ـ در ماشـــین‌های جریان مستقیم ولتاژ اصلی در ..... القا می‌شود.

۶ ـ کموتاتـــور از تیغه‌های ..... که توســـط عایق ..... نســـبت به یکدیگر و محور ماشین عایق شده‌اند تشکیل شده است.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ بدنه نقش تکیه‌گاه و محافظت از ســـایر اجزای ماشین را ایفا می‌کند.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ تعداد قطب‌های ماشـــین همواره فرد اســـت و جنس آن از ورقه فولادی است.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ اجزای قسمت ساکن ماشین‌های جریان مستقیم را نام ببرید.

۲ ـ ســـیم‌پیچی میدان برای جریان‌های زیاد چگونه طراحی می‌شود؟

۳ ـ اجـــزای قســـمت متحرک ماشـــین‌های جریان مستقیم را نام ببرید.

۴ ـ روش‌های تهویه رتور ماشین‌های جریان مستقیم را توضیح دهید.

۵ ـ چرا به رتور ماشین‌های جریان مستقیم، آرمیچر می‌گویند؟

۶ ـ ویژگی‌های محور رتور را بنویسید.

۷ ـ وظیفه پروانه خنک کننده را بنویسید.

۸ ـ تهویه ماشین‌های جریان مستقیم با قدرت کم و زیاد چگونه صورت می‌پذیرد؟

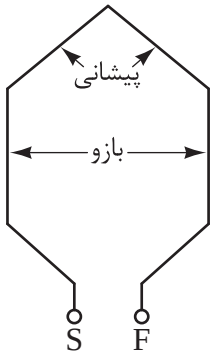
۱۱ ـ ۲ ـ سیم‌پیچی آرمیچر ماشین‌های جریان مستقیم

در ماشین‌های جریان مستقیم، نحوه سری و موازی کردن کلاف‌های سیم‌پیچی رتور تحت عنوان «سیم‌پیچی آرمیچر»[۱] مطرح می‌شود. به طور کلی اصطلاح «سیم‌پیچی آرمیچر» به سیم‌پیچی‌هایی اطلاق می‌شود که نیروی محرکه اصلی در آنها القا می‌شود.

در این بخش به شیوه‌های اتصال کلاف‌های سیم‌پیچی آرمیچر به یکدیگر از طریق تیغه‌های کموتاتور پرداخته می‌شود. با معرفی روش‌های «ترسیم سیم‌پیچی آرمیچر» به تأثیر این شیوه‌ها بر نیروی محرکه القایی، جریان و گشتاور ماشین‌های جریان مستقیم اشاره خواهد شد[۲].

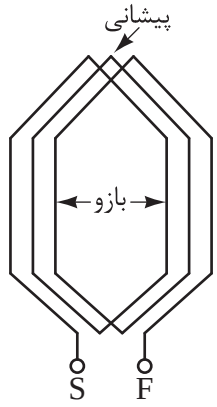
برخی از واژه‌های مربوط به سیم‌پیچی در ذیل آورده شده است:

«حلقه»[۳] شامل یک دور هادی است. قسمتی از حلقه که درون شیار قرار می‌گیرد «بازو» نام دارد و قسمتی که در بیرون شیار قرار می‌گیرد «پیشانی» نامیده می‌شود. هر حلقه دارای یک سر و ته می‌باشد. سر حلقه را با حرف «S»[۴] و ته آن را با حرف «F»[۵] نشان می‌دهند (شکل ۹۴ ـ ۲).



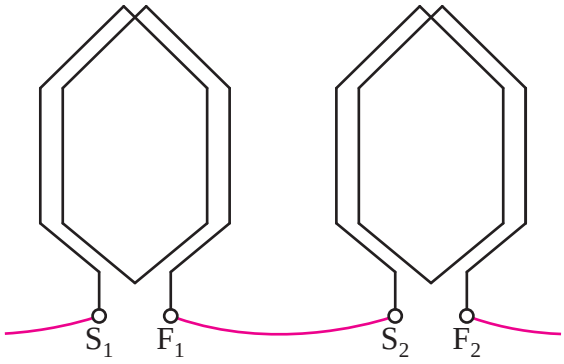
شکل ۹۴ ـ ۲

«کلاف»[۶] از اتصال سری چندین حلقه تشکیل شده است. برای کلاف نیز می‌توان همانند حلقه، بازو، پیشانی و سر و ته در نظر گرفت (شکل ۹۵ ـ ۲).

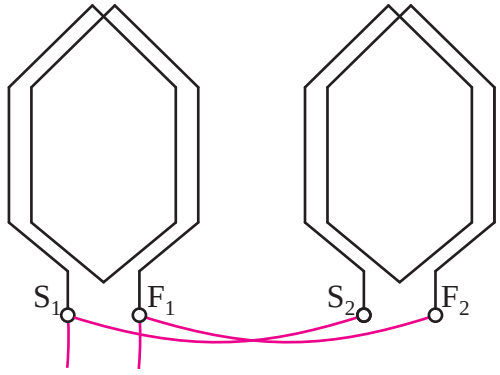


شکل ۹۵ ـ ۲

«سیم‌پیچی»[۷] از اتصال چندین کلاف تشکیل شده است. این اتصال می‌تواند به‌صورت سری یا موازی و یا ترکیب سری و موازی باشد (شکل ۹۶ ـ ۲).



الف ـ اتصال سری کلاف‌ها



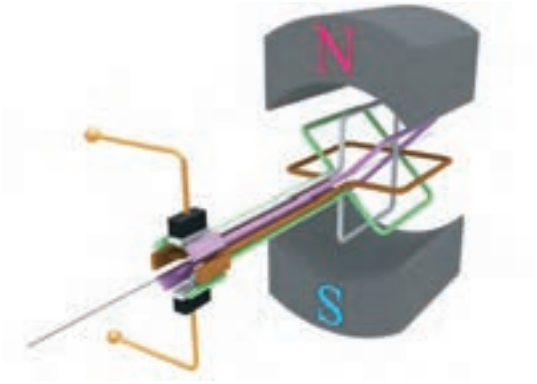
ب ـ اتصال موازی کلاف‌ها

شکل ۹۶ ـ ۲

۱. Armature Winding
۲. جزییات بیشتر سیم‌پیچی آرمیچر را در درس «تکنولوژی کارگاه سیم‌پیچی» خواهید آموخت.
۳. Turn
۴. Start
۵. Final
۶. Coil
۷. Winding

۱۲ ـ ۲ ـ روش‌های ترسیم سیم‌پیچی آرمیچر

در قسمت‌های قبل مشاهده شد برای قابل استفاده و کاربردی شـــدن ژنراتور و موتور ساده جریان مستقیم تعداد حلقه‌های آنها افزایش داده می‌شـــود (شکل‌های ۴۸ ـ ۲ و ۷۷ ـ ۲). ماشـــین جریان مســـتقیمی با چهار حلقه و هشت تیغه کموتـاتـــور در نظـــر است (شکل ۹۷ ـ ۲).

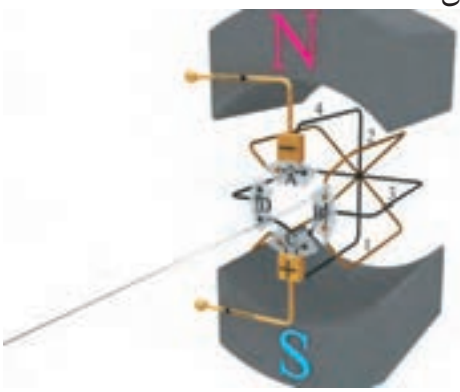


شکل ۹۷ ـ ۲

مشـــاهده می‌شود در هر لحظه فقط یک یا دو حلقه دارای جریان می‌شـــوند و حلقه‌هـــای دیگر فاقد جریان الکتریکی هســـتند و نقش مؤثـــری در تمام لحظات در ماشـــین ایفا نمی‌کنند. در واقع به دلیـــل عدم ارتباط الکتریکی بین این حلقه‌ها، افزایش بیشتر تعداد حلقه‌ها با این شـــیوه تأثیر چندانی در کارایی ماشین نگذاشته است.

برای برقراری ارتباط الکتریکی بین حلقه‌ها روش‌هایی به‌کار گرفته می‌شـــود که حلقه‌ها را به‌صورت ســـری و مـــوازی از طریق تیغه‌های کموتاتـــور به یکدیگر متصل می‌کنند تا جریان الکتریکی از آنها عبور کند. با این عمل در موتورها تغییرات گشـــتاور به حداقـــل مقدار ممکن می‌رسد و گشـــتاور یکنواخت خواهد شد و در ژنراتورها ضربان نیروی محرکه القایی نیز به حداقل مقدار ممکن می‌رسد و مقدار متوسط آن افزایش می‌یابد.

نمونه‌ای از سری و موازی شدن حـــلقه‌ها در شـکل (۹۸ ـ ۲) نشان داده شده است.



شکل ۹۸ ـ ۲ طرح یک ماشین ۴ کلافی

این شکل یک ماشـــین جریان مستقیم دو قطب با چهار کلاف و چهار تیغه کموتاتور را نشـــان می‌دهد. به منظور پرهیز از شـــلوغ شدن شـــکل کلاف‌ها به‌صورت حلقه نشان داده شده‌اند.

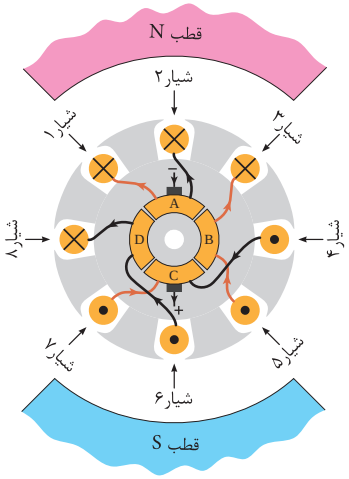
دو حلقـــه مشـــکی از طریـــق تیغـــه D و دو حلقه قهوه‌ای از طریق تیغه B با هم سری شده‌اند؛ هر یک از حلقه‌های مشکی و قهوه‌ای از طریق تیغه‌های A و C با هم موازی خواهند شد. بدین ترتیب جریان الکتریکی از طریق جاروبک به تیغه A وارد می‌شـــود و پس از عبور از حلقه‌های مشـــکی و قهوه‌ای به تیغه C می‌رسد و از طریق جاروبک خارج می‌شـــود. لذا جریان الکتریکی از تمام حلقه‌ها می‌گذرد و آنها در کار ماشین مؤثر خواهند شد.

ترسیم ســـیم‌پیچی آرمیچر مطابق شکل (۹۸ ـ ۲) بسیار دشوار است. لذا روش‌های ترسیمی دیگری به‌کار می‌رود. این روش‌ها عبارت است از:

- دیاگرام دایره‌ای (مقطعی)
- دیاگرام خطی (راه جریان)
- دیاگرام گسترده (باز)
- دیاگرام سریع (دندانه اره‌ای)

۱ ـ ۱۲ ـ ۲ ـ دیاگرام دایره‌ای

دیاگرام دایـــره‌ای، نمای روبروی رتـــور و کموتاتور است. در این دیاگرام «ســـربندی کلاف‌های سیم‌پیچی آرمیچـــر» یعنـــی اتصال ســـر و ته کلاف بـــه تیغه‌های کموتاتور مشـــخص می‌شـــود و جهت جریان هر یک از بازوهای کلاف در هر یک از شـــیارهای رتور نشان داده می‌شود. کلاف‌های رتور و کموتاتور شکل (۹۸ ـ ۲) در شکل (۹۹ ـ ۲) نشان داده شده است.



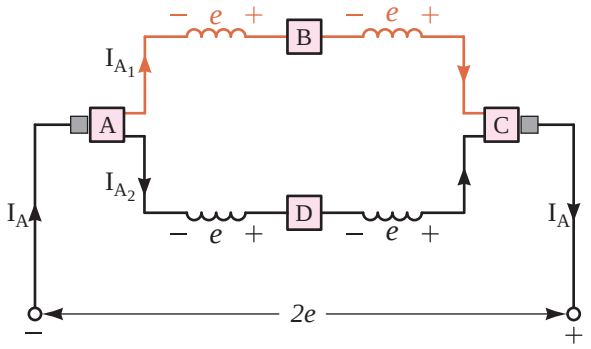
شکل ۹۹ ـ ۲

۲ ـ ۱۲ ـ ۲ ـ دیاگرام خطی

در دیاگرام خطی چگونگی ارتباط کلاف‌ها به یکدیگر و اتصال ســـر و ته آنها به تیغه‌های کموتاتور به صورت دیگری ترسیم می‌شود.

این دیاگرام نشـــان می‌دهد چگونه با موازی شـــدن کلاف‌ها، مســـیرهای موازی برای عبور جریان الکتریکی ایجاد می‌شـــود و کلاف‌هایی که در این مســـیرها قرار می‌گیرند با یکدیگر ســـری می‌شـــوند تا نیروی محرکه القایی آنها با هم جمع شـــود. هر یک از این مسیرهای موازی جریان «راه جریان» نام دارد.

دیاگرام خطی کلاف‌های ســـیم‌پیچی آرمیچر شکل (۹۸ ـ ۲) در شکل (۱۰۰ ـ ۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۰۰ ـ ۲ دیاگرام خطی ماشین چهار کلافی دو قطب

در این شکل لحظه‌ای که جاروبک‌ها با تیغه‌های A و C کموتاتور در تماس هستند مشاهده می‌شود. جریان آرمیچر I_A از طریق تیغه A کموتاتور بین دو راه جریان که توسط کلاف‌های قهوه‌ای و مشکی ایجاد شده است تقســـیم می‌شود و جریان‌های I_{A_1} و I_{A_2} را در هر مسیر جاری می‌کند. کلاف‌های هر یک از این راه‌های جریان توسط تیغه‌های B و D کموتاتور سری شده‌اند و نیروی محرکه القایی e آنها با هم جمع می‌شـــود و ولتاژ $2e$ را بین تیغه‌های A و C کموتاتور به‌وجود می‌آورند.

تعداد راه‌های جریان را با a نشـــان می‌دهند لذا در این دیاگرام $a = 2$ است.

فعالیت ۶ ـ ۲

بـــا گردش رتور و قرار گرفتـــن جاروبک‌ها در مقابل تیغه‌های B و D نحوه ســـری و موازی شـــدن کلاف و تقسیم جریان را بررسی کنید.

۳ ـ ۱۲ ـ ۲ ـ دیاگرام گسترده

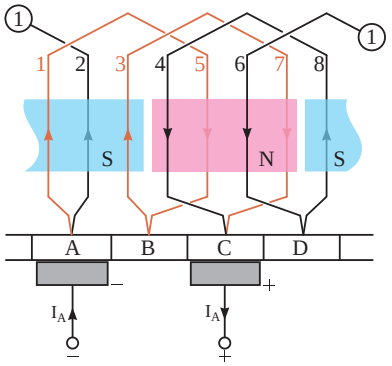
دیاگرام گســـترده، موقعیت هر کلاف در شـــیارهای رتور و نحوه اتصال سر و ته آنها را به تیغه‌های کموتاتور

نشـــان می‌دهد. در این دیاگرام با توجه به جهت جریان در کلاف‌ها محل قطب‌های مغناطیســـی ســـیم‌پیچی آرمیچر نیز مشخص می‌شود.

از دیاگرام گسترده اطلاعات مربوط به سیم پیچی و سربندی کلاف‌های سیم‌پیچی آرمیچر به‌دست می‌آید و برای سیم‌پیچی عملی آرمیچر مناسب‌تر است.

در ترسیم دیاگرام گســـترده، رتور و کموتاتور را که استوانه‌ای هستند برش طولی، در امتداد شیارها می‌دهند و آنها را به‌صورت صفحه‌ای ترســـیم می‌کنند. به تعداد شیارهای رتور خطوطی به‌طور عمودی رسم می‌شود. در صورتی‌که در هر شـــیار دو بازو از دو کلاف مختلف قرار گرفت، بازویی که در بالای شیار قرار می‌گیرد با خط پر و بازویی که در پایین شـــیار قرار می‌گیرد را با خط‌چین نشان می‌دهند.

با ایجاد یک برش فرضی در شکل (۹۸ ـ ۲) دیاگرام گسترده آن مطابق شکل (۱۰۱ ـ ۲) ترسیم می‌شود.



شکل ۱۰۱ ـ ۲ دیاگرام گسترده ماشین چهار کلافی دو قطب

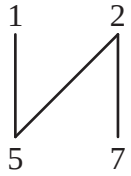
جریان آرمیچر I_A از طریق جاروبک متصل به تیغه A کموتاتور به سیم‌پیچی وارد می‌شود و از طریق جاروبک متصل به تیغه C کموتاتور از آن خارج می‌شود. مشاهده می‌شـــود بازوی کلاف‌های با جهت جریان یکســـان در کنـــار هم قـــرار گرفته‌اند و به‌طور مشـــترک قطب‌های مغناطیسی در رتور به‌وجود می‌آورند.

۴ ـ ۱۲ ـ ۲ ـ دیاگرام سریع

دیاگرام سریع موقعیت هر بازوی کلاف در شیارهای رتور را نشـــان می‌دهـــد. معمولاً دیاگرام ســـریع بعد از دیاگرام گســـترده ترسیم می‌شـــود. با توجه به دیاگرام گسترده شـــکل (۱۰۱ ـ ۲) مشاهده می‌شود کلافی که یکی از بازوهای آن در شـــیار ۱ رتـــور قرار دارد، بازوی دیگر آن در شـــیار ۵ قرار گرفته اســـت. این فرایند در دیاگرام ســـریع به‌صورت شـــکل (۱۰۲ ـ ۲) نشان داده می‌شود.

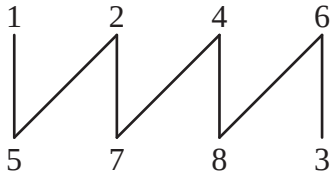
شکل ۱۰۲ ـ ۲

بازوی کلاف بعدی در شـــیارهای ۲ و ۷ قرار گرفته است لذا دیاگرام ســـریع به‌صورت شکل (۱۰۳ ـ ۲) در می‌آید.



شکل ۱۰۳ ـ ۲

با ادامه این روند دیاگرام ســـریع شـــکل (۱۰۱ ـ ۲) به‌صورت شکل (۱۰۴ ـ ۲) تکمیل می‌شود.



شکل ۱۰۴ ـ ۲

در صورتی‌که در شـــیارهای رتور دو بازو از دو کلاف قرار داشـــته باشـــد. بازویی را که در زیر قرار می‌گیرد با

اعداد پریم‌دار نشان می‌دهند.

۱۳ ـ ۲ ـ گام‌های سیم‌پیچی آرمیچر

سیم‌پیچی آرمیچر با گام‌های آن شناسایی می‌شود. این گام‌ها عبارتند از:

- گام قطبی[۱]
- گام رفت[۲] (گام جلو)
- گام برگشت[۳] (گام عقب)
- گام سیم‌پیچی[۴]
- گام کموتاتور[۵]

گام قطبی

با عبور جریان الکتریکی از سیم‌پیچی آرمیچر در اطراف رتور آن قطب‌های مغناطیسی تشکیل می‌شود.

فاصله بین مرکز تا مرکز دو قطب غیرهمنام مجاور یکدیگر بر حسب شیار رتور را «گام قطبی» گویند.

گام قطبی را با y_P نشان می‌دهند و از رابطه (۷ ـ ۲) به‌دست می‌آید.

$$y_P = \frac{S}{P} \qquad (۲-۷)$$

در این رابطه:

S تعداد شیارهای رتور

P تعداد قطب‌های رتور

y_P گام قطبی بر حسب شیار رتور

مثال ۳ ـ ۲ ـ رتور ماشین جریان مستقیمی ۴ شیار دارد. اگر رتور دو قطب سیم‌پیچی شده باشد گام قطبی آن چقدر است؟

حل:

گام قطبی از رابطه (۷ ـ ۲) به‌دست می‌آید و برابر است با:

$$y_P = \frac{S}{P} = \frac{۴}{۲} = ۲ \text{ شیار}$$

گام رفت

فاصله بین بازوهای یک کلاف سیم‌پیچی آرمیچر بر حسب شیار رتور را «گام رفت» گویند.

شکل (۱۰۵ ـ ۲) گام رفت را با $y_۱$ نشان می‌دهند و از رابطه (۸ ـ ۲) به‌دست می‌آید.

$$y_۱ = \frac{S}{P} \pm \varepsilon \qquad (۲-۸)$$

در این رابطه:

S تعداد شیارهای رتور

P تعداد قطب‌های رتور

ε کوچک‌ترین عددی که کسر $\frac{S}{P}$ را گویا می‌کند.

$y_۱$ گام رفت

در رابطه (۸ ـ ۲) اگر:

$\varepsilon = ۰$ باشد، گام رفت برابر با گام قطبی خواهد شد و سیم‌پیچی را با «گام کامل[۶]» گویند.

$\varepsilon < ۰$ منفی باشد، گام رفت کوچک‌تر از گام قطبی می‌شود و سیم‌پیچی را با «گام کوتاه[۷]» گویند.

$\varepsilon > ۰$ مثبت باشد، گام رفت بزرگ‌تر از گام قطبی می‌شود و سیم‌پیچی را با «گام بلند[۸]» گویند.

---

۱. Pole Pitch ۲. Forward Pitch ۳. Back Pitch ۴. Coil Pitch
۵. Commutator Pitch ۶. Full Pitch ۷. Short Pitch ۸. Long Pitch

شکل ۱۰۵ ـ ۲

مثال ۳ ـ ۲ ـ رتور یک ماشین جریان مستقیم دارای چهار قطب و یازده شیار می‌باشد، گام رفت را تعیین کنید.

حل:

گام رفت از رابطه (۸ ـ ۲) به‌دست می‌آید:

$$y_1 = \frac{S}{P} \pm \varepsilon = \frac{11}{4} \pm \varepsilon$$

کسر $\frac{11}{4}$ گویا نیست و با $\varepsilon = +\frac{1}{4}$ گویا می‌شود.

$$y_1 = \frac{11}{4} + \frac{1}{4} = 3$$

$\varepsilon > 0$ انتخاب شد؛ پس سیم‌پیچی با گام بلند است.

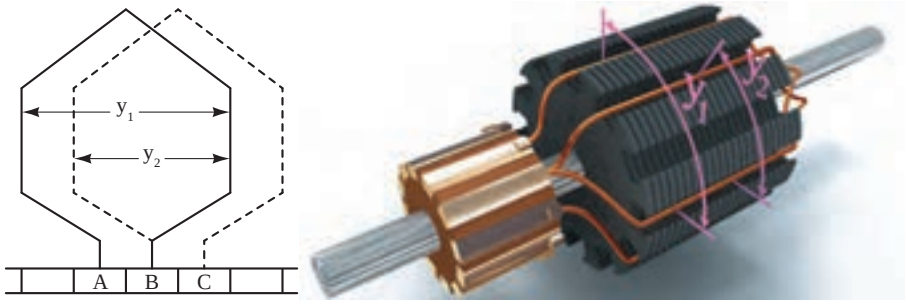
فعالیت ۸ ـ ۲

۱ ـ چرا در رابطه (۸ ـ ۲) ε مطرح شده است.

۲ ـ در مثال (۳ ـ ۲) چرا $\varepsilon = -\frac{3}{4}$ انتخاب نشده است.

گام برگشت

فاصله بین بازوی دوم از کلاف اول تا بازوی اول از کلاف دوم سیم‌پیچی آرمیچر بر حسب شیار رتور را «گام برگشت» می‌گویند و آن را با y_2 نشان می‌دهند (شکل ۱۰۶ ـ ۲).



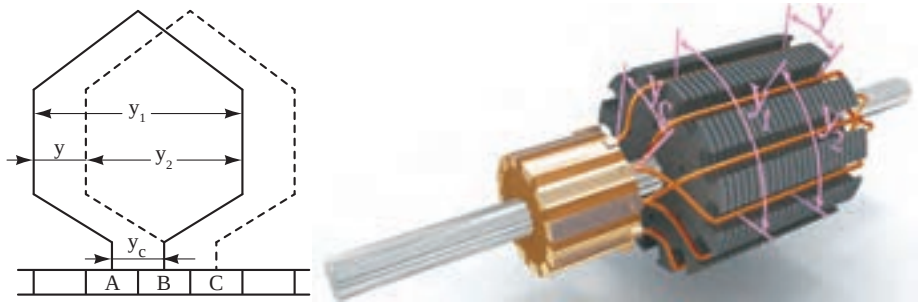
شکل ۱۰۶ ـ ۲

گام سیم‌پیچی

فاصله بین دو بازوی اول دو کلاف متوالی سیم‌پیچی آرمیچر بر حسب شیار رتور را «گام سیم‌پیچی» گویند و آن را با y نشان می‌دهند (شکل ۱۰۷ ـ ۲).

گام کموتاتور

فاصله بین سر و ته یک کلاف روی کموتاتور بر حسب تعداد عایق بین تیغه‌های کموتاتور را «گام کموتاتور» می‌گویند. و آن را با y_C نشان می‌دهند (شکل ۱۰۷ ـ ۲).



شکل ۱۰۷ ـ ۲

پرسش ۷ ـ ۲

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ دیاگرام ..... نمای روبروی رتور و کموتاتور است.

۲ ـ دیاگرام گسترده موقعیت هر کلاف در ..... و نحوه اتصال سر و ته آنها را به ..... نشان می‌دهد.

۳ ـ فاصله بین بازوهای یک کلاف بر حسب شیار رتور را ..... گویند.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ دیاگرام خطی نشان می‌دهد چگونه با موازی شدن کلاف‌ها، مسیرهای موازی برای عبور جریان الکتریکی ایجاد می‌شود.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ دیاگرام سریع موقعیت هر بازوی کلاف در شیارهای رتور را نشان می‌دهد.

صحیح ☐ غلط ☐

۳ ـ فاصله بین دو بازوی اول دو کلاف متوالی بر حسب شیار را گام سیم‌پیچی گویند.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ مفاهیم مربوط به سیم‌پیچی آرمیچر را تعریف کنید:

الف ـ حلقه ب ـ کلاف پ ـ سیم‌پیچی

۲ ـ روش‌های ترسیمی سیم‌پیچی آرمیچر را نام ببرید.

۳ ـ گام‌های سیم‌پیچی آرمیچر را نام ببرید.

۴ ـ گام قطبی را تعریف کنید و رابطه آن را بنویسید.

۵ ـ گام برگشت را تعریف کنید.

۶ ـ گام کموتاتور را تعریف کنید.

تمرین ۷ ـ ۲

۱ ـ گام قطبی رتور یک ماشین جریان مستقیم دو قطب برابر ۶ می‌باشد. تعداد شیارهای رتور را به‌دست آورید.

۲ ـ رتور یک ماشین جریان مستقیم دارای چهار قطب و سیزده شیار می‌باشد. گام رفت را به‌دست آورید.

۱۴ ـ ۲ ـ روش‌های سیم‌پیچی آرمیچر

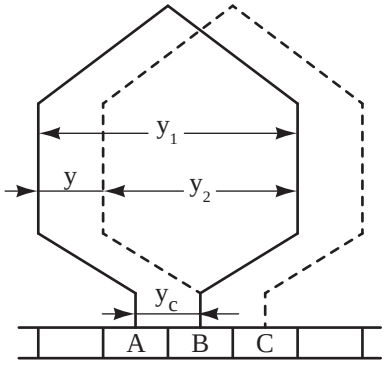
برای اتصال کلاف‌های سیم‌پیچی آرمیچر به تیغه‌های کموتاتور ماشین‌های جریان مستقیم روش‌های گوناگونی وجود دارد. اما دو روش آن به‌نام «حلقوی[۱]» و «موجی[۲]» مشهورتر است. انجام هر یک از این اتصال‌ها به ترتیب باعث ایجاد «سیم‌پیچی حلقوی[۳]» و «سیم‌پیچی موجی[۴]» در رتور می‌شود.

سیم پیچی‌های حلقوی و موجی از نظر شکل سیم‌پیچی و نحوه اتصال کلاف‌ها به تیغه‌های کموتاتور با یکدیگر متفاوت هستند. این تفاوت در تعداد راه‌های جریان و ترتیب اتصال سر و ته کلاف‌ها به تیغه‌های کموتاتور می‌باشد.

سیم‌پیچی‌های حلقوی و موجی به دو صورت «ساده» و «مرکب» اجرا می‌شوند.

۱ ـ ۱۴ ـ ۲ ـ سیم‌پیچی حلقوی ساده

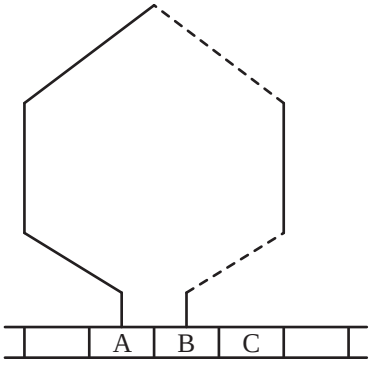
سربندی دو کلاف به تیغه‌های کموتاتور به‌صورت سیم‌پیچی حلقوی ساده به همراه گام‌های آن در دیاگرام گسترده شکل (۱۰۸ ـ ۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۰۸ ـ ۲ دیاگرام گسترده دو کلاف از سیم‌پیچی حلقوی ساده

در این شکل ته هر کلاف به یک تیغه کموتاتور اتصال می‌یابد و این تیغه محل اتصال سرکلاف بعدی خواهد شد و این روند ادامه می‌یابد تا این‌که تمام سر و ته کلاف‌ها به ترتیب به تیغه و تیغه مجاور آن متصل می‌شود. این نوع سیم پیچی اسم حقیقی خود را دارد؛ زیرا کلاف‌ها پس از اتصال به تیغه‌های کموتاتور تشکیل حلقه‌های پشت سر هم را می‌دهند.

سیم‌پیچی حلقوی به دو صورت «راست‌گرد» یا «پیش رونده[۵]» و «چپ‌گرد» یا «پس رونده[۶]» سربندی می‌شود. سربندی کلاف از نوع راست‌گرد در شکل (۱۰۹ ـ ۲) نشان داده شده است.

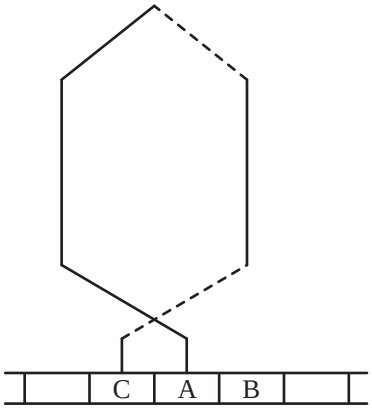


شکل ۱۰۹ ـ ۲ کلاف با سربندی حلقوی راست گرد

در سیم‌پیچی راست‌گرد ته کلاف به تیغه کموتاتوری که در سمت راست سر کلاف قرار دارد اتصال داده می‌شود.

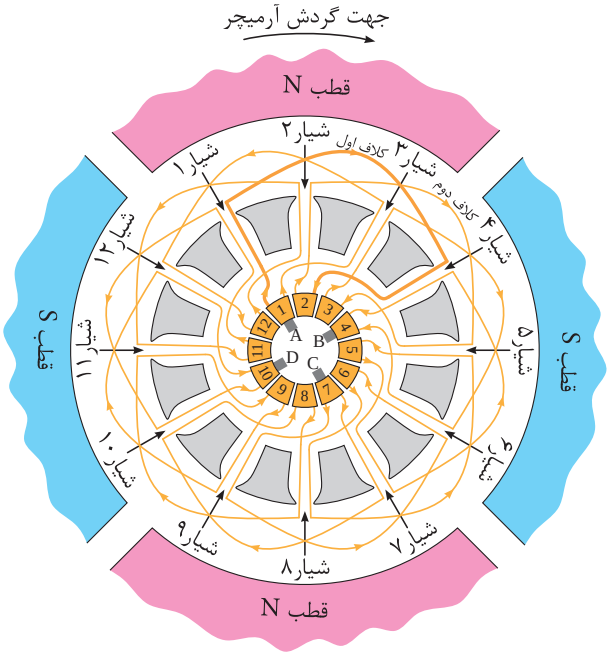
سربندی کلاف از نوع چپ‌گرد در شکل (۱۱۰ ـ ۲) نشان داده شده است. در سیم‌پیچی چپ‌گرد ته کلاف به تیغه کموتاتوری که در سمت چپ سرکلاف قرار دارد اتصال داده می‌شود.

۱. Lap
۲. Wave
۳. Lap Winding
۴. Wave Winding
۵. Progressive
۶. Retrogressive



شکل ۱۱۰ ـ ۲ کلاف با سربندی حلقوی چپ‌گرد

دیاگرام دایره‌ای سیم‌پیچی حلقوی ساده چهار قطب رتور ۱۲ شیار با ۱۲ تیغه کموتاتور در شکل (۱۱۱ ـ ۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۱۱ ـ ۲ دیاگرام دایره‌ای رتور ۱۲ شیار ۴ قطب با سیم‌پیچی حلقوی ساده

رتور ۱۲ شیار و ۴ قطب دارد و از رابطه (۷ ـ ۲) گام قطبی به‌دست می‌آید:

$$y_P = \frac{S}{P} = \frac{۱۲}{۴} = ۳$$

در این شکل یکی از کلاف‌ها پررنگ‌تر نشان داده شده است؛ آن را کلاف اول می‌نامیم. بازوی اول این کلاف در شیار ۱ رتور قرار دارد و بازوی دوم آن در شیار ۴ رتور قرار گرفته است. بین بازوی اول و دوم این کلاف ۳ شیار فاصله است و طبق تعریف، گام رفت $y_۱ = ۳$ می‌شود. چون گام رفت با گام قطبی برابر است سیم‌پیچی «گام کامل» می‌باشد.

سر کلاف اول به تیغه ۱ کموتاتور اتصال دارد. این کلاف در طی مسیری راست‌گرد پس از عبور از شیارهای ۱ و ۴، ته آن به تیغه ۲ کموتاتور متصل شده است. بین سر و ته این کلاف یک عایق از کموتاتور قرار دارد. بنابراین طبق تعریف، گام کموتاتور $y_C = +۱$ می‌شود و سیم‌پیچی راست‌گرد است.

کلاف بعدی کلاف دوم نامیده می‌شود که بازوی اول آن در شیار ۲ و بازوی دوم این کلاف در شیار ۵ رتور قرار می‌گیرد. سرکلاف دوم به تیغه ۲ کموتاتور که ته کلاف اول به آن متصل شده بود، اتصال می‌یابد و ته آن به تیغه ۳ کموتاتور متصل می‌شود. این روند در جاگذاری کلاف‌های بعدی در شیارهای رتور و اتصال سر و ته آنها به تیغه‌های کموتاتور ادامه می‌یابد تا آن که انتهای آخرین کلاف به ابتدای کلاف اول در تیغه ۱ وصل شود. بدین ترتیب سیم‌پیچی رتور به‌صورت حلقوی ساده تکمیل می‌شود.

بازوی دوم کلاف اول در شیار ۴ رتور و بازوی اول کلاف دوم در شیار ۲ رتور قرار دارد. بین این دو بازو ۲شیار فاصله است که طبق تعریف، گام برگشت $y_۲ = ۲$ می‌شود.

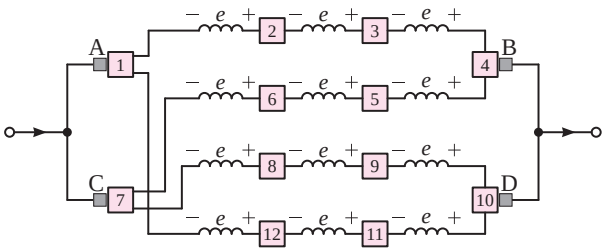
بازوی اول کلاف اول در شیار ۱ رتور و بازوی اول کلاف دوم در شیار ۲ رتور قرار دارد. بین این دو بازو

یک شـــیار فاصله اســـت و طبق تعریف، گام سیم‌پیچی $y = ۱$ می‌شود.

سیم‌پیچی حلقوی ساده است؛ تعداد جاروبک‌ها برابر تعداد قطب‌ها اســـت، لذا از ۴ جاروبک با پهنایی برابر با عرض تیغه کموتاتور استفاده می‌شود.

جاروبک‌ها بـــر روی تیغه‌هایی از کموتاتور قرار داده می‌شـــود که جریان کلاف‌ها به آنها وارد یا از آنها خارج می‌شـــود. مطابق شکل جریان از تیغه‌های شماره ۱ و ۷ کموتاتور خارج می‌شـــود و به تیغه‌های شماره ۴ و ۱۰ کموتاتور وارد می‌شود؛ لذا چهار جاروبک A، B، C و D به روی این تیغه‌ها قرار می‌گیرند. بدیهی اســـت پلاریته ولتـــاژ جاروبک‌های A و C و جاروبک‌های B و D یکی است. چرا؟

دیاگرام خطی ســـیم‌پیچی حلقوی ساده مربوط به دیاگرام دایره‌ای شـــکل (۱۱۱ ـ ۲) در شکل (۱۱۲ ـ ۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۱۲ ـ ۲ دیاگرام خطی رتور ۱۲ شیار ۴ قطب با سیم‌پیچی حلقوی ساده

در دیاگرام خطی شکل (۱۱۲ ـ ۲) مشاهده می‌شود میـــان دو تیغه مجاور کموتاتور یـــک کلاف قرار گرفته اســـت. این کلاف‌ها از طریـــق تیغه‌هـــای کموتاتور با یک‌دیگر سری شده‌اند.

جاروبک‌های هم پلاریته B و D و جاروبک‌های هم پلاریته A و C به یکدیگر ارتباط داده شـــده‌اند. بدین ترتیب چهار مســـیر شکل می‌گیرد و کلاف‌های آرمیچر در این مسیرها توزیع می‌شوند.

جریان پس از عبور از جاروبک‌های A و C در چهار مسیر تقسیم می‌شود. هر یک از این مسیرها راهی برای عبور جریان اســـت. لذا چهار «راه جریان» ایجاد شـــده است. یعنی $a = ۴$ می‌باشد.

مشاهده می‌شود در سیم پیچی حلقوی ساده تعداد راه‌های جریان با تعداد قطب‌ها برابر است. بنابراین:

$$a = P \qquad (۲-۹)$$

با توجه به دیاگرام خطی شکل (۱۱۲ ـ ۲) مشاهده می‌شـــود کلاف‌ها در هـــر راه جریان با یکدیگر ســـری می‌شـــوند، لذا نیروی محرکه القایی آنهـــا با هم جمع می‌شود. اگر نیروی محرکه القایی هر کلاف e ولت باشد از آنجایی که در هر راه جریان ۳ کلاف قرار دارد، نیروی محرکـــه القایی در هر راه جریان $۳e$ ولت خواهد شـــد. ولتـــاژ میـــان دو جاروبک A و B یـــا C و D با نیروی محرکه القایی در هر راه جریان یعنی $۳e$ ولت برابر است. کلاف‌های هر یـــک از این راه‌های جریان پس از این‌که با یک‌دیگر سری شدند به‌وســـیله اتصال جاروبک‌ها به تیغه‌های کموتاتور با هم موازی می‌شـــوند. بدین ترتیب جریان آرمیچر بین راه‌های جریان تقسیم می‌شود. اگر جریان هر مســـیر جریان $I_{a_۱}$ آمپر باشـــد از آنجایی که آرمیچر ۴ راه جریان دارد لذا جریان آرمیچر $۴I_{a_۱}$ آمپر خواهد شد. بنابراین بین جریان آرمیچر و جریان هر راه جریان رابطه (۱۰ ـ ۲) برقرار است.

$$I_{a۱} = \frac{I_A}{a} \qquad (۲-۱۰)$$

در این رابطه:

I_{a_1} جریان هر راه جریان

a تعداد راه‌های جریان

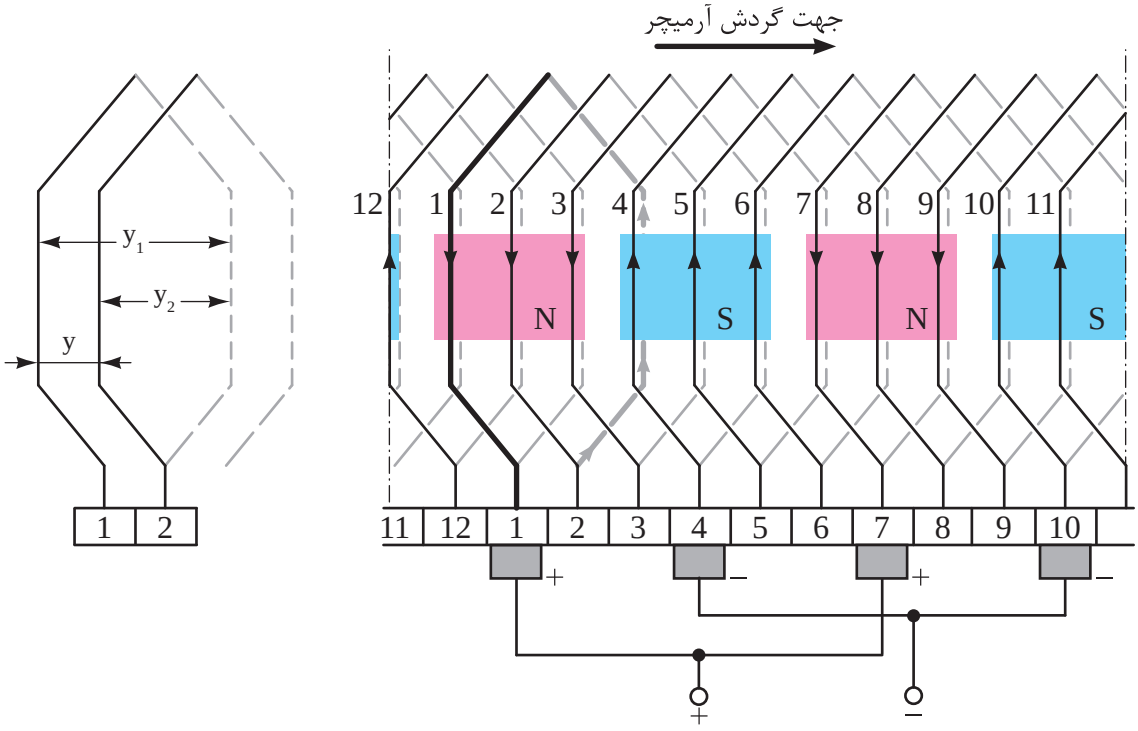
I_A جریان آرمیچر

تقسیم جریان بین راه‌های جریان در سیم‌پیچی حلقوی باعث می‌شود از کلاف‌های آرمیچر در هر راه، جریان کمتری عبور کند و سطح مقطع هادی‌های آنها کاهش یابد.

دیاگرام گسترده سیم‌پیچی حلقوی ساده مربوط به دیاگرام دایره‌ای شکل (۱۱۱ ـ ۲) در شکل (۱۱۳ ـ ۲) نشان داده شده است. از آنجایی که در هر شیار رتور دو بازو از دو کلاف قرار گرفته است در دیاگرام گسترده، بازویی که در شیار زیر قرار می‌گیرد را با خط چین نشان می‌دهند.

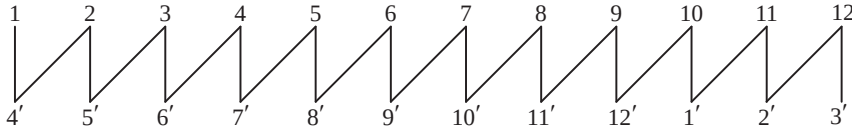
فعالیت ۷ ـ ۲

گام‌های سیم‌پیچی شکل (۱۱۳ ـ ۲) را به‌دست آورید.



شکل ۱۱۳ ـ ۲ دیاگرام گسترده رتور ۱۲ شیار چهار قطب با سیم‌پیچی حلقوی ساده

دیاگرام سریع سیم‌پیچی حلقوی ساده مربوط به دیاگرام دایره‌ای شکل (۱۱۱ ـ ۲) در شکل (۱۱۴ ـ ۲) نشان داده شده است. در دیاگرام سریع بازویی که در شیار در زیر قرار می‌گیرد با اعداد پریم‌دار نشان داده می‌شود.



شکل ۱۱۴ ـ ۲ دیاگرام سریع رتور ۱۲ شیار چهار قطب با سیم‌پیچی حلقوی ساده

سیم‌پیچی حلقوی ساده با خصوصیات زیر شناسایی خواهد شد:

- گام کموتاتور $y_C = \pm 1$ است. در صورتی‌که $y_C = +1$ باشد سیم‌پیچی حلقوی ساده راست‌گرد است. در صورتی‌که $y_C = -1$ باشد سیم‌پیچی را حلقوی ساده چپ‌گرد می‌نامند.
- تعداد جاروبک‌ها برابر تعداد قطب‌ها می‌باشد (شکل ۱۱۱ ـ ۲).
- پهنای هر جاروبک با عرض تیغه کموتاتور برابر است (شکل ۱۱۳ ـ ۲).
- تعداد راه‌های جریان برابر تعداد قطب‌ها است (شکل ۱۱۲ ـ ۲).

روابط $y = y_1 - y_2$ و $y = y_C$ حاکم است (شکل ۱۰۸ ـ ۲).

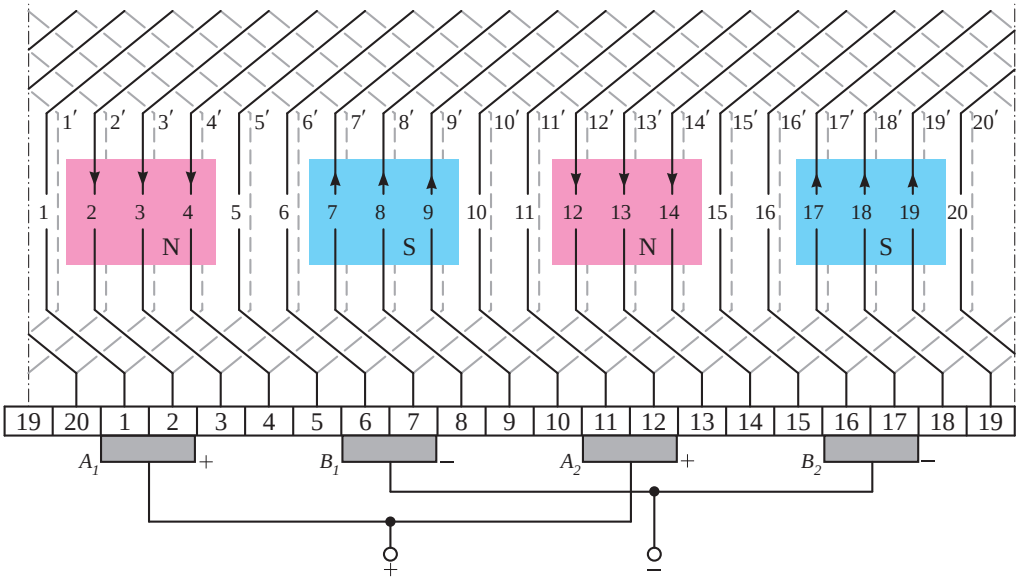
۲ ـ ۱۴ ـ ۲ سیم‌پیچی حلقوی مرکب

سیم‌پیچی حلقوی مرکب از m سیم‌پیچی حلقوی ساده مستقل از یک‌دیگر تشکیل می‌شود که با هم موازی شده‌اند و به همین دلیل نیز به آن مرکب گویند.

در بین اصطلاحات سیم‌پیچی آرمیچر، m را «درجه ترکیب» نامیده‌اند. m نشان می‌دهد سیم‌پیچی مرکب از چند سیم‌پیچی ساده تشکیل شده است. $m=1$ یعنی رتور دارای یک سیم‌پیچی حلقوی ساده می‌باشد و $m=2$ یعنی رتور دارای دو سیم‌پیچی حلقوی ساده است که در اصطلاح آن را «سیم‌پیچی حلقوی مرکب دوگانه» می نامند. این روند نام‌گذاری می‌تواند ادامه یابد.

در سیم‌پیچی حلقوی مرکب سر و ته کلاف‌های هر یک از سیم‌پیچی‌های حلقوی ساده به تیغه‌های کموتاتور به فاصله $\frac{m}{2}$ متصل می‌شوند. جاروبک نیز با پهنای خود تیغه‌های کموتاتور مجاور یکدیگر را به هم ارتباط می‌دهد. بدیهی است پهنای جاروبک m برابر عرض تیغه کموتاتور انتخاب می‌شود تا m سیم‌پیچی حلقوی ساده را با هم موازی کند.

دیاگرام گسترده سیم‌پیچی حلقوی مرکب دوگانه یک رتور ۲۰ شیار ۴ قطب در شکل (۱۱۵ ـ ۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۱۵ ـ ۲ دیاگرام گسترده سیم‌پیچی حلقوی مرکب دو گانه رتور ۲۰ شیار چهار قطب

این سیم‌پیچی شامل دو سیم‌پیچی حلقوی ساده ۴ قطب است که مستقل از یکدیگر می‌باشند. لذا $m=2$ است. به همین دلیل آن را مرکب دوگانه نامیده‌اند. هر یک از این سیم‌پیچی‌های حلقوی ساده طبق رابطه (۹ـ۲) دارای ۴ راه جریان می‌باشند. پهنای جاروبک ۲ برابر عرض یک تیغه کموتاتور انتخاب شده است تا دو تیغه مجاور یکدیگر را به هم ارتباط دهد. بدین ترتیب دو سیم‌پیچی حلقوی ساده با یکدیگر موازی می‌شوند و آرمیچر دارای ۸ راه جریان می‌شود. مشاهده می‌شود تعداد راه‌های جریان به ۲ برابر تعداد قطب‌ها افزایش یافته است. بنابراین در حالت کلی تعداد راه‌های جریان از رابطه (۱۱ ـ ۲) به‌دست می‌آید.

$$a = m\mathrm{P} \qquad (۲-۱۱)$$

در این رابطه:

P تعداد قطب

m درجه ترکیب

a تعداد راه جریان

در شکل (۱۱۳ ـ ۲) گام کموتاتور ۲ است که با درجه ترکیب m برابر شده است. لذا در حالت کلی می‌توان از رابطه (۱۲ ـ ۲) گام کموتاتور سیم‌پیچی حلقوی را به‌دست آورد.

$$y_C = \pm m \qquad (۲-۱۲)$$

در این رابطه:

m درجه ترکیب

$+m$ برای سیم‌پیچی راست‌گرد

$-m$ برای سیم‌پیچی چپ‌گرد

y_C گام کموتاتور

سیم‌پیچی حلقوی مرکب نسبت به سیم‌پیچی حلقوی ساده، دارای تعداد راه جریان بیشتری است لذا از آن در سیم‌پیچی آرمیچر ماشین‌هایی استفاده می‌شود که برای جریان خیلی زیاد طراحی شده‌اند.

فعالیت ۹ ـ ۲

گام‌های سیم‌پیچی شکل (۱۱۵ ـ ۲) را تعیین کنید.

با توجه به مطالب بخش‌های ۱ ـ ۱۴ ـ ۲ و ۲ ـ ۱۴ ـ ۲ می‌توان درباره سیم‌پیچی حلقوی به نکات زیر اشاره داشت:

- با استفاده از سیم‌پیچی حلقوی مرکب امکان استفاده از سیم‌پیچی آرمیچر در جریان‌های بیشتر فراهم می‌شود.
- درجه ترکیب m نشان می‌دهد که سیم‌پیچی آرمیچر از چند سیم‌پیچی ساده تشکیل شده است.
- گام کموتاتور $y_C = \pm m$ است. علامت مثبت برای سیم‌پیچی راست‌گرد و علامت منفی برای سیم‌پیچی چپ‌گرد منظور می‌شود.
- تعداد جاروبک‌ها برابر تعداد قطب‌ها است.
- پهنای هر جاروبک m برابر عرض تیغه کموتاتور می‌باشد.

- تعداد راه‌های جریان m برابر تعداد قطب‌ها است.
  یعنی $a = mP$
- گام سیم‌پیچی برابر است با $y = y_C$
- رابطه $y = y_1 - y_2$ همواره حاکم است.
- جریان هر راه جریان برابر است با $I_{a1} = \frac{I_A}{a}$

پرسش ۸ ـ ۲

۱ ـ تفاوت سیم‌پیچی‌های حلقوی و موجی از نظر شکل سیم‌پیچی را بنویسید.

۲ ـ دیاگرام گسترده دو کلاف از سیم‌پیچی حلقوی ساده را رسم کنید و گام‌های سیم‌پیچی را بر روی آن نشان دهید.

۳ ـ خصوصیات سیم‌پیچی حلقوی ساده را بنویسید.

۴ ـ خصوصیات سیم‌پیچی حلقوی مرکب را بنویسید.

۵ ـ تفاوت سیم‌پیچی حلقوی راست‌گرد با چپ‌گرد را با رسم شکل نشان دهید.

۶ ـ گام‌های سیم‌پیچی شکل (۱۱۱ ـ ۲) را تعیین کنید.

تمرین ۸ ـ ۲

۱ ـ برای رتور ۱۹ شیار یک ماشین جریان مستقیم که به‌صورت حلقوی ساده راست‌گرد با چهار قطب سیم‌پیچی شده است گام‌های سیم‌پیچی و تعداد راه‌های مسیر جریان را تعیین کنید.

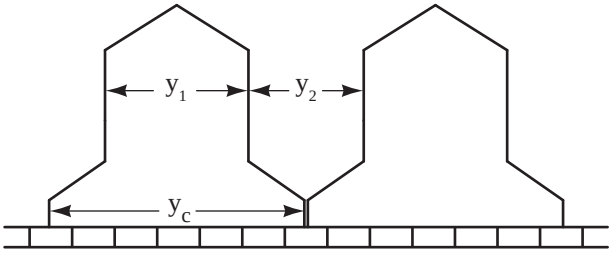
۲ ـ رتور ۱۵ شیار یک ماشین جریان مستقیم چهار قطب به صورت حلقوی مرکب دوگانه سیم‌پیچی شده است. مطلوب است:

الف ـ گام‌های سیم‌پیچی

ب ـ تعداد راه‌های جریان

۳ ـ ۱۴ ـ ۲ ـ سیم‌پیچی موجی ساده

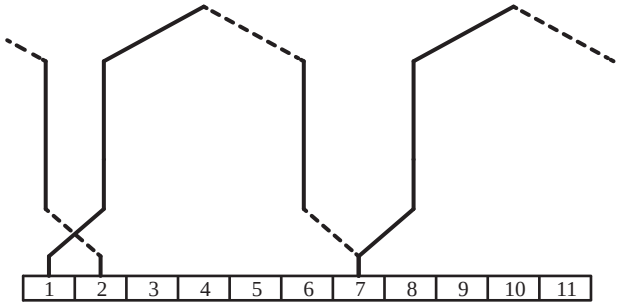
سربندی دو کلاف به تیغه‌های کموتاتور به صورت سیم‌پیچی موجی ساده به همراه گام‌های آن در شکل (۱۱۶ ـ ۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۱۶ ـ ۲ دیاگرام گسترده دو کلاف از سیم‌پیچی موجی ساده

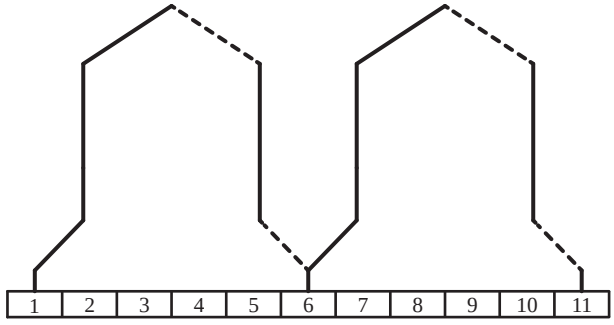
در این شکل مشاهده می‌شود سر و ته هر کلاف با فاصله‌ای زیاد به اندازه y_C به دو تیغه کموتاتور متصل می‌شود و ته هر کلاف محل اتصال سر کلاف بعدی خواهد شد و این روند ادامه می‌یابد تا این‌که سر و ته همه کلاف‌ها به تیغه‌های کموتاتور متصل می‌شوند.

سیم‌پیچی موجی نیز به دو صورت «راست‌گرد» یا «پیش‌رونده» و «چپ‌گرد» یا «پس‌رونده» سربندی می‌شود. سربندی دو کلاف به صورت راست‌گرد در شکل (۱۱۷ ـ ۲) نشان داده شده است. در سیم‌پیچی راست‌گرد ته کلاف دوم به تیغه کموتاتور سمت راست سر کلاف اول اتصال داده شده است.



شکل ۱۱۷ ـ ۲ سربندی دو کلاف سیم پیچی موجی به صورت راست‌گرد

سربندی دو کـــلاف به صورت چـــپ‌گرد در شکل (۱۱۸ ـ ۲) نشان داده شده است. در سیم‌پیچی چپ‌گرد ته کلاف دوم به تیغه کموتاتور سمت چپ سرکلاف اول اتصال داده شده است.



شکل ۱۱۸ ـ ۲ سربندی دو کلاف سیم‌پیچی موجی به صورت چپ‌گرد

دیاگرام دایره‌ای سیم‌پیچی موجی ساده چهار قطب رتور ۱۱ شیار با ۱۱ تیغه کموتاتور در شکل (۱۱۹ ـ ۲) نشان داده شده است.

رتور ۱۱ شیار و ۴ قطب دارد و از رابطه (۷ ـ ۲) گام قطبی به‌دست می‌آید:

$$y_p = \frac{S}{P} = \frac{۱۱}{۴} = ۲/۷۵$$

در این شـــکل یکی از کلاف‌ها پررنگ‌تر نشان داده شـــده اســـت که آن را کلاف اول می نامیم. بازوی اول این کلاف در شـــیار ۱ رتور قـــرار دارد و بازوی دوم آن در شـــیار ۴ رتور قرار گرفته است. بین بازوی اول و دوم این کلاف ۳ شیار فاصله است و طبق تعریف، گام رفت $y_۱ = ۳$ می‌شـــود. چون گام رفت بزرگ‌تر از گام قطبی است سیم‌پیچی از نوع «گام بلند» می‌باشد.

ســـر کلاف اول به تیغـــه ۱ کموتاتور اتصـــال دارد. این کلاف در طی مســـیری راســـت‌گرد پس از عبور از شـــیارهای ۱ و ۴ رتور، ته آن به تیغه ۶ کموتاتور متصل شـــده است. بین سر و ته این کلاف ۵ عایق از کموتاتور قرار دارد طبق تعریف، گام کموتاتور $y_C = +۵$ می‌شود و سیم‌پیچی راست‌گرد است.

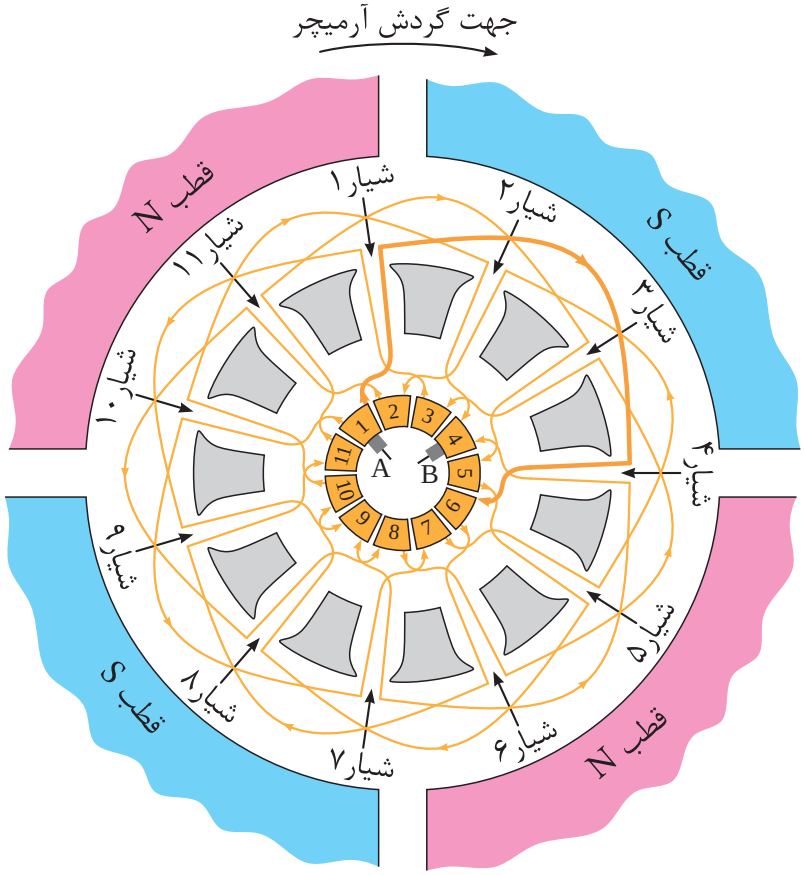
کلاف بعدی کلاف دوم نامیده می‌شود که بازوی اول آن در شـــیار ۶ و بازوی دوم این کلاف در شیار ۹ رتور قرار می‌گیرد. ســـر کلاف دوم به تیغه ۵ کموتاتور که ته کلاف اول به آن متصل شـــده بـــود، اتصال می‌یابد و ته آن به تیغه ۱۱ کموتاتور متصل می‌شـــود. این روند در جاگذاری کلاف‌های بعدی در شـــیارهای رتور و اتصال سرو ته آنها به تیغه‌های کموتاتور ادامه می‌یابد تا آن‌که انتهـــای آخرین کلاف به ابتـــدای کلاف اول در تیغه ۱ وصل شـــود. بدین ترتیب ســـیم‌پیچی رتـــور به صورت موجی ساده تکمیل می‌شود.

بازوی دوم کلاف اول در شـــیار ۴ و بازوی اول کلاف دوم در شـــیار ۶ رتور قرار دارد. بین این دو بازو ۲ شیار فاصله اســـت که طبـــق تعریف، گام برگشـــت $y_۲ = ۲$ می‌شود.

بازوی اول کلاف اول در شـــیار ۱ و بازوی اول کلاف دوم در شـــیار ۶ رتور قرار دارد بین این دو بازو ۵ شیار فاصله اســـت و طبـــق تعریف، گام ســـیم‌پیچی $y = ۵$ می‌شود.

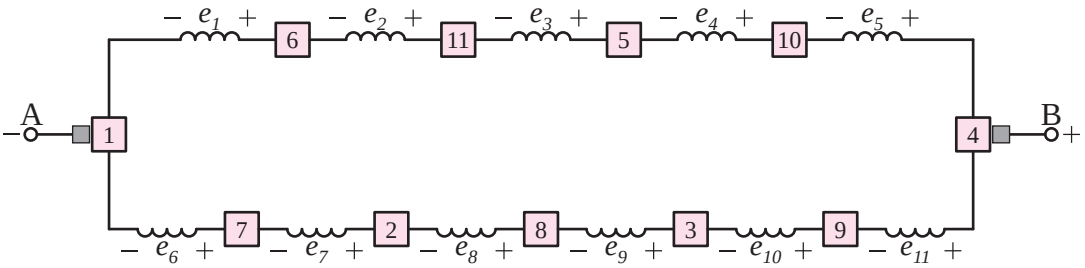
مطابق شکل این سیم‌پیچی موجی دو عدد جاروبک دارد که پهنـــای هر یک برابر با عـــرض تیغه کموتاتور است.

جاروبک‌هـــا بـــر روی تیغه‌هایی از کموتاتـــور قرار می‌گیرند که جریان کلاف‌ها به آنها وارد یا از آنها خارج می‌شـــود. جریان از تیغهٔ شـــمار ۱ کموتاتور خارج و به تیغه شماره ۴ کموتاتور وارد می‌شود. لذا جاروبک A به روی تیغه شماره ۱ و جاروبک B به روی تیغه شماره ۴ کموتاتور قرار می‌گیرند.



شکل ۱۱۹ ـ ۲ دیاگرام مدور رتور ۱۱ شیار ۴ قطب با سیم‌پیچی موجی ساده

دیاگرام خطی ســـیم‌پیچی موجی ســـاده مربوط به دیاگرام دایره‌ای شکل (۱۱۹ ـ ۲) در شکل (۱۲۰ ـ ۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲۰ ـ ۲ دیاگرام خطی رتور ۱۱ شیار با قطب با سیم‌پیچی موجی ساده

در این شکل کلاف‌ها از طریق تیغه‌های کموتاتور با یکدیگر سری شده‌اند. با قرار گرفتن جاروبک‌ها به روی تیغه‌های کموتاتور دو مسیر شکل می‌گیرد و کلاف‌های آرمیچر در این دو مسیر توزیع می‌شوند.

جریـــان ورودی به آرمیچر پـــس از عبور از جاروبک بین این دو مسیر تقسیم می‌شود. هر یک از این مسیرها راهی برای عبور جریان اســـت. لذا دو «راه جریان» ایجاد شده است. یعنی:

$$a = ۲ \qquad (۲-۱۳)$$

مشاهده می‌شود در ســـیم‌پیچی موجی ساده تعداد راه‌های جریان مستقل از تعداد قطب‌ها می‌باشد و هیچ ارتباطی با یکدیگر ندارد.

با توجه به دیاگرام خطی شکل (۱۲۰ ـ ۲) مشاهده می‌شـــود کلاف‌های سیم‌پیچی آرمیچر در ۲ راه جریان توزیع شده‌اند. کلاف‌ها در هر راه جریان با یکدیگر سری می‌شوند و نیروی محرکه القایی آن‌ها با یک‌دیگر جمع می‌شود. کلاف‌های هر یک از این راه‌های جریان پس از این‌که با یکدیگر ســـری شدند بوسیله اتصال جاروبک‌ها به تیغه‌های کموتاتور با هم موازی می‌شوند. بدین ترتیب جریان آرمیچر بین دو راه جریان تقســـیم می‌شود. اگر جریان هر مســـیر جریان I_{a_1} آمپر باشـــد از آنجایی که آرمیچر ۲ راه جریان دارد لذا جریان آرمیچر $۲I_{a_1}$ آمپر خواهد شد. بنابراین بین جریان آرمیچر و جریان هر راه جریان همان رابطه (۱۰ ـ ۲) برقرار است.

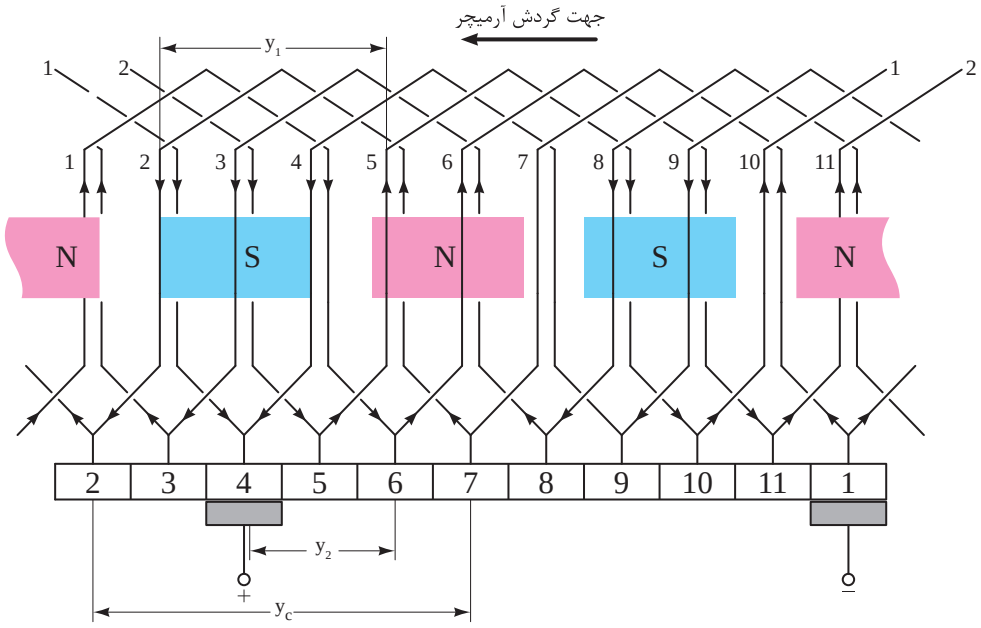
$$I_{a_1} = \frac{I_A}{a}$$

ســـیم‌پیچی موجی ســـاده انتخاب مناســـبی برای آرمیچرهای ولتاژ زیاد و جریان نسبتاً کم می‌باشد. زیرا در ســـیم پیچی موجی در هر راه جریان تعداد بیشتری از کلاف‌ها با هم سری می‌شـــوند و سیم‌پیچی آرمیچر ولتاژ بیشتری را خواهد داشت. تعداد کم راه‌های جریان امکان تحمل جریان‌های زیاد از سیم‌پیچی موجی ساده را سلب می‌کند.

دیاگرام گسترده ســـیم‌پیچی موجی ساده مربوط به دیاگرام دایره‌ای شـــکل (۱۱۹ ـ ۲) در شکل (۱۲۱ ـ ۲) نشان داده شده است.

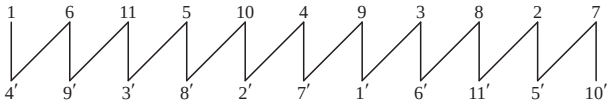
فعالیت ۱۰ـ ۲

گـــام‌های سیـــم‌پیچی y_C ، y_1 ، y_2 و y شـــکل (۱۲۱ ـ ۲) را به‌دست آورید.



شکل ۱۲۱ ـ ۲ دیاگرام گسترده رتور ۱۱ شیار، ۴ قطب موجی ساده

دیاگرام سریع سیم‌پیچی موجی ساده مربوط به دیاگرام دایره‌ای شکل (۱۱۹ ـ ۲) در شکل (۱۲۲ ـ ۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲۲ ـ ۲ دیاگرام سریع رتور ۱۱ شیار چهار قطب با سیم‌پیچی موجی ساده

در دیاگرام سریع بازویی که در شیار در زیر قرار می‌گیرد با اعداد پریم‌دار نشان داده می‌شود.

سیم‌پیچی موجی ساده با خصوصیات زیر شناسایی خواهد شد:

- تعداد جاروبک‌ها ۲ عدد می‌باشد (شکل ۱۱۹ـ۲).
- پهنای هر جاروبک برابر m عرض تیغه کموتاتور است (شکل ۱۲۰ ـ ۲).
- تعداد راه‌های جریان برابر ۲ می‌باشد (شکل ۱۲۰ـ۲).
- روابط $y = y_1 + y_2$ و $y = y_C$ حاکم است (شکل ۱۱۶ ـ ۲).

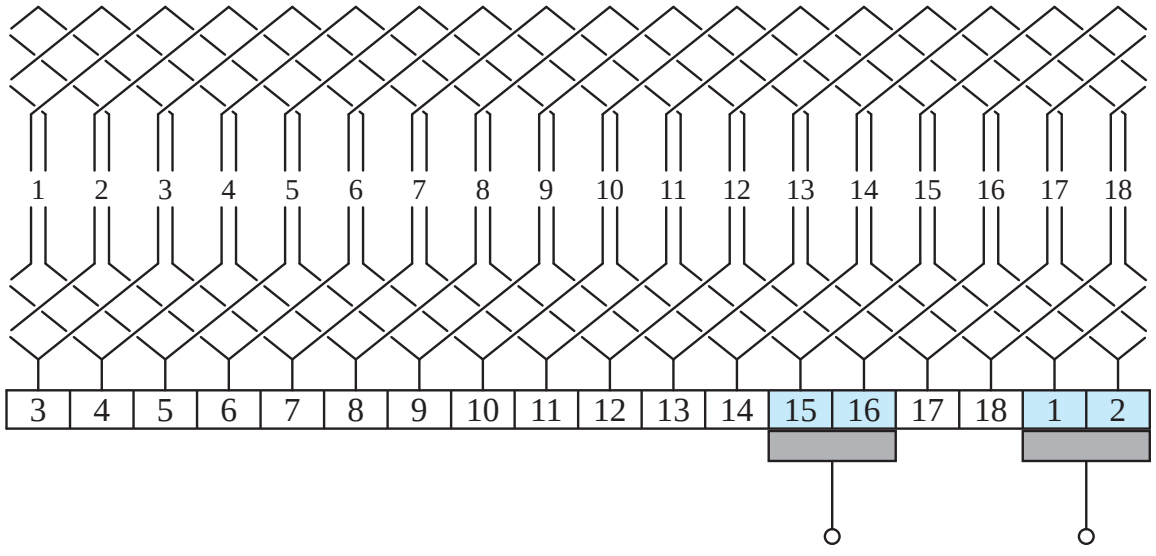
۴ ـ ۱۴ ـ ۲ ـ سیم‌پیچی موجی مرکب

سیم پیچی موجی مرکب از m سیم پیچی موجی ساده مستقل از یکدیگر تشکیل می‌شود که با هم موازی شده‌اند و به همین دلیل نیز به آن مرکب گویند. در این سیم‌پیچی نیز m نشان می‌دهد سیم‌پیچی مرکب از چند سیم‌پیچی ساده تشکیل شده است. $m=1$ یعنی رتور دارای یک سیم‌پیچی موجی ساده است. $m=2$ یعنی رتور دارای دو سیم‌پیچی موجی ساده است که در اصطلاح آن را «سیم‌پیچی موجی مرکب دوگانه» می‌نامند. این روند نام‌گذاری می‌تواند ادامه یابد.

در سیم‌پیچی موجی مرکب سر و ته کلاف‌های هر یک از سیم‌پیچی‌های موجی ساده به تیغه‌های کموتاتور به فاصله $\frac{m}{2}$ متصل می‌شوند.

جاروبک نیز با پهنای خود تیغه‌های کموتاتور مجاور یکدیگر را به هم ارتباط می‌دهد. بدیهی است پهنای جاروبک m برابر عرض تیغه کموتاتور انتخاب می‌شود تا m سیم‌پیچی موجی ساده را با هم موازی کند.

دیاگرام گسترده سیم‌پیچی موجی مرکب دوگانه یک رتور ۱۸ شیار ۴ قطب در شکل (۱۲۳ ـ ۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲۳ ـ ۲ دیاگرام گسترده سیم‌پیچی موجی مرکب دوگانه رتور ۱۸ شیار ۴ قطب

این سیم‌پیچی شامل دو سیم‌پیچی موجی ساده ۴ قطب است که مستقل از یکدیگر می‌باشند؛ لذا $m=۲$ است. به همین دلیل آن را مرکب دوگانه نامیده‌اند. هر یک از این سیم‌پیچی‌های موجی ساده طبق رابطه (۱۳ـ ۲) دارای ۲ راه جریان می‌باشند. پهنای جاروبک ۲ برابر عرض یک تیغه کموتاتور انتخاب شده است تا دو تیغه مجاور یکدیگر را به هم ارتباط دهد. بدین ترتیب دو سیم‌پیچی موجی ساده با یکدیگر موازی می‌شوند و سیم‌پیچی آرمیچر دارای ۴ راه جریان می‌شود. مشاهده می‌شود تعداد راه‌های جریان به ۲ برابر تعداد راه‌های جریان سیم‌پیچی موجی ساده افزایش یافته است. بنابراین در حالت کلی تعداد راه‌های جریان از رابطه (۱۴ ـ ۲) به‌دست می‌آید.

$$a = ۲m \qquad (۲-۱۴)$$

در این رابطه:

m درجه ترکیب

a تعداد راه جریان

فعالیت ۱۱ ـ ۲

گام‌های سیم‌پیچی y_C ، $y_۱$ ، $y_۲$ و y را در شکل (۱۲۳ ـ ۲) به‌دست آورید.

گام کلکتور در سیم‌پیچی‌های موجی اعم از ساده یا مرکب از رابطه (۱۵ ـ ۲) محاسبه می‌شود.

$$y_C = \frac{۲(c \pm m)}{P} \qquad (۲-۱۵)$$

در این رابطه:

c تعداد تیغه‌های کموتاتور

m درجه ترکیب

$+m$ برای سیم‌پیچی راست‌گرد

$-m$ برای سیم‌پیچی چپ‌گرد

P تعداد قطب

y_C گام کموتاتور

سیم‌پیچی موجی مرکب نسبت به موجی ساده، دارای تعداد راه جریان بیشتری است. لذا سیم‌پیچی آرمیچر می‌تواند جریان بیشتری داشته باشد. ضمن این‌که تغییری در ولتاژ سیم‌پیچی آرمیچر با سیم‌پیچی موجی مرکب نسبت به موجی ساده ایجاد نخواهد شد.

با توجه به مطلب بخش‌های ۳ ـ ۱۴ ـ ۲ و ۴ ـ ۱۴ ـ ۲ می توان درباره سیم‌پیچی موجی به نکات زیر اشاره داشت:

- با استفاده از سیم‌پیچی موجی مرکب امکان استفاده از سیم‌پیچی آرمیچر در جریان‌های بیشتر فراهم می‌شود.
- درجه ترکیب m نشان می‌دهد که سیم‌پیچی آرمیچر از چند سیم‌پیچی ساده تشکیل شده است.
- گام کموتاتور $y_C = \frac{۲(c \pm m)}{P}$ است. علامت مثبت برای سیم پیچی راست‌گرد و علامت منفی برای سیم پیچی چپ‌گرد منظور می‌شود.
- تعداد جاروبک‌ها به تعداد قطب‌ها بستگی ندارد و به‌طور ثابت ۲ عدد می‌باشد.
- پهنای هر جاروبک m برابر عرض تیغه‌های

کموتاتور است.

- تعداد راه‌های جریان $a = ۲m$ می‌باشد.
- گام سیم‌پیچی برابر است با $y = y_C$
- رابطه $y = y_۱ + y_۲$ همواره حاکم است.
- جریان هر راه جریان برابر است با $I_{a۱} = \frac{I_A}{a}$

پرسش ۹ ـ ۲

۱ ـ دیاگرام گسترده دو کلاف از سیم‌پیچی موجی ساده را رسم کنید و گام‌های سیم‌پیچی را بر روی آن نشان دهید.

۲ ـ خصوصیات سیم‌پیچی موجی ساده را بنویسید.

۳ ـ خصوصیات سیم‌پیچی موجی مرکب را بنویسید.

۴ ـ تفاوت سیم‌پیچی موجی راست‌گرد با چپ‌گرد را با رسم شکل نشان دهید.

۵ ـ گام‌های سیم‌پیچی شکل (۱۱۷ ـ ۲) را به‌دست آورید.

تمرین ۹ ـ ۲

۱ ـ رتور ۱۱ شیار یک ماشین جریان مستقیم را به‌صورت موجی ساده چهار قطب چپ‌گرد سیم‌پیچی شده است مطلوب است:

الف ـ گام‌های سیم‌پیچی

ب ـ تعداد راه‌های جریان

۱۵ ـ ۲ ـ کمیت‌های الکتریکی سیم‌پیچی آرمیچر

کمیت‌های الکتریکی سیم‌پیچی آرمیچر شامل نیروی محرکه القایی، جریان، مقاومت الکتریکی و گشتاور است. نوع سیم‌پیچی آرمیچر یکی از عواملی است که در مقدار هر یک از این کمیت‌ها مؤثر است. با انتخاب نوع سیم‌پیچی مناسب می‌توان مقدار مطلوب هر یک از این کمیت‌ها را به‌دست آورد.

۱ ـ ۱۵ ـ ۲ ـ نیروی محرکه القایی

در روش‌های سیم‌پیچی مشاهده شد در هر راه جریان کلاف‌های سیم‌پیچی آرمیچر از طریق تیغه‌های کموتاتور با یک‌دیگر سری می‌شوند. لذا نیروی محرکه القایی هر کلاف e، در هر راه جریان، با یکدیگر جمع می‌شود. این موضوع در دیاگرام گسترده به‌خوبی مشهود است. با مقایسه دیاگرام گسترده سیم‌پیچی‌های حلقوی و موجی شکل‌های (۱۱۲ ـ ۲) و (۱۲۰ ـ ۲) مشاهده می‌شود تعداد کلاف‌های هر راه جریان سیم‌پیچی موجی بیشتر از سیم‌پیچی حلقوی است. لذا نیروی محرکه القایی هر مسیر جریان در سیم‌پیچی موجی بیشتر از سیم‌پیچی حلقوی است. این موضوع بیانگر تأثیر نوع سیم‌پیچی بر نیروی محرکه القایی آرمیچر است.

نیروی محرکه القایی سیم‌پیچی آرمیچر، ناشی از گردش رتور در میدان مغناطیسی استاتور است. بنابراین در ماشین‌های جریان مستقیم در حالت موتوری یا ژنراتوری با گردش رتور، نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی آرمیچر ایجاد خواهد شد.

نیروی محرکه القایی سیم‌پیچی ماشین‌های جریان مستقیم در حالت موتوری یا ژنراتوری از رابطه

(۱۶ ـ ۲) به‌دست می‌آید.

$$E_A = \frac{P}{a} \cdot Z \cdot \varphi \cdot \frac{n}{۶۰} \qquad (۲\text{-}۱۶)$$

در این رابطه:

n سرعت گردش رتور بر حسب دور بر دقیقه[۱] [RPM]

φ فوران هر قطب بر حسب وبر $[wb]$

Z تعداد هادی‌های درون شیارهای رتور

P تعداد قطب‌های استاتور

a تعداد راه جریان سیم‌پیچی آرمیچر

E_A نیروی محرکه القایی سیم‌پیچی آرمیچر بر حسب ولت [V]

مثال ۴ ـ ۲ ـ رتور یک ماشین جریان مستقیم دارای سیم‌پیچی حلقوی ساده، ۴ قطب و فوران هر قطب wb ۰/۰۱ دارای ۱۰۰۰ هادی در شیارهای رتور با سرعت RPM ۱۲۰۰ می‌گردد. نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی آرمیچر چند ولت است؟

حل:

سیم‌پیچی حلقوی ساده است لذا $m=۱$ است.

در سیم‌پیچی حلقوی داریم: $a = mP$

$a = ۱ \times ۴ = ۴$

از رابطه (۱۶ ـ ۲) خواهیم داشت:

$$E_A = \frac{P}{a} \cdot Z \cdot \varphi \cdot \frac{n}{۶۰}$$

$$E_A = \frac{۴}{۴} \times ۱۰۰۰ \times ۰/۰۱ \times \frac{۱۲۰۰}{۶۰} = ۲۰۰\ [V]$$

فعالیت ۱۲ ـ ۲

نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی آرمیچر مثال ۴ ـ ۲ را به ازای سیم‌پیچی موجی ساده به‌دست آورید. از مقایسه جواب‌ها چه نتیجه‌ای به‌دست می‌آید.

معمولاً رابطه (۱۶ ـ ۲) را در $\frac{۲\pi}{۲\pi}$ ضرب می‌کنند.

$$E_A = \frac{P}{a} \cdot Z \cdot \varphi \cdot \frac{n}{۶۰} \cdot \frac{۲\pi}{۲\pi} \qquad (۲\text{-}۱۷)$$

در رابطه (۱۷ ـ ۲) کمیت‌هایی که در یک ماشین جریان مستقیم ثابت هستند و در حین کار ماشین تغییر نمی‌کنند را ضریب ثابت K می‌نامند و واحد آن $\frac{۱}{rad}$ است.

$$K = \frac{P}{a} \cdot \frac{Z}{۲\pi} \qquad (۲\text{-}۱۸)$$

هم‌چنین در رابطه (۱۷ ـ ۲) حاصل $\frac{n \cdot ۲\pi}{۶۰}$ بیانگر سرعت زاویه‌ای ω می‌باشد. سرعت زاویه‌ای عبارت مقدار زاویه‌ای که رتور در مدت یک ثانیه طی می‌کند.

$$\omega = \frac{۲\pi n}{۶۰} \qquad (۲\text{-}۱۹)$$

در این رابطه:

n سرعت گردش رتور بر حسب دور بر دقیقه [R.P.M]

ω سرعت زاویه‌ای رتور بر حسب رادیان بر ثانیه $\left[\frac{rad}{sec}\right]$

با جایگزینی مقادیر K و ω از روابط (۱۸ ـ ۲) و (۱۹ ـ ۲) در رابطه (۱۷ ـ ۲) خواهیم داشت:

۱. Revolution Per Minute

$$E_A = K \cdot \varphi \cdot \omega \qquad (۲-۲۰)$$

رابطه (۲۰ ـ ۲) نشان می‌دهد نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی آرمیچر یک ماشین جریان مستقیم تابع سرعت رتور و فوران قطب‌های آن است.

مثال ۵ ـ ۲ ـ نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی آرمیچر یک ماشین جریان مستقیم با فوران هر قطب ۲۰ mwb و سرعت رتور ۶۰۰ RPM برابر ۱۲۰ ولت است. ضریب ثابت ماشین چقدر است؟

حل:

واحد فوران به وبر تبدیل می‌شود، لذا خواهیم داشت:

$$\varphi = ۲۰ \times ۱۰^{-۳} [wb]$$

سرعت زاویه از رابطه (۱۹ ـ ۲) به‌دست می‌آید؛ در صورتی‌که فرض شود $\pi = ۳$ خواهیم داشت:

$$\omega = \frac{۲\pi n}{۶۰}$$

$$\omega = \frac{۲ \times ۳ \times ۶۰۰}{۶۰} = ۶۰ \left[\frac{rad}{sec}\right]$$

از رابطه (۲۰ ـ ۲) ضریب ثابت به‌دست خواهد آمد.

$$E_A = K \cdot \varphi \cdot \omega$$

$$K = \frac{E}{\varphi \cdot \omega} = \frac{۱۲۰}{۲۰ \times ۱۰^{-۳} \times ۶۰} = ۱۰۰ \left[\frac{۱}{rad}\right]$$

فعالیت ۱۳ ـ ۲

نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی آرمیچر مثال ۵ ـ ۲ را در سرعت ۹۰۰ RPM به‌دست آورید. از مقایسه جواب‌ها چه نتیجه‌ای به‌دست می‌آید؟

نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی آرمیچر از رابطه (۲۱ ـ ۲) نیز قابل محاسبه است.

$$E_A = \frac{Z \cdot E_C}{a} \qquad (۲-۲۱)$$

در این رابطه:

E_A نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی آرمیچر

Z تعداد هادی‌های درون شیارهای آرمیچر

a تعداد راه جریان سیم‌پیچی آرمیچر

E_C نیروی محرکه القایی در هر هادی آرمیچر

مثال ۶ ـ ۲ ـ رتور یک ماشین جریان مستقیم دارای سیم‌پیچی‌های حلقوی ساده چهار قطب می‌باشد. این سیم‌پیچی شامل ۲۰۰ هادی است و نیروی محرکه القایی هر هادی ۲ ولت می‌باشد. نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی آرمیچر چند ولت است.

حل:

سیم‌پیچی حلقوی ساده است لذا $m = ۱$ می‌باشد.

در سیم‌پیچی حلقوی داریم:

$$a = mP$$

$$a = ۱ \times ۴ = ۴$$

نیروی محرکه القایی در هر هادی ۲ ولت است. یعنی:

$$E_C = ۲V$$

از رابطه ۲۱ ـ ۲ خواهیم داشت:

$$E_A = \frac{Z \cdot E_C}{a}$$

$$E_A = \frac{۲۰۰ \times ۲}{۴} = ۱۰۰ [V]$$

فعالیت ۱۴ ـ ۲

نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی آرمیچر مثال ۶ ـ ۲ را به ازای سیم‌پیچی موجی ساده چند ولت می‌شود؟

۲ ـ ۱۵ ـ ۲ ـ جریان

در روش‌های سیم‌پیچی حلقوی و موجی بخش ۱۴ ـ ۲ در شکل‌های (۱۱۲ ـ ۲) و (۱۲۰ ـ ۲) نشان داده شد کلاف‌های سیم‌پیچی آرمیچر بین راه‌های جریان توزیع می‌شوند و با اتصال جاروبک‌ها به تیغه‌های کموتاتور، راه‌های جریان با هم موازی خواهند شد. جریان هر راه جریان I_{A1} با یکدیگر جمع می‌شوند و جریان آرمیچر I_A به‌وجود می‌آید. در این دو شکل مشاهده می‌شود جریان هر مسیر جریان برابر جریان هر کلاف است که با جریان هر هادی درون شیارهای آرمیچر، تفاوتی ندارد. در دیاگرام گسترده سیم‌پیچی حلقوی ساده شکل (۱۱۲ ـ ۲) نسبت به دیاگرام گسترده سیم‌پیچی موجی ساده شکل (۱۲۰ ـ ۲) تعداد راه‌های جریان بیشتری ایجاد شده است، لذا سیم‌پیچی حلقوی نسبت به سیم‌پیچی موجی تحمل جریان بیشتری را خواهد داشت. این موضوع تأثیر نوع سیم‌پیچی بر جریان آرمیچر را نشان می‌دهد.

جریان آرمیچر با توجه به نوع سیم‌پیچی از رابطه (۱۰ ـ ۲) به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$I_A = aI_{a1} \qquad (۲-۲۲)$$

مثال ۷ ـ ۲ ـ رتور یک ماشین جریان مستقیم دارای سیم‌پیچی موجی ساده، ۴ قطب می‌باشد. اگر جریان هر راه جریان ۴ آمپر باشد، جریان سیم‌پیچی آرمیچر چند آمپر است؟

حل:

سیم‌پیچی موجی ساده است لذا $m=1$ است.

در سیم‌پیچی موجی داریم:

$$a = 2m$$

$$a = 2\times 1 = 2$$

از رابطه (۲۲ ـ ۲) خواهیم داشت:

$$I_A = aI_{a1}$$

$$I_A = 2\times 4 = 8\ [A]$$

فعالیت ۱۵ ـ ۲

جریان سیم‌پیچی آرمیچر مثال ۷ ـ ۲ را به ازای سیم‌پیچی حلقوی ساده به‌دست آورید. از مقایسه جواب‌ها چه نتیجه‌ای به‌دست می‌آید.

۳ ـ ۱۵ ـ ۲ ـ مقاومت الکتریکی

سیم‌پیچی آرمیچر از کلاف‌هایی تشکیل شده است که هر کدام از آنها دارای مقاومت اهمی هستند. هنگامی‌که این کلاف‌ها در سیم‌پیچی‌های حلقوی یا موجی از طریق تیغه‌های کموتاتور در هر راه جریان با هم سری می‌شوند، هر راه جریان دارای مقاومت الکتریکی می‌شود. با اتصال جاروبک‌ها به تیغه‌های کموتاتور، راه‌های جریان با هم به‌صورت موازی در می‌آیند و مقاومت الکتریکی آنها با هم موازی می‌شوند. بدین ترتیب مقاومت الکتریکی، بین دو جاروبک مثبت و منفی به‌وجود می‌آید که آن را «مقاومت الکتریکی سیم‌پیچی آرمیچر» می‌نامند و با R_A نشان می‌دهند.

مقاومت الکتریکی سیم‌پیچی آرمیچر از رابطه

(۲۳ ـ ۲) به‌دست می‌آید.

$$R_A = \frac{Z \cdot R_t}{۲a^۲} \qquad (۲\text{-}۲۳)$$

که در این رابطه:

R_t مقاومت الکتریکی یک حلقه از کلاف‌های سیم‌پیچی آرمیچر

Z تعداد هادی‌های درون شیارهای آرمیچر

a تعداد راه جریان

R_A مقاومت الکتریکی سیم‌پیچی آرمیچر

مثال ۸ ـ ۲ ـ رتور یک ماشین جریان مستقیم دارای سیم‌پیچی حلقوی مرکب دوگانه، ۴ قطب می‌باشد. این سیم‌پیچی شامل ۲۰۰۰ حلقه است و مقاومت الکتریکی هر حلقه ۰/۰۰۴ Ω می‌باشد. مقاومت الکتریکی سیم‌پیچی آرمیچر چند اهم است؟

حل:

سیم‌پیچی حلقوی مرکب دوگانه است؛ لذا $m=۲$ می‌باشد.

در سیم‌پیچی حلقوی داریم: $a = mP$

$$a = ۲ \times ۴ = ۸$$

هر حلقه دارای ۲ هادی است. پس تعداد هادی‌ها دو برابر تعداد حلقه‌های سیم‌پیچی است. یعنی:

$$Z = ۲N$$

$$Z = ۲ \times ۲۰۰۰ = ۴۰۰۰$$

از رابطه (۲۳ ـ ۲) خواهیم داشت.

$$R_A = \frac{Z \cdot R_t}{۲a^۲}$$

$$R_A = \frac{۴۰۰۰ \times ۰/۰۰۴}{۲ \times ۸^۲} = ۰/۱۲۵ \ [\Omega]$$

فعالیت ۱۶ ـ ۲

مقاومت الکتریکی سیم‌پیچی آرمیچر مثال ۷ ـ ۲ به ازای سیم‌پیچی موجی مرکب دوگانه چند اهم می‌شود.

۴ ـ ۱۵ ـ ۲ ـ گشتاور تولیدی

گشتاور تولیدی[۱] سیم‌پیچی آرمیچر، ناشی از نیرویی است که از طرف میدان مغناطیسی قطب‌های استاتور به هادی‌های حامل جریان در شیارهای رتور وارد می‌شود. این گشتاور را بعضاً «گشتاور آرمیچر» یا «گشتاور الکترومغناطیسی»[۲] می‌نامند و مقدار آن از رابطه (۲۴ ـ ۲) به‌دست می‌آید.

$$T_A = \frac{P}{A} \cdot Z \cdot \varphi \cdot \frac{I_A}{۲\pi} \qquad (۲\text{-}۲۴)$$

در این رابطه:

I_A جریان سیم‌پیچی آرمیچر بر حسب آمپر [A]

φ فوران قطب‌ها بر حسب وبر [wb]

Z تعداد هادی‌های درون شیارهای آرمیچر

P تعداد قطب‌های استاتور

a تعداد راه جریان سیم‌پیچی آرمیچر

T_A گشتاور آرمیچر بر حسب نیوتن متر [N.m]

مثال ۹ ـ ۲ ـ یک ماشین جریان مستقیم با سیم‌پیچی موجی مرکب دوگانه ۴ قطب و فوران قطب ۰/۰۱ wb دارای ۵۰۰ هادی در شیارهای آرمیچر است. اگر جریان سیم‌پیچی آرمیچر ۱۲ آمپر باشد. گشتاور آرمیچر چند نیوتن متر خواهد شد.

حل:

۱. Developed Torque

۲. Electromagnetic Torque

سیم‌پیچی آرمیچر موجی مرکب دوگانه است. لذا $m=۲$ است. در سیم‌پیچی موجی داریم:

$$a = ۲m$$

$$a = ۲\times ۲ = ۴$$

گشتاور آرمیچر از رابطه (۲۳ ـ ۲) به‌دست می‌آید:

$$T_A = \frac{P}{A}\cdot Z\cdot \varphi \cdot \frac{I_A}{۲\pi}$$

در صورتی‌که $\pi = ۳$ فرض شود:

$$T_A = \frac{۴}{۴}\times ۵۰۰\times ۰/۰۱\times \frac{۱۲}{۲\pi} = ۱۰\ [N.m]$$

فعالیت ۱۷ ـ ۲

گشتاور آرمیچر مثال ۹ ـ ۲ به ازای سیم‌پیچی حلقوی مرکب دوگانه چند نیوتن متر است؟

در رابطه گشتاور آرمیچر حاصل $\frac{P}{A}.\frac{Z}{۲\pi}$ بیانگر ضریب ثابت K است. لذا با جایگزینی مقدار K در رابطه (۲۴ ـ ۲) خواهیم داشت.

$$T_A = K\cdot \varphi \cdot I_A \qquad (۲\text{-}۲۵)$$

رابطه (۲۵ ـ ۲) نشان می‌دهد، گشتاور آرمیچر تابع فوران قطب‌ها و جریان آرمیچر است.

مثال ۱۰ ـ ۲ ـ یک ماشین جریان مستقیم با جریان آرمیچر ۱۰A و فوران قطب wb ۰/۰۱ گشتاور ۲ N.m تولید می‌کند. ضریب ثابت ماشین چقدر است؟

حل:

از رابطه (۲۵ ـ ۲) ضریب ثابت به‌دست می‌آید:

$$T_A = K\cdot \varphi \cdot I_A$$

$$K = \frac{T_A}{\varphi \cdot I_A} = \frac{۲}{۰/۰۱\times ۱۰} = ۲۰\left[\frac{۱}{rad}\right]$$

فعالیت ۱۸ ـ ۲

گشتاور آرمیچر مثال ۱۰ ـ ۲ را در صورتی‌که جریان آرمیچر به ۱۵ A و فوران قطب‌ها ۰/۰۵ wb افزایش یابند را به‌دست آورید.

تمرین ۱۰ ـ ۲

۱ ـ رتور یک ماشین جریان مستقیم دارای سیم‌پیچی حلقوی ساده با ۱۰۰۰ هادی و فوران زیر هر قطب ۲۰ mwb با چه سرعتی گردانده شود تا نیروی محرکه القایی ۱۲۰ ولت ایجاد شود؟

۲ ـ رتور یک ماشین جریان مستقیم چهار قطب با ۱۰۰۰ هادی و فوران زیر هر قطب ۱۰ mwb با سرعت ۶۰۰ RPM گردانده می‌شود. نیروی محرکه القایی را در دو حالت زیر به‌دست آورید:

الف ـ سیم‌پیچی حلقوی مرکب دو گانه

ب ـ سیم‌پیچی موجی مرکب دوگانه

۳ ـ سیم‌پیچی آرمیچر یک ماشین جریان مستقیم ۶ قطب با فوران زیر هر قطب ۱۰ mwb دارای ۱۰۰۰ هادی می‌باشد. رتور با سرعت ۱۲۰۰ RPM گردانده می‌شود. مطلوب است محاسبه نیروی محرکه القایی

سیم‌پیچی آرمیچر در حالت‌های جدول زیر:

الف ـ سیم‌پیچی آرمیچر حلقوی ساده	E_A=.....
ب ـ سیم‌پیچی آرمیچر حلقوی مرکب دوگانه	E_A=.....
ج ـ سیم‌پیچی آرمیچر موجی ساده	E_A=.....
د ـ سیم‌پیچی آرمیچر موجی مرکب دوگانه	E_A=.....

از نتایج به‌دست آمده چه نتیجه‌ای حاصل می‌شود؟

۴ ـ رتور یک ماشین جریان مستقیم دارای سیم‌پیچی ۴ قطب می‌باشد. این سیم‌پیچی شامل ۱۰۰۰ حلقه است. نیروی محرکه القایی، مقاومت و جریان هر حلقه به ترتیب [V] ۱۰، [Ω] ۰/۱ و [A] ۴ است. مطلوب است کمیت‌های الکتریکی سیم‌پیچی آرمیچر که در حالت‌های جدول زیر آمده است. پس از تکمیل جدول، بر روی نتایج بحث کنید.

	m	a	I_A[A]	R_A[Ω]	E_A[V]
سیم‌پیچی حلقوی ساده					
سیم‌پیچی حلقوی مرکب دوگانه					
سیم‌پیچی موجی ساده					
سیم‌پیچی موجی مرکب دوگانه					

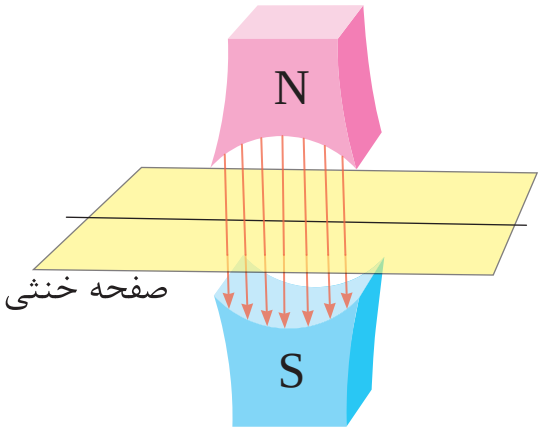
۵ ـ یک ماشین جریان مستقیم با سیم‌پیچی حلقوی ساده ۶ قطب و فوران قطب mwb ۲۰ دارای ۱۰۰۰ هادی در شیارهای آرمیچر است. اگر گشتاور آرمیچر N.m ۵ باشد، جریان سیم‌پیچی آرمیچر چند آمپر است؟

۶ ـ یک ماشین جریان مستقیم با سیم‌پیچی موجی ساده ۲ قطب و فوران قطب wb ۰/۰۲ دارای ۶۰۰ هادی در شیارهای آرمیچر است. اگر جریان آرمیچر ۵A باشد گشتاور آرمیچر چند نیوتن متر خواهد شد؟

۱۶ ـ ۲ ـ عکس‌العمل آرمیچر

میدان مغناطیسی میان دو قطب غیرهمنام «میدان طولی» نام دارد؛ خطوط مغناطیسی میدان طولی به‌طور مستقیم موازی با یکدیگر بین دو قطب غیرهمنام قرار گرفته‌اند. می‌توان صفحه‌ای فرضی، عمود بر میدان طولی در نظر گرفت و آن را «صفحه خنثی»[1] نامید (شکل ۱۲۴ ـ ۲).

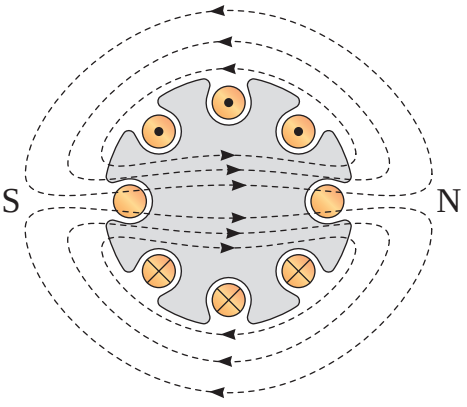
۱. Neutral Plane



شکل ۱۲۴ ـ ۲ میدان مغناطیسی طولی قطب‌ها و صفحه خنثی

با قرار گرفتن هر یک از کلاف‌های سیم پیچی آرمیچر در موقعیت صفحه خنثی، نیروی محرکه در آنها القا نمی‌شود. به همین دلیل این صفحه را خنثی نامیده‌اند.

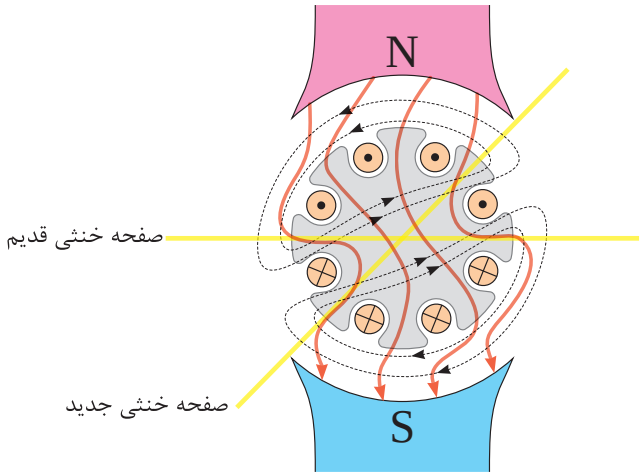
در حالت ژنراتوری با اتصال آرمیچر به مصرف‌کننده در هادی‌های آن جریان القایی جاری می‌شود و در حالت موتوری با اتصال آرمیچر به منبع جریان مستقیم یا یک باتری، هادی‌های آن حامل جریان خواهند شد. با جاری شدن جریان در هادی‌های سیم‌پیچی آرمیچر، در اطراف رتور میدان مغناطیسی به‌وجود می‌آید. این میدان را «میدان عرضی» می‌نامند (شکل ۱۲۵ ـ ۲).



شکل ۱۲۵ ـ ۲ میدان مغناطیسی عرضی رتور

هر قدر جریان سیم‌پیچی آرمیچر بیشتر باشد میدان عرضی قوی‌تر خواهد شد.

در ماشین‌های جریان مستقیم چون سیم‌پیچی آرمیچر در میان قطب‌ها قرار دارد، میدان قطب‌ها و میدان ناشی از عبور جریان از سیم پیچی آرمیچر بر هم‌دیگر تأثیر می‌گذارند و باعث تغییر شکل میدان طولی می‌شوند (شکل ۱۲۶ ـ ۲).



شکل ۱۲۶ ـ ۲

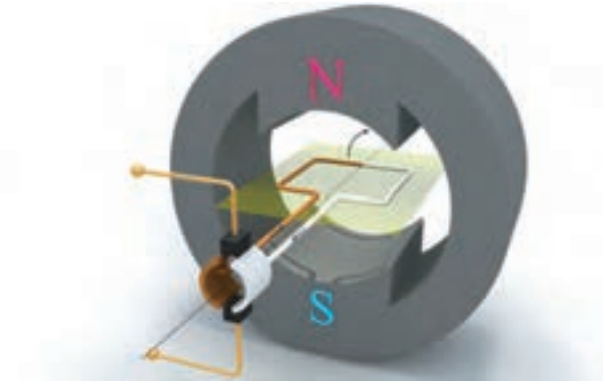
تأثیر میدان عرضی رتور بر میدان طولی قطب‌ها را «عکس‌العمل آرمیچر»[۱] می‌نامند.

عکس‌العمل آرمیچر پیامدهایی برای ماشین جریان مستقیم به همراه می‌آورد که عبارتند از:

- عکس‌العمل آرمیچر باعث ایجاد اعوجاج و تضعیف میدان طولی قطب‌ها می‌شود. لذا مقدار نیروی محرکه القایی در هادی‌های سیم‌پیچی آرمیچر کاهش می‌یابد. کم شدن نیروی محرکه القایی در ژنراتورها باعث کاهش ولتاژ خروجی می‌شود و در موتورها باعث افزایش جریان موتور خواهد شد.
- عکس‌العمل آرمیچر سبب جابه‌جایی صفحه خنثی می‌شود و آن را به محل جدیدی منتقل می‌کند. لذا هنگامی‌که هادی‌های سیم‌پیچی آرمیچر در

۱. Armature Reaction

محـــل قدیم صفحه خنثی قـــرار می‌گیرند در آنها نیروی محرکه القا می‌شود. در این لحظه هادی‌ها توسط جاروبک‌ها روی کمـوتاتور اتصـــال کوتـــاه شده‌اند (شکـــل ۱۲۷ ـ ۲).



شکل ۱۲۷ ـ ۲

بنابراین جریان شـــدیدی از هادی‌ها می‌گذرد. این جریان می‌تواند به ســـیم‌پیچی آرمیچر صدمه بزند و در محل تماس جاروبک‌ها با کموتاتور جرقه به‌وجود آورد. حـــرارت ناشـــی از جرقه به کموتاتور آســـیب می‌رساند.

۱۷ ـ ۲ ـ روش هـــای مقابله بـــا عکس‌العمل آرمیچر

شـــدت و ضعف پیامدهای عکس‌العمل آرمیچر تابع شدت جریان الکتریکی در هادی‌های سیم‌پیچی آرمیچر اســـت. ســـه روش برای مقابله با این پیامدها ارایه شده است. این روش‌ها عبارتند از:

- جابه‌جایی محل جاروبک‌ها
- قطب‌های کموتاسیون[۱] یا میان قطب[۲]
- سیم‌پیچ‌های جبران‌کننده[۳]

هر یـــک از این روش‌ها دارای نقـــاط قوت و ضعفی هستند که در ادامه توضیح داده شده‌اند.

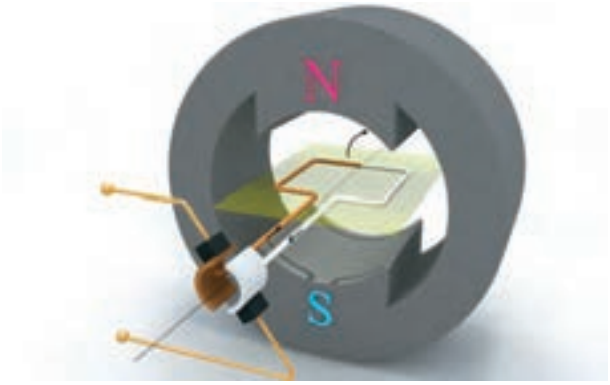
۱ ـ ۱۷ ـ ۲ ـ جابه‌جایی محل جاروبک‌ها

برای کاهـــش جرقه زیر جاروبک‌هـــا می‌توان محل جاروبک‌هـــا را روی کموتاتور به اندازه جابه‌جایی صفحه خنثی جابه‌جا کرد و آنها را به محل جدید صفحه خنثی برد. ولی اجرای آن معمولاً با مشـــکلاتی همراه است که به آن اشاره خواهد شد.

- میزان جابه‌جایی صفحه خنثی تابع جریان آرمیچر اســـت. بنابراین هر دفعه که جریان آرمیچر تغییر کند باید محل جاروبک‌ها را تنظیم کرد.
- صفحـــه خنثـــی در ژنراتورهـــا در جهت چرخش آرمیچـــر و در موتورها برخـــلاف جهت چرخش آرمیچـــر جابه‌جا می‌شـــود. بنابراین متناســـب با حالت ژنراتوری یا موتوری محل جاروبک‌ها تنظیم خواهد شد.
- جابه‌جـــا کردن جاروبک‌ها جرقـــه زیر جاروبک‌ها را کاهـــش می‌دهد اما در بهبـــود دیگر پیامدهای عکس‌العمل آرمیچر اثر ندارد.

در عمل جاروبک‌ها را به ازای دو سوم بار کامل ماشین جابه‌جـــا و ثابت می‌کنند. در این حالت، در بی‌باری و تا حدودی در بار کامل جرقه زده می‌شـــود. روش جابه‌جا کردن جاروبک‌ها برای کاهش جرقه منسوخ شده است. امروزه جابه‌جایی جاروبک‌ها تنها در ماشین‌های جریان مســـتقیم کوچک و بســـیار کوچک به کار می‌رود. علت این‌که در این ماشین‌ها هنوز این روش استفاده می‌شود این اســـت که راه‌حل های بهتر در چنین ماشـــین‌های کوچکی اقتصادی نیستند (شکل ۱۲۸ ـ ۲).

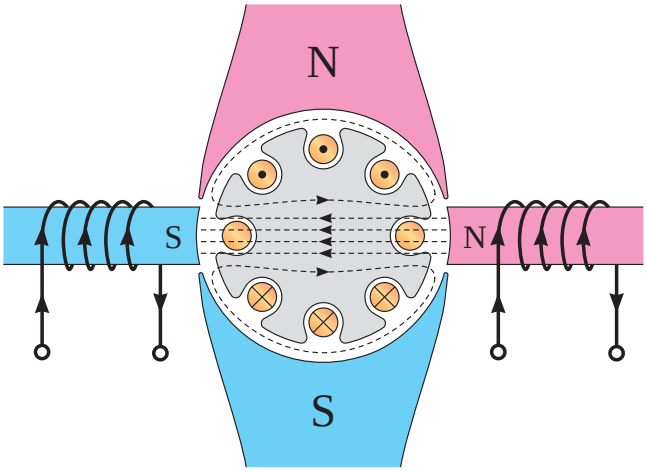
۱. Commutating Poles ۲. Interpoles ۳. Compensating Windings



شکل ۱۲۸ ـ ۲

۲ ـ ۱۷ ـ ۲ ـ قطب های کموتاسیون

روش مناسب مقابله با جرقه زیر جاروبک‌ها ایجاد هماهنگ خواهد بود (شکل ۱۲۹ ـ ۲).



شکل ۱۲۹ ـ ۲

استفاده از قطب‌های کموتاسیون بسیار متداول است و در ماشین‌های جریان مستقیم با قدرت بالای ۱ اسب بخار استفاده می‌شود.

قطب‌های کموتاسیون جرقه زیر جاروبک‌ها را رفع می‌کنند اما در بهبود اعوجاج میدان طولی قطب‌ها اثری ندارند زیرا کوچک هستند و بُرد میدان مغناطیسی آنها کم است و به میدان طولی قطب‌ها نمی‌رسد. بنابراین همچنان کاهش نیروی محرکه القایی در هادی‌های میدان مغناطیسی مخالف با میدان عرضی رتور است. برای ایجاد این میدان مغناطیسی قطب‌های کوچکی به نام «قطب‌های کموتاسیون[۱]» یا «میان قطب[۲]» استفاده می‌شود. قطب های کموتاسیون در فاصله بین قطب‌های اصلی ماشین جریان مستقیم، در محل صفحه خنثی مقابل هادی‌هایی که در حال عبور از صفحه خنثی هستند قرار می‌گیرند.

میدان مغناطیسی قطب‌های کموتاسیون از طریق سیم‌پیچ آنها تولید می‌شود. سیم‌پیچ قطب‌های کموتاسیون با سیم‌پیچی آرمیچر سری هستند. بدین ترتیب میدان مغناطیسی آنها با میدان عرضی آرمیچر

آرمیچر وجود دارد.

۳ ـ ۱۷ ـ ۲ ـ سیم‌پیچی‌های جبران‌کننده

برای خنثی کردن عکس‌العمل آرمیچر و بهبود اعوجاج میدان طولی قطب‌ها از«سیم‌پیچی جبران‌کننده»[۳] استفاده می‌شود.

سیم‌پیچی‌های جبران‌کننده درون شیارهایی در کف قطب‌ها به موازات شیارهای آرمیچر قرار می‌گیرند و این سیم‌پیچی‌ها، با سیم‌پیچی آرمیچر سری می‌شوند

۱. Commutating Poles ۲. Interpoles ۳. Compensating Windings

به طوری که هرگاه جریـــان آرمیچر تغییر کرد، جریان سیم‌پیچی‌های جبران کننده نیز تغییر کند.

میدان مغناطیسی سیم‌پیچی‌های جبران‌کننده باید مخالف میدان مغناطیســـی هادی‌های آرمیچر باشد. لذا جهت جریان در ســـیم‌پیچی‌های جبران‌کننده مخالف جهت جریان در هادی‌های آرمیچر اســـت که در مقابل آنها قرار می‌گیرد (شکل ۱۳۰ ـ ۲).

شکل ۱۳۰ ـ ۲

هرچند ســـیم‌پیچی‌های جبران‌کننـــده، اعوجاج در میدان طولـــی و جرقه زیر جاروبک‌ها را از بین می‌برند، امـــا نصب آنها قیمت ماشـــین‌های جریان مســـتقیم را افزایـــش می‌دهد. لذا ســـیم‌پیچی‌های جبران‌کننده در ماشـــین‌های جریان مســـتقیم با توان بالا که نصب آنها توجیه اقتصادی دارد استفاده می‌شود.

پرسش ۱۱ ـ ۲

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ میدان مغناطیســـی میـــان دو قطب غیرهمنام ..... نام دارد.

۲ ـ با قرار گرفتـــن هر یک از کلاف‌های آرمیچر در موقعیت ..... نیروی محرکه در آنها القا نمی‌شود.

۳ ـ هـــر قدر جریـــان آرمیچر ..... باشـــد میدان ..... قوی‌تر خواهد شد.

۴ ـ صفحـــه خنثـــی در اثـــر عکس‌العمـــل آرمیچر ..... می‌شود.

۵ ـ ســـیم‌پیچی قطب‌های کموتاسیون با سیم‌پیچی آرمیچر ..... هستند.

۶ ـ برای خنثی‌کـــردن عکس‌العمل آرمیچر و بهبود اعوجاج در میدان طولی قطب از ..... استفاده می‌شود.

۷ ـ جهت جریان در ســـیم‌پیچی‌های جبران‌کننده ..... جهت جریان ..... است.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ با قرار گرفتـــن هر یک از کلاف‌های آرمیچر در موقعیت صفحه خنثی نیروی محرکه در آنها القا می‌شود.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ میـــزان جابه‌جایـــی صفحه خنثـــی تابع جریان آرمیچر است.

صحیح ☐ غلط ☐

۳ ـ محل نصب قطب‌های کموتاسیون در فاصله بین قطب‌های اصلی ماشین جریان مستقیم است.

صحیح ☐ غلط ☐

۴ ـ قطب‌های کموتاســـیون جرقه زیر جاروبک ها را رفع می‌کند.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ میدان عرضی را تعریف کنید.

۲ ـ عکس‌العمل آرمیچر را توضیح دهید.

۳ ـ روش‌های مقابله بـــا عکس‌العمل آرمیچر را نام ببرید.

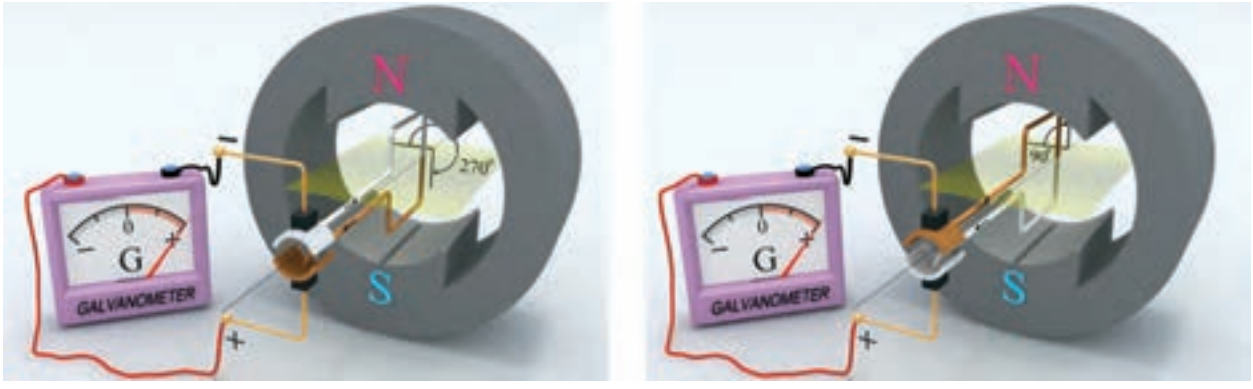
۴ ـ وظیفه قطب‌های کموتاسیون را بنویسید.

۵ ـ چـــرا قطب‌های کموتاســـیون اثـــری در بهبود اعوجاج میدان طولی ندارند؟

۶ ـ چرا ســـیم‌پیچی‌های جبران کننده با سیم‌پیچی آرمیچر سری می‌شوند؟

۱۸ ـ ۲ ـ کموتاسیون

در بخش ۲ ـ ۵ ـ ۲ نشان داده شد وقتی هادی‌های سیم‌پیچی آرمیچر از حوزه قطب N وارد حوزه قطب S می‌شوند جهت جریان در آنها معکوس می‌شود. معکوس شدن جریان زمانی اتفاق می‌افتد که هادی‌ها از صفحه‌ی خنثی عبور می‌کنند (شکل ۱۳۱ ـ ۲).

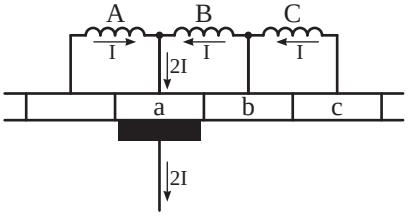


شکل ۱۳۱ ـ ۲

تغییـــر جهـــت جریـــان در کلاف‌هـــای آرمیچر را «کموتاسیون»[۱] گویند. به هنگام کموتاسیون جاروبک‌ها از یک تیغه به تیغهٔ دیگر کموتاتور می‌روند. مدت زمانی که طول می‌کشد تا جاروبک از یک تیغه به تیغه‌ی دیگر کموتاتور برود را «زمان کموتاســـیون» گویند. و آن را با Δt نشان می‌دهند.

برای بررســـی پدیـــده کموتاســـیون یـــا معکوس شـــدن جهت جریان کلاف‌های آرمیچـــر در طی زمان کموتاسیون، قسمتی از کموتاتور و تعدادی از کلاف‌های آرمیچر در شکل (۱۳۲ ـ ۲) نشان داده شده است.

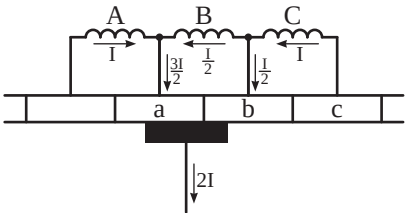
۱. Commutation



شکل ۱۳۲ ـ ۲

در این شکل هر کلاف I آمپر جریان دارد و جاروبک با تمـــاس به تیغه a کموتاتور جریان کلاف‌های A و B را انتقال می‌دهد.

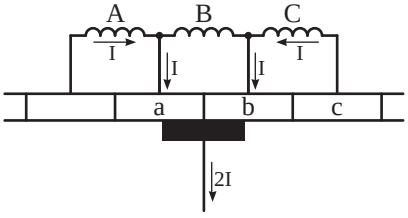
با گردش رتور لحظه‌ای فرا می‌رســد که جاروبک به تیغه‌هـــای a و b کموتاتور تـــماس می‌یـابد (شـکل ۱۳۳ ـ ۲).



شکل ۱۳۳ ـ ۲

این شکل لحظه‌ای را نشان می‌دهد که جریان کلاف B در اثر کاهش القای نیروی محرکه به $\frac{I}{۲}$ کاهش یافته است و توســط جاروبک اتصال کوتاه شده است. سطح تماســی جاروبک‌ها با تیغه‌های a و b کموتاتور تقسیم جریان را تعیین می‌کند. لذا سهم کلاف C کمتر از سهم کلاف A در تأمین جریان آرمیچر شده است.

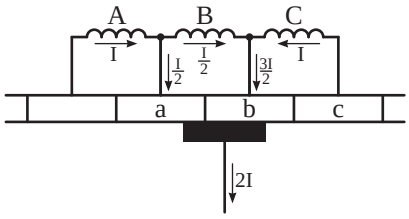
در ادامه گردش رتور لحظه‌ای فرا می‌رسد که سطح تماس جاروبــک با تیغه‌های a و b کموتاتور مســاوی می‌شود (شکل ۱۳۴ ـ ۲).



شکل ۱۳۴ ـ ۲

این شکل لحظه‌ای را نشان می‌دهد که کلاف B در صفحه خنثی قرار گرفته است. لذا نیروی محرکه در آن القا نمی‌شود و جریان آرمیچر توسط کلاف‌های A و C تأمین می‌شود.

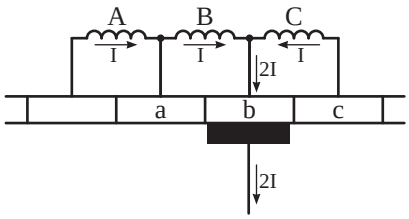
با گردش رتور ســطح تماســی جاروبک با تغیه b کموتاتور بیش‌تر از تیغه a می‌شود و کلاف B از صفحه خنثی خارج خواهد شــد و در آن نیــروی محرکه القا می‌شــود و جهت جریان آن معکوس می‌شــود (شکل ۱۳۵ ـ ۲).



شکل ۱۳۵ ـ ۲

این شــکل لحظه‌ای را نشان می‌دهد که کلاف B از صفحه خنثی خارج شــده اســت و در اثر القای نیروی محرکه جریان آن به $\frac{I}{۲}$ رســیده اســت. سطح تماس جاروبک با تیغه‌های a وb باعث شــده اســت که سهم کلاف A کمتــر از ســهم کلاف C در تأمیــن جریان آرمیچر باشد.

در ادامه گردش رتور جاروبــک با تیغه b کموتاتور تماس می‌یابــد و جریان کلاف‌هــای B و C را انتقال می‌دهد (شکل ۱۳۶ ـ ۲).



شکل ۱۳۶ ـ ۲

اگر معکوس شدن جریان کلاف B، یعنی تغییر کردن از I+ به صفر، و سپس از صفر به I–، در طی زمان کموتاسیون کامل شود، در این صورت «کموتاسیون خوب» خواهد بود. کموتاسیون خوب به این معنی است که هیچ جرقه‌ای در جاروبک مشاهده نشود. اگر معکوس شدن جریان کلاف B در طی زمان کموتاسیون کامل نشود، در این صورت جرقه‌هایی بین جاروبک و تیغه‌های کموتاتور ایجاد خواهد شد، لذا «کموتاسیون بد» خواهد بود. مواردی که باعث ایجاد جرقه بین جاروبک و تیغه کموتاتور می‌شوند به شرح زیر است:

۱ ـ در طی زمان کموتاسیون تغییر جریان در کلاف اتصال کوتاه شده نیروی ضد محرکه U_{Cemf} القا می‌کند که از رابطه (۲۶ ـ ۲) به‌دست می‌آید.

$$U_{Cemf} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} \qquad (۲\text{-}۲۶)$$

در این رابطه:

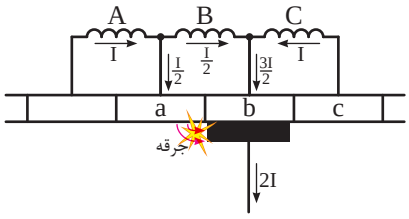
U_{Cemf} نیروی ضد محرکه

L ضریب خودالقایی کلاف اتصال کوتاه شده

ΔI تغییرات جریان

Δt زمان انجام کموتاسیون

نیروی ضد محرکه U_{Cemf} طبق قانون لنز با عامل به‌وجودآورنده‌اش یعنی «تغییرات جریان ΔI» مخالفت می‌کند و مانع تغییر جهت جریان به‌طور کامل در پایان زمان کموتاسیون می‌شود و جریان کلاف به I نمی‌رسد (شکل ۱۳۷ ـ ۲).



شکل ۱۳۷ ـ ۲ نمایش کموتاسیون بد

در این شکل فرض شده است جریان کلاف B در پایان زمان کموتاسیون به $\frac{I}{۲}$ رسیده است. بنابراین $\frac{۳I}{۲}$ جریان آرمیچر توسط کلاف‌های B و C، و $\frac{I}{۲}$ آن توسط جریان کلاف A از طریق تیغه a کموتاتور به صورت جرقه بین تیغه کموتاتور و جاروبک تأمین شده است. این جرقه‌ها باعث وارد آمدن خساراتی به جاروبک و تیغه کموتاتور می‌شود.

برای بهبود «کموتاسیون بد» باید اثر نیروی ضد محرکه القایی U_{Cemf} در کلافی که کموتاسیون در آن انجام می‌شود را از بین برد. برای این منظور به هنگام کموتاسیون زمانی که کلاف به صفحه خنثی می‌رسد در آن نیروی محرکه‌ای به نام «نیروی محرکه القایی معکوس کننده» القا می‌کنند. جهت نیروی محرکه القایی معکوس‌کننده مخالف جهت نیروی ضد محرکه U_{Cemf} است و اثر آن را خنثی می‌کند. همچنین به معکوس شدن جهت جریان در کلاف کمک می‌کند. لذا کموتاسیون به‌طور کامل و صحیح صورت می‌گیرد و جرقه بین تیغه کموتاتور و جاروبک ایجاد نمی‌شود.

برای ایجاد نیروی محرکه القایی معکوس کننده، از میدان مغناطیسی قطب‌های کموتاسیون که در صفحه خنثی قرار دارند استفاده می‌شود. بنابراین قطب‌های

کموتاسیون علاوه بر تعدیل عکس‌العمل آرمیچر، نقش خنثی‌کننـــده اثر خود القایی کلاف اتصال کوتاه شـــده سیم‌پیچی آرمیچر را در زمان کموتاسیون نیز به عهده دارد.

۲ ـ از دیگـــر علل ایجاد جرقه هنگام کموتاســـیون، اشکالات مکانیکی زیر می‌باشد:

- ناصافی سطح تیغه‌های کموتاتور
- ناصافی و جذب نبودن جاروبک‌ها
- تنظیم نبودن جاروبک نگه‌دار
- تنظیم نبودن محور کموتاتور نسبت به محور رتور
- کثیف شدن سطح تیغه‌های کموتاتور در اثر ذرات چربی یا گرد و غبار
- قرار گرفتن پلیســـه‌های بسیار ریز بین جاروبک و تیغه کموتاتور

بدیهی است که پس از شناسایی هر یک از اشکالات فوق نسبت به رفع آن اقدام می‌شود.

پرسش ۱۲ ـ ۲

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ تغییـــر جهت جریان در کلاف‌هـــای آرمیچر را ..... می‌نامند.

۲ ـ مدت زمانی که طول می‌کشد تا جاروبک از یک تیغه به تیغه دیگر کموتاتور برود ..... نام دارد.

۳ ـ در مدت زمان کموتاســـیون جهت جریان کلاف ..... می‌شود.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ تغییر جریان در کلاف های آرمیچر را عکس‌العمل آرمیچر می‌نامند.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ برای بهبود کموتاسیون باید اثر نیروی ضدمحرکه القایی را از بین برد.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ کموتاسیون را تعریف کنید.

۲ ـ پیامد کموتاسیون ناقص چیست؟

۳ ـ به منظور بهبود کموتاســـیون در ماشـــین‌های جریان مستقیم چه تدبیری اتخاذ می‌شود؟

فصل سوم

ژنراتورهای جریان مستقیم

هدف‌های رفتاری

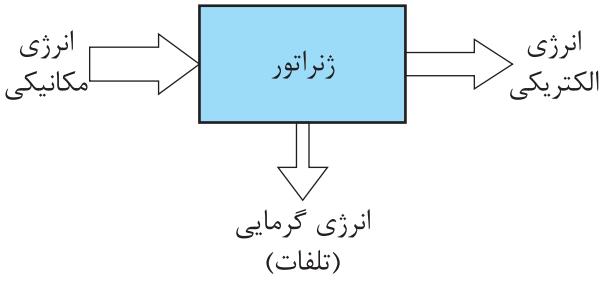
پس از پایان این فصل از فراگیر انتظار می‌رود که:

- ژنراتورهای جریان مستقیم را تعریف کند و آنها را طبقه‌بندی نماید.
- مشخصات اصلی ژنراتورهای جریان مستقیم را تعریف کند و آنها را از یکدیگر تمیز دهد.
- توان، راندمان و تلفات ژنراتورهای جریان مستقیم را تعریف کند و روابط حاکم بر آنها را توضیح دهد.
- تقسیم‌بندی تلفات انرژی در ژنراتورهای جریان مستقیم را توضیح دهد.
- نمودار پخش توان در ژنراتورهای جریان مستقیم را رسم کند و آن را تجزیه و تحلیل نماید.
- ژنراتور تحریک مستقل را تعریف کند و ساختمان داخلی آن را از روی شکل توضیح دهد.
- مدار الکتریکی معادل ژنراتور تحریک مستقل را رسم کند و آن را تجزیه و تحلیل نماید.
- منحنی مشخصه‌های ژنراتور تحریک مستقل را از هم تمیز دهد.
- کاربرد ژنراتور تحریک مستقل را توضیح دهد.
- ژنراتور تحریک شنت را تعریف کند و ساختمان داخلی آن را از روی شکل توضیح دهد.
- مدار الکتریکی معادل ژنراتور تحریک شنت را رسم کند و آن را تجزیه و تحلیل نماید.
- منحنی مشخصه‌های ژنراتور تحریک شنت را از هم تمیز دهد.
- کاربرد ژنراتور تحریک شنت را توضیح دهد.
- ژنراتور تحریک سری را تعریف کند و ساختمان داخلی آن را از روی شکل توضیح دهد.
- مدار الکتریکی معادل ژنراتور تحریک سری را رسم کند و آن را تجزیه و تحلیل نماید.
- منحنی مشخصه‌های ژنراتور تحریک سری را از هم تمیز دهد.
- کاربرد ژنراتور تحریک سری را توضیح دهد.
- ژنراتور کمپوند را تعریف کند و ساختمان داخلی آن را از روی شکل توضیح دهد.
- مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند را رسم کند و آن را تجزیه و تحلیل نماید.
- منحنی مشخصه‌های ژنراتور کمپوند را از هم تمیز دهد.

- کاربرد ژنراتور کمپوند را توضیح دهد.
- ضرورت کنترل ولتاژ در ژنراتورهای جریان مستقیم را توضیح دهد.
- عوامل موثر در مقدار ولتاژ ژنراتورهای جریان مستقیم را توضیح دهد.
- روش‌های تنظیم ولتاژ در ژنراتورهای جریان مستقیم را توضیح دهد.
- به پرسش‌های این فصل پاسخ دهد.
- تمرین‌های این فصل را حل نماید.

مقدمه

ژنراتورهای جریان مستقیم[1] ماشین‌هایی هستند که سیستم الکتریکی آنها جریان مستقیم است و انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. بدیهی است در فرآیند این تبدیل، بخشی از انرژی به گرما تبدیل خواهد شد که از آن به عنوان «تلفات» نام برده می‌شود (شکل ۱ ـ ۳).



شکل ۱ ـ ۳

از مزایای برجسته ژنراتورهای جریان مستقیم این است که دارای مشخصه‌های کاری هستند که به سادگی قابل کنترل می‌باشند. ویژگی ژنراتورهای جریان مستقیم این است که با ترکیب‌های متنوع در ارتباط مدار تحریک با مدار آرمیچر می‌توان به ژنراتورهای تحریک مستقل، تحریک موازی، تحریک سری و تحریک ترکیبی دست یافت که هر یک از آنها مشخصه‌های ولت ـ آمپر منحصر به خود را دارند.

در سال‌های اخیر فناوری الکترونیک قدرت، آنچنان پیشرفت کرده است که در حوزه‌هایی که در گذشته در انحصار ژنراتورهای جریان مستقیم بود، اکنون از مدارهای الکترونیکی استفاده می‌شود. البته این به آن مفهوم نیست که امروزه دیگر ژنراتورهای جریان مستقیم تولید نمی‌شوند؛ بلکه تنوع و انعطاف و سادگی نسبی سیستم‌های تحریک آنها تداوم حضورشان در حوزه وسیعی از کاربردها را تضمین کرده است. بعضی از کاربردهای ژنراتورهای جریان مستقیم در جوشکاری با کیفیت بالا در اسکلت‌های فلزی و دینامومتر برای اندازه‌گیری گشتاور و تاکومتر برای اندازه‌گیری سرعت و در مدارات کنترل با سیستم‌های حلقه بسته و آبکاری الکتریکی و نظایر آن غیرقابل جایگزین است. وقتی آبکاری در تجهیزات گران قیمت قطعات هواپیما و غیره لازم باشد ولتاژ DC ثابت بدون وقفه به‌وسیله چند ژنراتور جریان مستقیم که به طور موازی با هم کار می‌کنند تامین می‌شود.

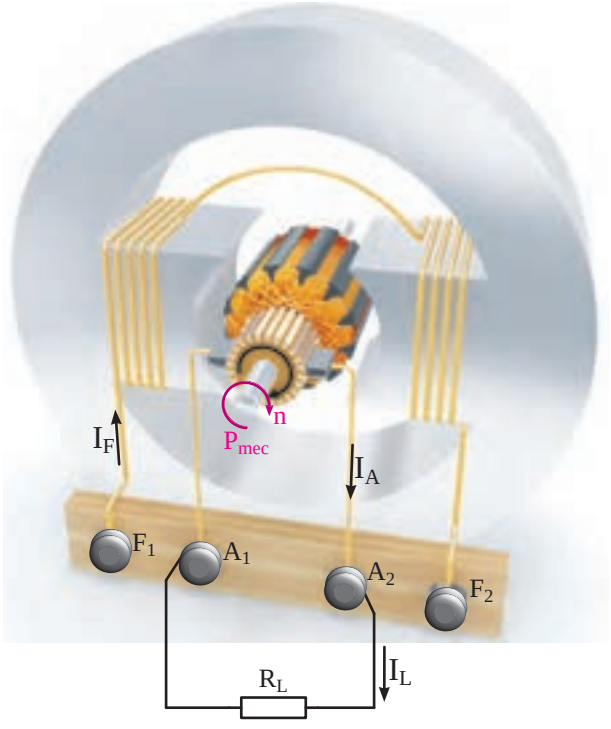
در شکل (۲ ـ ۳) یک ژنراتور جریان مستقیم نشان داده شده است.

۱. Direct Current Generators

شکل ۲ ـ ۳ ژنراتور جریان مستقیم

۱ ـ ۳ ـ پخش توان[۱] و تلفات در ژنراتورهای جریان مستقیم

طرح ساختمانی ژنراتور جریان مستقیم در شکل (۳ ـ ۳) نشان داده شده است.



شکل ۳ ـ ۳ طرح ساختمانی ژنراتور جریان مستقیم

قسمت ساکن یا استاتور قطب‌های برجسته دارد. درصورتی‌که سیم‌پیچی قطب‌ها توسط جریان I_F تحریک شوند، فوران ناشی از آن در فاصله هوایی توزیع خواهد شد.

رتور یا قسمت متحرک که سیم‌پیچی آرمیچر در شیارهای آن سیم‌بندی شده است درون میدان مغناطیسی قطب‌های استاتور قرار داده شده است. با گرداندن رتور، در سیم‌پیچی آرمیچر نیروی محرکه القایی E_A القا می‌شود و ماشین جریان مستقیم حالت ژنراتوری به خود گرفته و در پایانه‌های A_1 و A_2 ولتاژ V_T ایجاد می‌شود. در صورت اتصال بار R_L به پایانه‌های A_1 و A_2 جریان I_A در سیم‌پیچی آرمیچر و جریان I_L در بار R_L جاری می‌شود.

توان مکانیکی[۲] مورد نیاز برای گرداندن محور رتور توسط موتور دیزلی یا بنزینی یا هر محرک دیگری تامین می‌شود.

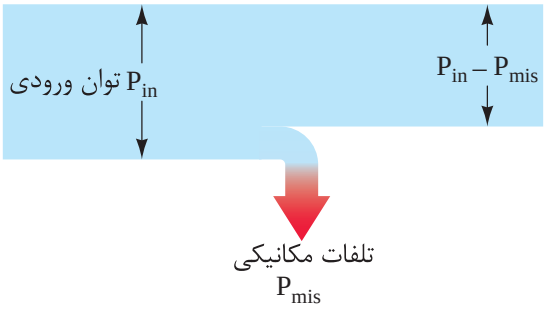
در ژنراتورهایی که توان الکتریکی مورد نیاز تحریک P_F توسط منبع خارجی تامین می‌شود، مجموع توان مکانیکی و توان تحریک P_F به عنوان توان ورودی P_{in} محسوب می‌شود. در صورتی‌که توان الکتریکی مورد نیاز تحریک P_F توسط خودِ ژنراتور تامین شود، توان مکانیکی آنها به عنوان توان ورودی P_{in} محسوب خواهد شد.

با گردش رتور، اصطکاک میان قسمت‌های ساکن و متحرک ایجاد خواهد شد. بخشی از این اصطکاک در یاتاقان‌ها است که ناشی از سایش میان قسمت متحرک با قسمت ساکن و بخش دیگر آن در اثر اصطکاک بین قسمت‌های متحرک فن ماشین با هوا به وجود می‌آید.

مقداری از توان ورودی P_{in} که در اثر اصطکاک

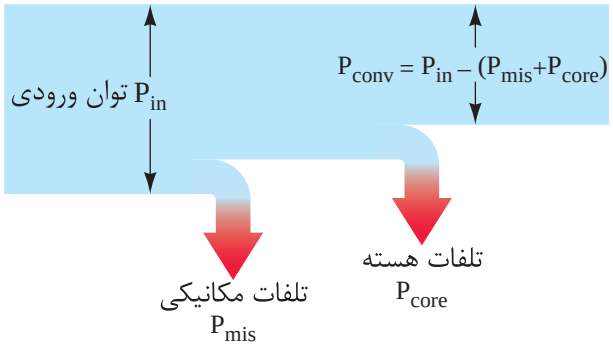
۱. Power Flow
۲. Mechanical Power

به گرما تبدیل می‌شـــود را «تلفات مکانیکی[1]» گویند و با P_{mis} نشـــان می‌دهند. تلفـــات مکانیکی P_{mis} از توان ورودی P_{in} می‌کاهد. این فرآیند در شکل (۴ ـ ۳) نشان داده شده است.



شکل ۴ ـ ۳

با جاری شدن فوران در هسته استاتور و رتور و در اثر گرداندن رتور، تلفات فوکو P_F و تلفات هیسترزیس P_H در هسته استاتور و رتور به‌وجود می‌آید. مقداری از توان ورودی P_{in} که در اثر تلفات فوکو و هیســـترزیس درون هسته به گرما تبدیل می‌شود را «تلفات هسته[2]» گویند و با P_{core} نشـــان می‌دهند. تلفات هسته P_{core} همراه با تلفـــات مکانیکی P_{mec} از تـــوان ورودی P_{in} می‌کاهد و بعد از کم شدن، توان باقی‌مانده را «توان تبدیل شده[3]» یا «توان الکترومغناطیســـی» می‌گویند و با P_{conv} نشان می‌دهند. این فرآیند در شـــکل (۵ ـ ۳) نشان داده شده است.



شکل ۵ ـ ۳

توان تبدیل شده توانی است که از شکل مکانیکی به شکل الکتریکی تبدیل شده است.

توان تبدیل شـــده P_{conv} شـــکل الکتریکی دارد و از رابطه (۱ ـ ۳) نیز قابل محاسبه است.

$$P_{conv} = E_A \cdot I_A \qquad (۳-۱)$$

در این رابطه:

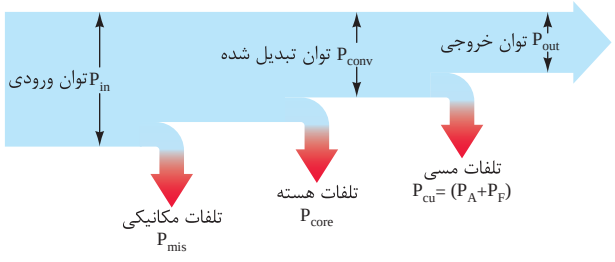
P_{conv} توان تبدیل شده [w]

E_A نیروی محرکه القایی آرمیچر [V]

I_A جریان آرمیچر [A]

می‌باشد.

با جاری شدن جریان در ســـیم‌پیچی‌های آرمیچر و تحریک، این سیم‌پیچی‌ها گرم می‌شوند. مقداری از توان تبدیل شـــده P_{conv} که در ســـیم‌پیچی‌ها به گرما تبدیل می‌شود را «تلفات مسی[4]» گویند و با P_{cu} نشان می‌دهند. بخشی از تلفات مسی که در سیم‌پیچی آرمیچر می‌باشد را «تلفات آرمیچر» گویند و با P_A نشـــان می‌دهند. بخش دیگر تلفات مســـی در ســـیم‌پیچی تحریک بوده و آن را «تلفات تحریک» گویند و با P_F نشـــان می‌دهند[5]. تلفات مســـی (P_A+P_F) از توان تبدیل شده P_{conv} می‌کاهد و بعد از کم شدن، توان باقی‌مانده را «توان خروجی» گویند و با P_{out} نشـــان می‌دهند. این فرآیند در شـــکل (۶ ـ ۳) نشان داده شده است. به این شکل «نمودار پخش توان[6]» در ژنراتورهای جریان مستقیم گویند.



شکل ۶ ـ ۳ نمودار پخش توان در ژنراتورهای جریان مستقیم

۱. Miscellaneous Losses ۲. Core Losses ۳. Converted Power ۴. Copper Losses

۵. معمولاً تلفات جاروبک‌ها در تلفات آرمیچر منظور می‌شود. در صورت وجود سیم‌پیچی جبران‌گر و قطب کمکی، تلفات مسی آنها محاسبه و منظور خواهد شد.

۶. Power Flow Diagram

توان خروجی P_{out} الکتریکی است و از رابطه (۲ ـ ۳) نیز قابل محاسبه است.

$$P_{out} = V_T \cdot I_L \qquad (۳-۲)$$

که در این رابطه:

P_{out} توان خروجی [W]

V_T ولتاژ ترمینال‌های ژنراتور [V]

I_T جریان بار [A]

مثال ۱ ـ ۳ ـ ژنراتور جریان مستقیمی ۴ kW با تلفات مسی ۳۰۰ W و هسته ۵۰۰ W و مکانیکی ۲۰۰ W مفروض است. مطلوب است:

الف ـ توان تبدیل شده P_{conv}

ب ـ توان ورودی P_{in}

حل:

واحد توان خروجی را به وات تبدیل می‌نماییم:

$$P_{out} = ۴_{KW} \times ۱۰۰۰ = ۴۰۰۰ [W]$$

با توجه به نمودار پخش توان شکل (۶ ـ ۳) داریم:

$$P_{conv} = P_{out} + (P_A + P_F)$$

$$P_{conv} = ۴۰۰۰ + (۳۰۰) = ۴۳۰۰ [W]$$

$$P_{in} = P_{conv} + P_{core} + P_{mis}$$

$$P_{in} = ۴۳۰۰ + ۵۰۰ + ۲۰۰ = ۵۰۰۰ [W]$$

۲ ـ ۳ ـ تلفات کل ژنراتورهای جریان مستقیم

حاصل جمع تلفات در ژنراتورهای جریان مستقیم را «تلفات کل» گویند و آن را با ΔP نشان می‌دهند. با توجه به نمودار پخش توان شکل (۶ ـ ۳) تلفات کل برابر است با:

تلفات کل = تلفات مکانیکی + تلفات هسته + تلفات مسی

و به‌صورت رابطه (۳ ـ ۳) نوشته می‌شود:

$$\Delta P = P_{mis} + P_{core} + P_{cu} \qquad (۳-۳)$$

تفاوت بین توان ورودی P_{in} و توان خروجی P_{out}، تلفات کل ΔP است و آن را با رابطه (۴ ـ ۳) نشان می‌دهند:

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \qquad (۳-۴)$$

تلفات مکانیکی P_{mis} و تلفات هسته P_{core} را «تلفات ثابت» گویند.

زیرا تلفات مکانیکی تابع سرعت محور آرمیچر n است و تلفات هسته تابع نیروی محرکه القایی آرمیچر E_A می‌باشد. در ژنراتورهای جریان مستقیم سعی می‌شود کمیت‌های سرعت و نیروی محرکه القایی آرمیچر ثابت نگه داشته شوند. در این صورت تلفات مکانیکی و هسته که تابع این دو کمیت هستند نیز مقداری ثابت خواهند داشت.

تلفات مسی شامل تلفات آرمیچر P_A و تلفات تحریک P_F را «تلفات متغیر» گویند. زیرا تلفات آرمیچر متناسب با مجذور جریان آرمیچر I_A و تلفات تحریک متناسب با مجذور جریان تحریک I_F می‌باشد. مقادیر جریان‌های آرمیچر و تحریک با توجه به نوع ژنراتور به جریان مصرف‌کننده I_L بستگی دارد و جریان مصرف کننده با تغییر مصرف کننده، تغییر می‌کند، لذا تلفات مسی تغییر می‌کند.

مثال ۲ ـ ۳ ـ یک ژنراتور جریان مستقیم توسط موتور دیزلی به قدرت ۱۰HP گردانده می‌شود. اگر

تلفـــات مکانیکی ۲۵۰ W و تلفات هســـته ۱۶۵ W و تلفات مسی ۶۲۵ W باشد مطلوب است:

الف ـ تلفات کل

ب ـ توان خروجی

حل:

از رابطه (۳ ـ ۳) تلفات کل به‌دست می‌آید:

$$\Delta P=P_{mis}+P_{core}+(P_A+P_F)$$
$$\Delta P=۲۵۰+۱۶۵+۶۲۵=۱۰۴۰\,[W]$$

واحد توان ورودی بر حسب اسب بخار HP است؛ آن را به وات تبدیل می‌کنیم:

$$P_{in}=۱۰_{HP}\times ۷۴۶=۷۴۶۰[W]$$

توان خروجی از رابطه (۴ ـ ۳) به‌دست می‌آید:

$$\Delta P=P_{in}-P_{out}$$
$$P_{out}=P_{in}-\Delta P$$
$$P_{out}=۷۴۶۰-۱۰۴۰=۶۴۲۰\,[W]$$

۳ ـ ۳ ـ بازده ژنراتورهای جریان مستقیم

در ژنراتورهای جریان مســـتقیم تـــوان ورودی P_{in} مکانیکی است و توان خروجی P_{out} الکتریکی می‌باشد. نســـبت توان خروجی به تـــوان ورودی را «بـــازده[1]» یا رانـدمان گویند و آن را با نشان η می‌دهند و از رابـطه (۵ ـ ۳) به‌دست می‌آید:

$$\eta=\frac{P_{out}}{P_{in}} \qquad (۳-۵)$$

بـــازده را بـر حسب درصد بیان می‌کنند و از رابطه (۶ ـ ۳) محاسبه می‌شود:

$$\%\eta=\frac{P_{out}}{P_{in}}\times ۱۰۰ \qquad (۳-۶)$$

بازده بدون واحد است؛ زیرا نسبت دو توان خروجی و ورودی است.

هر چه بازده به ۱۰۰٪ نزدیک شـــود تلفات ژنراتور کمتر خواهد شد.

مثال ۳ ـ ۳ ـ یک ژنراتور جریان مستقیم ۴ kW، ۲۰۰ V با بازده ۸۰٪ مفروض است. مطلوب است:

الف ـ توان ورودی P_{in}

ب ـ جریان بار I_L

حل:

از رابطه (۵ ـ ۳) توان ورودی به‌دست می‌آید:

$$\eta=\frac{P_{out}}{P_{in}}$$
$$P_{in}=\frac{P_{out}}{\eta}$$

بازده ۸۰٪ است؛ یعنی $\frac{۸۰}{۱۰۰}$ که برابر ۰/۸ است.

$$P_{in}=\frac{۴kw}{۰/۸}=۵\,[kW]$$

جریان بار از رابطه (۲ ـ ۳) به‌دست می‌آید:

$$P_{out}=V_T\cdot I_L$$
$$I_L=\frac{P_{out}}{V_T}$$

۱. Efficiency

توان خروجی بر حسب kW است آن را به W تبدیل می‌کنیم:

$$P_{out} = ۴_{KW} \times ۱۰۰۰ = ۴۰۰۰ [W]$$

$$I_L = \frac{۴۰۰۰}{۲۰۰} = ۲۰ [A]$$

پرسش ۱ ـ ۳

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ فرآیند تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی توسط ..... صورت می‌گیرد.

۲ ـ توانی که در اثر ..... و ..... در هسته به گرما تبدیل می‌شود را ..... گویند.

۳ ـ تلفات مکانیکی تابع ..... است.

۴ ـ از مزایای ژنراتورهای جریان مستقیم این است که دارای مشخصه‌های کاری هستند که به ..... قابل ..... است.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ در ماشین‌های الکتریکی فرآیند تبدیل انرژی برگشت‌پذیر است.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ حاصل جمع تلفات در ژنراتورهای جریان مستقیم را تلفات کل گویند.

صحیح ☐ غلط ☐

۳ ـ تلفات آرمیچر و تلفات تحریک را تلفات ثابت گویند.

صحیح ☐ غلط ☐

۴ ـ از ژنراتور جریان مستقیم در جوشکاری و اندازه‌گیری گشتاور استفاده می‌شود.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ ژنراتور الکتریکی را تعریف کنید.

۲ ـ نمودار پخش توان در ژنراتورهای جریان مستقیم را رسم نمایید و کمیت‌های الکتریکی را بر روی آن مشخص کنید.

۳ ـ تلفات مکانیکی را تعریف کنید.

۴ ـ مفهوم توان تبدیل شده در ژنراتورهای جریان مستقیم را بیان کنید.

۵ ـ تلفات تحریک را تعریف کنید.

۶ ـ تلفات ثابت در ژنراتورهای جریان مستقیم کدام‌اند؟ چرا؟

۷ ـ بازده را تعریف کنید.

۸ ـ آیا بازده ژنراتورها به ٪۱۰۰ می‌رسد؟ چرا؟

تمرین ۱ ـ ۳

۱ ـ ژنراتور جریان مستقیمی با توان ۵ HP گردانده می‌شود. در صورتی‌که تلفات هسته ۱۵۰ W و تلفات مسی ۲۲۰ W و تلفات مکانیکی ۱۳۰ W باشد.

مطلوب است:

الف ـ توان تبدیل شده

ب ـ توان خروجی

۲ ـ ژنراتور جریان مستقیم ۱ kW توسط موتور دیزلی به قدرت ۲ HP گردانده می‌شود. اگر تلفات ثابت ۱۰۰ W باشد مطلوب است:

الف ـ تلفات کل

ب ـ تلفات متغیر

۳ ـ یک ژنراتور جریان مستقیم ۱۲ V، ۱۵ A توسط موتور بنزینی با قدرت ۲۵۰ W گردانده می‌شود.

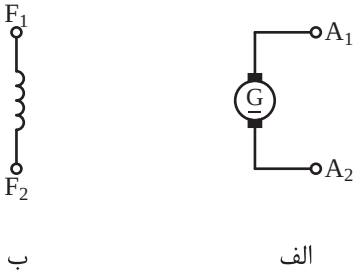
مطلوب است:

الف ـ توان خروجی

ب ـ بازده

۴ ـ ۳ ـ علامت اختصـــاری و مدار الکتریکی معادل ژنراتور جریان مستقیم

طـــرح ساختمانی ژنراتور جریان مستقیم شـــکل (۳ ـ ۳) دو قســـمت مجزا از یکدیگر را نشـــان می‌دهد. یکی سیم‌پیچ تحریک درون استاتور و دیگری سیم‌پیچ آرمیچر بر روی رتور می‌باشـــد. علامـــت اختصاری این دو قسمت در شـــکل (۷ ـ ۳) نشان داده شده است. به کمک علامت‌های اختصاری می‌توان نمایش ساده‌ای از ژنراتورهای جریان مستقیم ارایه کرد.



شکل ۷ ـ ۳ الف ـ علامت اختصاری آرمیچر

ب ـ علامت اختصاری سیم‌پیچ تحریک

از علامـــت اختصاری بـــرای نشـــان دادن اتصالات الکتریکـــی در ژنراتورهای جریان مســـتقیم اســـتفاده می‌شود.

تحلیل الکتریکـــی ژنراتورهای جریان مســـتقیم به منظور محاســـبه کمیت‌های الکتریکـــی ولتاژ، جریان و توان با استفاده از مدار الکتریکی معادل امکانپذیر است. مدار الکتریکی معادل ســـیم‌پیچ تحریک یک مدار RL ســـری می‌باشد که در شـــکل (۸ ـ ۳) نشان داده شده است.

شکل ۸ ـ ۳ مدار الکتریکی معادل سیم‌پیچ تحریک

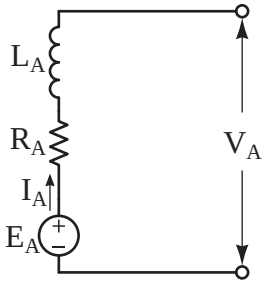
در این شکل:

R_F معادل مقاومت اهمی سیم‌پیچ تحریک

L_F ضریب خود القایی سیم‌پیچ تحریک

I_F جریان سیم‌پیچ تحریک

مدار الکتریکی معادل ســـیم‌پیچ آرمیچر یک منبع ولتاژ مســـتقل جریان مســـتقیم ســـری با یک مقاومت می‌باشد که در شکل (۹ ـ ۳) نشان داده شده است.



شکل ۹ ـ ۳ مدار الکتریکی معادل سیم‌پیچ آرمیچر

در این شکل:

E_A معادل نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچ آرمیچر [V]

R_A معادل مقاومت اهمی سیم‌پیچی آرمیچر [Ω]

L_A ضریب خود القایی سیم‌پیچی آرمیچر [H]

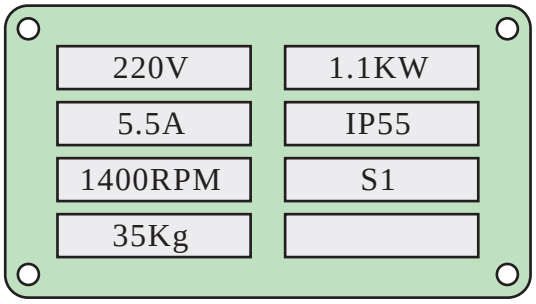
I_A جریان سیم‌پیچی آرمیچر [A]

V_A ولتاژ دو سر آرمیچر [V]

۵ ـ ۳ ـ مشـــخصات ژنراتورهـــای جریـــان مستقیم

ژنراتورهای جریان مســـتقیم توسط کارخانه سازنده مورد آزمایش‌هـــای متعددی قرار می‌گیرند. نتایجی که از این آزمایش‌ها به‌دســـت می‌آید به عنوان «مشخصات ژنراتور جریان مســـتقیم» ارایه می‌شوند. این مشخصات در سه گروه دسته‌بندی می‌شوند. در ادامه به هر یک از این گروه‌ها پرداخته شده است.

۱ ـ گروه اول شـــامل مشـــخصاتی است که به روی پلاک ماشین ثبت می‌شـــود. در شکل (۱۰ ـ ۳) پلاک یک ژنراتور جریان مستقیم نشان داده شده است.



شکل ۱۰ ـ ۳

مشخصاتی که بر روی پلاک ثبت می‌شوند را «مقادیر نامـــی» می‌نامند. معمولاً ژنراتورها بـــه گونه‌ای طراحی می‌شوند که به ازای مقادیر نامی آسیب نبینند.

مشـــخصات پلاک شکل (۱۰ ـ ۳) مربوط به ژنراتور جریان مستقیم ۲۲۰ ولتی ۵/۵ آمپری است که با سرعت ۱۴۰۰ دور بر دقیقه باید گردانده شـــود. توان نامی این ژنراتور ۱/۱ کیلووات اســـت و دارای وزن ۳۵کیلوگرم و کلاس حفاظتی IP55 و شرایط کاری S1 می‌باشد.

فعالیت ۱ ـ ۳

درباره کلاس‌های عایقی و شرایط کاری تحقیق کنید.

۲ ـ گروه دوم شـــامل مشـــخصاتی اســـت که نتایج آزمایش‌های بی‌باری و بارداری ژنراتور را پس از تنظیم، ترسیم می‌کنند و «منحنی مشخصه[۱]» نامیده می‌شوند. در ادامه به این منحنی مشخصه‌ها پرداخته شده است.

۱ ـ ۵ ـ ۳ ـ منحنی مشخصه بی‌باری $E_A=f(I_F)$

منحنی مشخصه بی‌باری تأثیر جریان تحریک I_F بر نیروی محرکه القایی آرمیچر E_A را در ســـرعت ثابت و بدون بار $I_L=0$ نشان می‌دهد. این مشخصه در بی‌باری به‌دست می‌آید و مشابه منحنی مغناطیسی است؛ لذا آن را «مشخصه مدار باز» یا «مشخصه مغناطیسی» گویند.

۲ ـ ۵ ـ ۳ ـ منحنی مشخصه بارداری $V_T=f(I_L)$

منحنی مشخصه بارداری تأثیر جریان بار I_L بر ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T در سرعت ثابت و جریان تحریک ثابت را نشان می‌دهد.

۳ ـ ۵ ـ ۳ ـ منحنی مشخصه تنظیم $I_f=f(I_L)$

منحنی مشـــخصه تنظیم تغییر جریان تحریک I_F را به ازای تغییر جریان بار I_L در سرعت ثابت و ولتاژ ثابت نشان می‌دهد.

۳ ـ گروه ســـوم شامل مشخصاتی است که از تجزیه و تحلیل اطلاعات مشـــخصات دسته اول و دوم به‌دست می‌آید و محاســـبه می‌شـــوند. یکی از این مشـــخصات کمیـــت «تنظیم ولتاژ[۲] V_R» اســـت کـــه تغییرات ولتاژ خروجی بدون بار نســـبت به ولتاژ بار را نشان می‌دهد و از رابطه (۷ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

۱. Characteristic Curve ۲. Voltage Regulation

$$V_R = \frac{E_A - V_T}{V_T} \qquad (۳-۷)$$

تنظیم ولتاژ V_R را به‌صورت درصد بیان می‌کنند و از رابطه (۸ ـ ۳) محاسبه می‌شود.

$$\%V_R = \frac{E_A - V_T}{V_T} \times ۱۰۰ \qquad (۳-۸)$$

که در این رابطه:

V_R تنظیم ولتاژ

E_A نیروی محرکه القایی آرمیچر

V_T ولتاژ پایانه‌های ژنراتور

هر چه درصد تنظیم ولتاژ کمتر باشد، در اثر افزایش جریان بار، ولتاژ پایانه‌های ژنراتور کمتر کاهش می‌یابد. بنابراین ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T از پایداری بیشتری برخوردار است.

پرسش ۲ ـ ۳

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ کمیت‌هایی که بر روی پلاک ثبت می‌شوند را ..... می‌نامند.

۲ ـ منحنی مشخصه بارداری تأثیر ..... بر ..... در سرعت ثابت و ..... نشان می‌دهد.

۳ ـ منحنی مشخصه بی‌باری تأثیر ..... بر ..... را در ..... و بدون بار نشان می‌دهد.

پرسش‌های صحیح غلط

۱ ـ منحنی مشخصه تنظیم تغییر جریان تحریک را به ازای تغییر جریان بار در سرعت متغیر و ولتاژ ثابت نشان می‌دهد.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ نتایجی که از آزمایش‌های ژنراتور به‌دست می‌آید منحنی مشخصه ژنراتور جریان مستقیم نام دارد.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ کاربرد علامت اختصاری در ژنراتورهای جریان مستقیم را بیان کنید.

۲ ـ کاربرد مدار الکتریکی معادل ژنراتورهای جریان مستقیم را توضیح دهید.

۳ ـ اطلاعات پلاک شکل (۱۰ ـ ۳) را استخراج نمایید و هر یک را توضیح دهید.

۴ ـ منحنی مشخصه بی‌باری را تعریف کنید.

۵ ـ مدار الکتریکی معادل سیم‌پیچ تحریک و آرمیچر را رسم کنید و کمیت آنها را مشخص نمایید.

۶ ـ درصد تنظیم ولتاژ را تعریف کنید و رابطه آن‌را بنویسید.

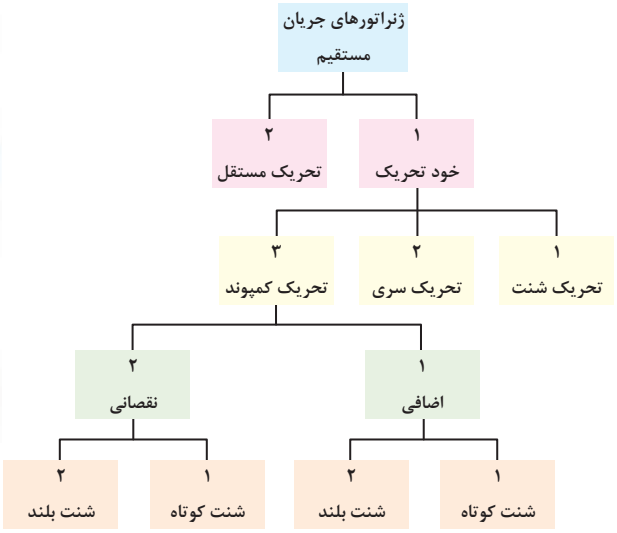
۷ ـ منحنی مشخصه بارداری را تعریف کنید.

۶ ـ ۳ ـ طبقه‌بندی ژنراتورهای جریان مستقیم

ژنراتورهای جریان مستقیم با توجه به نحوهٔ تامین تغذیه تحریک به ژنراتورهای «تحریک مستقل[۱]» و «خود تحریک[۲]» تقسیم‌بندی شده‌اند. ژنراتورهای خود تحریک نیز بر اساس ارتباط الکتریکی بین مدار آرمیچر با مدار

۱. Separately Excited ۲. Self Excited

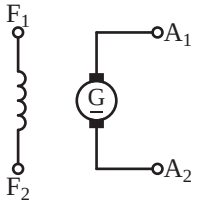
تحریک بـــه ژنراتورهای «تحریک شـــنت[1]» ، «تحریک سری[2]» و «تحریک کمپوند[3]» تقسیم‌بندی می‌شوند. در شکل (۱۱ ـ ۳) نحوه تقســـیم‌بندی ژنراتورهای جریان مستقیم نشان داده شده است.



شکل ۱۱ ـ ۳ تقسیم‌بندی ژنراتورهای جریان مستقیم

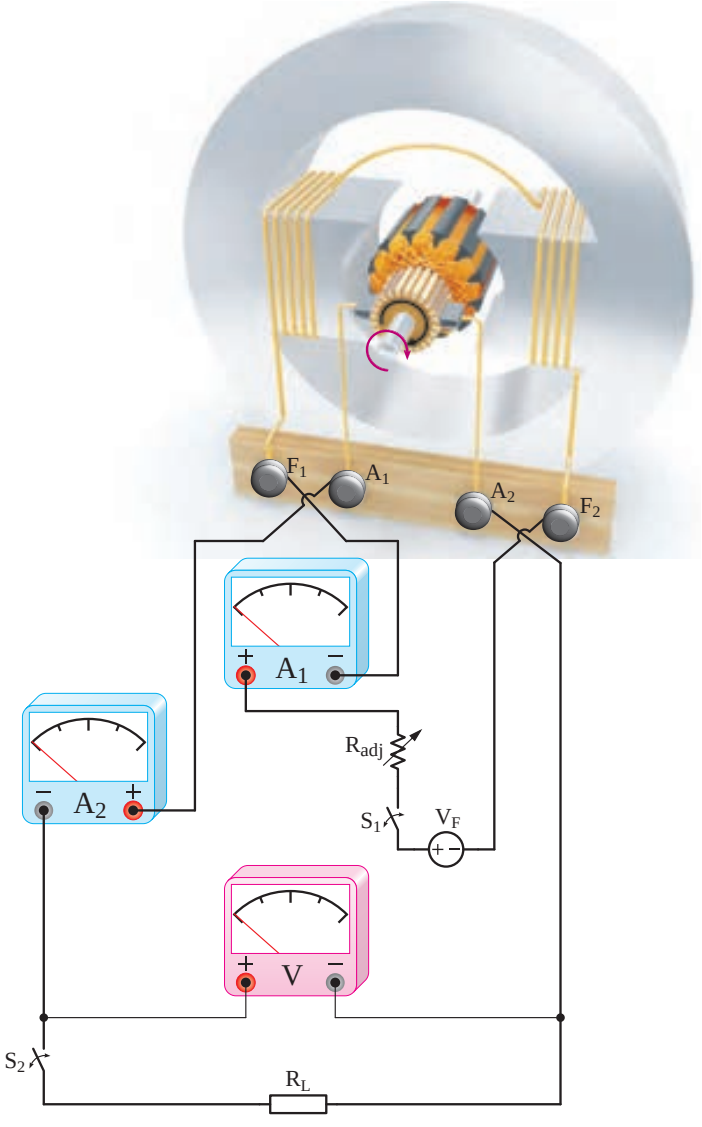
۷ ـ ۳ ـ ژنراتور جریان مســـتقیم با تحریک مستقل

ژنراتـــور جریان مســـتقیم با تحریک مســـتقل را به اختصار «ژنراتور تحریک مســـتقل» گوینـــد. در ژنراتور تحریک مســـتقل ارتباط الکتریکی بیـــن مدار آرمیچر با مـــدار تحریک وجود ندارد. علامـــت اختصاری موتور تحریک مســـتقل در شـــکل (۱۲ ـ ۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۲ ـ ۳ نقشه اختصاری ژنراتور تحریک مستقل

طرح ســـاختمانی ژنراتور تحریک مستقل در شکل (۱۳ ـ ۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۳ ـ ۳ طرح ساختمانی ژنراتور تحریک مستقل

در این شکل استاتور دارای دو قطب برجسته می‌باشد. ســـیم‌پیچی تحریک به دور قطب‌ها پیچیده شده است. این ســـیم‌پیچی با تعداد دور زیاد بـــرای جریان کم به گونه‌ای طراحی می‌شـــود تا نیروی محرکه مغناطیسی $(\theta=NI)$ مورد نیاز را تامین نماید. ســـیم‌پیچی تحریک توسط منبع ولتاژ مســـتقل V_F تغذیه شده است. برای

۱. Shunt Field ۲. Series Field ۳. Compound Field

تغییر و تنظیم جریان تحریک از مقاومت متغیر سری با سیم‌پیچی تحریک استفاده شده است. این مقاومت متغیر را «مقاومت تنظیم‌کننده جریان تحریک»[1] می‌نامند و با R_{adj} نشان می‌دهند. برای قطع و وصل کردن مدار تحریک از کلید S_1 استفاده شده است. مدار تحریک مستقل است و ارتباط الکتریکی با مدار آرمیچر ندارد. مصرف‌کننده R_L توسط کلید S_2 به پایانه‌های A_1 و A_2 آرمیچر اتصال داده شده است. برای اندازه‌گیری جریان تحریک I_F از آمپرمتر A_1 و جریان بار I_L از آمپرمتر A_2 استفاده شده است. ولت‌متر V با اتصال به پایانه‌های ماشین، ولتاژ V_T که همان ولتاژ بار است را اندازه می‌گیرد.

۸ ـ ۳ ـ راه‌اندازی ژنراتور تحریک مستقل

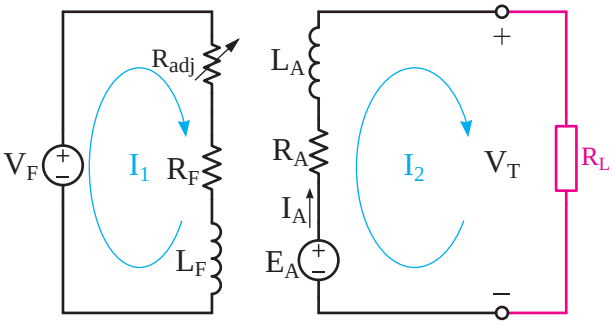
برای راه‌اندازی ژنراتور تحریک مستقل ابتدا کلیدهای S_1 و S_2 شکل (۱۳ ـ ۳) را باز می‌کنند تا مدار الکتریکی آرمیچر و تحریک قطع شود. مقاومت تنظیم‌کننده تحریک را در حداکثر مقدار خود قرار می‌دهند. رتور را توسط محرک با سرعت «نامی» و «ثابت» به گردش در می‌آورند. سپس کلید مدار تحریک S_1 بسته می‌شود و با کم کردن مقاومت تنظیم‌کننده جریان تحریک R_{adj}، جریان سیم‌پیچی تحریک افزایش می‌یابد. فوران قطب‌ها زیاد می‌شود و در سیم‌پیچی آرمیچر نیروی محرکه E_A القا شده و زیاد خواهد شد. افزایش جریان تحریک تا جایی ادامه می‌یابد تا ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T به مقدار نامی خود برسد. این ولتاژ توسط ولت‌متر V اندازه‌گیری می‌شود. در این لحظه ژنراتور راه‌اندازی شده است و آماده اتصال به بار است.

۱ ـ ۸ ـ ۳ ـ بهره‌برداری

«تنظیم» و «ثبت» ولتاژ پایانه‌های ژنراتور در محدوده بار نامی را «بهره‌برداری» گویند. به منظور بهره‌برداری از ژنراتور تحریک مستقل شکل (۱۳ ـ ۳) پس از راه‌اندازی، با بستن کلید S_2 بار به ژنراتور متصل خواهد شد. با اتصال بار به ژنراتور ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T کاهش می‌یابد. برای تنظیم ولتاژ مقاومت تنظیم‌کننده جریان تحریک R_{adj} را کم می‌کنند تا جریان تحریک افزایش یابد و ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T دوباره در مقدار نامی تثبیت شود. بدیهی است با کم کردن یا قطع بار، ولتاژ پایانه‌های ژنراتور افزایش می‌یابد که برای کاهش آن جریان تحریک را کم می‌کنند. لازم به ذکر است که این تنظیم‌ها در محدوده مقادیر نامی امکان‌پذیر است.

۹ ـ ۳ ـ مدار الکتریکی معادل ژنراتور تحریک مستقل

محاسبه کمیت‌های الکتریکی ولتاژ ، جریان و توان با استفاده از مدار الکتریکی معادل امکان‌پذیر است. در شکل (۱۴ ـ ۳) مدار الکتریکی معادل سیم‌پیچ تحریک و سیم‌پیچ آرمیچر ژنراتور تحریک مستقل در کنار یکدیگر نشان داده شده است.



شکل ۱۴ ـ ۳ مدار الکتریکی معادل ژنراتور تحریک مستقل

مدار معادل الکتریکی نشان می‌دهد بین مدار سیم‌پیچ تحریک و سیم‌پیچ آرمیچر ارتباط الکتریکی وجود ندارد.

۱. Adjustment

مدار الکتریکی تحریک و آرمیچر را با روش حلقه یا روش‌هـــای دیگر می‌توان تحلیل کرد. معمولاً در تحلیل مدار الکتریکی اثرات مغناطیسی عکس‌العمل آرمیچر و کموتاسیون به دلیل پیچیدگی محاسبات در نظر گرفته نمی‌شـــود. روش متداول اندازه‌گیری اثرات مغناطیسی استفاده از منحنی مشخصه‌های ژنراتور است.

با نوشتن KVL برای حلقه‌های مدار تحریک و مدار آرمیچر معادلات (۹ ـ ۳) و (۱۰ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$KVL۱) \quad -V_F + R_{adj}I_۱ + R_F I_۱ = ۰ \qquad (۳-۹)$$

$$KVL۲) \quad -E_A + R_A I_۲ + V_T = ۰ \qquad (۳-۱۰)$$

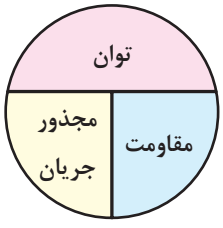
دقـــت کنید جریـــان مدارهای تحریـــک و آرمیچر تغییرات ندارنـــد و مدار در حالت «پایدار» می‌باشـــد و هم‌چنین جریان آنها DC است و فرکانس ندارد. لذا در سلف‌های با ضریب خود القایی L_A و L_F افت ولتاژ ایجاد نمی‌شود و بنابراین در نوشتن KVL لحاظ نخواهد شد.

جریـــان حلقه $I_۱$ از محل جریـــان I_F و جریان حلقه $I_۲$ از محل جریان‌های I_A و I_L می‌گذرد. بنابراین روابط (۱۱ ـ ۳) و (۱۲ ـ ۳) را می‌توان نوشت.

$$I_F = I_۱ \qquad (۳-۱۱)$$

$$I_A = I_L = I_۲ \qquad (۳-۱۲)$$

تلفات تحریک از رابطه (۱۳ ـ ۳) و تلفات آرمیچر از رابطه (۱۴ ـ ۳) به‌دست می‌آید.



$$P_F = (R_F + R_{adj})I_F^۲ \qquad (۳-۱۳)$$

$$P_A = R_A I_A^۲ \qquad (۳-۱۴)$$

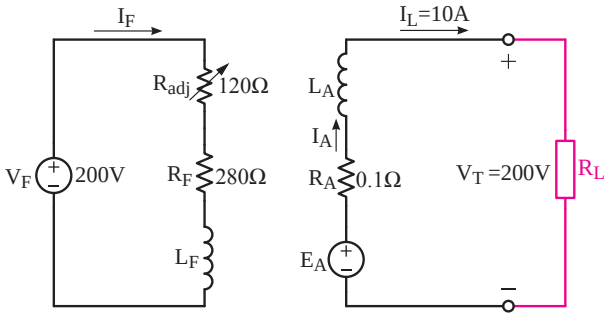
توان خروجی از رابطه (۲ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$P_{out} = V_T \cdot I_L$$

مثال ۵ ـ ۳ ـ ژنراتور جریان مســـتقیمی با تحریک مستقل ۲۰۰ ولتی، ۱۰ آمپری با مدار الکتریکی معادل مطابق شکل (۱۵ ـ ۳) در نظر است. مطلوب است:

الف ـ جریان مدار تحریک I_F

ب ـ نیروی محرکه القایی آرمیچر E_A



شکل ۱۵ ـ ۳

حل:

ـ برای مدار تحریـــک حلقه $I_۱$ را انتخاب می‌کنیم و KVL می‌نویسیم.

$$KVL۱) \quad -V_F + R_{adj}I_۱ + R_F I_۱ =$$

$$-۲۰۰ + ۱۲۰I_۱ + ۲۸۰I_۱ = ۰$$

$$-۲۰۰ + ۴۰۰I_۱ = ۰$$

$$۴۰۰I_۱ = ۲۰۰$$

$$I_۱ = \frac{۲۰۰}{۴۰۰} = ۰/۵ \ [A]$$

ـ حلقه $I_۱$ از محل I_F می‌گذرد.

$$I_F = I_۱ = ۰/۵\ [A]$$

ـ برای حلقه مدار آرمیچر حلقه $I_۲$ را انتخاب می‌کنیم و KVL می‌نویسیم.

$$KVL۲) \quad -E_A + R_A I_۲ + V_T = ۰$$

ـ حلقه $I_۲$ از محل I_L می‌گذرد.

$$I_۲ = I_L = ۱۰\,[A]$$
$$KVL۲) \quad -E_A + ۰/۱\,(۱۰) + ۲۰۰ = ۰$$
$$-E_A + ۱ + ۲۰۰ = ۰$$
$$E_A = ۲۰۱\,[V]$$

مثال ۶ ـ ۳ ـ کمیت‌هـــای الکتریکی یک ژنراتور جریان مستقیم با تحریک مستقل به‌شرح زیر است:

$$V_F = ۲۰۰[V],\ I_F = ۰/۴\,[A],\ R_F = ۴۵۰\,[\Omega]$$
$$E_A = ۲۶۰[V],\ R_A = ۰/۵\,[\Omega],\ V_T = ۲۵۰[V]$$

مطلوب است:

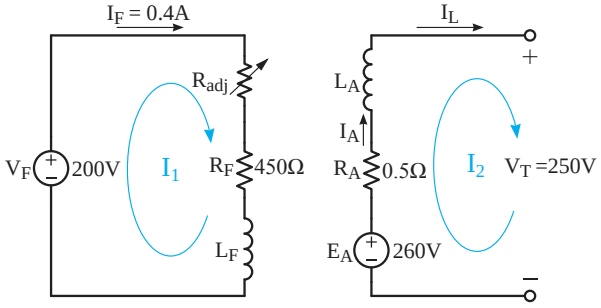
الف ـ مقدار مقاومت تنظیم‌کننده جریان تحریک

ب ـ جریان بار و آرمیچر

ج ـ تلفات مسی و توان خروجی

حل:

ـ مدار معادل الکتریکی ژنراتور جریان مســـتقیم با تحریک مســـتقل را رســـم می‌کنیم و کمیت‌های آن را می‌نویسیم.



ـ برای مدار تحریـــک حلقه $I_۱$ را انتخاب می‌کنیم و KVL می‌نویسیم.

$$KVL۱) \quad -V_F + R_{adj} I_۱ + R_F I_۱ = ۰$$

ـ از محل I_F حلقه $I_۱$ می‌گذرد، لذا:

$$I_۱ = I_F = ۰/۴\ [A]$$
$$-۲۰۰ + R_{adj}(۰/۴) + ۴۵۰\,(۰/۴) = ۰$$
$$-۲۰۰ + ۰/۴R_{adj} + ۱۸۰ = ۰$$
$$۰/۴R_{adj} = ۲۰$$
$$R_{adj} = \frac{۲۰}{۰/۴} = ۵۰\,[\Omega]$$

ـ برای مدار آرمیچـــر حلقه $I_۲$ را انتخاب می‌کنیم و KVL می‌نویسیم:

$$KVL۲) \quad -E_A + R_A I_۲ + V_T = ۰$$
$$-۲۶۰ + ۰/۵I_۲ + ۲۵۰ = ۰$$
$$۰/۵I_۲ = ۱۰$$
$$I_۲ = \frac{۱۰}{۰/۵} = ۲۰\,[A]$$

ـ از محل جریان‌های I_A و I_L حلقه $I_۲$ می‌گذرد:

$$I_A = I_L = I_۲ = ۲۰\,[A]$$

ـ تلفات تحریک از رابطه (۱۱ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$P_F = (R_F + R_{adj})I_F^2$$
$$P_F = (۴۵۰+۵۰)\times ۰/۴^2 = ۸۰[W]$$

ـ تلفات آرمیچر از رابطه (۱۲ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$P_A = R_A I_A^2$$
$$P_A = ۰/۵\times ۲۰^2 = ۲۰۰[W]$$

ـ تلفات مسی از حاصل جمع تلفات تحریک و آرمیچر به‌دست می‌آید.

$$P_A + P_F = ۲۰۰+۸۰ = ۲۸۰[W]$$

ـ توان خروجی از رابطه (۲ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$P_{out} = V_T \cdot I_L$$
$$P_{out} = ۲۵۰\times ۲۰ = ۵۰۰۰[W]$$

پرسش ۳ ـ ۳

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ در ژنراتورهای تحریک مستقل ..... بین مدار آرمیچر با مدار تحریک وجود ندارد.

۲ ـ برای تغییر و تنظیم جریان تحریک از ..... استفاده شده است.

۳ ـ برای راه‌اندازی ژنراتور تحریک مستقل رتور را با سرعت ..... و ..... به گردش درمی‌آورند.

۴ ـ ..... و ..... ولتاژ پایانه‌های ژنراتور در محدوده بار نامی را بهره‌برداری گویند.

۵ ـ محاسبه کمیت‌های الکتریکی ولتاژ، جریان و توان با استفاده از ..... امکان‌پذیر است.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ ژنراتورهای جریان مستقیم به ژنراتورهای تحریک مستقل و خود تحریک تقسیم‌بندی شده‌اند.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ در ژنراتورهای تحریک مستقل ارتباط الکتریکی بین مدار آرمیچر با مدار تحریک وجود دارد.

صحیح ☐ غلط ☐

۳ ـ استاتور ژنراتور تحریک مستقل دارای قطب برجسته می‌باشد.

صحیح ☐ غلط ☐

۴ ـ سیم‌پیچی تحریک به گونه‌ای طراحی می‌شود تا نیروی محرکه مغناطیسی مورد نیاز را تامین کند.

صحیح ☐ غلط ☐

۵ ـ با زیاد کردن مقاومت تنظیم‌کننده، جریان تحریک افزایش می‌یابد.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ طرح ساختمانی ژنراتور تحریک مستقل شکل (۱۳ ـ ۳) را توضیح دهید.

۲ ـ نحوه راه‌اندازی ژنراتور تحریک مستقل را بیان کنید.

۳ ـ نقشه اختصاری ژنراتور تحریک مستقل را رسم کنید.

۴ ـ مدار الکتریکی معادل ژنراتور تحریک مستقل را

رسم کنید و کمیت‌های الکتریکی آن را معرفی کنید.

۵ ـ چرا در نوشتن KVL برای مدار الکتریکی معادل از محاسبه افت ولتاژها L_F و L_A صرف‌نظر می‌شود؟

تمرین ۲ ـ ۳

۱ ـ کمیت‌های الکتریکی یک ژنراتور جریان مستقیم به شرح زیر است:

$$I_F = ۰/۵[A],\ R_F = ۲۰۰[\Omega],\ R_{adj} = ۳۰[\Omega]$$
$$E_A = ۲۵[V],\ R_A = ۰/۱[\Omega],\ I_L = ۱۰[A]$$

مطلوب است:

الف ـ ولتاژ ترمینال‌های ژنراتور V_T

ب ـ ولتاژ تحریک V_F

ج ـ تلفات مسی آرمیچر و تحریک

۲ ـ یک ژنراتور جریان مستقیم تحریک مستقل $5kW$ و $۲۵۰V$ با مقاومت سیم‌پیچی آرمیچر ۲Ω مفروض است. مطلوب است:

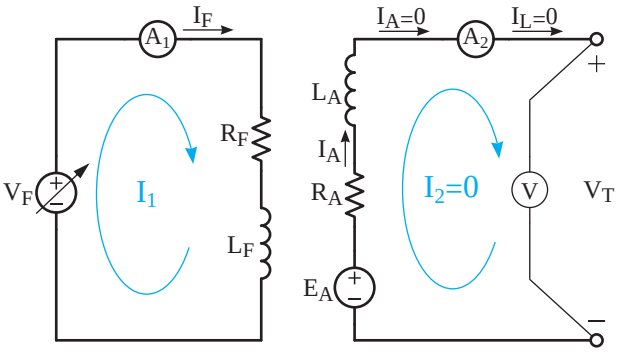
الف ـ جریان مدار آرمیچر

ب ـ توان تبدیل شده

ج ـ تلفات آرمیچر

۱۰ ـ ۳ ـ منحنی مشخصه بی‌باری ژنراتور تحریک مستقل

منحنی مشخصه بی‌باری از آزمایش بی‌باری به‌دست می‌آید و هدف تعیین تأثیر جریان تحریک I_F بر نیروی محرکه القایی آرمیچر E_A در سرعت ثابت است. برای انجام آزمایش بی‌باری ژنراتور را مطابق مدار الکتریکی شکل (۱۶ ـ ۳) اتصال می‌دهند.



شکل ۱۶ ـ ۳ مدار الکتریکی آزمایش بی‌باری ژنراتور تحریک مستقل

آمپرمتر A_1 جریان تحریک I_F و آمپر متر A_2 جریان آرمیچر I_A و ولت‌متر V ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T را نشان می‌دهند.

نیروی محرکه القایی با رابطه (۲۰ ـ ۲) بیان می‌شود.

$$E_A = K \cdot \varphi \cdot \omega$$

با ثابت نگه داشتن سرعت ω، نیروی محرکه القایی E_A تابعی از فوران قطب‌ها خواهد شد. فوران قطب‌ها نیز تابعی از جریان تحریک I_F است. پس نیروی محرکه القایی تابعی از جریان تحریک خواهد شد و آن را به صورت $E_A = F(I_F)$ نشان می‌دهند و می خوانند E_A تابعی از I_F.

در آزمایش بی‌باری، ژنراتور بدون بار می‌باشد و جریان سیم‌پیچی آرمیچر $I_A = ۰$ است. لذا اثرات مغناطیسی ناشی از عکس‌العمل آرمیچر و کموتاسیون به‌وجود نمی‌آید. از طرفی طبق رابطه (۱۰ ـ ۳) خواهیم داشت:

$$KVL۲) \quad -E_A + R_A I_A + V_T = ۰$$

از آنجایی‌که $I_۲ = I_A = ۰$ است. پس:

$$KVL۲) \quad -E_A + R_A(۰) + V_T = ۰$$

$$-E_A + 0 + V_T = 0$$
$$E_A = V_T$$

بنابراین در آزمایش بی‌باری ولت‌متر V با اندازه‌گیری V_T مقدار E_A را نشان می‌دهد.

۱ ـ ۱۰ ـ ۳ ـ آزمایش بی‌باری

در حالی که ژنراتور بدون بار است رتور آن را توسط محرک با سرعت ثابت به گردش در می‌آورند. سپس با افزایش ولتاژ منبع V_F جریان تحریک را طی چند مرحله افزایش می‌دهند و در هر مرحله مقدار نیروی محرکه القایی آرمیچر E_A را که توسط ولت‌متر V اندازه‌گیری می‌شود در جدولی یادداشت می‌نمایند. این کار را آنقدر ادامه می‌دهند تا جریان تحریک به مقدار نامی برسد.

سپس روی یک دستگاه مختصات که محور افقی آن جریان تحریک I_F و محور عمودی آن نیروی محرکه القایی آرمیچر E_A است، نقاط نشان‌دهنده مقدار E_A به ازای هر جریان تحریک معین را مشخص می‌نمایند. این نقاط را به یکدیگر وصل می‌کنند. منحنی به‌دست آمده به «منحنی رفت بی‌باری» موسوم است.

در ادامه آزمایش، با کاهش ولتاژ منبع V_F جریان تحریک را طی چند مرحله کاهش می‌دهند و در هر مرحله مقدار نیروی محرکه القایی E_A را که توسط ولت‌متر V اندازه‌گیری می‌شود یادداشت می‌نمایند. این کار را آنقدر ادامه می‌دهند تا جریان تحریک صفر شود. سپس بر روی دستگاه مختصاتی که منحنی رفت بی‌باری را ترسیم کرده بودند نقاط نشان دهنده مقدار E_A به ازای هر جریان تحریک را در این حالت مشخص می‌نمایند. این نقاط را به یکدیگر وصل می‌کنند. منحنی به‌دست آمده به «منحنی برگشت بی‌باری» موسوم است.

جداول (۱ ـ ۳) و (۲ ـ ۳) نتایج رفت و برگشت آزمایش بی‌باری ژنراتور ۱ kW، ۲۰۰ V، ۱۵۰۰ RPM را نشان می‌دهند.

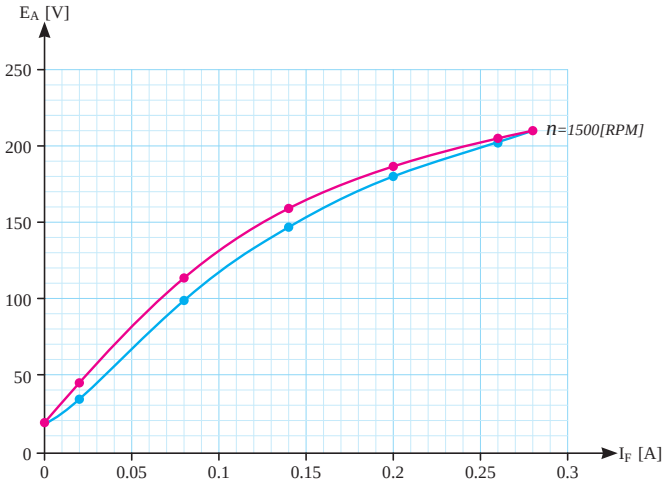
I_F [A]	۰	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۱۴	۰/۲	۰/۲۶	۰/۲۸
E_A [V]	۱۶/۴	۳۴	۹۹	۱۴۸	۱۸۱	۲۰۳	۲۱۰

جدول ۱ ـ ۳ نتیجه رفت آزمایش بی‌باری

I_F [A]	۰/۲۸	۰/۲۶	۰/۲	۰/۱۴	۰/۰۸	۰/۰۲	۰
E_A [V]	۲۱۰	۲۰۶	۱۸۷	۱۵۹	۱۱۵	۴۵	۱۷

جدول ۲ ـ ۳ نتیجه برگشت آزمایش بی‌باری

نقاط نشان‌دهنده مقدار هر ولتاژ به ازای جریان تحریک معین جداول رفت و برگشت آزمایش بی‌باری در شکل (۱۷ ـ ۳) نشان داده شده است. با اتصال نقاط رفت به یکدیگر منحنی رفت و با اتصال نقاط برگشت به یکدیگر منحنی برگشت ترسیم می‌شود.

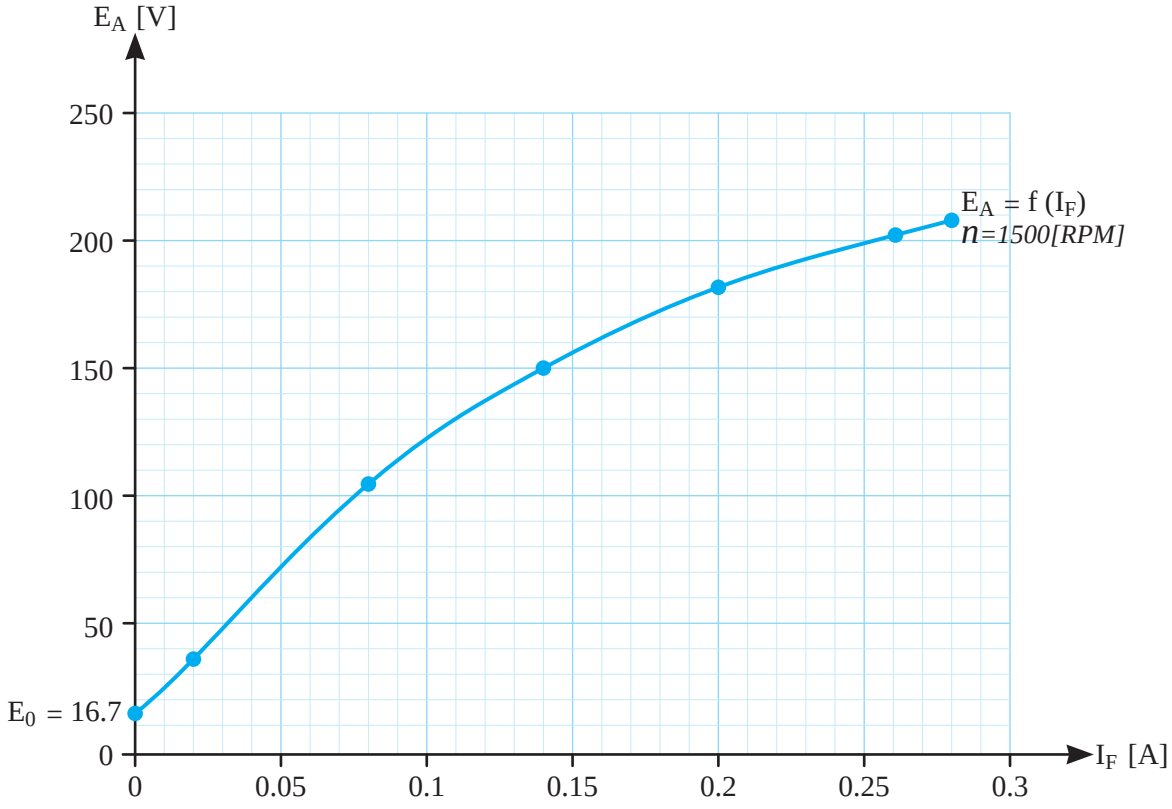


شکل ۱۷ ـ ۳ منحنی رفت و برگشت بی‌باری

در آزمایش بی‌باری جریان تحریک I_F متغیر و نیروی محرکه القایی E_A تابع است. لذا در ترسیم منحنی رفت و برگشت، جریان تحریک منطبق بر محور x (متغیر) و

نیـــروی محرکه القایی منطبق بر محور y (تابع) انتخاب شده است.

میانگین منحنی رفت و برگشـــت شـــکل (۱۷ ـ ۳) را «منـــــحنی مشخصه بـی‌باری» گـویند که در شکـل (۱۸ ـ ۳) نشـــان داده شده است.



شکل ۱۸ ـ ۳ منحنی مشخصه بی‌باری در سرعت ۱۵۰۰ RPM

منحنی مشـــخصه بی‌باری شـــبیه منحنی مشخصه مغناطیسی مواد فرومغناطیسی است و دارای سه ناحیه «خطی»، «خمیدگی» و «اشباع» است؛ لذا به آن «منحنی مغناطیسی» نیز می‌گویند.

ابتدای منحنی مشخصه بی‌باری تقریباً خطی است. اما با افزایش جریان تحریک I_F، هسته قطب‌ها به اشباع می‌روند و مشـــخصه بی‌باری به شکل منحنی درمی‌آید. پس از اشباع کامل قطب‌ها افزایش جریان تحریک I_F بر نیروی محرکه القایی آرمیچر E_A تقریبا بی‌تأثیر خواهد شد و مقدار E_A را می‌توان ثابت در نظر گرفت.

نیروی محرکه القایی در ابتدای ناحیه خطی منحنی مشخصه بی‌باری به ازای جریان تحریک صفر را «ولتاژ پس‌ماند» می‌نامند و آن را با E_0 نشان می‌دهند. در شکل (۱۸ ـ ۳) این مقدار برابر $E_0 = ۱۶/۷ [V]$ اســـت. ولتاژ پس‌ماند به ازای فوران پس‌ماند مغناطیســـی قطب‌ها با گردش رتور در سیم‌پیچی آرمیچر القا می‌شود.

فعالیت ۱ ـ ۳ ـ برنامه صفحه گسترده *Excel xp* یکی از برنامه‌های مجموعه *Microsoft Office* است که جهت انجام عملیاتی نظیر ایجاد نمودار کاربرد دارد. با استفاده از این برنامه نمودار مربوط به جداول آزمایش بی‌باری را رسم کنید.

جریـــان تحریک مربوط بـــه نقطـــه کار ژنراتور در انتهای ناحیه خمیدگی و شـــروع ناحیه اشـــباع منحنی مشـــخصه بی‌باری تنظیم خواهد شد. تا ژنراتور «پایدار» بماند و مقدار ولتاژ آن ثابت شـــود. در صورتی‌که جریان تحریک مربوط بـــه نقطه کار ژنراتـــور در ناحیه خطی منحنی مشـــخصه بی‌باری تنظیم شـــود، به ازای تغییر جزیی جریان تحریک، ولتاژ به شـــدت تغییر می‌کند و کار ماشین «ناپایدار» می‌شود. و چنانچه در ناحیه اشباع منحنی مشـــخصه بی‌باری تنظیم شـــود، امکان تنظیم ولتاژ ماشین «محدود» می‌شود.

در صورتی‌که منحنی مشـــخصه بی‌باری در دور n_1 به‌دست آمده باشـــد می‌توان آن را بدون تکرار آزمایش بی‌باری در دور n_2 نیز به‌دســـت آورد. برای این منظور با اســـتفاده از رابطه (۱۵ ـ ۳) در جریان تحریک معین، مقـــدار نیروی محرکه القایی در ســـرعت n_1 را به ازای سرعت n_2 به‌دست آورد.

$$\frac{E_{A1}}{E_{A2}}=\frac{n_1}{n_2} \qquad (۳-۱۵)$$

که در این رابطه:

E_{A1} نیروی محرکه القایی آرمیچر در سرعت n_1

E_{A2} نیروی محرکه القایی آرمیچر در سرعت n_2

منحنی مشـــخصه شـــکل (۱۸ ـ ۳) به ازای سرعت $n_1=1500RPM$ رسم شـــده اســـت. برای ترسیم این مشخصه در سرعت $n_2=1000RPM$ به ازای چند نقطه تحریک I_F، مقادیر نیروی محرکه القایی E_A در سرعت جدید n_2 با اســـتفاده از رابطه (۱۵ ـ ۳) محاســـبه و در جدول (۳ ـ ۳) یادداشت شده است.

$I_F[A]$	۰	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۱۴	۰/۲	۰/۲۶	۰/۲۸
$E_{A1}[v]$ $n_1=1500RPM$	۱۶/۷	۳۹/۵	۱۰۷	۱۵۳/۵	۱۸۴	۲۰۴	۲۱۰
$E_{A2}[v]$ $n_2=1000RPM$	۱۱/۱	۲۶/۳	۷۱/۳	۱۰۲/۳	۱۲۲/۶	۱۳۶	۱۴۰

جدول ۳ ـ ۳

نحوه محاســـبه E_{A2} به ازای جریان تحریک $I_F=0$ در سرعت $n_2=1000RPM$ به این صورت است که ابتدا از منحنی مشـــخصه بی‌باری شـــکل (۱۸ ـ ۳) به ازای $I_F=0$ مقدار نیروی محرکه القایی $E_{A1}=16/7$ به‌دست می‌آید. ســـپس با رابطه (۱۵ ـ ۳) مقدار E_{A2} در سرعت $n_2=1000RPM$ محاسبه و در جدول (۳ ـ ۳) یادداشت شده اســـت. بدیهی است به ازای دیگر مقادیر I_F نیز به همین ترتیب عمل می‌شود.

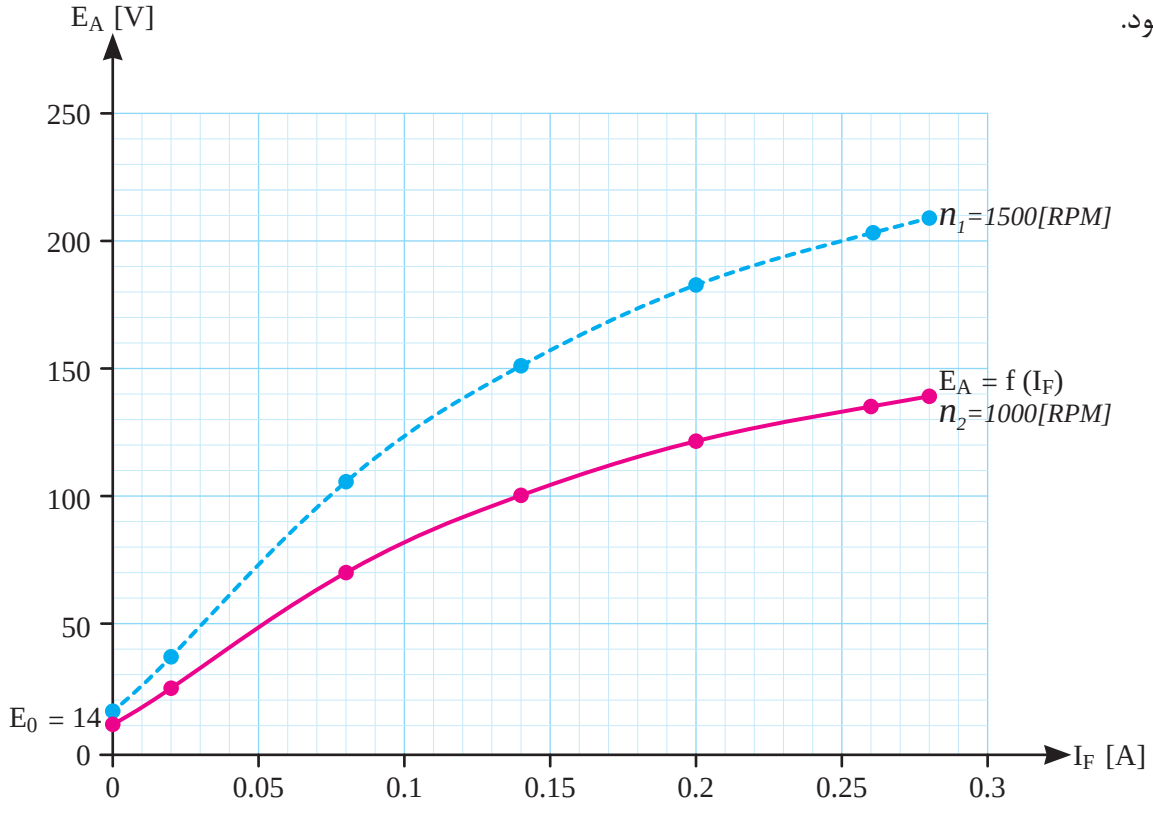
$$\frac{E_{A1}}{E_{A2}}=\frac{n_1}{n_2}$$

$$\frac{16/7}{E_{A2}}=\frac{1500}{1000}$$

$$E_{A2}=\frac{1000\times 16/7}{1500}=11/1\,[V]$$

هـــر مقدار از ولتاژ E_{A2} بـــه ازای جریان تحریک I_F جدول (۳ ـ ۳) در شـــکل (۱۹ ـ ۳) با یک نقطه نشـــان داده شـــده است و با اتصال این نقاط به یکدیگر منحنی

مشخصه بی‌باری در سرعت $n_2 = 1000RPM$ ترسیم می‌شود.

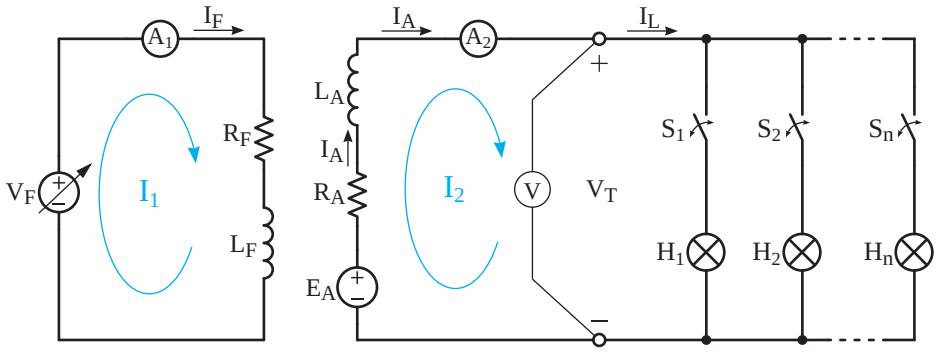


شکل ۱۹ ـ ۳ منحنی مشخصه بی‌باری در سرعت ۱۰۰۰ RPM

۱۱ ـ ۳ ـ منحنی مشخصه بارداری ژنراتور تحریک مستقل

منحنی مشخصه بارداری از آزمایش بارداری به‌دست می‌آید و هدف تعیین تأثیر جریان بار I_L بر ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T در سرعت ثابت و جریان تحریک I_F ثابت است.

برای انجام آزمایش بارداری، ژنراتور تحریک مستقل را مطابق مدار الکتریکی شکل (۲۰ ـ ۳) اتصال می‌دهند.



شکل ۲۰ ـ ۳ مدار الکتریکی آزمایش بارداری ژنراتور تحریک مستقل

آمپرمتر A_1 جریان تحریک I_F و آمپرمتر A_2 جریان بار I_L را که در ژنراتور تحریک مستقل با جریان آرمیچر I_A برابر است را نشان می‌دهند. ولت‌متر V با اتصال به پایانه‌های ژنراتور ولتاژ V_T یا ولتاژ مصرف‌کننده‌ها را نشان می‌دهد. ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T با نوشتن KVL از رابطه (۱۰ ـ ۳) به‌دست خواهد آمد.

$$KVL2) \quad -E_A + R_A I_2 + V_T = 0$$
$$V_T = E_A - R_A I_2$$

با جایگزینی I_L به جای I_2 رابطه (۱۶ ـ ۳) به‌دست می‌آید:

$$V_T = E_A - R_A I_L \qquad (۳-۱۶)$$

نیروی محرکه القایی آرمیچر $E_A = K \cdot \varphi \cdot \omega$ تابع سرعت و جریان تحریک است. در آزمایش بارداری سرعت و جریان تحریک ثابت نگه داشته می‌شوند؛ لذا نیروی محرکه القایی E_A مقداری ثابت خواهد داشت. پس با توجه به رابطه (۱۶ ـ ۳) در آزمایش بارداری، ولتاژ ژنراتور V_T تابع جریان بار I_L خواهد بود.

در شکل (۲۰ ـ ۳) از لامپ‌های H_1 تا H_n به عنوان بار و از کلیدهای S_1 تا S_n برای اتصال آنها به ژنراتور استفاده شده است.

۱ ـ ۱۱ ـ ۳ ـ آزمایش بارداری

برای انجام آزمایش بارداری ابتدا رتور ژنراتور توسط محرک با سرعت ثابت گرداننده می‌شود. سپس با افزایش ولتاژ منبع مستقل مدار تحریک V_F، جریان تحریک I_F را افزایش می‌دهند تا ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T به مقدار نامی برسد. اکنون کلیدهای S_1 تا S_n شکل (۲۰ ـ ۳) را به ترتیب می‌بندند و بدین ترتیب با روشن کردن لامپ‌های H_1 تا H_n جریان بار I_L را طی چند مرحله افزایش می‌دهند و در هر مرحله مقادیر ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T که توسط ولت‌متر V و جریان بار I_L که توسط آمپرمتر A_2 اندازه‌گیری می‌شوند را در جدولی یاداشت می‌نمایند. این کار آنقدر ادامه می‌یابد تا جریان بار I_L به مقدار نامی ژنراتور برسد.

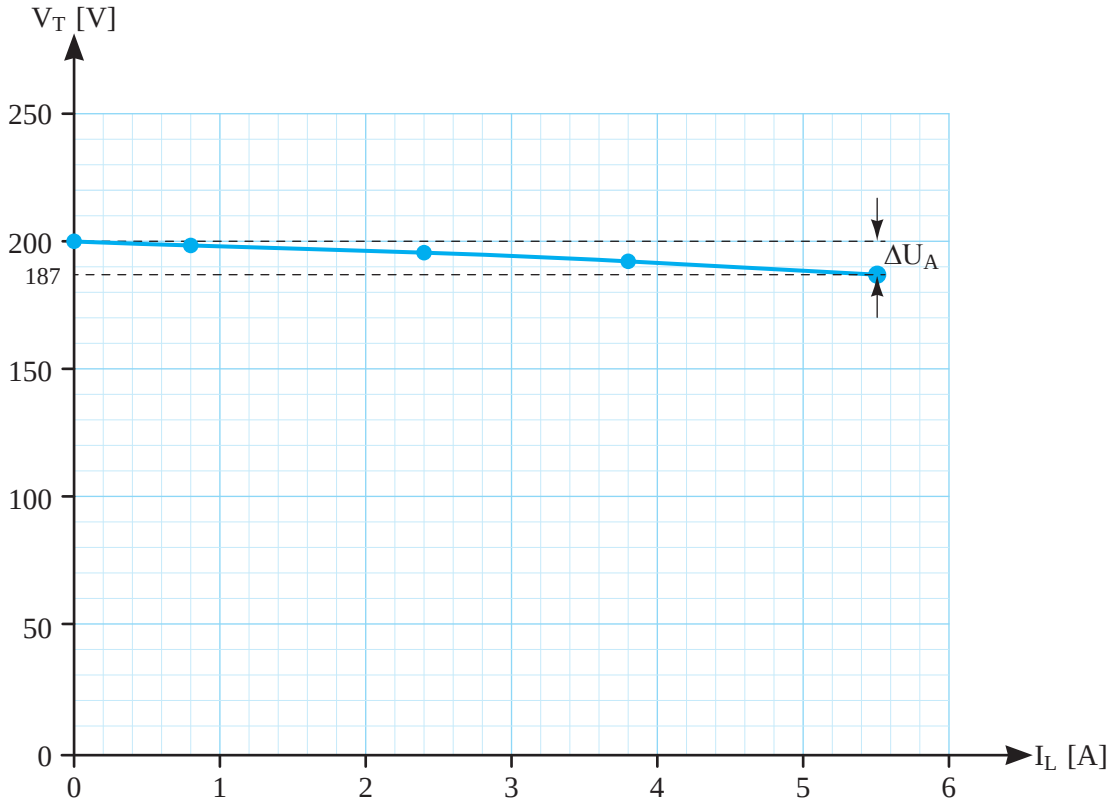
سپس روی یک دستگاه مختصات که محور افقی آن جریان بار I_L و محور عمودی آن ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T معینی را مشخص می‌نمایند تا «منحنی مشخصه بارداری» ژنراتور تحریک مستقل به‌دست آید.

جدول (۴ ـ ۳) نتیجه آزمایش بارداری ژنراتور تحریک مستقل ۱ kW، ۵/۵ آمپر ۲۰۰ ولتی را درسرعت ۱۵۰۰ RPM نشان می‌دهد.

I_L [A]	۰	۰/۸	۲/۴	۳/۸	۵/۵
V_T [V]	۲۰۰	۱۹۸	۱۹۵	۱۹۲	۱۸۷

جدول ۴ ـ ۳ نتیجه آزمایش بارداری

نقاط نشان‌دهنده مقدار هر ولتاژ به ازای جریان بار معین جدول (۴ ـ ۳) در شکل (۲۱ ـ ۳) نشان داده شده است. با اتصال نقاط به یکدیگر منحنی مشخصه بارداری ترسیم شده است.



شکل ۲۱ ـ ۳ منحنی مشخصه بارداری ژنراتور تحریک مستقل

در آزمایش بارداری جریان بار I_L متغیر و ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T تابع است. لذا جریان بار منطبق بر محور x (متغیر) و ولتاژ V_T منطبق بر محور y (تابع) انتخاب شده است.

فعالیت ۲ ـ ۳ ـ با استفاده از برنامه *Excel* نمودار مربوط به جدول (۴ ـ ۳) را رسم کنید.

منحنی مشخصه بارداری شکل (۲۱ ـ ۳) نشان می‌دهد افزایش جریان بار I_L باعث کاهش ولتاژ ترمینال ژنراتور V_T خواهد شد. این کاهش ولتاژ را «افت ولتاژ آرمیچر» گویند و با ΔU_A نشان می‌دهند.

افت ولتاژ آرمیچر ΔU_A تابع جریان بار I_L است و عواملی که سبب ایجاد آن خواهند شد عبارت است از:

۱ ـ مقاومت اهمی سیم‌پیچی آرمیچر

۲ ـ اثرات مغناطیسی عکس‌العمل آرمیچر و کموتاسیون

افت ولتاژ ناشی از مقاومت اهمی سیم‌پیچی آرمیچر با «$R_A I_A$» و افت ولتاژ ناشی از اثرات مغناطیسی با «ε» نشان داده می شوند. بنابراین برای افت ولتاژ آرمیچر ΔU_A رابطه (۱۷ ـ ۳) نوشته خواهد شد.

$$\Delta U_A = R_A I_A + \varepsilon \qquad (۳-۱۷)$$

منحنی مشخصه بارداری شکل (۲۱ ـ ۳) هم‌چنین نشان می‌دهد، افت ولتاژ آرمیچر ΔU_A همان اختلاف ولتاژ ترمینال ژنراتور به ازای $I_L = ۰$ یعنی ولتاژ بی‌باری یا همان E_A با ولتاژ بارداری V_T است که با رابطه (۱۸ ـ ۳) نشان داده می‌شود.

$$\Delta U_A = E_A - V_T \qquad (۳-۱۸)$$

روش متداول اندازه‌گیری افت ولتاژ ناشی از اثرات مغناطیسی ε استفاده از منحنی مشخصه بارداری و روابط (۱۷ ـ ۳) و (۱۸ ـ ۳) است که در مثال (۷ ـ ۴) آورده شده است.

مثال ۷ ـ ۴ ـ منحنی مشخصه بارداری شکل (۲۱ ـ ۳) مربوط به ژنراتور تحریک مستقل با مقاومت اهمی سیم‌پیچی آرمیچر $R_A = ۱/۲۵\ \Omega$ است. به ازای جریان بار $I_L = ۵/۵\ A$ مطلوب است:

ـ افت ولتاژ ناشی از اثرات مغناطیسی ε

حل:

ـ با توجه به منحنی مشخصه بارداری به‌دست می‌آوریم.

$$I_L = ۰ \Rightarrow V_T = E_A = ۲۰۰\,[V]$$
$$I_L = ۵/۵\,[A] \Rightarrow V_T = ۱۸۷\,[V]$$

ـ با توجه به رابطه (۱۸ ـ ۳) خواهیم داشت.

$$\Delta U_A = E_A - V_T$$
$$\Delta U_A = ۲۰۰ - ۱۸۷ = ۱۳\,[V]$$

ـ و از رابطه (۱۷ ـ ۳) افت ولتاژ ناشی از اثرات مغناطیسی به‌دست می‌آید.

$$\Delta U_A = R_A I_A + \varepsilon$$
$$۱۳ = ۱/۲۵ \times ۵/۵ + \varepsilon$$
$$\varepsilon = ۶/۱۲۵\,[V]$$

ـ درصد تنظیم ولتاژ از رابطه (۸ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$\%V_R = \frac{E_A - V_T}{V_T} \times ۱۰۰$$

$$\%V_R = \frac{۲۰۰ - ۱۸۷}{۱۸۷} \times ۱۰۰ = \%۶/۹۵$$

۱۲ ـ ۳ ـ کاربرد ژنراتور تحریک مستقل

پایداری ولتاژ ژنراتور تحریک مستقل بسیار مناسب و با تغییر جریان بار تقریباً ثابت است. از ژنراتور تحریک مستقل برای شارژ باتری‌ها و تغذیه تحریک ژنراتورهای جریان متناوب در نیروگاه‌های برق استفاده شده است. همچنین خودروهای شهری و بین شهری که قبل از سال ۱۹۷۵ میلادی تولید شده‌اند مجهز به ژنراتور مستقل به منظور شارژ باتری و تامین روشنایی بوده‌اند.

پرسش ۴ ـ ۳

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ منحنی مشخصه بی‌باری از ..... به‌دست می‌آید.

۲ ـ منحنی مشخصه بی‌باری دارای سه ناحیه ..... و ..... و ..... است.

۳ ـ منحنی مشخصه بارداری از ..... به‌دست می‌آید.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ هدف از انجام آزمایش بی‌باری تعیین تأثیر جریان تحریک بر نیروی محرکه القایی در سرعت ثابت است.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ هدف از انجام آزمایش بارداری تعیین تأثیر ولتاژ ژنراتور بر جریان بار در سرعت ثابت است.

صحیح ☐ غلط ☐

۳ ـ از ژنراتور تحریک مستقل برای تغذیه تحریک ژنراتورهای جریان متناوب در نیروگاه‌های برق استفاده

می‌شود.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ نحوه انجام آزمایش بی‌باری ژنراتور تحریک مستقل را شرح دهید.

۲ ـ چرا در آزمایش بی‌باری سرعت ژنراتور باید ثابت نگه داشته شود؟

۳ ـ هدف از انجام آزمایش بی‌باری را بنویسید.

۴ ـ نحوه انجام آزمایش بارداری ژنراتور تحریک مستقل را شرح دهید.

۵ ـ چرا در آزمایش بارداری سرعت و جریان تحریک باید ثابت نگه داشته شود؟

۶ ـ هدف از انجام آزمایش بارداری را بنویسید.

۷ ـ کاربرد ژنراتور تحریک مستقل را بنویسید.

تمرین ۳ ـ ۳

۱ ـ میانگین نتایج رفت و برگشت آزمایش بی‌باری ژنراتور تحریک مستقل در سرعت ۱۳۰۰ RPM به شرح زیر است.

I_F[A]	۰	۰/۲	۰/۶	۰/۸	۱	۱/۲
E_A [v]	۱۲	۴۴	۹۸	۱۱۳	۱۲۲	۱۲۷

مطلوب است:

الف ـ منحنی مشخصه بی‌باری در سرعت ۱۳۰۰ RPM

ب ـ منحنی مشخصه بی‌باری در سرعت ۱۵۰۰ RPM

۲ ـ نتیجه آزمایش بارداری ژنراتور تحریک مستقل ۴۶۰ v، ۴۰ A با مقاومت اهمی سیم‌پیچ آرمیچر ۰/۳ Ω به شرح زیر است.

I_L[A]	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰
V_T[V]	۴۸۰	۴۷۸	۴۷۵	۴۷۱	۴۶۰

مطلوب است:

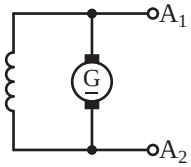
الف ـ منحنی مشخصه بارداری

ب ـ افت ولتاژ آرمیچر در بارنامی

ج ـ افت ولتاژ ناشی از اثرات مغناطیسی در بارنامی

۱۳ ـ ۳ ـ ژنراتور جریان مستقیم با تحریک شنت

ژنراتور جریان مستقیم با تحریک شنت را به اختصار «ژنراتور شنت[۱]» گویند. در ژنراتور شنت مدار تحریک با مدار آرمیچر به صورت موازی اتصال داده می‌شود و بین آنها ارتباط الکتریکی برقرار می‌باشد. علامت اختصاری ژنراتور شنت در شکل (۲۲ ـ ۳) نشان داده شده است.

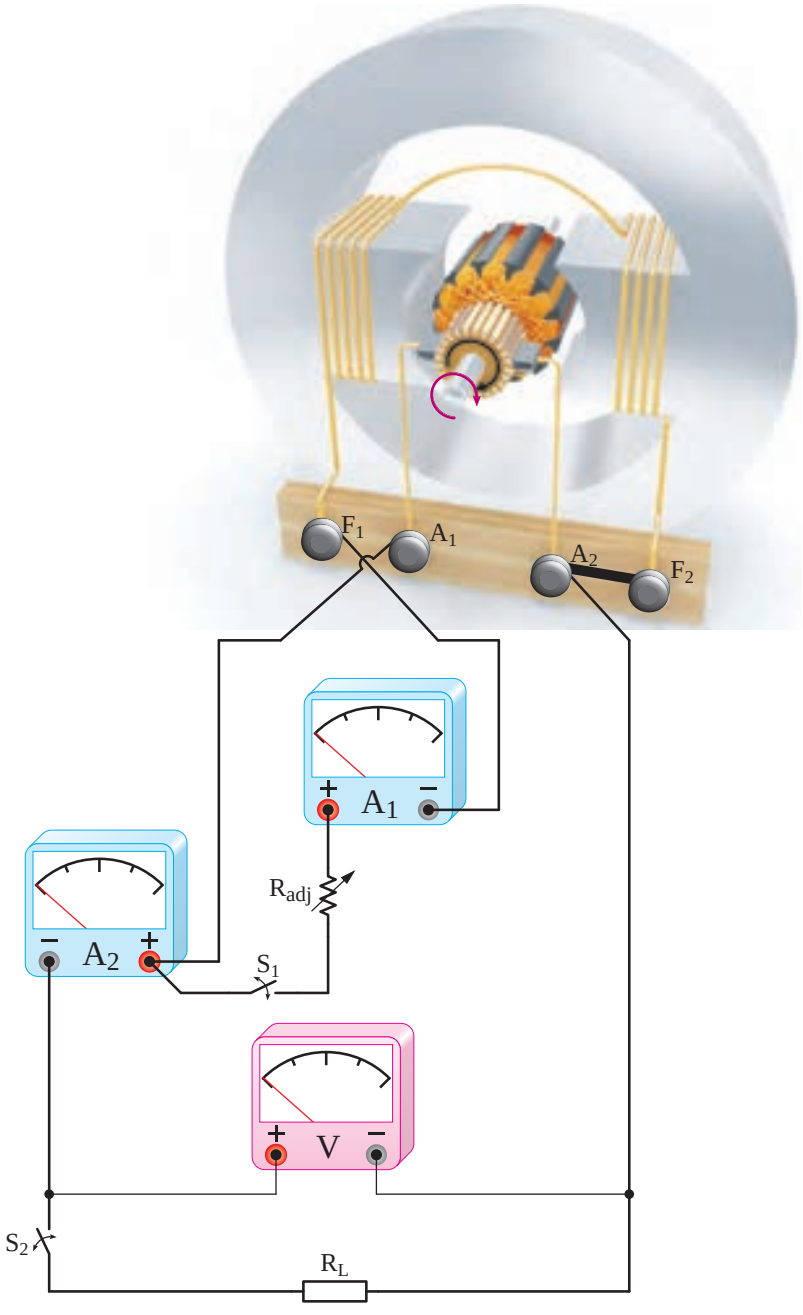


شکل ۲۲ ـ ۳ نقشه اختصاری ژنراتور شنت

طرح ساختمانی ژنراتور شنت در شکل (۲۳ ـ ۳) نشان داده شده است.

در این شکل استاتور دارای قطب‌های برجسته می‌باشد. سیم‌پیچی تحریک بر روی قطب‌ها قرار داده شده است. این سیم‌پیچی با تعداد دور زیاد برای جریان کم به گونه‌ای طراحی می‌شود تا نیروی محرکه مغناطیسی $(\theta=NI)$ مورد نیاز را تامین نماید. سیم‌پیچی تحریک با سیم‌پیچی آرمیچر موازی است.

۱. Shunt Generator



شکل ۲۳ ـ ۳ طرح ساختمانی ژنراتور شنت

لـــذا ولتاژ ســـیم‌پیچ تحریـــک برابر ولتـــاژ آرمیچر می‌باشـــد و جریان آن از ولتاژ آرمیچر تامین می‌شـــود. برای تغییر و تنظیم جریان تحریک از مقاومت متغیری با ســـیم‌پیچ تحریک، سری می‌شود. این مقاومت متغیر را «مقاومـــت تنظیم‌کننده جریان تحریک» می‌نامند و با R_{adj} نشـــان می‌دهند. مصرف‌کننده R_L توسط کلید S به ترمینال‌های A_1 و A_2 آرمیچر اتصال داده شده است تا آن نیز همانند ســـیم‌پیچ تحریک با سیم‌پیچ آرمیچر موازی شود و از ولتاژ و جریان آرمیچر تغذیه‌کند. برای اندازه‌گیری جریان تحریک I_F، آمپرمتر A_1 و جریان بار I_L، آمپرمتر A_2 و ولتاژ پایانه‌های ماشین V_T، ولت‌متر V در مدار قرار داده شده‌اند.

۱۴ ـ ۳ ـ راه‌اندازی ژنراتور شنت

برای راه‌اندازی ژنراتور شنت کلیدهای S_1 و S_2 شکل (۲۳ ـ ۳) را باز می‌گذارند و مقاومت تنظیم‌کننده جریان تحریک R_{adj} را در حداقل مقدار خود قرار می‌دهند. سپس رتور را با سرعت نامی به گردش در می‌آورند تا فوران ناشی از پس‌ماند مغناطیسی قطب‌ها، نیروی محرکه القایی پس‌ماند در سیم‌پیچی آرمیچر القا کند و ولتاژی در پایانه‌های آرمیچر ایجاد نماید. در این لحظه با بستن کلید S_1 مدار تحریک موازی با مدار آرمیچر می‌شود و ولتاژ آرمیچر جریان ضعیفی از سیم‌پیچی تحریک عبور می‌دهد. در نتیجه فوران قطب‌ها افزایش می‌یابد و نیروی محرکه القایی بیشتری در سیم‌پیچی آرمیچر القا می‌کند. در این صورت ولتاژ پایانه‌های آرمیچر بیشتر می‌شود و جریان سیم‌پیچی تحریک زیادتر خواهد شد که منجر به افزایش دوباره نیروی محرکه القایی می‌شود. این عمل آنقدر ادامه می‌یابد تا قطب‌ها اشباع شوند. در این لحظه ولتاژ پایانه‌های آرمیچر در حداکثر مقدار خود ثابت خواهد شد. ژنراتور راه‌اندازی شده است و برای تنظیم ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T به مقدار نامی، مقاومت تنظیم‌کننده جریان تحریک R_{adj} را زیاد می‌کنند تا جریان تحریک کاهش یابد و ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T در حد نامی ثابت شود.

۱ ـ ۱۴ ـ ۳ ـ شرایط راه‌اندازی

برخی مواقع پس از به گردش در آوردن رتور، ژنراتور شنت راه‌اندازی نمی‌شود و اصطلاحاً «ولتاژگیری» نمی‌نماید. عواملی که سبب عدم راه‌اندازی ژنراتور شنت خواهند شد عبارتند از:

۱ ـ عدم وجود پس‌ماند مغناطیسی در قطب‌های استاتور

در این شرایط ولتاژی در سیم‌پیچی آرمیچر القا نخواهد شد و خود تحریکی انجام نمی‌شود. برای رفع این مشکل، گردش رتور را متوقف می‌کنند. سرهای سیم‌پیچی تحریک را از سرهای سیم‌پیچی آرمیچر جدا می‌نمایند و با اتصال به منبع ولتاژ DC با ولتاژ مناسب، پس‌ماند مغناطیسی قطب‌ها «احیا» خواهد شد. مجدداً سرهای سیم‌پیچی تحریک را به سرهای سیم‌پیچی آرمیچر اتصال می‌دهند و ژنراتور را راه‌اندازی می‌کنند.

۲ ـ جهت جریان در سیم‌پیچی تحریک صحیح نمی‌باشد.

در این شرایط فورانی که در اثر عبور جریان از سیم‌پیچی تحریک ایجاد می‌شود با فوران ناشی از پس از ماند مغناطیسی قطب‌ها هم جهت نیست و پس‌ماند مغناطیسی قطب‌ها را از بین می‌برد. برای رفع این مشکل، گردش رتور را متوقف می‌کنند. سرهای سیم‌پیچی تحریک را از سرهای سیم‌پیچی آرمیچر جدا می‌نمایند و پس‌ماند مغناطیسی قطب را احیا می‌کنند. سپس سرهای سیم تحریک را برعکس حالت قبل به سرهای سیم‌پیچی آرمیچر اتصال می‌دهند و ژنراتور را راه‌اندازی می‌کنند.

۳ ـ جهت گردش رتور صحیح نباشد.

معمولاً بر روی بدنه ماشین‌های جریان مستقیم جهت گردش رتور را مشخص می‌کنند. در صورتی‌که رتور خلاف جهت گرداننده شود پلاریته نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی آرمیچر معکوس می‌شود. درنتیجه جهت جریان سیم‌پیچی تحریک عوض می‌شود و پس‌ماند مغناطیسی قطب را از بین می‌برد در این صورت مطابق بند ۱ باید پس‌ماند مغناطیسی قطب‌ها

را احیا نمـــود و پس رتور را در جهت صحیح به گردش درآورد و ژنراتور را راه‌اندازی کرد.

۴ ـ مقدار مقاومت تنظیم‌کننده جریان تحریک R_{adj} زیاد باشد.

در این شـــرایط جریان مدار تحریک کمتر از مقدار نامی خود می‌شود و ولتاژ ژنراتور در کمتر از ولتاژ نامی ثابت می‌شـــود. برای جلوگیری از بروز این مشـــکل به هنگام راه‌انـــدازی مقدار مقاومت تنظیم جریان تحریک R_{adj} را در حداقل مقدار خود یعنی صفر قرار می‌دهند.

۵ ـ سرعت گردش رتور کمتر از سرعت نامی باشد.

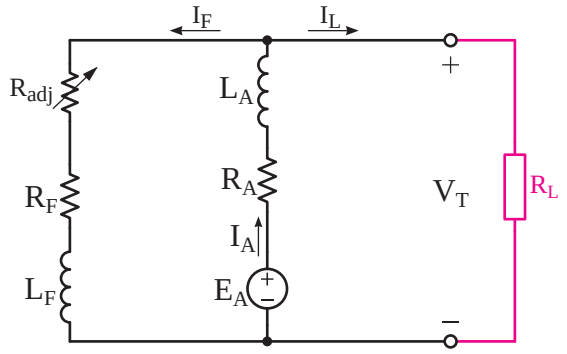
در این شرایط نیروی محرکه کمتری در سیم‌پیچی آرمیچر القا می‌شـــود و ولتاژ ژنراتـــور در کمتر از ولتاژ نامی ثابت خواهد شد. برای جلوگیری از بروز این اشکال سرعت گردش محرک را افزایش می‌دهند تا به سرعت نامی برسد.

۲ ـ ۱۴ ـ ۳ ـ بهره‌برداری

پس از راه‌اندازی ژنراتور شـــنت با بســـتن کلید $S_۲$ شـــکل (۲۳ ـ ۳) بار بـــه ژنراتور متصل خواهد شـــد و ژنراتور مورد بهره‌برداری قـــرار می‌گیرد. با اتصال بار به ژنراتور ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T کاهش می‌یابد. برای تنظیم ولتاژ، مقاومت تنظیم‌کننده جریان تحریک R_{adj} را کـــم می‌کنند تا جریان تحریـــک افزایش یابد و ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T به مقدار نامی تثبیت شود. بدیهی است با قطع بار، ولتاژ پایانه‌های ژنراتور افزایش می‌یابد کـــه به منظور کاهش آن، مقـــدار R_{adj} را زیاد می‌کنند تـــا در اثر کاهش جریان تحریک ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T کاهش بیابد. این تنظیم‌ها در محدوده مقادیر نامی امکان‌پذیر است.

۱۵ ـ ۳ ـ مدار الکتریکی معادل ژنراتور شنت

محاســـبه کمیت‌های الکتریکی ولتاژ، جریان و توان الکتریکی با استفاده از مدار معادل الکتریکی امکان‌پذیر اســـت. در شکل (۲۴ ـ ۳) مدار الکتریکی معادل ژنراتور شنت نشان داده شده است.



شکل ۲۴ ـ ۳ مدار الکتریکی معادل ژنراتور تحریک موازی

مدار معادل الکتریکی نشـــان می‌دهد مدار سیم‌پیچ تحریک، موازی با مدار ســـیم‌پیچی آرمیچر ارتباط داده شده است.

مدار الکتریکی ژنراتور شنت با روش پتانسیل گره یا روش‌هـــای دیگر می‌توان تحلیل کرد. معمولاً در تحلیل مدار الکتریکی اثرات مغناطیسی عکس‌العمل آرمیچر و کموتاسیون به دلیل پیچیدگی محاسبات در نظر گرفته نمی‌شـــود. روش متداول اندازه‌گیری اثرات مغناطیسی استفاده از منحنی مشخصه‌های ژنراتور است.

با نوشـــتن KCL برای گره مدار تحریک و آرمیچر معادله (۱۹ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$KCL) \quad -I_A + I_F + I_L = ۰ \qquad (۳-۱۹)$$

با به‌کار بردن قوانین اهم مقادیر جریان‌های I_F و I_A به‌دست خواهد آمد.

$$I_F = \frac{V_T}{R_F + R_{adj}} \qquad (۳-۲۰)$$

جریان مدار آرمیچر I_A از محل E_A بسوی V_T جاری است پس $E_A > V_T$ و خواهیم داشت.

$$I_A = \frac{E_A - V_T}{R_A} \qquad (۳-۲۱)$$

از رابطه $P_{out} = V_T \cdot I_L$ جریان I_L به‌دست می‌آید.

$$I_L = \frac{P_{out}}{V_T} \qquad (۳-۲۲)$$

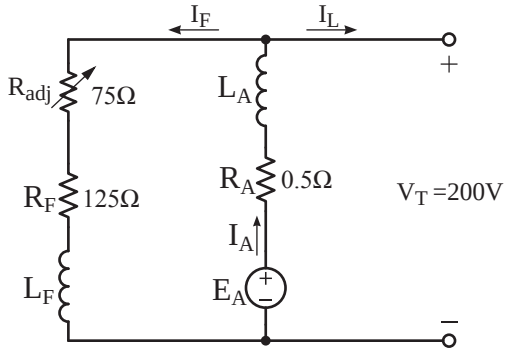
تلفات تحریک از رابطه (۱۳ ـ ۳) و تلفات آرمیچر از رابطه (۱۴ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$P_F = (R_F + R_{adj})I_F^۲$$
$$P_A = R_A I_A^۲$$

مثال ۸ ـ ۳ ـ ژنراتور شنت ۵ kW، ۲۰۰ V با مدار معادل الکتریکی مطابق شکل (۲۵ ـ ۳) در نظر است. مطلوب است:

الف ـ جریان آرمیچر I_A

ب ـ نیروی محرکه القایی آرمیچر



شکل ۲۵ ـ ۳

حل:

ـ از رابطه (۲۰ ـ ۳) جریان مدار تحریک I_F به‌دست می‌آید.

$$I_F = \frac{V_T}{R_F + R_{adj}} = \frac{۲۰۰}{۱۲۵ + ۷۵} = ۱\,[A]$$

ـ و از رابطه (۲۲ ـ ۳) جریان بار I_L به‌دست خواهد آمد.

$$I_L = \frac{P_{out}}{V_T} = \frac{۵ \times ۱۰^۳}{۲۰۰} = ۲۵\,[A]$$

ـ از رابطه (۱۹ ـ ۳) جریان آرمیچر I_A به‌دست می‌آید.

$$KCL) \quad -I_A + I_F + I_L = ۰$$
$$-I_A + ۱ + ۲۵ = ۰$$
$$I_A = ۲۶[A]$$

ـ از رابطه (۲۱ ـ ۳) نیروی محرکه القایی آرمیچر E_A به‌دست می‌آید.

$$I_A = \frac{E_A - V_T}{R_A}$$
$$۲۶ = \frac{E_A - ۲۰۰}{۰/۵}$$
$$۲۶ \times ۰/۵ = E_A - ۲۰۰$$
$$E_A = ۲۰۰ + ۲۶ \times ۰/۵ = ۲۱۳\,[V]$$

مثال ۹ ـ ۳ ـ کمیت‌های الکتریکی ژنراتور شنت به‌شرح زیر است:

$$E_A = ۱۴۰\,[A]\ ,\ R_A = ۱\ [\Omega]\ ,\ R_F = ۳۰\ [\Omega]$$
$$I_L = ۱۶\,[A]\ ,\ R_{adj} = ۰\ [\Omega]$$

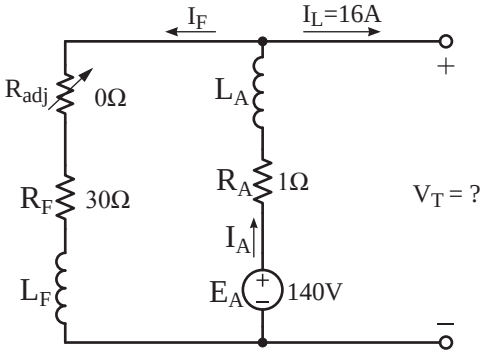
مطلوب است:

الف ـ ولتاژ ترمینال ژنراتور

ب ـ تلفات مسی آرمیچر و تحریک

حل:

ـ مدار معادل الکتریکی ژنراتور تحریک موازی را رسم می‌کنیم و کمیت‌های آن را می‌نویسیم.



ـ رابطه (۲۰ ـ ۳) را برای جریان تحریک می‌نویسیم.

$$I_F = \frac{V_T}{R_F + R_{adj}} = \frac{V_T}{۳۰+۰} = \frac{V_T}{۳۰}$$

ـ رابطه (۲۱ ـ ۳) را برای جریان آرمیچر می‌نویسیم.

$$I_A = \frac{E_A - V_T}{R_A} = \frac{۱۴۰ - V_T}{۱}$$

ـ برای گره مدار تحریک و آرمیچر KCL می‌نویسیم. و مقادیر I_A ، I_F و I_L را جایگزین می‌کنیم.

$$KCL)\quad -I_A + I_F + I_L = ۰$$
$$-\frac{۱۴۰ - V_T}{۱} + \frac{V_T}{۳۰} + ۱۶ = ۰$$

ـ مخرج مشترک می‌گیریم.

$$\frac{-۴۲۰۰ + ۳۰V_T + V_T + ۴۸۰}{۳۰} = ۰$$
$$۳۱V_T - ۳۷۲۰ = ۰$$
$$V_T = \frac{۳۷۲۰}{۳۱} = ۱۲۰\,[V]$$

ـ اکنون با محاسبه V_T مقادیر جریان‌های I_A و I_F را از روابط (۲۰ ـ ۳) و (۲۱ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$I_A = \frac{E_A - V_T}{R_A} = \frac{۱۴۰ - ۱۲۰}{۱} = ۲۰\,[A]$$
$$I_F = \frac{V_T}{R_F + R_{adj}} = \frac{۱۲۰}{۳۰+۰} = ۴\,[A]$$

ـ از رابطه (۱۳ ـ ۳) تلفات تحریک و از رابطه (۱۴ ـ ۳) تلفات آرمیچر به‌دست می‌آید.

$$P_F = (R_F + R_{adj})I_F^۲ = (۳۰+۰)\times ۴^۲ = ۴۸۰\,[w]$$
$$P_A = R_A I_A^۲ = ۱\times ۲۰^۲ = ۴۰۰\,[w]$$

پرسش ۵ ـ ۳

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ در ژنراتور شنت مدار تحریک با مدار آرمیچر به صورت ..... اتصال داده می‌شود و بین آنها ..... برقرار می‌باشد.

۲ ـ سیم‌پیچی تحریک بر روی ..... قرار داده

شده است.

۳ ـ بـــرای اندازه‌گیری جریان تحریـــک از ..... و بـــرای اندازه‌گیری ولتاژ پایانه‌های ماشـــین از ..... استفاده می‌شود.

پرسش‌های صحیح غلط

۱ ـ ســـیم‌پیچی تحریک شنت با تعداد دور کم برای جریان زیاد طراحی شده است.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ از مقاومـــت متغیـــر R_{adj} بـــرای تنظیم جریان تحریک استفاده می‌شود.

صحیح ☐ غلط ☐

۳ ـ روش متـــداول اندازه‌گیری اثرات مغناطیســـی استفاده از منحنی مشخصه‌های ژنراتور است.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ طرح ســـاختمانی ژنراتور شنت شکل (۲۳ ـ ۳) را توضیح دهید.

۲ ـ نحوه راه‌اندازی ژنراتور شنت را بنویسید.

۳ ـ برای راه‌اندازی ژنراتور شـــنت چـــه نکاتی باید رعایت شود؟

۴ ـ در صورتی‌کـــه پس‌ماند مغناطیســـی قطب‌های ژنراتور شنت از بین برود چه باید کرد؟

۵ ـ ژنراتور شـــنت به هنـــگام راه‌انـــدازی برعکس گردانده شـــده اســـت. اکنون برای راه‌اندازی صحیح آن چه باید کرد؟

۶ ـ مدار الکتریکی معادل ژنراتور شنت را رسم کنید و کمیت‌های الکتریکی آن را معرفی کنید.

۷ ـ چرا جهت جریان آرمیچر از سوی نیروی محرکه القایی E_A به سمت ترمینال‌های ژنراتور شنت است؟

تمرین ۴ ـ ۳

۱ ـ ژنراتور شنت با جریان تحـریک ۲A و آرمیچـر A ۱۲ مفروض است. مقاومت مدار تحریک و تنظیم‌کننده جریان تحریک روی هم ۱۰۰Ω می‌باشد. اگر مقاومت سیم‌پیچی آرمیچر ۰/۵Ω باشد مطلوب است:

الف ـ ولتاژ ترمینال‌های ژنراتور

ب ـ توان خروجی ژنراتور

پ ـ نیروی محرکه القایی آرمیچر

۲ ـ ژنراتـــور شنـــت ۴ kw، ۲۰۰ V بـا رانـــدمـان ۸۰ ٪ مفروض اســـت. مقاومت مـــدار آرمیچر ۰/۲Ω و مدار تحریک ۲۰۰Ω است. مطلوب است:

الف ـ نیروی محرکه القایی آرمیچر

ب ـ توان تبدیل شده

پ ـ تلفات ثابت

۳ ـ ژنراتور شنت توسط محرک با توان ۱۰ اسب بخار گردانده می‌شود و ژنراتور ولتاژ ۵۰۰ V و جریان ۱۲ A به بار می‌دهد، اگر مقاومت مدار تحریک $R_F = ۵۰۰\Omega$ و آرمیچر $R_A = ۰/۲\Omega$ باشد. مطلوب است:

الف ـ بازده ژنراتور

ب ـ تلفات مسی

پ ـ تلفات ثابت

۴ ـ مقاومت مـــدار تحریک و آرمیچـــر یک ژنراتور شـــنت به ترتیب ۲۰۰Ω و ۰/۱Ω می‌باشد. اگر تلفات سیم‌پیچ تحریک ۸۰۰ W و تلفات سیم‌پیچ آرمـــیچر

۱۰۰۰W باشد مطلوب است:

الف ـ جریان آرمیچر و بار

ب ـ نیروی محرکه القایی آرمیچر

پ ـ بازده ژنراتور در صورتی که تلفات ثابت ۱۵۰۰ W باشد.

۱۶ ـ ۳ ـ منحنی مشخصه بی‌باری ژنراتور شنت

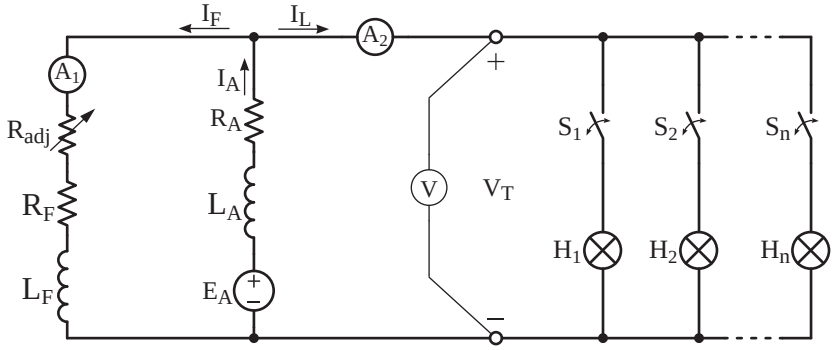
منحنی مشخصه بی‌باری از آزمایش بی‌باری به‌دست می‌آید و هدف تعیین تأثیر جریان تحریک I_F بر نیروی محرکه القایی آرمیچر E_A در سرعت ثابت است. برای انجام آزمایش بی‌باری ژنراتور شنت، ابتدا مدار سیم‌پیچی تحریک را از مدار سیم‌پیچی آرمیچر جدا می‌کنند. سپس مانند یک ژنراتور تحریک مستقل مطابق آنچه که در قسمت ۱۰ ـ ۳ توضیح داده شد آزمایش بی‌باری را انجام می‌دهند.

منحنی مشخصه بی‌باری ژنراتور شنت مشابه منحنی مشخصه بی‌باری ژنراتور تحریک مستقل است.

۱۷ ـ ۳ ـ منحنی مشخصه بارداری ژنراتور شنت

منحنی مشخصه بارداری از آزمایش بارداری به‌دست می‌آید و هدف تعیین تأثیر جریان بار I_L بر ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T در سرعت n ثابت و جریان تحریک I_F ثابت است.

برای انجام آزمایش بارداری، ژنراتور شنت را مطابق مدار الکتریکی شکل (۲۶ ـ ۳) اتصال می‌دهند.



شکل ۲۶ ـ ۳ مدار الکتریکی آزمایش بارداری ژنراتور شنت

آمپرمتر A_1 جریان تحریک I_F و آمپرمتر A_2 جریان بار I_L و ولت‌متر V ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T را نشان می‌دهند.

ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T از رابطه (۲۱ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$I_A = \frac{E_A - V_T}{R_A}$$

$$R_A I_A = E_A - V_T$$

$$V_T = E_A - R_A I_A \qquad (۳-۲۳)$$

در آزمایش بارداری سرعت و جریان تحریک ثابت نگه داشته می‌شوند. لذا نیروی محرکه القایی E_A

مقداری ثابت خواهد داشت. جریان آرمیچر I_A متاثر از جریان بار I_L است. پس با توجه به رابطه (۲۳ ـ ۳) ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T تابعی از جریان بار I_L می‌باشد.

در شکل (۲۶ ـ ۳) از لامپ‌های H_1 تا H_n به عنوان بار و از کلیدهای S_1 تا S_n برای اتصال آنها به پایانه‌های ژنراتور استفاده شده است.

۱ ـ ۱۷ ـ ۳ ـ آزمایش بارداری

برای انجام آزمایش بارداری ابتدا رتور ژنراتور توسط محرک با سرعت ثابت گردانده می‌شود. سپس با کاهش مقاومت تنظیم‌کننده جریان تحریک R_{adj} جریان تحریک را افزایش می‌دهند تا ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T به مقدار نامی برسد. اکنون کلیدهای S_1 تا S_n شکل (۲۶ ـ ۳) را به ترتیب می‌بندند و با روشن کردن لامپ‌های H_1 تا H_n جریان بار I_L را طی چند مرحله افزایش می‌دهند و در هر مرحله مقادیر ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T که توسط ولتمتر V و جریان بار I_L که توسط آمپرمتر A_2 اندازه‌گیری می‌شوند را در جدولی یادداشت می‌نمایند. این کار آنقدر ادامه می‌یابد تا جریان بار I_L به مقدار جریان نامی ژنراتور برسد.

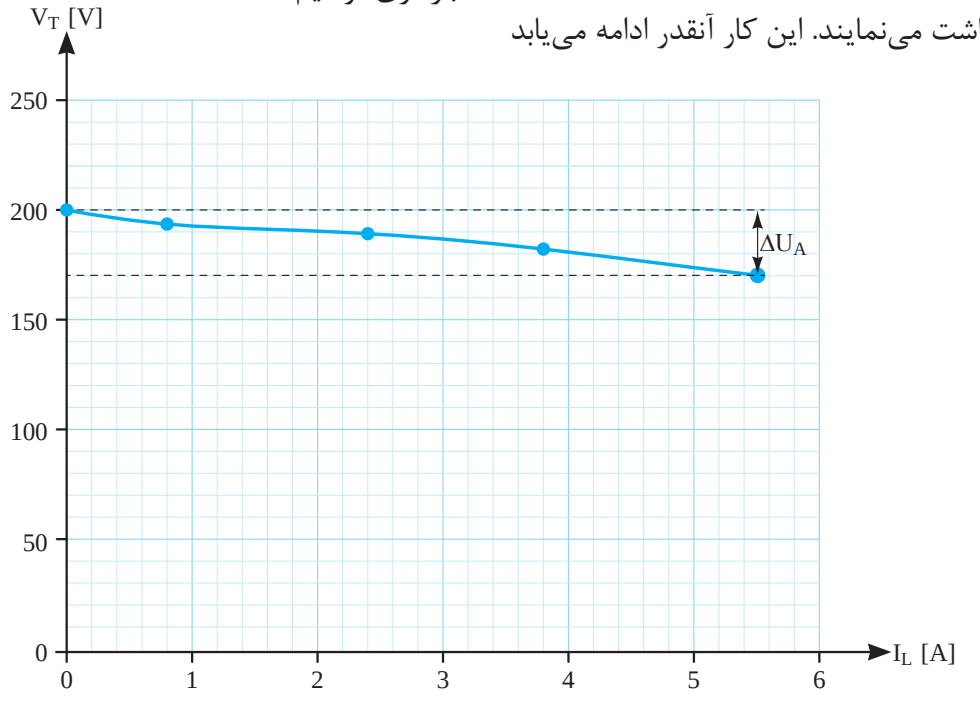
سپس روی یک دستگاه مختصات نقاط نشان‌دهنده مقدار V_T به ازای جریان بار I_L معینی را مشخص می‌نمایند. این نقاط را به یکدیگر وصل می‌کنند تا «منحنی مشخصه بارداری» ژنراتور شنت به‌دست آید.

جدول (۵ ـ ۳) نتیجه آزمایش بارداری ژنراتور شنت ۱ kW، ۵/۵ A و ۲۰۰ V را در سرعت ۱۵۰۰ RPM نشان می‌دهد. این همان ماشینی است که بر روی آن آزمایش بی‌باری و باداری در بخش ۱۱ ـ ۳ انجام شده است.

I_L[A]	۰	۰/۸	۲/۴	۳/۸	۵/۵
V_T[v]	۲۰۰	۱۹۳/۵	۱۸۹	۱۸۲	۱۷۰

جدول ۵ ـ ۳ نتیجه آزمایش بارداری ژنراتور شنت

نقاط نشان‌دهنده‌ی مقدار هر ولتاژ به ازای جریان بار معین جدول (۵ ـ ۳) در شکل (۲۷ ـ ۳) نشان داده شده است. با اتصال نقاط به یک‌دیگر منحنی مشخصه بارداری ترسیم شده است.



شکل ۲۷ ـ ۳ منحنی مشخصه بارداری ژنراتور شنت

فعالیت ۳ ـ ۳ ـ با استفاده از برنامه *Excel* نمودار مربوط به جدول (۵ ـ ۳) را رسم نمایید.

مثال ۹ ـ ۴ ـ منحنی مشخصه بارداری شکل (۲۷ ـ ۳) مربوط به ژنراتور شنت با مقاومت اهمی سیم‌پیچی آرمیچر $R_A = ۱/۲۵\Omega$ است. به ازای جریان بار $I_L = ۵/۵A$ درصد تنظیم ولتاژ $\%V_R$ را به‌دست آورید.

حل:

با توجه به منحنی مشخصه بارداری به‌دست می‌آوریم:

$$I_L = ۰ \Rightarrow V_T = E_A = ۲۰۰\,[V]$$
$$I_L = ۵/۵[A] \Rightarrow V_T = ۱۷۰\,[V]$$

با توجه به رابطه (۸ ـ ۳) درصد تنظیم ولتاژ به‌دست می‌آید.

$$\%V_R = \frac{E_A - V_T}{V_T} \times ۱۰۰$$
$$\%V_R = \frac{۲۰۰ - ۱۷۰}{۱۷۰} \times ۱۰۰ = \%۱۷$$

۱۸ ـ ۳ ـ کاربرد ژنراتور شنت

ژنراتور شنت بیش از ژنراتورهای تحریک مستقل کاربرد پیدا می‌کند زیرا به منبع ولتاژ مستقل برای تحریک احتیاج ندارد.

از طرفی سیم‌پیچی آرمیچر ژنراتورهای شنت، موظف به تامین جریان بار I_L و جریان تحریک I_F است. بنابراین سیم‌پیچی آرمیچر ژنراتور شنت تحت جریان بیشتری نسبت به ژنراتور تحریک مستقل قرار می‌گیرد. به همین دلیل افت ولتاژ ناشی از مقاومت اهمی سیم‌پیچی آرمیچر $R_A I_A$ و اثرات مغناطیسی آرمیچر ε بیش‌تر خواهد شد. این موضوع از مقایسه مثال‌های (۷ ـ ۴) و (۹ ـ ۴) کاملاً مشهود است.

ژنراتورهای شنت در شارژ باتری‌ها و تغذیه تحریک ژنراتورهای نیروگاه‌ها کاربرد دارند.

پرسش ۶ ـ ۳

۱ ـ نحوه انجام آزمایش بارداری ژنراتور شنت را شرح دهید.

۲ ـ هدف از انجام آزمایش بارداری را بنویسید.

۳ ـ بین ژنراتورهای شنت با ژنراتورهای تحریک مستقل از دیدگاه کاربرد، مقایسه‌ای انجام دهید.

۴ ـ کاربرد ژنراتور شنت را بنویسید.

تمرین ۵ ـ ۳

۱ ـ نتایج آزمایش بی‌باری و بارداری ژنراتور شنت ۴۰۰ V، ۴۰ kw با مقاومت اهمی سیم‌پیچ آرمیچر $R_A = ۰/۳\Omega$ و سیم‌پیچ تحریک $R_F = ۳۰۰\Omega$ به شرح زیر است:

I_F[A]	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۸	۱	۱/۲	۱/۴	۱/۵
E_A [V]	۱۴۷	۲۷۸	۳۷۴	۴۲۵	۴۵۷	۴۸۵	۵۱۲	۵۲۳

I_L[A]	۰	۲۰	۳۰	۵۰	۷۰	۸۰	۱۰۰
V_T [V]	۴۵۰	۴۴۰	۴۳۳	۴۱۶	۳۹۳	۳۷۹	۳۴۶

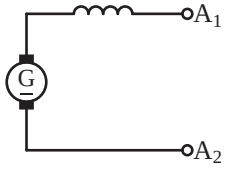
مطلوب است:

الف ـ جریان سیم‌پیچ تحریک و آرمیچر در بار نامی

ب ـ افت ولتاژ ناشی از اثرات مغناطیسی در بار نامی

۱۹ ـ ۳ ـ ژنراتورهای جریان مستقیم با تحریک سری

ژنراتور جریان مستقیم با تحریک سری را به اختصار «ژنراتور سری[۱]» گویند. در ژنراتور سری مدار تحریک با مدار آرمیچر به صورت سری اتصال داده می‌شود و بین آنها ارتباط الکتریکی برقرار می‌باشد. نقشهٔ اختصاری ژنراتور سری در شکل (۲۸ ـ ۳) نشان داده شده است.



شکل ۲۸ ـ ۳ نقشه اختصاری ژنراتور سری

طرح ساختمانی ژنراتور سری در شکل (۲۹ ـ ۳) نشان داده شده است.

استاتور دارای قطب‌های برجسته می‌باشد. سیم‌پیچی تحریک بر روی قطب‌ها قرار داده شده است. این سیم‌پیچی با تعداد دور کم برای جریان زیاد به گونه‌ای طراحی می‌شود تا نیروی محرکه مغناطیسی $(\theta = NI)$ مورد نیاز را تأمین نماید. سیم‌پیچی تحریک، سری با سیم‌پیچی آرمیچر اتصال داده شده است. لذا جریان سیم‌پیچی تحریک برابر جریان آرمیچر می‌باشد و ولتاژ سیم‌پیچی تحریک با عبور جریان آرمیچر از سیم‌پیچ تحریک تأمین می‌شود. مصرف کننده R_L توسط کلید S به ترمینال‌های A_1 و A_2 آرمیچر اتصال داده شده است. با بستن کلید S مقاومت بار و سیم‌پیچ تحریک با سیم‌پیچ آرمیچر به صورت سری در می‌آیند و از ولتاژ و جریان آرمیچر تغذیه می‌کنند. جریان این مدار سری توسط آمپرمتر A و ولتاژ پایانه‌های ماشین V_T توسط ولت‌متر V اندازه‌گیری می‌شود.

شکل ۲۹ ـ ۳ طرح ساختمانی ژنراتور سری

۲۰ ـ ۳ ـ راه‌اندازی ژنراتور سری

برای راه‌اندازی ژنراتور سری کلید S شکل (۲۹ ـ ۳) را باز می‌گذارند. سپس رتور را با سرعت نامی به گردش درمی‌آورند تا فوران ناشی از پس‌ماند مغناطیسی قطب‌ها، نیروی محرکه القایی پس‌ماند E_o در سیم‌پیچی آرمیچر القا کند. در این لحظه ولتاژ پایانه‌های ژنراتور به حداقل مقدار خود که برابر نیروی محرکه القایی پسماند E_o است می‌رسد. در این حال ژنراتور راه‌اندازی شده است و آماده برای اتصال به بار است.

۱. Series Generator

۱ ـ ۲۰ ـ ۳ ـ بهره‌برداری

پس از راه‌اندازی ژنراتور تحریک سری با بستن کلید S شکل (۲۹ ـ ۳) بار به پایانه‌های ژنراتور متصل خواهد شد و مدار سری شامل بار، سیم‌پیچی تحریک و سیم‌پیچی آرمیچر ایجاد می‌شود. نیروی محرکه القایی پسماند E_o سیم‌پیچی آرمیچر، جریان ضعیفی در مدار سری متشکل از بار، سیم‌پیچی تحریک و سیم‌پیچی آرمیچر جاری می‌نماید. این جریان، فوران مغناطیسی قطب‌ها را افزایش می‌دهد تا نیروی محرکه القایی بیشتری در سیم‌پیچی آرمیچر القا شود. لذا ولتاژ پایانه‌های ژنراتور افزایش می‌یابد. با افزایش ولتاژ پایانه‌ها، جریان بار زیاد می‌شود. این جریان هنگام عبور از سیم‌پیچی تحریک فوران قطب‌ها را دوباره افزایش می‌دهد. این عمل آنقدر ادامه می‌یابد تا ولتاژ پایانه‌های ژنراتور ثابت شود.

۲ ـ ۲۰ ـ ۳ ـ شرایط راه‌اندازی

برخی مواقع پس از به گردش در آوردن رتور ژنراتور سری و اتصال به بار، ژنراتور راه‌اندازی نمی‌شود و «ولتاژگیری» نمی‌کند. عواملی که سبب عدم راه‌اندازی ژنراتور تحریک سری خواهند شد عبارت است از:

۱ ـ پسماند مغناطیسی در قطب‌ها وجود ندارد.

۲ ـ جهت جریان سیم‌پیچی تحریک صحیح نیست.

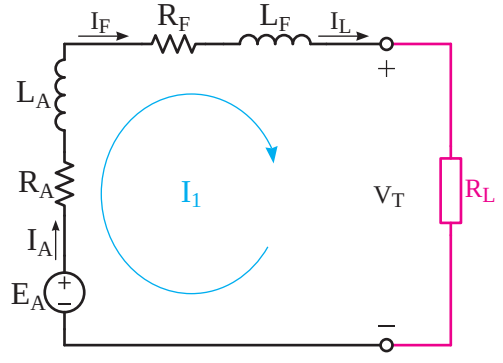
۳ ـ جهت گردش رتور صحیح نیست.

۴ ـ سرعت گردش رتور کمتر از سرعت نامی است.

برای رفع اشکال ناشی از عوامل بالا مطابق آنچه که در بخش ۱ ـ ۱۴ ـ ۳ توضیح داده شد اقدام می‌شود.

۲۱ ـ ۳ ـ مدار الکتریکی معادل ژنراتور سری

محاسبه کمیت‌های الکتریکی ولتاژ، جریان و توان با استفاده از مدار معادل الکتریکی امکان‌پذیر است. در شکل (۳۰ ـ ۳) مدار الکتریکی معادل ژنراتور سری نشان داده شده است.



شکل ۳۰ ـ ۳ مدار الکتریکی معادل ژنراتور تحریک سری

این مدار معادل نشان می‌دهد مدار سیم‌پیچی تحریک، به صورت سری با مدار سیم‌پیچی آرمیچر ارتباط داده شده است.

مدار الکتریکی ژنراتور سری با روش جریان حلقه یا روش‌های دیگر قابل تحلیل است. معمولاً در تحلیل مدار الکتریکی، اثرات مغناطیسی عکس‌العمل آرمیچر و کموتاسیون به دلیل پیچیدگی محاسبات در نظر گرفته نمی‌شود. روش متداول اندازه‌گیری اثرات مغناطیسی استفاده از منحنی مشخصه‌های ژنراتور است.

با نوشتن KVL برای حلقه مدار الکتریکی معادل سیم‌پیچی‌های آرمیچر و تحریک معادل (۲۳ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$KVL۱) \quad -E_A + R_A I_L + R_F I_L + V_T = ۰ \quad (۳-۲۴)$$

جریان حلقه $I_۱$ از محل جریان‌های I_F، I_A و I_L می‌گذرد و رابطه (۲۵ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$I_A = I_F = I_L = I_1 \qquad (۳-۲۵)$$

با توجه به رابطه (۲۵ ـ ۳) جریان I_L را جایگزین I_1 در رابطه (۲۴ ـ ۳) می‌شود.

$$-E_A + R_A I_L + R_F I_L + V_T = ۰$$

از I_L فاکتور گرفته می‌شود و رابطه (۲۶ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

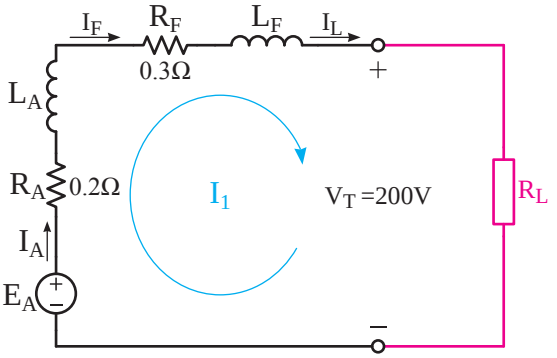
$$-E_A + (R_A + R_F) I_L + V_T = ۰$$

$$V_T = E_A - (R_A + R_F) I_L \qquad (۳-۲۶)$$

مثـــال ۱۰ ـ ۳ ـ ژنراتور جریان مســـتقیم تحریک سری ۱ kW، ۲۰۰ V با مدار معادل الکتریکی مطابق شکل (۳۱ ـ ۳) در نظر است. مطلوب است:

الف ـ جریان بار

ب ـ نیروی محرکه القایی آرمیچر



شکل ۳۱ ـ ۳

ـ از رابطه (۲۲ ـ ۳) جریان بار به‌دست می‌آید.

$$I_L = \frac{P_{out}}{V_T} = \frac{۱ \times ۱۰^{۳}}{۲۰۰} = ۵ \ [A]$$

ـ از رابطه (۲۵ ـ ۳) خواهیم داشت:

$$I_A = I_F = I_L = I_1 = ۵ \ [A]$$

ـ KVL را طبق رابطه (۲۴ ـ ۳) برای جریان حلقه I_1 می‌نویسیم:

$$KVL۱) \quad -E_A + R_A I_1 + R_F I_1 + V_T = ۰$$
$$-E_A + ۰/۲(۵) + ۰/۳(۵) + ۲۰۰ = ۰$$
$$-E_A + ۱ + ۱/۵ + ۲۰۰ = ۰$$
$$E_A = ۲۰۲/۵ \ [V]$$

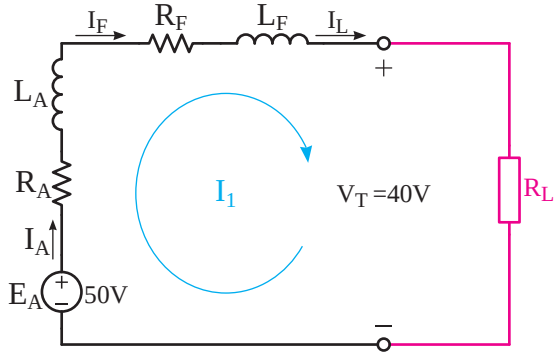
مثال ۱۱ ـ ۳ ـ ژنراتور جریان مستقیم تحریک سری با نیـــروی محرکه القایی آرمیچر ۵۰ V و ولتاژ ترمینال ۴۰ V مفروض اســـت. مقاومت مدار تحریک و آرمیچر روی هم ۰/۸ Ω است. مطلوب است:

الف ـ توان خروجی

ب ـ بازده در صورتی‌که تلفات ثابت ۷۵ W باشد.

حل:

ـ ابتدا مدار معادل الکتریکی ژنراتور تحریک سری را رسم می‌کنیم و کمیت‌های الکتریکی آن را می‌نویسیم و جریان حلقه I_1 را نشان می‌دهیم.



ـ KVL را طبق رابطه (۲۴ ـ ۳) برای جریان حلقه I_1 می‌نویسیم:

$$KVL۱) \quad -E_A + R_A I_1 + R_F I_1 + V_T = ۰$$

ـ مقادیر R_A و R_F به‌صورت $R_A + R_F = ۰/۸$ داده شده است. بنابراین از جریان $I_۱$ در رابطه (۲۴ ـ ۳) فاکتور می‌گیریم.

$$KVL۱) \quad -E_A + (R_A + R_F)I_۱ + V_T = ۰$$

ـ مقادیر را جایگزین و مقدار جریان حلقه $I_۱$ را به‌دست می‌آوریم.

$$-۵۰ + (۰/۸)I_۱ + ۴۰ = ۰$$
$$۰/۸ I_۱ = ۱۰$$
$$I_۱ = ۱۲/۵ \ [A]$$

ـ جریان حلقه $I_۱$ از محل جریان‌های I_F، I_A و I_L می‌گذرد و طبق رابطه (۲۵ ـ ۳) داریم:

$$I_A = I_F = I_L = I_۱ = ۱۲/۵ [A]$$

ـ توان خروجی از رابطه (۲ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$P_{out} = V_T \cdot I_L$$
$$P_{out} = ۴۰ \times ۱۲/۵ = ۵۰۰ [W]$$

ـ تلفات تحریک از رابطه (۲۶ ـ ۳) و تلفات آرمیچر از رابطه (۱۴ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$P_F = R_F I_F^۲$$
$$P_A = R_A I_A^۲$$

ـ تلفات مسی از حاصل جمع تلفات تحریک و آرمیچر به‌دست می‌آید.

$$P_A + P_F = R_A I_A^۲ + R_F I_F^۲$$

ـ در ژنراتور تحریک سری طبق رابطه (۲۶ ـ ۳)، $I_A = I_F$ است. با جایگزینی I_A به جای I_F خواهیم داشت:

$$P_A + P_F = R_A I_A^۲ + R_F I_F^۲$$
$$P_A + P_F = (R_A + R_F) I_A^۲$$
$$P_A + P_F = (۰/۸)(۱۲/۵)^۲ = ۱۲۵ \ [W]$$

ـ تلفات کل از رابطه (۳ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$\Delta P = P_{mec} + P_{core} + P_a + P_F$$
$$\Delta P = ۷۵ + ۱۲۵ = ۲۰۰ [w]$$

ـ توان ورودی از رابطه (۴ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$\Delta P = P_{in} - P_{out}$$
$$P_{in} = P_{out} + \Delta P$$
$$P_{in} = ۵۰۰ + ۲۰۰ = ۷۰۰ [W]$$

ـ بازده از رابطه (۵ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$\%\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times ۱۰۰$$
$$\%\eta = \frac{۵۰۰}{۷۰۰} \times ۱۰۰ = \%۷۱$$

پرسش ۷ ـ ۳

۱ـ طرح ساختمانی ژنراتور تحریک سری شکل (۲۹ ـ ۳) را توضیح دهید.

۲ ـ نحوهٔ راه‌اندازی ژنراتور تحریک سری را بنویسید.

۳ ـ چه نکاتی را هنگام راه‌اندازی ژنراتور تحریک

سری باید رعایت کرد؟

۴ ـ چرا بـــه هنگام راه‌انـــدازی ژنراتورهای تحریک سری، قطب‌ها باید پسماند مغناطیسی داشته باشند؟

۵ ـ مدار معادل الکتریکی ژنراتور تحریک ســـری را رسم کنید و کمیت‌های الکتریکی آن را معرفی کنید.

۶ ـ در ژنراتور تحریک ســـری چرا ولتاژ پایانه‌ها V_T کوچک‌تر از نیروی محرکه القایی آرمیچر E_A است؟

تمرین ۶ ـ ۳

۱ ـ یـک ژنراتور جـــــریان مستقیم تحریک سری ۱۰ kW کـــه جریان تحریک آن ۱۰ A اســـت دارای تلفـــات مکانیکـــی ۶۵۰ W و تلفـــات آهنی ۵۰ W و مقاومت ســـیم‌پیچی آرمیچر ۳Ω و سیم‌پیچی تحریک سری ۳/۵Ω می‌باشد. مطلوب است:

الف ـ تلفات کل

ب ـ توان ورودی ژنراتور

پ ـ توان الکترومغناطیسی

ت ـ نیروی محرکه القایی آرمیچر

۲ ـ یک ژنراتور تحریک ســـری ۲۰۰V، ۱۲kW با بازده ۸۰ ٪ دارای مقاومـــت آرمیچر ۰/۲Ω و تحریک ۰/۳Ω می‌باشد. مطلوب است:

الف ـ تلفات مسی ژنراتور

ب ـ تلفات ثابت ژنراتور

۳ ـ یـــک ژنراتور ســـری ۲۰۰ V، ۱۵۰ A دارای ۶ قطب می‌باشد. ســـیم‌پیچی آرمیچر دارای ۶۰۰ هادی و به‌صورت حلقوی ســـاده سیم‌بندی شـــده است. اگر مقاومت آرمیچر و تحریک به ترتیب ۰/۰۲Ω و ۰/۰۴Ω باشد مطلوب است:

الف ـ نیروی محرکه القایی آرمیچر

ب ـ ســـرعت ژنراتـــور در صورتی‌که فوران هر قطب ۲۱ mwb باشد.

۲۲ ـ ۳ ـ منحنی مشـــخصه بی‌باری ژنراتور سری

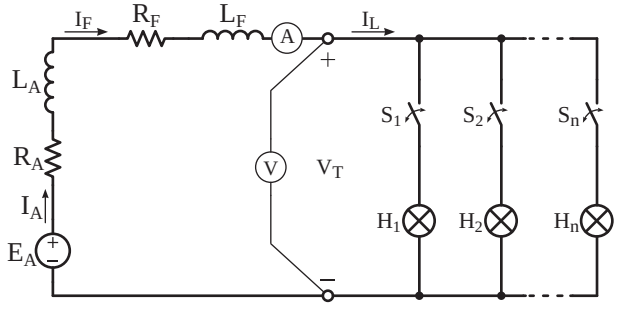
برای انجام آزمایش بی‌باری ژنراتور ســـری ابتدا مدار سیم‌پیچی تحریک را از مدار ســـیم‌پیچی آرمیچر جدا می‌کنند؛ ســـپس همانند یک ژنراتور تحریک مســـتقل مطابق آنچه در قسمت ۱۰ ـ ۳ توضیح داده شد آزمایش بی‌باری را انجام می‌دهند.

منحنی مشخصه بی‌باری ژنراتور سری مشابه منحنی مشخصه بی‌باری ژنراتور تحریک مستقل است.

۲۳ ـ ۳ ـ منحنی مشـــخصه بارداری ژنراتور تحریک سری

منحنی مشـــخصه بارداری ژنراتور تحریک سری از آزمایش بارداری به‌دســـت می‌آیـــد و هدف تعیین تأثیر جریان بار I_L بر ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T در ســـرعت n ثابت است.

برای انجام آزمایش بارداری، ژنراتور تحریک سری را مطابق مدار الکتریکی شکل (۳۲ ـ ۳) اتصال می‌دهند.



شکل ۳۲ ـ ۳ مدار الکتریکی آزمایش بارداری ژنراتور تحریک سری

آمپرمتر A جریان مدار سری شامل سیم‌پیچی آرمیچر، تحریک و بار و ولت‌متر V ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T را نشان می‌دهند. از لامپ های H_1 تا H_n به‌عنوان بار و از کلیدهای S_1 تا S_n برای اتصال آنها به پایانه‌های ژنراتور استفاده شده است.

۱ ـ ۲۳ ـ ۳ ـ آزمایش بارداری

برای انجام آزمایش بارداری پس از برقراری شرایط راه‌اندازی، رتور ژنراتور توسط محرک با سرعت ثابت گردانده می‌شود. سپس کلیدهای S_1 تا S_n شکل (۳۲ ـ ۳) را به ترتیب می‌بندند و با روشن کردن لامپ‌های H_1 تا H_n جریان بار I_L را طی چند مرحله افزایش می‌دهند و در هر مرحله مقادیر ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T که توسط ولت‌متر V و جریان بار I_L که توسط آمپرمتر A اندازه‌گیری می‌شوند را در جدولی یادداشت می‌کنند. این کار آن‌قدر ادامه می‌یابد تا جریان بار I_L به مقدار جریان نامی ژنراتور برسد.

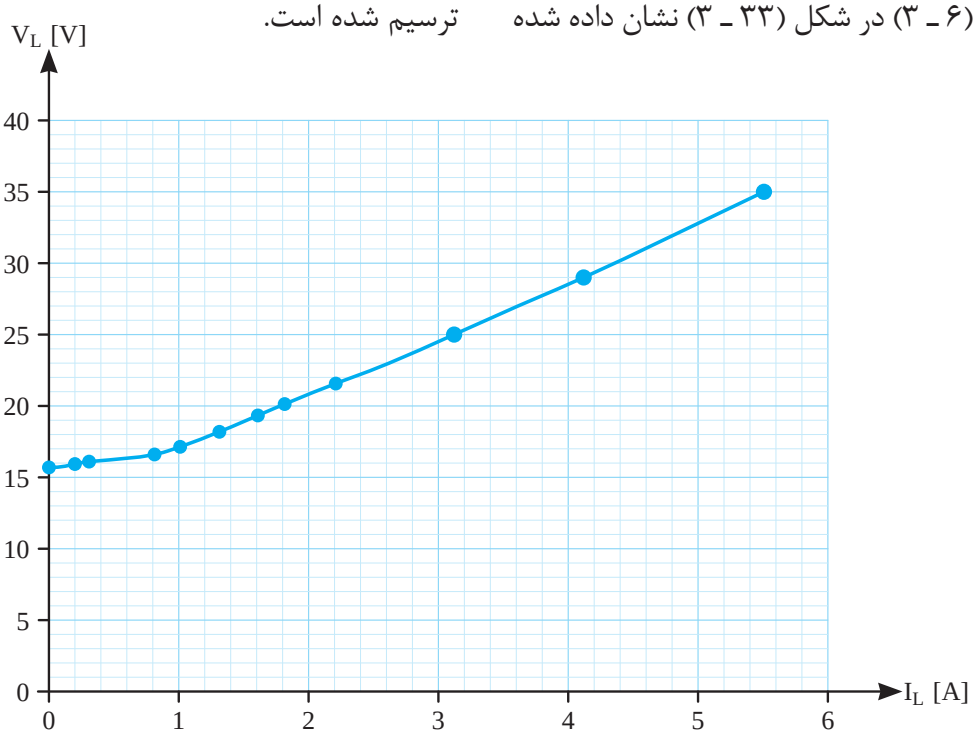
سپس روی یک دستگاه مختصات نقاط نشان دهنده مقدار V_T به ازای هر جریان بار I_L معینی را مشخص می‌کنند؛ این نقاط را به یکدیگر وصل می‌کنند تا «منحنی مشخصه بارداری» ژنراتور سری به‌دست آید.

جدول (۶ ـ ۳) نتیجه آزمایش بارداری ژنراتور سری ۱۹۵ W ، ۵/۵ A و ۳۵ V را در سرعت ۱۵۰۰ RPM نشان می‌دهد.

I_L[A]	۰	۰/۲	۰/۳	۰/۸	۱	۱/۳	۱/۶	۱/۸	۲/۲	۳/۱	۴/۱	۵/۲
V_T [v]	۱۵/۶	۱۵/۶	۱۶	۱۶/۵	۱۷/۲	۱۸/۲	۱۹/۳	۲۰/۳	۲۱/۴	۲۵	۲۹	۳۵

جدول ۶ ـ ۳ نتیجه آزمایش بارداری ژنراتور سری

نقاط نشان‌دهنده مقدار هر ولتاژ به ازای جریان بار معین جدول (۶ ـ ۳) در شکل (۳۳ ـ ۳) نشان داده شده است. با اتصال نقاط به یکدیگر منحنی مشخصه بارداری ترسیم شده است.



شکل ۳۳ ـ ۳ منحنی مشخصه بارداری ژنراتور تحریک سری

فعالیت ۴ ـ ۳ ـ با استفاده از برنامه *Excel* نمودار مربوط به جدول (۶ ـ ۳) را رسم نمایید.

مثال ۱۲ ـ ۳ ـ جدول (۷ ـ ۳) نتایج آزمایش بی‌باری ژنراتور سری ۱۹۵ W، ۵/۵ A و ۳۵ V را در سرعت ۱۵۰۰ RPM نشان می‌دهد. اگر مقاومت سیم‌پیچی آرمیچر $R_A = ۱/۲۵\ \Omega$ و مقاومت سیم‌پیچی تحریک $R_F = ۰/۳\ \Omega$ باشد، مطلوب است:

الف ـ افت ولتاژ ناشی از اثرات مغناطیسی آرمیچر در بارنامی

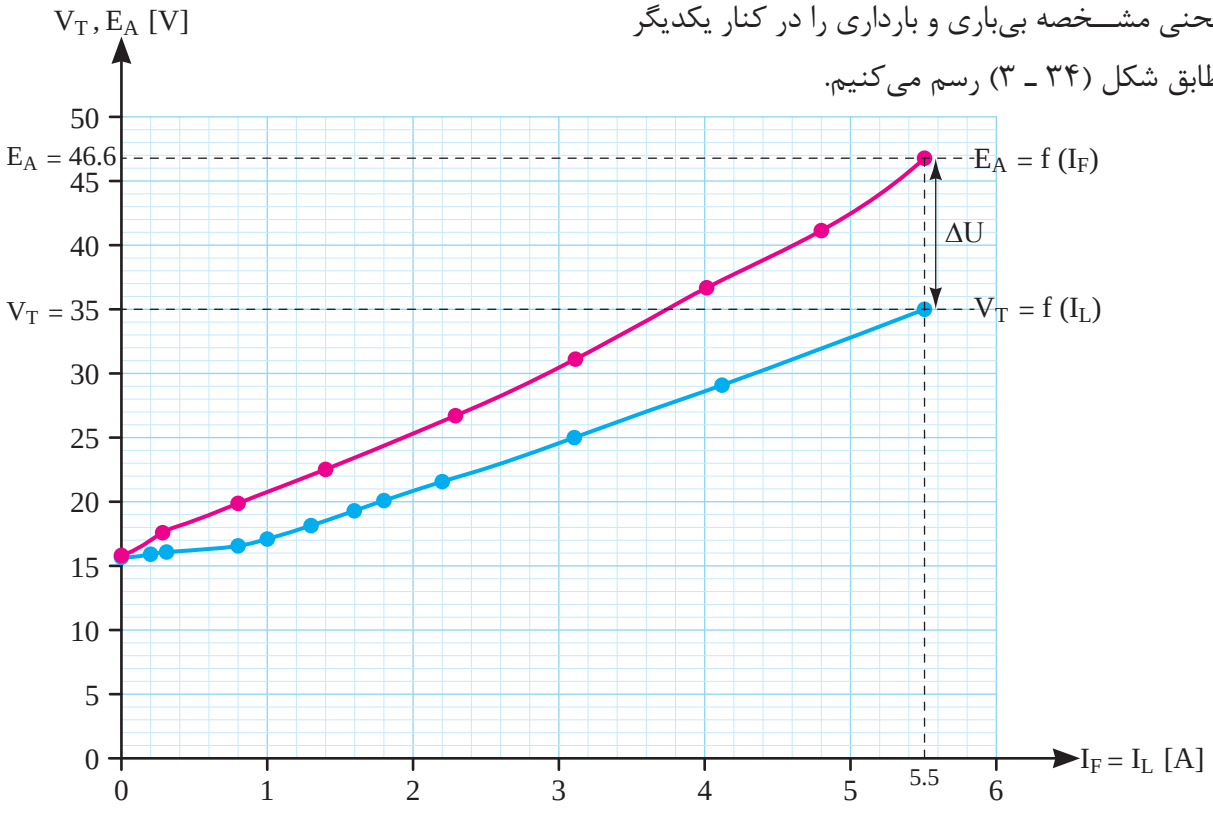
ب ـ درصد تنظیم ولتاژ در بارنامی

$I_F[A]$	۰	۰/۳	۰/۸	۱/۴	۲/۳	۳/۱	۴	۴/۸	۵/۵
E_A [v]	۱۵/۶	۱۷/۵	۱۹/۹	۲۲/۵	۲۶/۷	۳۱	۳۶/۷	۴۱/۱	۴۶/۶

جدول ۷ ـ ۳ نتیجه آزمایش بی‌باری ژنراتور سری

حل:

با توجه به نتایج جدول (۷ ـ ۳) و جدول (۶ ـ ۳) منحنی مشخصه بی‌باری و بارداری را در کنار یکدیگر مطابق شکل (۳۴ ـ ۳) رسم می‌کنیم.



شکل ۳۴ ـ ۳

ـ اختلاف میان منحنی مشخصه بی‌باری و بارداری ژنراتور تحریک سری نشان‌دهنده افت ولتاژ آرمیچر ΔU_A است. به ازای جریان نامی ژنراتور $I_L = ۵/۵\,A$ مقدار نیروی محرکه القایی آرمیچر E_A از منحنی مشخصه بی‌باری و مقدار ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T به‌دست می‌آید.

$$E_A = ۴۶/۶[V]$$
$$V_T = ۳۵[V]$$

ـ از رابطـه (۱۸ ـ ۳) افـت ولتاژ آرمیچر به‌دسـت می‌آید.

$$\Delta U_A = E_A - V_T$$
$$\Delta U_A = ۴۶/۶ - ۳۵ = ۱۱/۶[V]$$

ـ در ژنراتورهای تحریک سـری افـت ولتاژ آرمیچر شـامل افت ولتاژ ناشـی از مقاومت اهمی سیم‌پیچی آرمیچـر $R_A I_L$ و افـت ولتاژ ناشـی از مقاومت اهمی سـیم‌پیچی تحریک $R_F I_L$ و افت ولتاژ ناشـی از اثرات مغناطیسی آرمیچر ε می‌باشد (رابطه ۲۷ ـ ۳).

$$\Delta U_A = R_A I_L + R_F I_L + \varepsilon \qquad (۳-۲۷)$$

$$\Delta U_A = (R_A + R_F) I_L + \varepsilon$$
$$۱۱/۶ = (۱/۲۵ + ۰/۳) \times ۵/۵ + \varepsilon$$
$$۱۱/۶ = ۸/۵۲۵ + \varepsilon$$
$$\varepsilon = ۳/۰۷۵\ [V]$$

ـ درصد تنظیم ولتاژ از رابطه (۸ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$\%V_R = \frac{E_A - V_T}{V_T} \times ۱۰۰$$
$$\%V_R = \frac{۴۶/۶ - ۳۵}{۳۵} \times ۱۰۰ = \%۳۳$$

۲۴ ـ ۳ ـ کاربرد ژنراتور سری

منحنی مشخصه بارداری ژنراتور سری عدم پایداری ولتاژ پایانه‌های آن را به ازای تغییر بار به خوبی نشـان می‌دهد. پرواضح است چنین ژنراتوری منبع ولتاژ ثابت خوبی نیسـت و از درصد تنظیم ولتاژ بالایی برخوردار اسـت. لذا برای ژنراتور تحریک سـری بـه دلیل عدم پایداری ولتاژ، کاربردی تعریف نشده است.

پرسش ۸ ـ ۳

۱ ـ نحـوه انجام آزمایش بـارداری ژنراتور تحریک سری را با رسم شکل شرح دهید.

۲ ـ هدف از انجام آزمایش بارداری را بنویسید.

۳ ـ آیا استفاده از ژنراتور تحریک سری برای مصارف روشنایی مناسب است؟ چرا؟

۴ ـ آیا برای ژنراتور سری کاربردی وجود دارد؟ چرا؟

۵ ـ با توجه به منحنی مشخصه بارداری ژنراتورهای تحریک موازی و تحریک سری بین آنها مقایسه‌ای انجام دهید.

تمرین ۷ ـ ۳

۱ ـ نتایج آزمایش بی‌باری و بارداری ژنراتور تحریک سـری ۶۰ V، ۱۲۰ A با مقاومت اهمی سـیم‌پیچی آرمیچر ۰/۰۷Ω و سیم‌پیچی تحریک ۰/۰۵Ω به شرح زیر است:

$I_F = I_L$ [A]	۰	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰	۱۲۰
E_A [v]	۴	۱۲	۲۷	۵۰	۷۰	۸۰	۷۹
V_T[V]	۴	۱۰	۲۰	۳۸	۵۵	۶۰	۵۹

الف ـ رسم منحنی مشخصه بی‌باری و بارداری

ب ـ افت ولتاژ ناشـی از اثرات مغناطیسـی در بار نامی

۲۵ ـ ۳ ـ ژنراتورهای جریان مستقیم با تحریک کمپوند

ژنراتور جریان مستقیم با تحریک کمپوند را به اختصار «ژنراتور کمپوند[1]» گویند. طرح ساختمانی ژنراتور کمپوند در شکل (۳۵ ـ ۳) نشان داده شده است.

شکل ۳۵ ـ ۳ طرح ساختمانی ژنراتور کمپوند

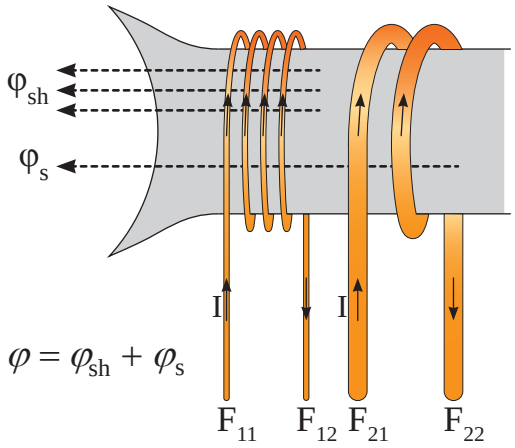
استاتور دارای قطب‌های برجسته می‌باشد. بر روی قطب‌ها دو سیم‌پیچی تحریک قرار داده شده است. فوران قطب‌ها از ترکیب فوران هر دو سیم‌پیچی تحریک به‌دست خواهد آمد.

یکی از سیم‌پیچی‌های تحریک از سیمی با قطر کم و تعداد دور زیاد برای جریان کم طراحی شده است و مناسب موازی شدن با مدار آرمیچر است. این سیم‌پیچی را «تحریک شنت» گویند. سیم‌پیچی تحریک دیگر از سیمی با قطر زیاد و تعداد دور کم برای جریان زیاد طراحی شده است و مناسب سری شدن با مدار آرمیچر است. این سیم‌پیچی را «تحریک سری» گویند.

ژنراتورهای کمپوند با توجه به نحوه اتصال سیم‌پیچی‌های تحریک شنت و سری با مدار سیم‌پیچی آرمیچر در چهار گروه تقسیم‌بندی می‌شوند که در ادامه به آنها پرداخته شده است.

۱ ـ ۲۵ ـ ۳ ـ ژنراتور کمپوند اضافی

اگر سیم‌پیچی‌های تحریک شنت و سری به گونه‌ای با مدار سیم‌پیچی آرمیچر ارتباط داده شوند تا جریان آنها هم جهت باشد به‌طوری که فوران ناشی از سیم‌پیچی تحریک سری φ_s به فوران ناشی از سیم‌پیچی تحریک شنت φ_{sh} اضافه شود در این صورت ژنراتور را «کمپوند اضافی» گویند (شکل ۳۶ ـ ۳).

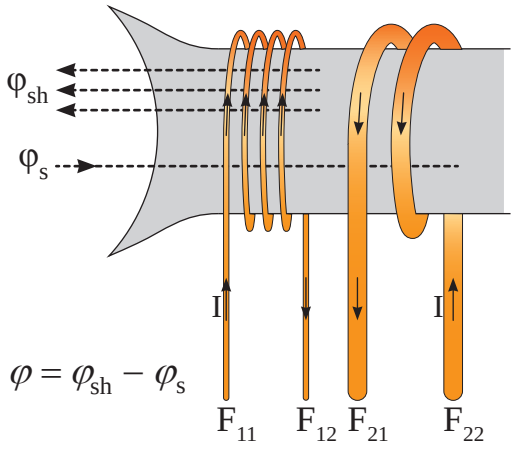


شکل ۳۶ ـ ۳ قطب ژنراتور کمپوند اضافی

۲ ـ ۲۵ ـ ۳ ـ ژنراتور کمپوند نقصانی

اگر سیم‌پیچی تحریک شنت و سری به گونه‌ای با مدار سیم‌پیچی آرمیچر ارتباط داده شوند تا جریان آنها هم جهت نباشد به‌طوری که فوران ناشی از سیم‌پیچی تحریک سری φ_s از فوران ناشی از سیم‌پیچی تحریک شنت φ_{sh} کم شود، در این صورت ژنراتور را «کمپوند نقصانی» گویند (شکل ۳۷ ـ ۳).

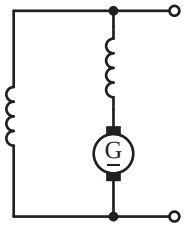
۱. Compound Generator



شکل ۳۷ ـ ۳ قطب ژنراتور کمپوند نقصانی

۳ ـ ۲۵ ـ ۳ ـ ژنراتور کمپوند با شنت بلند

اگر سیم‌پیچی آرمیچر ابتدا با سیم‌پیچی تحریک سری و سپس به سیم‌پیچی تحریک شنت مطابق نقشه اختصاری شکل (۳۸ ـ ۳) ارتباط داده شود، ژنراتور را «کمپوند با شنت بلند» می‌نامند.

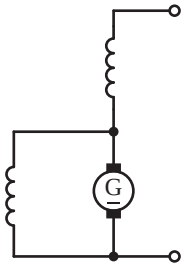


شکل ۳۸ ـ ۳ نقشه اختصاری ژنراتور کمپوند با شنت بلند

ژنراتور کمپوند با شنت بلند با توجه به جهت فوران‌های تحریک شنت و سری می‌تواند از نوع «اضافی» یا «نقصانی» باشد.

۴ ـ ۲۵ ـ ۳ ـ ژنراتور کمپوند با شنت کوتاه

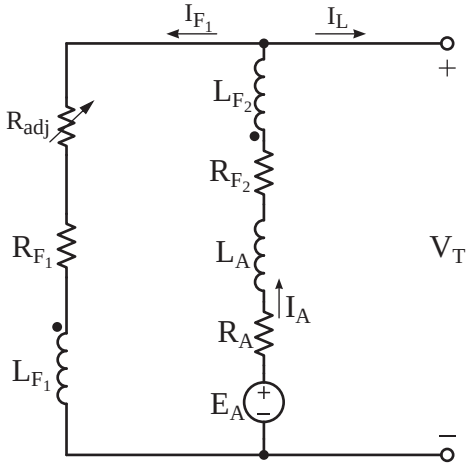
اگر سیم‌پیچی آرمیچر ابتدا با سیم‌پیچی تحریک شنت و سپس به سیم‌پیچی تحریک سری مطابق نقشه اختصاری شکل (۳۹ ـ ۳) ارتباط داده شود ژنراتور را «کمپوند با شنت کوتاه» می‌نامند. ژنراتور کمپوند با شنت کوتاه با توجه به جهت فوران‌های تحریک شنت و کوتاه می‌تواند از نوع «اضافی» یا «نقصانی» باشد.



شکل ۳۹ ـ ۳ نقشه اختصاری ژنراتور کمپوند با شنت کوتاه

۲۶ ـ ۳ ـ مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند اضافی با شنت بلند

مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند اضافی با شنت بلند در شکل (۴۰ ـ ۳) نشان داده شده است.



شکل ۴۰ ـ ۳ مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند اضافی با شنت بلند

سر سیم‌پیچی‌های تحریک سری و شنت با «نقطه» مشخص شده است. «طبق قرارداد جریانی که از سر سیم‌پیچی تحریک وارد شود فوران مغناطیسی مثبت ایجاد می‌کند.» جریان مدارهای تحریک سری و شنت از سرهای نقطه‌دار وارد می‌شوند. بنابراین فوران آنها مثبت و با یکدیگر هم جهت هستند و با هم جمع می‌شوند. پس ژنراتور کمپوند اضافی است.

مدار معادل الکتریکی ژنراتور کمپوند با شـــنت بلند با روش پتانســـیل گره یا روش‌های دیگر و صرف‌نظر از اثرات مغناطیسی تحلیل می‌شود.

ـ با نوشتن KCL برای گره مدار تحریک و آرمیچر معادله (۱۹ ـ ۳) به‌دست می‌آید:

$$KCL) \quad -I_A + I_{F_۱} + I_L = ۰$$

ـ با به‌کار بردن قوانین اهم مقادیر جریان‌های $I_{F_۱}$ و I_A طبق روابط (۲۰ ـ ۳) و (۲۱ ـ ۳) به‌دســـت خواهد آمد:

$$I_{F_۱} = \frac{V_T}{R_{F_۱} + R_{adj}}$$

$$I_A = \frac{E_A - V_T}{R_A + R_{F_۲}}$$

ـ از رابطه (۲۲ ـ ۳) جریان I_L به‌دست می‌آید.

$$I_L = \frac{P_{out}}{V_T}$$

ـ تلفات تحریـــک موازی از رابطه (۱۳ ـ ۳) و تلفات آرمیچر از رابطه (۱۴ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$P_{F_۱} = (R_{F_۱} + R_{adj}) I_{F_۱}^۲$$

$$P_A = R_A I_A^۲$$

ـ تلفات تحریک ســـری از رابطه (۲۶ ـ ۳) به‌دســـت می‌آید.

$$P_{F_۱} = R_{F_۲} I_A^۲$$

مثال ۱۳ ـ ۳ ـ ژنراتور کمپوند اضافی با شنت بلند V ۲۰۰، A ۱۰ با مشـــخصات $R_{F_۱} + R_{adj} = ۴۰۰\,\Omega$ ، $R_{F_۲} = ۰/۳[\Omega]$ و $R_A = ۰/۲[\Omega]$ مطابـــق شکـــل (۴۱ ـ ۳) مفروض اســـت. مطلوب است محاسبه نیروی محرکه القایی آرمیچر.

حل:

ـ از رابطه (۲۰ ـ ۳) جریان تحریک موازی به‌دســـت می‌آید.

$$I_{F_۱} = \frac{V_T}{R_{F_۱} + R_{adj}} = \frac{۲۰۰}{۴۰۰} = ۰/۵\ [A]$$

ـ از رابطه (۱۹ ـ ۳) جریان آرمیچر به‌دست می‌آید.

$$KCL) \quad -I_A + I_{F_۱} + I_L = ۰$$
$$-I_A + ۱۰ + ۰/۵ = ۰$$
$$I_A = ۱۰/۵\ [A]$$

ـ از رابطه (۲۱ ـ ۳) نیـــروی محرکه القایی آرمیچر E_A به‌دست می‌آید.

$$I_A = \frac{E_A - V_T}{R_A + R_{F_۲}}$$
$$۱۰/۵ = \frac{E_A - ۲۰۰}{۰/۲ + ۰/۳}$$
$$۱۰/۵(۰/۲ + ۰/۳) = E_A - ۲۰۰$$
$$E_A = ۲۰۰ + ۱۰/۵(۰/۲ + ۰/۳) = ۲۰۵/۲۵[A]$$

مثـــال ۱۴ ـ ۳ ـ ژنراتور کمپوند اضافی با شـــنت بلند، ۴ kw، ۱۰۰ V و بازده ۸۰ ٪ مفروض است. اگر $R_{F_1}+R_{adj}=50\Omega$، $R_F=0/03\Omega$ و $R_A=0/07\Omega$ باشد، مطلوب است:

الف ـ تلفات تحریک سری و شنت و تلفات آرمیچر

ب ـ تلفات مکانیکی و هسته روی هم

حل:

ـ از رابطه (۲۲ ـ ۳) جریان بار I_L به‌دست می‌آید.

$$I_L=\frac{P_{out}}{V_T}=\frac{4\times10^3}{100}=40\,[A]$$

ـ از رابطه (۲۰ ـ ۳) جریان تحریک موازی به‌دســـت می‌آید.

$$I_F=\frac{V_T}{R_{F_1}+R_{adj}}=\frac{100}{50}=2\,[A]$$

ـ از رابطه (۱۹ ـ ۳) جریان آرمیچر به‌دست می‌آید.

$$KCL)\quad -I_A+I_{F_1}+I_L=0$$
$$-I_A+2+40=0$$
$$I_A=42\,[A]$$

ـ از رابطه (۱۳ ـ ۳) تلفات تحریک شـــنت و از رابطه (۲۶ ـ ۳) تلفات تحریک سری به‌دست می‌آید.

$$P_{F_1}=(R_{F_1}+R_{adj})I_{F_1}^2=(50)\times2^2=200\,[W]$$
$$P_{F_2}=R_{F_2}I_A^2=0/03\times42^2=52/92\,[W]$$

ـ از رابطه (۱۴ ـ ۳) تلفات آرمیچر به‌دست می‌آید.

$$P_A=R_AI_A^2=0/07\times42^2=123/48\,[W]$$

ـ از رابطه (۵ ـ ۳) توان ورودی P_{in} به‌دست می‌آید.

$$\eta=\frac{P_{out}}{P_{in}}$$
$$P_{in}=\frac{P_{out}}{\eta}=\frac{4}{0/8}=5\,[kw]$$

ـ از رابطه (۴ ـ ۳) تلفات کل به‌دست می‌آید.

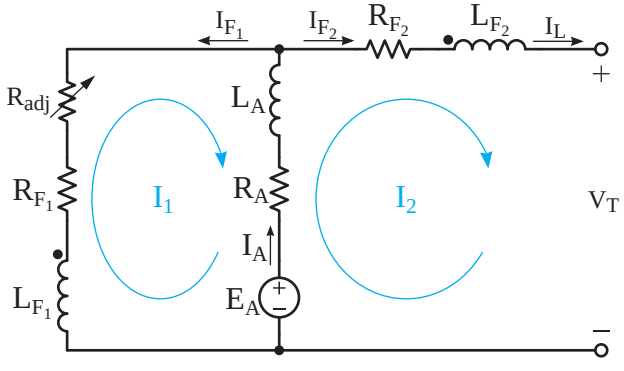
$$\Delta P=P_{in}-P_{out}=5-4=1\,[kw]\ \text{یا}\ 1000\,[W]$$

ـ از رابطه (۳ ـ ۳) تلفات هســـته و مکانیکی به‌دست می‌آید.

$$\Delta P=P_{mis}+P_{core}+P_A+P_{F_2}+P_{F_1}$$
$$1000=(P_{mis}+P_{core})+1234/8+529/2+2$$
$$P_{mis}+P_{core}=1000-123/48-52/92-20$$
$$P_{mis}+P_{core}=623/6\,[W]$$

۲۷ ـ ۳ ـ مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند اضافی با شنت کوتاه

مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند اضافی با شنت کوتاه در شکل (۴۱ ـ ۳) نشان داده شده است.



شکل ۴۱ ـ ۳ مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند اضافی با شنت کوتاه

مدار معادل الکتریکی ژنراتور کمپوند اضافی با شنت کوتاه با روش جریان حلقه یا روش‌های دیگر و صرف‌نظر از اثرات مغناطیسی تحلیل می‌شود.

با نوشتن KVL برای جریان حلقه‌های I_1 و I_2 معادلات (۲۸ ـ ۳) و (۲۹ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$KVL1) \quad (R_{F_1} + R_{adj})\, I_1 + R_A\,(I_1 - I_2) + E_A = 0 \qquad (3\text{-}28)$$

$$KVL2) \quad -E_A + R_A(I^2 - I^1) + R_{F_2} I^2 + V_T = 0 \qquad (3\text{-}29)$$

پس از حل معادلات (۲۸ ـ ۳) و (۲۹ ـ ۳) جریان حلقه‌های I_1 و I_2 به‌دست می‌آید و خواهیم داشت:

$$I_{F_1} = -I_1 \qquad (3\text{-}30)$$

$$I_{F_2} = I_L = I_2 \qquad (3\text{-}31)$$

$$I_A = -I_1 + I_2 \qquad (3\text{-}32)$$

مثال ۱۵ ـ ۳ ـ یک ژنراتور کمپوند اضافی با شنت کوتاه $200\ V$، $1600\ W$ با $R_A = 1\ \Omega$، $R_{F_1} + R_{adj} = 108\ \Omega$ و $R_{F_2} = 2\ \Omega$ مفروض است. مطلوب است:

الف ـ جریان آرمیچر

ب ـ نیروی محرکه القایی آرمیچر

حل:

ـ از رابطه (۲۲ ـ ۳) جریان بار I_L به‌دست می‌آید:

$$I_L = \frac{P_{out}}{V_T} = \frac{1600}{200} = 8\ [A]$$

ـ از رابطه (۳۱ ـ ۳) در می‌یابیم:

$$I_L = I_{F_2} = I_2 = 8\ [A]$$

ـ از رابطه (۲۸ ـ ۳) خواهیم داشت:

$$KVL1) \quad R_{F_1} I_1 + R_A(I_1 - I_2) + E_A = 0$$
$$KVL1) \quad 108 I_1 + 1(I_1 - 8) + E_A = 0$$
$$KVL1) \quad 109 I_1 + E_A = 8$$

ـ از رابطه (۲۹ ـ ۳) خواهیم داشت:

$$KVL2) \quad -E_A + R_A(I_2 - I_1) + R_{F_2} I_2 + V_T = 0$$
$$KVL2) \quad -E_A + 1(8 - I_1) + 2 \times 8 + 200 = 0$$
$$KVL2) \quad -I_1 - E_A = -224$$

ـ معادلات KVL۱ و KVL۲ را در یک دستگاه قرار می‌دهیم:

$$KVL1) \quad 109 I_1 + E_A = 8$$
$$KVL2) \quad \underline{-I_1 - E_A = -224}$$
$$108 I_1 + 0 = -216$$

$$I_1 = \frac{-216}{108} = -2$$

ـ از رابطه (۳۰ ـ ۳) جریان تحریک شنت به‌دست می‌آید:

$$I_{F_1} = -I_1 = -(-2) = 2\ [A]$$

ـ از رابطه (۳۰ ـ ۳) جریان آرمیچر به‌دست می‌آید:

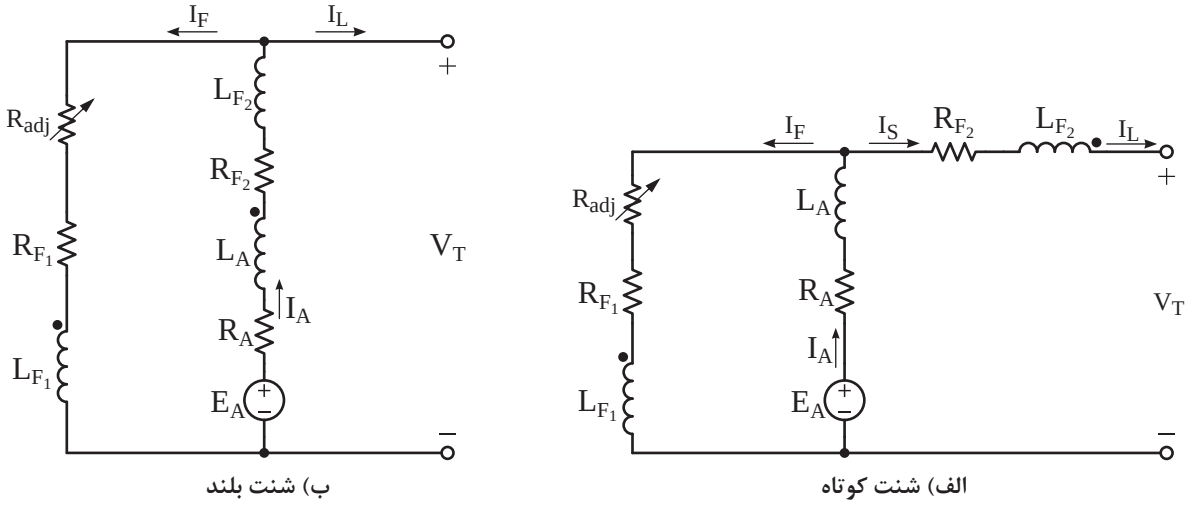
$$I_A = -I_1 + I_2 = -(-2) + 8 = 10\ [A]$$

ـ از رابطه KVL۱ مقدار E_A به‌دست می‌آید:

$$KVL1) \quad 109I_1 + E_A = 8$$
$$109(-2) + E_A = 8$$
$$E_A = 226[V]$$

۲۸ ـ ۳ ـ مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند نقصانی

مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند نقصانی با شنت کوتاه و بلند در شکل (۴۲ ـ ۳) نشان داده شده است. «طبق قرارداد جریانی که از سر نقطه‌دار سیم‌پیچی تحریک وارد شود فوران مغناطیسی مثبت ایجاد می‌کند و جریانی که از سر نقطه‌دار سیم‌پیچی تحریک خارج شود فوران منفی ایجاد می کند». جریان تحریک شنت از سر نقطه‌دار وارد و جریان تحریک سری از سر نقطه‌دار خارج می‌شوند. بنابراین فوران تحریک موازی مثبت و فوران تحریک سری منفی می‌شوند و فوران قطب‌ها از تفاضل آنها به‌دست می‌آید. پس ژنراتور «کمپوند نقصانی» است.



شکل ۴۲ ـ ۳ مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند نقصانی

۱۹ ـ ۳ ـ راه‌اندازی و شرایط راه‌اندازی ژنراتور کمپوند

راه‌اندازی ژنراتور کمپوند مشابه توضیحات بخش ۱۴ ـ ۳ راه‌اندازی ژنراتور تحریک موازی است. شرایط راه‌اندازی آن نیز مطابق توضیحات بخش ۱ ـ ۱۴ ـ ۳ می‌باشد.

۳۰ ـ ۳ ـ بهره‌برداری از ژنراتور کمپوند اضافی

پس از راه‌اندازی ژنراتور کمپوند اضافی و اتصال بار به آن، ژنراتور مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T جریان I_L را در بار R_L جاری می‌کند. جریان در سیم‌پیچی آرمیچر افت ولتاژهای ناشی از اثرات مغناطیسی ε و مقاومت اهمی سیم‌پیچی آرمیچر $R_A I_A$ و در سیم‌پیچی تحریک سری افت ولتاژ $R_{F_2} I_{F_2}$ ایجاد می‌کند. افت ولتاژ باعث کاهش ولتاژ پایانه‌های ژنراتور می‌شود. از طرفی عبور جریان از سیم‌پیچی تحریک سری، فوران در قطب‌ها جاری می‌نماید. فوران سیم‌پیچی تحریک سری به فوران سیم‌پیچی تحریک موازی اضافه می‌شود و فوران قطب‌ها زیاد خواهد شد. بنابراین نیروی محرکه بیشتری در

سیم‌پیچی آرمیچر القا می‌شود و ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T افزایش می‌یابد.

پس از بهره‌برداری از ژنراتور کمپوند اضافی سه حالت پیش خواهد آمد:

۱ ـ اگر نیروی محرکه القایی ناشی از فوران سیم‌پیچی تحریک سری، کمتر از افت ولتاژهای ژنراتور باشد ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T همانند ژنراتور تحریک موازی و با شیب کمتری کاهش می‌یابد. در این صورت ژنراتور کمپوند اضافی را «زیر کمپوند[۱]» می‌نامند.

تعداد دور کم سیم‌پیچ تحریک سری باعث کم شدن نیروی محرکه مغناطیسی $(\theta = NI)$ و فوران آن می‌شود. لذا نیروی محرکه القایی آرمیچر ناشی از فوران سیم‌پیچی تحریک سری، کمتر از افت ولتاژهای ژنراتور خواهد شد.

۲ ـ با زیاد کردن تعداد دور سیم‌پیچی تحریک سری، نیروی محرکه مغناطیسی $(\theta = NI)$ و فوران آن زیاد می‌شود. حال اگر نیروی محرکه القایی آرمیچر ناشی از فوران سیم‌پیچی تحریک سری، برابر افت ولتاژهای ژنراتور باشد ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T تقریباً ثابت خواهد ماند. در این صورت ژنراتور کمپوند اضافی را «کمپوند مسطح[۲]» می‌نامند.

۳ ـ با زیادتر کردن تعداد دور سیم‌پیچی تحریک سری، نیروی محرکه مغناطیسی $(\theta = NI)$ و فوران آن زیادتر می‌شود. حال اگر نیروی محرکه القایی آرمیچر ناشی از فوران سیم‌پیچی تحریک سری، بیش از افت ولتاژهای ژنراتور شود ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T افزایش خواهد یافت. در این صورت ژنراتور کمپوند اضافی را «فوق کمپوند[۳]» می‌نامند.

۳۱ ـ ۳ ـ بهره‌برداری از ژنراتور کمپوند نقصانی

با تعویض محل اتصال سرهای سیم‌پیچی تحریک سری ژنراتور کمپوند اضافی، جهت جریان و فوران سیم‌پیچ تحریک سری معکوس می‌شود و ژنراتور کمپوند نقصانی به‌دست می‌آید.

پس از راه‌اندازی ژنراتور کمپوند نقصانی و اتصال بار به آن، ژنراتور مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T جریان I_L را در بار R_L جاری می‌کند. عبور جریان از سیم‌پیچی تحریک سری، فوران در قطب‌ها جاری می‌کند. فوران سیم‌پیچی تحریک سری، مخالف جهت فوران سیم‌پیچی تحریک موازی است.

فوران قطب‌ها که از تفاضل فوران سیم‌پیچی‌های تحریک موازی و سری به‌دست می‌آید، کاهش می‌یابد. بنابراین نیروی محرکه القایی سیم‌پیچی آرمیچر کاهش چشمگیری پیدا می‌کند و ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T سقوط می‌کند.

پرسش ۹ ـ ۳

۱ ـ تفاوت ژنراتور کمپوند اضافی و نقصانی را توضیح دهید.

۲ ـ نحوه راه‌اندازی ژنراتور کمپوند را توضیح دهید.

۳ ـ به هنگام راه‌اندازی ژنراتور کمپوند چه نکاتی باید رعایت شود؟

۴ ـ به هنگام بهره‌برداری از ژنراتور کمپوند اضافی چند حالت پیش می‌آید؟ علت آن را توضیح دهید.

۵ ـ علت کاهش ولتاژ ژنراتور کمپوند نقصانی به

۱. Under Compounded ۲. Flat Compounded ۳. Over Compounded

هنگام بهره‌برداری چیست؟ توضیح دهید.

۶ ـ مـــدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند اضافی با شنت بلند را رســـم کنید و کمیت‌های الکتریکی آن را تعریف کنید.

۷ ـ مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند نقصانی با شـــنت کوتاه را رسم کنید و کمیت‌های الکتریکی آن را تعریف کنید.

تمرین ۸ ـ ۳

۱ ـ یک ژنراتور کمپوند اضافی با شـــنت بلند توسط محرکـــی با تـــوان ۱۰ HP و ســـرعت ۱۲۰۰ PRM گردانده می‌شـــود و تـــوان ۶ kw با ولتاژ ۲۰۰ V به بار می‌دهـــد. اگر $R_{F_2} = ۰/۱\ \Omega$ ، $R_{F_1} + R_{adj} = ۴۰۰\ \Omega$ و $R_A = ۰/۲\ \Omega$ باشد، مطلوب است:

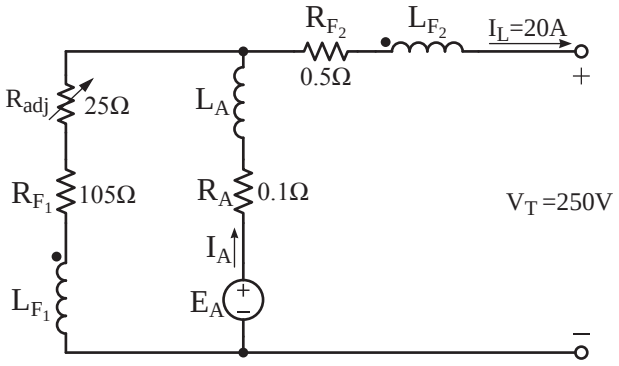
الف ـ نیروی محرکه القایی در آرمیچر

ب ـ تلفات هسته و مکانیکی روی هم

۲ ـ یک ژنراتور کمپوند اضافی با شنت کوتاه مطابق شکل مقابل مفروض است. مطلوب است:

الف ـ نیروی محرکه القایی آرمیچر

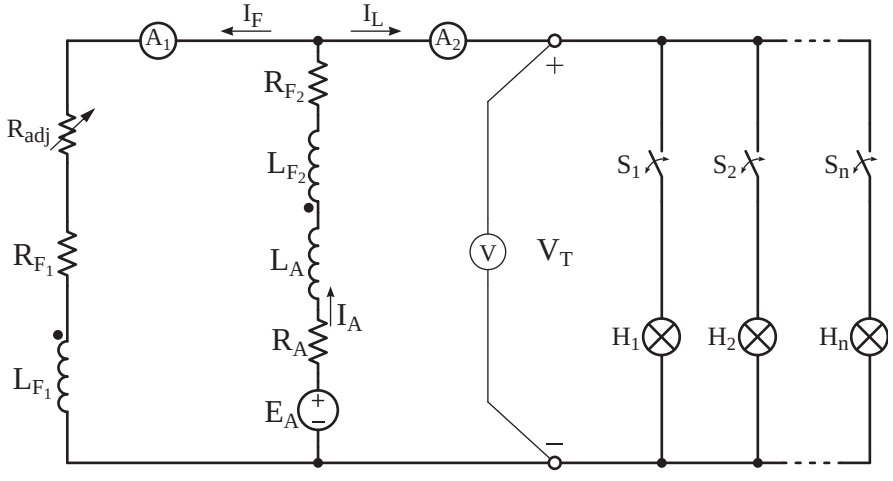
ب ـ بـــازده در صورتی‌که تلفات هســـته ۲۵۰ W و تلفات مکانیکی ۳۰۰ W باشد.



۳۲ ـ ۳ ـ منحنی مشـــخصه بارداری ژنراتور کمپوند اضافی

منحنی مشخصه بارداری از آزمایش بارداری به‌دست می‌آید و هدف تعیین تأثیر جریان بار بر ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T در ســـرعت n ثابت و جریان تحریک موازی ثابت اســـت. در ژنراتور کمپوند جریان تحریک ســـری تابعی از جریان بار است. پس در آزمایش بارداری مقدار آن ثابت نیست.

نتایج آزمایش بارداری ژنراتور کمپوند اضافی با شنت بلند و کوتاه بســـیار نزدیک به یکدیگر اســـت و تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارند. لذا برای انجام آزمایش بارداری، ژنـــراتور کمپوند را به صـورت شنت بلند مطابق شکل (۴۳ ـ ۳) اتصال داده‌اند.



شکل ۴۳ ـ ۳ مدار الکتریکی آزمایش بارداری ژنراتور کمپوند اضافی

آمپرمتر A_1 جریان تحریک شنت I_{F_1} و آمپرمتر A_2 جریـــان بار I_L و ولت‌متر V ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T را نشان می‌دهند.

در آزمایش بارداری ژنراتور کمپوند، سرعت و جریان تحریک شنت ثابت نگه داشته می‌شوند. جریان آرمیچر و تحریک سری متاثر از جریان بار I_L است.

در شکل (۴۳ ـ ۳) از لامپ‌های H_1 تا H_n به عنوان بار و از کلیدهای S_1 تا S_n برای اتصال آنها به پایانه‌های ژنراتور استفاده شده است.

۱ ـ ۲ ـ ۳ ـ ۳ ـ آزمایش بارداری

آزمایش بارداری ژنراتور کمپوند مشـــابه توضیحات بخش ۱ ـ ۱۷ ـ ۳ ژنراتور شنت انجام خواهد شد.

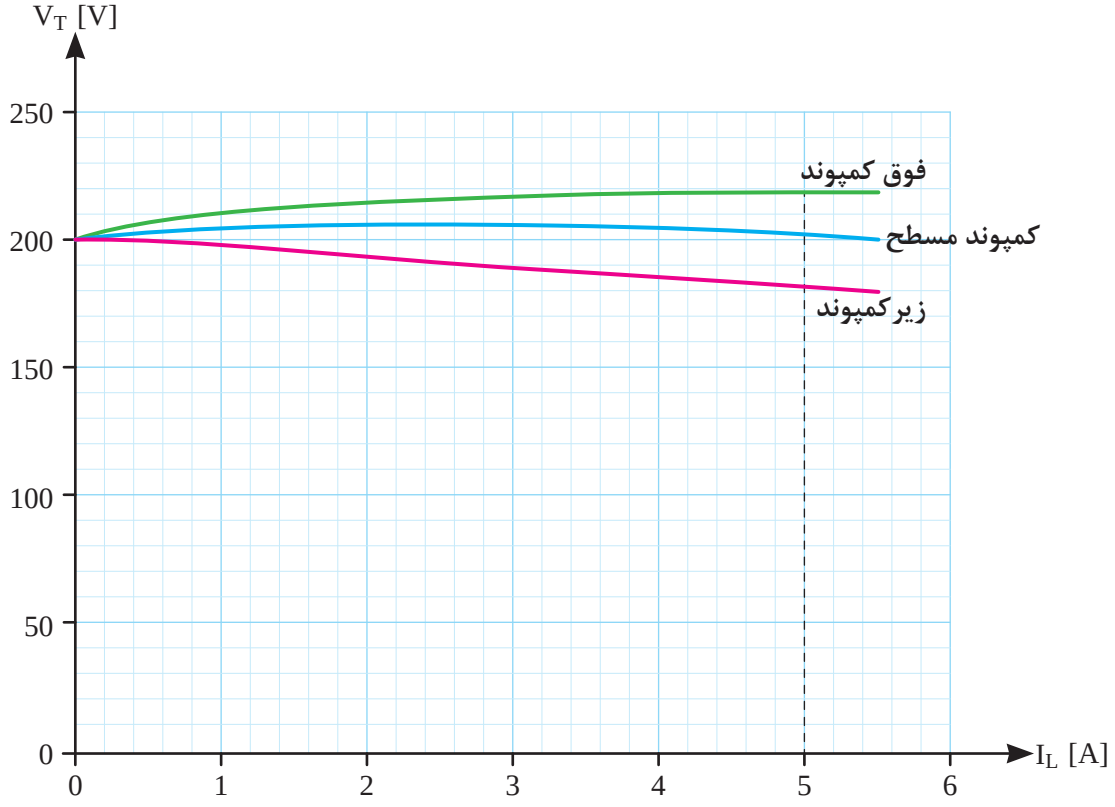
پس از ترســـیم نتایج آزمایش بـــارداری برای ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T بر حسب جریان بار I_L سه حالتِ ممکن پیش می‌آید:

۱ ـ با افزایـــش جریان بار I_L ولتاژ پایانه‌های ژنراتور تقریباً ثابـــت می‌ماند. در این صـــورت ژنراتور «کمپوند مسطح» است.

۲ ـ با افزایـــش جریان بار I_L ولتاژ پایانه‌های ژنراتور کاهش می‌یابـــد. در این صورت ژنراتـــور «زیر کمپوند» است.

۳ ـ با افزایـــش جریان بار I_L ولتاژ پایانه‌های ژنراتور افزایش می‌یابد. در این صـــورت ژنراتور «فوق کمپوند» است.

منحنی مشـــخصه بارداری ژنراتور کمپوند اضافی در سه حالت در شکل (۴۴ ـ ۳) نشان داده شده است.



شکل ۴۴ ـ ۳ منحنی مشخصه بارداری ژنراتور کمپوند اضافی

مثال ۱۶ ـ ۳ ـ منحنی مشخصه بارداری شکل (۴۴ ـ ۳) مربوط به ژنراتور کمپوند اضافی ۲۰۰ V، ۵/۵ A است. درصد تنظیم ولتاژ $\%V_R$ به ازای سه حالت زیر کمپوند، کمپوند مسطح و فوق کمپوند را به‌دست آورید.

حل:

ـ با توجه به منحنی مشخصه بارداری به‌دست می‌آوریم.

$$I_L = ۰ \Rightarrow V_T = E_A = ۲۰۰[V]$$

$$I_L = ۵/۵[A] \begin{cases} V_T = ۲۱۰[V] & \text{فوق کمپوند} \\ V_T = ۱۹۸[V] & \text{کمپوندمسطح} \\ V_T = ۱۸۰[V] & \text{زیرکمپوند} \end{cases}$$

ـ با توجه به رابطه (۱۸ ـ ۳) درصد تنظیم ولتاژ به‌دست می‌آید.

$$\%V_R = \frac{E_A - V_T}{V_T} \times ۱۰۰$$

ـ در حالت فوق کمپوند

$$\%V_R = \frac{۲۰۰ - ۲۱۰}{۲۱۰} \times ۱۰۰ = -\%۴/۷۶$$

در حالت کمپوند مسطح

$$\%V_R = \frac{۲۰۰ - ۱۹۸}{۱۹۸} \times ۱۰۰ = \%۱$$

در حالت زیر کمپوند

$$\%V_R = \frac{۲۰۰ - ۱۸۰}{۱۸۰} \times ۱۰۰ = \%۱۱$$

۳۳ ـ ۳ ـ کاربرد ژنراتور کمپوند اضافی

ژنراتور کمپوند اضافی در حالت «کمپوند مسطح» دارای کمترین درصد تنظیم ولتاژ می‌باشد و ولتاژ تقریباً ثابتی در اختیار مصرف کننده‌ها قرار می‌دهد. از این ژنراتورها در جاهایی استفاده می‌شود که مصرف‌کننده در نزدیکی ژنراتور قرار دارد و طول کابل‌های ارتباطی آن‌قدر بلند نیست که باعث ایجاد افت ولتاژ قابل ملاحظه‌ای شود.

ژنراتورهای کمپوند اضافی در حالت «فوق کمپوند» دارای درصد تنظیم ولتاژ منفی می‌باشند؛ یعنی ولتاژ پایانه‌های ژنراتور در حالت بارداری بیشتر از ولتاژ پایانه‌های ژنراتور به هنگام بی‌باری است. لذا از این ژنراتورها در جاهایی استفاده می‌شود که مصرف‌کننده در فاصله دورتری از ژنراتور قرار دارد و طول کابل‌های ارتباطی آن‌قدر بلند شده است که باعث ایجاد افت ولتاژ می‌شود. از این رو افزایش ولتاژ پایانه‌های ژنراتور در حالت بارداری جبران افت ولتاژ کابل‌ها را می‌نماید تا ولتاژ ثابتی به بار برسد.

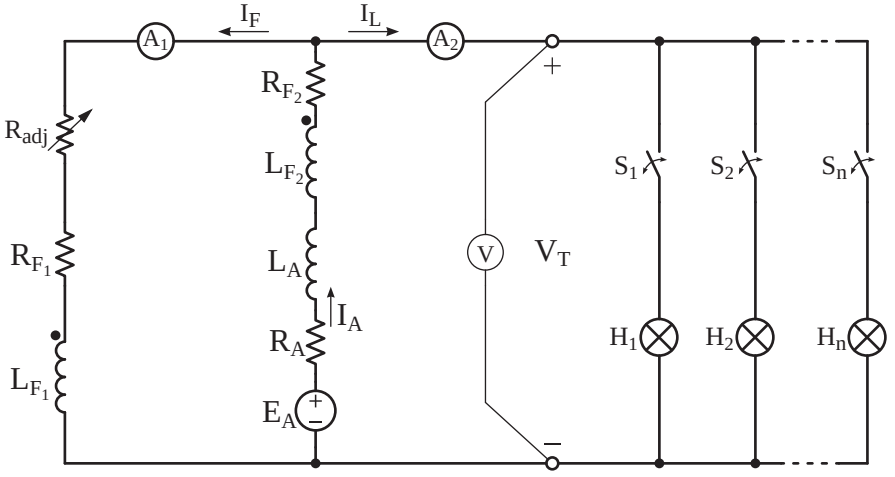
ژنراتور کمپوند اضافی در حالت «زیر کمپوند» در واقع ژنراتور کمپوندی است که به دلایل فنی و تکنولوژی امکان افزایش تعداد دور سیم‌پیچی تحریک سری فراهم نشده است تا آن را به حالت فوق کمپوند یا کمپوند مسطح برساند. ژنراتور کمپوند در حالت زیر کمپوند دارای بیشترین افت ولتاژ نسبت به حالت فوق کمپوند یا کمپوند مسطح است. مثال ۱۶ ـ ۳ را ببینید.

۳۴ ـ ۳ ـ منحنی مشخصه بارداری ژنراتور کمپوند نقصانی

برای انجام آزمایش بارداری ژنراتور کمپوند نقصانی،

سرهای سیم‌پیچی تحریک سری را به گونه‌ای به سرهای سیم‌پیچی آرمیچر اتصال می‌دهند که جهت جریان در سیم‌پیچی تحریک سری نسبت به جهت جریان سیم‌پیچی تحریک سری ژنراتور کمپوند اضافی معکوس شود.

مدار الکتریکی آزمایش بارداری ژنراتور کمپوند نقصانی با شنت بلند در شکل (۴۵ ـ ۳) نشان داده شده است.

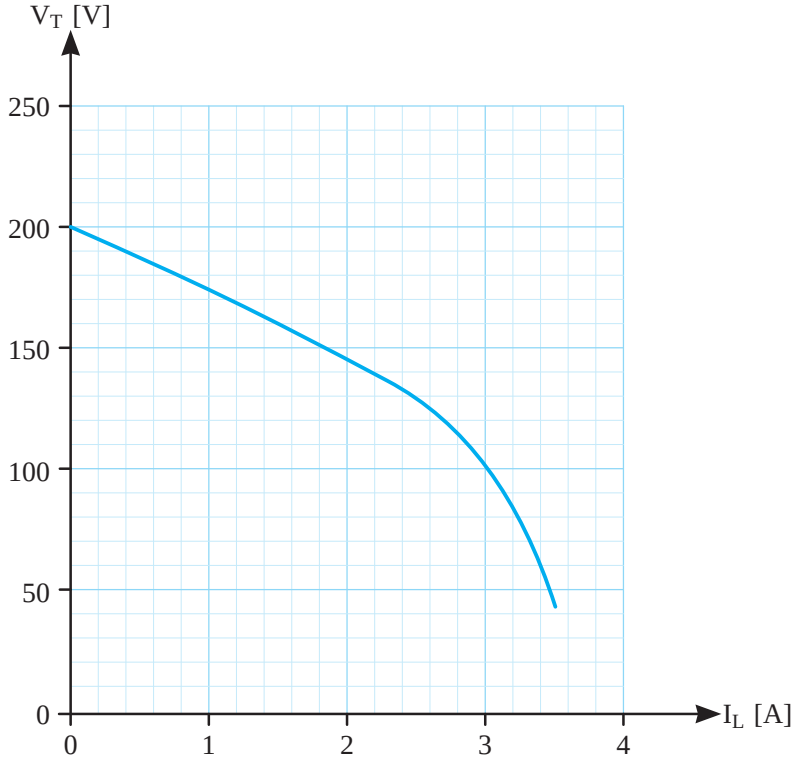


شکل ۴۵ ـ ۳ مدار الکتریکی آزمایش بارداری ژنراتور کمپوند نقصانی

۱ ـ ۳۴ ـ ۳ ـ آزمایش بارداری

آزمایش بارداری ژنراتور کمپوند نقصانی مشابه توضیحات بخش ۱ ـ ۱۷ ـ ۳ ژنراتور شنت انجام خواهد شد.

پس از ترسیم نتایج آزمایش بارداری، منحنی مشخصه بارداری ژنراتور کمپوند نقصانی به صورت شکل (۴۶ ـ ۳) به‌دست می‌آید.



شکل ۴۶ ـ ۳ منحنی مشخصه بارداری ژنراتور کمپوند نقصانی

مثال ۱۷ ـ ۳ ـ منحنی مشخصه بارداری شکل (۴۶ـ ۳) مربوط به ژنراتور کمپوند نقصانی، ۵/۵A، ۲۰۰V است. درصد تنظیم ولتاژ $\%V_R$ را به ازای بار ۳A چقدر است.

حل:

ـ با توجه به منحنی بارداری به‌دست می‌آوریم:

$$I_L = ۰ \Rightarrow V_T = E_A = ۲۰۰[V]$$
$$I_L = ۳[A] \Rightarrow V_T = ۱۰۰[V]$$

ـ با توجه به رابطه (۱۸ ـ ۳) درصد تنظیم ولتاژ به‌دست می‌آید.

$$\%V_R = \frac{E_A - V_T}{V_T} \times ۱۰۰$$
$$\%V_R = \frac{۲۰۰ - ۱۰۰}{۱۰۰} \times ۱۰۰ = \% \ ۱۰۰$$

۳۵ ـ ۳ ـ کاربرد ژنراتور کمپوند نقصانی

ژنراتور کمپوند نقصانی دارای بیش‌ترین درصد تنظیم ولتاژ می‌باشد. و در بار کامل ولتاژ پایانه‌های آن به‌شدت کاهش می‌یابد. از این ژنراتور در جوشکاری به روش «قوس الکتریکی» استفاده می‌شود.

پرسش ۱۰ ـ ۳

۱ ـ هدف از انجام آزمایش بارداری را شرح دهید.

۲ ـ نحوه انجام آزمایش بارداری ژنراتور کمپوند اضافی را توضیح دهید.

۳ ـ چگونه ژنراتور کمپوند اضافی را تبدیل به کمپوند نقصانی می‌کنند؟

۴ ـ کاربرد ژنراتور کمپوند اضافی را بنویسید.

۵ ـ چرا ژنراتور کمپوند اضافی به حالت «زیر کمپوند» در می‌آید؟ آیا این حالت مطلوب است؟

۶ ـ کمترین و بیشترین درصد تنظیم ولتاژ مربوط به کدام ژنراتور کمپوند است؟ چرا؟

۵ ـ کاربرد ژنراتور کمپوند نقصانی را بنویسید.

۳۶ ـ ۳ ـ تنظیم ولتاژ ژنراتورهای جریان مستقیم

تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز مصرف کننده‌های الکتریکی تحت «ولتاژ معین» به عهدهٔ ژنراتورها می‌باشد.

مصرف‌کننده‌های الکتریکی به عنوان بار به پایانه‌های ژنراتور متصل می‌شوند و جریان I_L را تحت ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T دریافت می‌کنند. در صورت تغییر ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T، جریان بار تغییر می‌کند و کیفیت کار مصرف کننده تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به‌طور مثال برای روشن کردن لامپ‌های ۲۲۰ V نیاز به ژنراتوری با ولتاژ پایانه‌های ۲۲۰ V می‌باشد. افزایش ولتاژ پایانه‌ها باعث سوختن لامپ‌ها می‌شود و کاهش ولتاژ پایانه‌ها منجر به کم نور شدن لامپ‌ها خواهد شد. بنابراین تنظیم ولتاژ پایانه‌های ژنراتور به منظور جلوگیری از آسیب دیدن مصرف‌کننده‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T ناشی از نیروی محرکه القایی آرمیچر E_A است (رابطه ۱۶ ـ ۳).

$$V_T = E_A - R_A I_A$$

با تنظیم نیروی محرکه القایی آرمیچر E_A ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T تنظیم می‌شود. نیروی محرکه

القایی آرمیچر طبق رابطه تابع «سرعت رتور» و «فوران قطب‌ها» است. در ادامه به تنظیم این دو کمیت اشاره شده است.

۱ ـ ۳۶ ـ ۳ ـ سرعت رتور

رتور ژنراتورهای جریان مستقیم توسط محرک‌های مکانیکی یا توربین گردانده می‌شود. منظور از محرک‌های مکانیکی، موتورهایی هستند که انرژی سوخت‌های فسیلی از قبیل گازوییل را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند. توربین‌ها نیز ماشین‌هایی هستند که در نیروگاه‌های برق نصب می‌شوند و انرژی جنبشی سیالاتی از قبیل آب، بخار یا باد را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند.

محرک‌ها برای کار در سرعت ثابت طراحی می‌شوند. افزایش سرعت محرک باعث بروز عیب‌های مکانیکی خواهد شد. کاهش سرعت بر گشتاور محرک اثرات نامطلوبی دارد. بنابراین تغییر سرعت محرک به منظور تنظیم ولتاژ ژنراتور روش مناسبی نیست.

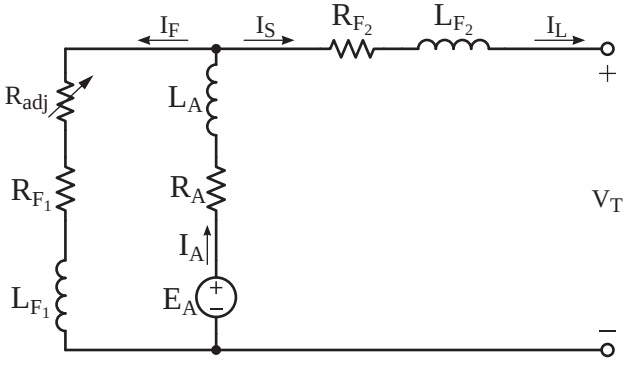
تثبیت سرعت محرک‌ها توسط مکانیزمی به نام «گاورنر[۱]» که بر روی آنها نصب می‌شود صورت می‌گیرد. گاورنر مانع از تغییر سرعت محرک در محدوده معینی خواهد شد. گاورنر از سرعت رتور نمونه‌برداری می‌کند و آن را با سرعت نامی مقایسه می‌نماید. در صورت مشاهده اختلاف در محرک‌های مکانیکی میزان سوخت و در توربین‌ها میزان سیال را تغییر می‌دهد.

۲ ـ ۳۶ ـ ۳ ـ فوران قطب‌ها

فوران قطب‌ها تابع جریان سیم‌پیچی‌های تحریک است. تنظیم ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T با تنظیم جریان سیم‌پیچی تحریک امکان‌پذیر خواهد شد. برای تنظیم جریان سیم‌پیچی تحریک، مقاومت مدار تحریک را به کمک «مقاومت متغیر[۲]» تغییر می‌دهند.

با کاهش مقاومت مدار سیم‌پیچی تحریک، جریان تحریک زیاد می‌شود. با زیاد شدن جریان سیم‌پیچی تحریک، فوران قطب‌ها φ زیاد می‌شود و باعث افزایش نیروی محرکه القایی آرمیچر E_A خواهد شد. افزایش E_A باعث افزایش ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T می‌شود. این فرایند با افزایش مقاومت مدار سیم‌پیچی تحریک معکوس می‌شود و باعث کاهش ولتاژ پایانه‌های ژنراتور V_T می‌شود.

مدار الکتریکی شکل (۴۷ ـ ۳) نحوهٔ قرار گرفتن مقاومت متغیر در مدار سیم‌پیچی تحریک موازی را نشان می‌دهد.



شکل ۴۷ ـ ۳ نحوه قرار گرفتن مقاومت متغیر در مدار سیم‌پیچی تحریک سری و موازی

در عمل تنظیم جریان تحریک به منظور تنظیم ولتاژ پایانه‌های ژنراتور دستی انجام نخواهد شد. بلکه توسط مدار الکترونیکی به نام «تنظیم کننده خودکار ولتاژ[۳]» که آن را «AVR» گویند انجام می‌شود. AVR با نمونه‌گیری ولتاژ و مقایسه آن با ولتاژ نامی در صورت اختلاف میان آنها جریان تحریک را تغییر می‌دهد.

۱. Governor ۲. Variable Resistor or Rheostat ۳. Automatic Voltage Regulator

پرسش ۱۱ ـ ۳

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ ضـــرورت تنظیم ولتـــاژ در ژنراتورها را توضیح دهید.

۲ ـ روش‌هـــای تنظیم ولتـــاژ در ژنراتورهای جریان مستقیم را شرح دهید. کدام روش اجرا می‌شود؟

۳ ـ وظیفه گاورنر را بنویسید.

۴ ـ جریان سیم‌پیچی تحریک در ژنراتورهای کمپوند چگونه تنظیم می‌شود؟

۵ ـ وظیفه AVR را بنویسید.

فصل چهارم

موتورهای جریان مستقیم

هدف‌های رفتاری

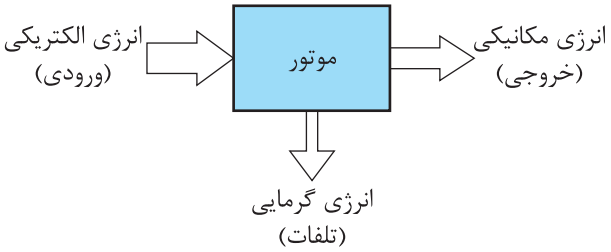
پس از پایان این فصل از فراگیر انتظار می‌رود که:

- موتورهای جریان مستقیم را تعریف کند و آنها را طبقه‌بندی نماید.
- مشخصه‌های اصلی موتورهای جریان مستقیم را تعریف کند و آنها را از یکدیگر تمیز دهد.
- توان، راندمان و تلفات در موتورهای جریان مستقیم را تعریف کند و روابط آنها را توضیح دهد.
- نمودار بخش توان در موتورهای جریان مستقیم را رسم کند و تجزیه و تحلیل نماید.
- موتور تحریک مستقل را تعریف کند و ساختمان داخلی آن را از روی شکل توضیح دهد.
- مدار الکتریکی معادل موتور تحریک مستقل را رسم کند و آن را تجزیه و تحلیل نماید.
- منحنی مشخصه‌های موتور تحریک مستقل را از هم تمیز دهد.
- کاربرد موتور تحریک مستقل را توضیح دهد.
- موتور تحریک شنت را تعریف کند و ساختمان داخلی آن را از روی شکل توضیح دهد.
- مدار الکتریکی معادل موتور شنت را رسم کند و آن را تجزیه و تحلیل نماید.
- منحنی مشخصه‌های موتور شنت را از هم تمیز دهد.
- کاربرد موتور شنت را توضیح دهد.
- موتور تحریک سری را تعریف کند و ساختمان داخلی آن را از روی شکل توضیح دهد.
- مدار الکتریکی معادل موتور سری را رسم کند و آن را تجزیه و تحلیل نماید.
- منحنی مشخصه‌های موتور سری را از هم تمیز دهد.
- کاربرد موتور سری را توضیح دهد.
- موتور تحریک کمپوند را تعریف کند و ساختمان داخلی آن را از روی شکل توضیح دهد.
- مدار الکتریکی معادل موتور کمپوند را رسم کند و آن را تجزیه و تحلیل نماید.
- منحنی مشخصه‌های موتور کمپوند را از هم تمیز دهد.
- کاربرد موتور کمپوند را توضیح دهد.

- روش‌های راه‌اندازی موتورهای جریان مستقیم را توضیح دهد.
- ضرورت کنترل سرعت در موتورهای جریان مستقیم را توضیح دهد.
- عوامل موثر در کنترل سرعت را توضیح دهد.
- روش‌های کنترل سرعت در موتورهای جریان مستقیم را توضیح دهد.
- مدارهای ساده کنترل سرعت به صورت بلوک دیاگرام را شرح دهد.
- چگونگی تغییر جهت گردش موتورهای جریان مستقیم را شرح دهد و مدارهای آن را رسم کند.
- ضرورت ترمز در موتورهای جریان مستقیم را توضیح دهد.
- انواع روش‌های ترمز را نام ببرد و آنها را توضیح دهد.
- به پرسش‌های این فصل پاسخ دهد.
- تمرین‌های این فصل را حل نماید.

مقدمه

موتورهای جریان مستقیم[1] به ماشین‌هایی گفته می‌شود که سیستم الکتریکی آنها جریان مستقیم است و انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند. در فرآیند این تبدیل، بخشی از انرژی به گرما تبدیل خواهد شد که از آن به عنوان «تلفات» نام برده می‌شود (شکل ۱ ـ ۴).



شکل ۱ ـ ۴

ویژگی موتورهای جریان مستقیم تنوع آنها است که با ترکیب‌های متنوع در مدار تحریک آنها می‌توان مشخصه‌های گشتاور ـ دور گوناگونی به‌دست آورد.

موتورهای جریان مستقیم به خاطر سادگی کنترل‌شان در سیستم‌هایی به کار می‌روند که نیاز به کنترل سرعت در محدوده وسیع و گشتاور زیاد دارند.

امروزه این موتورها در توان‌های کم در حد میلی‌وات تا توان‌های زیاد در حد ده مگاوات ساخته می‌شوند.

موتورهای جریان مستقیم با توان‌های کم که با ولتاژ تا ۲۴ ولت کار می‌کنند در اسباب‌بازی‌ها و روبات‌ها استفاده و با توان‌هایی تا چند صد وات که با ولتاژ تا ۲۳۰ ولت کار می‌کنند در لوازم خانگی و ابزارهای صنعتی استفاده می‌شوند. از موتورهای جریان مستقیم با توان‌های زیاد تا ۱۰ MW که از ولتاژ ۱۱۰ ولت تا ۸۰۰ ولت با گشتاور بین ۲۰ N.m تا ۲۰۰۰۰۰ Nm ساخته می‌شوند در قطارها و کارخانجات نورد فولاد استفاده می‌شود.

علاوه بر مواردی چون گشتاور زیاد، امکان کنترل سرعت خوب، موتورهای جریان مستقیم ساختمان محکم دارند و در مقابل لرزش مقاوم هستند.

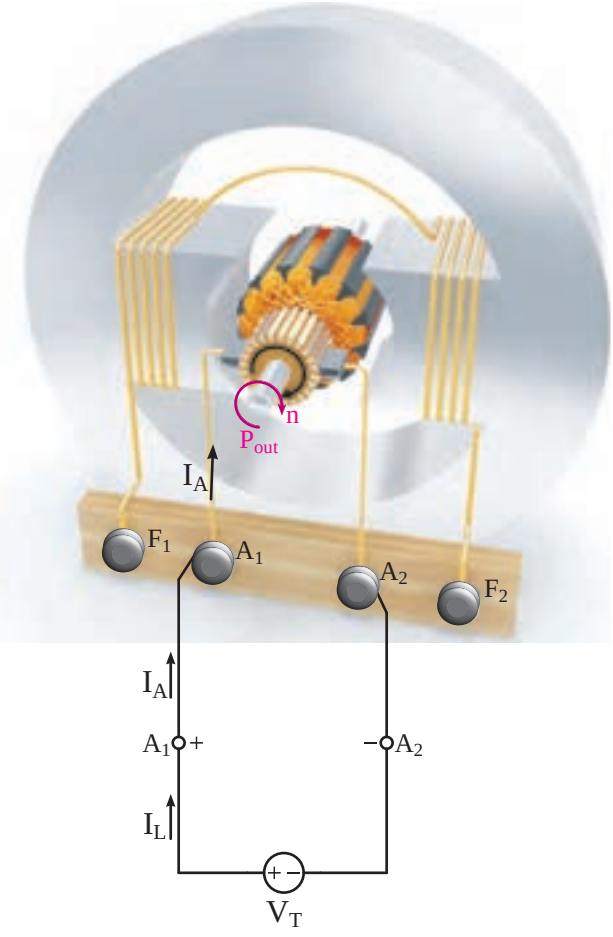
در ماشین‌های جریان مستقیم فرآیند تبدیل انرژی برگشت‌پذیر[2] است. یعنی یک ماشین الکتریکی جریان مستقیم می‌تواند به صورت موتور یا ژنراتور مورد

۱. Direct Current Motors
۲. Revesile

بهره‌برداری قرار گیرد. لذا ساختمان داخلی و شکل ظاهری موتورهای جریان مستقیم با ژنراتورهای جریان مستقیم تفاوت نخواهد داشت.

۱ ـ ۴ ـ پخش توان و تلفات در موتورهای جریان مستقیم

طرح ساختمانی موتور جریان مستقیم در شکل (۲ ـ ۴) نشان داده شده است.



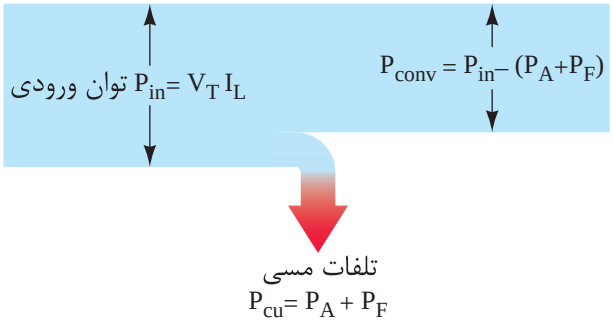
شکل ۲ ـ ۴ طرح ساختمانی موتور جریان مستقیم

استاتور قطب‌های برجسته دارد. در صورتی‌که سیم‌پیچی قطب‌ها توسط جریان I_F تحریک شوند فوران ناشی از آن در فاصله هوایی توزیع خواهد شد. سیم‌پیچی آرمیچر درون میدان قطب‌ها قرار دارد و با اتصال پایانه‌های A_1 و A_2 آن به منبع ولتاژ جریان مستقیم به ولتاژ V_T، جریان I_A در سیم‌پیچی آرمیچر جاری شده و در آن گشتاور ایجاد می‌کند و رتور را می‌گرداند. لذا ماشین جریان مستقیم حالت موتوری به خود می‌گیرد.

توان الکتریکی مورد نیاز توسط منبع DC تحت ولتاژ V_T و جریان I_L تامین خواهد شد که در موتورها به عنوان «توان ورودی» محسوب می‌شود و آن را با P_{in} نشان داده و از رابطه (۱ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$P_{in} = V_T \cdot I_L \qquad (۴-۱)$$

با جاری شدن جریان در سیم‌پیچی‌های آرمیچر و تحریک، این سیم‌پیچی‌ها گرم می‌شوند. مقداری از توان ورودی P_{in} که در سیم‌پیچی‌های آرمیچر و تحریک به گرما تبدیل می‌شود را «تلفات مسی» گویند و با P_{cu} نشان می‌دهند. بخشی از تلفات مسی که در سیم‌پیچی آرمیچر می‌باشد را «تلفات آرمیچر» گویند و با P_A نشان می‌دهند. بخش دیگر تلفات مسی در سیم‌پیچی تحریک است و آن را «تلفات تحریک» نامیده و با P_F نشان می‌دهند. تلفات مسی (P_A+P_F) از توان ورودی P_{in} می‌کاهد و بعد از کم شدن، توان باقی‌مانده را «توان تبدیل شده» نامیده و با P_{conv} نشان می‌دهند. این فرآیند در شکل (۳ ـ ۴) نشان داده شده است.



شکل ۳ ـ ۴

توان تبدیل شـــده P_{conv}، توان الکتریکی است که به توان مکانیکی تبدیل شده است. توان تبدیل شده P_{conv} از رابطه (۱ ـ ۳) نیز قابل محاسبه است.

$$P_{conv} = E_A \cdot I_A$$

در این رابطه:

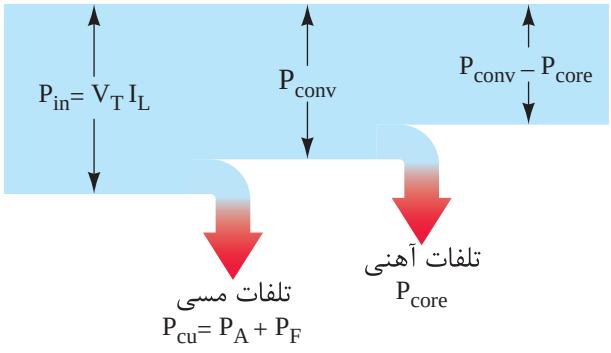
P_{conv} توان تبدیل شده. [W]

E_A نیروی محرکه القایی آرمیچر [V]

I_A جریان آرمیچر [A]

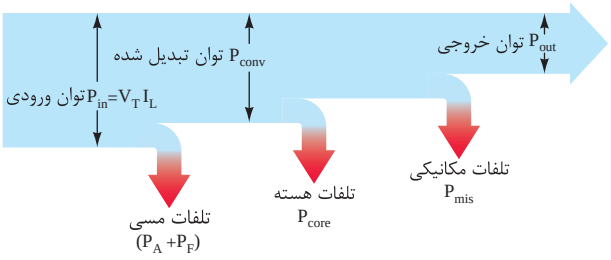
با جاری شدن فوران در هسته استاتور و آرمیچر و در اثر گردش آرمیچر، تلفات فوکو و هیســـترزیس به‌وجود می‌آید. مقداری از توان الکتریکی ورودی P_{in} که در اثر تلفات فوکو و هیســـترزیس به گرما تبدیل می‌شـــود را «تلفات هسته» گویند و با P_{core} نشان می‌دهند.

تلفات هســـته P_{core} از تـــوان تبدیل شـــده P_{conv} می‌کاهد. این فرآیند در شـــکل (۴ ـ ۴) نشان داده شده است.



شکل ۴ ـ ۴

با گردش رتور، اصطکاک میان قســـمت‌های ساکن و متحرک ایجاد می‌شـــود. بخشـــی از این اصطکاک در یاتاقان‌هـــا و بخش دیگر آن در اثر اصطکاک قســـمت متحرک و هوای درون ماشین به‌وجود می‌آید. مقداری از توان مکانیکی ورودی P_{in} که در اثر اصطکاک به گرما تبدیل می‌شـــود را «تلفات مکانیکـــی» گویند و با P_{mis} نشـــان می‌دهند. تلفات مکانیکـــی P_{mis} همراه با تلفات هســـته P_{core} از توان تبدیل شده P_{conv} می‌کاهد و بعد از کم شـــدن، توان باقی‌مانده را «توان خروجی» گویند و با P_{out} نشـــان می‌دهند. این فرآیند در شکل (۵ ـ ۴) نشان داده شده است. به این شکل «نمودار پخش توان» موتورهای جریان مستقیم گویند.



شکل ۵ ـ ۴ نمودار پخش توان در موتورهای جریان مستقیم

مثال ۱ ـ ۴ ـ مـــوتور جـــریـــان مستـــقیم ۲۰۰ V، ۱۰ A بـــا تلفـــات مســـی ۵۰ W و هســـته ۴۰ W و مکانیکی ۶۰ W مفروض است.

مطلوب است:

الف ـ توان ورودی

ب ـ توان تبدیل شده

ج ـ توان خروجی

حل:

ـ بـــا توجه به نمـــودار پخش توان شـــکل (۴ ـ ۴) داریم:

$$P_{in} = V_T I_L = ۲۰۰ \times ۱۰ = ۲۰۰۰ [W]$$

$$P_{conv} = P_{in} - (P_A + P_F)$$

$$P_{conv} = ۲۰۰۰ - ۵۰ = ۱۹۵۰ [W]$$

$$P_{out} = P_{conv} - P_{mis} - P_{core}$$
$$P_{out} = ۱۹۵۰ - ۴۰ - ۶۰ = ۱۸۵۰[W]$$

۲ ـ ۴ ـ تلفات کل موتورهای جریان مستقیم

حاصل جمع تلفات موتورهای جریان مستقیم را «تلفات کل» گویند و آن را با ΔP نشان می‌دهند. با توجه به نمودار پخش توان شکل (۴ ـ ۴) تلفات کل برابر است با:

تلفات مکانیکی + تلفات هسته + تلفات مسی = تلفات کل

که در فصل قبل آن را با رابطه (۳ ـ ۳) نشان دادیم:

$$\Delta P = (P_A + P_F) + P_{core} + P_{mis}$$

تفاوت بین توان ورودی P_{in} و توان خروجی P_{out}، تلفات کل ΔP است و آن را با رابطه (۴ ـ ۳) نشان دادیم.

$$\Delta P = P_{in} - P_{out}$$

تلفات مکانیکی P_{mis} و تلفات هسته P_{core} مطابق آنچه که در بخش ۲ ـ ۳ توضیح داده شد را «تلفات ثابت» نامیده و تلفات مسی که شامل تلفات آرمیچر P_A و تلفات تحریک P_F است را «تلفات متغیر» گویند.

مثال ۲ ـ ۱ ـ موتور جریان مستقیم ۲۲۰ V، ۱۶/۵ A مفروض است. تلفات آرمیچر ۳۰ W و تلفات تحریک ۲۰ W می‌باشد. اگر تلفات هسته ۶۰ W و تلفات مکانیکی ۴۰ W باشد مطلوب است:

الف) تلفات متغیر

ب) تلفات ثابت

ج) توان خروجی

حل:

$$\text{تلفات متغیر} = P_A + P_F = ۳۰ + ۲۰ = ۵۰W$$

$$\text{تلفات ثابت} = P_{core} + P_{mis} = ۶۰ + ۴۰ = ۱۰۰W$$

ـ توان ورودی از رابطه (۱ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$P_{in} = V_T I_L = ۲۲۰ \times ۱۶/۵ = ۳۶۳۰[W]$$

ـ تلفات کل از رابطه (۳ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$\Delta P = P_A + P_F + P_{core} + P_{mis}$$
$$\Delta P = ۳۰ + ۲۰ + ۶۰ + ۴۰ = ۱۵۰[W]$$

ـ توان نیز خروجی از رابطه (۴ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$\Delta P = P_{in} - P_{out}$$
$$P_{out} = P_{in} - \Delta P$$
$$P_{out} = ۳۶۳۰ - ۱۵۰ = ۳۴۸۰[W]$$

۳ ـ ۴ ـ بازده موتورهای جریان مستقیم

در موتورهای جریان مستقیم توان ورودی P_{in} الکتریکی است و توان خروجی P_{out} مکانیکی می‌باشد. نسبت توان خروجی به توان ورودی را «بازده» یا راندمان نامیده و آن را با η نشان می‌دهند که از رابطه (۵ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

بـــازده را بر حسب درصد بیان می‌کنند و از رابـطه (۶ ـ ۳) محاسبه می‌شود.

$$\%\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times ۱۰۰$$

مثال ۳ ـ ۴ ـ یـک مـوتور جریان مستقیم ۴ KW، ۲۵۰ V، ۲۰ A مفروض است. مطلوب است محاسبه:

الف ـ بازده بر حسب درصد

ب ـ تلفات

حل:

ـ توان ورودی از رابطه (۱ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$P_{in} = V_T \cdot I_L = ۲۵۰ \times ۲۰ = ۵۰۰۰ [W]$$

ـ توان خروجی بر حسب KW است که آن را به W تبدیل می‌کنیم.

$$P_{out} = ۴_{kw} \times ۱۰۰۰ = ۴۰۰۰ [W]$$

ـ بازده بر حســب درصد از رابطه (۶ ـ ۳) به‌دســت می‌آید.

$$\%\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times ۱۰۰$$

$$\%\eta = \frac{۴۰۰۰}{۵۰۰۰} \times ۱۰۰ = \%۸۰$$

ـ تلفات از رابطه (۴ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$\Delta P = P_{in} - P_{out}$$

$$\Delta P = ۵۰۰۰ - ۴۰۰۰ = ۱۰۰۰ [W]$$

۴ ـ ۴ ـ گشتاور موتورهای جریان مستقیم

گشـــتاور آرمیچر موتورهای جریان مستقیم ناشی از جاری شدن جریان در سیم‌پیچی آرمیچر واقع در میدان مغناطیســـی قطب‌های استاتور اســـت. با عبور جریان از ســـیم‌پیچی آرمیچر I_A، از طرف فوران مغناطیســـی میدان قطب‌های استاتور φ به هادی‌های حامل جریان سیم‌پیچی آرمیچر نیروی مغناطیسی وارد می‌شود. این نیرو حول محور رتور گشتاور آرمیچر T_A ایجاد می‌نماید و از رابطه (۲۵ ـ ۲) به‌دست می‌آید.

$$T_A = K \varphi I_A$$

با ایجاد گشتاور، سیم‌پیچی آرمیچر شروع به گردش در فوران مغناطیسی قطب‌های استاتور می‌کند و در آن $\frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$ پدید آمده و طبق قانون القای الکترومغناطیســـی فاراده نیـــروی محرکه E_A در ســـیم‌پیچی آرمیچر القا می‌شـــود. نیروی محرکه القایی در ســـیم‌پیچی آرمیچر E_A از رابطه (۲۰ ـ ۲) به‌دست می‌آید.

$$E_A = K \cdot \varphi \cdot \omega$$

مشاهده می‌شود در ماشـــین‌های الکتریکی جریان مستقیم پدیده‌های ژنراتوری و موتوری به طور هم زمان در سیم‌پیچی آرمیچر شکل می‌گیرند.

مقدار ضریب K از رابطه‌های (۲۵ ـ ۲) و (۲۰ ـ ۲) به‌دست می‌آید. رابطه (۲ ـ ۴)

$$K = \frac{T_A}{\varphi I_A} = \frac{E_A}{\varphi \omega} \qquad (۴-۲)$$

گشـــتاور آرمیچر T_A از تناسب رابطه (۲ ـ ۴) قابل

محاسبه است. رابطه (۳ ـ ۴)

$$T_A = \frac{E_A I_A}{\omega} \qquad (۴-۳)$$

در رابطه (۳ ـ ۴) مقدار $E_A I_A$ بیانگر توان تبدیل شده P_{conv} است. با جایگزینی آن، رابطه (۴ ـ ۴) به‌دست خواهد آمد.

$$T_A = \frac{P_{conv}}{\omega} \qquad (۴-۴)$$

رابطه (۴ ـ ۴) تعریف جدیدی برای گشتاور آرمیچر ارایه می‌دهد. طبق این تعریف «نسبت توان تبدیل شده P_{conv} به سرعت زاویه‌ای رتور ω گشتاور آرمیچر T_A نامیده می‌شود.» بر اساس همین تعریف «نسبت توان خروجی P_{out} به سرعت زاویه‌ای رتور ω ، گشتاور بار T_{load} می‌نامند» و از رابطه (۵ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$T_{load} = \frac{P_{out}}{\omega} \qquad (۴-۵)$$

بدیهی است توان تبدیل شده P_{conv} بزرگ‌تر از توان خروجی P_{out} است در نتیجه گشتاور آرمیچر نیز بیشتر از گشتاور بار خواهد شد.

مثال ۴ ـ ۴ موتور جریان مستقیم ۸۰ KW، ۸۰۰ V و سرعت ۱۵۰۰ RPM مفروض است. اگر در این سرعت نیروی محرکه القایی آرمیچر ۷۵۰ V و جریان آرمیچر ۱۲۵ A باشد مطلوب است:

الف ـ گشتاور آرمیچر T_A

ب ـ گشتاور بار T_{load}

حل:

ـ سرعت زاویه موتور از رابطه (۱۹ ـ ۲) به‌دست می‌آید.

$$\omega = \frac{۲\pi n}{۶۰} = \frac{۲\times ۳/۱۴\times ۱۵۰۰}{۶۰} = ۱۵۷\left[\frac{rad}{sec}\right]$$

ـ از رابطه (۳ ـ ۴) گشتاور آرمیچر به‌دست می‌آید.

$$T_A = \frac{E_A I_A}{\omega} = \frac{۷۵۰\times ۱۲۵}{۱۵۷} = ۵۹۷/۱[N.m]$$

ـ از رابطه (۵ ـ ۴) گشتاور بار به‌دست می‌آید.

$$T_{load} = \frac{P_{out}}{\omega} = \frac{۸۰\times ۱۰^{۳}}{۱۵۷} = ۵۰۹/۵[N.m]$$

پرسش ۱ ـ ۴

پرسش‌های کامل کردنی

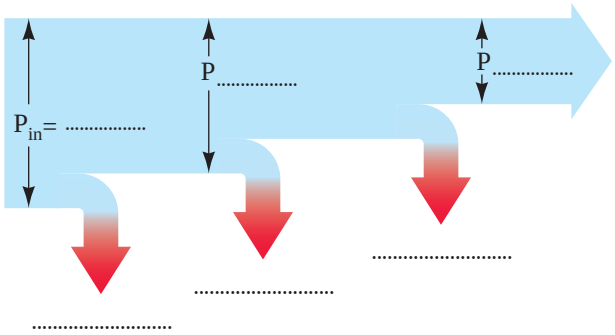
۱ ـ فرآیند تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی توسط ..... صورت می‌گیرد.

۲ ـ مقداری از توان که در اثر ..... در ..... تبدیل به ..... می‌شود را تلفات مکانیکی گویند.

۳ ـ نسبت توان ..... به سرعت ..... را گشتاور آرمیچر نامند.

۴ ـ نسبت توان ..... به سرعت..... را گشتاور بار نامند.

۵ ـ نمودار پخش توان موتور جریان مستقیم شکل زیر را تکمیل کنید.



پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ حاصل جمع تلفات مکانیکی و تلفات تحریک و تلفات آرمیچر را تلفات کل گویند.

☐ صحیح ☐ غلط

۲ ـ تلفات مکانیکی و تلفات هسته را تلفات متغیر گویند.

☐ صحیح ☐ غلط

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ مفهوم توان تبدیل شده در موتورهای جریان مستقیم را شرح دهید.

۲ ـ تلفات آرمیچر را شرح دهید.

۳ ـ ویژگی‌های موتورهای جریان مستقیم را بنویسید.

۴ ـ تلفات متغیر در موتورهای جریان مستقیم کدامند؟

۵ ـ علت پیدایش حالت موتوری و ژنراتوری در ماشین‌های جریان مستقیم را شرح دهید؟

۶ ـ تلفات در موتورهای جریان مستقیم را تعریف کنید.

۷ ـ به چه دلیل به تلفات مسی، تلفات متغیر گویند؟

تمرین ۱ ـ ۴

۱ ـ موتور جریان مستقیم ۱ kW، ۲۰۰ V با توان تبدیل شده ۱۱۰۰ W و تلفات مسی ۵۰ W مفروض است. مطلوب است:

الف ـ تلفات مکانیکی و هسته روی هم

ب ـ توان ورودی موتور

پ ـ جریان موتور

۲ ـ موتور جریان مستقیم ۱۰ kW، ۵۰۰ V با تلفات ثابت ۷۰۰ W و متغیر ۸۰۰ W مفروض است. مطلوب است:

الف ـ تلفات کل

ب ـ توان ورودی

پ ـ توان تبدیل شده

۳ ـ یک موتور جریان مستقیم ۱۰ HP، ۲۵۰ V با بازده ۷۴/۵ ٪ مفروض است. مطلوب است:

الف ـ توان ورودی

ب ـ جریان موتور

۴ ـ یک موتور جریان مستقیم ۴۵ kW باری را با گشتاور ۴۳۰ N.m به گردش درآورده است. سرعت رتور را برحسب RPM به‌دست آورید.

۵ ـ یک موتور جریان مستقیم ۹۰ kW با تلفات ثابت ۲/۵ kW باری را با سرعت ۱۲۰۰ RPM می‌گرداند. مطلوب است:

الف ـ گشتاور بار

ب ـ گشتاور آرمیچر

۵ ـ ۴ ـ پدیده مهار گسستگی در موتورهای جریان مستقیم

افزایش سرعت موتورهای جریان مستقیم در اثر کاهش فوران مغناطیسی قطب‌ها را «مهارگسستگی[۱]» گویند.

نیروی محرکه القایی آرمیچر از رابطه به‌دست می‌آید. بر اساس این رابطه سرعت از رابطه (۶ ـ ۴) تعیین می‌شود.

$$\omega = \frac{E_A}{K \cdot \varphi} \qquad (۴-۶)$$

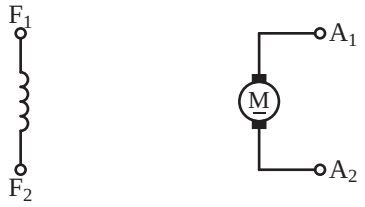
گشتاور آرمیچر موتورهای جریان مستقیم از رابطه (۲۵ ـ ۲) به‌دست می‌آید.

$$T_A = K \cdot \varphi \cdot I_A$$

اگر در اثر افزایش مقاومت مدار تحریک، جریان سیم‌پیچی تحریک I_F کاهش یابد فوران مغناطیسی قطب‌ها φ کم می‌شود و طبق رابطه (۲۵ ـ ۲) گشتاور آرمیچر کاهش می‌یابد. در این صورت اگر موتور بار داشته باشد، از حرکت می‌ایستد و جریان سیم‌پیچی آرمیچر افزایش می‌یابد و به آن آسیب خواهد رسید. در صورتی‌که موتور بدون بار باشد کاهش فوران طبق رابطه (۶ ـ ۴) منجر به افزایش سرعت می‌شود و مهار گسسته خواهد شد و به یاتاقان‌ها آسیب می‌رسد؛ هم‌چنین در اثر افزایش جریان به سیم‌پیچی آرمیچر آسیب می‌رسد.

۶ ـ ۴ ـ علامت اختصاری و مدار الکتریکی معادل موتورهای جریان مستقیم

طرح ساختمانی موتور جریان مستقیم شکل (۲ ـ ۴) دو قسمت مجزا از یکدیگر را نشان می‌دهد. یکی سیم‌پیچی تحریک بر روی استاتور و دیگری سیم‌پیچی آرمیچر بر روی رتور می‌باشد. علامت اختصاری این دو قسمت در شکل (۶ ـ ۴) نشان داده شده است. به کمک علامت‌های اختصاری می‌توان نمایش ساده‌ای از موتورهای جریان مستقیم ارایه کرد.



ب الف

شکل ۶ ـ ۴ الف ـ علامت اختصاری آرمیچر
ب ـ علامت اختصاری تحریک

از علامت اختصاری برای نشان دادن اتصالات الکتریکی در موتورهای جریان مستقیم استفاده می‌شود.

تحلیل الکتریکی موتورهای جریان مستقیم به منظور محاسبه کمیت‌های الکتریکی ولتاژ، جریان و توان با استفاده از مدار الکتریکی معادل امکان‌پذیر است. مدار الکتریکی معادل سیم‌پیچی تحریک، یک مدار RL سری می‌باشد که در شکل (۷ ـ ۴) نشان داده شده است.

۱. Run awav

شکل ۷ ـ ۴ مدار الکتریکی معادل سیم‌پیچی تحریک

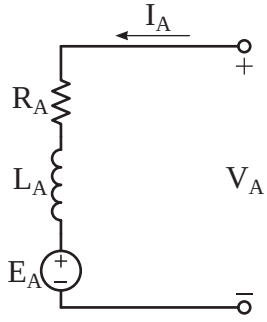
در این شکل:

R_F معادل مقاومت اهمی سیم‌پیچی تحریک

L_F ضریب خود القایی سیم‌پیچی تحریک

I_F جریان سیم‌پیچی تحریک

مدار الکتریکی معادل سیم‌پیچی آرمیچر در شکل (۸ ـ ۴) نشان داده شده است.



شکل ۸ ـ ۴ مدار الکتریکی معادل سیم‌پیچی آرمیچر

در این شکل:

E_A معادل نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی آرمیچر [V]

R_A معادل مقاومت اهمی سیم‌پیچی آرمیچر [Ω]

I_A جریان سیم‌پیچی آرمیچر [A]

V_A ولتاژ دو سر آرمیچر [V]

L_A ضریب خود القایی سیم‌پیچی آرمیچر

۷ ـ ۴ ـ مشخصات موتورهای جریان مستقیم

موتورهای جریان مستقیم توسط کارخانه سازنده مورد آزمایش‌های متعددی قرار خواهند گرفت. نتایجی که از این آزمایش‌ها به‌دست می‌آید به عنوان «مشخصات موتور جریان مستقیم» ارایه خواهند شد. این مشخصات به سه گروه تقسیم می‌شوند.

۱ ـ گروه اول شامل مشخصاتی است که بر روی پلاک ماشین ثبت می‌شود. این مشخصات را «مقادیر نامی» می‌نامند. به هنگام استفاده از موتور تجاوز از مقادیر نامی باعث بروز مشکلات جدی و آسیب به سیم‌پیچی‌های ماشین و قسمت‌های مکانیکی آن خواهد شد.

۲ ـ گروه دوم شامل مشخصاتی است که پس از تنظیم، ترسیم می‌شوند و به عنوان «منحنی مشخصه» به صورت سند در می‌آیند. این منحنی مشخصات عبارتند از:

- منحنی مشخصه الکترومکانیکی

منحنی مشخصه الکترومکانیکی تأثیر تغییرات سرعت گردش رتور n بر جریان سیم‌پیچی آرمیچر I_A را در ولتاژ V_T ثابت نشان می‌دهد.

- منحنی مشخصه الکترومغناطیسی

منحنی مشخصه الکترومغناطیسی تأثیر تغییرات گشتاور بار T_{load} بر جریان سیم‌پیچی آرمیچر I_A را در ولتاژ ثابت V_T نشان می‌دهد.

- منحنی مشخصه گشتاور ـ سرعت

منحنی مشخصه گشتاور ـ سرعت تأثیر تغییرات گشتاور بار T_{load} بر سرعت گردش رتور n را در ولتاژ V_T ثابت نشان می‌دهد.

۳ ـ گروه ســوم شامل مشخصاتی است که از تجزیه و تحلیل اطلاعات مشــخصات گروه اول و دوم به‌دست آمده و محاسبه می‌شوند. یکی از این مشخصات کمیت «تنظیم سرعت[۱] S_R» اســت که تغییرات سرعت نسبت به ســرعت بارداری را نشان می‌دهد و از رابطه (۷ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$S_R = \frac{n_\circ - n}{n} \qquad (۴\text{-}۷)$$

تنظیم سرعت را به صورت درصد بیان می‌کنند و از رابطه (۸ ـ ۴) محاسبه می‌شود.

$$\%S_R = \frac{n_\circ - n}{n} \times ۱۰۰ \qquad (۴\text{-}۸)$$

که در این رابطه:

S_R تنظیم سرعت

$n_\circ$ سرعت بی‌باری رتور

n سرعت بارداری رتور

هرچــه درصد تنظیم ســرعت کمتر باشــد، در اثر افزایش گشتاور بار ســرعت رتور کمتر کاهش می‌یابد. بنابراین سرعت رتور از پایداری بیشتری برخودار است.

مثال ۵ ـ ۴ ـ یک موتور جریان مســتقیم ۲ KW در بی‌بــاری با ســرعت ۱۵۰۰ RPM و در بار کامل با سرعت ۱۴۴۰ RPM می‌گردد. مطلوب است:

الف ـ درصد تنظیم سرعت

ب ـ گشتاور بار

حل:

ـ درصد تنظیم ســرعت از رابطه (۸ ـ ۴) به‌دســت می‌آید.

$$\%S_R = \frac{n_\circ - n}{n} \times ۱۰۰$$

$$\%S_R = \frac{۱۵۰۰ - ۱۴۴۰}{۱۴۴۰} \times ۱۰۰ = \%۴/۱$$

ـ از رابطــه (۱۹ ـ ۲) ســرعت زاویــه‌ای به‌دســت می‌آید.

$$\omega = \frac{۲\pi n}{۶۰} = \frac{۲ \times ۳/۱۴ \times ۱۴۴۰}{۶۰} = ۱۵۰/۷۲ \left[\frac{rad}{sec}\right]$$

ـ از رابطه (۵ ـ ۴) گشتاور بار به‌دست می‌آید.

$$T_{load} = \frac{P_{out}}{\omega} = \frac{۲ \times ۱۰^۳}{۱۵۰/۷۲} = ۱۳/۲۶ [N.m]$$

پرسش ۲ ـ ۴

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ منحنی مشــخصه الکترومکانیکی تأثیر تغییرات ..... بر ..... را نشان می‌دهد.

۲ ـ هرچه درصد تنظیم سرعت ..... باشد، سرعت رتور از پایداری ..... برخوردار است.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ منحنی مشخصه گشتاور ـ سرعت تأثیر گشتاور بار بر سرعت گردش رتور را نشان می‌دهد.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ هرچه درصد تنظیم سرعت بیشتر باشد سرعت

۱. Speed Regulation

رتور از پایداری بیشتری برخوردار است.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ علامت اختصاری سیم‌پیچی تحریک و آرمیچر موتور جریان مستقیم را رسم کنید. کاربرد آن را بنویسید.

۲ ـ مدار الکتریکی معادل موتور جریان مستقیم را رسم کنید هر یک از عناصر آن را شرح دهید.

۳ ـ مقادیر نامی موتورهای جریان مستقیم را تعریف نمایید.

۴ ـ منحنی مشخصه الکترومغناطیسی را تعریف کنید.

۵ ـ درصد تنظیم سرعت را تعریف کنید و رابطه آن را بنویسید.

تمرین ۲ ـ ۴

۱ ـ گشتاور خروجی یک موتور جریان مستقیم ۳۰ KW در بار کامل ۱۲۰ Nm است. اگر درصد تنظیم سرعت ۴ ٪ باشد سرعت آن در بی‌باری چقدر است؟

۸ ـ ۴ ـ طبقه‌بندی موتورهای جریان مستقیم

موتورهای جریان مستقیم با توجه به نوع تحریک و نحوه تامین تغذیه تحریک به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند.

۱ ـ موتورهای جریان مستقیم با آهن‌ربای دایم[۱] PMDC

۲ ـ موتورهای جریان مستقیم با تحریک مستقل[۲]

۳ ـ موتورهای جریان مستقیم با تحریک شنت[۳]

۴ ـ موتورهای جریان مستقیم با تحریک سری[۴]

۵ ـ موتورهای جریان مستقیم با تحریک کمپوند[۵]

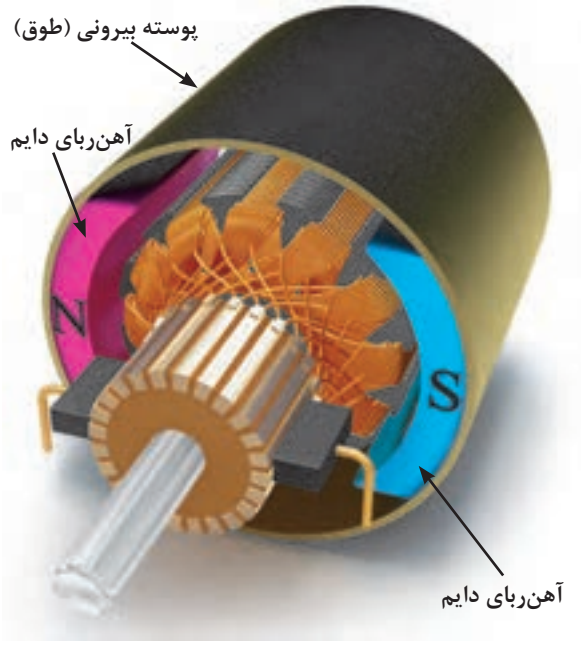
۹ ـ ۴ ـ موتورهای جریان مستقیم با آهن‌ربای دایم

موتورهای جریان مستقیم با آهن‌ربای دایم PMDC یک موتور DC است که قطب‌های آن از آهن‌ربای دایم ساخته شده است. این موتورها با حجم کوچک و توان کم دارای گشتاور مناسبی هستند و بسیار استفاده می‌شوند. در شکل (۹ ـ ۴) موتور جریان مستقیم با آهن‌ربای دایم نشان داه شده است.

شکل ۹ ـ ۴ موتور جریان مستقیم با آهن‌ربای دایم

موتورهای جریان مستقیم با آهن‌ربای دایم دارای قطب‌های صاف هستند. شکل (۱۰ ـ ۴) طرح ساختمانی موتور DC با آهن‌ربای دایم را نشان می‌دهد.

۱. Permanent Magnet DC Motor ۲. Separatly Excited ۳. Shunt Field
۴. Series Field ۵. Compounded Field



شکل ۱۰ ـ ۴ طرح ساختمانی موتور DC با آهن‌ربای دایم

پوســـته بیرونی یا طوقه از جنس آلیاژ آلومینیمی یا فلزاتی دیگر اســـت و آهن‌رباهای دایم که همان قطب‌ها هستند را نگه می‌دارد. رتور نیز مانند دیگر ماشین‌های DC، شـــیارهایی برای ســـیم‌پیچی دارد و شامل یک کموتاتور و چند جاروبک است.

موتورهای DC با آهن‌ربای دایم PMDC به جای ســـیم‌پیچی تحریـــک دارای آهن‌ربای دایم هســـتند و ساختمان ساده‌تری دارند. عدم نیاز به تحریک خارجی برای تولید میدان مغناطیسی و نبود تلفات تحریک نیز از مزایای آنها به شـــمار می‌آیـــد. از طرف دیگر تضعیف میدان مغناطیس آهن‌رباهـــای دایم در اثر عکس‌العمل آرمیچر و عدم کنترل بر میدان مغناطیســـی قطب‌ها از معایب موتورهای DC با آهن‌ربای دایم است.

۱ ـ ۹ ـ ۴ ـ کاربرد

موتورهای DC با آهن‌ربای دایم در اسباب‌بازی‌ها و در خودروها به عنوان موتور برف پاکن و پمپ شیشه‌شوی و پایین و بالابر شیشـــه و هم‌چنین در مسواک‌ها به کار می‌روند. به‌طور کلی در جاهایی که نیاز به موتور کوچک و ارزان‌قیمت باشـــد این موتورها پیشنهاد خواهند شد. سالانه میلیون‌ها موتور جریان مستقیم با آهن‌ربای دایم در دنیا تولید و استفاده می‌شوند.

پرسش ۳ ـ ۴

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ موتورهای PMDC با حجـــم ..... و توان ..... دارای گشتاور ..... هستند.

۲ ـ موتورهای PMDC با آهن‌ربای ..... دارای قطب‌های ..... هستند.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ در موتورهای PMDC پوسته بیرونی از جنس آهن‌ربای دایم است.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ موتورهای جریان مســـتقیم چگونه طبقه‌بندی می‌شوند؟

۲ ـ انواع موتورهای جریان مستقیم را نام ببرید.

۳ ـ ساختمان موتورهای جریان مستقیم با آهن‌ربای دایم را شرح دهید.

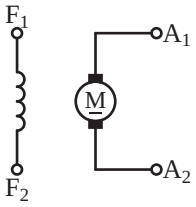
۴ ـ وظیفـــه پوســـته در موتورهـــای PMDC را بنویسید.

۵ ـ مزایـــا و معایـــب موتورهای جریان مســـتقیم با آهن‌ربای دایم را بنویسید.

۶ ـ کاربرد موتورهای PMDC را بنویسید.

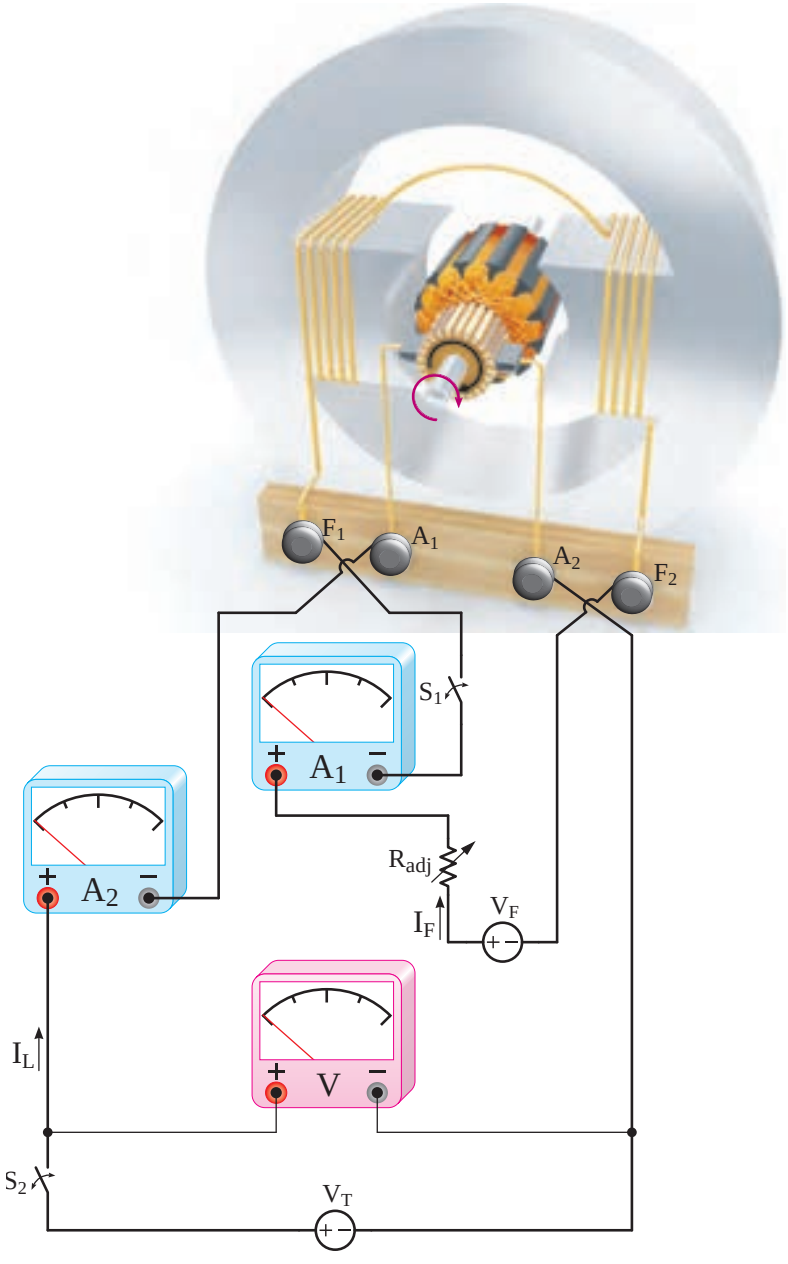
۱۰ ـ ۴ ـ موتورهای جریان مستقیم با تحریک مستقل

موتورهای جریان مستقیم با تحریک مستقل را «موتور تحریک جداگانه» نیز می‌گویند. در موتور تحریک مستقل ارتباط الکتریکی بین مدار آرمیچر با مدار تحریک وجود ندارد. علامت اختصاری موتور تحریک مستقل در شکل (۱۱ ـ ۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۱ ـ ۴ علامت اختصاری موتور تحریک مستقل

طرح ساختمانی موتور تحریک مستقل در شکل (۱۲ ـ ۴) نشان داده شده است.

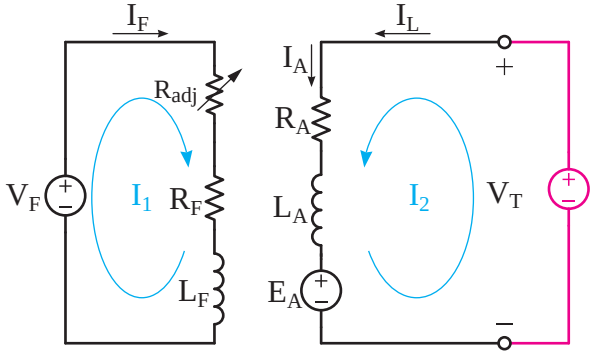


شکل ۱۲ ـ ۴ طرح ساختمانی موتور تحریک مستقل

سیم‌پیچی تحریک با تعداد دور زیاد برای جریان کم به دور قطب‌ها پیچیده شده است. سیم‌پیچی تحریک توسط منبع ولتاژ V_F تغذیه می‌شود. برای تغییر و تنظیم جریان تحریک از مقاومت متغیر سری با سیم‌پیچی تحریک استفاده شده است. این مقاومت را «مقاومت تنظیم‌کننده جریان تحریک» می‌نامند و با R_{adj} نشان می‌دهند. برای قطع و وصل کردن مدار تحریک از کلید S_1 و برای اندازه‌گیری جریان آن از آمپرمتر A_1 استفاده شده است. مدار آرمیچر توسط منبع ولتاژ V_T تغذیه می‌شود و برای قطع و وصل آن از کلید S_2 و برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان آن از ولت‌متر V و آمپرمتر A_2 استفاده شده است.

۱ ـ ۱۰ ـ ۴ ـ مدار الکتریکی معادل

مدار الکتریکی معادل موتور تحریک مستقل در شکل (۱۳ ـ ۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۳ ـ ۴ مدار الکتریکی معادل موتور تحریک مستقل

این مدار با توجه به توضیحات بخش ۴ ـ ۳ و طرح ساختمانی شکل (۱۲ ـ ۴) به‌دست آمده است.

مدار الکتریکی تحریک و آرمیچر را با روش حلقه یا روش‌های دیگر می‌توان تحلیل کرد. معمولاً در تحلیل مدار الکتریکی معادل اثرات مغناطیسی عکس‌العمل آرمیچر و کموتاسیون به دلیل پیچیدگی محاسبات در نظر گرفته نمی‌شوند. روش متداول اندازه‌گیری اثرات مغناطیسی استفاده از منحنی مشخصه‌های موتور است.

در حالت پایدار جریان مدار تحریک I_F و مدار آرمیچر I_A از نوع DC است و فرکانس ندارند. لذا برای نوشتن معادلات جریان و ولتاژ از اثرات خود القایی L_A و L_F صرف‌نظر خواهد شد.

برای مدار الکتریکی معادل سیم‌پیچی تحریک حلقه I_1 در جهت حرکت عقربه‌های ساعت و برای مدار الکتریکی معادل سیم‌پیچی آرمیچر حلقه I_2 در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت انتخاب شده است.

با نوشتن KVL برای حلقه‌های I_1 و I_2 معادلات (۹ ـ ۴) و (۱۰ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$KVL1) \quad -V_F + R_{adj}I_1 + R_F I_1 = 0 \qquad (۴-۹)$$

$$KVL2) \quad -V_T + R_A I_2 + E_A = 0 \qquad (۴-۱۰)$$

جریان حلقه I_1 از محل I_F و جریان حلقه I_2 از محل جریان‌های I_A و I_L می‌گذرد. بنابراین روابط (۱۱ ـ ۴) و (۱۲ ـ ۴) را می‌توان نوشت.

$$I_F = I_1 \qquad (۴-۱۱)$$

$$I_A = I_L = I_2 \qquad (۴-۱۲)$$

تلفات تحریک از رابطه (۱۳ ـ ۴) و تلفات آرمیچر از رابطه (۱۴ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$P_F = (R_F + R_{adj})I_F^2 \qquad (۴-۱۳)$$

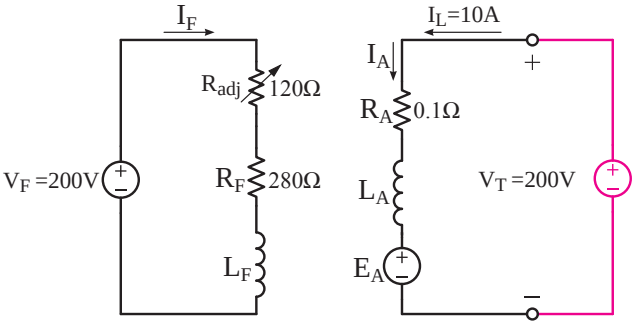
$$P_A = R_A I_A^2 \qquad (۴-۱۴)$$

مثـــال ۶ ـ ۴ ـ موتور جریان مســـتقیم با تحریک مستقل ۲۰۰ ولتی، ۱۰ آمپری با مدار الکتریکی معادل مطابق شکل (۱۴ ـ ۴) در نظر است. مطلوب است:

الف) جریان مدار تحریک I_F

ب) نیروی محرکه القایی آرمیچر E_A

پ) تلفات تحریک و آرمیچر



شکل ۱۴ ـ ۴

حل:

ـ بـــرای مدار تحریک حلقـــه $I_۱$ را در جهت حرکت عقربه‌های ساعت انتخاب می‌کنیم و KVL می‌نویسیم تا جریان تحریک به‌دست آید.

$$KVL۱) \quad -V_F + R_{adj} I_۱ + R_F I_۱ = ۰$$
$$-۲۰۰ + ۱۲۰ I_۱ + ۲۸۰ I_۱ = ۰$$
$$-۲۰۰ + ۴۰۰ I_۱ = ۰$$
$$۴۰۰ I_۱ = ۲۰۰$$
$$I_۱ = \frac{۲۰۰}{۴۰۰} = ۰/۵ \,[A]$$

ـ حلقه $I_۱$ از محل I_F می‌گذرد.

$$I_F = I_۱ = ۰/۵ \,[A]$$

ـ برای مـــدار آرمیچر حلقـــه $I_۲$ را در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ســـاعت انتخـــاب می‌کنیم و KVL می‌نویسیم.

$$KVL۲) \quad -V_T + R_A I_۲ + E_A = ۰$$

ـ حلقـــه $I_۲$ از محـــل I_A و در جهـــت آن می‌گذرد؛ بنابراین خواهیم داشت:

$$I_A = I_L = I_۲ = ۱۰ \,[A]$$

ـ با جایگزینی $I_۲$ در رابطه KVL۲ خواهیم داشت:

$$KVL۲) \quad -۲۰۰ + ۰/۱(۱۰) + E_A = ۰$$
$$E_A = ۱۹۹ \,[V]$$

ـ پس از محاســـبه I_F و I_A تلفات تحریک و آرمیچر به‌دست می‌آید.

$$P_F = (R_A + R_{adj}) I_F^2$$
$$P_F = (۲۸۰ + ۱۲۰) \times ۰/۵^2 = ۱۰۰ \,[W]$$

$$P_A = R_A I_A^2$$
$$P_A = ۰/۱ \times ۱۰^2 = ۱۰ \,[W]$$

تمرین ۳ ـ ۴

۱ ـ یک موتور جریان مســـتقیم با تحریک مستقل ۴ KW، ۲۵۰ V با بازده ۸۰ ٪ و مقاومت سیم‌پیچی آرمیچر ۰/۵Ω مفروض است. مطلوب است:

الف ـ جریان موتور

ب ـ توان الکترو مغناطیسی

۲ ـ یک موتور جریان مســـتقیم با تحریک مستقل با

مشخصات زیر مفروض است:

$$V_F = ۲۰۰V \ , \ I_F = ۰/۵\ A \ , \ V_T = ۲۰۰V$$
$$E_A = ۱۹۰V \ \ , \ R_A = ۰/۵\Omega$$

مطلوب است:

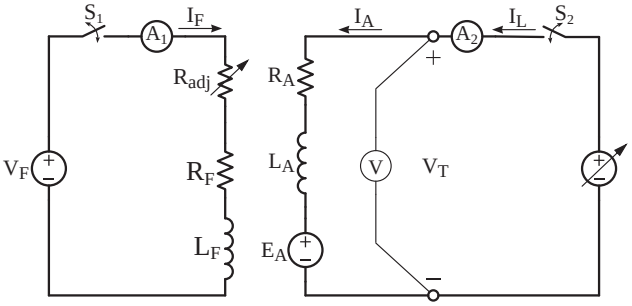
الف ـ مقاومت مدار تحریک

ب ـ جریان موتور

ج ـ اگر تلفات ثابت ۲۰۰ W باشد بازده موتور چند درصد است؟

۲ ـ ۱۰ ـ ۴ ـ راه‌اندازی

برای راه‌اندازی موتور تحریک مستقل قبل از هر کاری ابتدا مقادیر نامی شامل ولتاژ، جریان، جریان تحریک و سرعت را از پلاک مشخصات موتور یادداشت کنید. مطابق شکل (۱۵ ـ ۴) مدار آرمیچر را از طریق آمپرمتر $A_۲$ و ولت‌متر V به منبع ولتاژ متغیر و مدار تحریک را از طریق مقاومت متغیر R_{adj} و آمپرمتر $A_۱$ به منبع ولتاژ V_F وصل کنید.



شکل ۱۵ ـ ۴ مدار الکتریکی راه‌اندازی موتور تحریک مستقل

مقاومت متغیر R_{adj} را در حداقل خود قرار دهید تا با بستن کلید $S_۱$ مدار تحریک با حداکثر جریان، بیشترین فوران را تولید کند. اکنون با بستن کلید $S_۲$ ولتاژ منبع متغیر را از صفر به تدریج زیاد نمایید تا ولت‌متر V ولتاژ نامی موتور را نشان دهد. در صورتی‌که سرعت موتور به سرعت بی‌باری n_0 نرسیده بود، با افزایش مقاومت متغیر R_{adj} ، جریان تحریک را کاهش دهید تا سرعت افزایش بیابد و به سرعت موردنظر برسد. بدیهی است افزایش بیش از حد مقاومت مدار تحریک یا قطع مدار تحریک مطابق آنچه که در بخش ۵ ـ۴ توضیح داده شد باعث بروز مشکلاتی خواهد شد.

۳ ـ ۱۰ ـ ۴ ـ آزمایش بارداری

منحنی مشخصه‌های الکترومکانیکی، الکترومغناطیسی و گشتاور ـ سرعت از آزمایش بارداری به‌دست می‌آید.

برای انجام آزمایش بارداری پس از راه‌اندازی موتور ضمن ثابت نگه داشتن ولتاژ موتور V_T گشتاور بار را طی چند مرحله افزایش دهید و در هر مرحله سرعت رتور را توسط دورسنج و جریان آرمیچر را توسط آمپرمتر و گشتاور بار را توسط گشتاورسنج[۱] اندازه‌گیری و نتایج را در جدولی یادداشت نمایید. مراحل آزمایش را تا رسیدن جریان آرمیچر به مقدار نامی ادامه دهید.

سپس روی یک دستگاه مختصات که محور افقی آن جریان آرمیچر I_A و محور عمودی آن سرعت رتور n است، نقاط نشان دهنده n به ازای جریان آرمیچر I_A معینی را مشخص کنید تا «منحنی مشخصه الکترومکانیکی» به‌دست آید. اکنون بر روی دستگاه مختصات دیگری که محور افقی آن جریان آرمیچر و محور عمودی آن گشتاور بار T_{load} است، نقاط نشان‌دهنده T_{load} به ازای جریان آرمیچر I_A معینی را مشخص کنید تا «منحنی مشخصه الکترومغناطیسی»

۱. Torque Meter

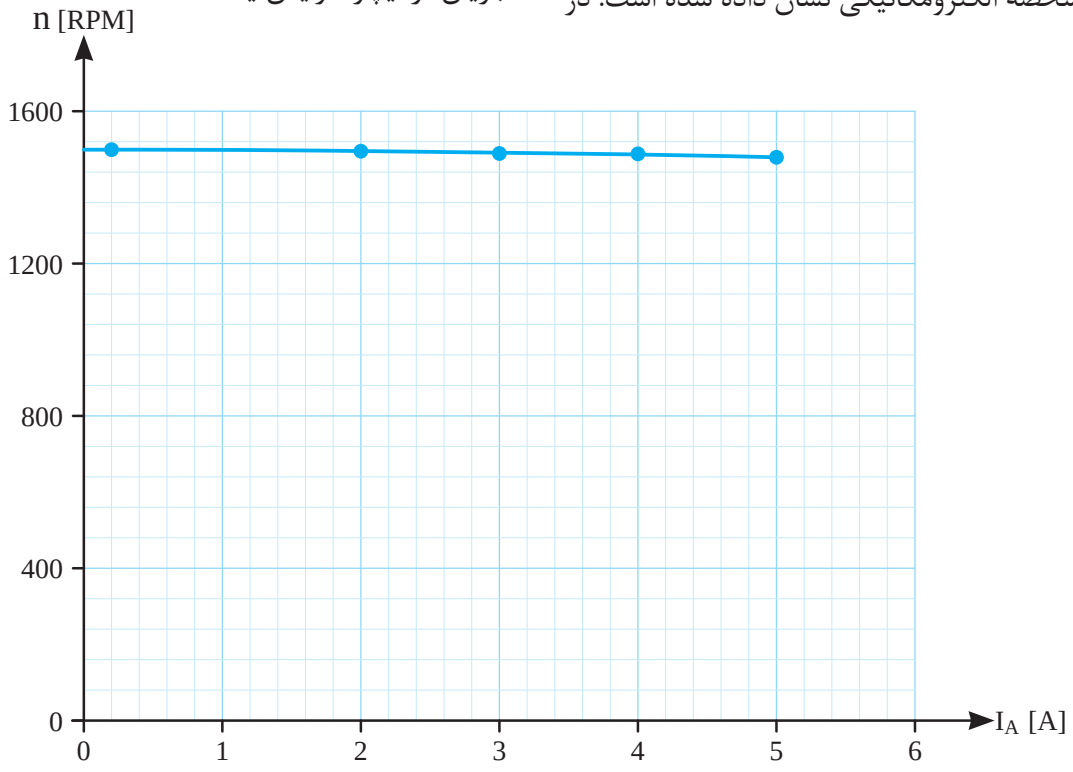
به‌دســـت آید. اگر نقاط نشـــان‌دهنده سرعت n به ازای گشـــتاور T_{load} معینی را بر روی دستگاه مختصاتی که محور افقی آن گشتاور T_{load} و محور عمودی آن سرعت n باشد نشان دهیم «منحنی مشخصه گشتاور ـ سرعت» به‌دست می‌آید.

جدول (۱ ـ ۴) نتایج آزمایش بارداری موتور تحریک مستقل ۲۲۰ V، ۱ KW، ۵ A را نشان می‌دهد.

V_T	۲۲۰V				
n[RPM]	۱۵۰۰	۱۴۹۶	۱۴۹۰	۱۴۸۹	۱۴۸۰
I_A[A]	۰/۲	۲	۳	۴	۵
T_{load}[Nm]	۰	۳	۴/۵	۶	۷/۵

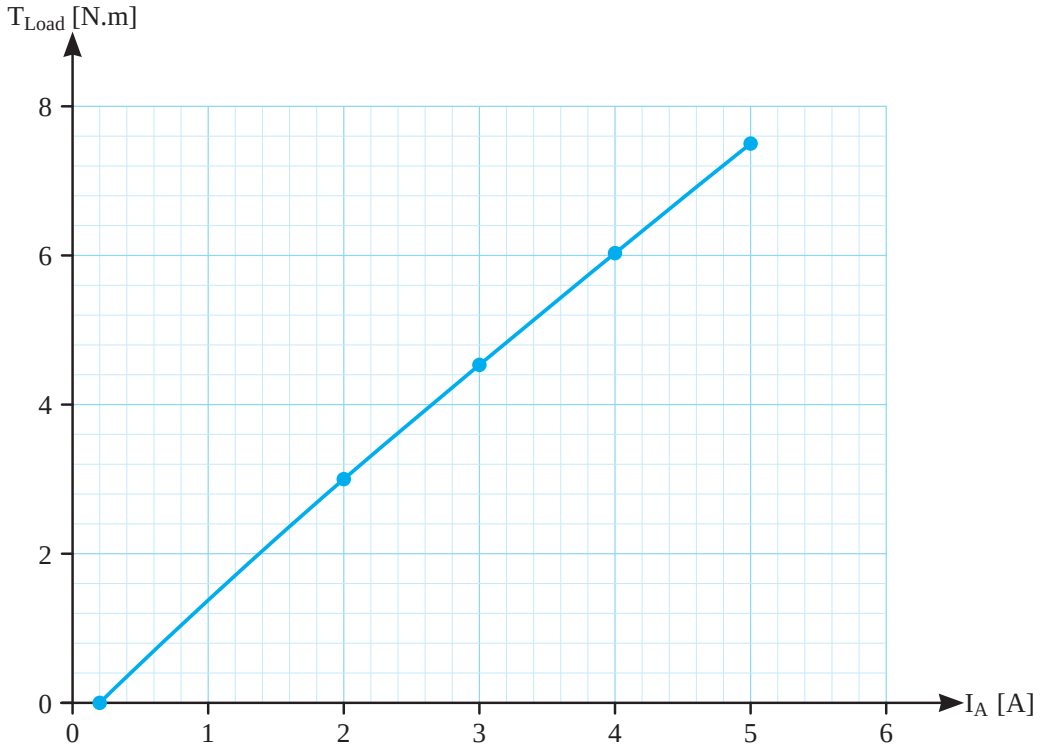
جدول ۱ ـ ۴ نتایج آزمایش بارداری موتور تحریک مستقل

نقاط نشان‌دهنده مقدار هر سرعت n به ازای جریان I_A معیـــن جـــدول (۱ ـ ۴) در شـــکل (۱۶ ـ ۴) تحت عنوان مشخصه الکترومکانیکی نشان داده شده است. در مشخصه الکترومکانیکی مشاهده می‌شود در اثر افزایش گشـــتاور بار که منجر به کاهش سرعت رتور شده است، جریان آرمیچر افزایش یافته است.



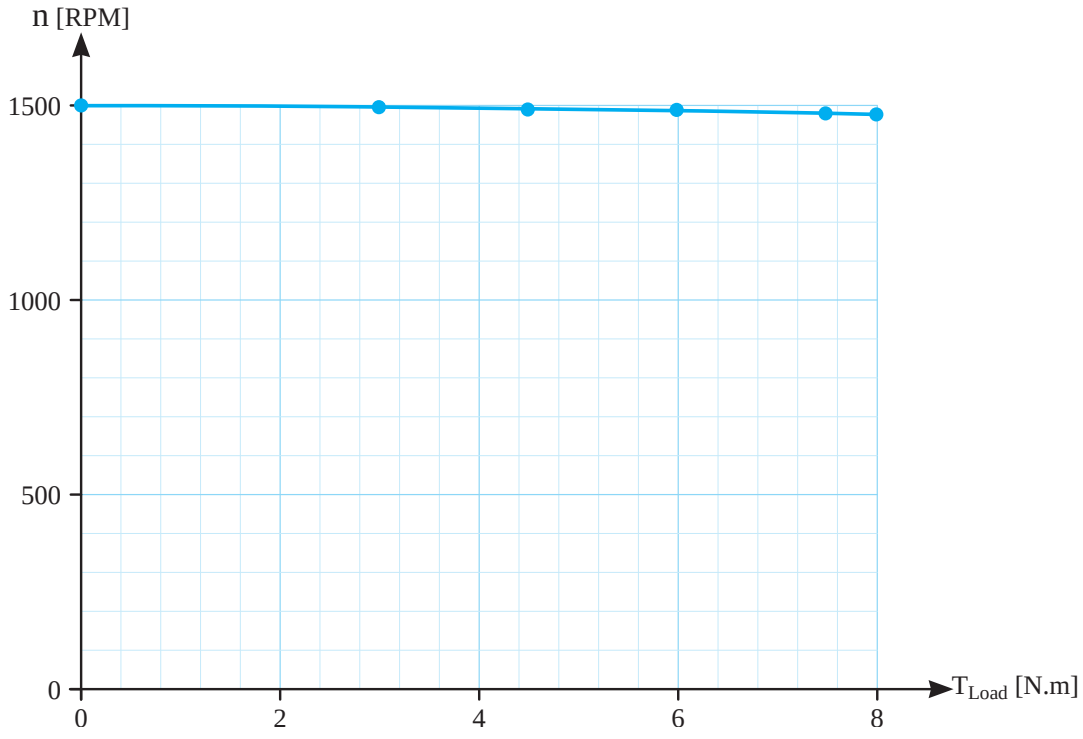
شکل ۱۶ ـ ۴ منحنی مشخصه الکترومکانیکی موتور تحریک مستقل

نقاط نشـــان‌دهندهٔ مقدار هر گشتاور T_{load} به ازای I_A معیـــن جـــدول (۱ ـ۴) در شـــکل (۱۷ ـ ۴) تحت عنوان مشخصه الکترومغناطیسی نشان داده شده است. در مشخصه الکترومغناطیســـی مشاهده می‌شود در اثر افزایش گشـــتاور بار T_{load}، موتور تحریک مستقل سعی می‌کند سرعت خود را ثابت نگه دارد اما جریان آرمیچر I_A را افزایش می‌دهد.



شکل ۱۷-۴ منحنی مشخصه الکترومغناطیسی موتور تحریک مستقل

نقاط نشـــان دهندهٔ مقـــدار هر ســـرعت n به ازای گشـــتاور T_{load} معین جدول (۱-۴) در شکل (۱۸-۴) تحت عنوان مشخصه گشتاور ـ سرعت نشان داده شده است. در مشخصه گشتاور ـ سرعت مشاهده می‌شود در اثر افزایش گشتاور بار T_{load} سرعت رتور اندکی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۸-۴ منحنی مشخصه گشتاور ـ سرعت موتور تحریک مستقل

فعالیت۱-۴- با استفاده از برنامه صفحه گسترده *Excel* از برنامه‌های مجموعه *Microsoft Office* منحنی مشخصه‌های مربوط به جدول (۱-۴) را رسم نمایید.

۴-۱۰-۴- کاربرد

موتورهای جریان مستقیم با تحریک مستقل دارای سرعت تقریبا ثابت از بی‌باری تا بار کامل می‌باشند و گشتاور آن کم می‌باشد. این موتورها با افزایش گشتاور بار در محدوده بار نامی سرعت خود را تقریبا ثابت نگه می‌دارند و جریان خود را افزایش می‌دهند. موتورهای جریان مستقیم با تحریک مستقل دارای بازه وسیع کنترل سرعت از صفر تا سرعت نامی می‌باشند و به خوبی می‌توان سرعت آنها را تحت کنترل داشت. بنابراین موتورهای تحریک مستقل در جاهایی به‌کار گرفته می‌شوند که نیاز به سرعت ثابت و کنترل سرعت در بازه وسیعی باشد.

پرسش ۴-۴

پرسش‌های کامل کردنی

۱- هدف از انجام آزمایش بارداری موتور تحریک مستقل تأثیر افزایش ..... بر ..... و ..... است.

۲- با افزایش گشتاور بار موتور تحریک مستقل جریان آرمیچر ..... می‌یابد.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ آزمایش بارداری موتور تحریک مستقل در ولتاژ ثابت انجام خواهد شد.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ با افزایش گشتاور بار موتور تحریک مستقل جریان آرمیچر کاهش می‌یابد.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ علامت اختصاری موتور تحریک مستقل را رسم کنید و اجزای آن را شرح دهید.

۲ ـ کاربرد مدار الکتریکی معادل را بنویسید.

۳ ـ مدار الکتریکی معادل موتور تحریک مستقل را رسم کنید و اجزای آن را شرح دهید.

۴ ـ قبل از راه‌اندازی موتور تحریک مستقل چه باید کرد؟

۵ ـ نحوه راه‌اندازی موتور تحریک مستقل را شرح دهید.

۶ ـ نحوه انجام آزمایش بارداری موتور تحریک مستقل را بنویسید.

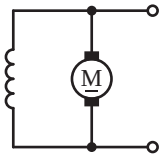
۷ ـ کاربرد موتورهای تحریک مستقل را بنویسید.

۸ ـ ویژگی‌های موتور تحریک مستقل را شرح دهید.

۹ ـ افزایش بیش از حد مقاومت متغیر R_{adj} چه مشکلی ایجاد می‌کند؟

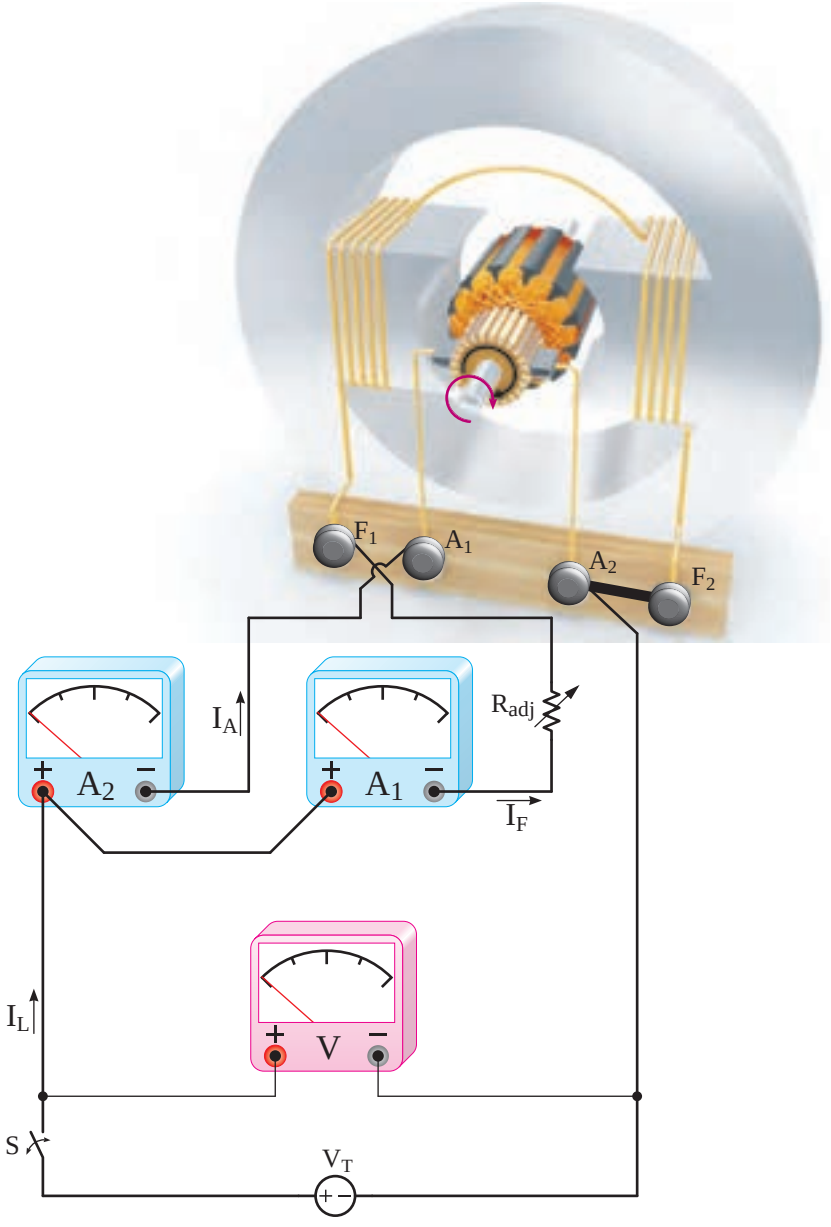
۱۱ ـ ۴ ـ موتورهای جریان مستقیم با تحریک شنت

موتورهای جریان مستقیم با تحریک شنت را به اختصار «موتور شنت» گویند. در موتور شنت مدار تحریک با مدار آرمیچر به صورت موازی ارتباط پیدا می‌کند. علامت اختصاری موتور شنت در شکل (۱۹ ـ ۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۹ ـ ۴ علامت اختصاری موتور شنت

طرح ساختمانی موتور شنت در شکل (۲۰ ـ ۴) نشان داده شده است.

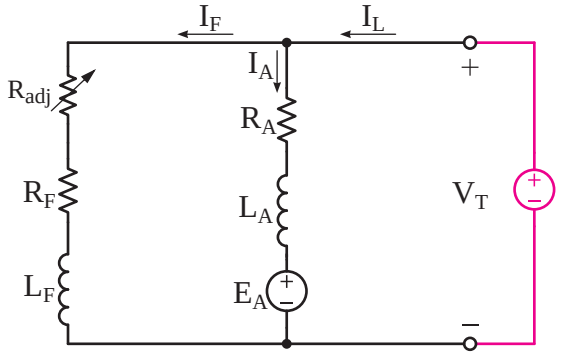


شکل ۲۰ ـ ۴ طرح ساختمانی موتور شنت

سیم‌پیچی تحریک با تعداد دور زیاد برای جریان کم به دور قطب‌ها پیچیده شـــده است. سیم‌پیچی تحریک با سیم‌پیچی آرمیچر به صورت موازی ارتباط داده شده اســـت. برای تغییر و تنظیم جریـــان تحریک، مقاومت تنظیم‌کننده جریان تحریک R_{adj} در مدار تحریک قرار داده شـــده است و برای اندازه‌گیری جریان‌های تحریک و آرمیچـــر از آمپرمترهای A_1 و A_2 و برای اندازه‌گیری ولتاژ V_T از ولت‌متر V استفاده شده است.

۱ ـ ۱۱ ـ ۴ مدار الکتریکی معادل

مدار الکتریکی معادل موتور شـــنت با توجه به طرح ســـاختمانی شـــکل (۲۰ ـ ۴) در شکل (۲۱ ـ ۴) نشان داده شده است.



شکل ۲۱ ـ ۴ مدار الکتریکی معادل موتور شنت

مـــدار الکتریکـــی معـــادل موتور شـــنت را با روش پتانســـیل گره یـــا روش‌هـــای دیگر می‌تـــوان تحلیل کرد. معمـــولاً در تحلیل مدار الکتریکـــی معادل اثرات مغناطیسی عکس‌العمل آرمیچر و کموتاسیون به دلیل پیچیدگی محاســـبات در نظر گرفته نمی‌شـــود. روش متداول اندازه‌گیری اثرات مغناطیسی استفاده از منحنی مشـــخصه‌های موتور اســـت. جریان موتور DC است و فرکانس ندارد؛ لذا برای نوشتن معادلات جریان و ولتاژ از اثرات خودالقایی L_A و L_F صرف‌نظر خواهد شد.

با نوشـــتن KCL برای گره مدار تحریک و آرمیچر معادله (۱۵ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$KCL) \quad -I_L + I_A + I_F = 0 \qquad (۴\text{-}۱۵)$$

بـــا به‌کار بردن قانون اهم مقادیر جریان‌های I_F و I_A به‌دست خواهد آمد.

$$I_F = \frac{V_T}{R_F + R_{adj}} \qquad (۴\text{-}۱۶)$$

جریان آرمیچر I_A از سمت V_T به سوی E_A جاری است. پس $V_T > E_A$ می‌باشد و خواهیم داشت:

$$I_A = \frac{V_T - E_A}{R_A} \qquad (۴\text{-}۱۷)$$

از رابطه $P_{in} = V_T \cdot I_L$ جریان I_L به‌دست می‌آید.

$$I_L = \frac{P_{in}}{V_T} \qquad (۴\text{-}۱۸)$$

تلفات تحریک از رابطه (۱۳ ـ ۴) و تلفات آرمیچر از رابطه (۱۴ ـ ۴) هم‌چنان قابل محاسبه است.

$$P_F = (R_F + R_{adj})I_F^2$$

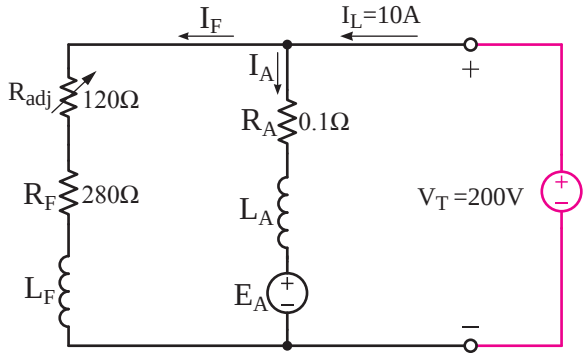
$$P_A = R_A I_A^2$$

مثال ۷ ـ ۴ ـ موتور شـــنت ۲۰۰ V، ۱۰ آمپری با مـــدار الکتریکی معادل مطابق شـــکل (۲۲ ـ ۴) در نظر است. مطلوب است:

الف) جریان مدار تحریک I_F

ب) نیروی محرکه القایی آرمیچر E_A

پ)تلفات تحریک و آرمیچر



شکل ۲۲ ـ ۴

حل:

ـ با قانون اهم جریان تحریک به‌دست می‌آید.

$$I_F = \frac{V_T}{R_F + R_{adj}} = \frac{۲۰۰}{۲۸۰+۱۲۰} = ۰/۵\ [A]$$

ـ با نوشتن KCL برای گره مدار تحریک و آرمیچر، جریان آرمیچر به‌دست خواهد آمد.

$$KCL) \quad -I_L + I_A + I_F = ۰$$
$$-۱۰ + I_A + ۱ = ۰$$
$$I_A = ۹[A]$$

ـ با نوشتن جریان آرمیچر، نیروی محرکه القایی آرمیچر به‌دست می‌آید.

$$I_A = \frac{V_T - E_A}{R_A}$$
$$۹ = \frac{۲۰۰ - E_A}{۰/۱}$$
$$۹ \times ۰/۱ = ۲۰۰ - E_A$$
$$E_A = ۲۰۰ - ۹ \times ۰/۱ = ۲۰۰/۹[V]$$

ـ اکنون تلفات تحریک و آرمیچر به‌دست می‌آید.

$$P_F = (R_F + R_{adj})I_F^۲$$
$$P_F = (۲۸۰+۱۲۰)۱^۲ = ۴۰۰[W]$$

$$P_A = R_A I_A^۲$$
$$P_A = ۰/۱ \times ۹^۲ = ۸/۱[W]$$

تمرین ۴ ـ ۴

۱ ـ یک موتور شنت ۴ KW، ۲۵۰ V با بازده ۸۰ ٪ و مقاومت آرمیچر ۰/۵Ω و تحریک $R_A + R_{adj} = ۲۵۰\ \Omega$ مفروض است. مطلوب است:

الف) جریان موتور

ب) توان الکترومغناطیسی

پ) تلفات ثابت

۲ ـ یک موتور شنت در اتصال به شبکه ۲۲۰ ولتی جریان ۱۰ آمپر دریافت می‌کند و با سرعت ۱۲۰۰ RPM می‌گردد. در صورتی‌که مقاومت مدار آرمیچر ۰/۲Ω و مدار تحریک ۴۴۰Ω باشد، مطلوب است:

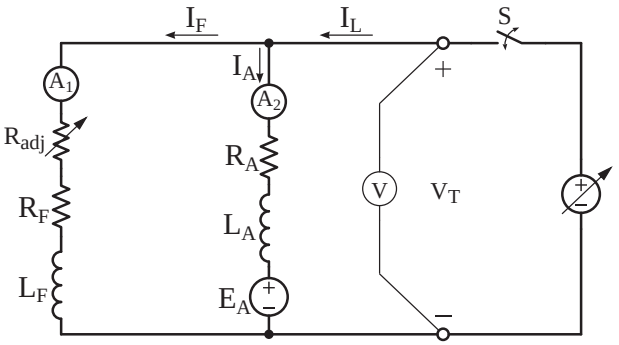
الف) جریان مدار آرمیچر

ب) نیروی محرکه القایی آرمیچر

پ) بازده در صورتی‌که تلفات ثابت ۱۵۰ W باشد.

۲ ـ ۱۱ ـ ۴ ـ راه‌اندازی

برای راه‌اندازی موتور شنت پس از یادداشت مقادیر نامی ولتاژ، جریان و سرعت از پلاک مشخصات موتور، مدار الکتریکی آرمیچر و تحریک را مطابق شکل (۲۳ ـ ۴) ببندید.



شکل ۲۳ ـ ۴ مدار الکتریکی راه‌اندازی موتور شنت

مقاومت متغیر R_{adj} را در حداقل خود قرار دهید و پس از بستن کلید S ولتاژ منبع متغیر را به آرامی زیاد نمایید تا ولت‌متر V ولتاژ نامی موتور را نشـــان دهد. در صورتی‌که ســـرعت موتور به سرعت بی‌باری n_o نرسیده بود با افزایـــش مقاومت R_{adj}، جریان تحریک را کاهش دهید تا سرعت افزایش یابد و به سرعت موردنظر برسد. بدیهی اســـت افزایش بیش از حد مقاومت مدار تحریک یـــا قطع مدار تحریک مطابـــق آنچه که در بخش ۵ ـ ۴ توضیح داده شد باعث بروز مشکلاتی خواهد شد.

۳ ـ ۱۱ ـ ۴ ـ آزمایش بارداری

نحوه انجام آزمایش بارداری و نتایج حاصل از آن در موتورهای شـــنت دقیقاً شبیه به موتور تحریک مستقل می‌باشد. بنابراین مشـــخصه‌های الکترومکانیکی شکل (۱۵ ـ ۴)، الکترومغناطیســـی شکل (۱۶ ـ ۴) و گشتاور ـ سرعت شـــکل (۱۷ ـ ۴) موتور تحریک مستقل برای موتور تحریک موازی نیز صادق است. در واقع در موتور تحریک مســـتقل از دو منبع برای تغذیه مدار آرمیچر و تحریک اســـتفاده می‌شود در حالی‌که در موتور شنت از یک منبع برای تغذیه مدار آرمیچر و تحریک اســـتفاده شده است. از آنجایی‌که در هر دو موتور جریان آرمیچر I_A و جریان تحریک I_F ارتباطی با یکدیگر پیدا نمی‌کنند باعث می‌شود موتور شنت رفتاری شبیه به رفتار موتور مستقل از خود داشته باشد و منحنی مشخصه‌های آنها یکسان باشد.

۴ ـ ۱۱ ـ ۴ ـ کاربرد

منحنی مشـــخصه‌های موتور شنت مشابه موتورهای تحریک مستقل می‌باشـــد. لذا کاربرد و ویژگی‌هایی که در بخش ۴ ـ ۱۰ ـ ۴ برای موتور تحریک مســـتقل ارایه شد برای موتور شنت نیز صدق می‌کند.

پرسش ۵ ـ ۴

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ در موتور ..... مدار ..... با مدار ..... به صورت موازی ارتباط پیدا می‌کند.

۲ ـ به هنگام راه‌اندازی موتور شنت مقاومت R_{adj} را در ..... قرار می‌دهند.

۳ ـ افزایش بیش از حد مقاومت مدار ..... یا قطع مدار ..... باعث مهار گسستگی می‌شود.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ بـــرای تحلیل مدار الکتریکی معادل شـــنت در حالـــت پایدار اثـــرات خود القایـــی L_A و L_F را در نظر می‌گیرند.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ پس از راه‌اندازی برای تنظیم ســـرعت مقاومت R_{adj} را تغییر می‌دهند.

صحیح ☐ غلط ☐

۳ ـ افزایش بیش از حد مقاومت R_{adj} در موتور شنت

مجاز است.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ علامت اختصاری موتور شنت را رسم کنید و اجزای آن را شرح دهید.

۲ ـ مدار الکتریکی معادل موتور شنت را رسم کنید. اجزای آن را شرح دهید.

۳ ـ قبل از راه‌اندازی موتور شنت چه باید کرد؟

۴ ـ نحوه راه‌اندازی موتور شنت را شرح دهید.

۵ ـ اگر پس از راه‌اندازی بخواهیم سرعت موتور شنت را افزایش دهیم چه باید کرد؟

۶ ـ چرا رفتار موتورهای شنت و مستقل مشابه یکدیگر است؟

۷ ـ کاربرد موتورهای شنت را بنویسید.

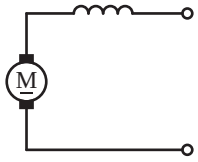
۸ ـ قطع مدار تحریک چه مشکلاتی برای موتور شنت ایجاد می‌کند؟

۹ ـ چرا نمی‌توان مقاومت مدار تحریک موتور شنت را بیش از حد زیاد کرد؟

۱۰ ـ نحوهٔ انجام آزمایش بارداری موتور شنت را شرح دهید.

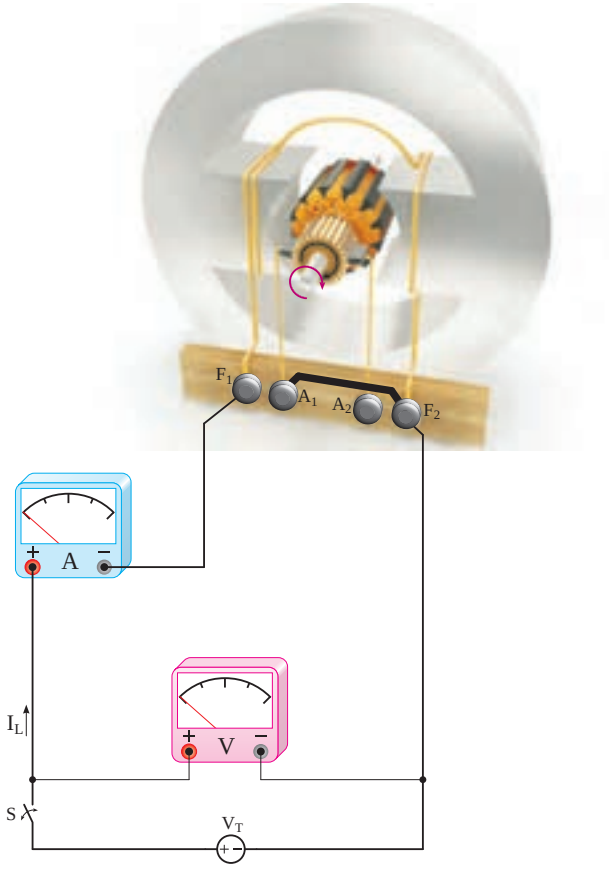
۱۲ ـ ۴ ـ موتورهای جریان مستقیم با تحریک سری

موتورهای جریان مستقیم با تحریک سری را به اختصار «موتور سری» گویند. در موتور سری مدار تحریک با مدار آرمیچر به صورت سری ارتباط پیدا می‌کند. علامت اختصاری موتور سری در شکل (۲۴ ـ ۴) نشان داده شده است.



شکل ۲۴ ـ ۴ علامت اختصاری موتور سری

طرح ساختمانی موتور سری در شکل (۲۵ ـ ۴) نشان داده شده است.



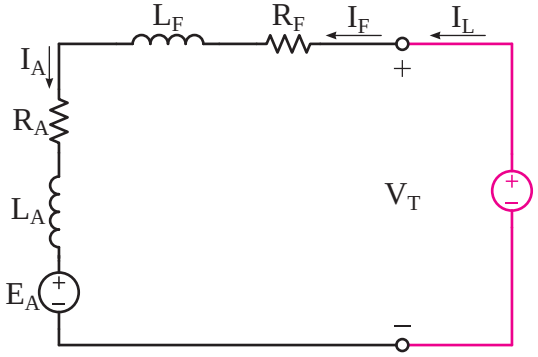
شکل ۲۵ ـ ۴ طرح ساختمانی موتور سری

سیم‌پیچی تحریک با تعداد دور کم برای جریان زیاد به دور قطب‌ها پیچیده شده است. سیم‌پیچی تحریک با سیم‌پیچی آرمیچر به صورت سری ارتباط داده شده

است. برای اندازه‌گیری جریان مدار تحریک و آرمیچر از آمپرمتر A و برای اندازه‌گیری ولتاژ منبع V_T از ولت‌متر V استفاده شده است.

۱ ـ ۱۲ ـ ۴ ـ مدار الکتریکی معادل

مدار الکتریکی معادل موتور سری با توجه به طرح ساختمانی شکل (۲۵ ـ ۴) در شکل (۲۶ ـ ۴) نشان داده شده است.



شکل ۲۶ ـ ۴ مدار الکتریکی معادل موتور سری

مدار الکتریکی معادل موتور سری را با روش حلقه یا روش‌های دیگر می‌توان تحلیل کرد. در حالت پایدار جریان موتور DC است و فرکانس ندارد؛ لذا برای نوشتن معادلات جریان و ولتاژ از اثرات خودالقایی L_A و L_F صرف‌نظر خواهد شد.

برای مدار الکتریکی معادل تحریک و آرمیچر حلقه I_1 در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت انتخاب شده است. با نوشتن KVL برای حلقه I_1 معادله (۱۹ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$KVL) \quad -V_T + R_F I_1 + R_A I_1 + E_A = 0 \qquad (۴-۱۹)$$

جریان حلقه I_1 از محل جریان‌های I_F، I_A و I_L می‌گذرد و رابطه (۲۰ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$I_A = I_F = I_L = I_1 \qquad (۴-۲۰)$$

با توجه به رابطه (۲۰ ـ ۴) جریان I_L جایگزین I_1 در رابطه (۱۹ ـ ۴) می‌شود.

$$-V_T + R_F I_L + R_A I_L + E_A = 0$$

از I_L فاکتور گرفته می‌شود و رابطه (۲۱ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$-V_T + (R_F + R_A) I_L + E_A = 0 \qquad (۴-۲۱)$$

تلفات تحریک از رابطه (۲۲ ـ ۴) و تلفات آرمیچر از رابطه (۲۳ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$P_F = R_F I_F^2 \qquad (۴-۲۲)$$

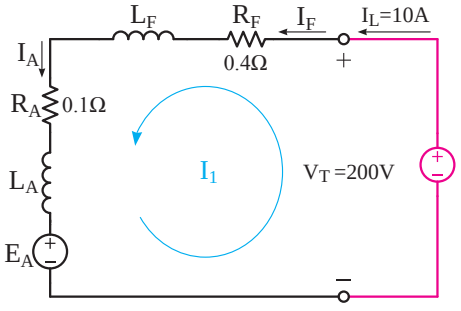
$$P_A = R_A I_A^2 \qquad (۴-۲۳)$$

مثال ۸ ـ ۴ ـ موتور جریان مستقیم سری ۲۰۰ V، ۱۰ A با مدار الکتریکی معادل مطابق شکل (۲۷ ـ ۴) در نظر است. مطلوب است:

الف) جریان مدار آرمیچر تحریک

ب) نیروی محرکه القایی آرمیچر

پ) تلفات تحریک و آرمیچر



شکل ۲۷ ـ ۴

حل:

ـ منبع ولتاژ با تحریک و آرمیچر مدار سری تشکیل داده است. پس:

$$I_A = I_F = I_L = ۱۰ [A]$$

ـ برای حلقه مدار الکتریکی معادل KVL می‌نویسیم و از آن V_T به‌دست می‌آید.

$$-V_T + (R_F + R_A) I_L + E_A = ۰$$
$$-۲۰۰ + (۰/۱ + ۰/۴) \times ۱۰ + E_A = ۰$$
$$E_A = ۲۰۰ - (۰/۵) \times ۱۰ = ۱۹۵ [V]$$

ـ تلفات تحریک از رابطه (۲۲ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$P_F = R_F I_F^۲$$
$$P_F = ۰/۴ \times ۱۰^۲ = ۴۰ [W]$$

ـ تلفات آرمیچر از رابطه (۲۳ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$P_A = R_A I_A^۲$$
$$P_A = ۰/۱ \times ۱۰^۲ = ۱۰ [W]$$

تمرین ۵ ـ ۴

۱ ـ یک موتور سری در اتصال به شبکه ۱۱۰ V جریان ۱۰ A دریافت و با سرعت ۶۰۰ RPM می‌گردد. اگر مقاومت مدار آرمیچر ۰/۴Ω و مقاومت مدار تحریک ۰/۶Ω باشد مطلوب است:

الف) نیروی محرکه القایی آرمیچر

ب) بازده در صورتی‌که تلفات ثابت ۵۰ W باشد.

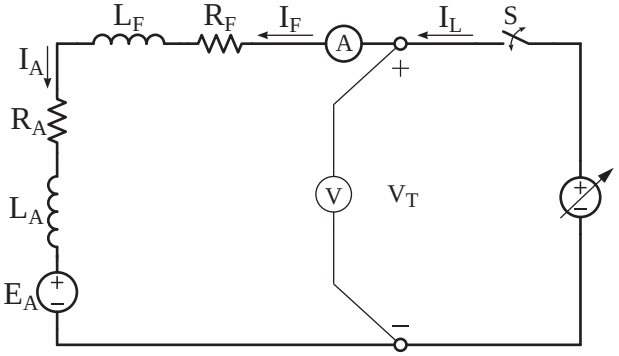
۲ ـ یک موتور سری ۱ kW، ۲۵۰ V با بازده ۸۰٪ و مقاومت مدار تحریک و آرمیچر روی هم ۰/۵Ω مفروض است. مطلوب است:

الف) جریان موتور

ب) تلفات ثابت

۲ ـ ۱۲ ـ ۴ ـ راه‌اندازی

برای راه‌اندازی موتورهای سری پس از یادداشت مقادیر نامی شامل ولتاژ، جریان و سرعت از پلاک مشخصات موتور، مدار الکتریکی آرمیچر و تحریک را مطابق شکل (۲۸ ـ ۴) ببندید.



شکل ۲۸ ـ ۴ مدار الکتریکی راه‌اندازی موتور سری

بارنامی را به موتور اعمال کنید. پس از بستن کلید S ولتاژ منبع متغیر را به تدریج زیاد کنید تا ولت‌متر V ولتاژ نامی و آمپرمتر A جریان نامی موتور را نشان دهند. در این شرایط موتور به سرعت نامی خود رسیده است.

به منظور جلوگیری از بروز پدیده فرار، موتورهای تحریک سری را با بار راه‌اندازی می‌کنند و برای جلوگیری از بی‌بار شدن، آنها را به‌صورت مستقیم یا با چرخ دنده به بار متصل می‌کنند.

در صورتی‌که موتور سری بدون بار راه‌اندازی شود جریان موتور کاهش خواهد یافت. از آنجایی که $I_A = I_F = I_L$ می‌باشد جریان مدار تحریک کم

می‌شـــود و فوران قطب‌ها کاهش می‌یابد و مطابق آنچه که در بخش ۵ ـ ۴ توضیح داده شد سرعت موتور بیش از حد افزایش می‌یابد و پدیده فرار روی می‌دهد.

۳ ـ ۱۲ ـ ۴ ـ آزمایش بارداری

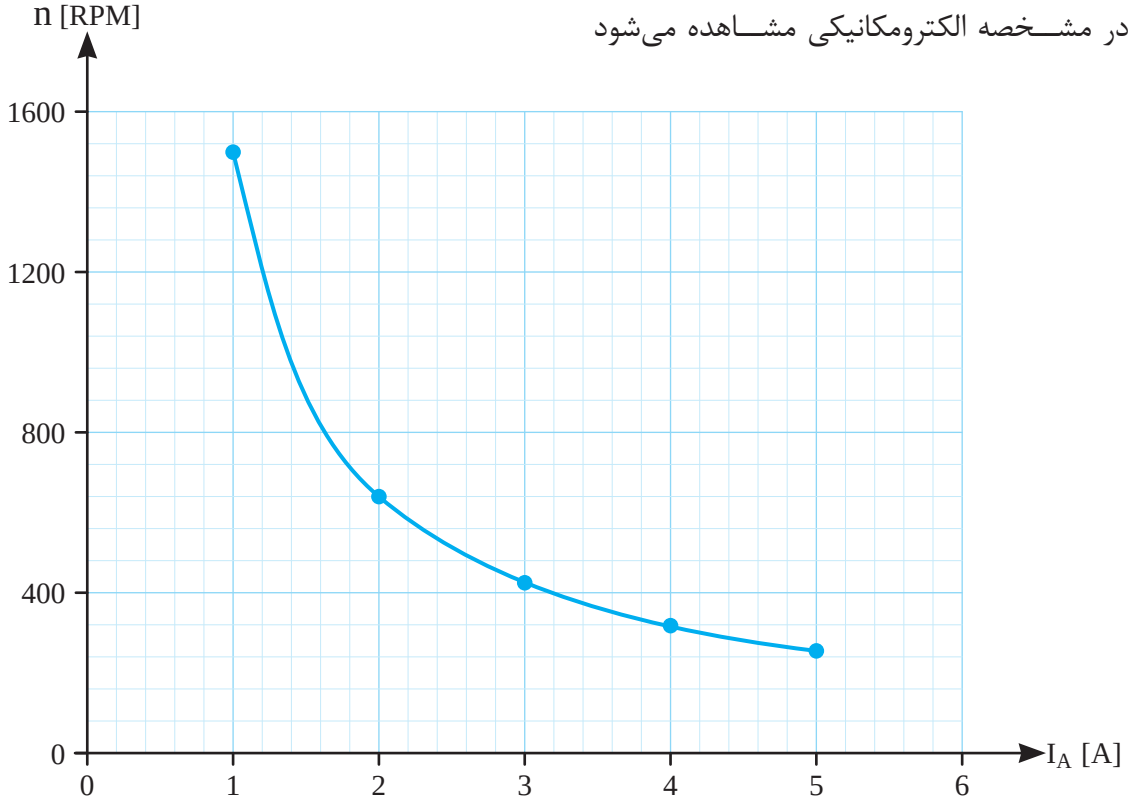
بـــرای انجام آزمایش بارداری پس از راه‌اندازی موتور ضمن ثابت نگه داشتن ولتاژ موتور V_T گشتاور بار را طی چند مرحله کاهش دهید و در هر مرحله ســـرعت رتور را توســـط دورسنج و جریان آرمیچر را توسط آمپرمتر و گشتاور بار را توسط گشتاورســـنج اندازه‌گیری و نتایج را در جدولی یادداشـــت کنید. این کار را تا جایی ادامه دهید که موتور بدون بار نشود.

جدول (۲ ـ ۴) نتایج آزمایش بارداری موتور تحریک سری ۲۲۰ V، ۱ kW، ۵ A را نشان می‌دهد.

V_T	۲۲۰V ثابت				
n [RPM]	۱۵۰۰	۶۴۰	۴۲۵	۳۱۸	۲۵۵
I_A [A]	۱	۲	۳	۴	۵
T_{load} [Nm]	۱/۳	۶	۱۳/۵	۲۴	۳۷/۵

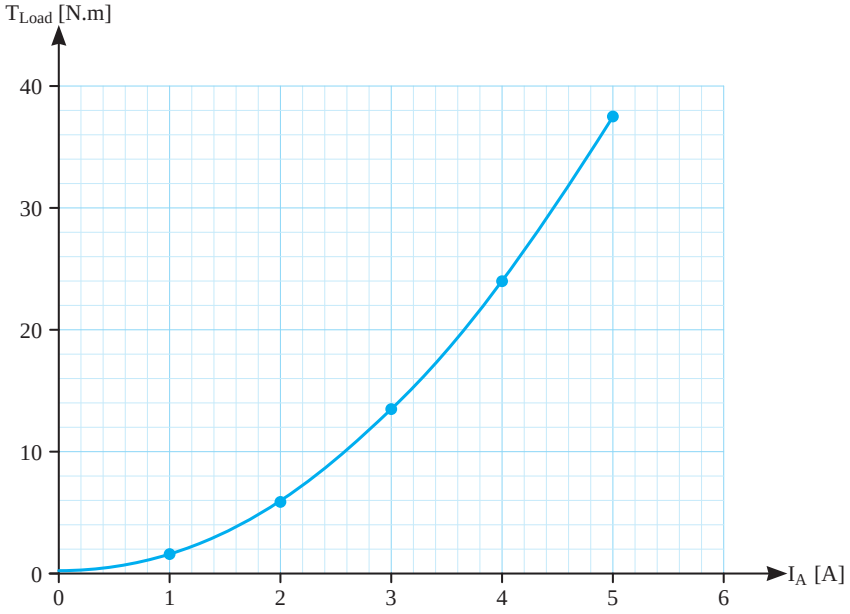
جدول ۲ ـ ۴ نتایج آزمایش بارداری موتور تحریک سری

نقاط نشان‌دهنده مقدار هر سرعت n به ازای جریان آرمیچـــر I_A معین جدول (۲ ـ ۴) در شـــکل (۲۹ ـ ۴) تحت عنوان مشـــخصه الکترومکانیکی نشان داده شده است. در مشـــخصه الکترومکانیکی مشـــاهده می‌شود در اثر افزایش گشـــتاور بار، موتور ســـری سرعت خود را به‌طور قابل ملاحظـــه‌ای کاهش می‌دهد ولی جریان آرمیچر افزایش قابل ملاحظه‌ای نداشته است.



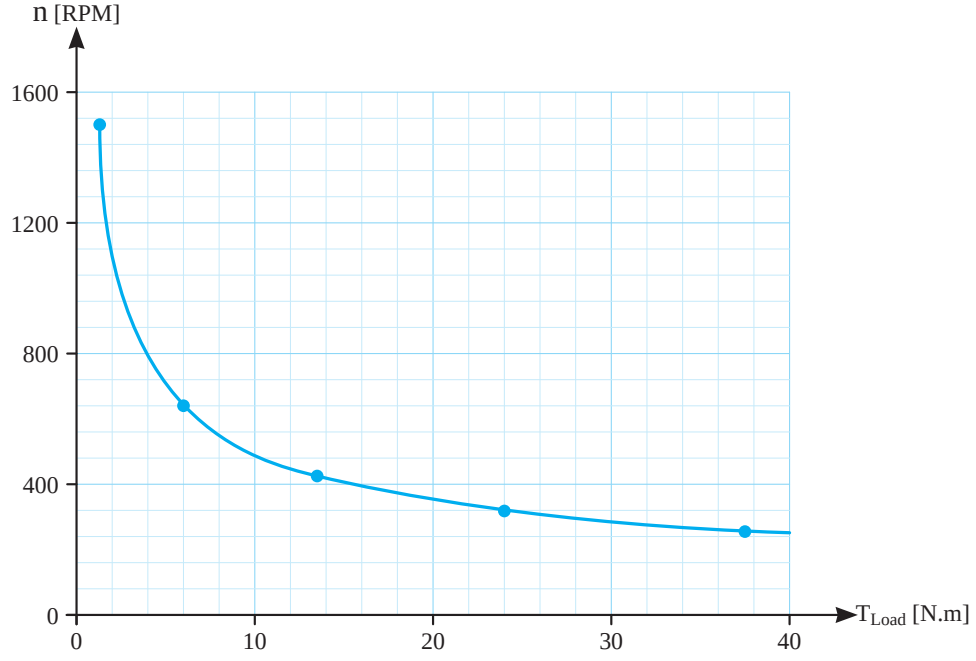
شکل ۲۹ ـ ۴ منحنی مشخصه الکترومکانیکی موتور سری

نقاط نشـــان‌دهنده مقدار هر گشتاور T_{load} به ازای جریـــان I_A معین جدول (۲ ـ ۴) در شـــکل (۳۰ ـ ۴) تحت عنوان مشخصه الکترومغناطیسی نشان داده شده است. در مشـــخصه الکترومغناطیسی مشاهده می‌شود به ازای افزایش گشـــتاور بـــار T_{load} جریان آرمیچر I_A افزایش قابل ملاحظه‌ای نداشته است.



شکل ۳۰ ـ ۴ منحنی مشخصه الکترومغناطیسی موتور سری

نقاط نشان‌دهندهٔ مقدار هر سرعت n به ازای گشتاور T_{load} معیـــن جـــدول (۱ ـ ۴) در شـــکل (۳۱ ـ ۴) تحت عنوان منحنی مشخصه گشتاور سرعت نشان داده شده است. در مشخصه گشتاور سرعت مشاهده می‌شود در اثر افزایش گشتاور بار T_{load} سرعت رتور به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده است.



شکل ۳۱ ـ ۴ منحنی مشخصه گشتاور ـ سرعت موتور تحریک سری

فعالیت ۲ ـ ۴ ـ با استفاده از برنامه صفحه گسترده *Excel* از برنامه‌هـــای مجموعه *Microsoft Office* منحنی مشـــخصه‌های مربوط به جدول (۲ ـ ۴) را رسم نمایید.

۴ ـ ۱۲ ـ ۴ ـ کاربرد

موتورهای ســـری دارای تغییرات ســـرعت زیادی از بی‌باری تا بار کامل می‌باشـــند و گشتاور راه‌اندازی آنها بسیار زیاد اســـت. این موتورها با افزایش گشتاور بار در محدوده بارنامی ســـرعت خود را کاهش داده و جریان خود را افزایش می‌دهند. موتورهای ســـری در جاهایی به‌کار گرفته می‌شوند که نیاز به گشتاور راه‌اندازی زیاد باشد و تغییرات سرعت مهم نباشد. یک نمونه از کاربرد موتور سری، راه‌انداز موتور خودروهای سواری است که بسیار بعید است جایگزینی داشته باشد.

پرسش ۶ ـ ۴

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ در موتـــور ســـری مدار ..... بـــا مدار آرمیچر ..... ارتباط می‌یابد.

۲ ـ به منظور جلوگیری از بـــروز پدیده فرار، موتور تحریک را ..... راه‌اندازی می‌کنند.

۳ ـ برای جلوگیری از بی‌بار شـــدن، موتور ســـری را به‌صورت ..... یا با ..... به بار متصل می‌کنند.

۴ ـ در موتور ســـری با افزایش گشـــتاور بار سرعت ..... و جریان آرمیچر ..... می‌یابد.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ در موتورهای سری مدار آرمیچر با مدار تحریک، سری می‌شود.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ رابطه $+V_T+(R_A+R_F)I_A-E_A=0$ در موتور تحریک سری صادق است.

صحیح ☐ غلط ☐

۳ ـ تلفات مســـی در موتور تحریک ســـری از رابطه $(R_A+R_F)I_A^2$ به‌دست می‌آید.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ علامت اختصاری ســـری را رسم کنید و اجزای آن را شرح دهید.

۲ ـ مدار الکتریکی معادل موتور سری را رسم کنید اجزای آن را شرح دهید.

۳ ـ قبل از راه‌اندازی موتور ســـری چه نکاتی را باید مورد توجه قرار داد؟

۴ ـ نحوه راه‌اندازی موتور سری را شرح دهید.

۵ ـ چـــرا موتورهـــای ســـری را زیر بـــار راه‌اندازی می‌کنند؟

۶ ـ آیا اتصال موتور سری توسط تسمه به بار صحیح است؟ چرا؟

۷ ـ نحوه انجام آزمایش بارداری موتور سری را شرح دهید.

۸ ـ از مقایســـه منحنی مشخصه‌های موتور سری با موتور تحریک شـــنت (یا مستقل) چه نتیجه‌ای به‌دست می‌آید؟

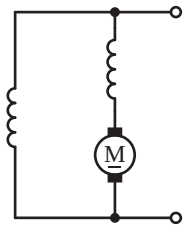
۹ ـ کاربرد موتور سری را بنویسید؟

۱۰ ـ ویژگی‌های موتور سری را بنویسید؟

۱۳ ـ ۴ ـ موتورهای جریان مستقیم با تحریک کمپوند

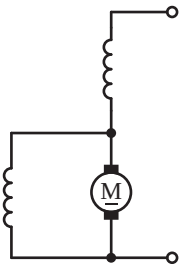
موتورهای جریان مستقیم با تحریک کمپوند را به اختصار «موتور کمپوند» گویند. در موتور کمپوند فوران قطب‌ها «ترکیبی[۱]» از فوران دو سیم‌پیچی تحریک موازی و سری است.

اگر سیم‌پیچی آرمیچر ابتدا با سیم‌پیچی تحریک سری و سپس با سیم‌پیچی تحریک موازی ارتباط پیدا کند، موتور را «کمپوند با شنت بلند» گویند. علامت اختصاری موتور کمپوند با شنت بلند در شکل (۳۲ ـ ۴) نشان داده شده است.



شکل ۳۲ ـ ۴ موتور کمپوند با شنت بلند

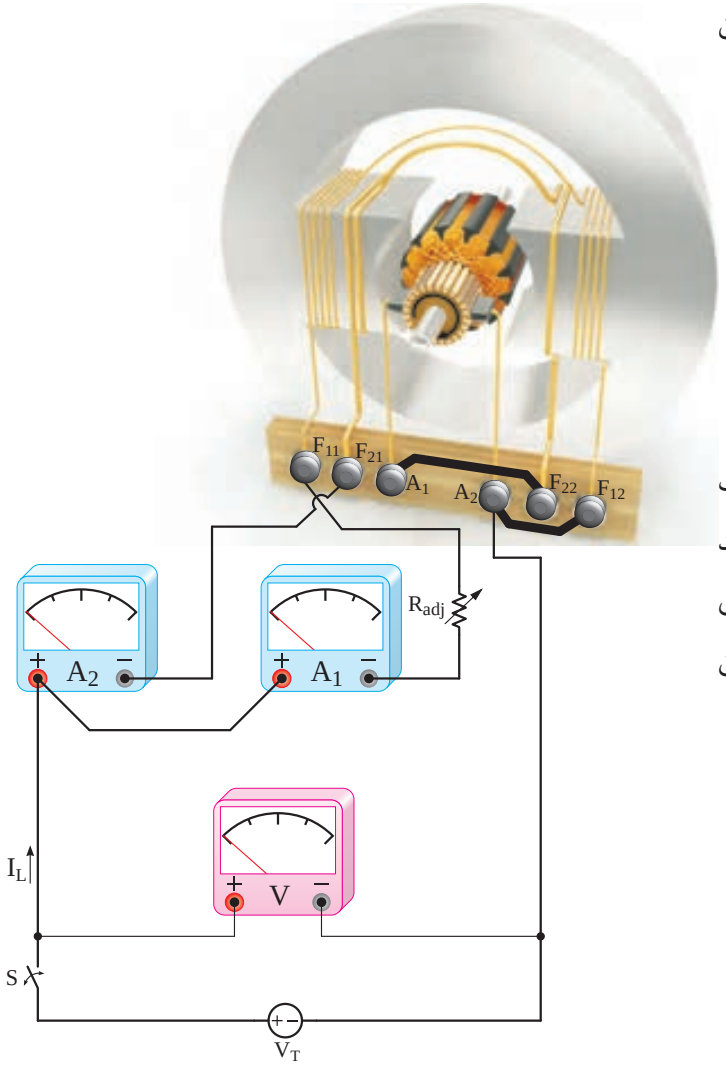
اگر سیم‌پیچی آرمیچر ابتدا با سیم‌پیچی تحریک موازی و سپس با سیم‌پیچی سری ارتباط پیدا کند موتور را «کمپوند با شنت کوتاه» گویند. علامت اختصاری موتور کمپوند با شنت کوتاه در شکل (۳۳ ـ ۴) نشان داده شده است.



شکل ۳۳ ـ ۴ موتور کمپوند با شنت کوتاه

در موتورهای کمپوند با شنت بلند یا کوتاه، سیم‌پیچی‌های تحریک موازی یا سری به گونه‌ای با سیم‌پیچی آرمیچر ارتباط داده می‌شوند تا فوران‌های آنها هم جهت شوند و «موتور کمپوند اضافی» باشد. درصورتی‌که فوران سیم‌پیچی تحریک موازی و سری هم‌جهت نباشد در این صورت موتور، «کمپوند نقصانی» خواهد شد.

طرح ساختمانی موتور کمپوند با شنت بلند در شکل (۳۴ ـ ۴) نشان داده شده است.

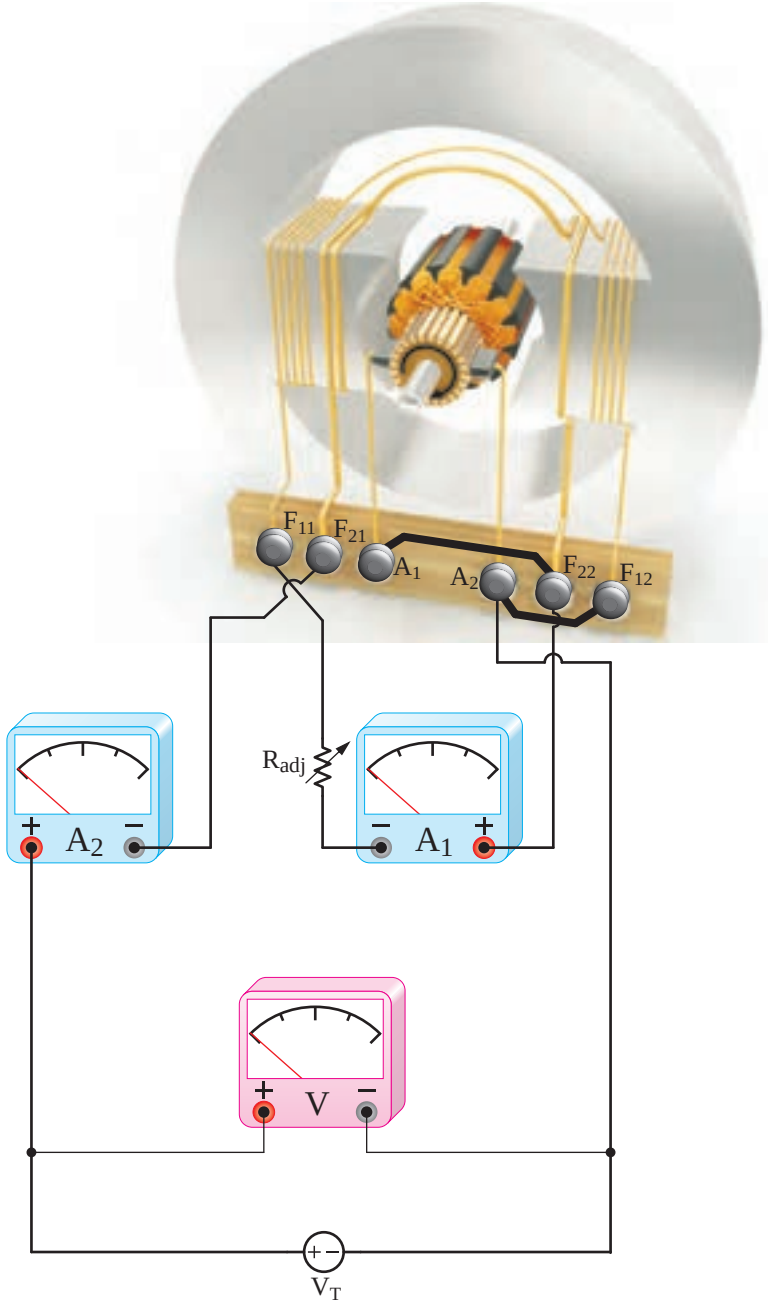


شکل ۳۴ ـ ۴ طرح ساختمانی موتور کمپوند با شنت بلند

۱. Compound

سیم‌پیچی تحریک سری با تعداد دورکم برای جریان زیاد و سیم‌پیچی تحریک موازی با تعداد دور زیاد برای جریان‌هـــای کم به دور قطب‌ها پیچیده شـــده اســـت. سروته سیم‌پیچی تحریک موازی با حروف F_{11} و F_{12} و ســـیم‌پیچی تحریک سری با حروف F_{21} و F_{22} مشخص شـــده اســـت. برای تغییر و تنظیم جریان ســـیم‌پیچی تحریک موازی از مقاومت تنظیم‌کننده جریان تحریک R_{adj} استفاده شده است و برای اندازه‌گیری جریان‌های تحریـــک موازی و آرمیچـــر از آمپرمترهای A_1 و A_2 و برای اندازه‌گیری ولتاژ V_T از ولت‌متر V اســـتفاده شده است.

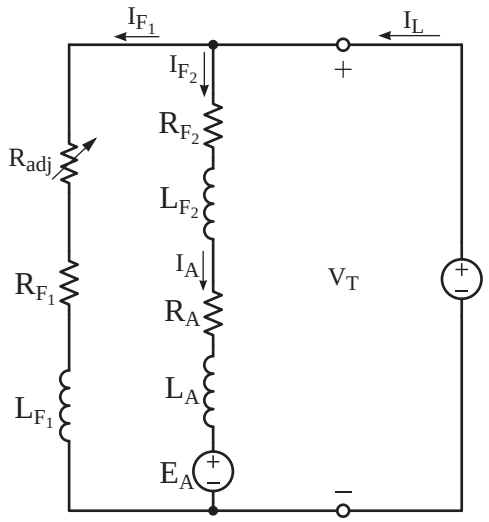
طرح ســـاختمانی موتور کمپوند با شـــنت کوتاه در شکل (۳۵ ـ ۴) نشان داده شده است.



شکل ۳۵ ـ ۴ طرح ساختمانی موتور کمپوند با شنت کوتاه

۱ ـ ۱۳ ـ ۴ ـ مـدار الکتریکی معادل موتور کمپوند با شنت بلند

مدار الکتریکی معادل موتور کمپوند باشـنت بلند با توجه به طرح سـاختمانی شکل (۳۴ ـ ۴) در شـکل (۳۶ ـ ۴) نشان داده شده است.



شکل ۳۶ ـ ۴ مدار الکتریکی معادل موتور کمپوند با شنت بلند

در این شکل:

R_{F_1} مقاومت اهمی مدار تحریک موازی

L_{F_1} ضریب خودالقایی سیم‌پیچ تحریک موازی

R_{F_2} مقاومت اهمی مدار تحریک سری

L_{F_2} ضریب خود القایی سیم‌پیچ تحریک سری

مدار الکتریکی معادل موتور کمپوند با شنت بلند را با روش پتانسیل گره یا روش‌های دیگر می‌توان تحلیل کرد. از آنجایی کـه در حالت پایدار جریان موتور DC اسـت و فرکانس ندارد لذا در نوشـتن معادلات جریان و ولتـاژ از اثرات خودالقایـی L_{F_1}،L_{F_2} و L_A صرف‌نظر خواهد شد.

با نوشـتن KCL برای گره مدار تحریک سـری و موازی با منبع ولتاژ، معادله (۲۴ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$\text{KCL)}\quad -I_L + I_{F_2} + I_{F_1} = 0 \qquad (۴\text{-}۲۴)$$

مدار تحریک سری با مدار آرمیچر، سری شده است. لذا:

$$I_A = I_{F_2} \qquad (۴\text{-}۲۵)$$

بـا به‌کار بردن قانون اهم مقادیر جریان‌ها به‌دسـت خواهد آمد.

$$I_{F_1} = \frac{V_T}{R_{F_1} + R_{adj}} \qquad (۴\text{-}۲۶)$$

$$I_A = I_{F_2} = \frac{V_T - E_A}{R_A + R_{F_2}} \qquad (۴\text{-}۲۷)$$

از رابطه $P_{in} = V_T \cdot I_L$ جریان I_L به‌دست می‌آید.

$$I_L = \frac{P_{in}}{V_T} \qquad (۴\text{-}۲۸)$$

تلفـات تحریک موازی از رابطـه (۲۹ ـ ۴) و تلفات تحریک سـری از رابطـه (۳۰ ـ ۴) و تلفات آرمیچر از رابطه (۳۱ ـ ۴) به‌دست می‌آیند.

$$P_{F_1} = (R_{F_1} + R_{adj})I_{F_1}^2 \qquad (۴\text{-}۲۹)$$

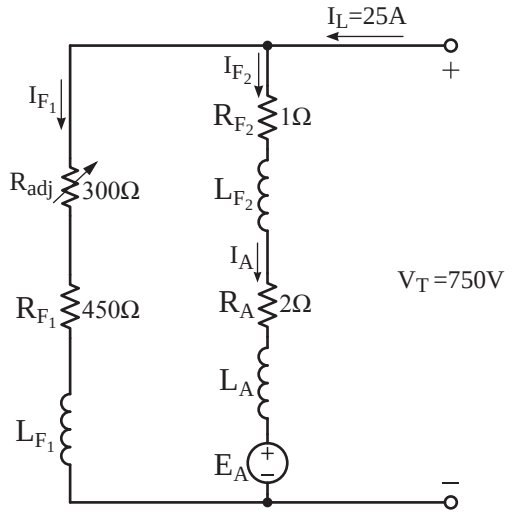
$$P_{F_2} = R_{F_2} I_{F_2}^2 \qquad (۴\text{-}۳۰)$$

$$P_A = R_A I_A^2 \qquad (۴\text{-}۳۱)$$

مثال ۹ ـ ۴ ـ موتور کمپوند با شنت بلند ۷۵۰ V، ۲۵ A با مدار الکتریکی معادل مطابق شکل (۳۷ ـ ۴) در نظر است. مطلوب است:

الف) نیروی محرکه القایی آرمیچر

ب) بازده در صورتی‌که تلفات ثابت ۱۵۲۲ W باشد.



شکل ۳۷ ـ ۴

حل:

ـ برای محاسبه نیروی محرکه الکتریکی ابتدا جریان مدار تحریک موازی و سپس جریان مدار تحریک سری و آرمیچر به‌دست می‌آید.

$$I_{F_1} = \frac{V_T}{R_{F_1} + R_{adj}} = \frac{۷۵۰}{۴۵۰ + ۳۰۰} = ۱[A]$$

$$KCL) \quad -I_L + I_{F_2} + I_{F_1} = ۰$$

$$-۲۵ + I_{F_2} + ۱ = ۰$$

$$I_{F_2} = ۲۴\ [A]$$

$$I_{F_2} = I_A = ۲۴\ [A]$$

$$I_A = I_{F_2} = \frac{V_T - E_A}{R_A + R_{F_2}}$$

$$۲۴ = \frac{۷۵۰ - E_A}{۱ + ۲}$$

$$۲۴ \times ۳ = ۷۵۰ - E_A$$

$$E_A = ۷۵۰ - ۷۲ = ۶۷۸\ [V]$$

ـ برای محاسبه بازده، تلفات مسی نیاز می‌باشد. لذا تلفات تحریک‌ها و آرمیچر را از روابط (۲۹ ـ ۴)، (۳۰ ـ ۴) و (۳۱ ـ ۴) به‌دست می‌آوریم.

$$P_{F_1} = (R_{F_1} + R_{adj}) I_{F_1}^۲$$

$$P_{F_1} = (۴۵۰ + ۳۰۰) \times ۱^۲ = ۷۵۰\ [W]$$

$$P_{F_2} = R_{F_2} I_{F_2}^۲$$

$$P_{F_2} = ۱ \times ۲۴^۲ = ۵۷۶\ [W]$$

$$P_A = R_A I_A^۲$$

$$P_A = ۲ \times ۲۴^۲ = ۱۱۵۲\ [W]$$

ـ تلفات کل از رابطه (۳ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$\Delta P = P_{core} + P_{F_1} + P_{F_2} + P_A$$

$$\Delta P = ۱۵۲۲ + ۷۵۰ + ۵۷۶ + ۱۱۵۲ = ۴۰۰۰\ [W]$$

ـ توان ورودی از رابطه (۱ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$P_{in} = V_T \cdot I_L$$

$$P_{in} = ۷۵۰ \times ۲۵ = ۱۸۷۵۰\ [W]$$

ـ توان خروجی از رابطه (۴ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

$$\Delta P = P_{in} - P_{out}$$

$$P_{out} = P_{in} - \Delta P$$

$$P_{out} = ۱۸۷۵۰ - ۴۰۰۰ = ۱۴۷۵۰\ [W]$$

ـ بازده از رابطه (۶ ـ ۳) به‌دست می‌آید.

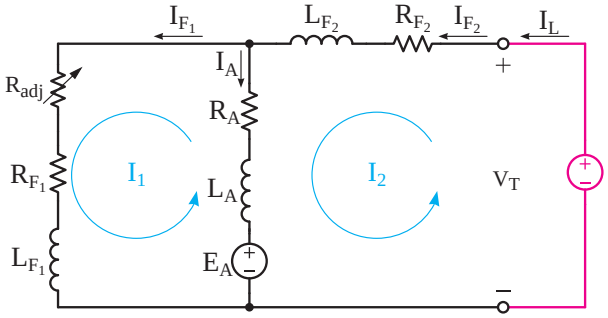
$$\%\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times ۱۰۰$$

$$\%\eta = \frac{۱۴۷۵۰}{۱۸۷۵۰} \times ۱۰۰ = \%۷۸$$

۲ ـ ۱۳ ـ ۴ ـ مـدار الکتریکی معادل موتور کمپوند با شنت کوتاه

مدار الکتریکی معادل موتور کمپوند با شـنت کوتاه بـا توجه به طرح ساختمانی شکل (۳۵ ـ ۴) در شـکل (۳۸ ـ ۴) نشان داده شده است.

مدار الکتریکی معادل موتور کمپوند با شـنت کوتاه را با روش حلقه یا روش‌های دیگر می‌توان تحلیل کرد. برای شکل (۳۸ ـ ۴) حلقه‌های $I_۱$ و $I_۲$ در جهت حرکت عقربه‌های ساعت انتخاب شده است.



شکل ۳۸ ـ ۴ مدار الکتریکی معادل موتور کمپوند با شنت کوتاه

جریان موتور DC اسـت و فرکانس نـدارد. لذا در حالت پایدار برای نوشـتن معـادلات KVL از اثرات خودالقایی $L_{F_۱}$،$L_{F_۲}$ و L_A صرف‌نظر خواهد شد.

با نوشـتن KVL برای حلقه‌های $I_۱$ و $I_۲$ معادلات (۳۲ ـ ۴) و (۳۳ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$KVL۱) \quad R_{F_۱} I_۱ - E_A + R_A (I_۱ - I_۲) = ۰ \qquad (۴\text{-}۳۲)$$

$$KVL۲) \quad -V_T + R_{F_۲} I_۲ + R_A (I_۲ - I_۱) + E_A = ۰ \qquad (۴\text{-}۳۳)$$

پس از حل معـادلات (۳۲ ـ ۴) و (۳۳ ـ ۴) جریان حلقه‌های $I_۱$ و $I_۲$ به‌دست می‌آید و خواهیم داشت:

$$I_{F_۲} = I_L = I_۲ \qquad (۴\text{-}۳۴)$$

$$I_{F_۱} = I_۱ \qquad (۴\text{-}۳۵)$$

$$I_A = -I_۱ + I_۲ \qquad (۴\text{-}۳۶)$$

تلفـات تحریک سـری از (۳۷ ـ ۴)، تلفات تحریک شـنت از (۳۸ ـ ۴) و تلفات آرمیچر از رابطه (۳۹ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$P_{F_۲} = R_{F_۲} I_{F_۲}^۲ \qquad (۴\text{-}۳۷)$$

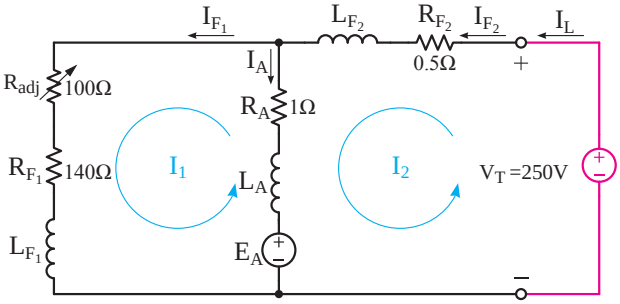
$$P_{F_۱} = R_{F_۱} I_{F_۱}^۲ \qquad (۴\text{-}۳۸)$$

$$P_A = R_A I_A^۲ \qquad (۴\text{-}۳۹)$$

مثال ۱۰ ـ ۴ ـ موتـور کـمپوند با شنت کـوتاه ۴ KW، ۲۵۰ V با بازده ۸۰ ٪ و مدار الکتریکی معادل مطابق شکل (۳۹ ـ ۴) در نظر است. مطلوب است:

الف ـ نیروی محرکه القایی آرمیچر E_A

ب ـ تلفات ثابت $P_{mis}+P_{core}$



شکل ۳۹ ـ ۴

حل:

ـ از رابطـــه بازده، توان ورودی به‌دســـت می‌آید و از رابطه توان، جریان I_L محاسبه می‌شود. سپس با تشکیل معادلاتِ KVL ، جریان‌ها و E_A به‌دست می‌آیند.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{۴kw}{۰/۸} = ۵\,[kw] = ۵۰۰۰[w]$$

$$P_{in} = V_T \cdot I_L$$

$$I_L = \frac{P_{in}}{V_T} = \frac{۵۰۰۰}{۲۵۰} = ۲۰\,[A]$$

$$KVL۱)\quad (R_{adj} + R_{F_۱})I_۱ - E_A + R_A(I_۱ - I_۲) = ۰$$

$$KVL۲)\quad -V_T + R_{F_۲}I_۲ + R_A(I_۲ - I_۱) + E_A = ۰$$

ـ بـــا جایگزیـــن کـــردن مقادیـــر معلـــوم و $I_L = I_۲ = ۲۰[A]$ در معادلات KVL۱ و KVL۲ خواهیم داشت:

$$KVL۱)\quad (۱۰۰+۱۴۰)I_۱ - E_A + ۱(I_۱ - ۲۰) = ۰$$

$$KVL۲)\quad -۲۵۰ + ۰/۵(۲۰) + ۱(۲۰ - I_۱) + E_A = ۰$$

ـ پس از ساده‌سازی معادلات KVL۱ و KVL۲ را در یک دستگاه قرار می‌دهیم.

$$KVL۱)\quad ۲۴۱I_۱ - E_A = ۲۰$$

$$KVL۲)\quad -I_۱ + E_A = ۲۲۰$$

$$۲۴۰I_۱ + ۰ = ۲۴۰$$

$$I_۱ = \frac{۲۴۰}{۲۴۰} = ۱[A]$$

ـ بـــا قرار دادن $I_۱$ در یکی از معادلات KVL مقدار E_A به‌دست می‌آید.

$$KVL۲)\quad -I_۱ + E_A = ۲۲۰$$

$$-۱ + E_A = ۲۲۰$$

$$E_A = ۲۲۱[V]$$

ـ با محاسبه تلفات مسی و کل تلفات می‌توان تلفات ثابت را به‌دست آورد.

$$I_{F_۱} = I_۱ = ۱[A]$$

$$I_A = -I_۱ + I_۲ = -۱ + ۲۰ = ۱۹[A]$$

$$I_{F_۲} = I_۲ = ۲۰[A]$$

$$P_{F_۱} = (R_{F_۱} + R_{adj})I_{F_۱}$$

$$P_{F_۱} = (۱۴۰+۱۰۰)\times ۱^۲ = ۲۴۰[w]$$

$$P_{F_۲} = R_{F_۲}I_{F_۲}^۲$$

$$P_{F_۲} = ۰/۵ \times ۲۰^۲ = ۲۰۰[w]$$

$$P_A = R_A I_A^۲ = ۱ \times ۱۹^۲ = ۳۶۱[w]$$

$$\Delta P = P_{in} - P_{out}$$

$$\Delta P = ۵۰۰۰ - ۴۰۰۰ = ۱۰۰۰[w]$$

$$\Delta P = P_{F_۱} + P_{F_۲} + P_A + P_{core} + P_{mis}$$

$$۱۰۰۰ = ۲۴۰ + ۲۰۰ + ۳۶۱ + P_{core} + P_{mis}$$

$$P_{core} + P_{mis} = ۱۹۹[w]$$

تمرین ۶ ـ ۴

۱ ـ یک موتور کمپوند با شنت بلند ۴۰ KW، ۵۰۰ V با بازده ۸۰ ٪ و $R_A = ۰/۴\Omega$، $R_{F_۲} = ۰/۱\Omega$، $R_{F_۱} = ۲۵۰\Omega$ مفروض است.

مطلوب است:

الف ـ نیروی محرکه القایی آرمیچر

ب ـ تلفات ثابت

۲ ـ یک موتور کمپوند با شنت کوتاه در اتصال به شبکه ۲۰۰ V جریان ۱۰ A دریافت می‌کند و با سرعت ۱۲۰۰ RPM می‌گردد. اگر $R_{F_۲} = ۰/۲\Omega$، $R_{F_۱} = ۱۹۸\Omega$، $R_A = ۰/۵\Omega$ باشد مطلوب است:

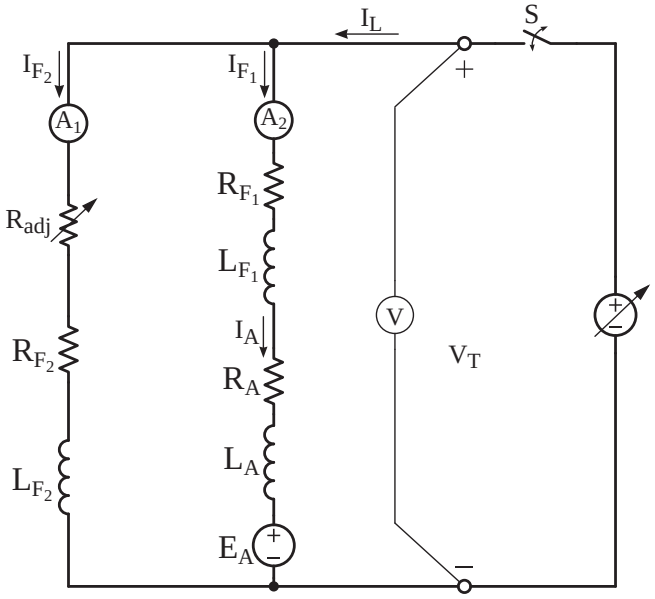
الف ـ نیروی محرکه القایی آرمیچر

ب ـ بازده در صورتی‌که تلفات ثابت ۵۰ W باشد.

۳ ـ ۱۳ ـ ۴ ـ راه‌اندازی

راه‌اندازی و رفتار موتورهای کمپوند با شنت بلند و کوتاه مشابه یکدیگر است. لذا به منظور تشریح راه‌اندازی، موتور کمپوند با شنت بلند انتخاب شده است.

برای راه‌اندازی موتور کمپوند پس از یادداشت مقادیر نامی ولتاژ، جریان و سرعت از پلاک مشخصات موتور، مدار الکتریکی آرمیچر و تحریک‌های سری و موازی را مطابق شکل(۴۰ ـ ۴) ببندید.



شکل۴۰ ـ ۴ مدار الکتریکی راه‌اندازی موتور کمپوند باشنت

مقاومت متغیر R_{adj} را در حداقل خود قرار دهید و پس از بستن کلید S ولتاژ منبع متغیر را به تدریج زیاد نمایید تا ولت‌متر V ولتاژ نامی موتور را نشان دهد. در صورتی‌که سرعت موتور به سرعت بی‌باری n_o نرسیده بود با افزایش مقاومت متغیر R_{adj}، جریان تحریک موازی را کاهش دهید تا سرعت افزایش یابد و به سرعت مورد نظر برسد.

بدیهی است با افزایش بیش از حد مقاومت یا قطع مدار تحریک موازی، موتور کمپوند رفتاری شبیه موتور سری از خود بروز می‌دهد.

۴ ـ ۱۳ ـ ۴ ـ آزمایش بارداری

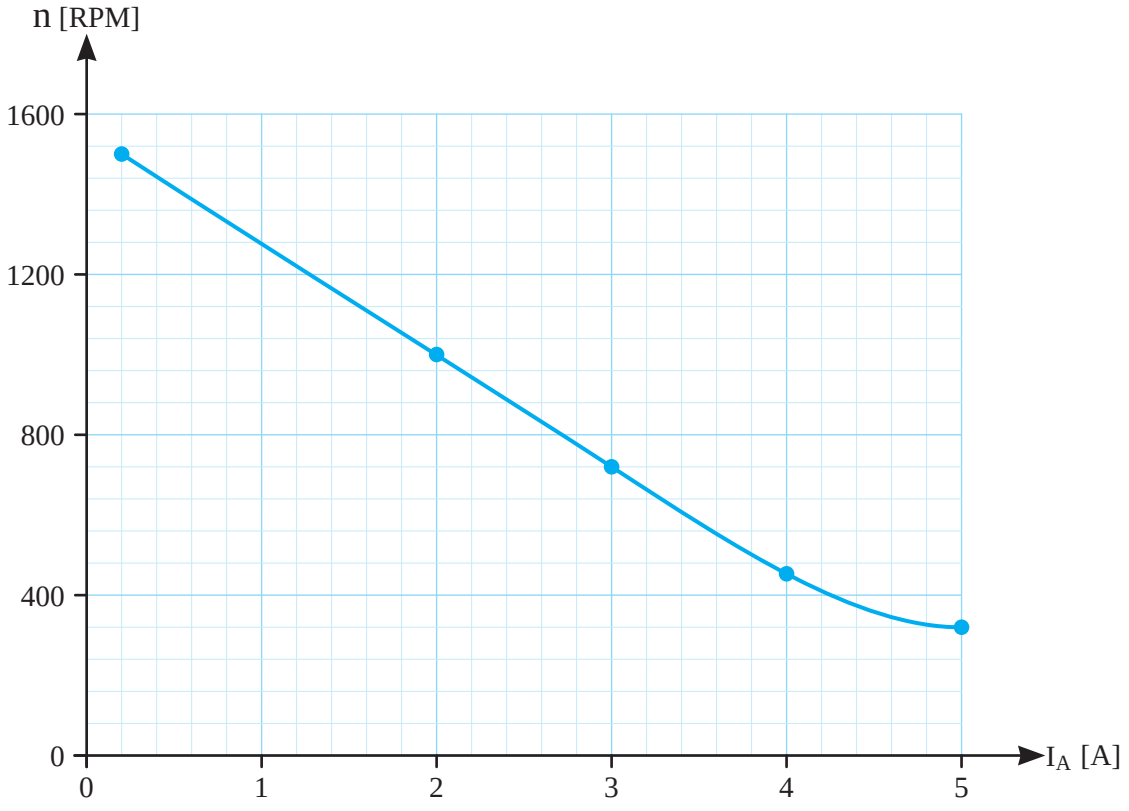
نحوه انجام آزمایش بـــارداری موتور کمپوند مطابق توضیحات بخش ۳ ـ ۱۰ ـ ۴ می‌باشد.

جدول (۴ ـ ۴) نتایج آزمایش بارداری موتور کمپوند اضافی ۲۲۰ V، ۱ kW، ۵ A را نشان می‌دهد.

V_T	۲۲۰V				
n [RPM]	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۷۲۰	۴۵۰	۳۲۰
I_A [A]	۰/۲	۲	۳	۴	۵
T_{load} [Nm]	۰	۴	۸	۱۷	۳۰

جدول ۴ ـ ۴ نتایج آزمایش بارداری موتور کمپوند اضافی

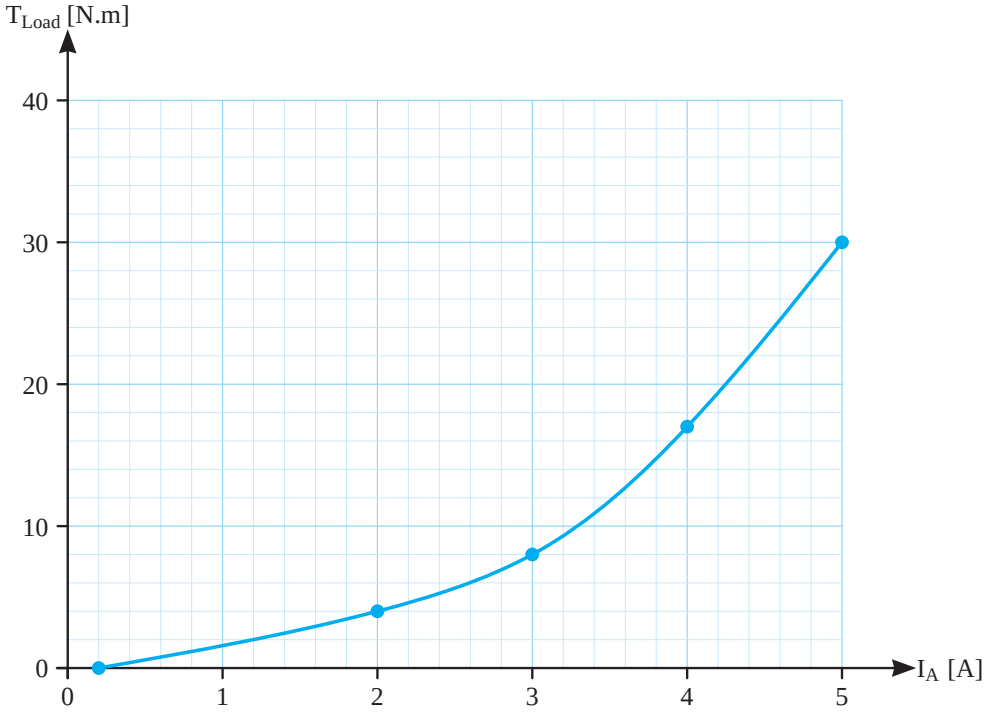
نقاط نشـــان‌دهنده مقـــدار هر ســـرعت n به ازای جریان I_A معین جدول (۴ ـ ۴) تحت عنوان مشـــخصه الکترومکانیکی موتور کمپوند اضافی در شکل (۴۱ ـ ۴) نشان داده شده است.



شکل ۴۱ ـ ۴ منحنی مشخصه الکترومکانیکی موتور کمپوند اضافی

در این شکل مشاهده می‌شود در اثر افزایش گشتاور بار که منجر به کاهش ســـرعت شده است موتور جریان I_A را افزایش می‌دهد.

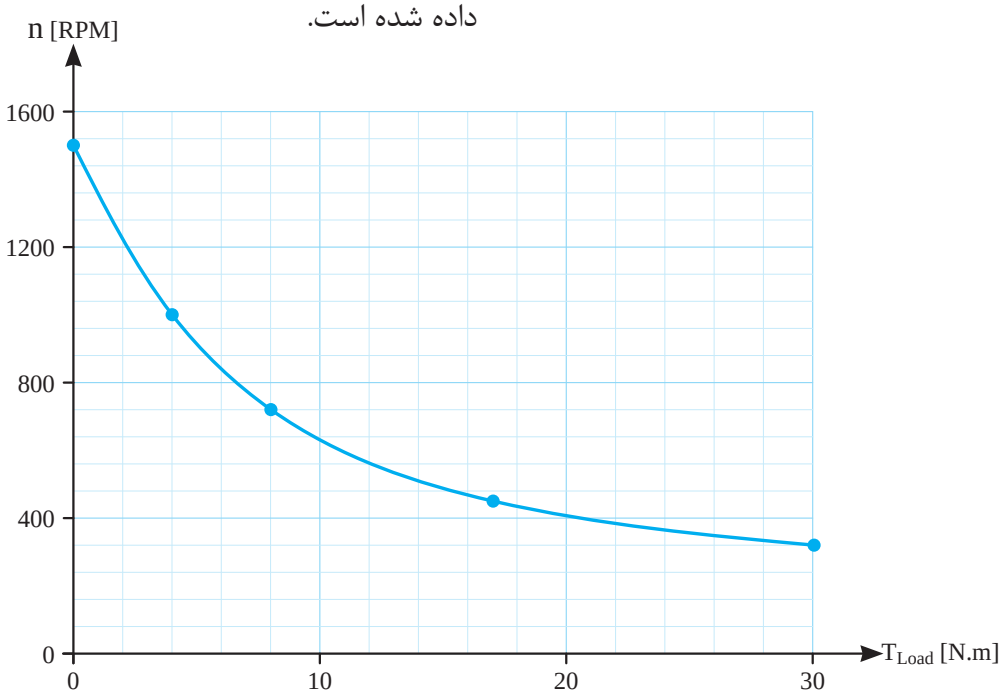
نقاط نشـــان‌دهنده مقدار هر گشتاور T_{load} به ازای جریـــان I_A معین جدول (۴ ـ ۴) در شـــکل (۴۲ ـ ۴) تحت عنوان منحنی مشـــخصه الکترومغناطیسی نشان داده شده است.



شکل ۴۲ ـ ۴ منحنی مشخصه الکترومغناطیسی موتور کمپوند اضافی

در این شکل مشاهده می‌شود که افزایش جریان I_A باعث افزایش گشتاور موتور شده است تا به گشتاور بار غلبه نماید.

نقاط نشان‌دهنده‌ی مقدار هر سرعت n به ازای گشتاور T_{load} معین جدول (۴ ـ ۴) در شکل (۴۳ ـ ۴) تحت عنوان منحنی مشخصه گشتاور ـ سرعت نشان داده شده است.



شکل ۴۳ ـ ۴ منحنی مشخصه گشتاور ـ سرعت موتور کمپوند اضافی

در این شکل مشاهده می‌شـــود افزایش گشتاور بار منجر به کاهش سرعت می‌شود.

فعالیت ۳ ــ ۴ ــ با استفاده از برنامه صفحه گسترده *Excel* از برنامه‌های مجموعـــه *Microsof Office* منحنی مشـــخصه‌های مربوط به جدول ۴ ـ ۴ را رســـم نمایید.

۵ ـ ۱۳ ـ ۴ ـ کاربرد

موتورهای کمپوند اضافی دارای تغییرات ســـرعتی کمتر از موتور ســـری و بیشتر از موتور شنت از بی‌باری تا بار کامل می‌باشند.

گشتاور موتور کمپوند اضافی از موتور سری کمتر و از موتور شنت بیشتر است. موتورهای کمپوند در جایی به‌کار گرفته می‌شـــوند که به گشـــتاور راه‌اندازی زیاد و سرعت تقریباً ثابت نیاز داشته باشند.

موتورهای کمپوند نقصانی موارد اســـتفاده چندانی ندارند. این موتورهـــا را می‌توان طوری طراحی کرد که بتوانند در حالت بارداری ســـرعت تقریباً ثابتی داشـــته باشـــند. از موتـــور کمپونـــد نقصانی در ماشـــین برش کارخانجات لوله‌سازی استفاده می‌شود.

پرسش ۷ ــ ۴

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ در موتورهای کمپوند فوران قطب‌ها ..... از فوران سیم‌پیچی تحریک ..... و ..... است.

۲ ـ اگر سیم‌پیچی آرمیچر ابتدا با سیم‌پیچی تحریک موازی و سپس با سیم‌پیچی تحریک سری ارتباط پیدا کند موتور ..... است.

۳ ـ اگر سیم‌پیچی آرمیچر ابتدا با سیم‌پیچی تحریک ..... و ســـپس با ســـیم‌پیچی تحریک ..... ارتباط پیدا کند موتور کمپوند با شنت بلند است.

۴ ـ راه‌اندازی و رفتار موتور کمپوند با شـــنت بلند و کوتاه ..... است.

۵ ـ منحنـــی مشـــخصه الکترومغناطیســـی تأثیـــر ..... بـــر ..... را در ولتـــاژ ثابت نشـــان می‌دهد.

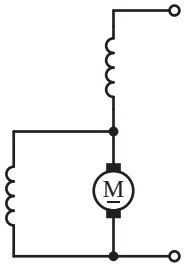
۶ ـ منحنی مشخصه ..... تأثیر گشتاور بار بر سرعت را در ولتاژ ثابت نشان می‌دهد.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ اگر سیم‌پیچی آرمیچر ابتدا با سیم‌پیچی تحریک سری و سپس با سیم‌پیچی تحریک موازی ارتباط پیدا کند موتور کمپوند با شنت کوتاه است.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ علامت اختصاری موتور کمپوند با شنت کوتاه به صورت زیر است.



صحیح ☐ غلط ☐

۳ ـ در نوشـــتن معادلات ولتـــاژ و جریان در حالت پایـــدار موتورهای DC از اثـــرات خودالقایی صرف‌نظر نمی‌شود.

صحیح ☐ غلط ☐

۴ ـ در لحظه راه‌اندازی موتور کمپوند مقاومت R_{adj}

را در حداقل قرار می‌دهند.

صحیح ☐ غلط ☐

۵ ـ پس از راه‌اندازی موتور کمپوند به منظور تنظیم سرعت مقاومت R_{adj} را تغییر می‌دهند.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ علامت اختصاری موتور کمپوند با شنت بلند را رسم کنید.

۲ ـ چرا موتور کمپوند نقصانی کاربرد ندارد؟

۳ ـ با توجه به شکل (۳۶ ـ ۴) طرح ساختمانی موتور کمپوند را شرح دهید.

۴ ـ چرا در تحلیل موتورهای DC از اثرات خودالقایی صرف‌نظر می‌شود؟

۵ ـ نحوه راه‌اندازی موتور کمپوند را شرح دهید.

۶ ـ آیا در موتورهای کمپوند پدیده فرار روی می‌دهد؟ چرا؟

۷ ـ نحوه تنظیم سرعت پس از راه‌اندازی موتور کمپوند را شرح دهید.

۸ ـ نحوه انجام آزمایش بارداری موتور کمپوند را شرح دهید.

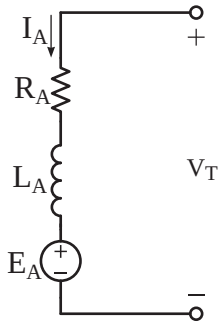
۱۴ ـ ۴ ـ راه‌اندازی موتورهای جریان مستقیم

موتورهای جریان مستقیم در لحظه راه‌اندازی چندین برابر جریان نامی از منبع تغذیه دریافت می‌کنند.

جریان راه‌اندازی زیاد مشکلات جدی را ایجاد می‌کند از جمله:

- آسیب رسیدن به سیم‌پیچی آرمیچر، کموتاتور و جاروبک‌ها
- ایجاد افت ولتاژ بسیار شدید در منبع تغذیه
- آسیب رسیدن به کابل‌های اتصال موتور به منبع تغذیه
- قطع فیوزهای موتور
- ایجاد ضربات شدید مکانیکی به رتور و آسیب رسیدن به محور و یاتاقان

علت جریان راه‌اندازی زیاد با توجه به مدار الکتریکی معادل سیم‌پیچی آرمیچر شکل (۴۴ ـ ۴) قابل توجیه است.



شکل ۴۴ ـ ۴

با توجه به شکل (۴۴ ـ ۴) جریان آرمیچر از رابطه (۴۰ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$I_A = \frac{V_T - E_A}{R_A} \qquad (۴-۴۰)$$

نیروی محرکه القایی با رابطه $E_A = K \cdot \varphi \cdot \omega$ تعیین می‌شود. در لحظه راه‌اندازی رتور در حال سکون است و سرعت $\omega = ۰$ است و نیروی محرکه القایی $E_A = ۰$ می‌شود. بنابراین رابطه جریان آرمیچر در لحظه راه‌اندازی به صورت رابطه (۴۱ ـ ۴) در می‌آید.[۱]

$$I_{A_{st}} = \frac{V_T - ۰}{R_A} \qquad (۴-۴۱)$$

۱. ضریب خودالقایی L_A در محاسبه جریان راه‌اندازی دخالت دارد و باعث کاهش آن می‌شود. به دلیل پیچیدگی محاسبات از اثر L_A در جریان راه‌اندازی صرف‌نظر شده است.

دلیل بزرگ شدن جریان آرمیچر در لحظه راه‌اندازی کوچک بودن مقاومت آرمیچر R_A در مقابل ولتاژ منبع تغذیه V_T است.

برای مثال موتور ۲۲۰ V، ۱ KW، ۵ A با مقاومت آرمیچر ۰/۲Ω را در نظر بگیریـــد. جریان آرمیچر این موتور در لحظه راه‌اندازی برابر است با:

$$I_{A_{st}} = \frac{V_T - ۰}{R_A}$$

$$I_{A_{st}} = \frac{۲۲۰ - ۰}{۰/۲} = ۱۱۰۰[A]$$

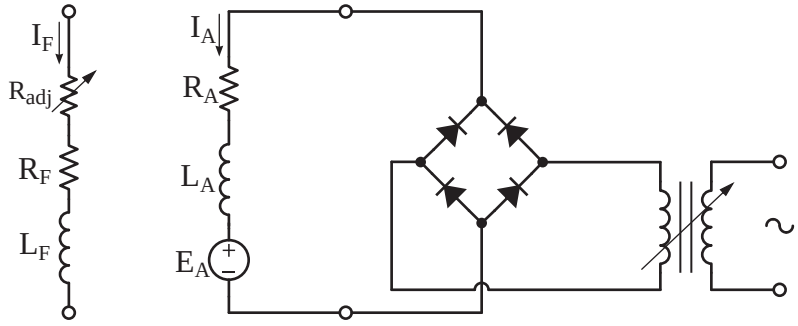
مشاهده می‌شود جریان آرمیچر در لحظه راه‌اندازی ۲۲۰ برابر جریان نامی موتور است. البته پس از راه‌اندازی موتور و ســـرعت گرفتن رتور نیروی محرکه القایی E_A افزایش می‌یابد و باعث کاهش جریان آرمیچر می‌شود.

برای کاهش جریان آرمیچر در لحظه راه‌اندازی طبق رابطه (۴۱ ـ ۴) باید ولتاژ V_T را کاهش یا مقاومت مدار آرمیچر R_A را افزایش داد. بدین منظور روش‌هایی ابداع شده است که به آنها پرداخته می‌شود.

۱ ـ ۱۴ ـ ۴ ـ راه‌اندازی با منبع ولتاژ متغیر

در این روش با استفاده از منبع ولتاژ DC متغیر در لحظه راه‌اندازی ولتاژ موتور را کاهش می‌دهند و پس از راه‌انـــداری ولتاژ را به تدریج افزایش می‌دهند تا به ولتاژ نامی برسد.

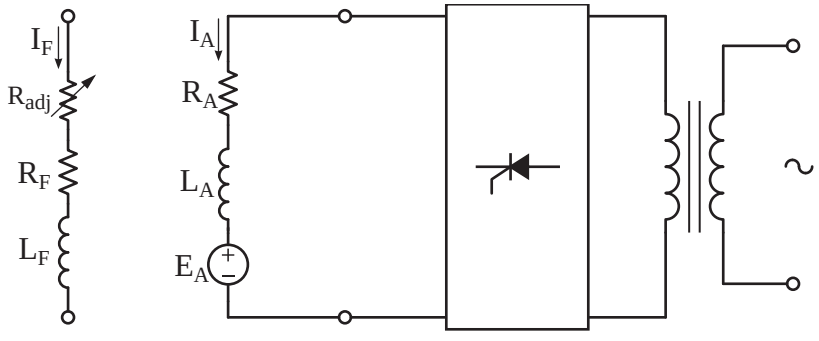
یـــــک نمـــونـــه از منبـع ولتاژ DC متغیر در شکل (۴۵ ـ ۴) نشان داده شده است.



شکل ۴۵ ـ ۴

در شـــکل (۴۵ ـ ۴) از یک ترانس متغیر برای تغییر ولتاژ و یک مدار الکترونیکی یکســـو کننده دیودی برای تبدیل ولتاژ AC به DC استفاده شده است.

نمـــونـــه دیگری از منبع ولتاژ DC متغیر در شکل (۴۶ ـ ۴) نشان داده شده است.



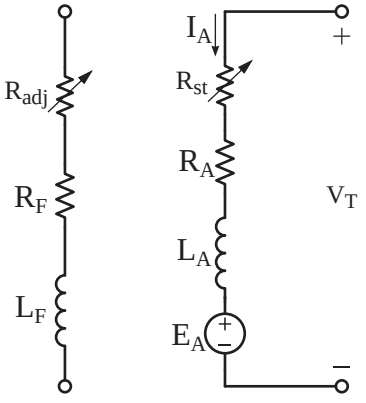
شکل ۴۶ ـ ۴

در این شـــکل از یک ترانس برای تبدیل ولتاژ و یک مدار الکترونیکی یکســـوکننده تریســـتوری تمام موج کنترل شـــده برای تغییر ولتـــاژ و تبدیل AC به DC استفاده شده است.

اســـتفاده از منبـــع ولتاژ DC متغیـــر در راه‌اندازی موتورهای DC به دلیل بازده زیاد بسیار مناسب است.

۴ ـ ۱۴ ـ ۴ ـ راه‌اندازی با مقاومت راه‌انداز

در ایـــن روش با اســـتفاده از مقاومـــت متغیر به نام «مقاومت راه‌انداز[۱]» که با مدار آرمیچر ســـری می‌شـــود مقاومـــت مدار آرمیچـــر را افزایـــش می‌دهند و پس از راه‌اندازی، مقاومـــت راه‌انداز را به تدریج کم می‌کنند تا به صفر برسد. نحوه قرار گرفتن مقاومت راه‌انداز در مدار آرمیچر در شکل (۴۷ ـ ۴) نشان داده شده است.



شکل ۴۷ ـ ۴

استفاده از مقاومت راه‌انداز با توجه به تلفات حرارتی بسیار زیاد آن توصیه نشده است.

پرسش ۸ ـ ۴

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ جریـــان راه‌اندازی زیاد باعث ایجـــاد ..... بسیار شدید در منبع تغذیه می‌شود.

۲ ـ در لحظه راه‌اندازی ســـرعت ..... اســـت و نیروی محرکه القایی ..... می‌شود.

۳ ـ پس از راه‌اندازی و ســـرعت گرفتن رتور نیروی محرکه القایی ..... و جریان آرمیچر ..... می‌یابد.

۴ ـ در منبع تغذیه ولتاژ متغیر وظیفه ترانســـفورمر ..... و وظیفه پل دیودی ..... است.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ یکی از مشـــکلات جریان راه‌انـــدازی زیاد قطع فیوزهای مدار است.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ در لحظه راه‌اندازی نیروی محرکه القایی آرمیچر برابر ولتاژ موتور است.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ مشکلاتی که جریان راه‌اندازی زیاد ایجاد می‌کند را بنویسید.

۲ ـ چـــرا موتورهـــای جریـــان مســـتقیم در لحظه راه‌اندازی جریان زیاد می‌کشند؟

۳ ـ راه‌اندازی موتور DC با منبع ولتاژ متغیر را شرح دهید.

۴ ـ نحوه راه‌اندازی موتور DC با مقاومت راه‌انداز را شرح دهید.

۵ ـ مزایای راه‌اندازی موتور DC با منبع ولتاژ متغیر نسبت به راه‌اندازی با مقاومت راه‌انداز را بنویسید.

۶ ـ معایـــب راه‌اندازی موتور DC با مقاومت راه‌انداز را بنویسید.

۱. Starting Resistor

۱۵ ـ ۴ ـ کنترل سرعت موتورهای جریان مستقیم

صنعت همواره نیاز به موتورهایی با گشتاور بالا با امکان کنترل سرعت وسیع و دقیق دارد. قطارهای مترو، اتوبوس‌های برقی و خطوط تولید کارخانجات نورد فولاد و سکوهای پرتاب موشک و وسایل دیگری از این دست وسایلی هستند که نیروی محرکه خود را از موتورهای DC تامین می‌کنند. موتورهای DC از نقطه نظر کنترل سرعت، نقش ارزنده‌ای ایفا می‌کنند. هم‌چنین می‌توان سرعت آنها را کمتر یا بیشتر از سرعت نامی در محدوده‌ای وسیع و دقیق کنترل کرد.

هم‌چنین سیستم‌های کنترل سرعت موتورهای DC ارزان‌تر از سیستم‌های کنترل سرعت موتورهای AC است.

نیروی محرکه القایی آرمیچر از رابطه $E_A = K \cdot \varphi \cdot \omega$ تعیین می‌شود و از آن رابطه (۴۲ ـ ۴) برای سرعت به‌دست می‌آید.

$$\omega = \frac{E_A}{K \cdot \varphi} \qquad (۴-۴۲)$$

برای موتورهای تحریک مستقل و شنت نیروی محرکه القایی E_A از رابطه (۴۳ ـ ۴) به‌دست می‌آید.

$$E_A = V_T - R_A I_A \qquad (۴-۴۳)$$

اگر از مقاومت مدار تحریک سری در موتورهای سری و کمپوند صرف‌نظر شود رابطه (۴۳ ـ ۴) برای آنها نیز صادق خواهد شد. با جایگزین کردن رابطه (۴۳ ـ ۴) در رابطه (۴۲ ـ ۴) رابطه سرعت به شکل رابطه (۴۴ ـ ۴) در می‌آید.

$$\omega = \frac{V_T - R_A I_A}{K \cdot \varphi} \qquad (۴-۴۴)$$

با توجه به رابطه (۴۴ ـ ۴) ولتاژ موتور V_T، مقاومت مدار آرمیچر R_A و فوران عواملی هستند که بر سرعت تأثیر گذارند. با توجه به این عوامل روش‌های کنترل ابداع شده است.

۱ ـ کنترل سرعت از طریق کنترل ولتاژ

سرعت در موتورهای DC طبق رابطه (۴۴ ـ ۴) با ولتاژ نسبت مستقیم دارد. روش کنترل ولتاژ برای کنترل سرعت از صفر تا سرعت نامی به‌کار می‌رود. بدیهی است افزایش ولتاژ، بیش ولتاژ نامی به منظور دستیابی به سرعت‌های فراتر از سرعت نامی به سیم‌پیچی‌های موتور آسیب می‌رساند.

اخیراً با پیشرفت‌هایی که در الکترونیک قدرت حاصل شده است استفاده از مدارهای الکترونیکی کنترل ولتاژ به منظور کنترل سرعت متداول شده است.

۲ ـ کنترل سرعت از طریق کنترل مقاومت مدار آرمیچر

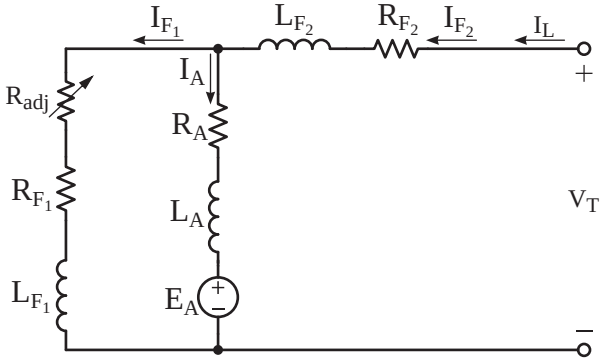
سرعت در موتورهای DC طبق رابطه (۴۴ ـ ۴) با مقاومت مدار آرمیچر نسبت عکس دارد. روش کنترل مقاومت مدار آرمیچر به منظور کنترل سرعت به دلیل افزایش تلفات حرارتی در مدار آرمیچر توصیه نشده است.

۳ ـ کنترل سرعت از طریق کنترل فوران قطب‌ها

سرعت در موتورهای DC طبق رابطه (۴۴ ـ ۴) با فوران قطب‌ها نسبت عکس دارد. روش کنترل فوران

برای کنترل سرعت فراتر از سرعت نامی به‌کار می‌رود. بدیهی است کاهش فوران به منظور دستیابی به بیش از سرعت نامی تا جایی مجاز است که موتور مهار گسسته نشود و جریان مدار آرمیچر از مقدار نامی تجاوز نکند.

کنترل فوران سیم‌پیچی تحریک موازی از طریق مقاومت متغیر R_{adj} که سری در مدار تحریک موازی قرار می‌گیرد امکان‌پذیر است. کنترل فوران سیم‌پیچی تحریک سری در عمل انجام نمی‌شود (شکل ۴۸ ـ ۴).

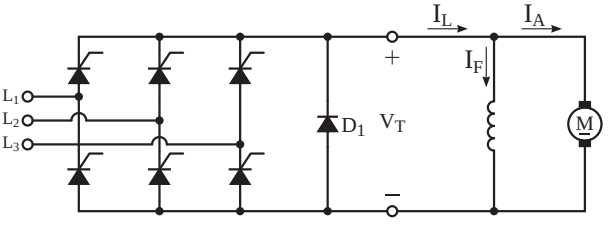


شکل ۴۸ ـ ۴ نحوه اتصال مقاومت R_{adj}

سیستم‌های کنترل سرعت موتورهای DC، روش‌های کنترل ولتاژ و فوران را به صورت ترکیبی به‌کار می‌گیرند و ضمن کنترل سرعت، راه‌اندازی موتور را نیز انجام می‌دهند.

۱ ـ ۱۵ ـ ۴ ـ کنترل سرعت الکترونیکی

امروزه استفاده از مدارهای الکترونیکی به منظور کنترل ولتاژ بسیار متداول شده است عناصر این مدارات قطعات نیمه هادی هستند. یک نمونه از این مدارهای الکترونیکی در شکل (۴۹ ـ ۴) نشان داده شده است.



شکل ۴۹ ـ ۴ مدار ساده کنترل ولتاژ DC موتور شنت

در این شکل ولتاژ شبکه سه فاز توسط یکسوکننده تریستوری یکسو می‌شود و مقدار ولتاژ DC توسط تغییر زاویه آتش گیت‌های تریستورها قابل کنترل می‌باشد. از دیود D_1 به عنوان هرز گرد جهت مستهلک کردن انرژی ذخیره شده در سیم‌پیچی‌های موتور استفاده شده است.

در سیستم‌های کنترل سرعت الکترونیکی امکان طراحی مدار الکترونیکی برای تغییر پلاریته ولتاژ DC جهت معکوس کردن دور وجود دارد.

- مزایای سیستم کنترل سرعت الکترونیکی:

۱ ـ فضای کمی اشغال می‌کند.

۲ ـ بازده بالا دارد.

۳ ـ امکان کنترل سریع ولتاژ خروجی

۴ ـ ارزان و اقتصادی هستند.

- معایب سیستم کنترل سرعت الکترونیکی:

۱ ـ تولید اعوجاج و نوسانات در شبکه برق

پرسش ۹ ـ ۴

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ صنعت نیاز به موتورهایی با گشتاور ..... با امکان کنترل ..... دارد.

۲ ـ کنترل ..... و کنترل ..... از روش‌های کنترل سرعت موتورهای DC هستند.

۳ ـ سرعت در موتورهای DC با فوران نسبت ..... دارد.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ موتورهای DC از نقطه نظر کنترل سرعت نقش ارزنده‌ای ایفا می‌کنند.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ سرعت در موتورهای DC با ولتاژ نسبت عکس دارد.

صحیح ☐ غلط ☐

۳ ـ روش کنترل سرعت از طریق کنترل مقاومت آرمیچر در موتورهای DC توصیه نشده است.

صحیح ☐ غلط ☐

۴ ـ سیستم‌های کنترل سرعت وظیفه راه‌اندازی موتور را نیز انجام می‌دهند.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ دلیل لزوم کنترل سرعت در موتورهای DC را شرح دهید.

۲ ـ عواملی که بر سرعت موتورهای DC تأثیر گذارند را بنویسید.

۳ ـ روش کنترل سرعت از طریق کنترل ولتاژ را شرح دهید.

۴ ـ چرا روش کنترل سرعت موتورهای DC از طریق کنترل مقاومت مدار آرمیچر توصیه نشده است؟

۵ ـ کنترل سرعت از طریق کنترل فوران را شرح دهید.

۶ ـ هر یک از روش‌های کنترل سرعت در چه محدوده‌ای کاربرد دارند؟ توضیح دهید.

۷ ـ نحوه نصب مقاومت‌های R_{adj} در مدار تحریک چگونه است؟ چرا؟

۸ ـ مزایای سیستم کنترل سرعت الکترونیکی را بنویسید؟

۱۶ ـ ۴ ـ تغییر جهت گردش موتورهای جریان مستقیم

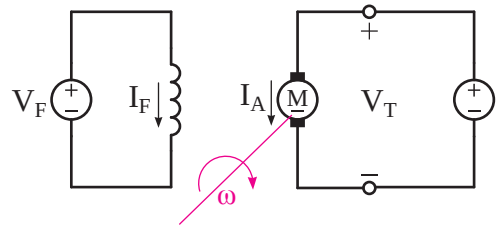
در بسیاری از بارهای صنعتی مانند نقاله‌ها، قطارهای مترو، خودروهای برقی و ... که نیروی محرکه آنها توسط موتورهای جریان مستقیم فراهم می‌شود امکان تغییر جهت گردش نیاز است.

تغییر جهت گردش موتورهای DC با تعویض جهت گشتاور آرمیچر امکان‌پذیر است. بدین منظور باید جهت جریان در سیم‌پیچی آرمیچر یا جهت جریان در سیم‌پیچی تحریک را عوض کرد. معمولاً برای تغییر جهت گردش موتورهای DC جهت جریان سیم‌پیچی آرمیچر را با جابه‌جا کردن دو سر مدار آرمیچر عوض می‌کنند و از تعویض جهت جریان مدار تحریک خودداری می‌کنند تا مشکلات زیر به‌وجود نیاید.

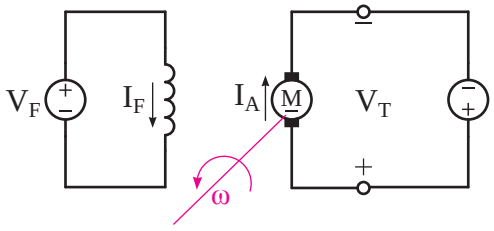
۱ ـ قطع مدار تحریک در لحظه تغییر جهت گردش باعث بروز پدیده مهار گسستگی خواهد شد.

۲ ـ تغییر جهت جریان تحریک پلاریته قطب‌های موتور را عوض می‌کند در این صورت در کار قطب‌های کمکی و سیم‌پیچی‌های جبران‌گر اختلال ایجاد خواهد شد.

در موتور تحریک مستقل کافی است پلاریته منبع ولتاژ مدار آرمیچر را عوض کرد تا جهت گردش موتور تغییر کند (شکل ۵۰ ـ ۴).



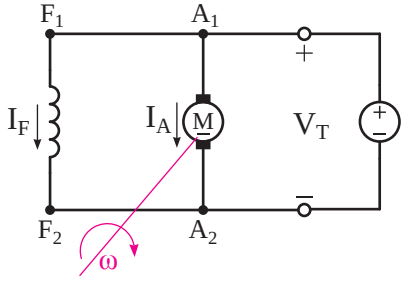
الف ـ راست گرد



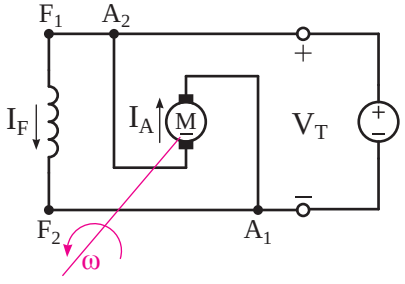
ب ـ چپ گرد

شکل ۵۰ ـ ۴ نقشه اختصاری تغییر جهت گردش موتور تحریک مستقل

در موتورهای شنت، سری و کمپوند با جابجایی محل اتصال مدار آرمیچر نسبت به مدار تحریک، جهت جریان آرمیچر را عوض می‌کنند تا جهت گردش موتور تغییر کند. در شکل (۵۱ ـ ۴) نقشه اختصاری تغییر جهت گردش موتور شنت نشان داده شده است.



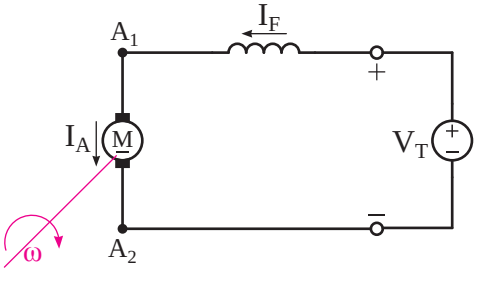
الف ـ راست گرد



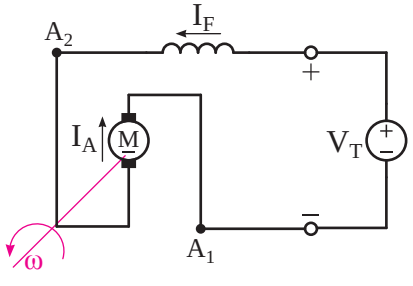
ب ـ چپ گرد

شکل ۵۱ ـ ۴ نقشه اختصاری تغییر جهت گردش موتور شنت

در شکل (۵۲ ـ ۴) نقشه اختصاری تغییر جهت گردش موتور سری نشان داده شده است.



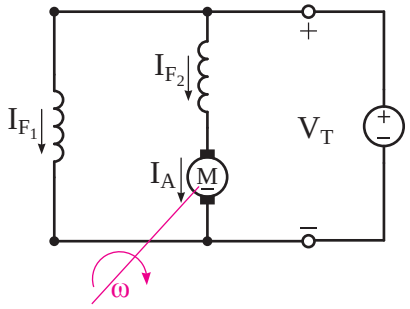
الف ـ راست گرد



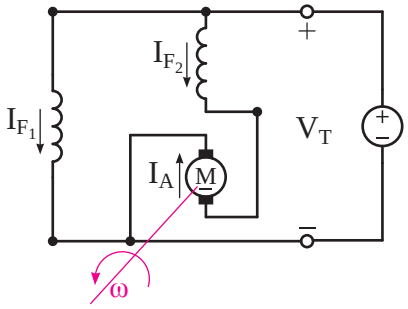
ب ـ چپ گرد

شکل ۵۲ ـ ۴ نقشه اختصاری تغییر جهت گردش موتور سری

در شکل (۵۳ ـ ۴) نقشه اختصاری تغییر جهت گردش موتور کمپوند با شنت بلند نشان داده شده است.



الف ـ راست گرد



ب ـ چپ گرد

شکل ۵۳ ـ ۴ نقشه اختصاری تغییر جهت گردش موتور کمپوند با شنت بلند

در موتورهای شنت، سری و کمپوند با تعویض پلاریته‌های منبع ولتاژ جهت جریان مدار آرمیچر و تحریک عوض می‌شود از این رو جهت گردش تغییر نخواهد کرد.

۱۷ ـ ۴ ـ ترمز در موتورهای جریان مستقیم

در بسیاری از بارهای صنعتی مانند نقاله‌ها، قطارهای مترو و خودروهای برقی... که توسط موتورهای جریان مستقیم به حرکت در می‌آیند پس از قطع از منبع تغذیه، رتور به خاطر انرژی جنبشی تا مدتی به حرکت خود ادامه می‌دهد و سپس متوقف می‌شود. در صورتی‌که نیاز به توقف سریع رتور باشد باید از حالت‌های ترمزی موتورهای جریان مستقیم استفاده کرد تا پس از خاموش شدن موتور، بلافاصله رتور و بار آن متوقف شوند.

اساس کار ترمز موتورهای DC بر این مبنا استوار است که انرژی جنبشی رتور در حال گردش را مستهلک می‌کند تا رتور متوقف شود. سه روش ترمز برای موتورهای DC به‌کار می‌رود:

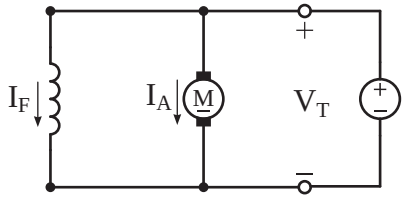
۱ ـ ترمز دینامیکی

۲ ـ ترمز با جریان مخالف

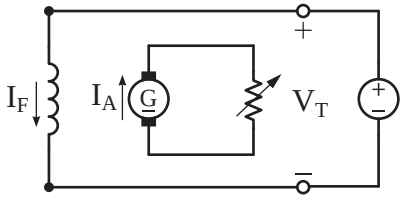
۳ ـ ترمز ژنراتوری

۱ ـ ۱۷ ـ ۴ ـ ترمز دینامیکی

در این روش برای موتورهای شنت مدار آرمیچر از منبع تغذیه جدا می‌شود و دو سر آن به یک مقاومت متغیر وصل می‌شود. در این صورت موتور تبدیل به ژنراتور تحریک مستقل خواهد شد و انرژی جنبشی رتور در سیم‌پیچی آرمیچر ابتدا تبدیل به انرژی الکتریکی می‌شود و سپس در مقاومت متغیر به انرژی گرمایی تبدیل خواهد شد. این تبدیل انرژی تا توقف رتور ادامه می‌یابد. نقشه اختصاری حالت کار و ترمز دینامیکی موتور شنت در شکل (۵۴ ـ ۴) نشان داده شده است.



الف ـ حالت کار



ب ـ حالت ترمز

شکل ۵۴ ـ ۴ نقشه اختصاری موتور شنت

در موتورهای سری برای ایجاد حالت ترمز دینامیکی، موتـــور از منبع تغذیه جدا می‌شـــود و مـــدار آرمیچر و تحریک سری به مقاومت متغیر متصل می‌شوند؛ با این تفاوت که دو ســـر ســـیم‌پیچی تحریک سری در حالت ترمزی جابه‌جا می‌شود تا جهت جریان آن مانند حالت کار موتـــوری باقی بماند و پس‌ماند قطب‌ها از بین نرود. نقشه اختصاری حالت کار و ترمز دینامیکی موتور سری در شکل (۵۵ ـ ۴) نشان داده شده است.

الف ـ حالت کار　　ب ـ حالت ترمز

شکل ۵۵ ـ ۴ نقشه اختصاری موتور سری

در موتورهـــای کمپونـــد بـــرای ایجـــاد حالت ترمز دینامیکی، مدار آرمیچر و تحریک سری مشابه آنچه که برای موتور سری شرح داده شد به مقاومت متغیر وصل می‌شـــود و مدار تحریک موازی بـــه منبع تغذیه متصل می‌ماند.

در روش ترمـــز دینامیکی لازم اســـت ســـیم‌پیچی تحریک در مدار باقی بماند تا رفتار ژنراتوری پدید آید. هم‌چنین هرچه مقدار مقاومت متغیر کمتر شود نیروی ترمزی قوی‌تری به‌وجود می‌آید و رتور سریع‌تر متوقف می‌شود.

در اتوبوس‌هـــای برقـــی مجهز به ترمـــز دینامیکی، مقاومـــت متغیر از طریق یک پـــدال در زیر پای راننده قرار داده شـــده است. راننده با فشار بر پدال ضمن قطع مدار آرمیچـــر از منبع تغذیه آن را بـــه مقاومت متغیر وصل می‌کند. فشار بیشتر بر پدال، مقاومت متغیر را کم می‌کند تا نیروی ترمز قوی‌تری ایجاد شود.

۲ ـ ۱۷ ـ ۴ ـ ترمز با جریان مخالف

در این روش برای ایجاد نیروی ترمزی جهت گردش موتـــور را با جابه‌جا کردن ســـرهای مدار آرمیچر عوض می‌کنند تا جهت گشـــتاور آرمیچر عوض شود؛ لذا رتور سریع متوقف می‌شود و پس از توقف، منبع تغذیه قطع می‌شود تا رتور در جهت مخالف حرکت نکند.

نیروی ترمزی جریان مخالف به مراتب بیشتر از ترمز دینامیکی است و رتور در مدت زمان کمتری می‌ایستد. امـــا در این روش ضربات شـــدید مکانیکـــی به محور و یاتاقان‌ها وارد می‌شود و مدارهای الکتریکی موتور، باید جریان‌های شدید لحظه‌ای را تحمل کند.

۳ ـ ۱۷ ـ ۴ ـ ترمز ژنراتوری

در مواردی که بار تحت تأثیر انرژی جنبشـــی خود بتواند ســـرعت رتور را به بیش از سرعت بی‌باری برساند (مانند حرکت خـــودرو در ســـرازیری)، نیروی محرکه القایـــی آرمیچر E_A بزرگ‌تر از ولتاژ V_T می‌شـــود. لذا

موتور تبدیل به ژنراتور خواهد شـد و انرژی جنبشـی رتـور به انـرژی الکتریکـی تبدیل و به منبـع تغذیه برگردانده می‌شـود و آن را شارژ می‌کند. در این صورت نیروی ترمزی ایجاد می‌شـود که مانع افزایش سـرعت رتور می‌شـود. این روش تولید نیـروی ترمزی را «ترمز ژنراتوری» گویند.

در روش ترمـز ژانرتوری باید امـکان جذب انرژی الکتریکی توسـط منبع تغذیه فراهم باشـد در غیر این صـورت نیروی ترمزی پدید نمی‌آید. ترمز مولدی باعث توقف رتور نخواهد شـد بلکه از افزایش سـرعت رتور جلوگیری می‌کند.

روش ترمـزی ژنراتوری در موتورهای سـری پدید نمی‌آیـد؛ زیرا رسـیدن به بیش از سـرعت بی‌باری به معنای وقوع پدیده فرار یا مهار گسستگی است.

پرسش ۱۰ ـ ۴

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ برای تغییر جهت گردش موتور DC باید جهت جریان ..... یا ..... را عوض کرد.

۲ ـ قطع مدار تحریک در لحظه تغییر جهت گردش باعث بروز پدیده ..... خواهد شد.

۳ ـ اساس کار ترمز موتورهای DC مستهلک کردن انرژی ..... است.

۴ ـ در روش ترمـز دینامیکی انرژی ..... رتور به انرژی ..... تبدیل می‌شود.

۵ ـ در روش ترمز دینامیکی لازم اسـت سیم‌پیچی ..... در مدار باقی بماند تا رفتار ..... پدید آید.

۶ ـ در روش ترمز ژنراتوری باید امکان جذب انرژی ..... توسط ..... فراهم باشد.

پرسش‌های صحیح، غلط

۱ ـ تغییر جهـت گردش موتورهای DC با تعویض جهت گشتاور آرمیچر امکان‌پذیر است.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ با تعویض پلاریته منبع ولتاژ مدار آرمیچر، جهت گردش موتور تحریک مستقل تغییر می‌کند.

صحیح ☐ غلط ☐

۳ ـ با تعویض پلاریته منبع ولتاژ جهت گردش موتور شنت تغییر می‌کند.

صحیح ☐ غلط ☐

۴ ـ در روش ترمز دینامیکی انرژی جنبشی رتور به انرژی الکتریکی تبدیل نمی‌شود.

صحیح ☐ غلط ☐

۵ ـ نیروی ترمزی جریان مخالف به مراتب بیشتر از ترمز دینامیکی است.

صحیح ☐ غلط ☐

۶ ـ روش ترمز ژنراتوری در موتور سری کاربرد دارد.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ تغییـر جهت گردش در موتورهای DC چگونه انجام می‌شود؟

۲ ـ چـرا از تعویض جهت جریان تحریک به منظور تغییر جهت گردش خودداری می‌شود؟

۳ ـ نقشه اختصاری تغییر جهت گردش موتور شنت را رسم نموده و توضیح دهید.

۴ ـ چرا در موتورهای شنت، سری و کمپوند با تعویض پلاریته منبع ولتاژ، جهت گردش تغییر نمی‌کند؟

۵ ـ لزوم اســـتفاده از ترمز در موتورهای الکتریکی را بنویسید.

۶ ـ اساس کار ترمز را شرح دهید.

۷ ـ انواع روش‌های ترمز را بنویسید.

۸ ـ روش ترمز دینامیکی را توضیح دهید.

۹ ـ با رســـم شکل نحوه ترمز دینامیکی موتور شنت را توضیح دهید.

۱۰ ـ با رسم شکل نحوه ترمز دینامیکی موتور سری را توضیح دهید.

۱۱ ـ نحـــوه ترمـــز دینامیکی در موتـــور کمپوند را توضیح دهید.

۱۲ ـ ترمز با جریان مخالف را توضیح دهید.

۱۳ ـ ترمز ژنراتوری را توضیح دهید.

۱۴ ـ چـــرا ترمز ژنراتـــوری در موتور ســـری پدید نمی‌آید؟

منابع

1-Electric Machinary – Fourth Edition – by Fitzgerald / Kingsley / Umans

2-Principles of Electric Machines and Power Electronics – by Sen, Paresh, Chandra

3 –Electric Machinery Fundamentals – Fourth Edition – by Stepheny. Chapman

۵ ـ ماشـــین‌های الکتریکی، تئوری، عملکرد و کاربردها - تالیف پروفسور بیم بهارا - ترجمه دکتر سلطانی، دکتر لسانی

۶ ـ ماشین‌های الکتریکی، تحلیل، بهره‌برداری، کنترل - تالیف پی سی سن - ترجمه دکتر عابدی، نبوی