

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# ماشین‌های الکتریکی DC

رشته الکتروتکنیک

زمینه صنعت

شاخه آموزش فنی و حرفه‌ای

شماره درس ۲۱۳۴

ترکمانی، امیرحسین	۶۲۱
ماشین‌های الکتریکی DC / مؤلف: امیرحسین ترکمانی. - تهران: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی	۳۱ /
ایران، ۱۳۹۵.	۱۴۶ م
۲۳۴ ص. : مصور. - (آموزش فنی و حرفه‌ای؛ شماره درس ۲۱۳۴)	۱۳۹۵
متون درسی رشته الکتروتکنیک، زمینه صنعت.	
برنامه‌ریزی و نظارت، بررسی و تصویب محتوا: کمیسیون برنامه‌ریزی و تألیف کتاب‌های درسی رشته الکتروتکنیک دفتر تألیف کتاب‌های درسی فنی و حرفه‌ای و کاردانش وزارت آموزش و پرورش.	
۱. ماشین‌آلات برقی. ۲. برق - جریان مستقیم. الف. ترکمانی، امیرحسین. ب. ایران. وزارت آموزش و پرورش. کمیسیون برنامه‌ریزی و تألیف کتاب‌های درسی رشته الکتروتکنیک. ج. عنوان. د. فروست.	

همکاران محترم و دانش آموزان عزیز :  
پیشنهادهای و نظرات خود را درباره محتوای این کتاب به نشانی  
تهران - صندوق پستی شماره ۴۸۷۴/۱۵ دفتر تألیف کتابهای درسی فنی  
و حرفه‌ای و کاردانش، ارسال فرمایند.

پیام‌نگار (ایمیل) [info@tvoccd.ir](mailto:info@tvoccd.ir)  
وب‌گاه (وب‌سایت) [www.tvoccd.sch.ir](http://www.tvoccd.sch.ir)  
پیام‌نگار (ایمیل) کمیسیون تخصصی رشته الکترونیک  
[tech@tvoccd.sch.ir](mailto: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 رشته الکترونیک، 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: اداره کل نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی  
تهران: خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)  
تلفن: ۸۸۸۳۱۱۶۱-۹۰۹ دورنگار: ۸۸۳۰۹۲۶۶ صندوق پستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹  
وب‌سایت: [www.chap.sch.ir](http://www.chap.sch.ir)

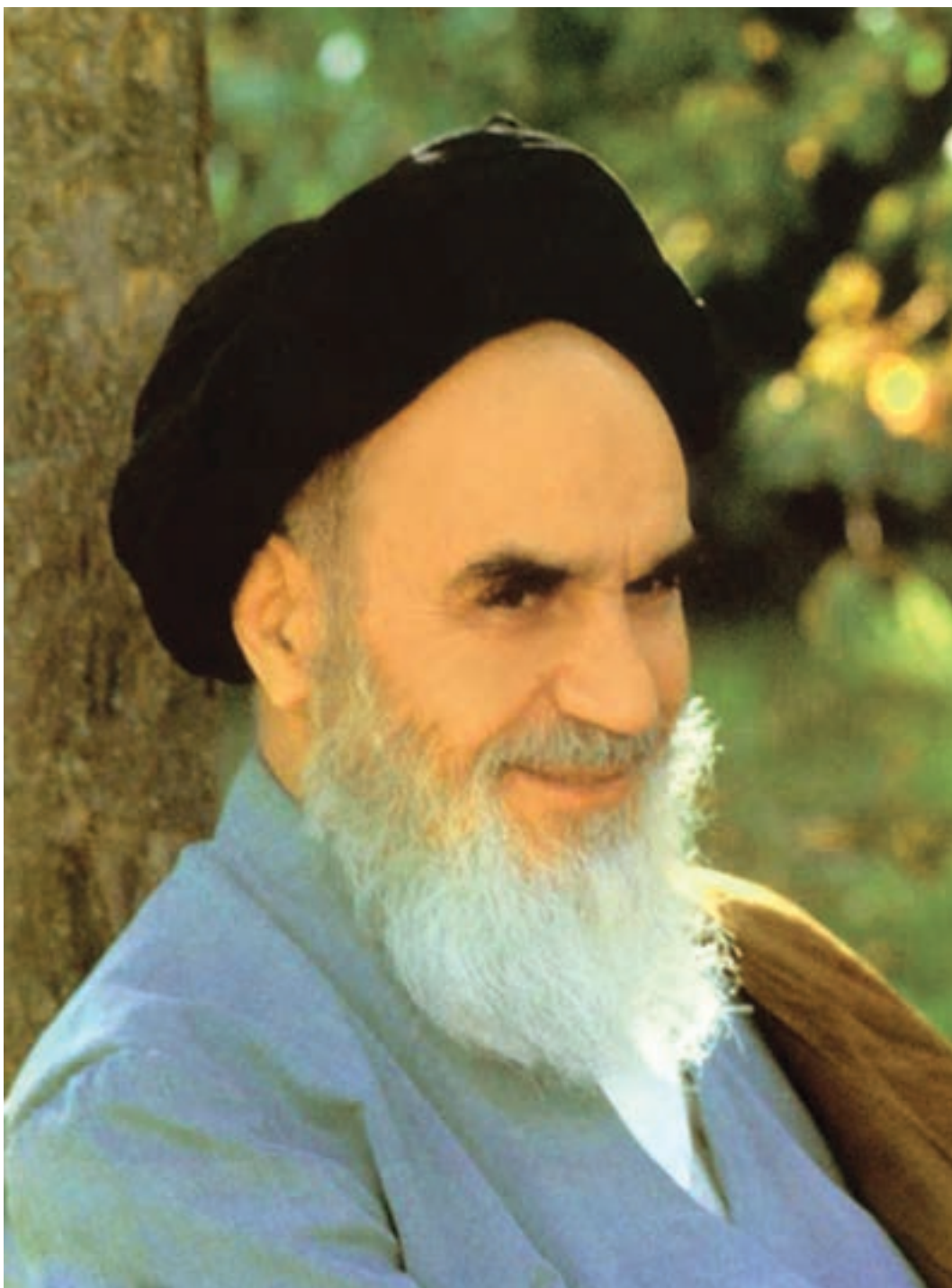
رسمی و تصویرسازی رایانه‌ای: محمد سیاحی  
صفحه آرا: محمد سیاحی، غزاله نجمی  
طراح جلد: حامد موسوی  
امور فنی رایانه‌ای: ناهید خیام‌باشی و مریم دهقان‌زاده

ناشر: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران  
تهران - کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروپخش)  
تلفن ۴۴۹۸۵۱۶۱-۵ دورنگار ۴۴۹۸۵۱۶۰ - صندوق پستی ۱۳۹-۳۷۵۱۵

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

سال انتشار و نوبت چاپ: چاپ پنجم ۱۳۹۵

حق چاپ محفوظ است.



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

امام خمینی «قدّس سرّه الشّریف»

# فهرست

۱۲ - ۱ - ضریب نفوذ مغناطیسی ..... ۲۴	<b>فصل اول - الکترومغناطیس ..... ۹</b>
۱۳ - ۱ - ضریب نفوذ مغناطیسی سیم‌پیچ با هسته	هدف‌های رفتاری ..... ۹
فرومغناطیس ..... ۲۶	مقدمه ..... ۱۰
۱۴ - ۱ - نواحی منحنی مغناطیسی مواد فرومغناطیس	۱ - ۱ - میدان مغناطیسی ..... ۱۱
..... ۲۹	۲ - ۱ - فوران مغناطیسی ..... ۱۲
۱۵ - ۱ - ضریب نفوذ مغناطیسی سیم‌پیچ بدون هسته در	۳ - ۱ - چگالی فوران مغناطیسی ..... ۱۴
خلأ ..... ۳۰	پرسش ۱ - ۱ ..... ۱۶
۱۶ - ۱ - ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی ..... ۳۲	تمرین ۱ - ۱ ..... ۱۶
پرسش ۴ - ۱ ..... ۳۳	۴ - ۱ - میدان مغناطیسی اطراف هادی حامل جریان
تمرین ۴ - ۱ ..... ۳۴	الکتریکی ..... ۱۶
۱ - ۱۶ - ۱ - مواد دیامغناطیس ..... ۳۵	۵ - ۱ - جهت میدان الکترو مغناطیسی اطراف هادی حامل
۲ - ۱۶ - ۱ - مواد پارامغناطیس ..... ۳۵	جریان الکتریکی ..... ۱۷
۳ - ۱۶ - ۱ - مواد فرومغناطیس ..... ۳۵	۶ - ۱ - چگالی فوران مغناطیسی اطراف یک هادی حامل
۱۷ - ۱ - حلقه هیستریزیس ..... ۳۶	جریان الکتریکی ..... ۱۸
پرسش ۵ - ۱ ..... ۴۰	۷ - ۱ - مقدار چگالی فوران مغناطیسی اطراف هادی حامل
۱۸ - ۱ - مدارهای مغناطیسی ..... ۴۰	جریان الکتریکی ..... ۱۸
۱۹ - ۱ - مدار مغناطیسی با شکاف هوایی ..... ۴۴	۸ - ۱ - میدان الکترو مغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان
پرسش ۶ - ۱ ..... ۴۷	الکتریکی ..... ۱۹
تمرین ۶ - ۱ ..... ۴۷	۹ - ۱ - جهت میدان الکترو مغناطیسی سیم‌پیچ حامل
۲۰ - ۱ - قانون نیروی محرکه مغناطیسی ..... ۴۸	جریان الکتریکی ..... ۲۰
تمرین ۷ - ۱ ..... ۵۰	پرسش ۲ - ۱ ..... ۲۱
<b>فصل دوم - مبانی ماشین‌های الکتریکی جریان</b>	تمرین ۲ - ۱ ..... ۲۲
<b>مستقیم ..... ۵۲</b>	۱۰ - ۱ - نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ حامل جریان
هدف‌های رفتاری ..... ۵۲	الکتریکی ..... ۲۲
مقدمه ..... ۵۴	۱۱ - ۱ - شدت میدان مغناطیسی ..... ۲۲
۱ - ۲ - طبقه‌بندی ماشین‌های الکتریکی ..... ۵۵	پرسش ۳ - ۱ ..... ۲۴
۲ - ۲ - قانون القای الکترومغناطیسی فاراده ..... ۵۵	تمرین ۳ - ۱ ..... ۲۴



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

۲۷ - ۳ - مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند اضافی با شنت کوتاه	۱۷۲
۲۸ - ۳ - مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند نقصانی	۱۷۴
۲۹ - ۳ - راه‌اندازی و شرایط راه‌اندازی ژنراتور کمپوند	۱۷۴
۳۰ - ۳ - بهره‌برداری از ژنراتور کمپوند اضافی	۱۷۴
۳۱ - ۳ - بهره‌برداری از ژنراتور کمپوند نقصانی	۱۷۵
پرسش ۹ - ۳	۱۷۵
تمرین ۸ - ۳	۱۷۶
۳۲ - ۳ - منحنی مشخصه بارگذاری ژنراتور کمپوند اضافی	۱۷۶
۳۳ - ۳ - کاربرد ژنراتور کمپوند اضافی	۱۷۸
۳۴ - ۳ - منحنی مشخصه بارگذاری ژنراتور کمپوند نقصانی	۱۷۸
۳۵ - ۳ - کاربرد ژنراتور کمپوند نقصانی	۱۸۰
پرسش ۱۰ - ۳	۱۸۰
۳۶ - ۳ - تنظیم ولتاژ ژنراتورهای جریان مستقیم	۱۸۰
پرسش ۱۱ - ۳	۱۸۲
<b>فصل چهارم - موتورهای جریان مستقیم</b>	<b>۱۸۳</b>
هدف‌های رفتاری	۱۸۳
مقدمه	۱۸۴
۱ - ۴ - پخش توان و تلفات در موتورهای جریان مستقیم	۱۸۵
۲ - ۴ - تلفات کل موتورهای جریان مستقیم	۱۸۷
۳ - ۴ - بازده موتورهای جریان مستقیم	۱۸۷
۴ - ۴ - گشتاور موتورهای جریان مستقیم	۱۸۸
پرسش ۱ - ۴	۱۸۹
تمرین ۱ - ۴	۱۹۰

۱۲ - ۳ - کاربرد ژنراتور تحریک مستقل	۱۵۰
پرسش ۴ - ۳	۱۵۰
تمرین ۳ - ۳	۱۵۱
۱۳ - ۳ - ژنراتور جریان مستقیم با تحریک شنت	۱۵۱
۱۴ - ۳ - راه‌اندازی ژنراتور شنت	۱۵۳
۱۵ - ۳ - مدار الکتریکی معادل ژنراتور شنت	۱۵۴
پرسش ۵ - ۳	۱۵۶
تمرین ۴ - ۳	۱۵۷
۱۶ - ۳ - منحنی مشخصه بی‌باری ژنراتور شنت	۱۵۸
۱۷ - ۳ - منحنی مشخصه بارگذاری ژنراتور شنت	۱۵۸
۱۸ - ۳ - کاربرد ژنراتور شنت	۱۶۰
پرسش ۶ - ۳	۱۶۰
تمرین ۵ - ۳	۱۶۰
۱۹ - ۳ - ژنراتورهای جریان مستقیم با تحریک سری	۱۶۱
۲۰ - ۳ - راه‌اندازی ژنراتور سری	۱۶۱
۲۱ - ۳ - مدار الکتریکی معادل ژنراتور سری	۱۶۲
پرسش ۷ - ۳	۱۶۴
تمرین ۶ - ۳	۱۶۵
۲۲ - ۳ - منحنی مشخصه بی‌باری ژنراتور سری	۱۶۵
۲۳ - ۳ - منحنی مشخصه بارگذاری ژنراتور تحریک سری	۱۶۵
۲۴ - ۳ - کاربرد ژنراتور سری	۱۶۸
پرسش ۸ - ۳	۱۶۸
تمرین ۷ - ۳	۱۶۸
۲۵ - ۳ - ژنراتورهای جریان مستقیم با تحریک کمپوند	۱۶۹
۲۶ - ۳ - مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند اضافی با شنت بلند	۱۷۰

۱۲ - ۴	موتورهای جریان مستقیم با تحریک سری ۲۰۷
تمرین ۵ - ۴	۲۰۹
پرسش ۶ - ۴	۲۱۲
۱۳ - ۴	موتورهای جریان مستقیم با تحریک کمپوند
تمرین ۶ - ۴	۲۱۳
پرسش ۷ - ۴	۲۱۹
۱۴ - ۴	راه‌اندازی موتورهای جریان مستقیم
پرسش ۸ - ۴	۲۲۳
۱۵ - ۴	کنترل سرعت موتورهای جریان مستقیم
پرسش ۹ - ۴	۲۲۵
۱۶ - ۴	تغییر جهت گردش موتورهای جریان مستقیم
تمرین ۳ - ۴	۲۲۸
۱۷ - ۴	ترمز در موتورهای جریان مستقیم
پرسش ۱۰ - ۴	۲۳۲
منابع	۲۳۴

۵ - ۴	پدیده مهار گسستگی در موتورهای جریان مستقیم
۶ - ۴	علامت اختصاری و مدار الکتریکی معادل موتورهای جریان مستقیم
۷ - ۴	مشخصات موتورهای جریان مستقیم
پرسش ۲ - ۴	۱۹۱
تمرین ۲ - ۴	۱۹۲
۸ - ۴	طبقه‌بندی موتورهای جریان مستقیم
۹ - ۴	موتورهای جریان مستقیم با آهن‌ربای دائم
پرسش ۳ - ۴	۱۹۴
۱۰ - ۴	موتورهای جریان مستقیم با تحریک مستقل
تمرین ۳ - ۴	۱۹۵
پرسش ۴ - ۴	۱۹۶
۱۱ - ۴	موتورهای جریان مستقیم با تحریک شنت
تمرین ۴ - ۴	۱۹۸
پرسش ۵ - ۴	۲۰۲
۲۰۳	
۲۰۵	
۲۰۶	

## مقدمه

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

تسلط بر مطالب ارائه شده، اساس درک بسیاری 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 سوم و چهارم آزمایش‌های ماشین‌های الکتریکی جریان مستقیم ارائه شده است تا هنرجویان در دوره کاردانی در انجام آنها دچار مشکل نشوند. بر خود لازم می‌دانم از زحمات اعضای کمیسیون تخصصی رشته برق تشکر نمایم. همچنین از رهنمودهای اساتید 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](mailto: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 هیستریزیس را توضیح دهد.
- منحنی هیستریزیس را در مواد مغناطیسی سخت، نرم و فریت توضیح دهد.

- منحنی‌های هیستریزیس 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

دو علم الکتریسیته و مغناطیس را به یکدیگر مربوط ساخت. برای تشریح رابطه بین جریان الکتریکی و مغناطیس نظریه‌ای به وجود آمده است که به آن نظریه الکترو مغناطیس<sup>۲</sup> می‌گویند. تأثیر میدان مغناطیسی اطراف یک هادی حامل جریان بر عقربه قطب‌نما در شکل (۱ - ۱) نشان داده شده است.



شکل ۱-۱

مشاهده می‌شود عقربه قطب‌نما، عمود بر هادی

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<sup>۱</sup> برای اولین بار متوجه شد که جریان الکتریکی می‌تواند آثار مغناطیسی بوجود آورد. این کشف مهم

مغناطیسی است. با ورود فناوری نانو به علم و صنعت مغناطیس، بهبود زیادی در کیفیت مغناطیس‌ها ایجاد شده است و مغناطیس‌هایی با ابعاد کوچک و نیروی مغناطیسی بزرگ ساخته شده‌اند.

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

یکی از حوزه‌هایی که انتظار می‌رود فناوری نانو<sup>۱</sup> اثر فراوانی بر پیشرفت آن داشته باشد، مغناطیس‌ها و مواد

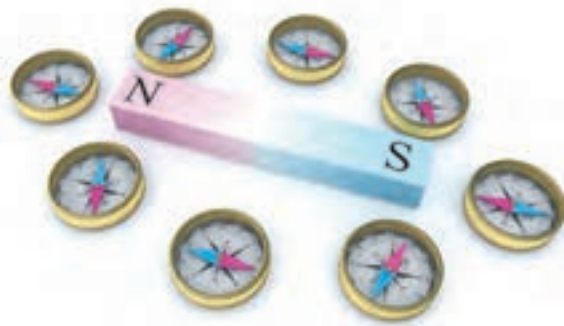
### هانس کریستن اوستد



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

منبع: کتاب زندگی‌نامه دانشمندان جهان

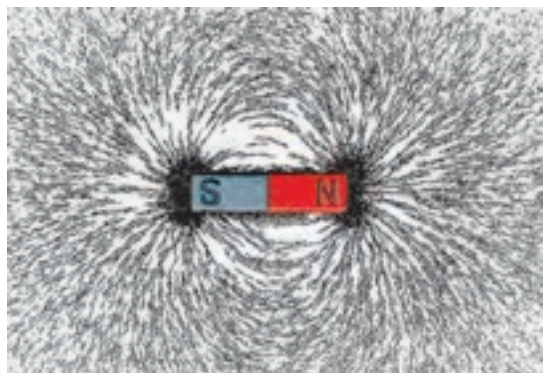
### ۱-۱- میدان مغناطیسی



شکل ۱-۲

در فضای اطراف یک آهن‌ربا یا مغناطیس طبیعی خاصیتی وجود دارد که ذرات آهن را به خود جذب می‌کند. به این فضا «میدان مغناطیسی»<sup>۲</sup> 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 (شکل ۱-۲).

با قرار دادن یک مقوا بر روی یک آهن‌ربا و پاشیدن براده‌های آهن به روی مقوا می‌توان خطوط نیروی میدان مغناطیسی را مشاهده کرد. (شکل ۱-۳)  
هر خط نیروی میدان مغناطیسی را یک ماکسول<sup>۳</sup> (max) می‌گویند.



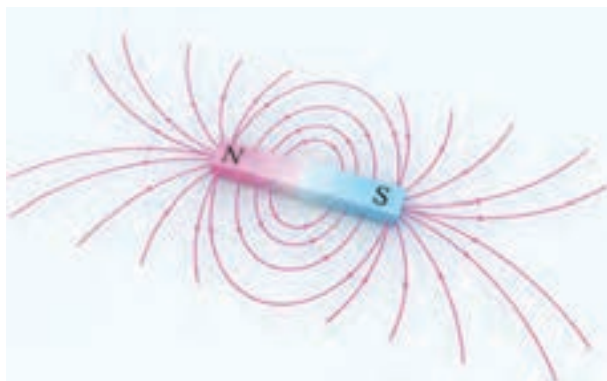
شکل ۱-۳





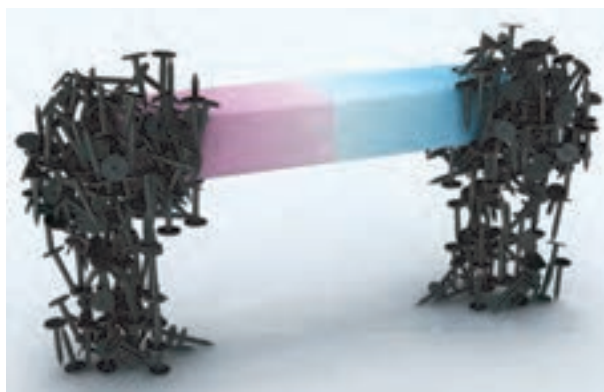
جیمز کلارک ماکسول در ۱۳ نوامبر سال ۱۸۳۱ در ادینبرای اسکاتلند متولد شد. از کودکی به ریاضیات و فیزیک علاقه فراوان داشت، در سال ۱۸۴۷ وارد دانشگاه ادینبرا شد و در ۱۸۵۰ به دانشگاه کمبریج رفت و در سال ۱۸۵۴ از تحصیل فراغت یافت.

ماکسول 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. وی عمر وی کوتاه بود و در سال ۱۸۷۹ در سن ۴۹ سالگی وفات یافت.  
منبع [www.roshd.ir](http://www.roshd.ir)



شکل ۵-۱ خطوط نیروی میدان مغناطیسی

خطوط نیروی میدان مغناطیسی در دو نقطه معین از میدان مغناطیسی دارای فشردگی بیشتری نسبت به سایر نقاط است این نقاط را قطب‌های مغناطیسی<sup>۱</sup> می‌نامند و با حروف  $N$  و  $S$  آنها را نشان می‌دهند. اثر جذب در قطب‌های میدان مغناطیسی بسیار قوی‌تر از سایر نقاط میدان مغناطیسی است (شکل ۴-۱).



شکل ۴-۱

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 ۵-۱).

## ۲-۱- فوران مغناطیسی

در شکل (۳-۱) خطوط نیروی میدان مغناطیسی اطراف یک آهن‌ربا نمایش داده شده است. به مجموع خطوط نیروی میدان مغناطیسی اطراف یک مغناطیس یا آهن‌ربا «فوران» یا «شار مغناطیسی<sup>۲</sup>» می‌گویند و آن را با  $\Phi$  نشان می‌دهند<sup>۳</sup>.

واحد فوران مغناطیسی ولت.ثانیه ( $V \cdot sec$ ) است که اصطلاحاً به آن وِبر  $wb$  می‌گویند. یک وِبر<sup>۴</sup> برابر با  $10^8$

۴. Weber

۳. در برخی کتب آن را Flow می‌نامند.

۲. Magnetic Flux

۱. Magnetic poles

خط نیروی میدان مغناطیسی یا ماکسول است. پس: کوچک‌تر آن میلی وبر  $mwb$  می‌باشد. یک وبر برابر با  $10^3$  میلی وبر است. یعنی:

$$1[v.sec] = 1[wb] = 10^3[max] \quad (1-1)$$

واحد رایج فوران مغناطیسی وبر  $wb$  است و واحد

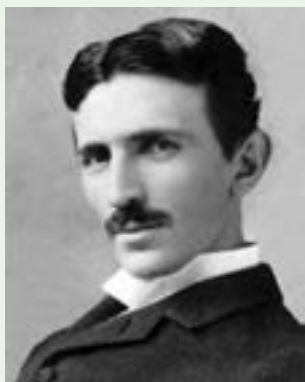
$$1[wb] = 10^3[mwb] \quad (1-2)$$

## ویلهلم وبر



ویلهلم 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 - 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 ۱-۱ - فوران مغناطیسی یک آهن‌ربا**  
 $2/5$  میلی وبر  $[mwb]$  است. فوران این آهن‌ربا چند ماکسول  $[max]$  است؟

حل:

- با استفاده از تناسب، واحد فوران را به وبر تبدیل

می‌کنیم.

$$\frac{1wb}{\phi} = \frac{10^3 mwb}{2/5 mwb}$$

$$\phi = \frac{2/5 \times 1}{10^3}$$

$$\phi = 2/5 \times 1 \times 10^{-3}$$

$$\phi = 2/5 \times 10^{-3} [wb]$$

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

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

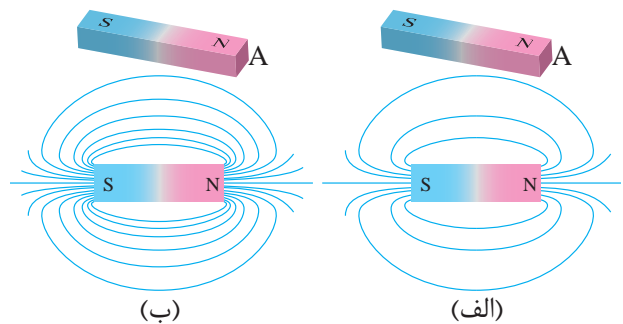
$$\varphi = \frac{2/5 \times 10^{-3} \times 10^8}{1}$$

$$\varphi = 2/5 \times 10^5 = 250000 [max]$$

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

### ۳-۱- چگالی فوران مغناطیسی

دو آهنربا با ابعاد مشابه و فوران‌های ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ماکسول که سطح مقطع قطب آنها با  $A$  مشخص می‌باشد در شکل (۶-۱) نشان داده شده است.



شکل ۶-۱

میدان مغناطیسی آهنربای شکل (الف-۶-۱) در سطح مقطع قطب خود ۱۰۰۰ و میدان مغناطیسی آهنربای شکل (ب-۶-۱) در سطح مقطع قطب خود ۲۰۰۰ خط نیروی وجود دارد. اما آهنربای شکل (ب-۶-۱) 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 شکل (ب-۶-۱) نسبت به شکل (الف-۶-۱) فشرده 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 مغناطیسی»<sup>۱</sup> تعریف می‌شود و آن را با  $B$  نشان می‌دهند.

چگالی فوران مغناطیسی  $B$  کمیتی است که تراکم یا فشردگی خطوط میدان مغناطیسی در سطح مقطع  $A$  را نشان می‌دهد. اگر سطح مورد نظر واحد انتخاب شود، «فوران عبوری از واحد سطح را چگالی فوران مغناطیسی» تعریف می‌کنند.

چگالی فوران مغناطیسی از رابطه (۳-۱) به دست می‌آید.

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

در این رابطه:

$\varphi$  فوران مغناطیسی بر حسب وبر  $wb$

$A$  مساحت مقطعی که فوران مغناطیسی  $\varphi$  از آن می‌گذرد بر حسب مترمربع  $m^2$

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

واحد چگالی فوران مغناطیسی  $B$  وبر بر مترمربع  $\left[ \frac{wb}{m^2} \right]$  است که اصطلاحاً به آن تسلا<sup>۲</sup>  $[T]$  می‌گویند و واحد کوچک‌تر آن ماکسول بر سانتی‌مترمربع  $\left[ \frac{max}{cm^2} \right]$  است که اصطلاحاً به آن گاوس<sup>۳</sup>  $[G]$  گفته می‌شود. پس:

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

## 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 شد. خود او، وقتی دوران کودکی‌اش را به یاد می‌آورد، به شوخی می‌گفت: «من شمردن را پیش از حرف زدن یاد گرفتم» او آموزش عالی خود را در دانشگاه گوتینگن گذراند. بعدها به مدت ۵۰ سال، کرسی استادی همین دانشگاه را به عهده داشت. گاوس در سال ۱۸۵۵ درگذشت.

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

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

- واحد فوران مغناطیسی به وبر تبدیل می‌شود:

$$\frac{1wb}{\phi} = \frac{10^3 mwb}{0.02 mwb}$$

$$\phi = \frac{0.02 \times 1}{10^3} = 0.02 \times 10^{-3} = 2 \times 10^{-5} [wb]$$

- از رابطه (۳ - ۱) چگالی فوران مغناطیسی به دست می‌آید:

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{2 \times 10^{-5}}{2 \times 10^{-4}} = 0.1 \left[ \frac{wb}{m^2} \right] = [T]$$

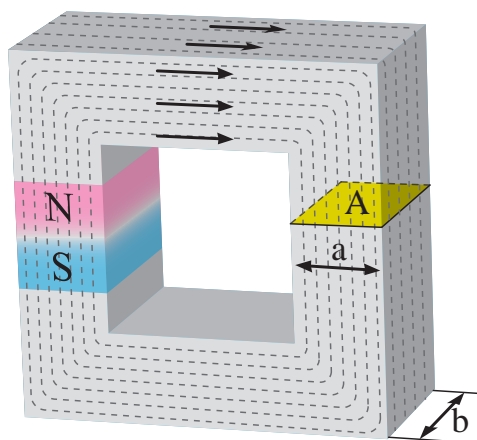
- واحد چگالی فوران مغناطیسی به گاوس تبدیل می‌شود:

$$\frac{1T}{0.1T} = \frac{10^4 G}{B}$$

$$B = \frac{0.1 \times 10^4}{1} = 0.1 \times 10^4 = 1000 [G]$$

مثال ۲-۱ - آهن‌ربایی با فوران مغناطیسی

$0.02 mwb$  مطابق شکل (۷ - ۱) در نظر است. چگالی فوران مغناطیسی در سطح مقطع  $A$  هسته چند گاوس می‌باشد؟ در صورتی که  $b=20 mm$  و  $a=10 mm$  باشد.



شکل ۷-۱

حل:

- سطح مقطع  $A$  برابر است با:

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

- واحد سطح مقطع به متر مربع تبدیل می‌شود:

## پرسش ۱-۱

### پرسش‌های کامل کردنی

- ۱- نظریه الکترومغناطیس رابطه ..... و ..... را تشریح می‌کند.
- ۲- میدان مغناطیسی بر قطب‌نما تأثیر ..... .
- ۳- به مجموع خطوط نیروی مغناطیسی اطراف یک مغناطیس ..... یا ..... گویند.

### پرسش‌های صحیح، غلط

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

☐ صحیح ☐ غلط

- ۲- واحد فوران ولت ثانیه یا تسلا است.

☐ صحیح ☐ غلط

### پرسش‌های تشریحی

- ۱- قطب‌های مغناطیسی را تعریف کنید.
- ۲- چگالی فوران مغناطیسی را تعریف کنید.
- ۳- واحد هر یک از کمیت‌های زیر را بنویسید.

الف - فوران

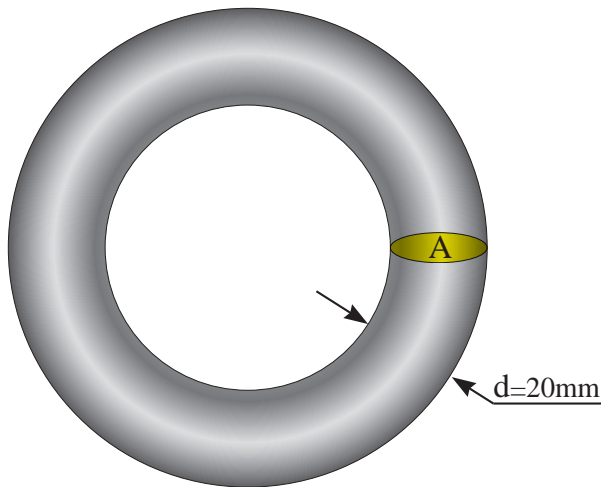
ب - چگالی فوران مغناطیسی

ج - خطوط نیروی مغناطیسی

## تمرین ۱-۱

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

- ۲- آهن‌ربایی با چگالی فوران مغناطیسی  $10000\text{ G}$  مطابق شکل (۸ - ۱) در نظر است. فوران مغناطیسی در سطح مقطع A هسته چند میلی وبر است؟

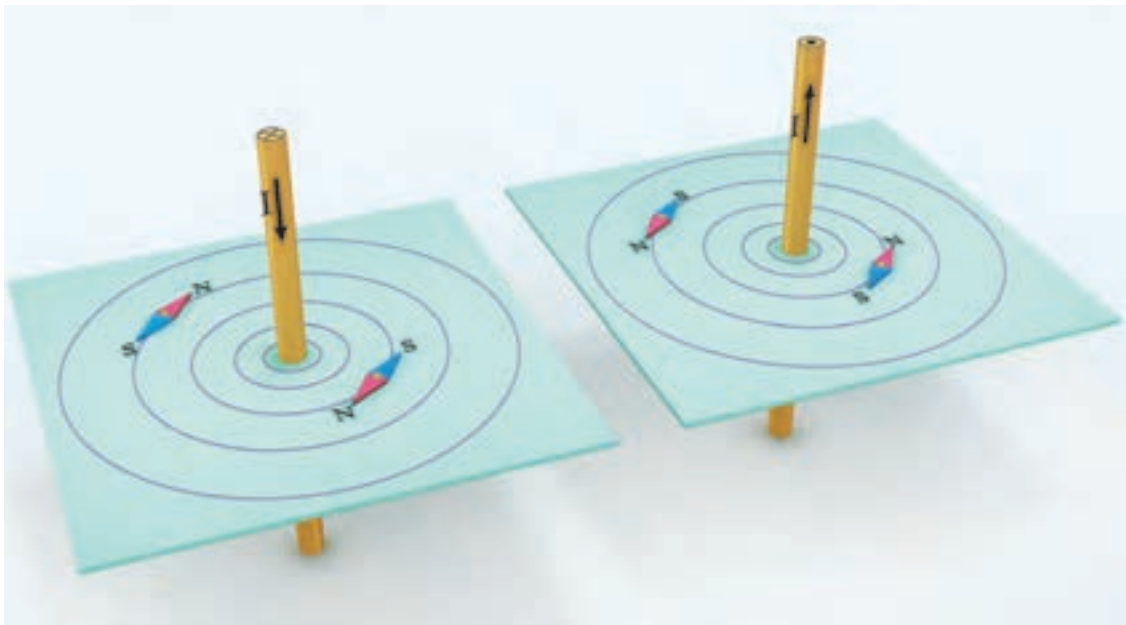


شکل ۸ - ۱

## ۴ - ۱ - میدان مغناطیسی اطراف هادی حامل

### جریان الکتریکی

جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی تولید می‌کند. اوستاد 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 - 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 ۹-۱

شست<sup>۱</sup> نیز استفاده کرد. برای این منظور مطابق شکل (۱۰-۱) باید شست دست راست را در جهت جریان الکتریکی هادی قرار داد تا بقیه انگشتان به صورت بسته، جهت میدان الکترومغناطیسی را نشان دهند.

مشاهده می کنید مانند جهت جریان می توان جهت میدان مغناطیسی را نیز به کمک نقطه (•) و ضربدر (X) مشخص کرد.

جهت میدان الکترومغناطیسی به جهت جریان الکتریکی بستگی دارد.

### ۵-۱- جهت میدان الکترومغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی

برای تعیین جهت میدان الکترومغناطیسی اطراف هادی حامل جریان الکتریکی علاوه بر استفاده از عقربه مغناطیسی مطابق شکل (۹-۱) می توان از قانون



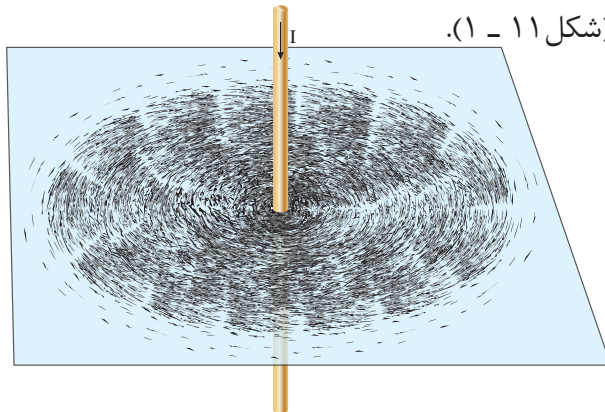
شکل ۱۰-۱



## ۶-۱- چگالی فوران مغناطیسی اطراف یک

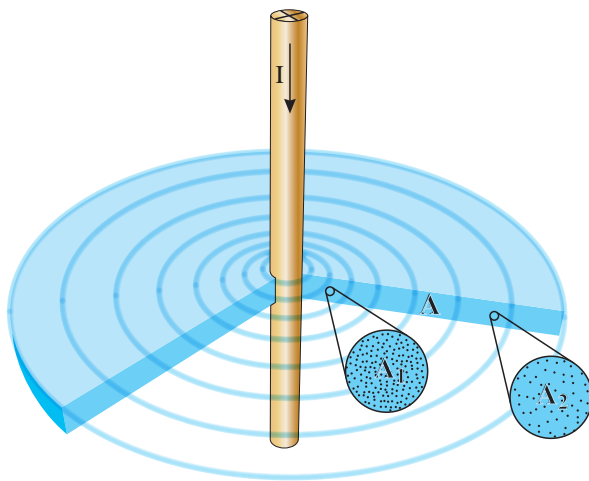
### هادی حامل جریان الکتریکی

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 ۱۱-۱).



شکل ۱۱-۱

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 (۱۲-۱) نشان داده شده است.



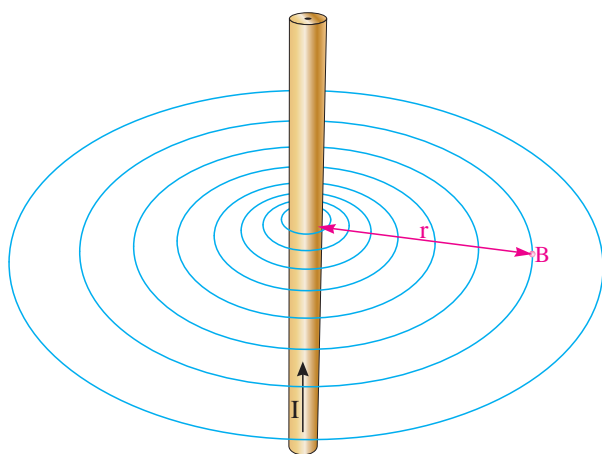
شکل ۱۲-۱

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.

## ۷-۱- مقدار چگالی فوران مغناطیسی اطراف

### هادی حامل جریان الکتریکی

آمپر<sup>۱</sup> 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 (۵-۱) را برای تعیین مقدار چگالی فوران مغناطیسی  $B$  نقطه‌ای به فاصله  $r$  از یک هادی حامل جریان به شدت  $I$  را بر اساس شکل (۱۳-۱) ارائه کردند.



شکل ۱۳-۱



$$B = k \frac{I}{r} \quad (۱-۵)$$

حل:

- واحد فاصله بر حسب متر تبدیل می‌شود.

$$\frac{1m}{r} = \frac{100cm}{1cm}$$

$$r = \frac{1 \times 1}{100} = 0.01m$$

- چگالی میدان مغناطیسی از رابطه (۵ - ۱) به دست می‌آید:

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

$$B = 2 \times 10^{-7} \times \frac{10}{0.01} = 2 \times 10^{-4} \left[ \frac{wb}{m^2} \right] = [T]$$

- واحد چگالی فوران مغناطیسی به گوس تبدیل

$$\frac{1T}{2 \times 10^{-4} T} = \frac{10^4 G}{B}$$

$$B = \frac{2 \times 10^{-4} \times 10^4}{1} = 2[G]$$

در این رابطه:

B چگالی فوران میدان مغناطیسی

بر حسب  $\left[ \frac{wb}{m^2} \right]$

K ضریبی است که به محیط اطراف هادی بستگی

دارد و برای هوا مقدار آن  $2 \times 10^{-7}$  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 - ۱ - چگالی فوران میدان مغناطیسی در

نقطه‌ای به فاصله ۱ cm از هادی حامل جریان ۱۰ A

چند گوس است؟

می‌شود:

آمپر



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

۸ - ۱ - میدان الکترومغناطیسی سیم پیچ

حامل جریان الکتریکی

هر نقطه از اطراف هادی متغیر و کم است. اگر هادی

حامل جریان الکتریکی به صورت سیم پیچ<sup>۱</sup> در آورده

شود ضمن اینکه میدان الکترو مغناطیسی در درون

سیم پیچ متمرکز می‌شود، چگالی فوران مغناطیسی B

نیز افزایش می‌یابد (شکل ۱۴ - ۱).

میدان الکترومغناطیسی هادی حامل جریان

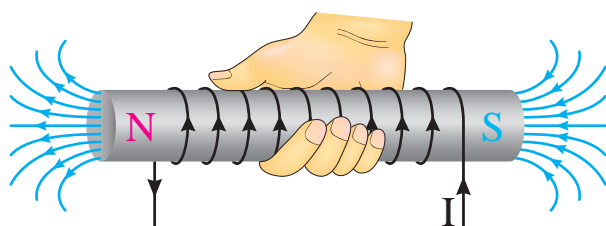
الکتریکی در سرتاسر دو طرف هادی توزیع می‌شود و

متمرکز نیست و مقدار چگالی فوران مغناطیسی B در

۱. Winding

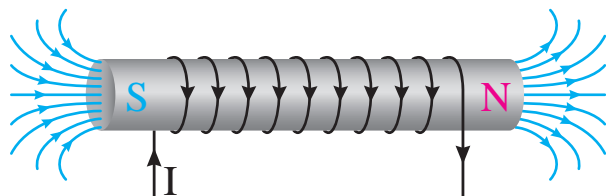
## ۹-۱- جهت میدان الکترومغناطیسی سیم پیچ حامل جریان الکتریکی

جهت میدان الکترومغناطیسی سیم پیچ حامل جریان الکتریکی از قاعده دست راست<sup>۲</sup> تعیین می شود. بدین منظور مطابق شکل (۱۶-۱) اگر انگشتان دست راست در جهت جریان الکتریکی سیم پیچ قرار گیرد، شست، جهت میدان الکترومغناطیسی را نشان می دهد. با تعیین جهت میدان الکترومغناطیسی محل قطب های N و S مشخص می شود. طبق قرارداد محل خروج فوران مغناطیسی را با حرف N و محل ورود آن را با حرف S نشان می دهند.



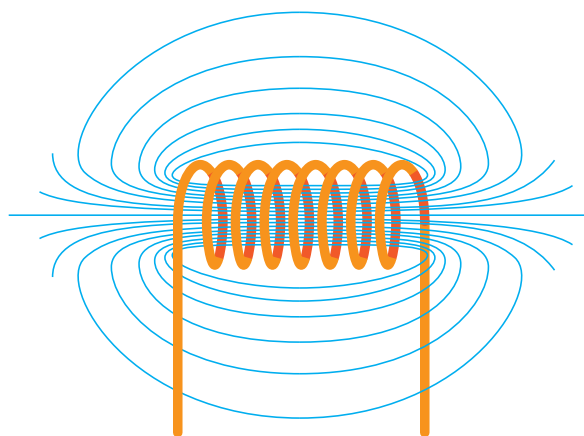
شکل ۱۶-۱

جهت میدان مغناطیسی سیم پیچ نیز تابع جهت جریان سیم پیچ است و با تغییر جهت جریان، جهت میدان مغناطیسی تغییر می کند (شکل ۱۷-۱).



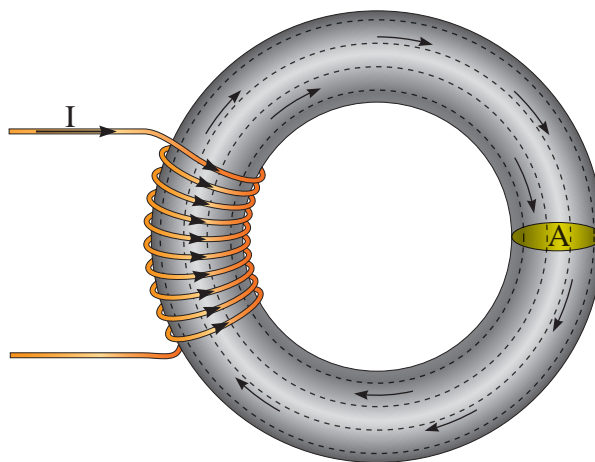
شکل ۱۷-۱

مثال ۴-۱- سیم پیچ حامل جریان الکتریکی شکل (۱۸-۱) میدان الکترومغناطیسی با فوران mwb<sup>۳</sup> در هسته تولید می کند. چگالی فوران مغناطیسی در هسته چند تسلا است؟



شکل ۱۴-۱

با قرار دادن سیم پیچ بر روی یک هسته از جنس مواد فرومغناطیسی<sup>۱</sup> مطابق شکل (۱۵-۱) و عبور جریان الکتریکی از آن، میدان الکترومغناطیسی با چگالی B بیشتری نسبت به سیم پیچ با هسته هوا ایجاد می شود. هسته فرومغناطیس باعث می شود، میدان الکترومغناطیسی درون سیم پیچ متمرکزتر شود، لذا چگالی فوران مغناطیسی افزایش می یابد.



شکل ۱۵-۱

۱. مواد فرومغناطیسی خواص آهن ربایی از خود نشان می دهند. آهن و آلیاژهای آهن، مواد فرومغناطیس هستند. ۲. Right-Hand Rule

- ۳- جهت میدان الکترومغناطیس سیم پیچ حامل جریان الکتریکی از ..... تعیین می شود.
- ۴- محل خروج فوران مغناطیسی را با حرف ..... نشان می دهند.

### پرسش های صحیح، غلط

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

☐ صحیح ☐ غلط

- ۲- محل ورود فوران مغناطیسی را با حرف N نشان می دهند.

☐ صحیح ☐ غلط

- ۳- جهت میدان الکترومغناطیس سیم پیچ، تابع جهت جریان الکتریکی است.

☐ صحیح ☐ غلط

### پرسش های تشریحی

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

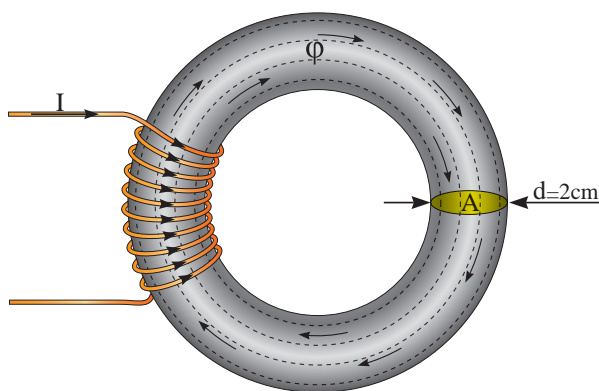
- ۲- جهت میدان الکترومغناطیسی اطراف هادی های شکل های (۱۹ - ۱) و (۲۰ - ۱) را به دست آورید.



شکل ۲۰ - ۱



شکل ۱۹ - ۱



شکل ۱۸ - ۱

حل:

- چگالی فوران از رابطه  $B = \frac{\phi}{A}$  به دست می آید. ابتدا واحد فوران را به وبر تبدیل می کنیم و سپس مساحت سطح مقطع A را محاسبه می کنیم:

$$\frac{1 \text{ wb}}{\phi} = \frac{10^{-3} \text{ mwb}}{3/14} \Rightarrow \phi = \frac{3/14 \times 1}{10^{-3}} = 3/14 \times 10^{-3} [\text{wb}]$$

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

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

$$\frac{1 \text{ m}^2}{A} = \frac{10^{-4} \text{ cm}^2}{3/14} \Rightarrow A = \frac{1 \times 3/14}{10^{-4}} = 3/14 \times 10^{-4} [\text{m}^2]$$

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

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

### پرسش ۲ - ۱

### پرسش های کامل کردنی

- ۱- جریان الکتریکی میدان ..... تولید می کند.
- ۲- برای تعیین جهت میدان الکترومغناطیسی اطراف هادی حامل جریان علاوه بر استفاده از ..... می توان از قانون ..... نیز استفاده کرد.

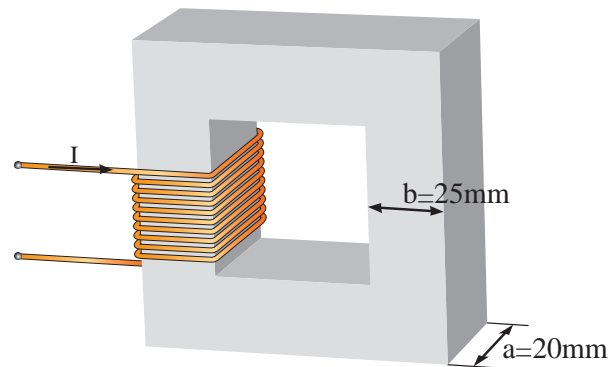
۳- میدان مغناطیسی هادی حامل جریان الکتریکی و سیم پیچ حامل جریان الکتریکی را با یکدیگر مقایسه کنید.

۴- نقش هسته فرومغناطیس را در سیم پیچ شرح دهید.

## تمرین ۲-۱

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

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



شکل ۲۱-۱

## ۱۰-۱ نیروی محرکه مغناطیسی سیم پیچ

### حامل جریان الکتریکی

علت ایجاد میدان الکترومغناطیسی شکل (۱۴-۱) عبور شدت جریان الکتریکی از حلقه های سیم پیچ است. میدان الکترومغناطیسی حلقه ها با یکدیگر جمع می شود و میدان الکترومغناطیسی قوی تولید خواهد شد. حاصل ضرب شدت جریان الکتریکی در

تعداد حلقه های سیم پیچ را نیروی محرکه مغناطیسی<sup>۱</sup> گویند و از رابطه (۶-۱) به دست می آید.

$$\theta = NI \quad (۱-۶)$$

در این رابطه:

$\theta$  نیروی محرکه مغناطیسی بر حسب آمپر دور<sup>۲</sup>  
[A.T]

N تعداد حلقه های سیم پیچ بر حسب دور

I شدت جریان الکتریکی سیم پیچ بر حسب  
آمپر [A]

مقدار نیروی محرکه مغناطیسی تابع شدت جریان الکتریکی سیم پیچ و تعداد حلقه های آن است.

مثال ۵-۱ از یک سیم پیچ با ۵۰۰۰ دور، جریان الکتریکی ۰/۱ آمپر می گذرد. نیروی محرکه مغناطیسی آن چند آمپر است؟  
حل:

$$\theta = NI$$

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

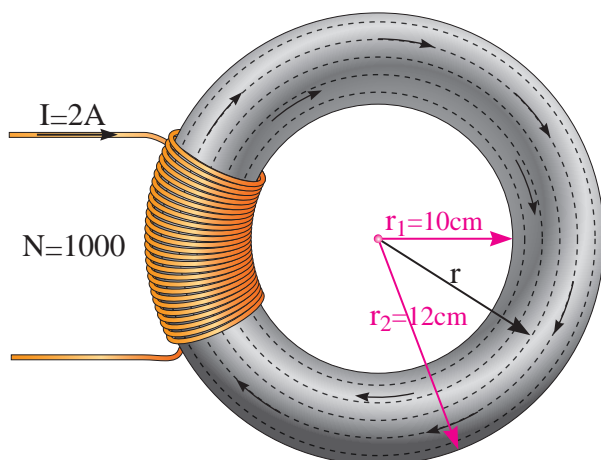
## ۱۱-۱ شدت میدان مغناطیسی<sup>۳</sup>

فوران میدان مغناطیسی یک سیم پیچ حامل جریان از تمام نقاط سطح مقطع هسته آن می گذرد. خطوط نیروی میدان مغناطیسی به موازات یکدیگر، طول مسیر هسته را طی می کنند و یکدیگر را قطع نمی کنند. شکل (۲۲-۱)

۲. در برخی کتب دور را به عنوان واحد نمی پذیرند و واحد نیروی محرکه مغناطیسی را [A] معرفی می کنند.

۱. Magneto Motive Force  
۳. Magnetic Field Intensity

مثال ۶-۱ - شدت میدان مغناطیسی شکل (۲۳-۱) را به دست آورید.



شکل ۲۳-۱

حل:

- شدت میدان مغناطیسی H از رابطه (۷-۱)

به دست می آید:

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

- طول متوسط هسته  $\ell_C$  به شکل دایره است؛ برای محاسبه آن باید ابتدا شعاع متوسط هسته را به دست

آورد:

$$r = \frac{r_1 + r_2}{2} = \frac{10 + 12}{2} = 11 \text{ cm}$$

- محیط دایره از رابطه زیر به دست می آید:

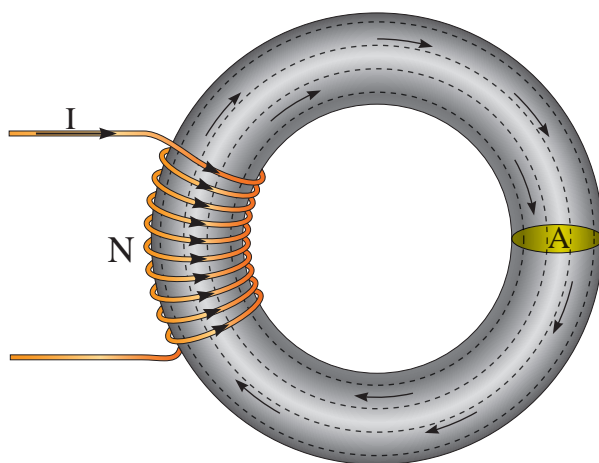
$$\ell = 2\pi r$$

$$\ell_C = 2 \times 3.14 \times 11 = 69.08 \text{ cm}$$

- واحد طول متوسط را به متر تبدیل می کنیم:

$$\frac{1 \text{ m}}{\ell_C} = \frac{100 \text{ cm}}{69.08 \text{ cm}}$$

$$\ell_C = \frac{69.08 \times 1}{100} = 0.6908 \text{ m}$$



شکل ۲۲-۱

نسبت نیروی محرکه مغناطیسی  $\theta$  به طول متوسط هسته  $\ell_C$  را «شدت میدان مغناطیسی» گویند و آن را با H نمایش می دهند و از رابطه (۷-۱) به دست می آید.

$$H = \frac{\theta}{\ell_C} = \frac{NI}{\ell_C} \quad (۷-۱)$$

در این رابطه:

H شدت میدان مغناطیسی بر حسب آمپر دور بر متر  $\left[ \frac{\text{A.turn}}{\text{m}} \right]$   
N تعداد حلقه های سیم پیچ

طول متوسط هسته بر حسب متر [m]

در رابطه (۷-۱) تعداد حلقه های سیم پیچ N و طول متوسط هسته  $\ell_C$  مقادیر ثابت هستند و معمولاً این رابطه به صورت (۸-۱) نوشته می شود:

$$H = \frac{N}{\ell_C} \cdot I \quad (۸-۱)$$

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

- اکنون شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۷ - ۱) قابل محاسبه است.

$$H = \frac{NI}{\ell_c} = \frac{1000 \times 2}{0.6908} = 2895/19 \left[ \frac{A.turn}{m} \right]$$

### پرسش ۳ - ۱

#### پرسش‌های کامل کردنی

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

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

۳ - شدت میدان مغناطیسی از رابطه ..... به‌دست می‌آید.

#### پرسش‌های صحیح، غلط

۱ - حاصل ضرب شدت جریان الکتریکی در تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ را نیروی محرکه مغناطیسی گویند.

☐ غلط ☐ صحیح

۲ - نسبت نیروی محرکه مغناطیسی به جریان الکتریکی سیم‌پیچ، شدت میدان مغناطیسی نام دارد.

☐ غلط ☐ صحیح

#### پرسش تشریحی

۱ - رابطه نیروی محرکه مغناطیسی را بنویسید و کمیت‌های آن را شرح دهید.

۲ - شدت میدان مغناطیسی را تعریف کنید.

### تمرین ۳ - ۱

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

۲ - شدت میدان مغناطیسی در هسته به طول ۲۰ cm برابر  $\left[ \frac{A.turn}{m} \right]$  ۲۰۰۰ است. اگر سیم‌پیچ این هسته دارای ۴۰۰۰ دور باشد شدت جریان الکتریکی آن چند آمپر است؟

### ۱۲ - ۱ - ضریب نفوذ مغناطیسی

نسبت چگالی فوران مغناطیسی B به شدت میدان مغناطیسی H را «ضریب نفوذ مغناطیسی»<sup>۱</sup> تعریف می‌کنند و آن را با  $\mu$  نمایش می‌دهند و از رابطه (۹ - ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (۹ - ۱)$$

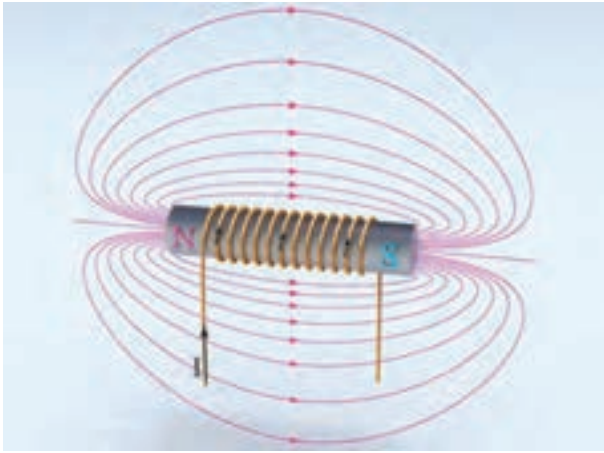
در این رابطه:

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

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

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

واحد ضریب نفوذ مغناطیسی  $\mu$  از نسبت واحد چگالی میدان مغناطیسی  $\left[ \frac{wb}{m^2} \right]$  به واحد شدت میدان مغناطیسی  $\left[ \frac{A.turn}{m} \right]$  به‌دست می‌آید.



شکل ۲۵-۱

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

**مثال ۷-۱ - 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 (۷-۱) به دست

$$H = \frac{NI}{\ell_c} = \frac{1000 \times 0.001}{0.2} = 5 \left[ \frac{A \cdot \text{turn}}{m} \right] \quad \text{می‌آید:}$$

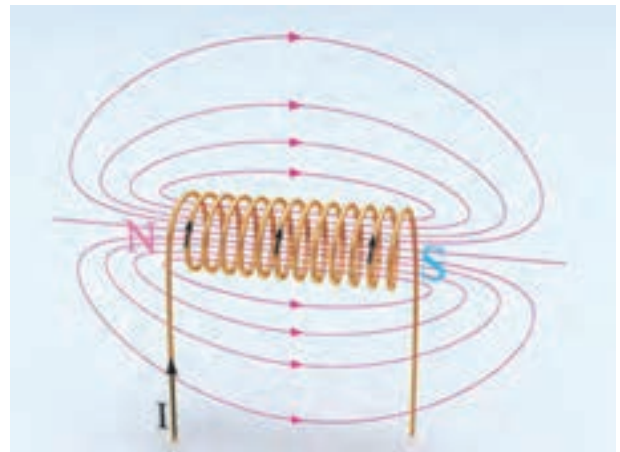
ضریب نفوذ مغناطیسی برای هسته فولادی از رابطه (۹-۱) به دست می‌آید:

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{0.5}{5} = 0.1 \left[ \frac{wb}{A \cdot \text{turn} \cdot m} \right]$$

$$[\mu] = \frac{\frac{wb}{m^3}}{\frac{A \cdot \text{turn}}{m}} = \frac{wb \cdot m}{A \cdot \text{turn} \cdot m^3} = \left[ \frac{wb}{A \cdot \text{turn} \cdot m} \right]$$

ضریب نفوذ مغناطیسی  $\mu$  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.<sup>۱</sup>

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



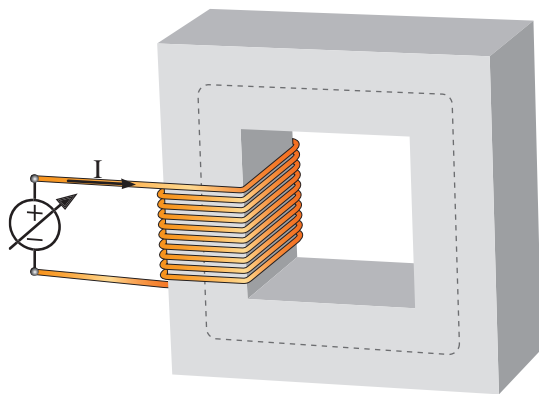
شکل ۲۴-۱

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

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

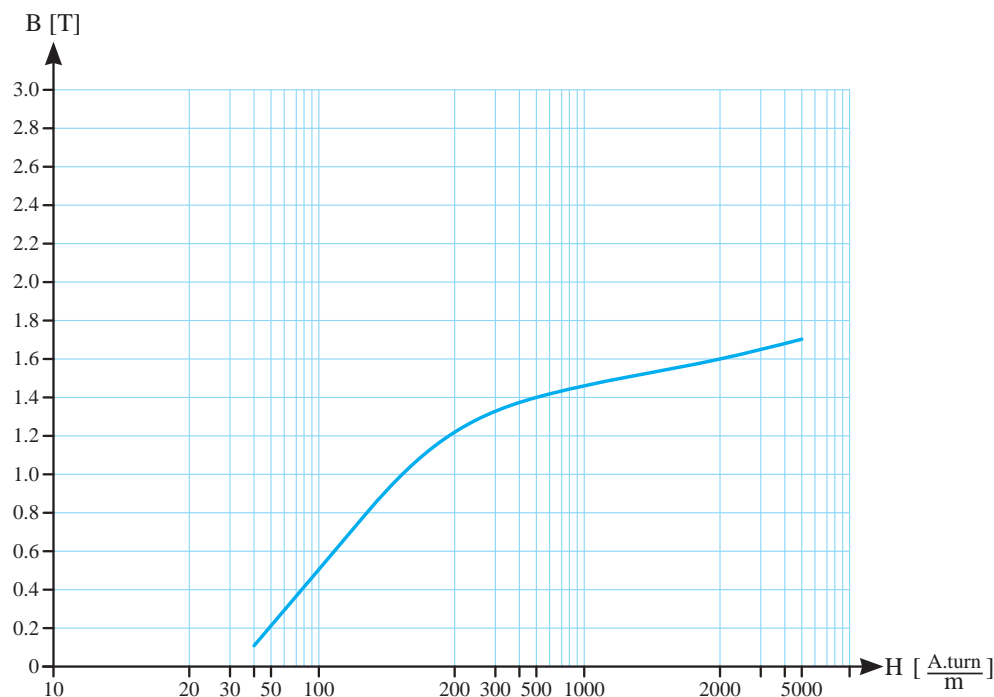


ورق شکل (۲۶ - ۱) عبور داده شده است.



شکل ۲۶-۱

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 - ۱) به دست می‌آید. این منحنی، «منحنی مغناطیسی» یا «منحنی اشباع» نام دارد.



شکل ۲۷-۱ منحنی مغناطیسی فولاد ورق

مثال ۸-۱- اگر هسته سیم‌پیچ مثال ۷-۱ از هوا انتخاب شود، چگالی فوران مغناطیسی به  $6 \times 10^{-6}$  وبر بر مترمربع کاهش می‌یابد. ضریب نفوذ مغناطیسی هوا چقدر است؟ ضریب نفوذ مغناطیسی فولاد را با هوا مقایسه کنید.

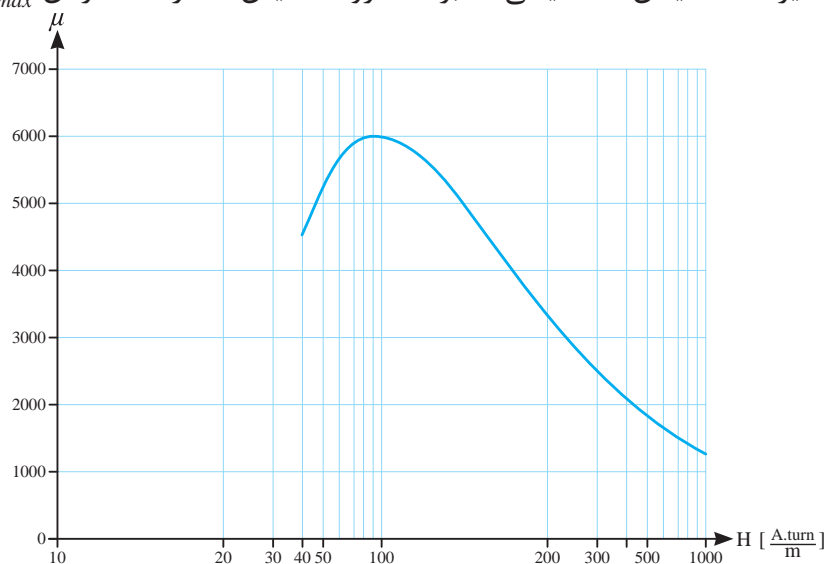
$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{6 \times 10^{-6}}{5} = 1/2 \times 10^{-6} \left[ \frac{wb}{A.turn.m} \right]$$

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

### ۱۳-۱- ضریب نفوذ مغناطیسی سیم‌پیچ با هسته فرومغناطیس

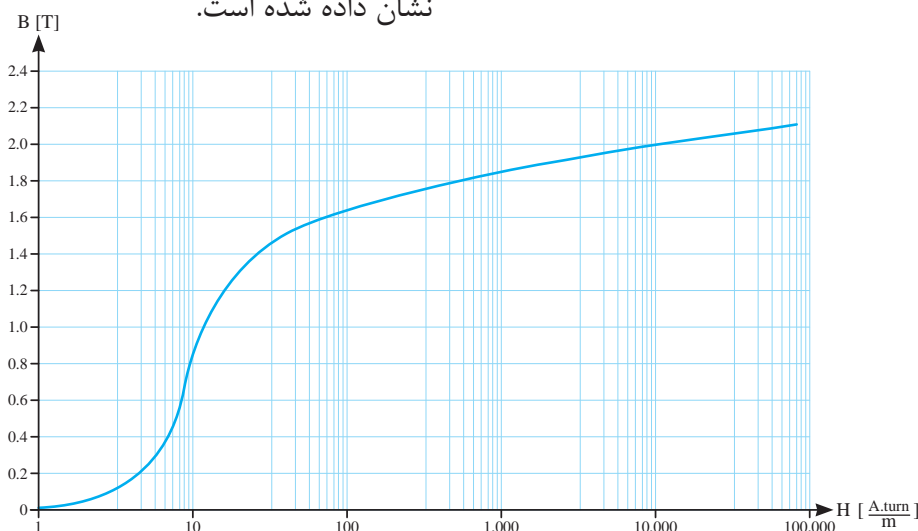
برای نشان دادن چگونگی رفتار ضریب نفوذ مغناطیسی  $\mu$  در هسته فرومغناطیس، جریان مستقیم DC از سیم‌پیچ با هسته فرومغناطیسی از جنس فولاد

ضریب نفوذ مغناطیسی  $\mu$  هسته فرومغناطیس در شکل (۲۸ - ۱) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد ضریب نفوذ مغناطیسی مواد فرومغناطیس مقدار ثابتی ندارد. منظور از مقدار ضریب نفوذ مغناطیسی  $\mu$  مواد فرومغناطیس مقدار حداکثر آن  $\mu_{max}$  است.



شکل ۲۸ - ۱

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



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

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  $\mu$  عددی ثابت نیست. تاثیر شدت میدان مغناطیسی  $H$  بر

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

مقدار B به دست می آید:

$$H = 1000 \left[ \frac{A \cdot \text{turn}}{m} \right] \xrightarrow[\text{شکل (۱-۲۹)}]{\text{منحنی مغناطیسی}} B = 1/85 [T]$$

چگالی فوران مغناطیسی هسته از جنس فولاد الکتریکی M-5 بیشتر از فولاد ورق شده است. در صورتی که 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 ۱-۱۱ -** شدت جریان الکتریکی سیم پیچ ۱۰۰۰ حلقه ای با هسته فولاد ورق به طول متوسط ۱۰ سانتی متر و چگالی میدان مغناطیسی ۱/۲ وبر به مترمربع چند آمپر است؟  
حل:

- از منحنی شکل (۱-۲۷) شدت میدان مغناطیسی لازم برای تولید چگالی فوران مغناطیسی ۱/۲ وبر بر مترمربع به دست می آید:

$$B = 1/2 [T] \xrightarrow[\text{شکل (۱-۲۷)}]{\text{منحنی مغناطیسی}} H = 200 \left[ \frac{A \cdot \text{turn}}{m} \right]$$

- جریان سیم پیچ از رابطه (۱-۷) به دست می آید.

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

$$I = \frac{H \cdot \ell_c}{N} = \frac{200 \times 10 \times 10^{-2}}{1000} = 0.02 [A]$$

در عمل از منحنی مغناطیسی برای تعیین B بر حسب H یا H بر حسب B می توان استفاده کرد. مثال های زیر این موضوع را روشن می کند.

**مثال ۱-۹ -** یک سیم پیچ ۱۰۰ حلقه ای حامل جریان الکتریکی ۱ آمپر بر روی یک هسته از جنس فولاد ورق به طول متوسط ۱۰ سانتی متر قرار دارد. چگالی فوران مغناطیسی در هسته چند تسلا است؟  
حل:

- شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۱-۷) به دست می آید:

$$H = \frac{NI}{\ell_c} = \frac{100 \times 1}{10 \times 10^{-2}} = 1000 \left[ \frac{A \cdot \text{turn}}{m} \right]$$

- از منحنی مغناطیسی شکل (۱-۲۷) به ازای H=۱۰۰۰ مقدار B به دست می آید.

$$H = 1000 \left[ \frac{A \cdot \text{turn}}{m} \right] \xrightarrow[\text{شکل (۱-۲۷)}]{\text{منحنی مغناطیسی}} B = 1/5 [T]$$

**مثال ۱-۱۰ -** اگر هسته سیم پیچ مثال ۱-۹ از جنس فولاد الکتریکی M-5 انتخاب شود، چگالی فوران مغناطیسی هسته چند تسلا می شود؟ از مقایسه جواب های این دو مثال چند نتیجه ای به دست می آید؟  
حل:

- تعداد حلقه، جریان الکتریکی سیم پیچ و طول هسته تغییر نکرده است؛ لذا شدت میدان مغناطیسی ثابت می ماند. یعنی:

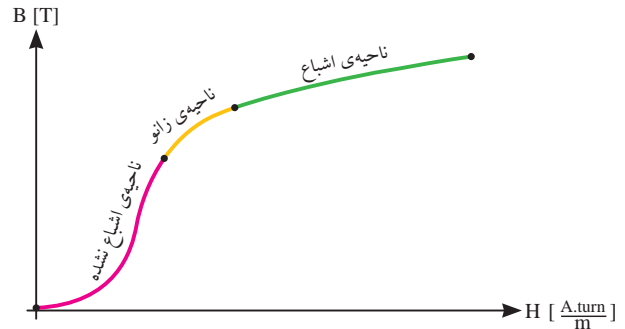
$$H = 1000 \left[ \frac{A \cdot \text{turn}}{m} \right]$$

- از منحنی مغناطیسی (۱-۲۹) به ازای H=۱۰۰۰

## ۱۴- ۱- نواحی منحنی مغناطیسی مواد

### فرومغناطیس

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



شکل ۱-۳۰

**ناحیه اشباع نشده<sup>۱</sup>:** 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  $\mu$  هسته زیاد است.

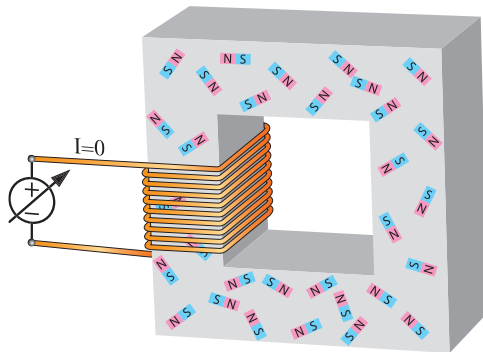
**ناحیه اشباع<sup>۲</sup>:** در این ناحیه تغییر شدت میدان مغناطیسی  $H$  تاثیر چندانی بر چگالی فوران مغناطیسی  $B$  نمی‌گذارد و منحنی مغناطیسی تقریباً تخت می‌شود. در ناحیه اشباع ضریب نفوذ مغناطیسی  $\mu$  کاهش می‌یابد و به سمت عدد ثابت  $\frac{wb}{A \cdot \text{turn} \cdot m} \times 10^{-7} \times 4\pi$  میل می‌کند.

**ناحیه زانو<sup>۳</sup>:** 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.

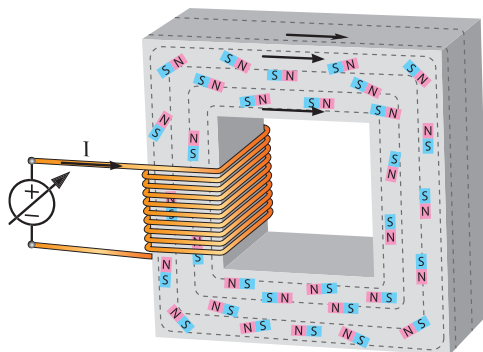
هسته فرومغناطیسی که سیم‌پیچ آن فاقد جریان الکتریکی است در شکل (۱-۳۱) نشان داده شده است.



شکل ۱-۳۱

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 (۱-۳۲)

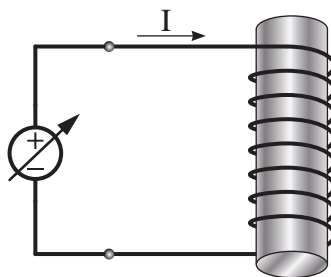


شکل ۱-۳۲

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.

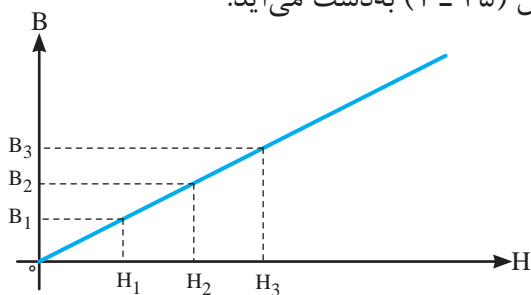
### ۱۵-۱- ضریب نفوذ مغناطیسی سیم‌پیچ بدون هسته در خلأ

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



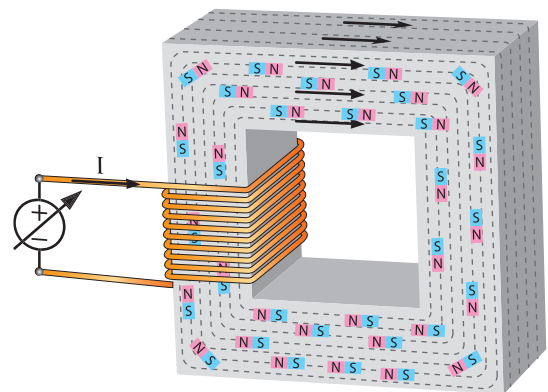
شکل ۳۴-۱

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  $H$  سیم‌پیچ رسم شود، نمودار خطی شکل (۳۵-۱) به دست می‌آید.



شکل ۳۵-۱

با افزایش بیشتر جریان الکتریکی سیم‌پیچ، شدت میدان مغناطیسی  $H$  بیشتر می‌شود و مولکول‌های مغناطیسی بیشتری در هسته منظم می‌شوند تا این که 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 ۳۳-۱).

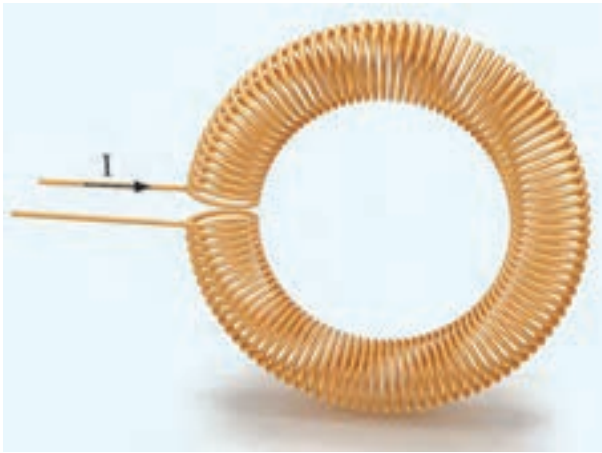


شکل ۳۳-۱

پس از اشباع هسته در صورتی که 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



شکل ۳۶-۱

حل:

- شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۱۰ - ۱) به دست

$$\mu_o = \frac{B_o}{H_o} \quad \text{می آید.}$$

$$H_o = \frac{B_o}{\mu_o} = \frac{0.6}{4\pi \times 10^{-7}} = 50000 \left[ \frac{A.turn}{m} \right]$$

- جریان سیم پیچ از رابطه (۷ - ۱) به دست می آید.

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

$$I = \frac{H \cdot \ell_c}{N} = \frac{50000 \times 10 \times 10^{-2}}{1000} = 50 [A]$$

**مثال ۱۳-۱** - اگر هسته سیم پیچ مثال (۱۲ - ۱) از فولاد الکتریکی M-5 فرض شود، جریان الکتریکی سیم پیچ چند آمپر می شود؟

حل:

- ابتدا از منحنی شکل (۲۹ - ۱) شدت میدان مغناطیسی برای تولید چگالی میدان ۱/۶ وبر بر مترمربع به دست می آید.

$$B = 1/6 \frac{wb}{m^2} \xrightarrow[\text{شکل (۲۷-۱)}]{\text{منحنی مغناطیسی}} H = 60 \left[ \frac{A.turn}{m} \right]$$

در شکل (۳۵ - ۱) مشاهده می شود 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» می باشد. 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 « $\mu_o$ » نشان می دهند و از رابطه (۱۰ - ۱) به دست می آید.

$$\mu_o = \frac{B_o}{H_o} \quad (10 - 1)$$

در این رابطه:

B چگالی فوران مغناطیسی در خلأ

H شدت میدان مغناطیسی در خلأ

$\mu_o$  ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ

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

$$\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \left[ \frac{wb}{A.turn.m} \right] \quad (11 - 1)$$

**مثال ۱۲-۱** - سیم پیچی بدون هسته در خلأ دارای ۱۰۰۰ حلقه و طول متوسط ۱۰ سانتی متر در شکل (۳۶ - ۱) نشان داده شده است. چگالی فوران مغناطیسی درون این سیم پیچ در خلأ ۰/۶ وبر بر متر مربع اندازه گیری شده است. جریان الکتریکی سیم پیچ چند آمپر است؟

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

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

$$I = \frac{H \cdot \ell_c}{N} = \frac{60 \times 10 \times 10^{-2}}{1000} = 0.006 \text{ [A]}$$

## فعالیت

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

## ۱۶ - ۱ - ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی

ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ 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  $\mu$  به ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ  $\mu_0$  را «ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی»<sup>۱</sup> گویند و آن را با  $\mu_r$  نمایش می‌دهند که از رابطه (۱۲ - ۱) به‌دست می‌آید.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (12 - 1)$$

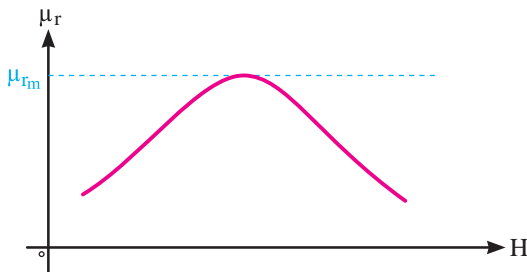
ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی، نسبت دو ضریب نفوذ مغناطیسی است و بدون واحد است. معمولاً کارخانه‌های تولیدکننده فولاد مغناطیسی، منحنی ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی  $\mu_r$  بر حسب شدت میدان مغناطیسی  $H$  تولیدات خود را ارائه می‌کنند تا مصرف‌کننده با استفاده از آن ضریب نفوذ مغناطیسی

$\mu$  را از رابطه (۱۳ - ۱) به‌دست آورد.

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (13 - 1)$$

ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی  $\mu_r$  نشان می‌دهد جسم چند برابر خلأ نفوذپذیری مغناطیسی دارد.

منحنی ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی  $\mu_r$  بر حسب شدت میدان مغناطیسی  $H$  برای فولاد ورق در شکل (۳۷ - ۱) نشان داده است.



شکل ۳۷ - ۱

منحنی شکل (۳۷ - ۱) نشان می‌دهد ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی  $\mu_r$  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  $\mu_r$  علاوه بر این که 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  $\mu_r$  را کاهش می‌دهد.

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



- مواد دیامغناطیس<sup>۱</sup>

- مواد پارامغناطیس<sup>۲</sup>

- مواد فرومغناطیس<sup>۳</sup>

است با:

$$H = \frac{NI}{\ell_C} = \frac{252 \times 0.1}{28 \times 10^{-2}} = 90 \left[ \frac{A.turn}{m} \right]$$

از منحنی شکل (۲۸ - ۱) ضریب نفوذ نسبی برابر

است با:

$$H = 90 \left[ \frac{A.turn}{m} \right] \xrightarrow{\text{منحنی شکل (۲۸ - ۱)}} \mu_r = 6000$$

از رابطه (۱۳ - ۱) ضریب نفوذ مغناطیسی برابر

است با:

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

$$\mu = 4\pi \times 10^{-7} \times 6000 = 7.5 \times 10^{-3} \left[ \frac{wb}{A.turn.m} \right]$$

### پرسش ۴ - ۱

#### پرسش‌های کامل کردنی

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

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

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

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

۵ - واحد ضریب نفوذ مغناطیسی ..... است.

#### پرسش‌های صحیح، غلط

۱ - ضریب نفوذ مغناطیسی مواد فرومغناطیس مقدار ثابتی دارد.

☐ غلط

☐ صحیح

### فعالیت

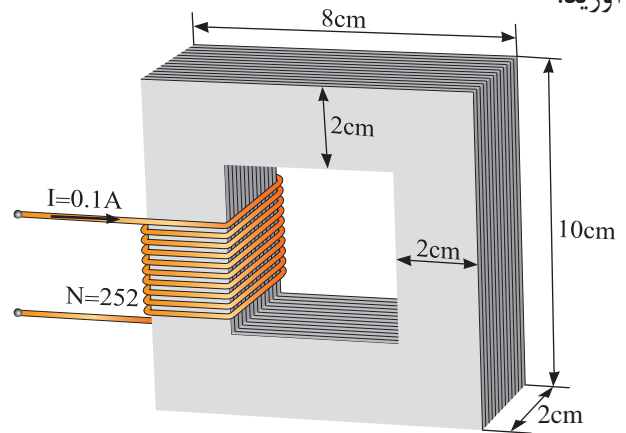
۱ - افزایش دمای هسته و فرکانس جریان سیم‌پیچ

چگونه باعث کاهش ضریب نفوذ مغناطیسی هسته

می‌شوند؟

مثال ۱۴ - ۱ - ضریب نفوذ مغناطیسی  $\mu$  هسته

شکل (۳۸ - ۱) که از جنس فولاد ورق است را به دست آورید.



شکل ۳۸ - ۱

حل:

محیط بیرونی هسته برابر است با:

$$\ell_{C_1} = 2(10 + 8) = 36 [cm]$$

محیط درونی هسته برابر است با:

$$\ell_{C_2} = 2(6 + 4) = 20 [cm]$$

محیط متوسط برابر است با:

$$\ell_C = \frac{36 + 20}{2} = 28 [cm]$$

شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۷ - ۱) برابر

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

☐ غلط ☐ صحیح

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

☐ غلط ☐ صحیح

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

☐ غلط ☐ صحیح

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

☐ غلط ☐ صحیح

### پرسش‌های تشریحی

۱ - ضریب نفوذ مغناطیسی را تعریف کنید.

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

۳ - متداول‌ترین مواد فرومغناطیس از چه فلزاتی ساخته می‌شوند؟

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

۵ - ناحیه اشباع نشده منحنی مغناطیسی را تعریف کنید.

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

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

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

### تمرین ۴ - ۱

۱ - هسته فرومغناطیسی با ضریب نفوذ مغناطیسی  $\frac{wb}{A \cdot \text{turn.m}} = 0.5$  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 - 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 - هسته با جنس فولاد ورق

ب - هسته با جنس فولاد الکتریکی M-5

ج - از مقایسه نتایج بندهای الف و ب چه نتیجه‌ای به دست می‌آید؟

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

الف - بدون هسته در خلأ

ب - با هسته از جنس فولاد الکتریکی M-5

ج - از مقایسه نتایج بندهای الف و ب چه نتیجه‌ای به دست می‌آید؟

۴ - ضریب نفوذ مغناطیسی  $\mu$  هسته شکل (۳۹-۱) که از جنس فولاد ورق است را به دست آورید.

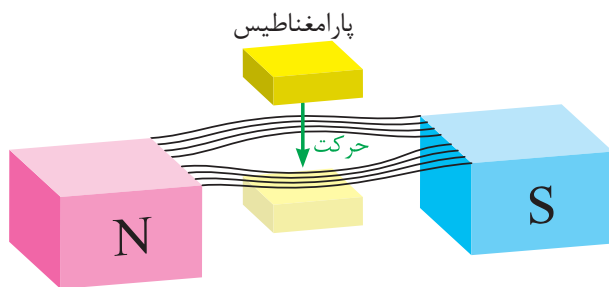
کمی از یک بیشتر است. آلومینیم، هوا و پلاتین از این مواد هستند.

مواد پارامغناطیس، مولکول‌های مغناطیسی ضعیفی دارند؛ هنگامی که مواد پارامغناطیس در میدان مغناطیسی آهن‌ربای قوی مطابق شکل (۴۱ - ۱) قرار می‌گیرند:

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

- به طرف ناحیه قوی میدان مغناطیسی کشیده می‌شوند. عامل این حرکت نیروی جاذبه بین مولکول‌های مغناطیسی این مواد و میدان مغناطیسی است.

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

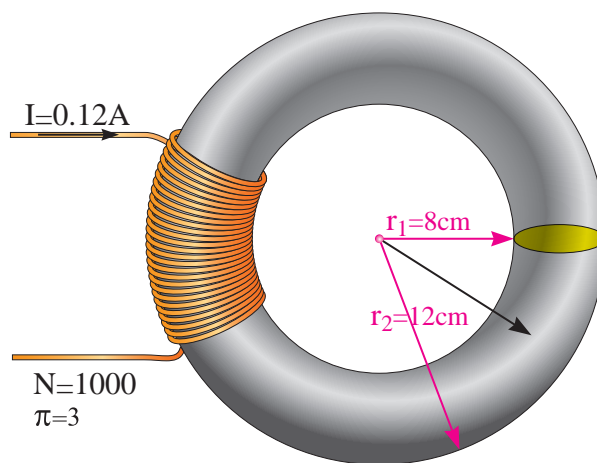


شکل ۴۱ - ۱

### ۳ - ۱۶ - ۱ - مواد فرومغناطیس

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

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



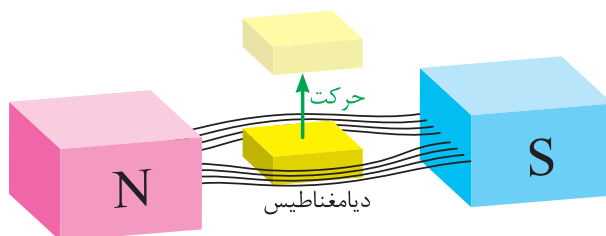
شکل ۳۹ - ۱

### ۱ - ۱۶ - ۱ - مواد دیامغناطیس

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

در مواد دیامغناطیس مولکول‌های مغناطیسی بوجود نمی‌آید. هنگامی که مواد دیامغناطیس در میدان مغناطیسی آهن‌ربای قوی مطابق شکل (۴۰ - ۱) قرار می‌گیرند:

- فوران مغناطیسی را از خود عبور نمی‌دهند.
- میدان مغناطیسی را غیر یکنواخت می‌کنند.
- از طرف میدان مغناطیسی دفع می‌شوند.



شکل ۴۰ - ۱

### ۲ - ۱۶ - ۱ - مواد پارامغناطیس

ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی  $\mu_r$  مواد پارامغناطیس

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

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

- 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»<sup>۱</sup> نامیده می‌شود بالاتر برود هم‌سویی مولکول‌های مغناطیسی از بین می‌رود و این مواد پارامغناطیس می‌شوند.<sup>۲</sup>

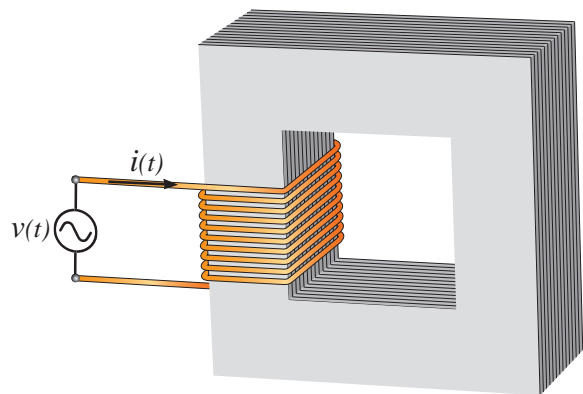
در جدول (۱ - ۱) ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی  $\mu_r$  چند نمونه از مواد در ناحیه اشباع نشده با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

مواد فرومغناطیس		مواد پارامغناطیس		مواد دیامغناطیس	
ماده	$\mu_r$	ماده	$\mu_r$	ماده	$\mu_r$
آهن بدون آلیاژ	تا ۶۰۰۰	هوا	۱/۰۰۰۰۰۰۰۴	جیوه	۰/۹۹۹۷۵
فولاد الکتریکی	تا ۶۵۰۰	اکسیژن	۱/۰۰۰۰۰۰۰۳	نقره	۰/۹۹۹۹۸۱
آهن نیکل آلیاژ	۳۰۰۰۰۰	آلومینیم	۱/۰۰۰۰۰۰۲۲	قلع	۰/۹۹۹۸۸
فریت مغناطیسی	۱۰۰۰۰۰	پلاتین	۱/۰۰۰۰۰۰۳۶	آب	۰/۸۹۹۹۱

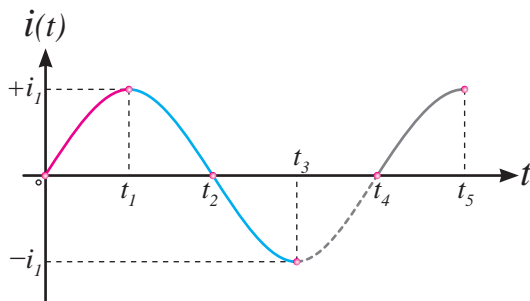
جدول ۱-۱

## ۱۷-۱ - حلقه هیستریزس

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



شکل ۴۲-۱

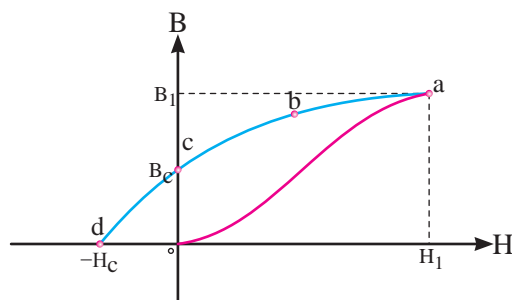


شکل ۴۳-۱

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

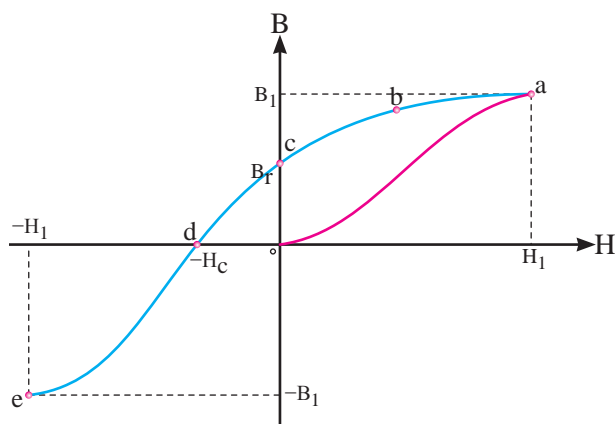
۲. برای آهن دمای کوری ۱۰۴۳ درجه کلون است.

۱. Curie



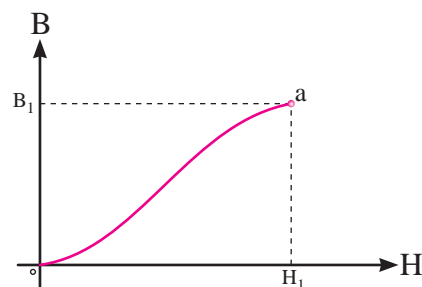
شکل ۱-۴۶

با افزایش شدت میدان مغناطیسی  $H$  در جهت وارونه، چگالی فوران مغناطیسی  $B$  هسته مطابق منحنی  $de$  در شکل (۱-۴۷) تغییر خواهد کرد.



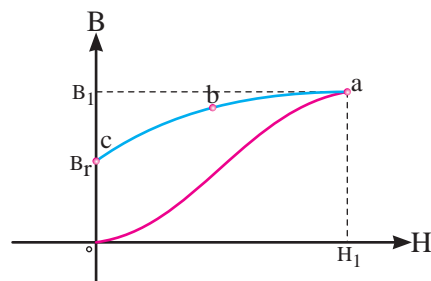
شکل ۱-۴۷

چگالی فوران مغناطیسی  $-B_1$  در نقطه  $e$  مربوط به شدت میدان مغناطیسی  $-H_1$  متناظر با  $-i_1$  است. بعد از زمان  $t_p$  با تغییر جریان الکتریکی  $i(t)$  شدت میدان مغناطیسی  $H$  تغییر خواهد کرد و منحنی  $B-H$  مسیر  $ef$  را مطابق شکل (۱-۴۸) دنبال خواهد کرد. تا با صفر شدن جریان الکتریکی در  $t_p$ ، شدت میدان مغناطیسی  $H$  صفر می شود و چگالی فوران مغناطیسی به  $-B_r$  می رسد.



شکل ۱-۴۴

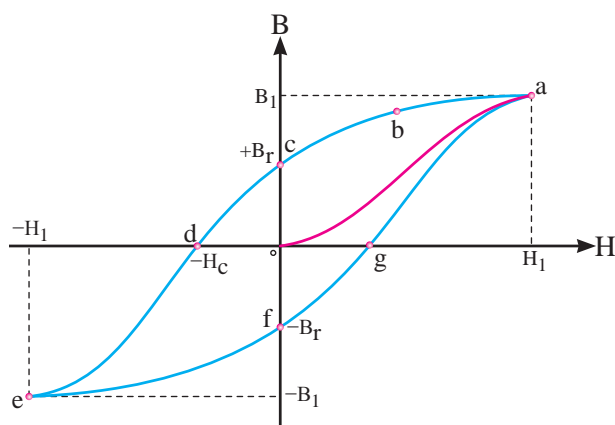
بعد از زمان  $t_p$  جریان الکتریکی  $i(t)$  رو به کاهش می گذارد و متناظر با آن شدت میدان مغناطیسی  $H$  نیز کاهش می یابد و منحنی مغناطیسی مسیر  $abc$  را مطابق شکل (۱-۴۵) دنبال خواهد کرد.



شکل ۱-۴۵

با صفر شدن جریان در  $t_p$ ، شدت میدان مغناطیسی  $H$  صفر می شود اما چگالی فوران مغناطیسی هسته به  $B_r$  می رسد. چگالی فوران مغناطیسی  $B_r$  «پس ماند» هسته نامیده می شود.

بعد از زمان  $t_p$  جهت جریان الکتریکی  $i(t)$  سیم پیچ معکوس می شود؛ لذا شدت میدان مغناطیسی  $H$  وارونه می گردد. چگالی فوران مغناطیسی  $B_r$  در هسته کاهش می یابد و در مقداری از  $H$  مثلاً  $-H_c$  از میان خواهد رفت و صفر می شود. شدت میدان مغناطیسی  $-H_c$  که پس ماند هسته  $B_r$  را از بین می برد، «شدت میدان مغناطیسی خنثی کننده» نامیده می شود. شکل (۱-۴۶)

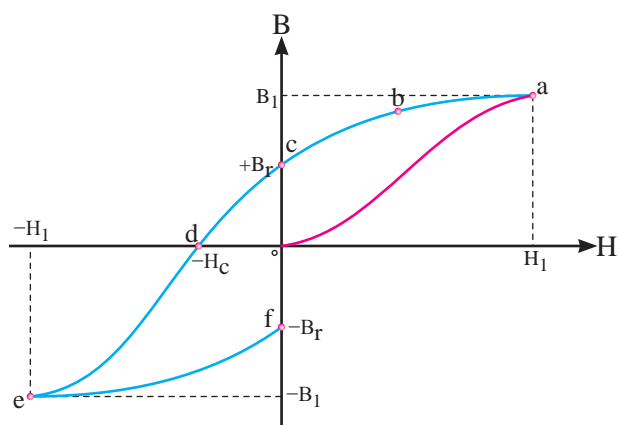


شکل ۵۰- ۱

حلقه پس ماند یا هیستریزیس نشان می دهد:  
 - رابطه بین چگالی فوران مغناطیسی  $B$  و شدت مغناطیسی  $H$  غیر خطی و چند مقداری است.  
 - اگرچه جریان الکتریکی سیم پیچ در نقاط  $C$  و  $F$  صفر است، اما هسته مغناطیس می باشد و دارای پس ماند مغناطیسی است.

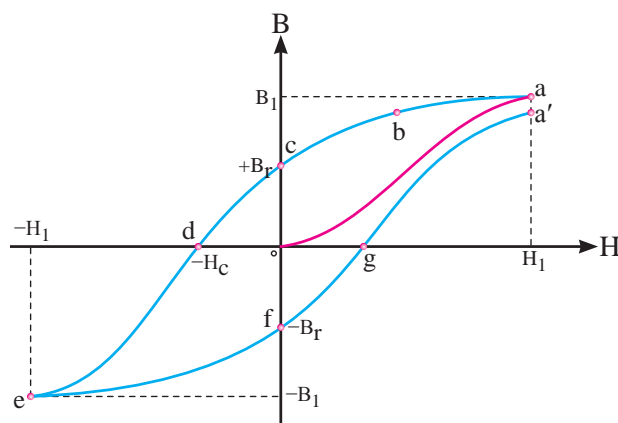
- به ازای یک حلقه هیستریزیس، جهت شدت میدان مغناطیسی هسته عوض می شود؛ لذا مولکول های مغناطیسی هسته می گردند و جهت میدان مغناطیسی در هسته تغییر می کند.

به ازای هر سیکل جریان الکتریکی سیم پیچ، یک بار حلقه هیستریزیس تکرار می شود. بنابراین در هر ثانیه تعداد حلقه های هیستریزیس با فرکانس جریان سیم پیچ برابر خواهد شد. بدین ترتیب متناسب با فرکانس جریان سیم پیچ، جهت میدان مغناطیسی در هسته تغییر می کند. مقدار انرژی که در یک ثانیه صرف تغییر جهت میدان مغناطیسی در هسته می شود را «تلفات هیستریزیس» تعریف می کنند. تلفات هیستریزیس به صورت حرارت در هسته ظاهر می شود و تابع فرکانس



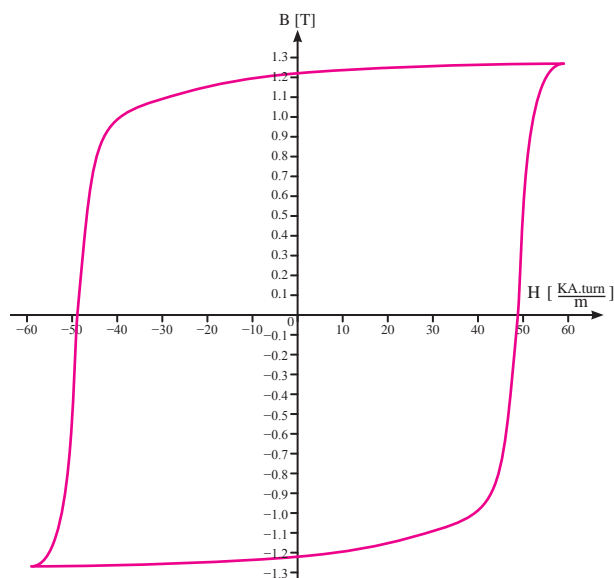
شکل ۴۸- ۱

بعد از زمان  $t_f$  جهت جریان الکتریکی  $i(t)$  در سیم پیچ معکوس می شود و شدت میدان مغناطیسی  $H$  نیز وارونه می گردد و افزایش می یابد در این صورت منحنی  $B-H$  مسیر  $fga'$  را طی خواهد کرد (شکل ۴۹- ۱).



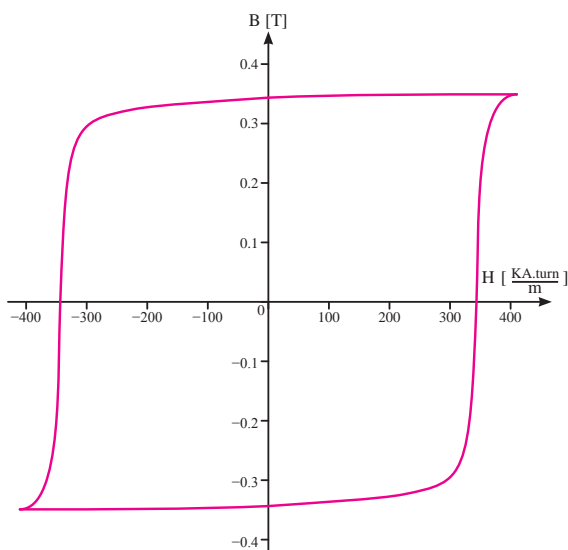
شکل ۴۹- ۱

باید دانست حلقه منحنی مغناطیسی بسته نمی شود و پس از چند سیکل مغناطیس شدن هسته حلقه تقریباً بسته می شود. این شکل به «حلقه پس ماند» یا «حلقه هیستریزیس» معروف است (شکل ۵۰- ۱).



شکل ۵۲ - ۱

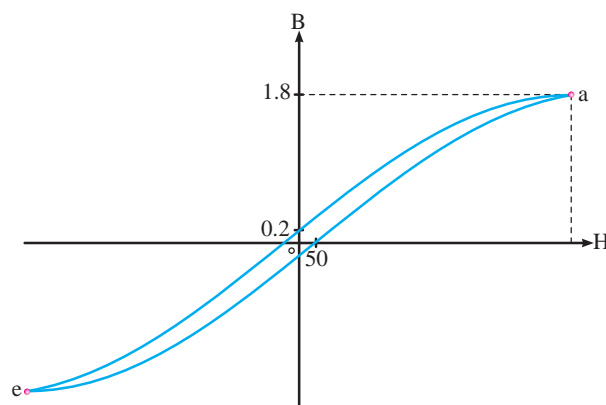
در مدارهای مغناطیسی که در فرکانس‌های رادیویی و مخابراتی کار می‌کنند، جنس هسته از مواد فرومغناطیس سرامیکی موسوم به «فریت»<sup>۵</sup> انتخاب می‌شود. فریت از ترکیب اکسید آهن و پودرهای کربنات باریم یا استرونیوم ساخته می‌شود. چگالی فوران مغناطیسی پس‌ماند  $B_r$  در فریت کمتر از النیکو است، اما شدت میدان خنثی‌کننده  $H_c$  در فریت بیشتر از النیکو می‌باشد. حلقه هیستریزیس فریت استرونیوم در شکل (۵۳ - ۱) نشان داده شده است.



شکل ۵۳ - ۱

جریان الکتریکی سیم‌پیچ است و متناسب با مساحت حلقه هیستریزیس می‌باشد. بدیهی است در جریان الکتریکی مستقیم هسته تلفات هیستریزیس ندارد. چرا؟ در ماشین‌های الکتریکی، ترانسفورمرها و آهن‌رباهای موقتی جنس هسته از مواد فرومغناطیسی موسوم به «آهن نرم»<sup>۱</sup> انتخاب می‌شود.

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



شکل ۵۱ - ۱

در آهن‌رباهای دائم<sup>۲</sup> جنس هسته غالباً آلیاژی از آهن، نیکل و کبالت موسوم به «آهن سخت»<sup>۳</sup> انتخاب می‌شود. یک دسته از این آلیاژها «النیکو»<sup>۴</sup> است که چگالی فوران مغناطیسی پس‌ماند  $B_r$  آنها بسیار زیاد می‌باشد. حلقه هیستریزیس آهن سخت وسیع است و شدت میدان خنثی‌کننده  $H_c$  نسبتاً بزرگی دارند. هیستریزیس النیکو<sup>۵</sup> در شکل (۵۲ - ۱) نشان داده شده است.



## پرسش ۵ - ۱

### پرسش‌های کامل کردنی

- ۱ - ضریب نفوذ مغناطیسی مواد فرومغناطیسی بین ..... تا ..... است.
- ۲ - در ماشین‌های الکتریکی جنس هسته از ..... موسوم به ..... انتخاب می‌شود.
- ۳ - در آهن‌رباهای ..... جنس هسته از ..... انتخاب می‌شود.
- ۴ - در مدارهای مغناطیسی مخابراتی جنس هسته از ..... موسوم به ..... انتخاب می‌شود.
- ۵ - ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی مواد دیامغناطیس ..... است.
- ۶ - ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی مواد پارامغناطیس ..... است.
- ۷ - تلفات هیستریزیس تابع ..... و ..... سیم‌پیچ است.

### پرسش‌های صحیح، غلط

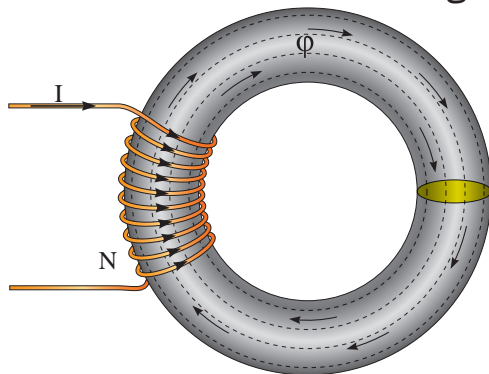
- ۱ - در مواد دیامغناطیس مولکول‌های مغناطیسی به‌وجود نمی‌آیند.  
☐ غلط ☐ صحیح
- ۲ - مواد پارامغناطیس، مولکول‌های مغناطیسی ضعیفی ندارند.  
☐ غلط ☐ صحیح
- ۳ - تلفات هیستریزیس به‌صورت حرارت در هسته ظاهر می‌شود.  
☐ غلط ☐ صحیح

## پرسش‌های تشریحی

- ۱ - رفتار مواد پارامغناطیس در میدان مغناطیسی را شرح دهید.
- ۲ - رفتار مواد فرومغناطیس در میدان مغناطیسی را شرح دهید.
- ۳ - چند نمونه از مواد دیا، پارا و فرومغناطیس را نام ببرید.
- ۴ - دمای کوری را تعریف کنید.
- ۵ - شدت میدان خنثی‌کننده را تعریف کنید.
- ۶ - چگالی فوران مغناطیسی پس‌ماند را تعریف کنید.
- ۷ - تلفات هیستریزیس را تعریف کنید.
- ۸ - ویژگی‌های مغناطیسی آهن سخت را بنویسید.
- ۹ - حلقه هیستریزیس در مواد مغناطیسی را با یکدیگر مقایسه کنید.

## ۱۸ - ۱ - مدارهای مغناطیسی

- در شکل (۵۴ - ۱) شدت جریان الکتریکی  $I$  سیم‌پیچی در هسته فرومغناطیس فوران مغناطیسی  $\phi$  جاری می‌کند.



شکل ۵۴ - ۱ - مدار مغناطیسی

- این پدیده از بعضی جهات مشابه جریان الکتریکی است که یک باتری در هادی جاری می‌کند (شکل ۵۵ - ۱).

$\varphi$  مدار مغناطیسی  $\longleftrightarrow$  مشابه  $I$  مدار الکتریکی

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

$\mathcal{R}$  مدار مغناطیسی  $\longleftrightarrow$  مشابه  $R$  مدار الکتریکی

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

$$R = \frac{E}{I} \quad (1 - 14)$$

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

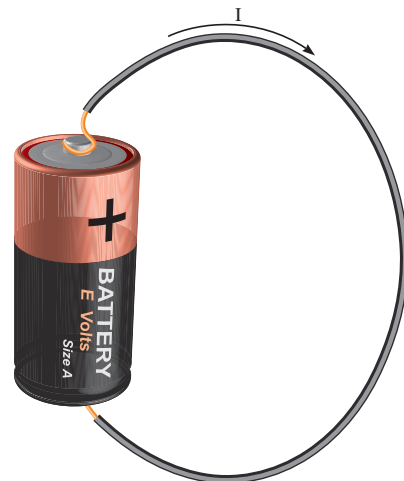
$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\varphi} \quad (1 - 15)$$

در این رابطه:

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

$\varphi$  فوران مغناطیسی هسته بر حسب [wb]

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



شکل ۵۵ - ۱ مدار الکتریکی

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

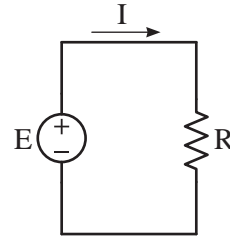
وجه تشابه مدار مغناطیسی شکل (۵۴ - ۱) با مدار الکتریکی شکل (۵۵ - ۱) عبارت است از:

● «نیروی محرکه الکتریکی»<sup>۳</sup> باتری  $E$  عامل جاری شدن جریان الکتریکی در هادی است و «نیروی محرکه مغناطیسی»<sup>۴</sup> سیم‌پیچ  $\theta$  عامل جاری شدن فوران مغناطیسی در هسته است. بنابراین عملکرد نیروی محرکه مغناطیسی و نیروی محرکه الکتریکی شبیه به یکدیگر است؛ یعنی:

$\theta$  مدار مغناطیسی  $\longleftrightarrow$  مشابه  $E$  مدار الکتریکی

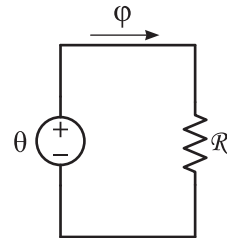
● جریان الکتریکی  $I$ ، در هادی مدار الکتریکی جاری می‌شود و فوران مغناطیسی  $\varphi$  در هسته مدار مغناطیسی جاری می‌شود. بنابراین رفتار فوران مغناطیسی و جریان الکتریکی نیز شبیه به یکدیگر است؛ یعنی:

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



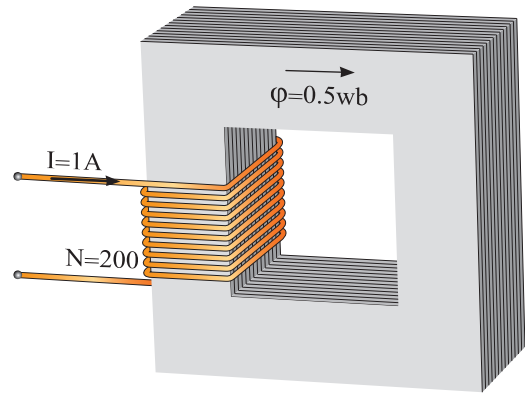
شکل ۵۶ - ۱

با توجه به وجه تشابه میان مدارهای مغناطیسی با مدارهای الکتریکی می توان مدار الکتریکی معادل شکل (۵۷ - ۱) را با تقریب مناسبی برای مدار مغناطیسی شکل (۵۴ - ۱) در نظر گرفت.



شکل ۵۷ - ۱

مثال ۱۵ - ۱ - فوران مغناطیسی در هسته شکل (۵۸ - ۱) برابر  $0.5 \text{ wb}$  است. مقاومت مغناطیسی هسته چقدر می باشد؟



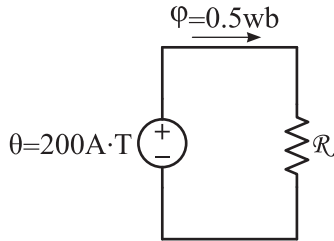
شکل ۵۸ - ۱

حل:

- نیروی محرکه مغناطیسی از رابطه (۶ - ۱) برابر است با:

$$\theta = NI = 200 \times 1 = 200 \text{ [A.turn]}$$

- مدار الکتریکی معادل با درج مقادیر مغناطیسی بر روی آن به صورت شکل زیر است.



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

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\phi} = \frac{200}{0.5} = 400 \left[ \frac{\text{A.turn}}{\text{wb}} \right]$$

برای تعیین رابطه مقاومت مغناطیسی  $\mathcal{R}$  به روش زیر عمل می شود:

- از رابطه (۳ - ۱) مقدار  $\phi$  برابر است با:

$$B = \frac{\phi}{A} \Rightarrow \phi = B.A \quad (16 - 1)$$

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

$$\mu = \frac{B}{H} \Rightarrow B = \mu H \quad (17 - 1)$$

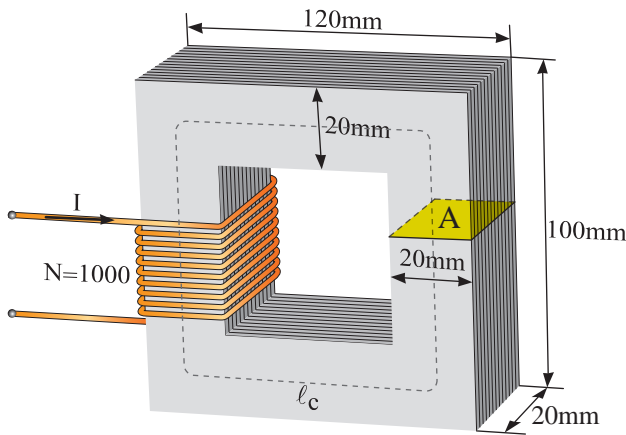
- با جایگزینی مقدار  $\mu$  از رابطه (۱۳ - ۱) در رابطه (۱۷ - ۱) به دست می آید:

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (18 - 1)$$

## فعالیت

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

**مثال ۱۶-۱** - اگر فوران مغناطیسی در مدار  
مغناطیسی شکل (۵۹-۱) برابر با ۴ mwb باشد  
جریان سیم‌پیچ چند آمپر است؟ در صورتی که  $\pi = 3$   
و  $\mu_r = 6000$  باشد.



شکل ۵۹-۱

حل:

- محیط بیرونی هسته برابر است با:

$$\ell_1 = (120 + 100) \times 2 = 440 \text{ mm}$$

- محیط درونی هسته برابر با:

$$\ell_2 = (80 + 60) \times 2 = 280 \text{ mm}$$

- محیط متوسط برابر است با:

$$\ell_c = \frac{\ell_1 + \ell_2}{2} = \frac{440 + 280}{2} = 360 \text{ mm}$$

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

$$A_c = 20 \times 20 = 400 \text{ mm}^2$$

- با جایگزینی رابطه (۱۸-۱) در (۱۶-۱) به دست  
می‌آید:

$$\phi = \mu_o \mu_r \cdot H \cdot A \quad (19-1)$$

- با جایگزینی رابطه (۱۹-۱) و (۶-۱) در رابطه  
(۱۵-۱) به دست می‌آید:

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\phi} \Rightarrow \mathcal{R} = \frac{NI}{\mu_o \mu_r \cdot H \cdot A} \quad (20-1)$$

- از رابطه رابطه (۷-۱) به دست می‌آید:

$$H = \frac{NI}{\ell_c} \Rightarrow \ell_c = \frac{NI}{H} \quad (21-1)$$

- با جایگزینی رابطه (۲۱-۱) در رابطه (۲۰-۱)  
به دست می‌آید:

$$\mathcal{R}_c = \frac{\ell_c}{\mu_o \mu_r \cdot A} \quad (22-1)$$

در این رابطه:

$\ell_c$  طول متوسط هسته بر حسب [m]

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

$\mu_r$  ضریب نفوذ نسبی هسته بدون واحد

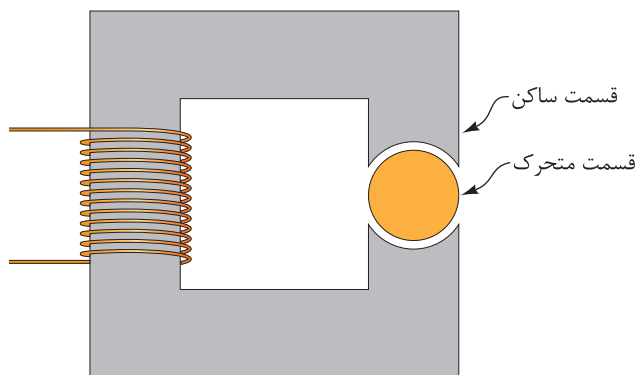
A سطح مقطع هسته بر حسب [m<sup>2</sup>]

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

اگر حاصل  $\mu_o \mu_r$  از رابطه (۱۳-۱) با  $\mu$  نشان داده  
شود رابطه (۲۲-۱) به صورت رابطه (۲۳-۱) در  
می‌آید.

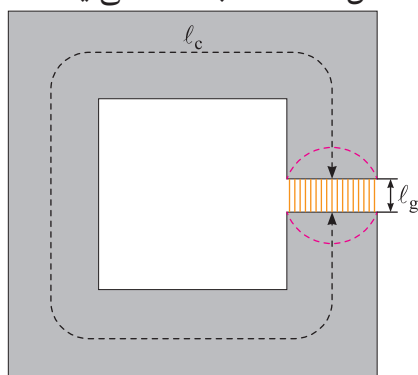
$$\mathcal{R} = \frac{\ell_c}{\mu \cdot A}$$

متحرک می‌باشند، بین قسمت متحرک و ساکن در هسته فرومغناطیس «شکاف هوایی» ایجاد می‌شود.



شکل ۶۰-۱

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



شکل ۶۱-۱

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

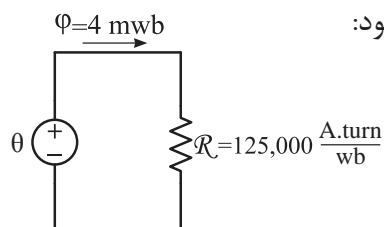
اگر در مدار مغناطیسی طول شکاف هوایی  $l_g$  از ابعاد سطح مقطع هسته مغناطیسی بسیار کوچک‌تر باشد، می‌توان با روش مدار الکتریکی معادل آن را تحلیل کرد. در صورتی که طول شکاف هوایی  $l_g$  از ابعاد سطح مقطع هسته مغناطیسی بزرگ‌تر باشد، فوران مغناطیسی مطابق شکل (۶۲-۱) به بیرون «نشت»

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

$$\mathcal{R}_c = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A} = \frac{360 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7} \times 6000 \times 400 \times 10^{-6}} = 125000 \left[ \frac{A \cdot \text{turn}}{\text{wb}} \right]$$

- مدار الکتریکی معادل رسم و مقادیر بر روی آن

درج می‌شود:



- نیروی محرکه مغناطیسی از رابطه (۱۵-۱) برابر

است با:

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

$$\theta = \mathcal{R}_c \cdot \phi = 125000 \times 4 \times 10^{-3} = 500 [A]$$

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

$$\theta = NI$$

$$I = \frac{\theta}{N} = \frac{500}{1000} = 0.5 [A]$$

## ۱۹-۱- 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 (۶۰-۱) دارند. وسایل تبدیل انرژی مانند ژنراتورها و موتورهای الکتریکی که دارای اجزای

رابطه (۲۳ - ۱) به دست می آید:

$$\mathcal{R}_c = \frac{\ell_c}{\mu_o \mu_r A} \quad (1 - 23)$$

و مقاومت مغناطیسی شکاف هوایی  $\mathcal{R}_g$  از رابطه (۲۴ - ۱) به دست می آید:

$$\mathcal{R}_g = \frac{\ell_g}{\mu_o \mu_r A} \quad (1 - 24)$$

در این رابطه:

$\ell_g$  طول شکاف هوایی بر حسب [m]

$\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$  ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ بر حسب  $\left[ \frac{wb}{A.turn.m} \right]$  ضریب نفوذ نسبی هوا<sup>۱</sup>

A سطح مقطع هسته بر حسب [m<sup>۲</sup>]

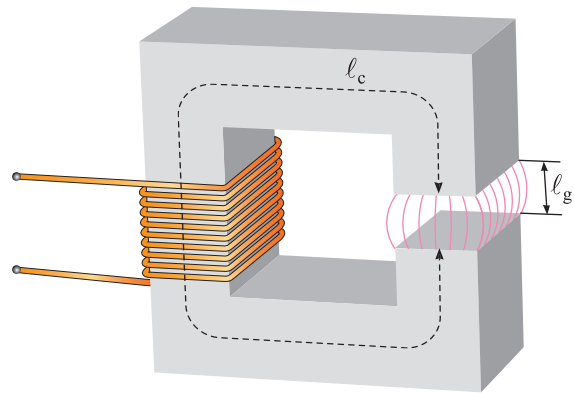
$\mathcal{R}_g$  مقاومت مغناطیسی بر حسب  $\left[ \frac{A.turn}{wb} \right]$

قوانین سری و موازی شدن مقاومت های مغناطیسی همانند مقاومت های الکتریکی است. به طوری که مقاومت مغناطیسی معادل<sup>۲</sup>، n مقاومت مغناطیسی سری از رابطه (۲۵ - ۱) به دست می آید<sup>۳</sup>:

$$\mathcal{R}_{eq} = \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \dots + \mathcal{R}_n \quad (1 - 25)$$

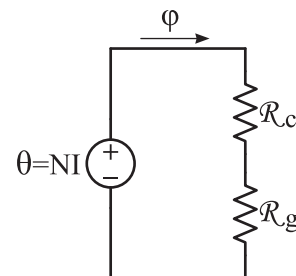
**مثال ۱۷ - ۱ - در مدار مغناطیسی شکل (۵۹ - ۱) شکاف هوایی به طول ۰/۴۸ mm مطابق شکل (۶۴ - ۱) ایجاد شده است. با فرض این که طول**

می کند و سطح مقطع موثر شکاف هوایی بزرگ تر از سطح مقطع هسته مغناطیسی دو طرف آن می شود، لذا نمی توان با روش مدار الکتریکی معادل آن را تحلیل کرد.



شکل ۶۲ - ۱

اکنون با فرض این که طول شکاف هوایی  $\ell_g$  در شکل (۶۱ - ۱) به حد کافی کوچک است و چگالی فوران مغناطیسی B هسته نیز یکنواخت می باشد، می توان مدار الکتریکی معادل شکل (۶۳ - ۱) را برای تحلیل آن در نظر گرفت. از آنجایی که فوران مغناطیسی، مسیر هسته و شکاف هوایی را طی می کند، لذا مقاومت مغناطیسی آنها در مدار الکتریکی معادل با هم سری می شوند.



شکل ۶۳ - ۱

در شکل (۶۳ - ۱) مقاومت مغناطیسی هسته  $\mathcal{R}_c$  از

۱. برای سهولت در محاسبات معمولاً برای هوا  $\mu_r$  برابر ۱ در نظر گرفته می شود.

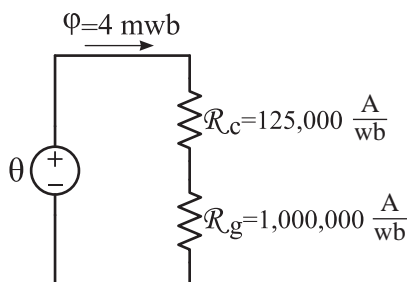
۲. Equal Reluctance

۳. مقاومت مغناطیسی معادل، n مقاومت مغناطیسی موازی از رابطه مقابل به دست می آید:

$$\mathcal{R}_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{\mathcal{R}_1} + \frac{1}{\mathcal{R}_2} + \dots + \frac{1}{\mathcal{R}_n}}$$

$$= 100000 \left[ \frac{A \cdot \text{turn}}{wb} \right]$$

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



- مقاومت مغناطیسی معادل از رابطه (۲۵ - ۱) برابر

است با:

$$R_{eq} = R_c + R_g = 125000 + 1000000$$

$$= 1125000 \left[ \frac{A \cdot \text{turn}}{wb} \right]$$

- نیروی محرکه مغناطیسی از رابطه (۱۵ - ۱) برابر

است با:

$$R = \frac{\theta}{\phi} \Rightarrow \theta = R \cdot \phi$$

$$\theta = 1125000 \times 4 \times 10^{-3} = 4500 \left[ A \cdot \text{turn} \right]$$

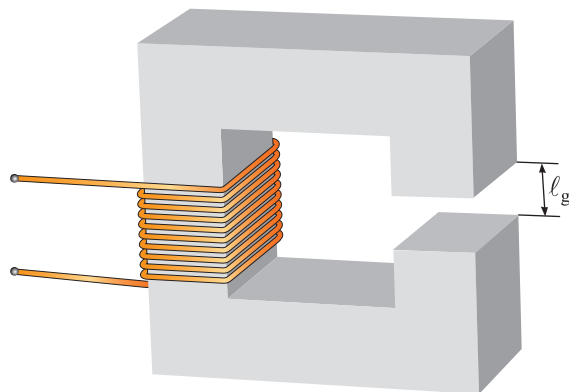
- جریان سیم‌پیچ از رابطه (۶ - ۱) برابر است با:

$$\theta = NI \Rightarrow I = \frac{\theta}{N} = \frac{4500}{1000} = 4.5 \left[ A \right]$$

### فعالیت

چرا با ایجاد شکاف هوایی جریان سیم‌پیچ افزایش یافته است؟

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



شکل ۶۴ - ۱

حل:

- مقاومت مغناطیسی هسته تغییر نمی‌کند و برابر

است با:

$$R_c = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A} = 125000 \left[ \frac{A \cdot \text{turn}}{wb} \right]$$

- طول شکاف هوایی بر حسب متر برابر است با:

$$l_g = 0.48 \times 10^{-3} \left[ m \right]$$

- طول شکاف هوایی بسیار کوچک‌تر از ابعاد سطح

مقطع هسته می‌باشد؛ لذا سطح مقطع شکاف هوایی با

هسته برابر است؛ یعنی:

$$A_g = A_c = 400 \times 10^{-6} \left[ m^2 \right]$$

- برای سهولت در محاسبات ضریب نفوذ نسبی هوا

برابر با:  $\mu_r = 1$

- مقاومت مغناطیسی هوا از رابطه (۲۴ - ۱) برابر

است با:

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 \mu_r A} = \frac{0.48 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7} \times 1 \times 400 \times 10^{-6}}$$



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 - در مدار مغناطیسی فرض می شود تمام فوران مغناطیسی در هسته محبوس است. اما جزء کوچکی از فوران مغناطیسی هسته به هوای اطراف می گریزد. این فوران در بیرون هسته «شار نشی<sup>۱</sup>» نام دارد.

۲ - در محاسبه مقاومت مغناطیسی، برای هسته یک طول مسیر متوسط و یک سطح مقطع مشخص فرض می شود. این فرض ها، مخصوصاً در مورد گوشه ها فرض های خیلی خوبی نیستند.

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

۴ - اگر در مسیر فوران مغناطیسی هسته، شکاف هوایی وجود داشته باشد، سطح مقطع موثر فاصله هوایی بزرگ تر از سطح مقطع هسته دو طرف آن است که در مدار معادل مغناطیسی سطح مقطع شکاف هوایی برابر سطح مقطع هسته فرض می شود.

روش های دیگری در تحلیل مدارهای مغناطیسی وجود دارد که به نتایج دقیق تری می انجامد. تحلیل مدارهای مغناطیسی به کمک « قانون نیروی محرکه مغناطیسی » یکی از این روش ها است.

## پرسش ۶-۱

### پرسش های کامل کردنی

۱ - مسیر بسته ای که فوران مغناطیسی در آن برقرار

می شود ..... نامیده می شود.

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

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

### پرسش های صحیح، غلط

۱ - هسته از خود در مقابل فوران مغناطیسی «مقاومت مغناطیسی» نشان می دهد.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ - جریان الکتریکی مشابه نیروی محرکه مغناطیسی است.

صحیح ☐ غلط ☐

### پرسش های تشریحی

۱ - مدار الکتریکی و مدار مغناطیسی را تعریف کنید.

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

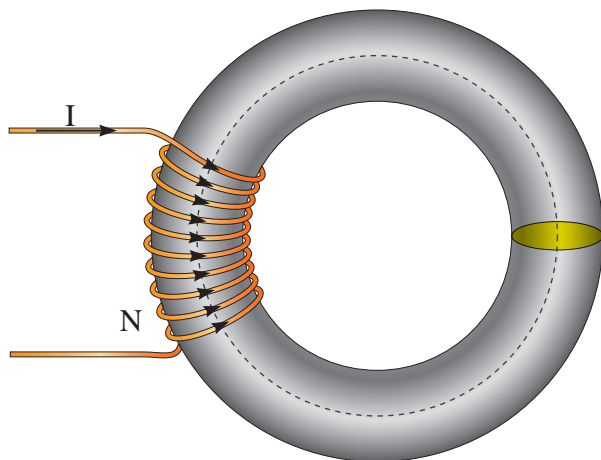
## تمرین ۶-۱

۱ - مقاومت و فوران مغناطیسی در هسته یک مدار مغناطیسی به ترتیب  $500 \frac{A \cdot turn}{wb}$  و  $10 mwb$  می باشد. اگر جریان سیم پیچ روی هسته  $20 mA$  باشد تعداد حلقه های سیم پیچ را به دست آورید.

۲ - بر روی یک هسته فرومغناطیسی مشابه شکل (۲۳ - ۱)، ۲۰۰ دور سیم پیچیده شده است. اگر جریان ۲ آمپر از سیم پیچ عبور کند. فوران مغناطیسی هسته را محاسبه نمایید. در صورتی که  $r_1 = 30 cm$ ،  $r_2 = 40 cm$  و  $\mu_r = 1000$  باشد.

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

قانون نیروی محرکه مغناطیسی برای مدار مغناطیسی شکل (۱-۶۵) به صورت رابطه (۱-۲۸) در می‌آید.



شکل ۱-۶۵

$$\theta = H_C \cdot \ell_C \quad (1-28)$$

در این رابطه:

$$H_C \text{ شدت میدان مغناطیسی هسته بر حسب } \left[ \frac{A \cdot \text{turn}}{m} \right]$$

$\ell_C$  طول متوسط هسته بر حسب m

$$\theta \text{ نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ بر حسب } [A \cdot \text{turn}]$$

اگر چنانچه هسته مدار مغناطیسی دارای شکاف هوایی به طول  $\ell_g$  و شدت میدان مغناطیسی  $H_g$  و ماده فرومغناطیس به طول  $\ell_C$  و شدت میدان مغناطیسی  $H_C$  مطابق شکل (۱-۶۶) باشد رابطه قانون نیروی محرکه مغناطیسی به صورت رابطه (۱-۲۹) نوشته می‌شود.

۳- اگر در مدار مغناطیسی تمرین ۲ شکاف هوایی به طول  $5 \text{ mm}$  ایجاد شود با فرض این که طول متوسط هسته تغییر نکرده باشد، فوران مغناطیسی هسته را محاسبه کنید.

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

## ۲۰-۱- 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 (۱-۲۶) نشان داده می‌شود:

$$\theta = \sum_{i=1}^n H_i \cdot \ell_i \quad (1-26)$$

در این رابطه:

$$\theta \text{ نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ بر حسب } [A \cdot \text{turn}]$$

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

$$\ell_i \text{ طول متوسط قسمت } i \text{ ام مدار مغناطیسی بر حسب } [m]$$

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

$$\theta = H_1 \ell_1 + H_2 \ell_2 + \dots + H_n \ell_n \quad (1-27)$$

$$\varphi = \varphi_C = \varphi_g = \lambda [mwb]$$

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 - ۱) برابر است با:

$$A = A_C = A_g = 64 [cm^2]$$

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

$$B = \frac{9/28 \times 10^{-3}}{64 \times 10^{-4}} = 1/45 [T]$$

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

$$B = 1/45 \xrightarrow[\text{شکل (۲۷ - ۱)}]{\text{منحنی مغناطیسی}} H_C = 800 \left[ \frac{A.turn}{m} \right]$$

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

$$H_g = \frac{B}{\mu_0} = \frac{1/45}{4\pi \times 10^{-7}} = 1154458 \left[ \frac{A.turn}{m} \right]$$

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

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

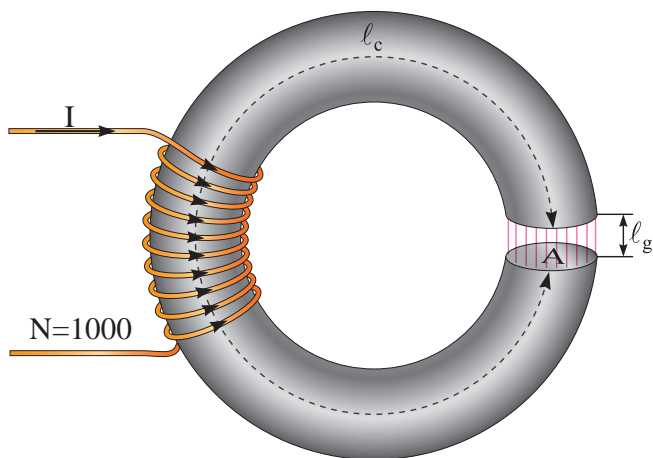
$$\theta = 1154458 \times 1/1 \times 10^{-3} + 800 \times 50 \times 10^{-2}$$

$$= 1670 [A]$$

از رابطه (۶ - ۱) شدت جریان به دست می‌آید.

$$\theta = NI$$

$$I = \frac{\theta}{N} = \frac{1670}{1000} = 1/6 [A.turn]$$



شکل ۶۶ - ۱

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

شدت میدان مغناطیسی هسته فرومغناطیسی  $H_C$  از منحنی مغناطیسی شکل‌های (۲۷ - ۱) و (۲۹ - ۱) با توجه به جنس هسته و شدت میدان مغناطیسی شکاف هوایی  $H_g$  از رابطه (۱۰ - ۱) به صورت  $H_g = \frac{B}{\mu_0}$  پس از تعیین  $B$  به دست می‌آیند. مقادیر  $\ell_g$  و  $\ell_C$  با توجه به شکل هندسی مدار مغناطیسی محاسبه می‌شوند.

**مثال ۱۸ - ۱ - مدار مغناطیسی مطابق شکل**

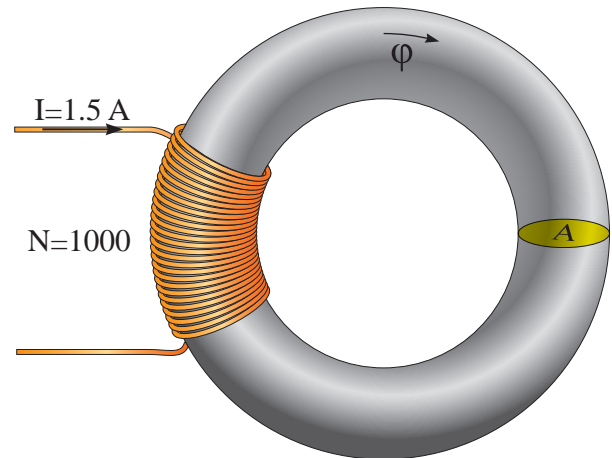
(۶۶ - ۱) دارای هسته فرومغناطیسی از جنس فولاد ورق به طول متوسط  $\ell_C = 50 \text{ cm}$  و سطح مقطع  $A_C = 64 \text{ cm}^2$  دارای یک شکاف هوایی به طول  $\ell_g = 1/1 \text{ mm}$  و فوران مغناطیسی هسته  $\varphi_C = 9/28 \text{ mwb}$  می‌باشد. جریان سیم‌پیچ را به کمک قانون نیروی محرکه مغناطیسی تعیین کنید.

حل:

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

مثال ۱۹-۱ - اگر در مثال ۱۸ - ۱ شکاف هوایی

مدار مغناطیسی با به هم رساندن هسته مغناطیسی مطابق شکل (۶۷ - ۱) از بین برود و جریان سیم پیچ ثابت بماند، فوران مغناطیسی هسته چند میلی وبر می شود؟



شکل ۶۷-۱

حل:

- نیروی محرکه مغناطیسی سیم پیچ از رابطه

(۶ - ۱) به دست می آید:

$$\theta = NI = 1000 \times 1 = 1000 [A.turn]$$

- شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۷ - ۱) به دست

می آید:

$$H_C = \frac{\theta}{\ell_C} = \frac{1000}{50 \times 10^{-2}} = 2000 \left[ \frac{A.turn}{m} \right]$$

- با توجه به مقدار  $H_C$  از منحنی مغناطیس شکل

(۲۷ - ۱) مقدار  $B$  برای فولاد ورق به دست می آید:

$$H_C = 2000 \xrightarrow[\text{شکل (۲۷-۱)}]{\text{منحنی مغناطیس}} B = 1/6 [T]$$

- فوران مغناطیسی از رابطه (۳ - ۱) محاسبه می شود:

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

$$\varphi = B.A = 1/6 \times 64 \times 10^{-4} = 0.01 wb$$

- واحد فوران مغناطیسی به میلی وبر تبدیل می شود:

$$\frac{1 wb}{0.01} = \frac{1000 mwb}{\varphi} \Rightarrow \varphi = \frac{0.01 \times 1000}{1}$$

$$= 10 [mwb]$$

- با از بین رفتن شکاف هوایی، مقاومت مغناطیسی کمتر می شود و فوران مغناطیسی هسته افزایش می یابد. مدارهای مغناطیسی به گونه ای طراحی می شوند 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 ۷-۱

۱ - هسته مغناطیسی از جنس فولاد الکتریکی M-5

بدون فاصله هوایی به طول متوسط ۴۰ cm و سطح

مقطع ۵۰ cm<sup>۲</sup> دارای فوران مغناطیسی ۱۰ mwb

می باشد. به روی این هسته یک سیم پیچ با ۴۰۰۰

حلقه قرار دارد. مطلوب است:

الف - شدت جریان سیم پیچ

ب - اگر یک فاصله هوایی ۱ mm در هسته ایجاد

شود شدت جریان سیم پیچ چند آمپر خواهد شد؟

در صورتی که بخواهیم فوران هسته ثابت بماند.

۲ - یک مدار مغناطیسی با مقاومت مغناطیسی

$$45000 \left[ \frac{A.turn}{wb} \right] \text{ دارای فوران مغناطیسی } 10 \text{ mwb}$$

می باشد. اگر تعداد دور سیم پیچ ۱۰۰۰ و طول متوسط

هسته ۹۰ cm باشد مطلوب است:

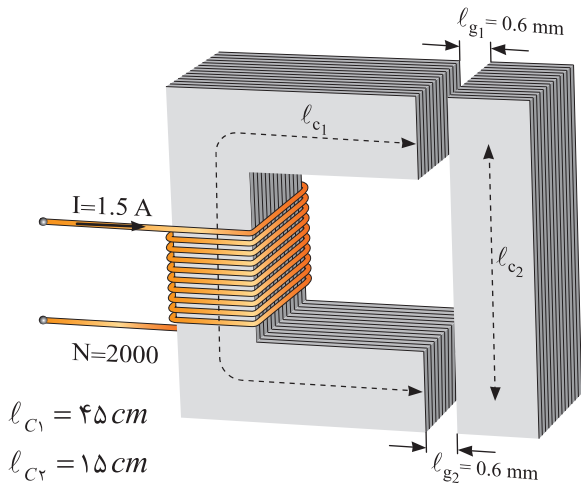
الف - جریان سیم‌پیچ

ب - شدت میدان هسته

۳ - در مدار مغناطیسی شکل (۶۸ - ۱) فوران مغناطیسی هسته ۱۰ mwb است؛ مطلوب است:

الف - مقاومت مغناطیسی هسته

ب - اگر یک فاصله هوایی ۱/۲ mm در هسته ایجاد شود و بخواهیم فوران هسته همان مقدار قبلی بماند، جریان سیم‌پیچ را چند آمپر باید افزایش دهیم. ( $\pi=3$ )



$$l_{C1} = 45 \text{ cm}$$

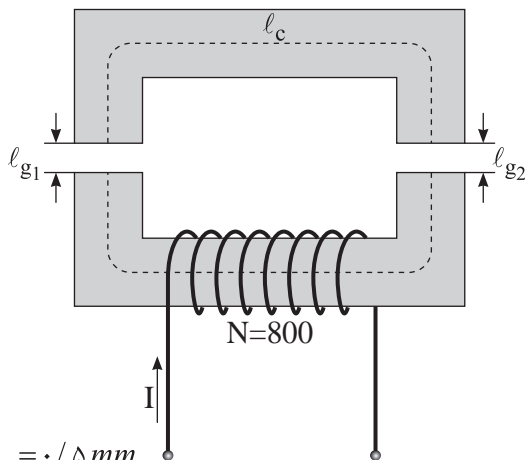
$$l_{C2} = 15 \text{ cm}$$

$$A = 5 \cdot \text{cm}^2$$

$$\pi = 3$$

شکل ۶۹ - ۱

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

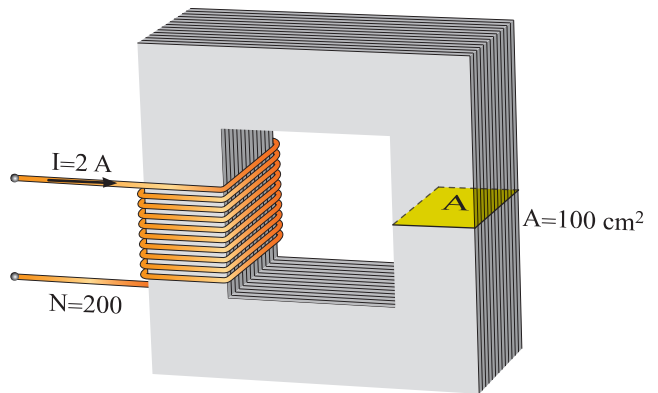


$$l_{g1} = l_{g2} = 0.5 \text{ mm}$$

$$A_g = A_c = 4 \text{ cm}^2$$

$$l_c = 30 \text{ cm}$$

شکل ۷۰ - ۱



شکل ۶۸ - ۱

۴ - در مدار مغناطیسی شکل (۶۹ - ۱) مطلوب است محاسبه:

الف - مقاومت مغناطیسی در صورتی که فوران مغناطیسی هسته ۱۲ mwb باشد.

ب - ضریب نفوذ نسبی هسته

## 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.



این ارتباط در ماشین‌های الکتریکی بر مبنای «میدان الکترومغناطیسی»<sup>۲</sup> صورت می‌گیرد.



شکل ۲-۲

ماشین‌های الکتریکی در زندگی روزمره امروزی حضور فراوانی دارند. «موتورهای الکتریکی»<sup>۳</sup> 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»<sup>۴</sup> 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.

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 ۲-۱

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»<sup>۱</sup> 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

## ۱-۲- طبقه‌بندی ماشین‌های الکتریکی

ماشین‌های الکتریکی از دو دیدگاه «نوع تبدیل انرژی» و «نوع جریان الکتریکی» طبقه‌بندی می‌شوند.

از دیدگاه انرژی، اگر ماشین الکتریکی انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل کند «موتور الکتریکی» نامیده می‌شود. و اگر این ماشین الکتریکی، انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل کند «ژنراتور الکتریکی» نامیده می‌شود.

ماشین‌های الکتریکی اعم از موتور یا ژنراتور الکتریکی، از دیدگاه نوع جریان در دو دسته «جریان متناوب AC» و «جریان مستقیم DC» طبقه‌بندی

می‌شوند. اگر ماشین الکتریکی برای کار در جریان متناوب AC طراحی شود آن را «ماشین الکتریکی جریان متناوب<sup>۱</sup>» می‌نامند و در صورتی که برای کار در جریان مستقیم DC طراحی شود آن را «ماشین الکتریکی جریان مستقیم<sup>۲</sup>» می‌نامند.

در ماشین‌های الکتریکی فرایند تبدیل انرژی برگشت‌پذیر<sup>۳</sup> است. بدین معنی که با رعایت یک سری ملاحظات عملی، هر ماشین الکتریکی می‌تواند به‌عنوان یک موتور الکتریکی، انرژی الکتریکی را به مکانیکی و یا به‌عنوان یک 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 داشت 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](http://www.tavanir.org.ir)

## ۲-۲- قانون القای الکترومغناطیسی فاراده<sup>۴</sup>

«قانون القای الکترومغناطیسی فاراده» یکی از اساسی‌ترین قوانین مغناطیسی در فیزیک است. طرز کار وسایل الکتریکی که الکترومغناطیس در آنها نقش دارد به کمک قانون القای الکترومغناطیسی فاراده قابل فهم است؛ به خصوص در تحلیل طرز کار وسایل تبدیل انرژی الکترومکانیکی اعم از موتور یا ژنراتور کاربرد

فراوان دارد.

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

**آزمایش ۱-** مداری متشکل از یک حلقه<sup>۵</sup> هادی که دو سر آن به یک گالوانومتر<sup>۶</sup> متصل است در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.

۳. Reversible Energy Turn  
۵.

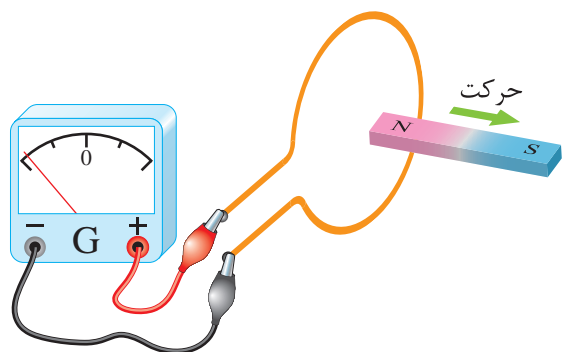
۲. Direct Current Machine

۱. Alternating Current Machine

۴. Faraday's law of electromagnetic induction

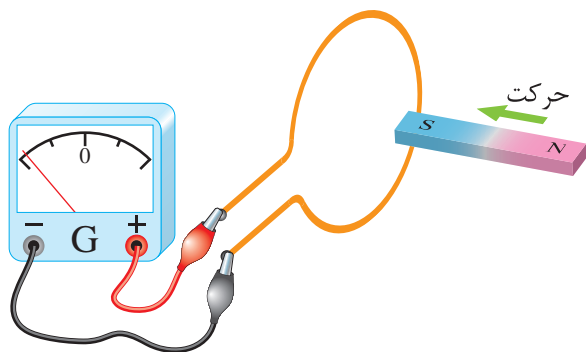
۶. گالوانومتر یک آمپرتر بسیار دقیق است که با کم‌ترین جریان الکتریکی منحرف می‌شود.

وقتی که آهنربای دائم از حلقه مطابق شکل (۲ - ۶) دور شود، عقربه گالوانومتر در جهت عکس حالت قبل منحرف می‌شود. یعنی جهت جریان در حلقه تغییر کرده است.



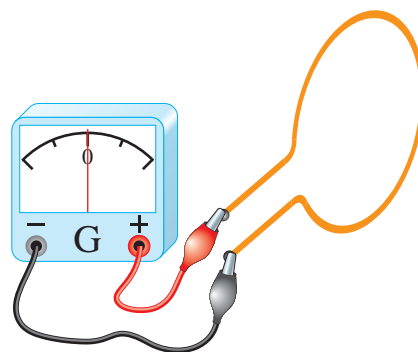
شکل ۲-۶

در ادامه آزمایش اگر قطب جنوب S آهنربای دائم مطابق شکل (۲ - ۷) داخل حلقه شود، عقربه گالوانومتر بر خلاف حالتی که قطب شمال N وارد حلقه شد منحرف می‌گردد.



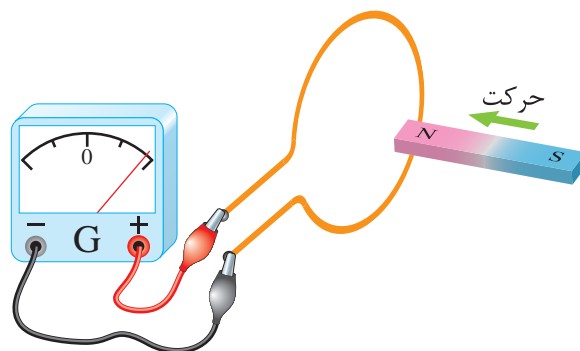
شکل ۲-۷

در این حالت نیز در صورتی که آهنربای دائم نسبت به حلقه مطابق شکل (۲ - ۸) حرکتی نداشته باشد، عقربه‌ی گالوانومتر منحرف نخواهد شد.



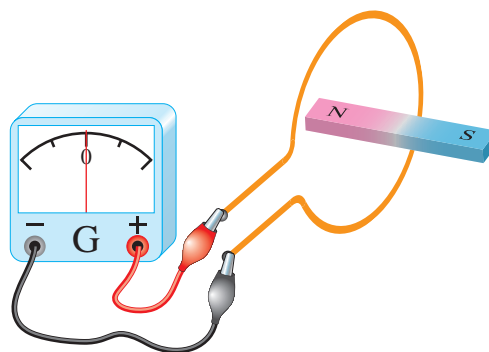
شکل ۲-۳

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



شکل ۲-۴

در صورتی که آهنربای دائم نسبت به حلقه مطابق شکل (۲ - ۵) حرکتی نداشته باشد، عقربه گالوانومتر منحرف نخواهد شد.



شکل ۲-۵

$$e \propto \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2-1)$$

در این رابطه:

$\Delta\phi$  تغییرات فوران مغناطیسی بر حسب وبر [wb]  
 $\Delta t$  مدت زمان وقوع تغییرات فوران مغناطیسی  
 بر حسب ثانیه (s)

$e$  نیروی محرکه القایی بر حسب ولت [V]

نیروی محرکه القایی  $e$  در عمل بسیار حائز اهمیت است. 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 به جای استفاده از یک حلقه سیم، از سیم‌پیچی با  $N$  حلقه، آزمایش فاراده تکرار شود، در هر حلقه سیم‌پیچ نیروی محرکه القایی ایجاد می‌شود و این نیروهای محرکه با یکدیگر جمع می‌شوند تا نیروی محرکه القایی سیم‌پیچ به دست آید؛ لذا مقدار نیروی محرکه القایی در سیم پیچ از رابطه (۲ - ۲) تعیین می‌شود.

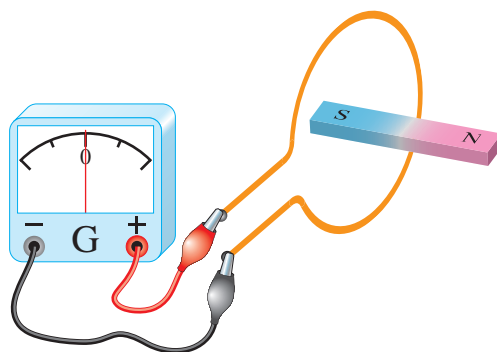
$$e = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2-2)$$

نیروی محرکه القایی  $e$  جریان القایی در سیم‌پیچ جاری می‌کند که از رابطه (۲ - ۳) به دست می‌آید:

$$i = \frac{e}{Z} \quad (2-3)$$

در این رابطه:

$Z$  مقاومت ظاهری<sup>۳</sup> سیم‌پیچ بر حسب اهم [ $\Omega$ ]  
 $i$  شدت جریان القایی سیم‌پیچ بر حسب آمپر [A]



شکل ۸ - ۲

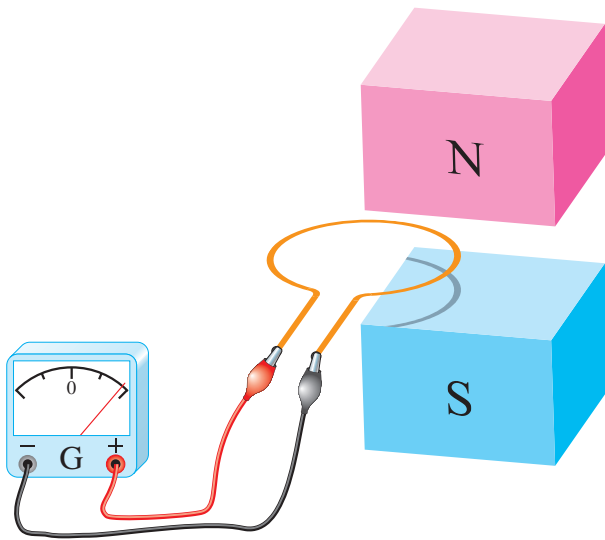
بدین ترتیب در این آزمایش پدیده‌ای مشاهده می‌شود که در اثر حرکت آهن‌ربای دائم نسبت به حلقه به وجود آمده است.

در آزمایش ۱ جریانی که در حلقه برقرار می‌شود را «جریان القایی»<sup>۱</sup> می‌نامند. می‌دانید عامل جاری شدن جریان در هر مدار الکتریکی نیروی محرکه ( $E$ ) است. جریان القایی نیز ناشی از یک نیروی محرکه است که آن را «نیروی محرکه القایی EMF»<sup>۲</sup> می‌نامند. نیروی محرکه القایی را به اختصار با  $e$  نشان می‌دهند.

فاراده با آزمایش‌هایی نظیر این آزمایش، توانست قانونی به دست آورد که به «قانون القای الکترومغناطیسی فاراده» مشهور شد. وی بر اساس این آزمایش‌ها متوجه شد که تغییر فوران مغناطیسی مهم‌ترین عامل ایجاد نیروی محرکه القایی است؛ لذا قانون القای الکترومغناطیس فاراده را چنین تعریف کرد: «مقدار نیروی محرکه‌ی القایی در هر مدار با آهنگ تغییر فوران متناسب است».

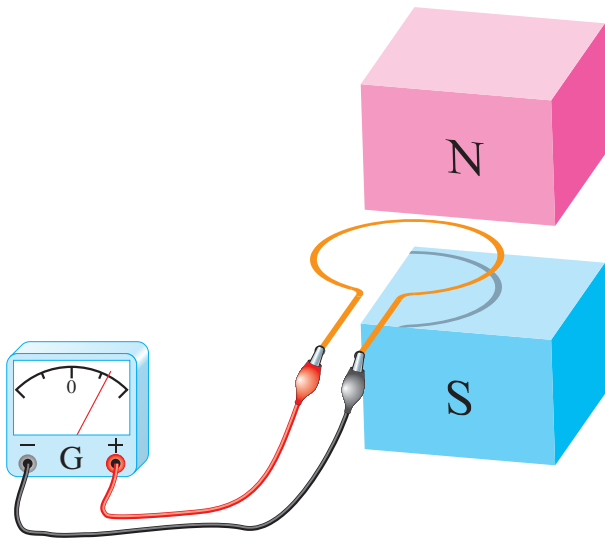
فاراده به کمک این قانون برای محاسبه مقدار نیروی محرکه القایی رابطه ریاضی (۱ - ۲) را ارائه کرد. این رابطه بیان ریاضی قانون القای الکترومغناطیسی فاراده است.

**آزمایش ۲ -** 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 - ۲) نشان داده شده است. حلقه در جهت نشان داده شده از درون میدان مغناطیسی عبور داده می‌شود.



شکل ۱۰-۲

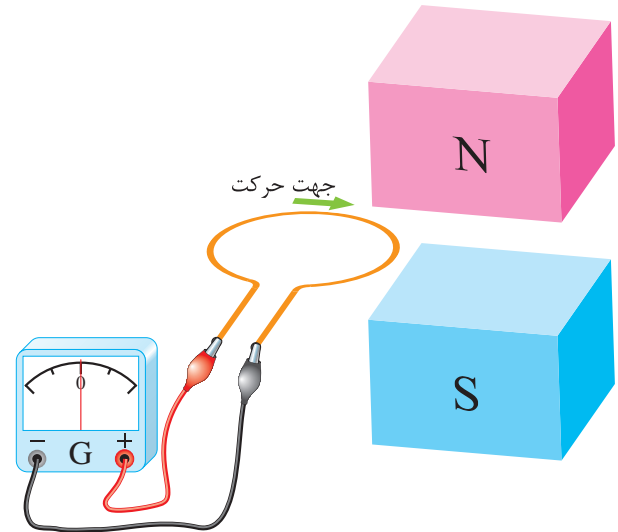
هرچه حلقه بیشتر وارد میدان مغناطیسی می‌شود فوران بیش‌تری سطح حلقه را می‌پوشاند. شکل (۱۱ - ۲).



شکل ۱۱-۲

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

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



شکل ۹-۲

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.

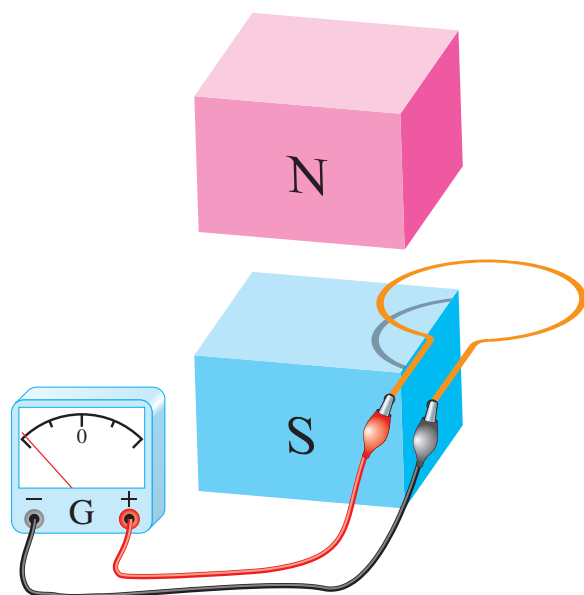
لحظه ورود حلقه به درون میدان مغناطیسی را شکل (۱۰ - ۲) نشان می‌دهد.

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

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.

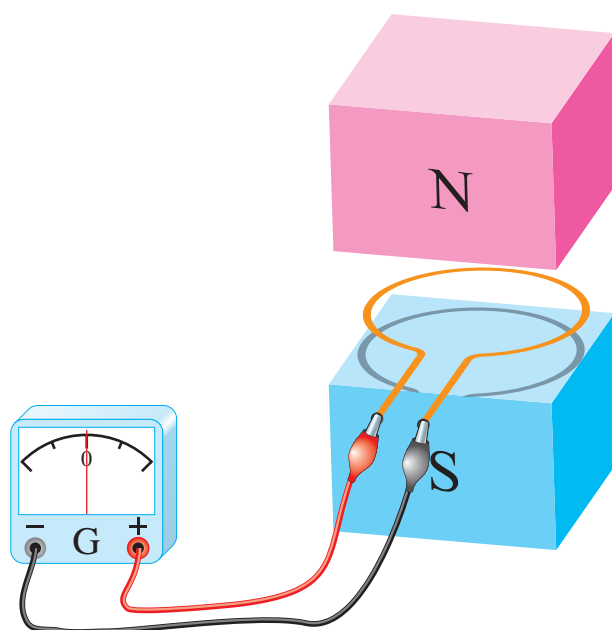
در لحظه خروج حلقه از میدان مغناطیسی فورانی که سطح حلقه را می‌پوشاند رو به کاهش است در صورتی که در زمان ورود حلقه به میدان مغناطیسی فورانی که سطح حلقه را می‌پوشاند رو به افزایش بوده است. لذا گالوانومتر به هنگام خروج حلقه از میدان مغناطیسی، برخلاف جهت ورود حلقه به میدان مغناطیسی، منحرف می‌شود.

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



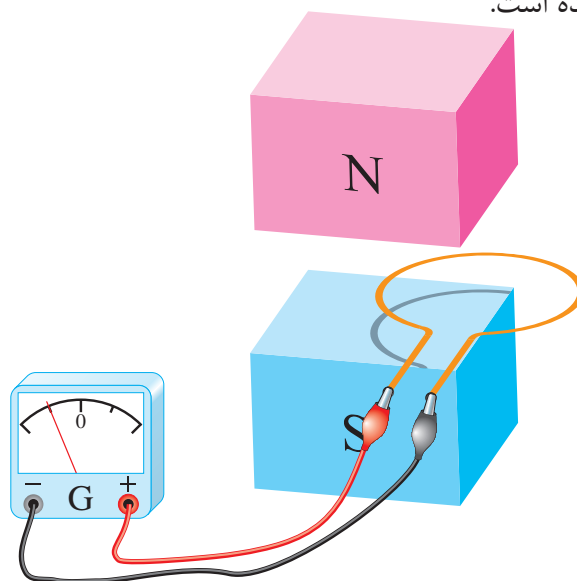
شکل ۲-۱۴

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.

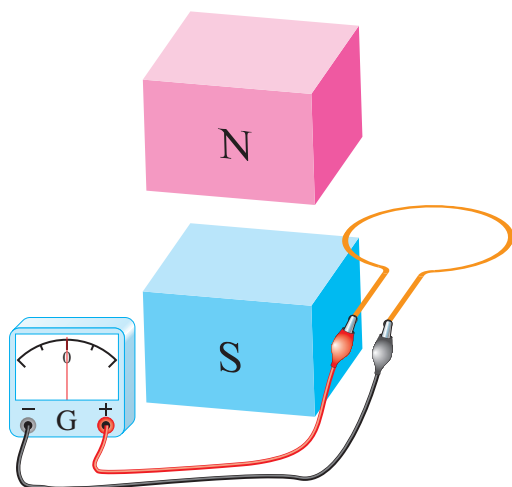


شکل ۲-۱۲

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



شکل ۲-۱۳



شکل ۱۵ - ۲

خروج کامل حلقه از میدان مغناطیسی در شکل (۱۵ - 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.

### هاینریش لنز



هاینریش فردریش امیل لنز در سال ۱۸۰۴ میلادی به دنیا آمد. وی یک فیزیک‌دان روسی - آلمانی - 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 پترزبورگ روسیه مشغول به کار شد. وی در سال ۱۸۶۵ میلادی در رم ایتالیا درگذشت.

### ۲-۲ - 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 به صورت «قانون لنز<sup>۱)</sup>» بیان می‌شود که توسط آقای لنز در سال ۱۸۳۴ میلادی ارایه گردید. طبق این قانون:

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

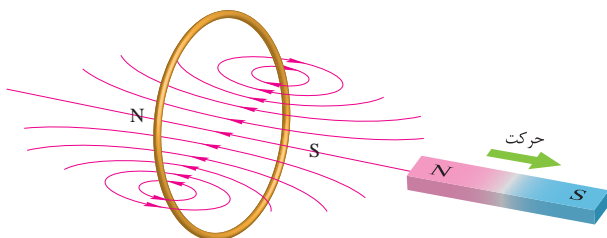
قانون لنز در مورد جریان‌های القایی به کار می‌رود.

از آنجایی که جریان در مدار بسته جاری می‌شود، لذا قانون لنز در مدارهای بسته کاربرد پیدا می‌کند.

در شکل (۱۶ - 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 به وجود آورنده‌اش مخالفت می‌کند؛ بدین معنی که میدان مغناطیسی ناشی از جریان القایی با حرکت آهن‌ربا به سمت حلقه مخالفت

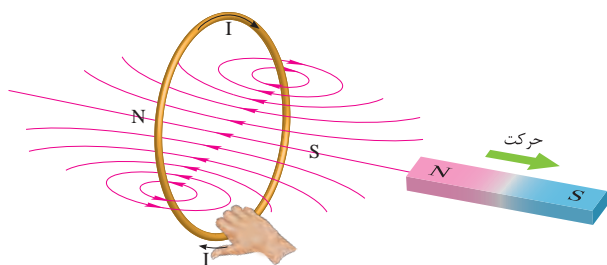


به وجود آورنده‌اش که همان «حرکت رو به عقب» آهن‌ربا است مخالفت خواهد کرد. یعنی میدان حلقه، قطب S خود را در مقابل قطب N آهن‌ربا قرار می‌دهد تا با ایجاد نیروی جاذبه مانع حرکت آهن‌ربا شود.



شکل ۲-۱۸

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

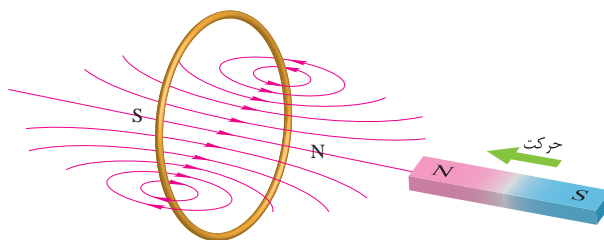


شکل ۲-۱۹

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

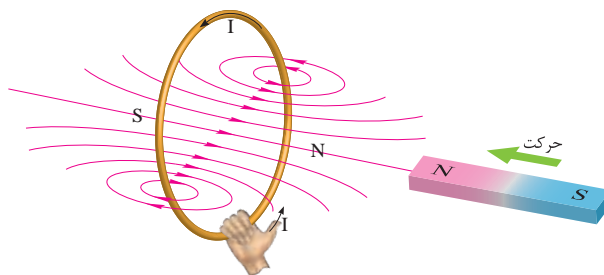
«حرکت» آهن‌ربا به سمت حلقه یا دور شدن از حلقه همیشه تحت تاثیر نیروی مقاوم میدان مغناطیسی حلقه قرار می‌گیرد. از این رو لازم است نیرویی که صرف حرکت آهن‌ربا می‌گردد کار انجام دهد.

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 ۲-۱۶

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

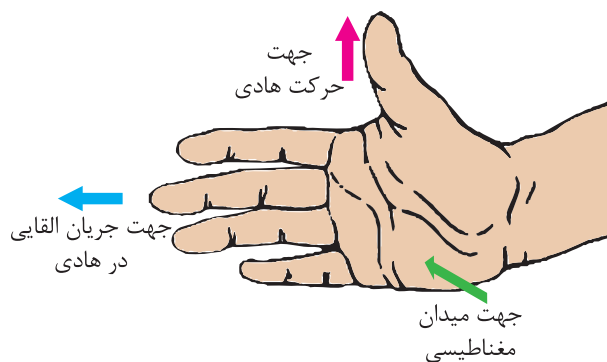


شکل ۲-۱۷

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.

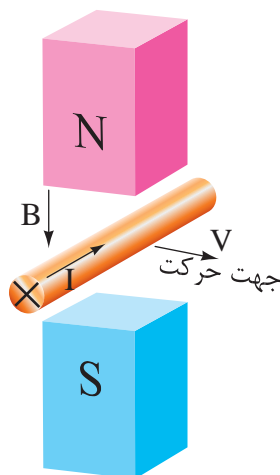
اگر آهن‌ربا مطابق شکل (۲ - ۱۸) به عقب حرکت داده شود، مطابق آزمایش ۱ فاراده نیز در این حالت جریان القایی در حلقه جاری می‌شود و طبق قانون لنز، میدان مغناطیسی ناشی از این جریان القایی نیز با عامل

## فعالیت ۱-۲

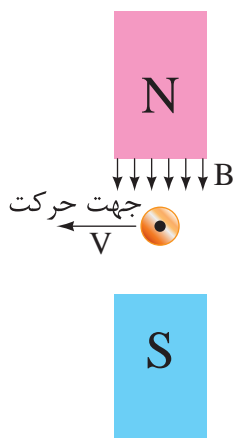


شکل ۲۰-۲ قانون دست راست

جهت جریان القایی یک هادی متحرک در میدان مغناطیسی توسط قانون دست راست در شکل‌های (۲۱-۲) و (۲۲-۲) تعیین شده است.



شکل ۲۱-۲



شکل ۲۲-۲

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

جهت میدان مغناطیسی جریان القایی به گونه‌ای است که همواره با عامل به وجود آورنده‌اش، «حرکت آهن ربا» مخالفت می‌کند. این مخالفت در رابطه قانون القای الکترومغناطیسی فاراده با یک علامت منفی به صورت رابطه (۴-۲) نشان داده می‌شود.

$$e = -N \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (۴-۲)$$

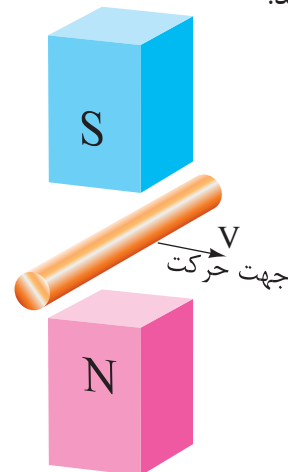
علامت منفی بیانگر همان قانون لنز است که در محاسبات دخالت داده نمی‌شود. لذا  $e$  به عنوان «نیروی ضد محرکه القایی»<sup>۱</sup> معرفی می‌شود تا مخالفت آن بر اساس قانون لنز در نام آن گنجانیده شده باشد. نیروی ضد محرکه القایی را به اختصار با  $Cemf$  نشان می‌دهند.

## ۴-۲-۲ قانون دست راست

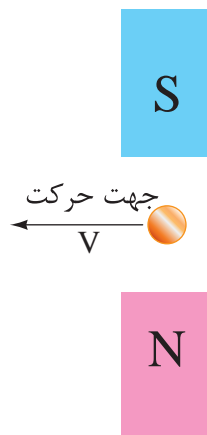
تعیین جهت جریان القایی با قانون بقای انرژی که به صورت قانون لنز در بخش ۳-۲ مطرح شد در برخی مواقع دشوار است. روش ساده‌تر برای تعیین جهت جریان القایی «قانون دست راست»<sup>۲</sup> است که آن را نیز می‌توان به کار برد. طبق این قانون اگر دست راست را مطابق شکل (۲۰-۲) طوری نگهداریم که فوران مغناطیسی از قطب N به کف دست وارد شود و شست جهت حرکت هادی را نشان دهد، انگشتان جهت جریان القایی هادی را نشان خواهند داد.

## فعالیت ۲-۲

۱ - جهت جریان القایی هادی شکل‌های (۲۳-۲) و (۲۴-۲) را با استفاده از قانون دست راست تعیین کنید.



شکل ۲-۲۳



شکل ۲-۲۴

۲ - از جواب‌های به‌دست آمده در شکل‌های (۲۱-۲) الی (۲۴-۲) چه نتیجه‌ای به‌دست می‌آید؟

## پرسش ۲-۱

### پرسش‌های کامل کردنی

۱ - تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی و بالعکس

..... نامیده می‌شود.

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

۳ - طبق قانون لنز ..... به گونه‌ای است که با عامل به‌وجود آورنده‌اش ..... می‌کند.

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

### پرسش‌های صحیح، غلط

۱ - ماشین‌های الکتریکی رابطی بین سیستم‌های الکتریکی و مکانیکی محسوب می‌شوند.

☐ صحیح ☐ غلط

۲ - قانون لنز در مورد جریان‌های القایی به کار می‌رود.

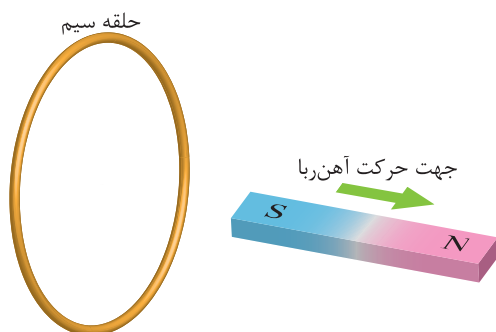
☐ صحیح ☐ غلط

### پرسش‌های تشریحی

۱ - ماشین الکتریکی را تعریف کنید.

۲ - ماشین‌های الکتریکی را چگونه طبقه‌بندی می‌کنند؟ توضیح دهید.

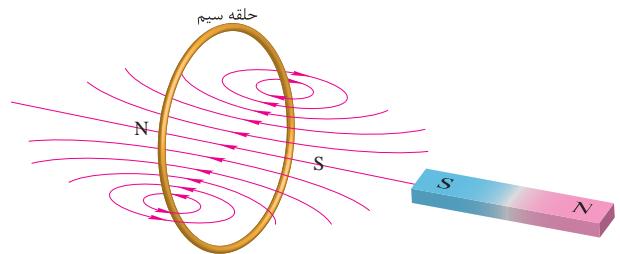
۳ - با توجه به شکل زیر جهت جریان القایی در حلقه را مشخص کنید.



۴- برگشت پذیری فرآیند تبدیل انرژی در ماشین‌های الکتریکی یعنی چه؟

۵- قانون لنز را تعریف کنید.

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



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

## ۵-۲- ژنراتورهای جریان مستقیم

ژنراتورهای جریان مستقیم<sup>۱</sup>، انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. پلاریته ولتاژ در پایانه‌های آنها ثابت است لذا جهت جریان در مصرف‌کننده عوض نمی‌شود (شکل ۲۵-۲).

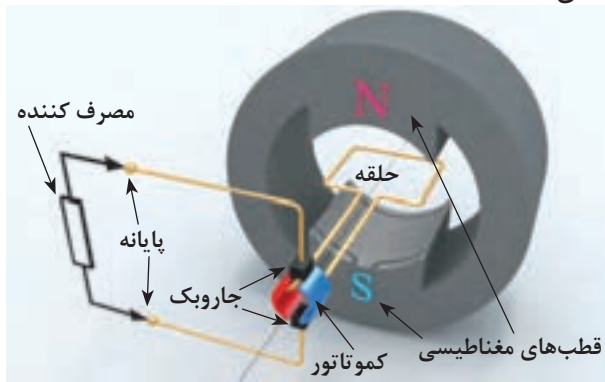


شکل ۲۵-۲ ژنراتور جریان مستقیم

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.

## ۱-۵-۲- ساختمان ژنراتور ساده جریان مستقیم

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



شکل ۲۶-۲ ژنراتور ساده جریان مستقیم با آهن‌ربای داریم ساختمان آن متشکل از چهار قسمت می‌باشد که عبارتند از:

۱- حلقه هادی

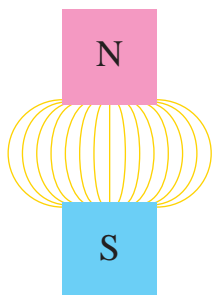
۲- کمو تاتور<sup>۲</sup>

۳- جاروبک<sup>۳</sup>

۴- قطب‌های مغناطیسی<sup>۴</sup>

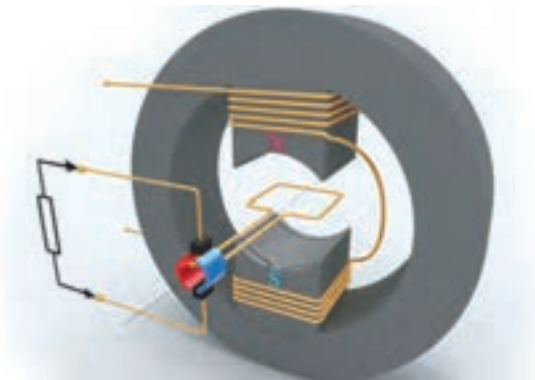
حلقه هادی حول محورش، در میان میدان مغناطیسی قوی دو قطب N و S یک آهن‌ربا، آزادانه می‌تواند گردش کند. سرهای حلقه هادی به دو نیم استوانه مسی لحیم شده است. این دو نیم استوانه مسی با عایقی از جنس میکا از یکدیگر جدا شده‌اند. به هر یک از این نیم استوانه مسی «تیغه»<sup>۵</sup> می‌گویند. مجموعه تیغه‌ها و عایق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

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 - ۲).



شکل ۲۸ - ۲ میدان مغناطیسی غیریکنواخت

برای تولید میدان مغناطیسی می‌توان به جای استفاده از آهن‌ربای دایم، سیم‌پیچی بر روی قطب‌ها پیچید تا با عبور جریان از آن، میدان مغناطیسی ایجاد شود. این سیم‌پیچی را «سیم‌پیچی میدان<sup>۱</sup>» یا «سیم پیچی تحریک<sup>۲</sup>» می‌نامند (شکل ۲۹ - ۲).



شکل ۲۹ - ۲ ژنراتور ساده جریان مستقیم با سیم‌پیچی تحریک میدان مغناطیسی میان دو قطب غیرهمنام «میدان طولی<sup>۳</sup>» نام دارد. راستای این میدان را با «محور مستقیم<sup>۴</sup>» نشان می‌دهند و آن را «محور  $d$ » می‌نامند. راستای عمود بر محور مستقیم را با «محور متعامد<sup>۵</sup>»

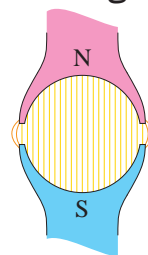
در این ژنراتور از دو جاروبک استفاده شده است. جاروبک‌ها بر روی کموتاتور قرار می‌گیرند. با گردش حلقه، کموتاتور متصل به آن در حال چرخش است و جاروبک‌ها با سایش به تیغه‌های کموتاتور، ارتباط الکتریکی حلقه هادی با مدار خارجی را برقرار می‌سازند و جریان القایی در آن را به مصرف‌کننده می‌رسانند. جنس جاروبک‌ها معمولاً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

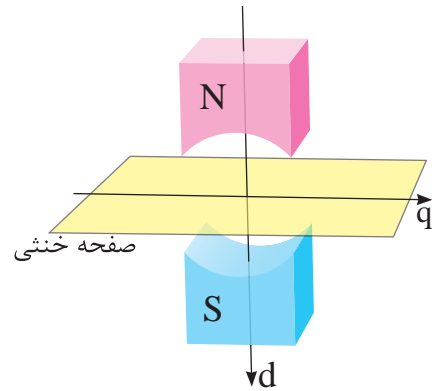
حلقه هادی از جنس مس انتخاب می‌شود. با گردش حلقه درون میدان مغناطیسی قطب‌ها، در آن نیروی محرکه القا می‌شود تا ولتاژ و جریان مورد نیاز مصرف‌کننده تامین شود.

نقش قطب‌ها ایجاد میدان مغناطیسی است که می‌توان توسط آهن‌ربای دایم به وجود 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 ۲۷ - ۲).



شکل ۲۷ - ۲ میدان مغناطیسی یکنواخت

نشان می‌دهند و آن را «محور  $q$ » می‌نامند. مماس بر محور متعامد عمود بر محور مستقیم صفحه‌ای فرضی در نظر می‌گیرند که «صفحه خنثی» نام دارد (شکل ۳۰ - ۲).



شکل ۳۰ - ۲ محورها  $d$  و  $q$

## پرسش ۲-۲

### پرسش‌های کامل کردنی

- ۱ - ژنراتورهای جریان مستقیم انرژی ..... را به انرژی ..... تبدیل می‌کنند.
- ۲ - مجموعه ..... و ..... کموتاتور نامیده می‌شود.

### پرسش‌های صحیح، غلط

- ۱ - نقش قطب‌ها ایجاد میدان مغناطیسی است.

☐ غلط ☐ صحیح

### پرسش‌های تشریحی

- ۱ - اجزای ساختمانی ژنراتور ساده جریان مستقیم را نام ببرید.
- ۲ - جنس جاروبک از چه موادی است و باید چه ویژگی‌هایی داشته باشد؟

۳ - میدان مغناطیسی غیر یکنواخت را تعریف کنید.

۴ - میدان مغناطیسی یکنواخت و غیریکنواخت را ترسیم کنید.

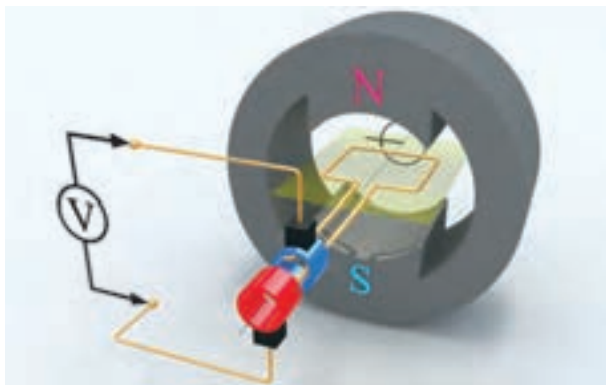
۵ - مفاهیم زیر را تعریف کنید؟

- |                 |                |
|-----------------|----------------|
| الف) میدان طولی | ب) محور مستقیم |
| پ) محور متعامد  | ت) صفحه خنثی   |

## ۲ - ۵ - ۲ - طرز کار ژنراتور ساده جریان مستقیم

اساس کار ژنراتورهای الکتریکی، بر مبنای قانون القای الکترومغناطیسی فاراده است. برای آشنایی با طرز کار ژنراتورها ابتدا به طرز کار ژنراتور ساده جریان متناوب پرداخته می‌شود.

با جایگزینی دو عدد «رینگ<sup>۱</sup>» به جای کموتاتور، ژنراتور ساده جریان مستقیم شکل (۲۶ - ۲) به ژنراتور ساده جریان متناوب تبدیل می‌شود (شکل ۳۱ - ۲).

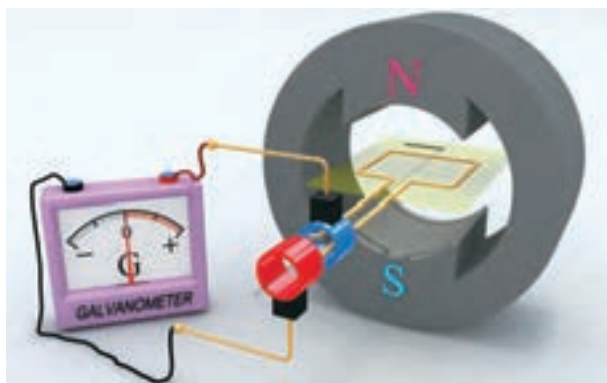


شکل ۳۱ - ۲ ژنراتور ساده جریان متناوب

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

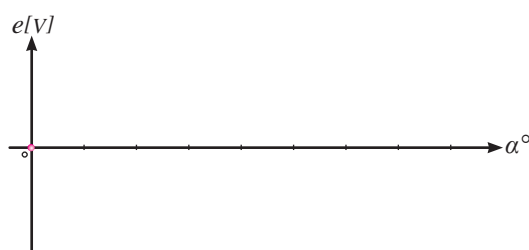
در این لحظه فوران، در سطح حلقه تغییرات ندارد. لذا طبق قانون القای الکترومغناطیسی فاراده در حلقه نیروی محرکه القا نمی‌شود و گالوانومتر صفر را نشان می‌دهد.

برای نشان دادن مقدار نیروی محرکه القایی در هر لحظه از دستگاه مختصات استفاده شده است که در آن محور افقی  $\alpha$  نامیده شده است. این محور بر اساس زاویه بین صفحه حلقه با صفحه خنثی مدرج می‌شود. محور عمودی  $e$  نامیده شده است و بر اساس مقدار نیروی محرکه القایی بر حسب ولت مدرج می‌شود.



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 اولین گام زمانی را که حلقه، در صفحه خنثی قرار دارد انتخاب شده است (شکل ۳۲ - 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.



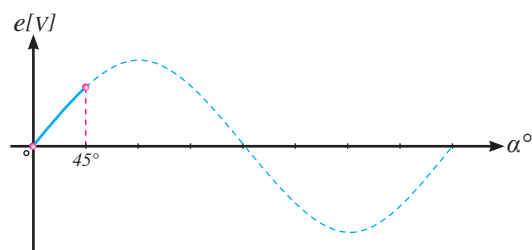
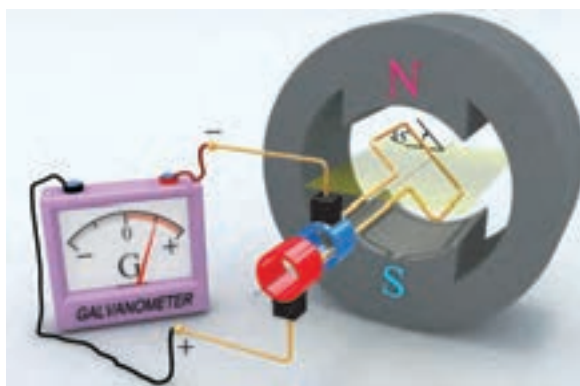
شکل ۳۲ - ۲

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

از آنجایی که در فاصله  $\langle \alpha \rangle 45^\circ$  «تغییرات فوران نسبت به زمان» برای سطح حلقه زیاد شده است مقدار نیروی محرکه القایی در حلقه نیز افزایش می‌یابد. شکل موج ولتاژ القایی در این فاصله روی محور مختصات نشان داده شده است.

با شروع دوران حلقه، سطح حلقه نسبت به صفحه خنثی زاویه پیدا می‌کند و فورانی که در سطح حلقه محصور می‌شود کاهش می‌یابد. لحظه‌ای که  $\alpha = 45^\circ$  است در شکل (۳۳ - ۲) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود فوران کمتری سطح حلقه را می‌پوشاند. تصویر فرضی سطح حلقه روی قطب S این موضوع را تأیید می‌کند. بنابراین در فاصله  $\langle \alpha \rangle 45^\circ$  فوران نسبت به زمان در حلقه تغییر کرده است و طبق قانون القای الکترومغناطیس فاراده در حلقه نیروی محرکه القا می‌شود.

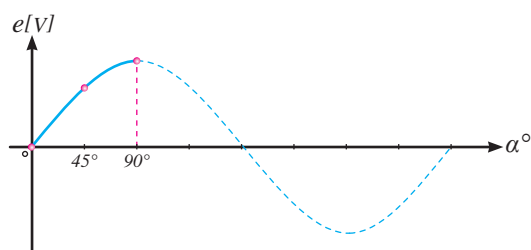
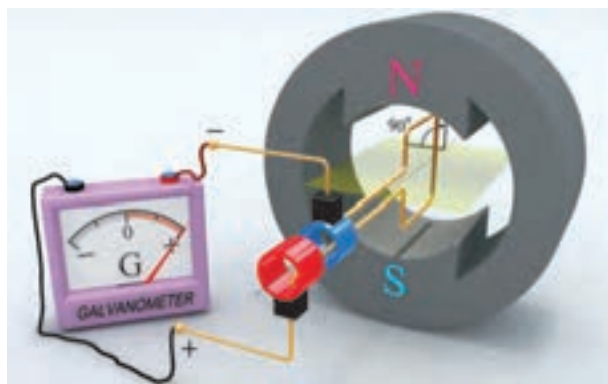




شکل ۲-۳۳

از زمانی که حلقه صفحه خنثی را در شکل (۲-۳۲) ترک کرد، تغییرات فوران در سطح حلقه رو به افزایش بوده است. بنابراین مقدار نیروی محرکه القایی نیز زیاد شده است. تا در  $\alpha = 90^\circ$  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.

در ادامه دوران حلقه در فاصله  $90^\circ < \alpha < 45^\circ$  فورانی که در سطح حلقه محصور می‌شود همچنان رو به کاهش است تا این که در  $\alpha = 90^\circ$  به صفر می‌رسد (شکل ۲-۳۴). این موضوع را عدم تشکیل تصویر حلقه روی سطح قطب S نیز تایید می‌کند. بنابراین در فاصله  $90^\circ < \alpha < 45^\circ$  همانند فاصله  $0 < \alpha < 45^\circ$  فوران نسبت به زمان در حلقه تغییر کرده است و طبق قانون القای الکترومغناطیس فاراده، نیروی محرکه القایی در حلقه ایجاد می‌شود.



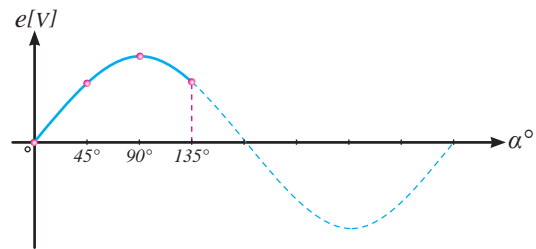
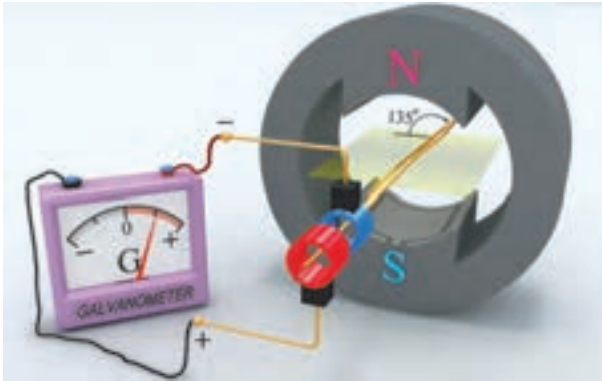
شکل ۲-۳۴

می‌شود در فاصله  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$  فورانی که توسط سطح حلقه محصور می‌شود به تدریج افزایش می‌یابد و در  $\alpha = 180^\circ$  به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این موضوع را بزرگ شدن تصویر فرضی سطح حلقه روی قطب S تایید می‌کند. بنابراین در فاصله  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$  همانند فاصله  $0 < \alpha < 90^\circ$  فوران نسبت به زمان در حلقه

با ادامه دوران حلقه زمانی فرا می‌رسد که صفحه حلقه مجدداً با صفحه خنثی مماس می‌شود. در این فاصله زاویه  $\alpha$  از  $90^\circ$  به  $180^\circ$  می‌رسد. وضعیت حلقه در  $\alpha = 180^\circ$  و  $\alpha = 135^\circ$  در شکل‌های (۲-۳۵) و (۲-۳۶) نشان داده شده است. با مقایسه شکل‌های (۲-۳۴)، (۲-۳۵)، و (۲-۳۶) مشاهده



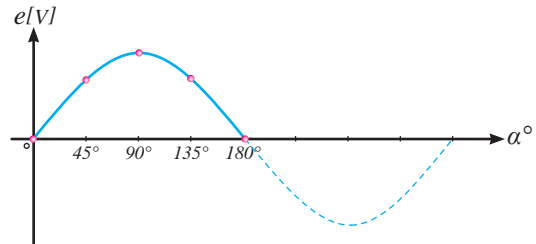
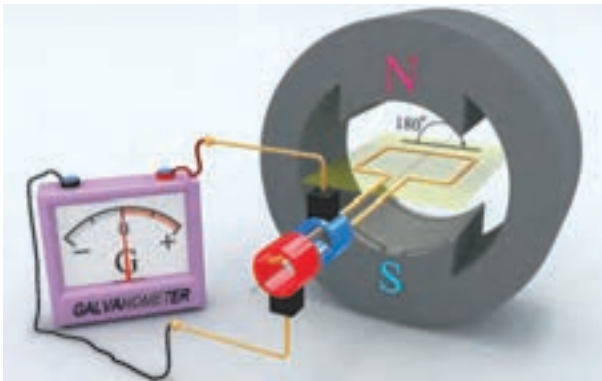
تغییر کرده است و طبق قانون القای الکترومغناطیسی  
فاراده نیروی محرکه در حلقه القا می‌شود.



شکل ۳۵- ۲

تا در  $\alpha = 180^\circ$  هنگامی که سطح حلقه در صفحه  
خنثی قرار می‌گیرد تغییرات فوران نسبت به زمان صفر  
می‌شود. لذا نیروی محرکه در حلقه القا نمی‌شود.

در فاصله  $\langle 180^\circ \rangle \alpha < 90^\circ$  «تغییرات فوران نسبت  
به زمان» برای سطح حلقه رو به کاهش بوده است.  
بنابراین مقدار نیروی محرکه القایی نیز کم می‌شود

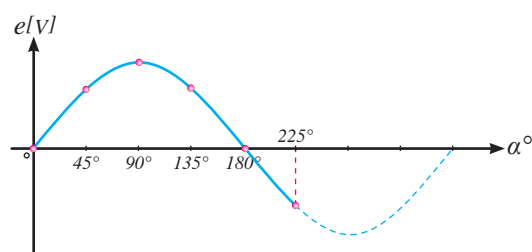
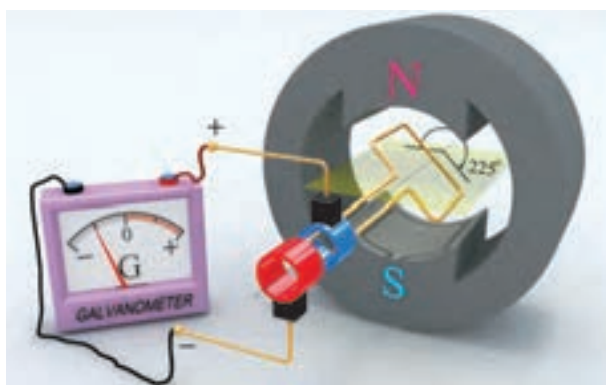


شکل ۳۶- ۲

کاهش می‌یابد و از بیشترین مقدار در  $\alpha = 180^\circ$  به  
کمترین مقدار در  $\alpha = 270^\circ$  می‌رسد و در این زاویه  
صفر می‌شود. کوچک شدن تصویر فرضی سطح حلقه  
روی قطب S این موضوع را 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.

با ادامه دوران حلقه، زاویه بین سطح حلقه و صفحه  
خنثی زیاد می‌شود. وضعیت حلقه در  $\alpha = 225^\circ$  در  
شکل (۳۷- ۲) و در  $\alpha = 270^\circ$  در شکل (۳۸- ۲)  
نشان داده شده است.

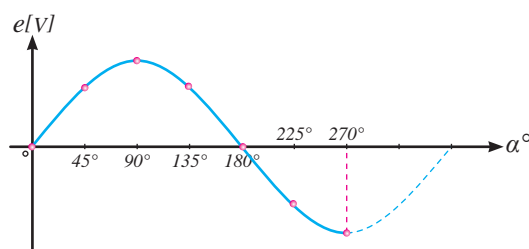
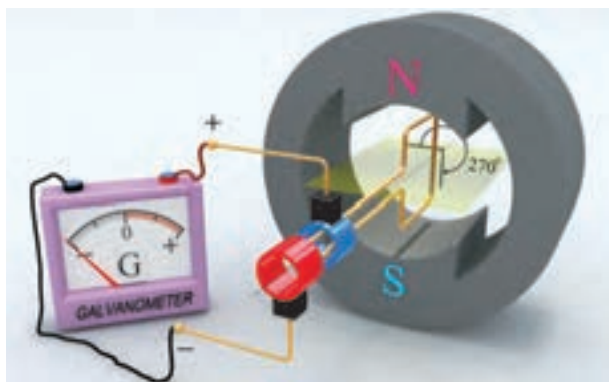
با مقایسه شکل‌های (۳۶- ۲)، (۳۷- ۲) و  
(۳۸- ۲) مشاهده می‌شود در فاصله  $\langle 270^\circ \rangle \alpha < 180^\circ$   
فورانی که در سطح حلقه محصور می‌شود به تدریج



شکل ۳۷ - ۲

جاروبک‌ها باعث تغییر جهت جریان القایی در ولت‌متر می‌شود و جهت حرکت عقربه ولت‌متر عکس حالت قبل می‌شود. بنابراین شکل موج در زیر محور  $\alpha$  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 - ۲).

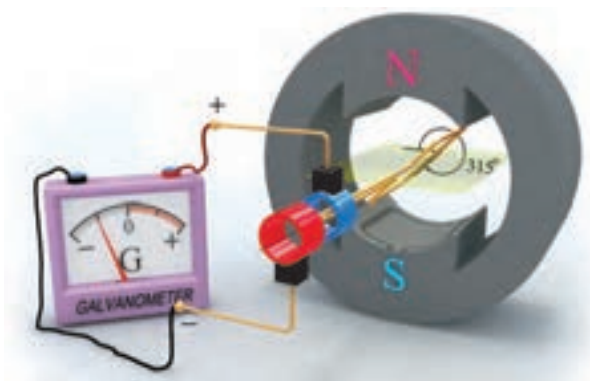


شکل ۳۸ - ۲

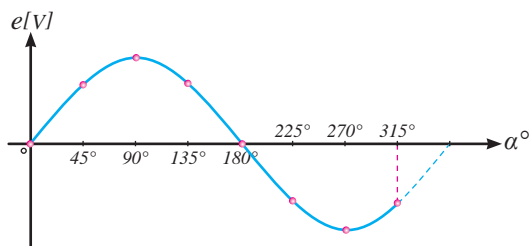
با مقایسه شکل‌های (۲ - ۳۸)، (۲ - ۳۹) و (۲ - ۴۰) مشاهده می‌شود در فاصله  $\alpha \langle 36^\circ$  از  $270^\circ$  فورانی که توسط سطح حلقه محصور می‌شود به تدریج افزایش می‌یابد و در  $\alpha = 36^\circ$  به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این موضوع را بزرگ شدن تصویر فرضی سطح

با ادامه دوران حلقه زمانی فرا می‌رسد که صفحه حلقه مجدداً با صفحه خنثی مماس می‌شود. در این فاصله زاویه  $\alpha$  از  $270^\circ$  به  $360^\circ$  می‌رسد. وضعیت حلقه در  $\alpha = 315^\circ$  در شکل (۲ - ۳۹) و در  $\alpha = 360^\circ$  در شکل (۲ - ۴۰) نشان داده شده است.

لذا طبق قانون القای الکترومغناطیسی فاراده نیروی محرکه، در حلقه القا می‌شود.



حلقه روی قطب S تأیید می‌کند. بنابراین در این فاصله «فوران نسبت به زمان» در حلقه تغییر کرده است؛

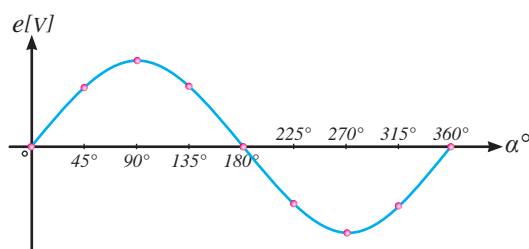
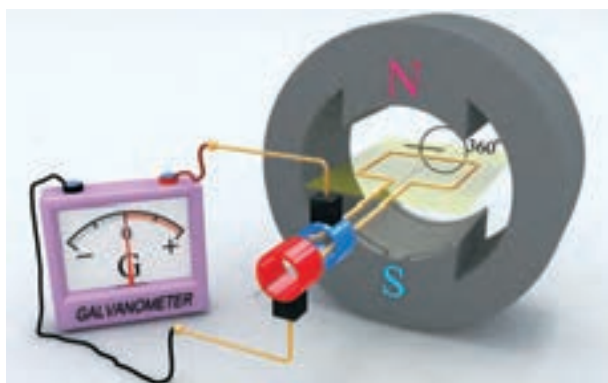


شکل ۳۹ - ۲

می‌شود و شکل موج در قسمت منفی دستگاه مختصات  $e$  و  $\alpha$  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.

«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  $180^\circ < \alpha < 270^\circ$  به علت گردش حلقه فوران قطب N از سمت دیگر سطح حلقه وارد حلقه می‌شود. لذا پلاریته ولتاژ القایی در حلقه معکوس



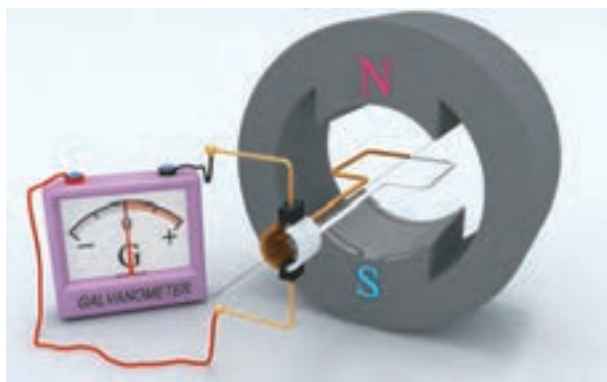
شکل ۴۰ - ۲

در شکل‌های (۲ - ۳۲) الی (۲ - ۴۰) 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.

موقعیت حلقه در شکل (۲ - ۴۰) همان موقعیت حلقه در شکل (۲ - ۳۲) 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

با دوران 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 - ۲

برای آشنایی با طرز کار ژنراتور ساده جریان مستقیم، حلقه حول محورش در جهت حرکت عقربه‌های ساعت دوران داده شده است و در چند لحظه، جهت جریان القایی در حلقه و همچنین جاروبک‌ها بررسی می‌شود. با شروع دوران، حلقه شکل (۴۱ - 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 - 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

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.

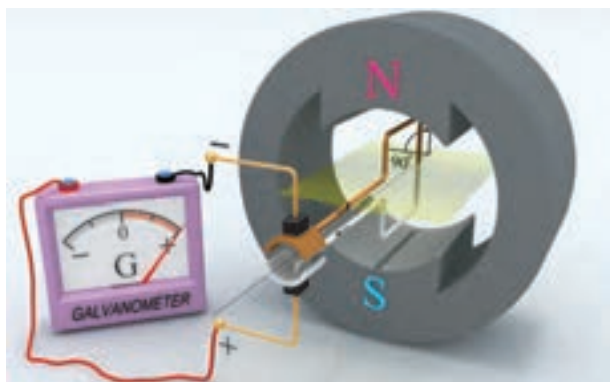
● در هر دور گردش حلقه پلاریته ولتاژ القایی جاروبک‌ها یک بار عوض می‌شود و جهت جریان القایی تغییر می‌کند.

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 مصرف کننده یکسو می‌شود.

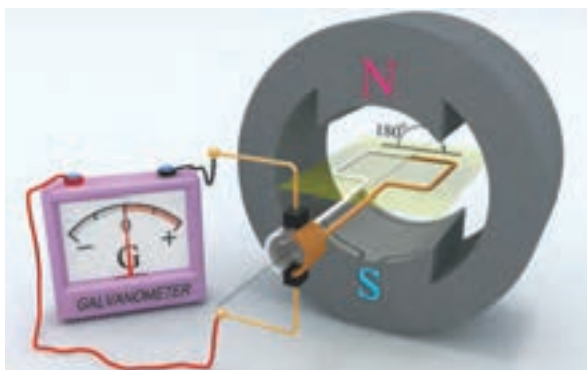
یک ژنراتور ساده جریان مستقیم متصل به یک گالوانومتر در شکل (۴۱ - ۲) نشان داده شده است. گالوانومتر ضمن این که مقدار ولتاژ القایی و جهت جریان القایی را نشان می‌دهد، نقش مصرف کننده را نیز ایفا می‌کند.

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 ۴۲-۲

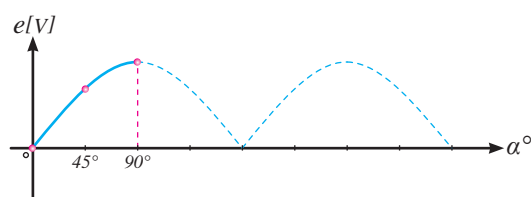
در حلقه به صفر می‌رسد و در آن نیروی محرکه القا نمی‌شود. بنابراین در حلقه جریان القایی جاری نمی‌شود. گالوانومتر صفر را نشان می‌دهد.



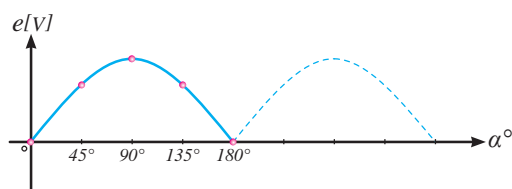
شکل ۴۳-۲

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

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



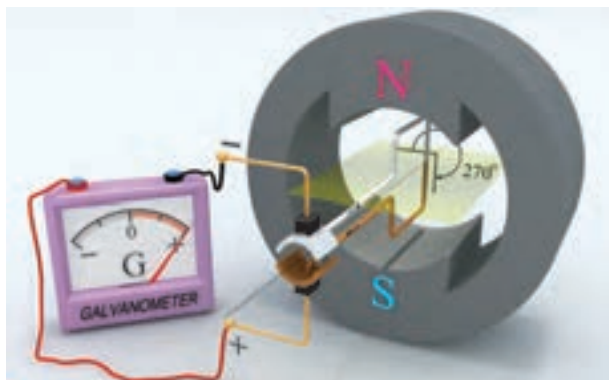
در ادامه دوران حلقه، زمانی فرا می‌رسد که سطح حلقه دوباره در صفحه‌ی خنثی قرار می‌گیرد. شکل (۴۳-۲). در این لحظه تغییرات فوران نسبت زمان



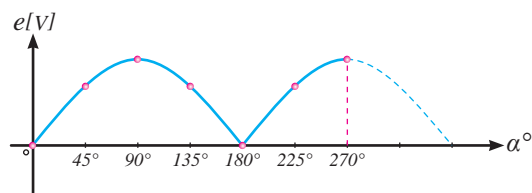
با ادامه دوران حلقه زمانی فرا می‌رسد که بازوی سفید حلقه در مقابل قطب N و بازوی قهوه‌ای حلقه در مقابل قطب S قرار می‌گیرد. شکل (۴۴-۲) با به کار بردن قانون دست راست، جهت جریان القایی این دو بازو تعیین می‌شود. بدین منظور برای بازوی قهوه‌ای کف دست راست در مقابل قطب N قرار می‌گیرد تا میدان قطب N به آن وارد شود و شست در جهت حرکت این بازو قرار داده می‌شود. بنابراین انگشتان جهت جریان



جهت جریان در گالوانومتر باعث شد تا عقربه آن در همان جهت قبلی انحراف پیدا کند. بنابراین شکل موج نیروی محرکه القایی نیز در همان جهت قبلی ترسیم می‌شود.



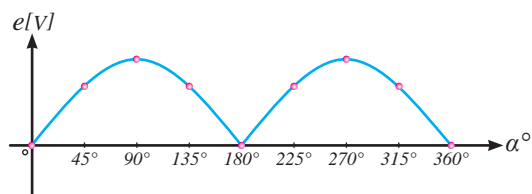
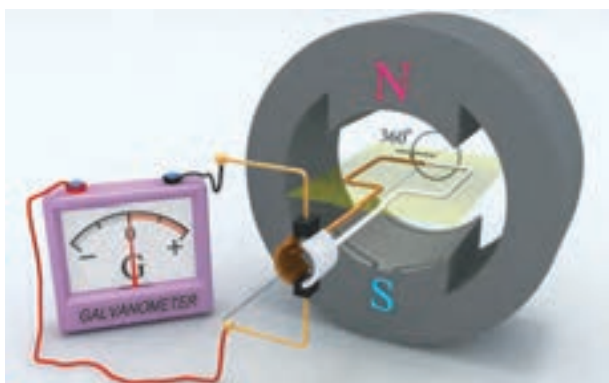
می‌شود و به بازوی سفید حلقه می‌رسد. جاروبک پایین که هم‌چنان جریان القایی از آن خارج می‌شود دارای پلاریته مثبت و جاروبک بالا که هم‌چنان جریان القایی به آن وارد می‌شود دارای پلاریته منفی است. عدم تغییر



شکل ۴۴- ۲

این حالت حلقه یک دور کامل دوران کرده است و با پیمودن  $360^\circ$  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.

در ادامه دوران حلقه، زمانی فرا می‌رسد که سطح حلقه دوباره در صفحه خنثی قرار می‌گیرد (شکل ۴۵- ۲). در این لحظه تغییرات فوران نسبت به زمان در حلقه به صفر می‌رسد و در آن طبق قانون القای الکترومغناطیسی فاراده، نیروی محرکه القا نمی‌شود. بنابراین در حلقه جریان القایی جاری نخواهد شد. در



شکل ۴۵- ۲

مقدار متوسط، میانگین مقادیر لحظه‌ای نیروی محرکه القایی است که چیزی بین صفر و حداکثر می‌باشد. برای شکل موج (۴۵- ۲) مقدار متوسط برابر است با:

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 می‌رسد و سپس دوباره به صفر بر می‌گردد. برای بیان اندازه واقعی نیروی محرکه القایی «مقدار متوسط<sup>۱</sup>» آن محاسبه می‌شود.

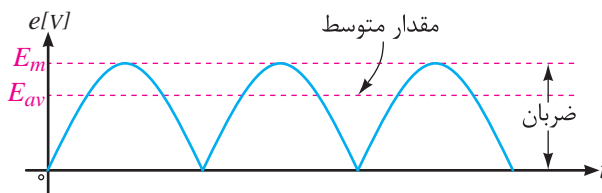
$$E_{av} = \frac{2E_m}{\pi} = 0.637E_m \quad (2-5)$$

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» آن بسیار زیاد است (شکل ۴۶ - ۲). بنابراین مقدار کم متوسط 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 - 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.

- هنگامی که 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 - ۵ - ۲ - اثر افزایش تعداد حلقه‌ها و تعداد دور آن در ژنراتور ساده جریان مستقیم

الف - اثر افزایش تعداد حلقه‌ها

برای کاهش ضربان و افزایش مقدار متوسط نیروی محرکه القایی به جای 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 - ۲).

۱. Ripple

مقدار لحظه‌ای نیروی محرکه القایی  $e$  در ژنراتور ساده جریان مستقیم از رابطه  $e = 2NBLV \sin \alpha$  به دست می‌آید. در این رابطه:

$N$  تعداد دور حلقه

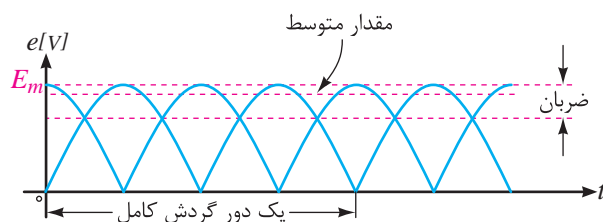
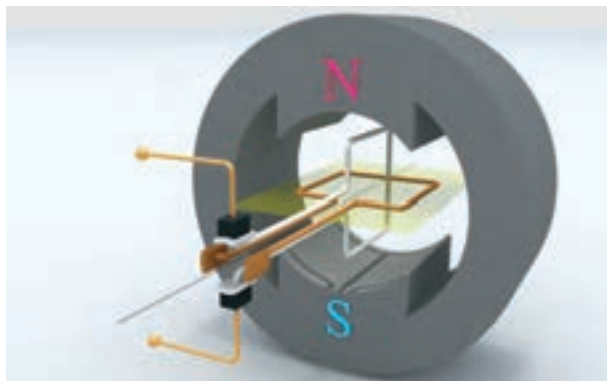
$B$  چگالی فوران مغناطیسی قطب‌ها بر حسب [T]

$L$  طول موثر هر بازوی حلقه در میدان مغناطیسی بر حسب [m]

$V$  سرعت حلقه بر حسب  $\left[\frac{m}{s}\right]$

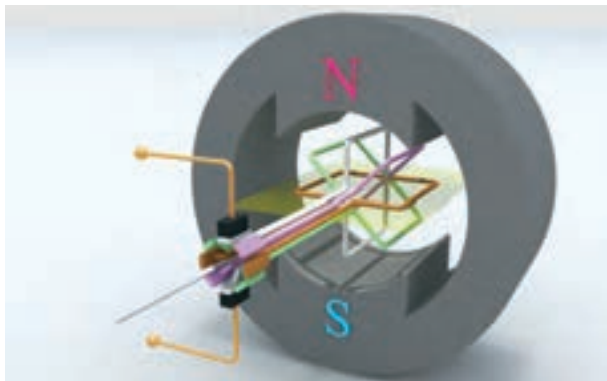
$\alpha$  زاویه بین سطح حلقه با صفحه خنثی بر حسب درجه

$e$  نیروی محرکه القایی بر حسب [V]

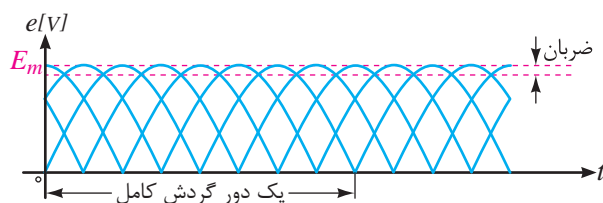


شکل ۴۷ - ۲

محركه القايي مي توان از تعداد حلقه هاي بيشترى استفاده كرد (شكل ۴۸ - ۲). با افزايش بيشتر تعداد حلقه ها، ضربان نيروي محركه القايي تقريباً به صفر مي رسد و مقدار متوسط نيروي محركه القايي  $E_{av}$  به حداكثر آن  $E_m$  نزديك مي شود. بديهي است افزايش تعداد حلقه ها تا جايي كه فضاي ميان قطبها اجازه دهد امكان پذير خواهد بود.



بدین ترتیب ضربان نیروی محركه القايي کاهش پيدا مي کند و مقدار متوسط آن افزايش مي يابد. همان طور كه در شكل (۴۷ - ۲) مشاهده مي شود، با افزايش تعداد حلقه ها، تعداد تيغه هاي كموتاتور افزايش مي يابد. در اين شكل نسبت تيغه ها به حلقه ها «دو به يك» است. براي کاهش ضربان و بيش تر شدن متوسط نيروي



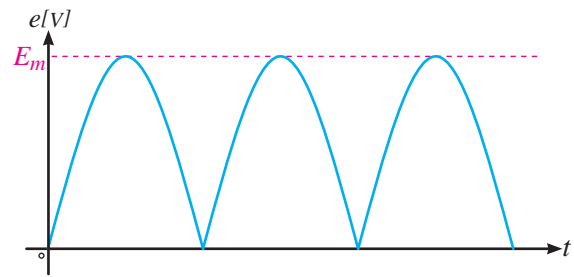
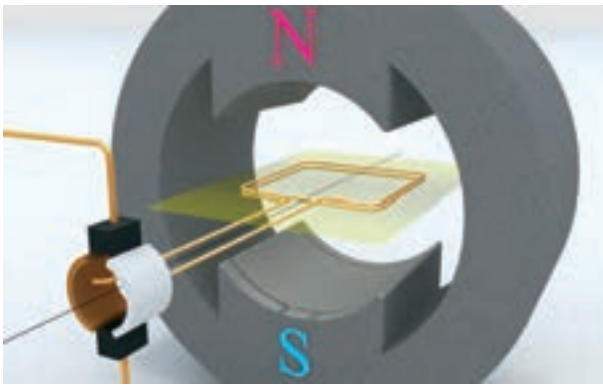
شکل ۴۸ - ۲

قانون القای الکترومغناطیسی فاراده  $(e = N \frac{\Delta \phi}{\Delta t})$  افزايش تعداد دور حلقه  $N$  باعث افزايش نيروي محركه القايي  $e$  در آن مي شود. در واقع در هر دور حلقه، نيروي محركه اي، القا مي شود. از آنجايي كه حلقه ها با يکديگر سري شده اند، نيروي محركه القايي حلقه ها با يکديگر جمع مي شود و در نتيجه نيروي محركه القايي كلاف افزايش مي يابد.

ب - اثر افزايش تعداد دور حلقه

همان طور كه گفته شد حداكثر مقدار نيروي محركه القايي  $E_m$  در ژنراتور ساده جريان مستقيم بسيار كم و در حد ميكرو ولت مي باشد. براي افزايش حداكثر مقدار نيروي محركه القايي  $E_m$  مي توان به جاي «حلقه» از «كلاف»<sup>۱</sup> كه از چندين حلقه سري با هم تشكيل شده است استفاده كرد (شكل ۴۹ - ۲). طبق رابطه



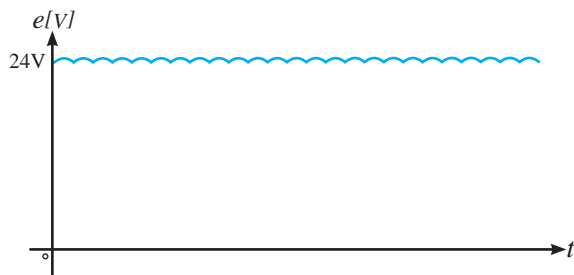
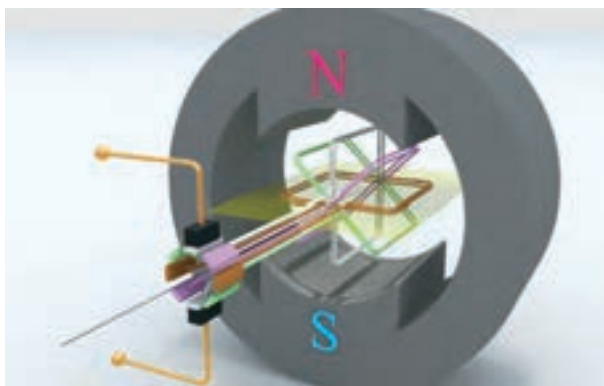


شکل ۴۹ - ۲

ج - نتیجه گیری

می کند، ضربان آن نیز کاهش می یابد. در این صورت ژنراتور کاربرد عملی پیدا می کند و ولتاژ پایانه های آن برای مصرف کننده قابل استفاده می شود (شکل ۵۰ - ۲).

در عمل با جایگزینی «کلاف ها» به جای «حلقه» در ژنراتور ساده جریان مستقیم، ضمن اینکه مقدار متوسط نیروی محرکه القایی افزایش قابل توجهی پیدا



شکل ۵۰ - ۲

پرسش ۲ - ۳

پرسش های صحیح، غلط

۱ - در ژنراتور ساده هر بار که حلقه وارد صفحه خنثی می شود نیروی محرکه القایی آن صفر می شود.

☐ صحیح ☐ غلط

۲ - با جایگزینی کموتاتور به جای رینگ ژنراتور ساده جریان متناوب به ژنراتور ساده جریان مستقیم تبدیل می شود.

☐ صحیح ☐ غلط

۳ - کموتاتور باعث می شود پلاریته ولتاژ القایی در

پرسش های کامل کردنی

۱ - در ژنراتور ساده با گردش حلقه ..... در سطح حلقه ایجاد می شود و طبق قانون ..... نیروی محرکه در حلقه ..... می شود.

۲ - در ژنراتور ساده با عبور حلقه از صفحه خنثی پلاریته ..... در حلقه ..... می شود.

۳ - در واقع جریان متناوب القایی داخل ژنراتور توسط ..... برای مصرف کننده ..... می شود.

زیر هر جاروبک ثابت بماند.

☐ غلط ☐ صحیح

### فعالیت ۳ - ۲

اگر جهت جریان الکتریکی هادی شکل (۵۱ - 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<sup>۱</sup>» که مفاهیم میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را شرح و تفصیل داده است، «نیروی لورنس<sup>۲</sup>» می‌گویند.  
مقدار نیروی مغناطیسی از رابطه (۶ - ۲) به‌دست می‌آید:

$$F = BIL \quad (۶-۲)$$

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 - ۲ - هادی به طول مؤثر  $20 [cm]$  در میدان مغناطیسی با چگالی فوران  $\left[\frac{wb}{m^2}\right] 0.8$  به‌طور عمود بر خطوط میدان مغناطیسی مطابق شکل

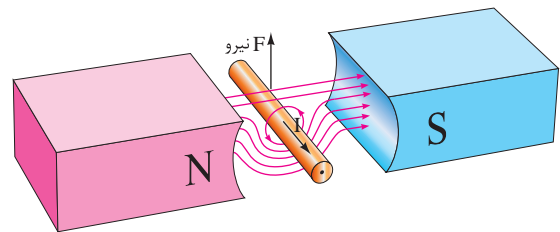
### پرسش‌های تشریحی

- ۱ - معایب ژنراتور ساده جریان مستقیم را بنویسید.
- ۲ - تأثیر افزایش تعداد حلقه‌ها و تعداد دور حلقه بر کار ژنراتور ساده را توضیح دهید.

### ۶ - ۲ - 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 - ۲).



شکل ۵۱ - 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 به سمت بالا حرکت می‌دهد.

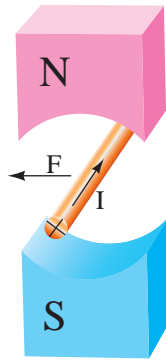
(۴۵ - ۲) قرار دارد. اگر از این هادی جریان  $10 \text{ [A]}$  عبور کند، نیروی مغناطیسی وارد بر این هادی چند نیوتن است؟

حل:

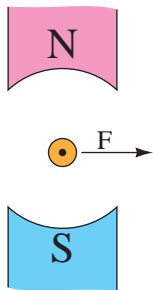
از رابطه (۶ - ۲) به دست می آید:

$$F = BIL$$

$$F = 0.8 \times 10 \times 20 \times 10^{-2} = 1.6 \text{ [N]}$$



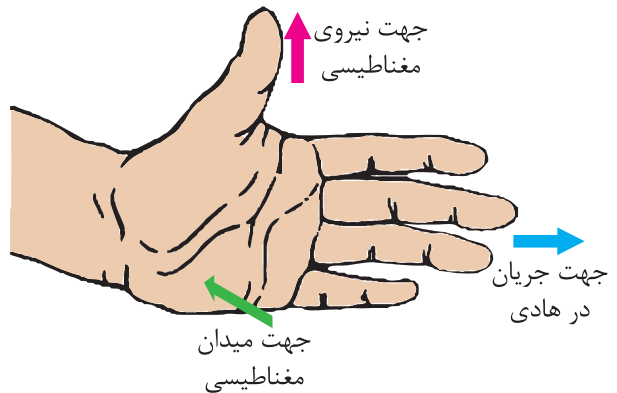
شکل ۵۳ - ۲



شکل ۵۴ - ۲

## ۲-۷ - قانون دست چپ

برای تعیین جهت نیروی مغناطیسی، «قانون دست چپ» ارائه شده است. طبق این قانون اگر دست چپ خود را مطابق شکل (۵۲ - ۲) به گونه ای نگه دارید که فوران مغناطیسی از قطب N به کف دست وارد شود و انگشتان، جهت جریان الکتریکی هادی را نشان دهند، انگشت شست جهت نیروی مغناطیسی وارد به هادی را نشان می دهد.



شکل ۵۲ - ۲

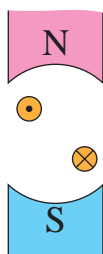
جهت نیروی مغناطیسی هادی حامل جریان، درون میدان مغناطیسی، توسط قانون دست چپ در شکل های (۵۳ - ۲) و (۵۴ - ۲) تعیین شده است.

## ۲-۴ فعالیت

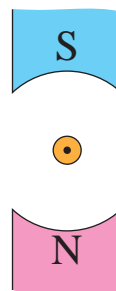
۱ - جهت نیروی مغناطیسی شکل های (۵۵ - ۲)، (۵۶ - ۲) را با استفاده از قانون دست چپ تعیین کنید.



شکل ۵۵ - ۲



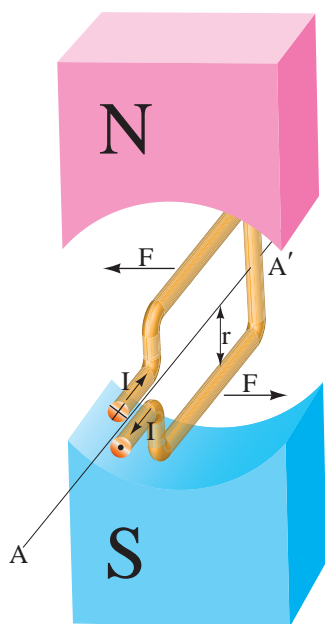
شکل ۵۸ - ۲



شکل ۵۶ - ۲

## ۸ - ۲ - 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 - 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»<sup>۱</sup> ایجاد می‌کنند<sup>۲</sup> و آن را حول محور می‌گردانند، لذا حلقه جابه‌جا می‌شود (شکل ۶۰ - ۲).



شکل ۵۹ - ۲

۲ - با مقایسه جهت نیروی مغناطیسی شکل‌های زیر، چه نتیجه‌ای به دست می‌آید:

الف - شکل (۵۳ - ۲) با شکل (۵۴ - ۲):

.....  
.....  
.....

ب - شکل (۵۳ - ۲) با شکل (۵۵ - ۲):

.....  
.....  
.....

پ - شکل (۵۳ - ۲) با شکل (۵۶ - ۲):

.....  
.....  
.....

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

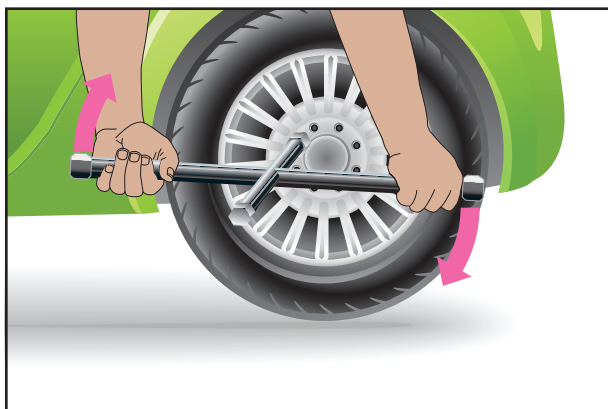


شکل ۵۷ - ۲

۱. Torque

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

به کار می‌برد تا گشتاور آچار افزایش یابد و بگردد (شکل ۶۲ - ۲).



شکل ۶۲ - ۲

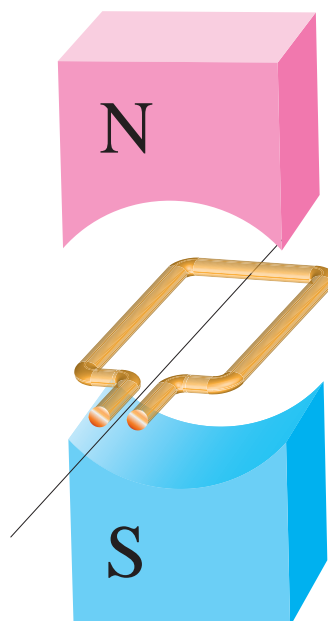
## فعالیت ۵ - ۲

۱ - چگونگی گشتاور در شکل (۶۳ - ۲) را بررسی کنید.



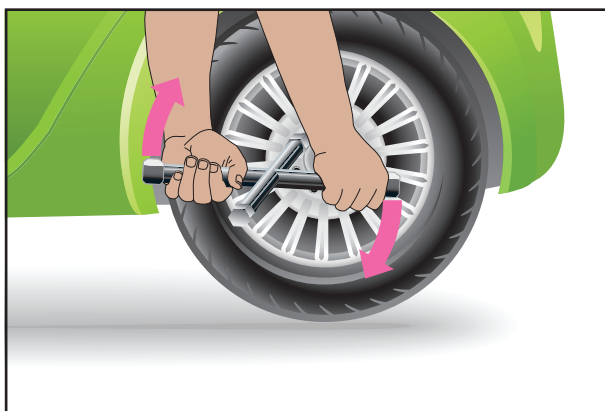
شکل ۶۳ - ۲

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



شکل ۶۰ - ۲

گشتاور عامل گردش است. به طور مثال هنگامی که مکانیک برای باز کردن پیچ‌های چرخ اتومبیل از «آچار چرخ» استفاده می‌کند، وی با دستان خود، دو نیرو در جهت مخالف به آچار چرخ اعمال می‌کند. این نیروها حول محور آچار چرخ گشتاور ایجاد می‌کنند تا آن بگردد (شکل ۶۱ - ۲).



شکل ۶۱ - ۲

در صورتی که مکانیک نتواند این آچار چرخ را بگرداند، آچاری که طول بازوهای آن بلندتر است را

## ۹-۲- موتورهای جریان مستقیم

موتورهای جریان مستقیم<sup>۱</sup>، 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 ۶۵-۲).



شکل ۶۴-۲

## پرسش ۴-۲

### پرسش‌های کامل کردنی

- ۱- مقدار نیروی مغناطیسی از رابطه ..... به دست می‌آید.
- ۲- برای تعیین ..... قانون دست چپ ارائه شده است.

### پرسش صحیح، غلط

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

☐ غلط ☐ صحیح

### پرسش تشریحی

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

## تمرین ۴-۲

- ۱- 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؟



شکل ۶۵-۲ موتور جریان مستقیم

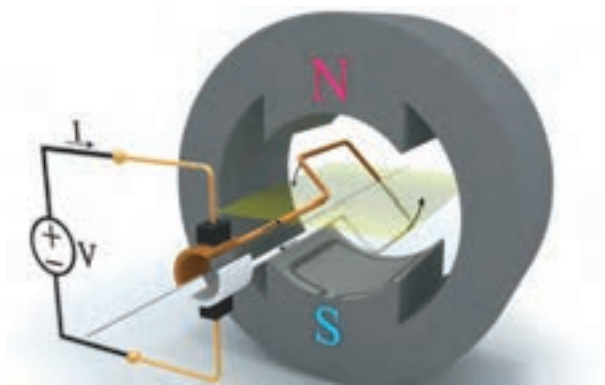
به منظور آشنایی با موتورهای جریان مستقیم ابتدا به توضیح موتور ساده جریان مستقیم پرداخته می‌شود. این موتور ساختمانی مشابه ساختمان ژنراتور ساده جریان مستقیم دارد. گشتاور آن بسیار کم و کاربرد عملی ندارد. اما برای آشنایی با طرز کار موتورهای واقعی جریان مستقیم، مطالعه آن بسیار مفید است.

## ۱-۹-۲- طرز کار موتور ساده جریان مستقیم

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

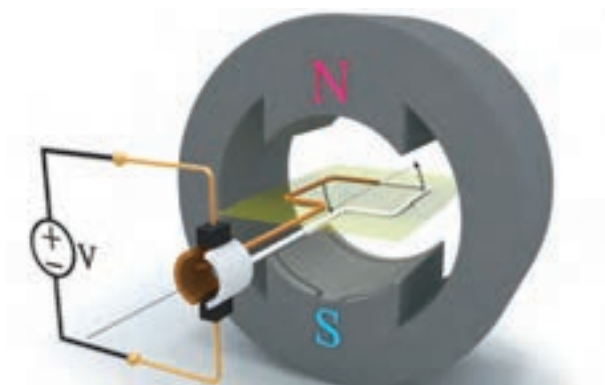


مادامی که جریان از بازوهای حلقه عبور می کند به آن ها نیروی مغناطیسی وارد می شود و حلقه تحت تأثیر گشتاور این نیروها به گردش خود ادامه می دهد (شکل ۶۸ - ۲).



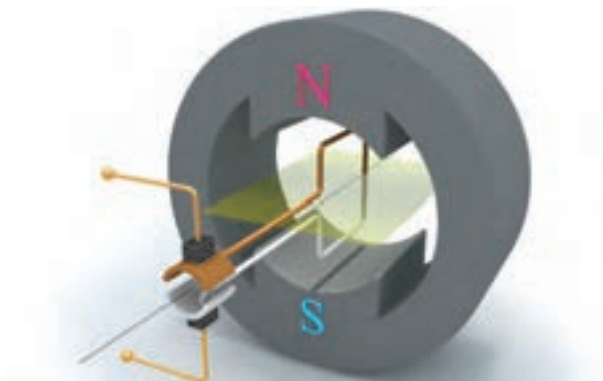
شکل ۶۸ - ۲

با گردش حلقه زمانی فرا می رسد که حلقه در صفحه خنثی قرار می گیرد. در این وضعیت اتصال جاروبک ها به کموتاتور قطع می شود و جریانی از حلقه نمی گذرد و با قطع جریان حلقه، نیروی مغناطیسی بازوهای آن صفر می شود. بنابراین در حلقه گشتاور ایجاد نمی شود (شکل ۶۹ - ۲).



شکل ۶۹ - ۲

اما سرعت اولیه حلقه باعث می شود که حلقه همچنان به حرکت خود ادامه دهد و صفحه خنثی را ترک کند. در این حالت مجدداً اتصال جاروبک ها به

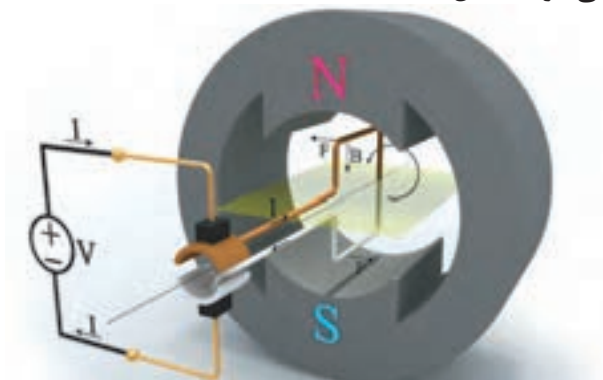


شکل ۶۶ - ۲

ساختمان آن مشابه ساختمان ژنراتور ساده جریان مستقیم می باشد و از چهار قسمت حلقه هادی، جاروبک، کموتاتور و قطب های مغناطیسی تشکیل شده است.

با اتصال منبع ولتاژ با جریان مستقیم به موتور ساده جریان مستقیم، جریان از قطب مثبت منبع، از طریق جاروبک به تیغه قهوه ای کموتاتور می رسد و وارد بازوی قهوه ای حلقه می شود و با عبور از بازوی سفید از طریق تیغه سفید کموتاتور و جاروبک به قطب منفی منبع می رسد.

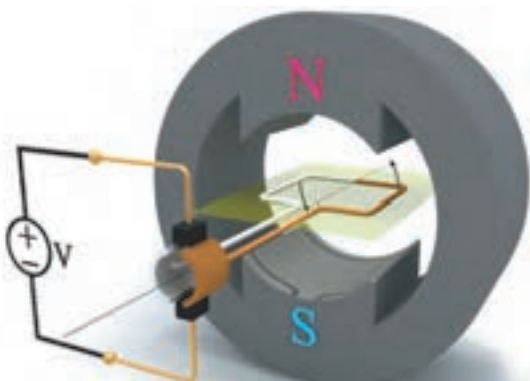
به بازوهای حامل جریان حلقه، نیروی مغناطیسی وارد می شود که با قانون دست چپ جهت آنها تعیین می شود (شکل ۶۷ - ۲).



شکل ۶۷ - ۲

این دو نیروی مغناطیسی در دو جهت مخالف یکدیگر به هر دو بازوی حلقه وارد می شوند و گشتاور ایجاد می کنند و باعث گردش حلقه حول محورش خواهند شد.

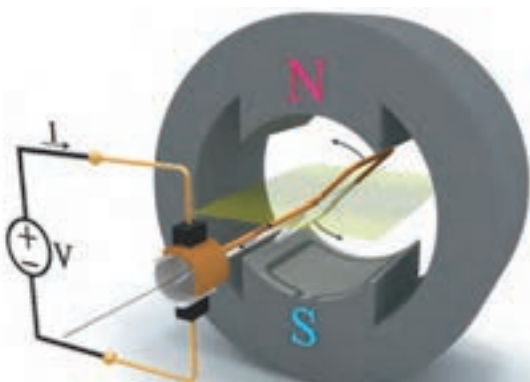
تیغه‌های کموتاتور برقرار می‌شود (شکل ۷۰ - ۲).



شکل ۷۲ - ۲

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

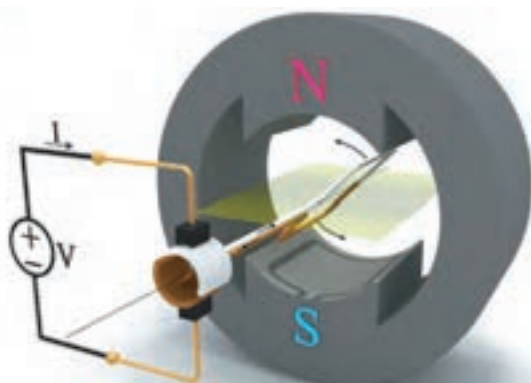
اما همچنان که توضیح داده شد، سرعت اولیه حلقه، آن را از صفحه خنثی خارج می‌کند تا اتصال جاروبک‌ها به تیغه‌های کموتاتور برقرار شود (شکل ۷۳ - ۲).



شکل ۷۳ - 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.

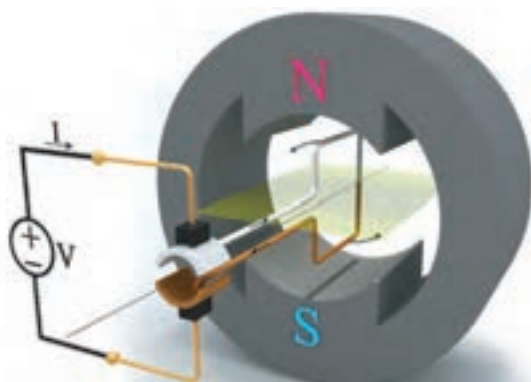
گردش حلقه ادامه می‌یابد تا سطح حلقه مجدداً عمود بر صفحه خنثی قرار می‌گیرد (شکل ۷۴ - ۲).



شکل ۷۰ - 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 - ۲).



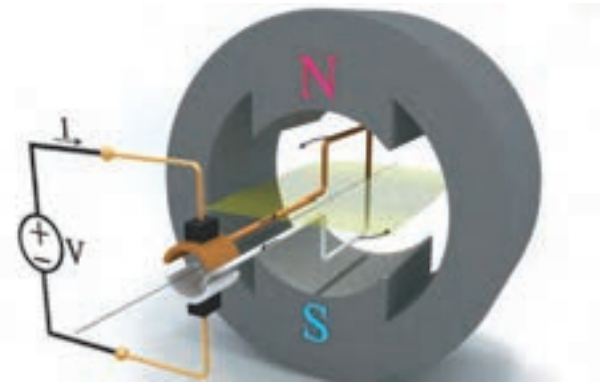
شکل ۷۱ - ۲

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



اصطلاحاً «راه اندازی» نمی‌شود.

گشتاور بسیار کم و یکنواخت نبودن گشتاور و همچنین عدم راه اندازی هنگامی که حلقه در صفحه خنثی است، از معایب موتور ساده جریان مستقیم محسوب می‌شود و باعث شده است تا این موتور غیرقابل استفاده باشد.



شکل ۷۴-۲

در این حالت بیشترین گشتاور در حلقه ایجاد می‌شود. در این جا حلقه با  $360^\circ$  درجه گردش به موقعیت اول خود در شکل (۶۷-۲) رسیده است. بدیهی است که گردش حلقه ادامه می‌یابد.

در موتور ساده جریان مستقیم با قرار گرفتن حلقه در صفحه خنثی گشتاور وارد به آن صفر می‌شود. هرگاه حلقه عمود بر صفحه خنثی قرار می‌گیرد گشتاور وارد به آن حداکثر می‌شود. بنابراین در حین گردش حلقه، مقدار لحظه‌ای گشتاور تغییر می‌کند و یکنواخت نیست<sup>۱</sup>. همچنین مقدار گشتاور بسیار کم و غیر کاربردی است و یکنواخت نبودن آن باعث شده است تا موتور ساده جریان مستقیم غیرقابل استفاده شود.

همچنین اگر حلقه در صفحه خنثی قرار داشته باشد و به منبع ولتاژ متصل شود، جاروبک‌ها به کموتاتور اتصال ندارند و جریان از حلقه عبور نمی‌کند و گشتاور در آن ایجاد نمی‌شود. لذا حلقه گردش نمی‌کند و

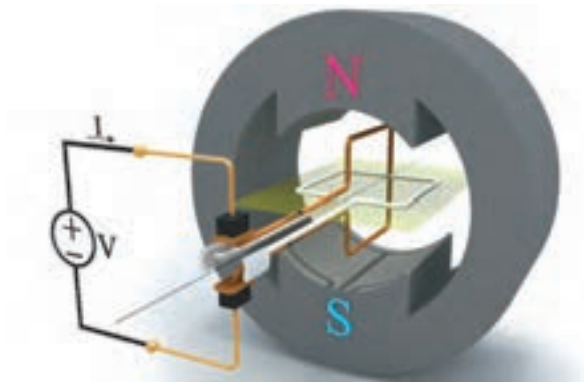
## ۲-۹-۲- اثر افزایش تعداد حلقه‌ها و تعداد دور آن

### در موتور ساده جریان مستقیم

#### الف - اثر افزایش تعداد حلقه

برای یکنواخت شدن گشتاور و راه اندازی در هر وضعیتی، تعداد حلقه‌ها را در موتور ساده جریان مستقیم افزایش می‌دهند.

موتور جریان مستقیم با دو حلقه عمود بر هم که روی یک محور قرار گرفته‌اند در شکل (۷۵-۲) نشان داده شده است.



شکل ۷۵-۲

در این شکل جاروبک‌ها به کموتاتور حلقه قهوه‌ای

۱. مقدار لحظه‌ای گشتاور در موتور ساده جریان مستقیم از رابطه  $T = 2NBLI r \sin \alpha$  به دست 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  $[A]$

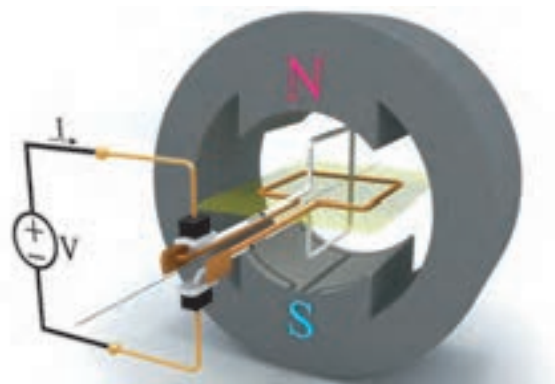
$r$  شعاع حلقه بر حسب  $[m]$

$\alpha$  زاویه بین سطح حلقه با صفحه خنثی بر حسب درجه

$T$  گشتاور بر حسب  $[N.m]$

اتصال دارند، لذا با اتصال منبع 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 سفید جریانی نمی‌گذرد و در آن گشتاور ایجاد نمی‌شود. حلقه‌ها در اثر گشتاور حلقه قهوه‌ای شروع به گردش می‌کنند.

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

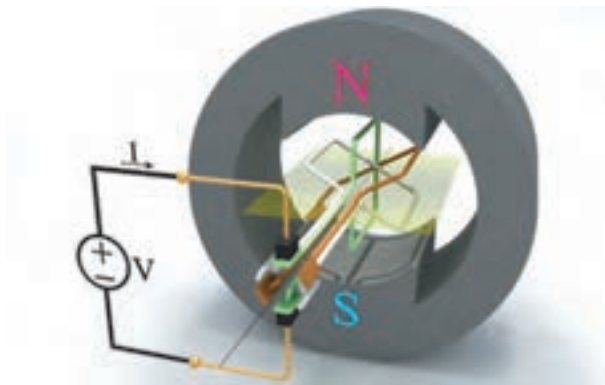


شکل ۷۶ - ۲

در این شرایط جریان از حلقه سفید می‌گذرد و در آن گشتاور ایجاد می‌شود. حلقه قهوه‌ای فاقد جریان می‌شود و در آن گشتاور ایجاد نمی‌شود. این بار حلقه‌ها به سبب گشتاور ایجاد شده در حلقه سفید گردش می‌کنند.

به‌طوری که مشاهده شد با قرار دادن دو حلقه عمود بر هم، که بر روی یک محور قرار دارند لحظه‌ای وجود نخواهد داشت که هر دو حلقه فاقد جریان شوند. لذا گشتاور هیچ‌گاه صفر نمی‌شود. بنابراین تغییرات گشتاور کاهش می‌یابد و موتور در هر وضعیتی راه‌اندازی می‌شود.

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



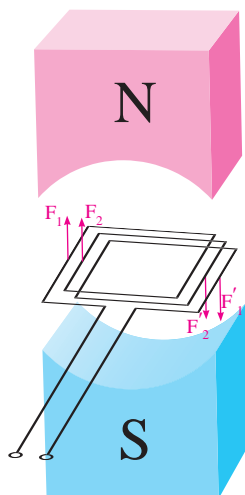
شکل ۷۷ - ۲

جاروبک‌ها همواره به کموتاتوری اتصال می‌یابند که حلقه مربوط به آن در وضعیت گشتاور حداکثر قرار دارد.

ب - افزایش تعداد دور حلقه

گشتاور ایجاد شده در موتور ساده جریان مستقیم تک حلقه‌ای شکل (۶۶ - ۲) بسیار کم بوده و کاربردی نمی‌باشد؛ این عیب بزرگی برای موتور ساده محسوب می‌شود.

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



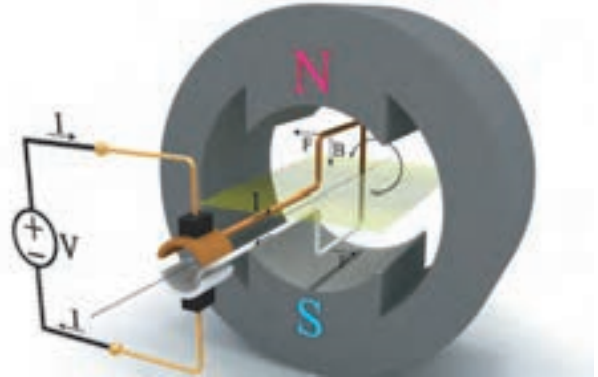
شکل ۷۸ - ۲

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

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- ۹- ۲- تغییر جهت گردش

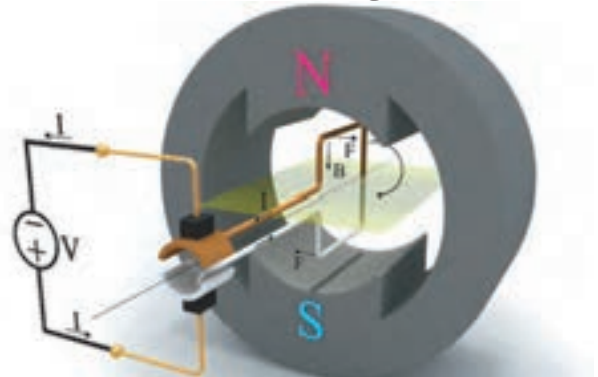
موتور ساده جریان مستقیم متصل به منبع ولتاژ در شکل (۲- ۷۹) نشان داده شده است.



شکل ۲- ۷۹

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

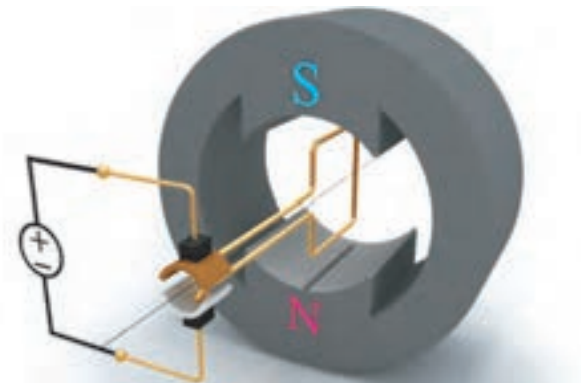
با تعویض پلار تیه‌های منبع ولتاژ، جهت جریان در حلقه عوض می‌شود. لذا جهت نیروهای مغناطیسی وارد به هر بازوی حلقه نیز عوض می‌شود و گشتاور ناشی از این نیروها، حلقه را حول محورش در جهت حرکت عقربه‌های ساعت می‌گرداند. شکل (۲- ۸۰).



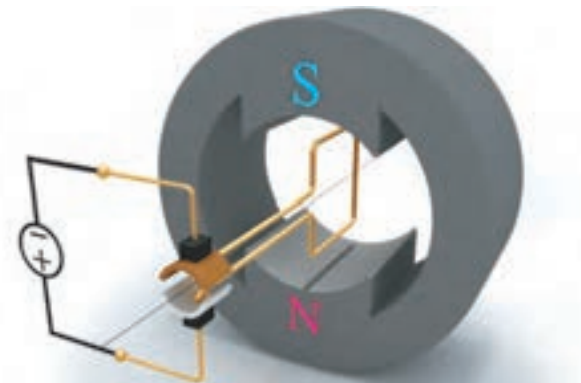
شکل ۲- ۸۰

### ۶- ۲- فعالیت

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



شکل ۲- ۸۱



شکل ۲- ۸۲

۲- از مقایسه شکل (۲- ۷۹) با شکل (۲- ۸۰) چه نتیجه‌ای به دست می‌آید؟

.....

.....

.....

۳- از مقایسه شکل (۲- ۷۹) با شکل (۲- ۸۱) چه نتیجه‌ای به دست می‌آید؟

.....

.....

.....

۴ - از مقایسه شکل (۷۹ - ۲) با شکل (۸۲ - ۲) چه نتیجه‌ای به دست می‌آید؟

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

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

۲ - تعویض محل قطب‌ها به منظور تغییر جهت میدان مغناطیسی

در موتورهای جریان مستقیم 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 - ۲

### پرسش‌های کامل کردنی

۱ - موتورهای جریان مستقیم، انرژی ..... را به انرژی ..... تبدیل می‌کنند.

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

۳ - به منظور افزایش ..... از حلقه با ..... بیشتر استفاده می‌شود.

### پرسش‌های صحیح، غلط

۱ - در موتور ساده جریان مستقیم با قرار گرفتن حلقه

در صفحه خنثی گشتاور وارد به آن صفر می‌شود.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ - در موتور ساده جریان مستقیم گشتاور بسیار زیاد و یکنواخت است.

صحیح ☐ غلط ☐

### پرسش‌های تشریحی

۱ - طرز کار موتور ساده جریان مستقیم را شرح دهید.

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

۳ - معایب موتور ساده جریان مستقیم را بنویسید.

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

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

## ۱۰ - ۲ - ساختمان ماشین‌های جریان مستقیم

پس از آشنایی با طرز کار ماشین‌های ساده جریان مستقیم (ژنراتور و موتور) اینک به ساختمان آنها پرداخته می‌شود.

ماشین‌های جریان مستقیم در عمل دارای ساختمان پیچیده‌تری می‌باشند 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 - ۲) نشان داده شده است.



شکل ۸۳- ۲ ماشین جریان مستقیم

ساختمان ماشین‌های جریان مستقیم از دو قسمت اصلی تشکیل شده است:  
قسمت ساکن یا استاتور<sup>۱</sup>  
قسمت متحرک یا رتور<sup>۲</sup>  
قسمت‌های ساکن و متحرک دارای اجزائی می‌باشند که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

شکل ۸۴- 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- ۱۰- ۲- اجزای قسمت ساکن

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

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

#### بدنه

بدنه<sup>۳</sup> 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.

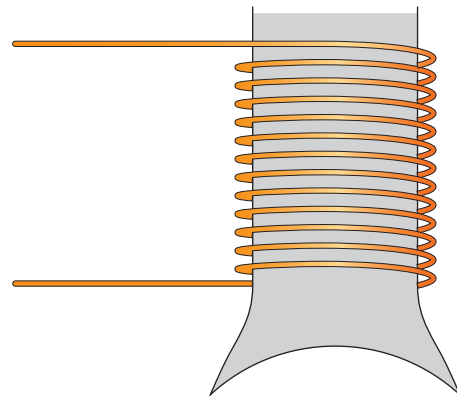


فولاد الکتریکی می باشد.

در برخی از ماشین های جریان مستقیم در بین قطب های مغناطیسی، قطب هایی به نام «قطب کموتاسیون»<sup>۱</sup> یا «میان قطب»<sup>۲</sup> تعبیه می شود که به وظایف آن ها بعداً پرداخته می شود.

### سیم پیچی میدان

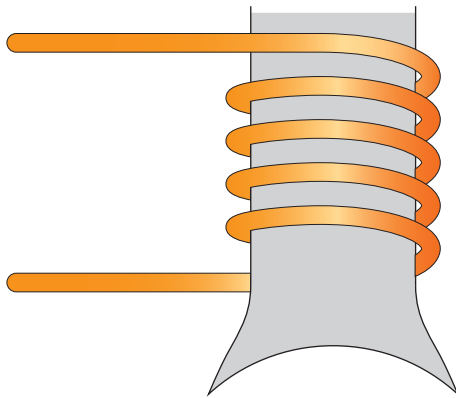
با اعمال جریان dc به سیم پیچی میدان<sup>۳</sup>، میدان مغناطیسی اصلی ماشین جریان مستقیم فراهم می شود. برای ایجاد میدان مغناطیسی در قطب های ماشین نیاز به آمپر دور مشخصی است. برای جریان های کم بایستی تعداد دور سیم پیچی میدان زیاد باشد ولی چون مقدار جریان کم است، سطح مقطع سیم کم می باشد. شکل (۸۵ - ۲)



شکل ۸۵ - ۲ سیم پیچی میدان برای جریان کم

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

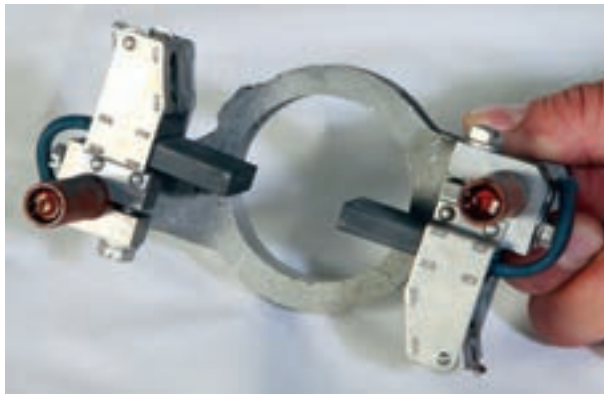
از آنجایی که «سیم پیچی میدان» در قسمت ساکن ماشین های جریان مستقیم قرار دارد آن را «سیم پیچی استاتور» نیز خطاب می کنند. و به طور کلی اصطلاح «سیم پیچی» به آن اطلاق می شود.



شکل ۸۶ - ۲ سیم پیچی میدان برای جریان زیاد

### جاروبک و جاروبک نگهدار

در قسمت ساکن ماشین های جریان مستقیم وسیله ای به نام جاروبک نگهدار<sup>۴</sup> نصب شده است. وظیفه جاروبک نگهدار، قرار دادن صحیح جاروبک ها روی تیغه های کموتاتور است. جاروبک ها در جاروبک نگهدار قرار می گیرند و توسط فنری با فشار قابل تنظیم بر روی کموتاتور فشار داده می شوند (شکل ۸۷ - ۲).



شکل ۸۷ - ۲ جاروبک نگهدار

### ۲ - ۱۰ - ۲ اجزای قسمت متحرک

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



شکل ۸۹ - ۲ هسته رتور با تهویه محوری

در رتورهای با تهویه شعاعی هسته از چند دسته ورق با طول ۴ تا ۱۰ سانتی‌متر که با یکدیگر ۸ تا ۱۰ میلی‌متر فاصله دارند تشکیل می‌گردد (شکل ۹۰ - ۲).



شکل ۹۰ - ۲ هسته با تهویه شعاعی

### سیم‌پیچی رتور

سیم‌پیچی رتور از کلاف‌های مشابهی تشکیل شده



شکل ۸۸ - 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

هسته رتور از ورقه‌های فولادی سیلیس‌دار ساخته می‌شود که با یک لایه نازک از هم عایق شده‌اند بر روی هسته رتور شیارهایی<sup>۱</sup> تعبیه شده است تا سیم‌پیچ‌ها در داخل آن‌ها قرار گیرند. این شیارها 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 به صورت «تهویه محوری» یا «تهویه شعاعی» می‌سازند. در رتورهای با تهویه محوری، سوراخ‌هایی در امتداد هسته ایجاد می‌کنند تا در اثر نفوذ جریان هوا به این سوراخ‌ها هسته خنک شود (شکل ۸۹ - ۲).

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 خنک کننده<sup>۳</sup> یا «فن» با ایجاد جریان هوا در داخل ماشین، موجب انتقال سریع تر 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 خنک کننده ماشین‌های جریان مستقیم با قدرت کم روی محور رتور نصب می‌شود و با گردش رتور می‌گردد و جریان هوا را به وجود می‌آورد. (شکل ۸۸ - ۲) اما ماشین‌های با قدرت متوسط و زیاد فاقد پروانه خنک کننده 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 - ۲) نشان داده شده است.



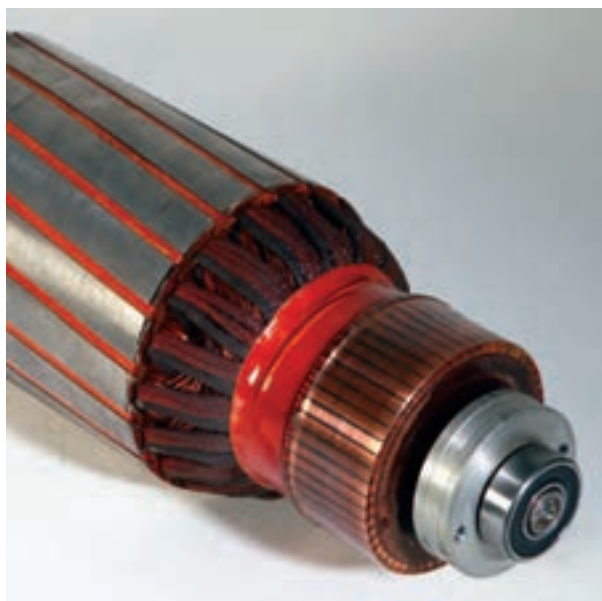
شکل ۹۲ - ۲ ماشین جریان مستقیم مجهز به فن جداگانه

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

از آنجایی که 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.

### کمو تاتور

کمو تاتور<sup>۱</sup> 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 کمو تاتور وصل می‌شود (شکل ۹۱ - ۲).



شکل ۹۱ - ۲ کمو تاتور

### محور

محور<sup>۲</sup> رتور ماشین‌های جریان مستقیم تکیه‌گاهی



تشکیل شده است.

### پرسش‌های صحیح، غلط

- ۱ - بدنه نقش تکیه‌گاه و محافظت از سایر اجزای ماشین را ایفا می‌کند.

☐ صحیح ☐ غلط

- ۲ - تعداد قطب‌های ماشین همواره فرد است و جنس آن از ورقه فولادی است.

☐ صحیح ☐ غلط

### پرسش‌های تشریحی

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

- ۲ - سیم‌پیچی میدان برای جریان‌های زیاد چگونه طراحی می‌شود؟

- ۳ - اجزای قسمت متحرک ماشین‌های جریان مستقیم را نام ببرید.

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

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

- ۶ - ویژگی‌های محور رتور را بنویسید.

- ۷ - وظیفه پروانه خنک کننده را بنویسید.

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

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



شکل ۹۳ - ۲

### پرسش ۶ - ۲

### پرسش‌های کامل کردنی

- ۱ - تأمین میدان مغناطیسی مورد نیاز ماشین جریان مستقیم وظیفه ..... است.

- ۲ - سیم‌پیچی میدان، برای جریان‌های کم دارای تعداد دور ..... و سطح مقطع سیم ..... می‌باشد.

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

- ۴ - روش تهویه رتور ماشین‌های جریان مستقیم به صورت ..... و ..... است.

- ۵ - در ماشین‌های جریان مستقیم ولتاژ اصلی در ..... القا می‌شود.

- ۶ - کموتاتور از تیغه‌های ..... که توسط عایق ..... نسبت به یکدیگر و محور ماشین عایق شده‌اند.

## ۱۱-۲-سیم‌پیچی آرمیچر ماشین‌های جریان

### مستقیم

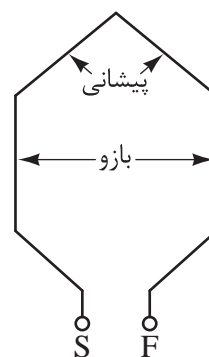
در ماشین‌های جریان مستقیم، نحوه سری و موازی کردن کلاف‌های سیم‌پیچی رتور تحت عنوان «سیم‌پیچی آرمیچر»<sup>۱</sup> مطرح می‌شود. به طور کلی اصطلاح «سیم‌پیچی آرمیچر» به سیم‌پیچی‌هایی اطلاق می‌شود که نیروی محرکه اصلی در آنها القا می‌شود.

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.<sup>۲</sup>

برخی از واژه‌های مربوط به سیم‌پیچی در ذیل آورده

شده است:

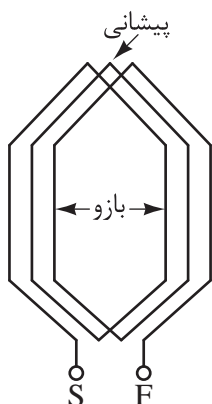
«حلقه»<sup>۳</sup> شامل یک دور هادی است. قسمتی از حلقه که درون شیار قرار می‌گیرد «بازو» نام دارد و قسمتی که در بیرون شیار قرار می‌گیرد «پیشانی» نامیده می‌شود. هر حلقه دارای یک سر و ته می‌باشد. سر حلقه را با حرف «S»<sup>۴</sup> و ته آن را با حرف «F»<sup>۵</sup> نشان می‌دهند (شکل ۹۴-۲).



شکل ۹۴-۲

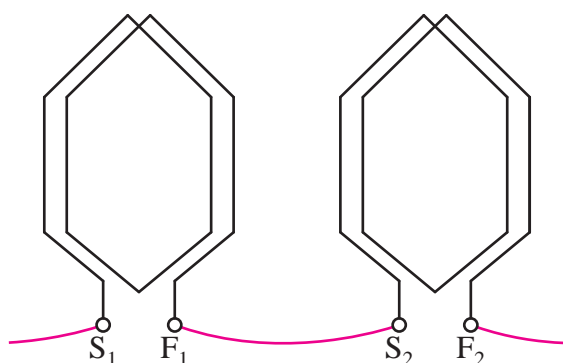
«کلاف»<sup>۶</sup> از اتصال سری چندین حلقه تشکیل شده

است. برای کلاف نیز می‌توان همانند حلقه، بازو، پیشانی و سر و ته در نظر گرفت (شکل ۹۵-۲).

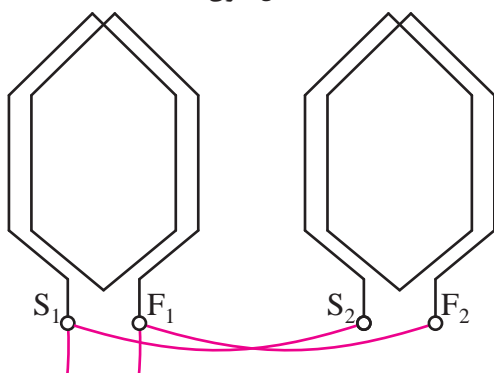


شکل ۹۵-۲

«سیم‌پیچی»<sup>۷</sup> از اتصال چندین کلاف تشکیل شده است. این اتصال می‌تواند به صورت سری یا موازی و یا ترکیب سری و موازی باشد (شکل ۹۶-۲).



الف - اتصال سری کلاف‌ها



ب - اتصال موازی کلاف‌ها

شکل ۹۶-۲

۲. جزئیات بیشتر سیم‌پیچی آرمیچر را در درس «تکنولوژی کارگاه سیم‌پیچی» خواهید آموخت.

۷. Winding

۶. Coil

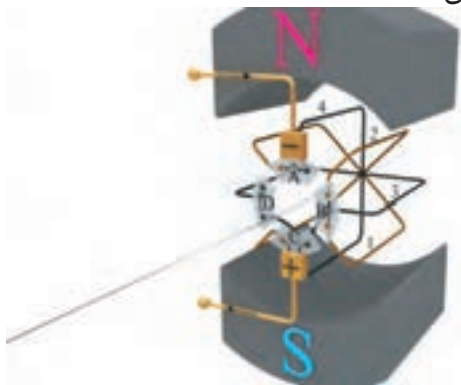
۵. Final

۴. Start

۱. Armature Winding

۳. Turn

نمونه‌ای از سری و موازی شدن حلقه‌ها در شکل (۹۸ - ۲) نشان داده شده است.



شکل ۹۸-۲ طرح یک ماشین ۴ کلافی

این شکل یک ماشین جریان مستقیم دو قطب با چهار کلاف و چهار تیغه کموتاتور را نشان می‌دهد. به منظور پرهیز از شلوغ شدن شکل کلاف‌ها به صورت حلقه نشان داده شده‌اند.

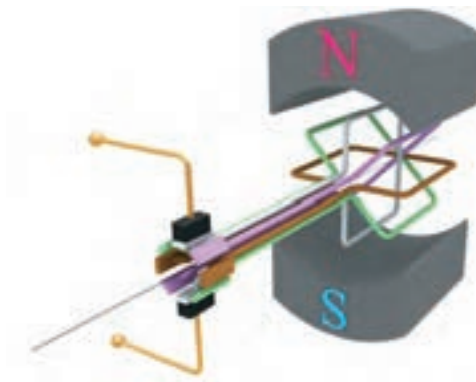
دو حلقه مشکی از طریق تیغه D و دو حلقه قهوه‌ای از طریق تیغه B با هم سری شده‌اند؛ هر یک از حلقه‌های مشکی و قهوه‌ای از طریق تیغه‌های A و C با هم موازی خواهند شد. بدین ترتیب جریان الکتریکی از طریق جاروبک به تیغه A وارد می‌شود و پس از عبور از حلقه‌های مشکی و قهوه‌ای به تیغه C می‌رسد و از طریق جاروبک خارج می‌شود. لذا جریان الکتریکی از تمام حلقه‌ها می‌گذرد و آنها در کار ماشین مؤثر خواهند شد.

ترسیم سیم‌پیچی آرمیچر مطابق شکل (۹۸ - ۲) بسیار دشوار است. لذا روش‌های ترسیمی دیگری به کار می‌رود. این روش‌ها عبارت است از:

- دیاگرام دایره‌ای (مقطعی)
- دیاگرام خطی (راه جریان)
- دیاگرام گسترده (باز)
- دیاگرام سریع (دندان‌اره‌ای)

## ۱۲-۲- روش‌های ترسیم سیم‌پیچی آرمیچر

در قسمت‌های قبل مشاهده شد برای قابل استفاده و کاربردی شدن ژنراتور و موتور ساده جریان مستقیم تعداد حلقه‌های آنها افزایش داده می‌شود (شکل‌های ۴۸-۲ و ۷۷-۲). ماشین جریان مستقیمی با چهار حلقه و هشت تیغه کموتاتور در نظر است (شکل ۹۷-۲).



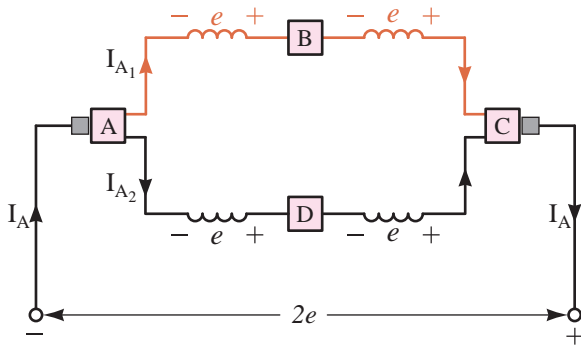
شکل ۹۷-۲

مشاهده می‌شود در هر لحظه فقط یک یا دو حلقه دارای جریان می‌شوند و حلقه‌های دیگر فاقد جریان الکتریکی هستند و نقش مؤثری در تمام لحظات در ماشین ایفا نمی‌کنند. در واقع به دلیل عدم ارتباط الکتریکی بین این حلقه‌ها، افزایش بیشتر تعداد حلقه‌ها با این شیوه تأثیر چندانی در کارایی ماشین نگذاشته است.

برای برقراری ارتباط الکتریکی بین حلقه‌ها روش‌هایی به کار گرفته می‌شود که حلقه‌ها را به صورت سری و موازی از طریق تیغه‌های کموتاتور به یکدیگر متصل می‌کنند تا جریان الکتریکی از آنها عبور کند. با این عمل در موتورهای تغییرات گشتاور به حداقل مقدار ممکن می‌رسد و گشتاور یکنواخت خواهد شد و در ژنراتورها ضربان نیروی محرکه القایی نیز به حداقل مقدار ممکن می‌رسد و مقدار متوسط آن افزایش می‌یابد.

## ۱- ۱۲- ۲- دیاگرام دایره‌ای

(۹۸- ۲) در شکل (۱۰۰- ۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۰۰- 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 تقسیم می‌شود و جریان‌های  $I_{A1}$  و  $I_{A2}$  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 می‌شود و ولتاژ  $2e$  را بین تیغه‌های A و C کموتاتور به وجود می‌آورند.

تعداد راه‌های جریان را با  $a$  نشان می‌دهند لذا در این دیاگرام  $a = 2$  است.

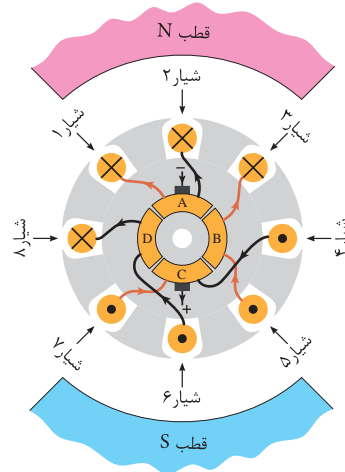
### فعالیت ۶- ۲

با گردش رتور و قرار گرفتن جاروبک‌ها در مقابل تیغه‌های B و D نحوه سری و موازی شدن کلاف و تقسیم جریان را بررسی کنید.

### ۳- ۱۲- ۲- دیاگرام گسترده

دیاگرام گسترده، موقعیت هر کلاف در شیارهای رتور و نحوه اتصال سر و ته آنها را به تیغه‌های کموتاتور

دیاگرام دایره‌ای، نمای روبروی رتور و کموتاتور است. در این دیاگرام «سربندی کلاف‌های سیم‌پیچی آرمیچر» یعنی اتصال سر و ته کلاف به تیغه‌های کموتاتور مشخص می‌شود و جهت جریان هر یک از بازوهای کلاف در هر یک از شیارهای رتور نشان داده می‌شود. کلاف‌های رتور و کموتاتور شکل (۹۸- ۲) در شکل (۹۹- ۲) نشان داده شده است.



شکل ۹۹- ۲

## ۲- ۱۲- ۲- دیاگرام خطی

در دیاگرام خطی چگونگی ارتباط کلاف‌ها به یکدیگر و اتصال سر و ته آنها به تیغه‌های کموتاتور به صورت دیگری ترسیم می‌شود.

این دیاگرام نشان می‌دهد چگونه با موازی شدن کلاف‌ها، مسیرهای موازی برای عبور جریان الکتریکی ایجاد می‌شود و کلاف‌هایی که در این مسیرها قرار می‌گیرند با یکدیگر سری می‌شوند تا نیروی محرکه القایی آنها با هم جمع شود. هر یک از این مسیرهای موازی جریان «راه جریان» نام دارد.

دیاگرام خطی کلاف‌های سیم‌پیچی آرمیچر شکل

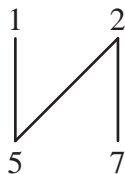
#### ۴- ۱۲- ۲- دیاگرام سریع

دیاگرام سریع موقعیت هر بازوی کلاف در شیارهای رتور را نشان می‌دهد. معمولاً دیاگرام سریع بعد از دیاگرام گسترده ترسیم می‌شود. با توجه به دیاگرام گسترده شکل (۲-۱۰۱) مشاهده می‌شود کلافی که یکی از بازوهای آن در شیار ۱ رتور قرار دارد، بازوی دیگر آن در شیار ۵ قرار گرفته است. این فرایند در دیاگرام سریع به صورت شکل (۲-۱۰۲) نشان داده می‌شود.



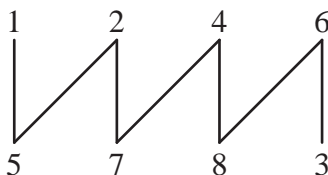
شکل ۲-۱۰۲

بازوی کلاف بعدی در شیارهای ۲ و ۷ قرار گرفته است لذا دیاگرام سریع به صورت شکل (۲-۱۰۳) در می‌آید.



شکل ۲-۱۰۳

با ادامه این روند دیاگرام سریع شکل (۲-۱۰۴) به صورت شکل (۲-۱۰۴) تکمیل می‌شود.



شکل ۲-۱۰۴

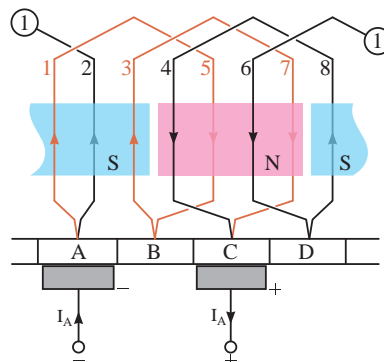
در صورتی که در شیارهای رتور دو بازو از دو کلاف قرار داشته باشد. بازویی را که در زیر قرار می‌گیرد با

نشان می‌دهد. در این دیاگرام با توجه به جهت جریان در کلاف‌ها محل قطب‌های مغناطیسی سیم‌پیچی آرمیچر نیز مشخص می‌شود.

از دیاگرام گسترده اطلاعات مربوط به سیم‌پیچی و سربندی کلاف‌های سیم‌پیچی آرمیچر به دست می‌آید و برای سیم‌پیچی عملی آرمیچر مناسب‌تر است.

در ترسیم دیاگرام گسترده، رتور و کموتاتور را که استوانه‌ای هستند برش طولی، در امتداد شیارها می‌دهند و آنها را به صورت صفحه‌ای ترسیم می‌کنند. به تعداد شیارهای رتور خطوطی به طور عمودی رسم می‌شود. در صورتی که در هر شیار دو بازو از دو کلاف مختلف قرار گرفت، بازویی که در بالای شیار قرار می‌گیرد با خط پر و بازویی که در پایین شیار قرار می‌گیرد با خط چین نشان می‌دهند.

با ایجاد یک برش فرضی در شکل (۲-۹۸) دیاگرام گسترده آن مطابق شکل (۲-۱۰۱) ترسیم می‌شود.



شکل ۲-۱۰۱ 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 می‌شود بازوی کلاف‌های با جهت جریان یکسان در کنار هم قرار گرفته‌اند و به طور مشترک قطب‌های مغناطیسی در رتور به وجود می‌آورند.

اعداد پریم‌دار نشان می‌دهند.

قطبی آن چقدر است؟

حل:

گام قطبی از رابطه (۷ - ۲) به‌دست می‌آید و برابر است با:

$$y_p = \frac{S}{P} = \frac{4}{2} = 2 \text{ شیار}$$

گام رفت

فاصله بین بازوهای یک کلاف سیم‌پیچی آرمیچر بر حسب شیار رتور را «گام رفت» گویند.

شکل (۵ - ۱۰۲) گام رفت را با  $y_1$  نشان می‌دهند و از رابطه (۸ - ۲) به‌دست می‌آید.

$$y_1 = \frac{S}{P} \pm \varepsilon \quad (2-8)$$

در این رابطه:

$S$  تعداد شیارهای رتور

$P$  تعداد قطب‌های رتور

$\varepsilon$  کوچک‌ترین عددی که کسر  $\frac{S}{P}$  را گویا می‌کند.

$y_1$  گام رفت

در رابطه (۸ - ۲) اگر:

$\varepsilon = 0$  باشد، گام رفت برابر با گام قطبی خواهد شد

و سیم‌پیچی را با «گام کامل»<sup>۴</sup> گویند.

$\varepsilon < 0$  منفی باشد، گام رفت کوچک‌تر از گام قطبی

می‌شود و سیم‌پیچی را با «گام کوتاه»<sup>۵</sup> گویند.

$\varepsilon > 0$  مثبت باشد، گام رفت بزرگ‌تر از گام قطبی

می‌شود و سیم‌پیچی را با «گام بلند»<sup>۶</sup> گویند.

## ۱۳-۲- گام‌های سیم‌پیچی آرمیچر

سیم‌پیچی آرمیچر با گام‌های آن شناسایی می‌شود.

این گام‌ها عبارتند از:

• گام قطبی<sup>۱</sup>

• گام رفت<sup>۲</sup> (گام جلو)

• گام برگشت<sup>۳</sup> (گام عقب)

• گام سیم‌پیچی<sup>۴</sup>

• گام کموتاتور<sup>۵</sup>

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 - ۲) به‌دست می‌آید.

$$y_p = \frac{S}{P} \quad (2-7)$$

در این رابطه:

$S$  تعداد شیارهای رتور

$P$  تعداد قطب‌های رتور

$y_p$  گام قطبی بر حسب شیار رتور

مثال ۳-۲- رتور ماشین جریان مستقیمی<sup>۴</sup>

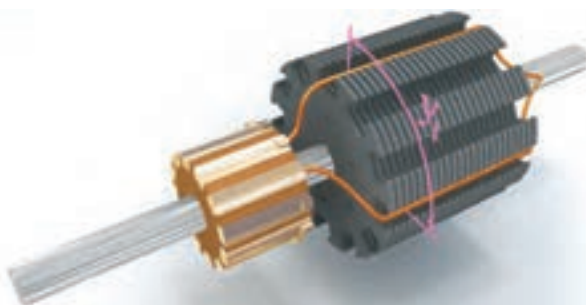
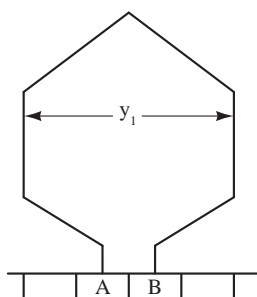
شیار دارد. اگر رتور دو قطب سیم‌پیچی شده باشد گام

۴. Coil Pitch  
Long Pitch

۳. Back Pitch  
Short Pitch

۲. Forward Pitch  
Full Pitch

۱. Pole Pitch  
Commutator Pitch



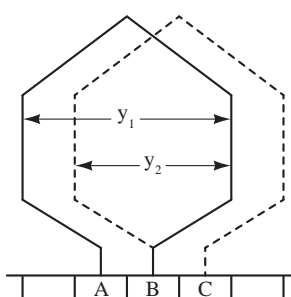
شکل ۲-۱۰۵

## فعالیت ۸-۲

- ۱- چرا در رابطه (۸-۲)  $\varepsilon$  مطرح شده است.
- ۲- در مثال (۲-۳) چرا  $\varepsilon = -\frac{3}{4}$  انتخاب نشده است.

### گام برگشت

فاصله بین بازوی دوم از کلاف اول تا بازوی اول از کلاف دوم سیم پیچی آرمیچر بر حسب شیار رتور را «گام برگشت» می گویند و آن را با  $y_p$  نشان می دهند (شکل ۱۰۶-۲).



شکل ۲-۱۰۶

### گام کموتاتور

فاصله بین سر و ته یک کلاف روی کموتاتور بر حسب تعداد عایق بین تیغه های کموتاتور را «گام کموتاتور» می گویند. و آن را با  $y_c$  نشان می دهند (شکل ۱۰۷-۲).

**مثال ۳-۲- رتور یک ماشین جریان مستقیم**  
دارای چهار قطب و یازده شیار می باشد، گام رفت را تعیین کنید.

حل:

گام رفت از رابطه (۸-۲) به دست می آید:

$$y_1 = \frac{S}{P} \pm \varepsilon = \frac{11}{4} \pm \varepsilon$$

کسر  $\frac{11}{4}$  گویا نیست و با  $\varepsilon = +\frac{1}{4}$  گویا می شود.

$$y_1 = \frac{11}{4} + \frac{1}{4} = 3$$

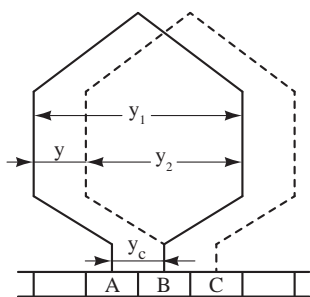
$\varepsilon > 0$  انتخاب شد؛ پس سیم پیچی با گام بلند است.



### گام سیم پیچی

فاصله بین دو بازوی اول دو کلاف متوالی سیم پیچی آرمیچر بر حسب شیار رتور را «گام سیم پیچی» گویند و آن را با  $y$  نشان می دهند (شکل ۱۰۷-۲).





شکل ۱۰۷-۲

## پرسش‌های تشریحی

- ۱ - مفاهیم مربوط به سیم‌پیچی آرمیچر را تعریف کنید:
- الف - حلقه      ب - کلاف      پ - سیم‌پیچی
- ۲ - روش‌های ترسیمی سیم‌پیچی آرمیچر را نام ببرید.
- ۳ - گام‌های سیم‌پیچی آرمیچر را نام ببرید.
- ۴ - گام قطبی را تعریف کنید و رابطه آن را بنویسید.
- ۵ - گام برگشت را تعریف کنید.
- ۶ - گام کموتاتور را تعریف کنید.

## تمرین ۲-۷

- ۱ - گام قطبی رتور یک ماشین جریان مستقیم دو قطب برابر ۶ می‌باشد. تعداد شیارهای رتور را به دست آورید.
- ۲ - رتور یک ماشین جریان مستقیم دارای چهار قطب و سیزده شیار می‌باشد. گام رفت را به دست آورید.

## پرسش ۲-۷

### پرسش‌های کامل کردنی

- ۱ - دیاگرام ..... نمای روبروی رتور و کموتاتور است.
- ۲ - دیاگرام گسترده موقعیت هر کلاف در ..... و نحوه اتصال سر و ته آنها را به ..... نشان می‌دهد.
- ۳ - فاصله بین بازوهای یک کلاف بر حسب شیار رتور را ..... گویند.

### پرسش‌های صحیح، غلط

- ۱ - دیاگرام خطی نشان می‌دهد چگونه با موازی شدن کلاف‌ها، مسیره‌های موازی برای عبور جریان الکتریکی ایجاد می‌شود.
- صحیح ☐ غلط ☐
- ۲ - دیاگرام سریع موقعیت هر بازوی کلاف در شیارهای رتور را نشان می‌دهد.
- صحیح ☐ غلط ☐
- ۳ - فاصله بین دو بازوی اول دو کلاف متوالی بر حسب شیار را گام سیم‌پیچی گویند.
- صحیح ☐ غلط ☐



## ۱۴-۲- روش‌های سیم‌پیچی آرمیچر

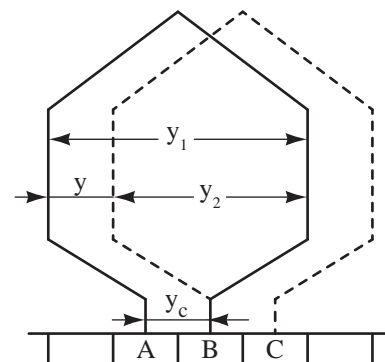
برای اتصال کلاف‌های سیم‌پیچی آرمیچر به تیغه‌های کموتاتور ماشین‌های جریان مستقیم روش‌های گوناگونی وجود دارد. اما دو روش آن به نام «حلقوی<sup>۱</sup>» و «موجی<sup>۲</sup>» مشهورتر است. انجام هر یک از این اتصال‌ها به ترتیب باعث ایجاد «سیم‌پیچی حلقوی<sup>۳</sup>» و «سیم‌پیچی موجی<sup>۴</sup>» در رتور می‌شود.

سیم‌پیچی‌های 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- ۱۴-۲- سیم‌پیچی حلقوی ساده

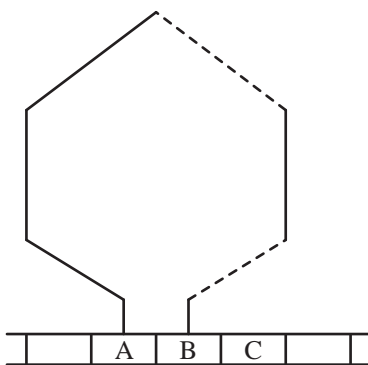
سربندی دو کلاف به تیغه‌های کموتاتور به صورت سیم‌پیچی حلقوی ساده به همراه گام‌های آن در دیگرام گسترده شکل (۱۰۸-۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۰۸-۲ دیگرام 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 این که تمام سر و ته کلاف‌ها به ترتیب به تیغه و تیغه مجاور آن متصل می‌شود. این نوع سیم‌پیچی 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 «پیش‌رونده<sup>۵</sup>» و «چپ‌گرد» یا «پس‌رونده<sup>۶</sup>» سربندی می‌شود. سربندی کلاف از نوع راست‌گرد در شکل (۱۰۹-۲) نشان داده شده است.

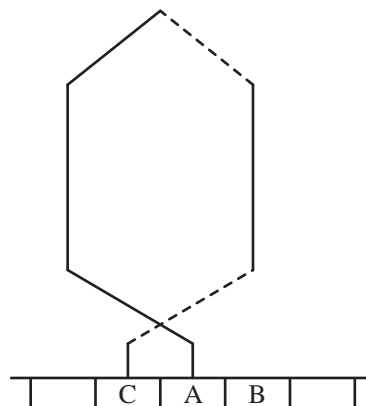


شکل ۱۰۹-۲ کلاف با سربندی حلقوی راست گرد

در سیم‌پیچی راست‌گرد ته کلاف به تیغه کموتاتوری که در سمت راست سر کلاف قرار دارد اتصال داده می‌شود.

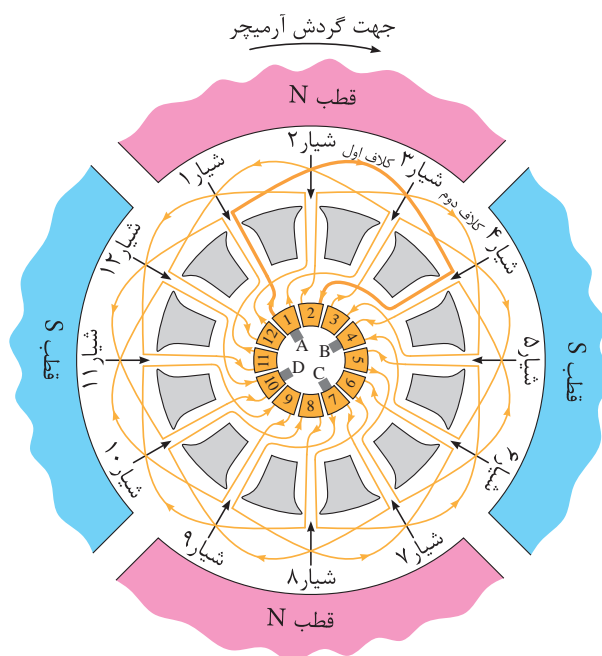
سربندی کلاف از نوع چپ‌گرد در شکل (۱۱۰-۲) نشان داده شده است. در سیم‌پیچی چپ‌گرد ته کلاف به تیغه کموتاتوری که در سمت چپ سر کلاف قرار دارد اتصال داده می‌شود.

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  $y_1 = 3$  می‌شود. چون گام رفت با گام قطبی برابر است سیم‌پیچی «گام کامل» می‌باشد.



شکل ۱۱۰- ۲ کلاف با سربندی حلقوی چپ‌گرد

دیagram دایره‌ای سیم‌پیچی حلقوی ساده چهار قطب رتور ۱۲ شیار با ۱۲ تیغه کموتاتور در شکل (۱۱۱ - ۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۱۱- ۲ دیagram دایره‌ای رتور ۱۲ شیار ۴ قطب با سیم‌پیچی حلقوی ساده

رتور ۱۲ شیار و ۴ قطب دارد و از رابطه (۷ - ۲) گام قطبی به دست می‌آید:

$$y_p = \frac{S}{P} = \frac{12}{4} = 3$$

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  $y_c = +1$  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. سر کلاف 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 به صورت 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 ۲ شیار فاصله است که طبق تعریف، گام برگشت  $y_r = 2$  می‌شود.

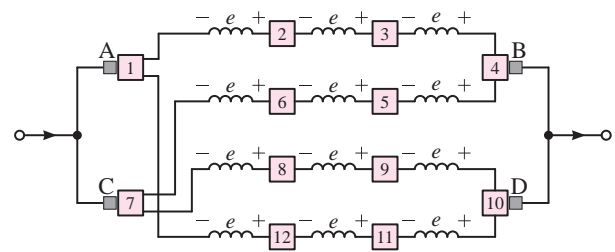
بازوی اول کلاف اول در شیار ۱ رتور و بازوی اول کلاف دوم در شیار ۲ رتور قرار دارد. بین این دو بازو

یک شیار فاصله است و طبق تعریف، گام سیم‌پیچی  $y = 1$  می‌شود.

سیم‌پیچی حلقوی ساده است؛ تعداد جاروبک‌ها برابر تعداد قطب‌ها است، لذا از ۴ جاروبک با پهنایی برابر با عرض تیغه کموتاتور استفاده می‌شود.

جاروبک‌ها بر روی تیغه‌هایی از کموتاتور قرار داده می‌شود که جریان کلاف‌ها به آنها وارد یا از آنها خارج می‌شود. مطابق شکل جریان از تیغه‌های شماره ۱ و ۷ کموتاتور خارج می‌شود 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 است پلاریته ولتاژ جاروبک‌های A و C و جاروبک‌های B و D یکی است. چرا؟

دیاگرام خطی سیم‌پیچی حلقوی ساده مربوط به دیاگرام دایره‌ای شکل (۱۱۱ - ۲) در شکل (۱۱۲ - ۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۱۲ - ۲ دیاگرام خطی رنور ۱۲ شیار ۴ قطب با سیم‌پیچی حلقوی ساده

در دیاگرام خطی شکل (۱۱۲ - ۲) مشاهده می‌شود میان دو تیغه مجاور کموتاتور یک کلاف قرار گرفته است. این کلاف‌ها از طریق تیغه‌های کموتاتور با یکدیگر سری شده‌اند.

جاروبک‌های هم پلاریته B و D و جاروبک‌های هم پلاریته A و C به یکدیگر ارتباط داده شده‌اند. بدین

ترتیب چهار مسیر 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 است. لذا چهار «راه جریان» ایجاد شده است. یعنی  $a = 4$  می‌باشد.

مشاهده می‌شود در سیم‌پیچی حلقوی ساده تعداد راه‌های جریان با تعداد قطب‌ها برابر است. بنابراین:

$$a = P \quad (2-9)$$

با توجه به دیاگرام خطی شکل (۱۱۲ - ۲) مشاهده می‌شود کلاف‌ها در هر راه جریان با یکدیگر سری می‌شوند، لذا نیروی محرکه القایی آنها 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 محرکه القایی در هر راه جریان  $3e$  ولت خواهد شد. ولتاژ میان دو جاروبک A و B یا C و D با نیروی محرکه القایی در هر راه جریان یعنی  $3e$  ولت برابر است. کلاف‌های هر یک از این راه‌های جریان پس از این که با یکدیگر سری شدند به وسیله اتصال جاروبک‌ها به تیغه‌های کموتاتور با هم موازی می‌شوند. بدین ترتیب جریان آرمیچر بین راه‌های جریان تقسیم می‌شود. اگر جریان هر مسیر جریان  $I_{a1}$  آمپر باشد از آنجایی که آرمیچر ۴ راه جریان دارد لذا جریان آرمیچر  $4I_{a1}$  آمپر خواهد شد. بنابراین بین جریان آرمیچر و جریان هر راه جریان رابطه  $(10-2)$  برقرار است.

$$I_{a1} = \frac{I_A}{a} \quad (2-10)$$

در این رابطه:

$I_{a_1}$  جریان هر راه جریانی

$a$  تعداد راههای جریانی

$I_A$  جریان آرمیچر

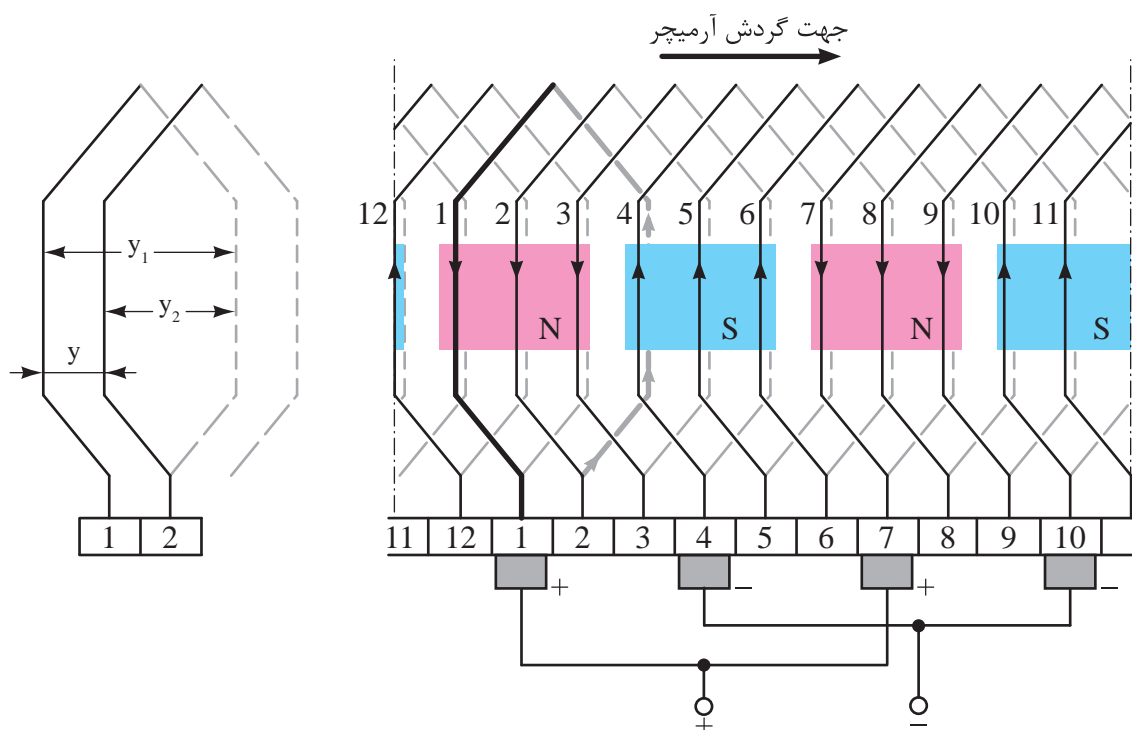
تقسیم جریان بین راههای جریانی در سیم پیچی حلقوی باعث می شود از کلاف های آرمیچر در هر راه، جریان کمتری عبور کند و سطح مقطع هادی های آنها کاهش یابد.

دیاگرام گسترده سیم پیچی حلقوی ساده مربوط به دیاگرام دایره ای شکل (۱۱۱ - ۲) در شکل (۱۱۳ - ۲) نشان داده شده است. از آنجایی که در هر شیاریتور دو بازو از دو کلاف قرار گرفته است در دیاگرام گسترده، بازویی که در شیاریتور قرار می گیرد را با خط چین نشان می دهند.

## فعالیت ۷ - ۲

گام های سیم پیچی شکل (۱۱۳ - ۲) را به دست

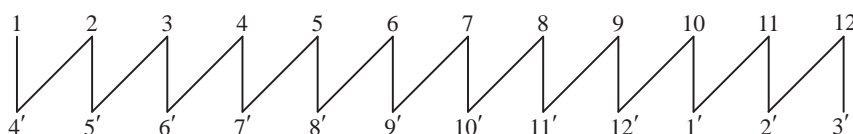
آورید.



شکل ۱۱۳ - ۲ دیاگرام گسترده رتور ۱۲ شیاریتور چهار قطب با سیم پیچی حلقوی ساده

شیاریتور در زیر قرار می گیرد با اعداد پریم دار نشان داده می شود.

دیاگرام سریع سیم پیچی حلقوی ساده مربوط به دیاگرام دایره ای شکل (۱۱۱ - ۲) در شکل (۱۱۴ - ۲) نشان داده شده است. در دیاگرام سریع بازویی که در



شکل ۱۱۴ - ۲ دیاگرام سریع رتور ۱۲ شیاریتور چهار قطب با سیم پیچی حلقوی ساده

سیم‌پیچی حلقوی ساده با خصوصیات زیر شناسایی خواهد شد:

- گام کموتاتور  $y_c = \pm 1$  است. در صورتی که  $y_c = +1$  باشد سیم‌پیچی حلقوی ساده راست‌گرد است. در صورتی که  $y_c = -1$  باشد سیم‌پیچی را حلقوی ساده چپ‌گرد می‌نامند.
- تعداد جاروبک‌ها برابر تعداد قطب‌ها می‌باشد (شکل ۱۱۱ - ۲).
- پهنای هر جاروبک با عرض تیغه کموتاتور برابر است (شکل ۱۱۳ - ۲).
- تعداد راه‌های جریان برابر تعداد قطب‌ها است (شکل ۱۱۲ - ۲).
- روابط  $y = y_c$  و  $y = y_1 - y_2$  حاکم است (شکل ۱۰۸ - ۲).

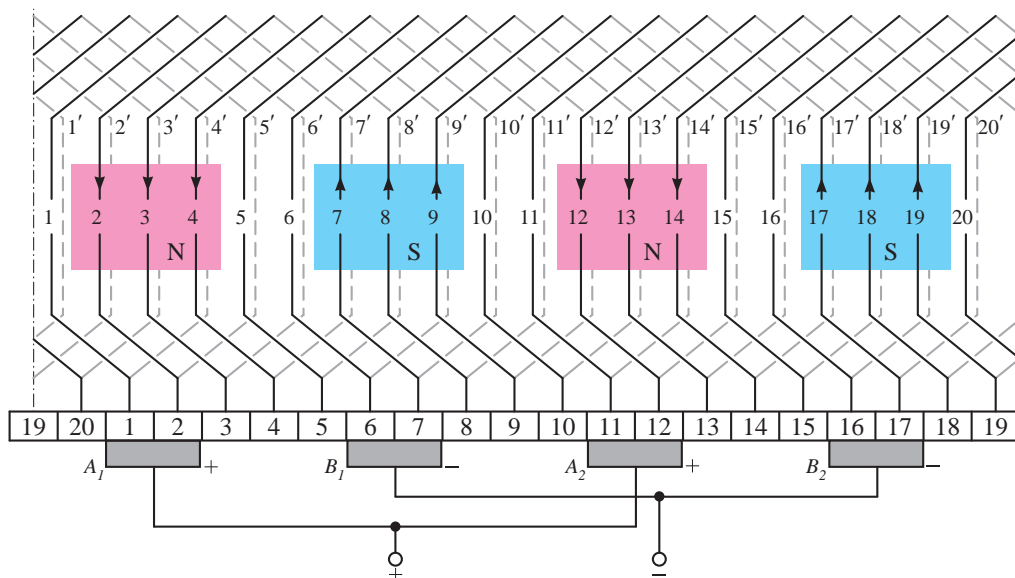
موازی شده‌اند و به همین دلیل نیز به آن مرکب گویند. در بین اصطلاحات سیم‌پیچی آرمیچر،  $m$  را «درجه ترکیب» نامیده‌اند.  $m$  نشان می‌دهد سیم‌پیچی مرکب از چند سیم‌پیچی ساده تشکیل شده است.  $m=1$  یعنی رتور دارای یک سیم‌پیچی حلقوی ساده می‌باشد و  $m=2$  یعنی رتور دارای دو سیم‌پیچی حلقوی ساده است که در اصطلاح آن را «سیم‌پیچی حلقوی مرکب دوگانه» می‌نامند. 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  $\frac{m}{p}$  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 - ۲) نشان داده شده است.

## ۲-۱۴-۲ سیم‌پیچی حلقوی مرکب

سیم‌پیچی حلقوی مرکب از  $m$  سیم‌پیچی حلقوی ساده مستقل از یکدیگر تشکیل می‌شود که با هم



شکل ۱۱۵ - ۲ دیاگرام گسترده سیم‌پیچی حلقوی مرکب دوگانه رتور ۲۰ شیار چهار قطب

$y_C$  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 ۹-۲

گام‌های سیم‌پیچی شکل (۱۱۵-۲) را تعیین کنید. با توجه به مطالب بخش‌های ۱-۱۴-۲ و ۲-۱۴-۲ 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.

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 (۹-۲) 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 (۱۱-۲) به دست می‌آید.

$$a = mP \quad (2-11)$$

در این رابطه:

$P$  تعداد قطب

$m$  درجه ترکیب

$a$  تعداد راه جریان

در شکل (۱۱۳-۲) گام کموتاتور ۲ است که با درجه ترکیب  $m$  برابر شده است. لذا در حالت کلی می‌توان از رابطه (۱۲-۲) گام کموتاتور سیم‌پیچی حلقوی را به دست آورد.

$$y_C = \pm m \quad (2-12)$$

در این رابطه:

$m$  درجه ترکیب

$+m$  برای سیم‌پیچی راست‌گرد

$-m$  برای سیم‌پیچی چپ‌گرد

● تعداد راه‌های جریان  $m$  برابر تعداد قطب‌ها است.

$$a = mP \text{ یعنی}$$

● گام سیم‌پیچی برابر است با  $y = y_c$

● رابطه  $y = y_1 - y_2$  همواره حاکم است.

● جریان هر راه برابر است با  $I_{a1} = \frac{I_A}{a}$

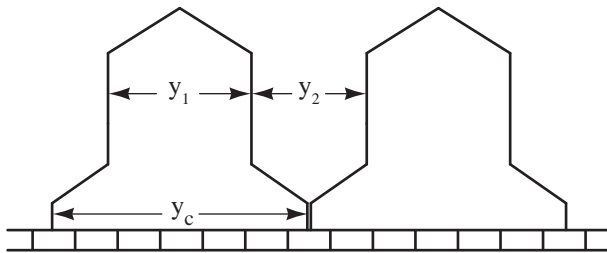
۲ - رتور ۱۵ شیار یک ماشین جریان مستقیم چهار قطب به صورت حلقوی مرکب دو گانه سیم‌پیچی شده است. مطلوب است:

الف - گام‌های سیم‌پیچی

ب - تعداد راه‌های جریان

### ۳ - ۱۴ - ۲ - سیم‌پیچی موجی ساده

سربندی دو کلاف به تیغه‌های کموتاتور به صورت سیم‌پیچی موجی ساده به همراه گام‌های آن در شکل (۱۱۶ - ۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۱۶ - 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 این که 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 - ۲) نشان داده شده است. در سیم‌پیچی راست‌گرد ته کلاف دوم به تیغه کموتاتور سمت راست سرکلاف اول اتصال داده شده است.

### پرسش ۸ - ۲

۱ - تفاوت سیم‌پیچی‌های حلقوی و موجی از نظر شکل سیم‌پیچی را بنویسید.

۲ - دیاگرام گسترده دو کلاف از سیم‌پیچی حلقوی ساده را رسم کنید و گام‌های سیم‌پیچی را بر روی آن نشان دهید.

۳ - خصوصیات سیم‌پیچی حلقوی ساده را بنویسید.

۴ - خصوصیات سیم‌پیچی حلقوی مرکب را بنویسید.

۵ - تفاوت سیم‌پیچی حلقوی راست‌گرد با چپ‌گرد را با رسم شکل نشان دهید.

۶ - گام‌های سیم‌پیچی شکل (۱۱۱ - ۲) را تعیین کنید.

### تمرین ۸ - ۲

۱ - برای رتور ۱۹ شیار یک ماشین جریان مستقیم که به صورت حلقوی ساده راست‌گرد با چهار قطب سیم‌پیچی شده است گام‌های سیم‌پیچی و تعداد راه‌های مسیر جریان را تعیین کنید.



است سیم‌پیچی از نوع «گام بلند» می‌باشد.

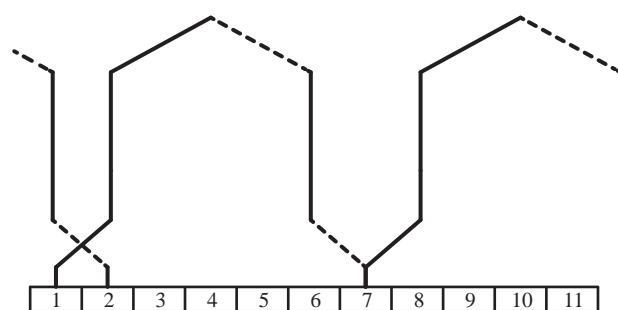
سر کلاف اول به تیغه ۱ کموتاتور اتصال دارد. این کلاف در طی مسیری راست‌گرد پس از عبور از شیارهای ۱ و ۴ رتور، ته آن به تیغه ۶ کموتاتور متصل شده است. بین سر و ته این کلاف ۵ عایق از کموتاتور قرار دارد طبق تعریف، گام کموتاتور  $y_c = +5$  می‌شود و سیم‌پیچی راست‌گرد است.

کلاف بعدی کلاف دوم نامیده می‌شود که بازوی اول آن در شیار ۶ و بازوی دوم این کلاف در شیار ۹ رتور قرار می‌گیرد. سر کلاف دوم به تیغه ۵ کموتاتور که ته کلاف اول به آن متصل شده بود، اتصال می‌یابد و ته آن به تیغه ۱۱ کموتاتور متصل می‌شود. این روند در جاگذاری کلاف‌های بعدی در شیارهای رتور و اتصال سرو 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 به صورت موجی ساده تکمیل می‌شود.

بازوی دوم کلاف اول در شیار ۴ و بازوی اول کلاف دوم در شیار ۶ رتور قرار دارد. بین این دو بازو ۲ شیار فاصله است که طبق تعریف، گام برگشت  $y_r = 2$  می‌شود.

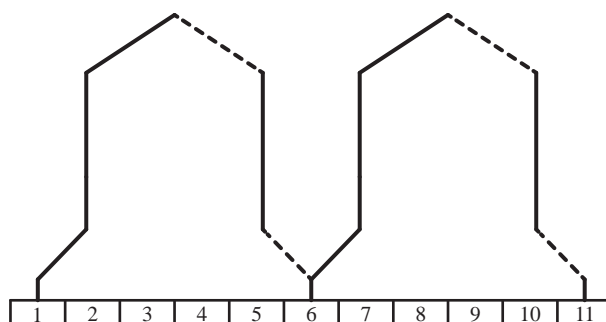
بازوی اول کلاف اول در شیار ۱ و بازوی اول کلاف دوم در شیار ۶ رتور قرار دارد بین این دو بازو ۵ شیار فاصله است و طبق تعریف، گام سیم‌پیچی  $y = 5$  می‌شود.

مطابق شکل این سیم‌پیچی موجی دو عدد جاروبک دارد که پهنای هر یک برابر با عرض تیغه کموتاتور است.



شکل ۱۱۷-۲ سربندی دو کلاف سیم‌پیچی موجی به صورت راست‌گرد

سربندی دو کلاف به صورت چپ‌گرد در شکل (۱۱۸-۲) نشان داده شده است. در سیم‌پیچی چپ‌گرد ته کلاف دوم به تیغه کموتاتور سمت چپ سرکلاف اول اتصال داده شده است.



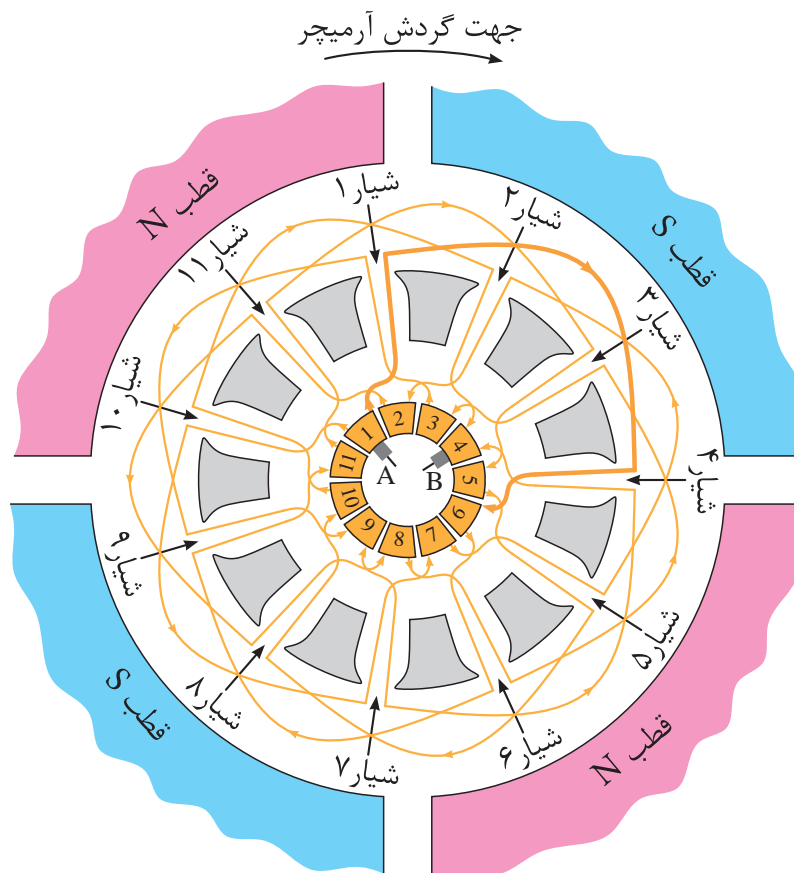
شکل ۱۱۸-۲ سربندی دو کلاف سیم‌پیچی موجی به صورت چپ‌گرد  
دیاگرام دایره‌ای سیم‌پیچی موجی ساده چهار قطب  
رتور ۱۱ شیار با ۱۱ تیغه کموتاتور در شکل (۱۱۹-۲) نشان داده شده است.

رتور ۱۱ شیار و ۴ قطب دارد و از رابطه (۷-۲) گام قطبی به دست می‌آید:

$$y_p = \frac{S}{P} = \frac{11}{4} = 2/75$$

در این شکل یکی از کلاف‌ها پررنگ‌تر نشان داده شده است که 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  $y_1 = 3$  می‌شود. چون گام رفت بزرگ‌تر از گام قطبی

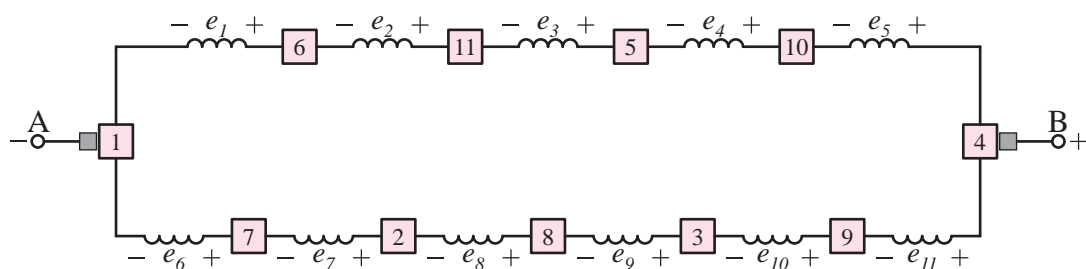
جاروبک‌ها بر روی تیغه‌هایی از کموتاتور قرار می‌گیرند که جریان کلاف‌ها به آنها وارد یا از آنها خارج می‌شود. جریان از تیغه شماره ۱ کموتاتور خارج و به جاروبک‌ها بر روی تیغه‌هایی از کموتاتور قرار می‌گیرند. لذا جاروبک A به روی تیغه شماره ۱ و جاروبک B به روی تیغه شماره ۴ کموتاتور قرار می‌گیرند.



شکل ۱۱۹ - ۲ دیاگرام مدور رتور ۱۱ شیار ۴ قطب با سیم‌پیچی موجی ساده

دیاگرام خطی سیم‌پیچی موجی ساده مربوط به نشان داده شده است.

دیاگرام دایره‌ای شکل (۱۱۹ - ۲) در شکل (۱۲۰ - ۲)



شکل ۱۲۰ - ۲ دیاگرام خطی رتور ۱۱ شیار ۴ 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.

خواهد شد. بنابراین بین جریان آرمیچر و جریان هر راه جریان همان رابطه (۱۰ - ۲) برقرار است.

$$I_{a1} = \frac{I_A}{a}$$

سیم‌پیچی موجی ساده انتخاب مناسبی برای آرمیچرهای ولتاژ زیاد و جریان نسبتاً کم می‌باشد. زیرا در سیم‌پیچی موجی در هر راه جریان تعداد بیشتری از کلاف‌ها با هم سری می‌شوند 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 سیم‌پیچی موجی ساده مربوط به دیاگرام دایره‌ای شکل (۱۱۹ - ۲) در شکل (۱۲۱ - ۲) نشان داده شده است.

## فعالیت ۱۰-۲

گام‌های سیم‌پیچی  $y_c$ ،  $y_1$ ،  $y_2$  و  $y$  شکل (۱۲۱ - ۲) را به‌دست آورید.

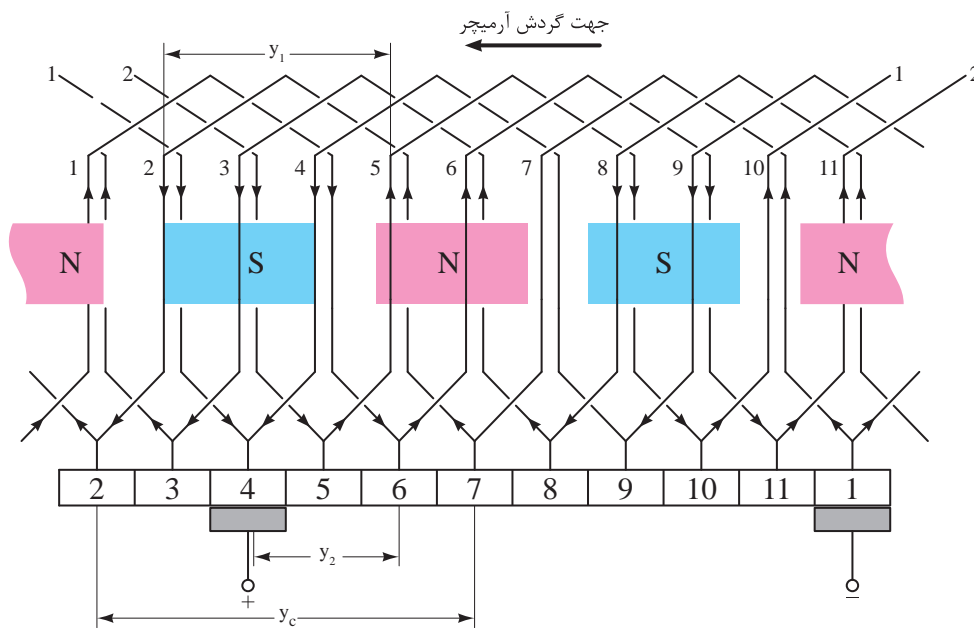
جریان ورودی به آرمیچر پس از عبور از جاروبک بین این دو مسیر تقسیم می‌شود. هر یک از این مسیرها راهی برای عبور جریان است. لذا دو «راه جریان» ایجاد شده است. یعنی:

$$a = 2$$

(۱۳-۲)

مشاهده می‌شود در سیم‌پیچی موجی ساده تعداد راه‌های جریان مستقل از تعداد قطب‌ها می‌باشد و هیچ ارتباطی با یکدیگر ندارد.

با توجه به دیاگرام خطی شکل (۱۲۰ - ۲) مشاهده می‌شود 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 این که با یکدیگر سری شدند بوسیله اتصال جاروبک‌ها به تیغه‌های کموتاتور با هم موازی می‌شوند. بدین ترتیب جریان آرمیچر بین دو راه جریان تقسیم می‌شود. اگر جریان هر مسیر جریان  $I_{a1}$  آمپر باشد از آنجایی که آرمیچر ۲ راه جریان دارد لذا جریان آرمیچر  $2I_{a1}$  آمپر



شکل ۱۲۱-۲ دیاگرام گسترده رتور ۱۱ شیار، ۴ قطب موجی ساده

#### ۴- ۱۴- ۲- سیم‌پیچی موجی مرکب

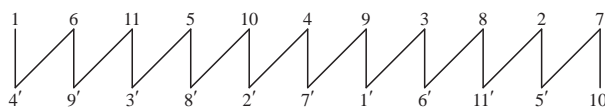
سیم‌پیچی موجی مرکب از  $m$  سیم‌پیچی موجی ساده مستقل از یکدیگر تشکیل می‌شود که با هم موازی شده‌اند و به همین دلیل نیز به آن مرکب گویند. در این سیم‌پیچی نیز  $m$  نشان می‌دهد سیم‌پیچی مرکب از چند سیم‌پیچی ساده تشکیل شده است.  $m=1$  یعنی رتور دارای یک سیم‌پیچی موجی ساده است.  $m=2$  یعنی رتور دارای دو 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 (۲-۱۲۳) نشان داده شده است.

دیاگرام سریع سیم‌پیچی موجی ساده مربوط به دیاگرام دایره‌ای شکل (۲-۱۱۹) در شکل (۲-۱۲۲) نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۲۲ 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.

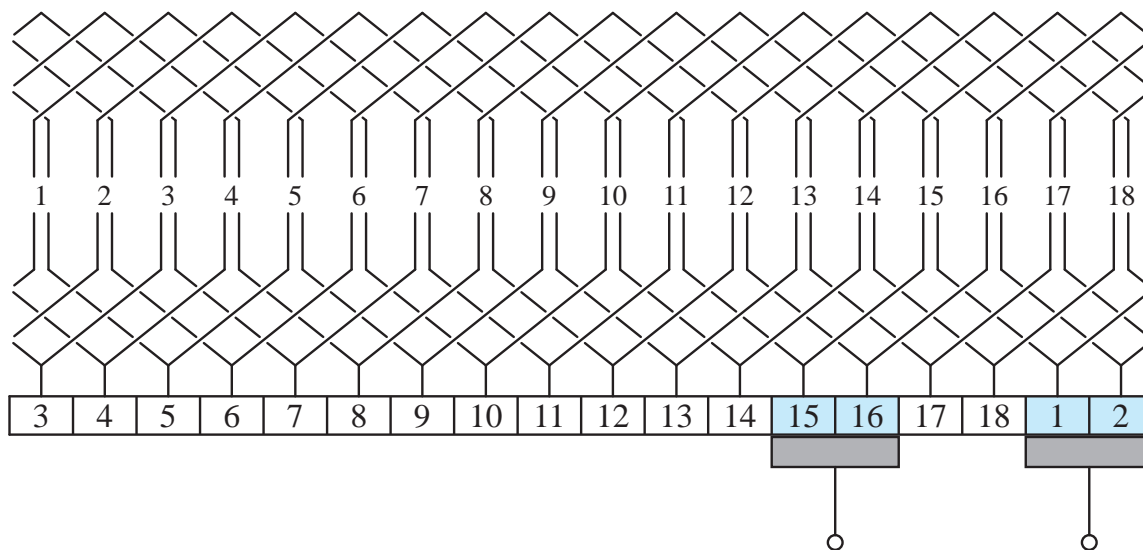
سیم‌پیچی موجی ساده با خصوصیات زیر شناسایی خواهد شد:

- تعداد جاروبک‌ها ۲ عدد می‌باشد (شکل ۲-۱۱۹).

- پهنای هر جاروبک برابر  $m$  عرض تیغه کموتاتور است (شکل ۲-۱۲۰).

- تعداد راه‌های جریان برابر ۲ می‌باشد (شکل ۲-۱۲۰).

- روابط  $y = y_1 + y_2$  و  $y = y_c$  حاکم است (شکل ۲-۱۱۶).



شکل ۲-۱۲۳ 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  $m=2$  است. به همین دلیل آن را مرکب دوگانه نامیده‌اند. هر یک از این سیم‌پیچی‌های موجی ساده طبق رابطه (۱۳-۲) 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 (۱۴-۲) به دست می‌آید.

$$a = 2m \quad (2-14)$$

در این رابطه:

$m$  درجه ترکیب

$a$  تعداد راه جریان

## فعالیت ۱۱ - ۲

گام‌های سیم‌پیچی  $Y_C, Y_1, Y_2$  و  $Y$  را در شکل (۱۲۳-۲) به دست آورید.

گام کلکتور در سیم‌پیچی‌های موجی اعم از ساده یا مرکب از رابطه (۱۵-۲) محاسبه می‌شود.

$$Y_C = \frac{2(c \pm m)}{p} \quad (2-15)$$

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 این که تغییری در ولتاژ سیم‌پیچی آرمیچر با سیم‌پیچی موجی مرکب نسبت به موجی ساده ایجاد نخواهد شد. با توجه به مطلب بخش‌های ۳ - ۱۴ - ۲ و ۴ - ۱۴ - ۲ می‌توان 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  $Y_C = \frac{2(c \pm m)}{p}$  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

کمو تاتور است.

## ۱۵-۲- 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.

● تعداد راه‌های جریان  $a = 2m$  می‌باشد.

● گام سیم‌پیچی برابر است با  $y = y_c$

● رابطه  $y = y_1 + y_2$  همواره حاکم است.

● جریان هر راه جریان برابر است با  $I_a = \frac{I_A}{a}$

### پرسش ۹-۲

۱- دیاگرام گسترده دو کلاف از سیم‌پیچی موجی ساده را رسم کنید و گام‌های سیم‌پیچی را بر روی آن نشان دهید.

۲- خصوصیات سیم‌پیچی موجی ساده را بنویسید.

۳- خصوصیات سیم‌پیچی موجی مرکب را بنویسید.

۴- تفاوت سیم‌پیچی موجی راست‌گرد با چپ‌گرد را با رسم شکل نشان دهید.

۵- گام‌های سیم‌پیچی شکل (۱۱۷-۲) را به‌دست آورید.

### تمرین ۹-۲

۱- رتور ۱۱ شیار یک ماشین جریان مستقیم را به‌صورت موجی ساده چهار قطب چپ‌گرد سیم‌پیچی شده است مطلوب است:

الف - گام‌های سیم‌پیچی

ب - تعداد راه‌های جریان

### ۱- ۱۵-۲- نیروی محرکه القایی

در روش‌های سیم‌پیچی مشاهده شد در هر راه جریان کلاف‌های سیم‌پیچی آرمیچر از طریق تیغه‌های کمو تاتور 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 (۱۱۲-۲) و (۱۲۰-۲) 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 - ۲) به دست می آید.

## فعالیت ۱۲ - ۲

نیروی محرکه القایی در سیم پیچی آرمیچر مثال ۴ - ۲ را به ازای سیم پیچی موجی ساده به دست آورید. از مقایسه جواب ها چه نتیجه ای به دست می آید. معمولاً رابطه (۱۶ - ۲) را در  $\frac{2\pi}{60}$  ضرب می کنند.

$$E_A = \frac{P}{a} \cdot Z \cdot \phi \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{2\pi}{2\pi} \quad (2-17)$$

در رابطه (۱۷ - ۲) کمیت هایی که در یک ماشین جریان مستقیم ثابت هستند و در حین کار ماشین تغییر نمی کنند را ضریب ثابت  $K$  می نامند و واحد آن  $\frac{1}{rad}$  است.

$$K = \frac{P}{a} \cdot \frac{Z}{2\pi} \quad (2-18)$$

هم چنین در رابطه (۱۷ - ۲) حاصل  $\frac{n \cdot 2\pi}{60}$  بیانگر سرعت زاویه ای  $\omega$  می باشد. سرعت زاویه ای عبارت مقدار زاویه ای که رتور در مدت یک ثانیه طی می کند.

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2-19)$$

در این رابطه:

$n$  سرعت گردش رتور بر حسب دور بر دقیقه [R.P.M]

$\omega$  سرعت زاویه ای رتور بر حسب رادیان بر ثانیه  $\left[ \frac{rad}{sec} \right]$

با جایگزینی مقادیر  $K$  و  $\omega$  از روابط (۱۸ - ۲) و (۱۹ - ۲) در رابطه (۱۷ - ۲) خواهیم داشت:

$$E_A = \frac{P}{a} \cdot Z \cdot \phi \cdot \frac{n}{60} \quad (2-16)$$

در این رابطه:

$n$  سرعت گردش رتور بر حسب دور بر دقیقه [RPM]

$\phi$  فوران هر قطب بر حسب وبر  $[wb]$

$Z$  تعداد هادی های درون شیارهای رتور

$P$  تعداد قطب های استاتور

$a$  تعداد راه جریان سیم پیچی آرمیچر

$E_A$  نیروی محرکه القایی سیم پیچی آرمیچر بر

حسب ولت  $[V]$

مثال ۴ - ۲ - رتور یک ماشین جریان مستقیم

دارای سیم پیچی حلقوی ساده، ۴ قطب و فوران هر قطب  $wb$  ۰/۰۱ دارای ۱۰۰۰ هادی در شیارهای رتور با سرعت ۱۲۰۰ RPM می گردد. نیروی محرکه القایی در سیم پیچی آرمیچر چند ولت است؟

حل:

سیم پیچی حلقوی ساده است لذا  $m=1$  است.

در سیم پیچی حلقوی داریم:

$$a = mP$$

$$a = 1 \times 4 = 4$$

از رابطه (۱۶ - ۲) خواهیم داشت:

$$E_A = \frac{P}{a} \cdot Z \cdot \phi \cdot \frac{n}{60}$$

$$E_A = \frac{4}{4} \times 1000 \times 0.01 \times \frac{1200}{60} = 200 [V]$$



نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی آرمیچر از رابطه (۲۰-۲) نیز قابل محاسبه است.

$$E_A = \frac{Z \cdot E_C}{a} \quad (2-21)$$

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 ۲-۶ -** 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  $m=1$  می‌باشد.

در سیم‌پیچی حلقوی داریم:

$$a = mP$$

$$a = 1 \times 4 = 4$$

نیروی محرکه القایی در هر هادی ۲ ولت است.

یعنی:

$$E_C = 2V$$

از رابطه ۲۰-۲ خواهیم داشت:

$$E_A = \frac{Z \cdot E_C}{a}$$

$$E_A = \frac{200 \times 2}{4} = 100 [V]$$

$$E_A = K \cdot \phi \cdot \omega \quad (2-20)$$

رابطه (۲۰-۲) نشان می‌دهد نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی آرمیچر یک ماشین جریان مستقیم تابع سرعت رتور و فوران قطب‌های آن است.

**مثال ۲-۵ -** نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی آرمیچر یک ماشین جریان مستقیم با فوران هر قطب ۲۰ mwb و سرعت رتور RPM ۶۰۰ برابر ۱۲۰ ولت است. ضریب ثابت ماشین چقدر است؟

حل:

واحد فوران به وبر تبدیل می‌شود، لذا خواهیم داشت:

$$\phi = 20 \times 10^{-3} [wb]$$

سرعت زاویه از رابطه (۱۹-۲) به دست می‌آید؛ در صورتی که فرض شود  $\pi = 3$  خواهیم داشت:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

$$\omega = \frac{2 \times 3 \times 600}{60} = 60 \left[ \frac{rad}{sec} \right]$$

از رابطه (۲۰-۲) ضریب ثابت به دست خواهد آمد.

$$E_A = K \cdot \phi \cdot \omega$$

$$K = \frac{E}{\phi \cdot \omega} = \frac{120}{20 \times 10^{-3} \times 60} = 100 \left[ \frac{1}{rad} \right]$$

## فعالیت ۱۳-۲

نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی آرمیچر مثال ۲-۵ را در سرعت RPM ۹۰۰ به دست آورید. از مقایسه جواب‌ها چه نتیجه‌ای به دست می‌آید؟

## فعالیت ۱۴ - ۲

نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی آرمیچر مثال ۶-۲ را به ازای سیم‌پیچی موجی ساده چند ولت می‌شود؟

### ۲-۱۵-۲ - جریان

در روش‌های سیم‌پیچی حلقوی و موجی بخش ۱۴-۲ در شکل‌های (۱۱۲-۲) و (۱۲۰-۲) 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 (۱۱۲-۲) نسبت به دیاگرام گسترده سیم‌پیچی موجی ساده شکل (۱۲۰-۲) 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 (۱۰-۲) به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$I_A = a I_{a1} \quad (2-22)$$

مثال ۷-۲ - 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 (۲۲-۲) خواهیم داشت:

$$I_A = a I_{a1}$$

$$I_A = 2 \times 4 = 8 \text{ [A]}$$

### فعالیت ۱۵ - ۲

جریان سیم‌پیچی آرمیچر مثال ۷-۲ را به ازای سیم‌پیچی حلقوی ساده به‌دست آورید. از مقایسه جواب‌ها چه نتیجه‌ای به‌دست می‌آید.

### ۳-۱۵-۲ - مقاومت الکتریکی

سیم‌پیچی آرمیچر از کلاف‌هایی تشکیل شده است که هر کدام از آنها دارای مقاومت اهمی هستند. هنگامی که 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

مقاومت الکتریکی سیم پیچی آرمیچر مثال ۷ - ۲ به ازای سیم پیچی موجی مرکب دوگانه چند اهم می شود.

#### ۴ - ۱۵ - ۲ - گشتاور تولیدی

گشتاور تولیدی<sup>۱</sup> سیم پیچی آرمیچر، ناشی از نیرویی است که از طرف میدان مغناطیسی قطب های استاتور به هادی های حامل جریان در شیارهای رتور وارد می شود. این گشتاور را بعضاً «گشتاور آرمیچر» یا «گشتاور الکترومغناطیسی»<sup>۲</sup> می نامند و مقدار آن از رابطه (۲۴ - ۲) به دست می آید.

$$T_A = \frac{P}{A} \cdot Z \cdot \varphi \cdot \frac{I_A}{2\pi} \quad (2-24)$$

در این رابطه:

$I_A$  جریان سیم پیچی آرمیچر بر حسب آمپر  $[A]$

$\varphi$  فوران قطب ها بر حسب وبر  $[wb]$

$Z$  تعداد هادی های درون شیارهای آرمیچر

$P$  تعداد قطب های استاتور

$a$  تعداد راه جریان سیم پیچی آرمیچر

$T_A$  گشتاور آرمیچر بر حسب نیوتن متر  $[N.m]$

مثال ۹ - ۲ - یک ماشین جریان مستقیم با

سیم پیچی موجی مرکب دوگانه ۴ قطب و فوران قطب ۱۰۰۵ wb دارای ۵۰۰ هادی در شیارهای آرمیچر است. اگر جریان سیم پیچی آرمیچر ۱۲ آمپر باشد. گشتاور آرمیچر چند نیوتن متر خواهد شد.

حل:

$$R_A = \frac{Z \cdot R_t}{2a^2} \quad (2-23)$$

که در این رابطه:

$R_t$  مقاومت الکتریکی یک حلقه از کلاف های

سیم پیچی آرمیچر

$Z$  تعداد هادی های درون شیارهای آرمیچر

$a$  تعداد راه جریان

$R_A$  مقاومت الکتریکی سیم پیچی آرمیچر

مثال ۸ - ۲ - رتور یک ماشین جریان مستقیم

دارای سیم پیچی حلقوی مرکب دوگانه، ۴ قطب می باشد. این سیم پیچی شامل ۲۰۰۰ حلقه است و مقاومت الکتریکی هر حلقه  $0.004 \Omega$  می باشد. مقاومت الکتریکی سیم پیچی آرمیچر چند اهم است؟

حل:

سیم پیچی حلقوی مرکب دوگانه است؛ لذا  $m=2$

می باشد.

در سیم پیچی حلقوی داریم:

$$a = mP$$

$$a = 2 \times 4 = 8$$

هر حلقه دارای ۲ هادی است. پس تعداد هادی ها دو

برابر تعداد حلقه های سیم پیچی است. یعنی:

$$Z = 2N$$

$$Z = 2 \times 2000 = 4000$$

از رابطه (۲۳ - ۲) خواهیم داشت.

$$R_A = \frac{Z \cdot R_t}{2a^2}$$

$$R_A = \frac{4000 \times 0.004}{2 \times 8^2} = 0.0125 [\Omega]$$

سیم‌پیچی آرمیچر موجی مرکب دوگانه است. لذا

$m=2$  است. در سیم‌پیچی موجی داریم:

$$a = 2m$$

$$a = 2 \times 2 = 4$$

گشتاور آرمیچر از رابطه (۲-۲۳) به دست می‌آید:

$$T_A = \frac{P}{A} \cdot Z \cdot \varphi \cdot \frac{I_A}{2\pi}$$

حل:

از رابطه (۲-۲۵) ضریب ثابت به دست می‌آید:

$$T_A = K \cdot \varphi \cdot I_A$$

$$K = \frac{T_A}{\varphi \cdot I_A} = \frac{2}{0.01 \times 10} = 20 \left[ \frac{1}{rad} \right]$$

## فعالیت ۱۸-۲

گشتاور آرمیچر مثال ۱۰-۲ را در صورتی که جریان آرمیچر به  $15 A$  و فوران قطب‌ها  $0.05 wb$  افزایش یابند را به دست آورید.

در صورتی که  $\pi = 3$  فرض شود:

$$T_A = \frac{4}{4} \times 500 \times 0.01 \times \frac{12}{2\pi} = 10 [N.m]$$

## فعالیت ۱۷-۲

گشتاور آرمیچر مثال ۹-۲ به ازای سیم‌پیچی

حلقوی مرکب دوگانه چند نیوتن متر است؟

در رابطه گشتاور آرمیچر حاصل  $\frac{P}{A} \cdot \frac{Z}{2\pi}$  بیانگر ضریب ثابت  $K$  است. لذا با جایگزینی مقدار  $K$  در رابطه (۲-۲۴) خواهیم داشت.

$$T_A = K \cdot \varphi \cdot I_A \quad (2-25)$$

رابطه (۲-۲۵) نشان می‌دهد، گشتاور آرمیچر تابع

فوران قطب‌ها و جریان آرمیچر است.

مثال ۱۰-۲ - یک ماشین جریان مستقیم با

جریان آرمیچر  $10 A$  و فوران قطب  $0.01 wb$  گشتاور

$2 N.m$  تولید می‌کند. ضریب ثابت ماشین چقدر است؟

## تمرین ۱۰-۲

۱- رتور یک ماشین جریان مستقیم دارای سیم‌پیچی حلقوی ساده با  $1000$  هادی و فوران زیر هر قطب  $20 mwb$  با چه سرعتی گردانده شود تا نیروی محرکه القایی  $120$  ولت ایجاد شود؟

۲- رتور یک ماشین جریان مستقیم چهار قطب با  $1000$  هادی و فوران زیر هر قطب  $10 mwb$  با سرعت  $600 RPM$  گردانده می‌شود. نیروی محرکه القایی را در دو حالت زیر به دست آورید:

الف - سیم‌پیچی حلقوی مرکب دو گانه

ب - سیم‌پیچی موجی مرکب دوگانه

۳- سیم‌پیچی آرمیچر یک ماشین جریان مستقیم  $6$  قطب با فوران زیر هر قطب  $10 mwb$  دارای  $1000$  هادی می‌باشد. رتور با سرعت  $1200 RPM$  گردانده می‌شود. مطلوب است محاسبه نیروی محرکه القایی

سیم‌پیچی آرمیچر در حالت‌های جدول زیر:

$E_A = \dots\dots\dots$	الف - سیم‌پیچی آرمیچر حلقوی ساده
$E_A = \dots\dots\dots$	ب - سیم‌پیچی آرمیچر حلقوی مرکب دوگانه
$E_A = \dots\dots\dots$	ج - سیم‌پیچی آرمیچر موجی ساده
$E_A = \dots\dots\dots$	د - سیم‌پیچی آرمیچر موجی مرکب دوگانه

از نتایج به‌دست آمده چه نتیجه‌ای حاصل می‌شود؟

است کمیت‌های الکتریکی سیم‌پیچی آرمیچر که در حالت‌های جدول زیر آمده است. پس از تکمیل جدول، بر روی نتایج بحث کنید.

۴- 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،  $[\Omega]$  ۰/۱ و  $[A]$  ۴ است. مطلوب

$E_A [V]$	$R_A [\Omega]$	$I_A [A]$	$a$	$m$	
					سیم‌پیچی حلقوی ساده
					سیم‌پیچی حلقوی مرکب دوگانه
					سیم‌پیچی موجی ساده
					سیم‌پیچی موجی مرکب دوگانه

## ۱۶- ۲- عکس‌العمل آرمیچر

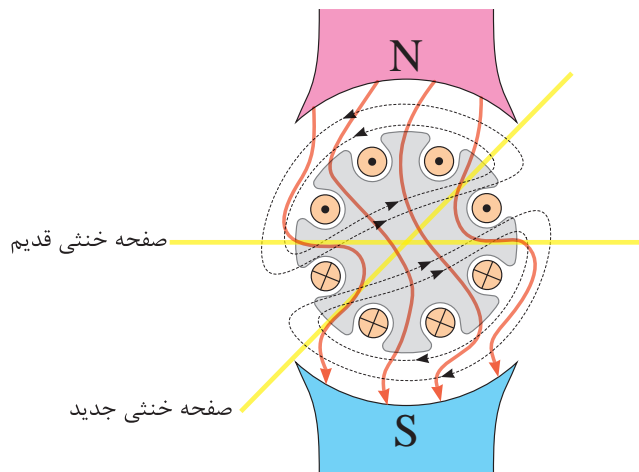
میدان مغناطیسی میان دو قطب غیرهمنام «میدان طولی» نام دارد؛ خطوط مغناطیسی میدان طولی به‌طور مستقیم موازی با یکدیگر بین دو قطب غیرهمنام قرار گرفته‌اند. می‌توان صفحه‌ای فرضی، عمود بر میدان طولی در نظر گرفت و آن را «صفحه خنثی»<sup>۱</sup> نامید (شکل ۱۲۴ - ۲).

۵- یک ماشین جریان مستقیم با سیم‌پیچی حلقوی ساده ۶ قطب و فوران قطب  $20 \text{ mwb}$  دارای ۱۰۰۰ هادی در شیارهای آرمیچر است. اگر گشتاور آرمیچر  $5 \text{ N.m}$  باشد، جریان سیم‌پیچی آرمیچر چند آمپر است؟

۶- یک ماشین جریان مستقیم با سیم‌پیچی موجی ساده ۲ قطب و فوران قطب  $0.02 \text{ wb}$  دارای ۶۰۰ هادی در شیارهای آرمیچر است. اگر جریان آرمیچر  $5 \text{ A}$  باشد گشتاور آرمیچر چند نیوتن متر خواهد شد؟

عرضی قوی تر خواهد شد.

در ماشین‌های جریان مستقیم چون سیم‌پیچی آرمیچر در میان قطب‌ها قرار دارد، میدان قطب‌ها و میدان ناشی از عبور جریان از سیم‌پیچی آرمیچر بر هم‌دیگر تأثیر می‌گذارند و باعث تغییر شکل میدان طولی می‌شوند (شکل ۱۲۶ - ۲).

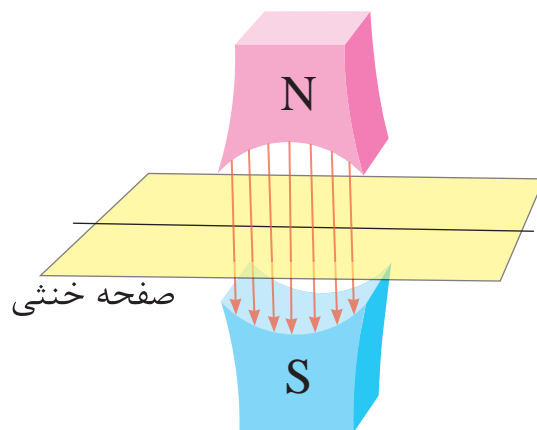


شکل ۱۲۶ - ۲

تأثیر میدان عرضی رتور بر میدان طولی قطب‌ها را «عکس‌العمل آرمیچر»<sup>۱</sup> می‌نامند.

عکس‌العمل آرمیچر پیامدهایی برای ماشین جریان مستقیم به همراه می‌آورد که عبارتند از:

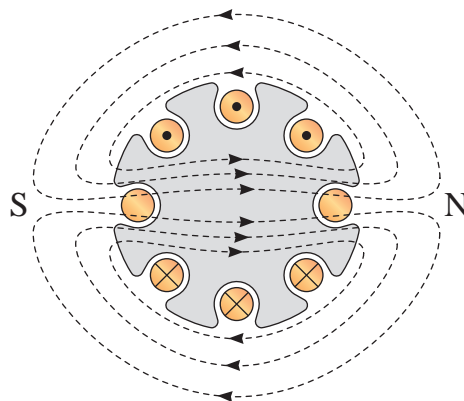
- عکس‌العمل آرمیچر باعث ایجاد اعوجاج و تضعیف میدان طولی قطب‌ها می‌شود. لذا مقدار نیروی محرکه القایی در هادی‌های سیم‌پیچی آرمیچر کاهش می‌یابد. کم شدن نیروی محرکه القایی در ژنراتورها باعث کاهش ولتاژ خروجی می‌شود و در موتورها باعث افزایش جریان موتور خواهد شد.
- عکس‌العمل آرمیچر سبب جابه‌جایی صفحه خنثی می‌شود و آن را به محل جدیدی منتقل می‌کند. لذا هنگامی که هادی‌های سیم‌پیچی آرمیچر در



شکل ۱۲۴ - ۲ میدان مغناطیسی طولی قطب‌ها و صفحه خنثی

با قرار گرفتن هر یک از کلاف‌های سیم‌پیچی 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 - ۲).



شکل ۱۲۵ - ۲ میدان مغناطیسی عرضی رتور

هر قدر جریان سیم‌پیچی آرمیچر بیشتر باشد میدان

هستند که در ادامه توضیح داده شده‌اند.

### ۱- ۱۷- ۲- جابه‌جایی محل جاروبک‌ها

برای کاهش جرقه زیر جاروبک‌ها می‌توان محل جاروبک‌ها را روی کموتاتور به اندازه جابه‌جایی صفحه خنثی جابه‌جا کرد و آنها را به محل جدید صفحه خنثی برد. ولی اجرای آن معمولاً با مشکلاتی همراه است که به آن اشاره خواهد شد.

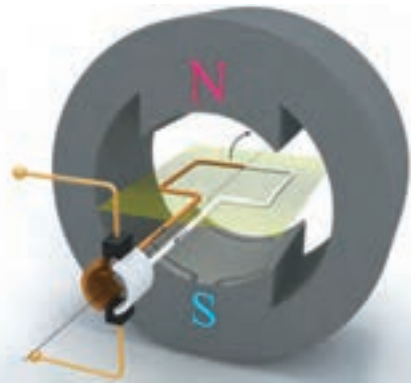
● میزان جابه‌جایی صفحه خنثی تابع جریان آرمیچر است. بنابراین هر دفعه که جریان آرمیچر تغییر کند باید محل جاروبک‌ها را تنظیم کرد.

● صفحه خنثی در ژنراتورها در جهت چرخش آرمیچر و در موتورهای برخلاف جهت چرخش آرمیچر جابه‌جا می‌شود. بنابراین متناسب با حالت ژنراتوری یا موتوری محل جاروبک‌ها تنظیم خواهد شد.

● جابه‌جا کردن جاروبک‌ها جرقه زیر جاروبک‌ها را کاهش می‌دهد اما در بهبود دیگر پیامدهای عکس‌العمل آرمیچر اثر ندارد.

در عمل جاروبک‌ها را به ازای دو سوم بار کامل ماشین جابه‌جا و ثابت می‌کنند. در این حالت، در بی‌باری و تا حدودی در بار کامل جرقه زده می‌شود. روش جابه‌جا کردن جاروبک‌ها برای کاهش جرقه منسوخ شده است. امروزه جابه‌جایی جاروبک‌ها تنها در ماشین‌های جریان مستقیم کوچک و بسیار کوچک به کار می‌رود. علت این که در این ماشین‌ها هنوز این روش استفاده می‌شود این است که راه‌حل‌های بهتر در چنین ماشین‌های کوچکی اقتصادی نیستند (شکل ۱۲۸ - ۲).

محل قدیم صفحه خنثی قرار می‌گیرند در آنها نیروی محرکه القا می‌شود. در این لحظه هادی‌ها توسط جاروبک‌ها روی کموتاتور اتصال کوتاه شده‌اند (شکل ۱۲۷ - ۲).



شکل ۱۲۷ - ۲

بنابراین جریان شدیدی از هادی‌ها می‌گذرد. این جریان می‌تواند به سیم‌پیچی آرمیچر صدمه بزند و در محل تماس جاروبک‌ها با کموتاتور جرقه به وجود آورد. حرارت ناشی از جرقه به کموتاتور آسیب می‌رساند.

### ۱۷- ۲- روش‌های مقابله با عکس‌العمل

#### آرمیچر

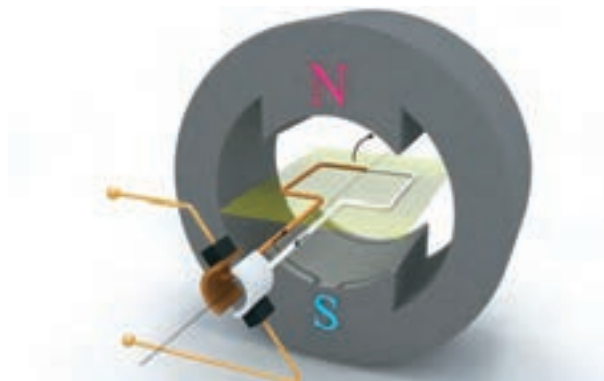
شدت و ضعف پیامدهای عکس‌العمل آرمیچر تابع شدت جریان الکتریکی در هادی‌های سیم‌پیچی آرمیچر است. سه روش برای مقابله با این پیامدها ارائه شده است. این روش‌ها عبارتند از:

- جابه‌جایی محل جاروبک‌ها
- قطب‌های کموتاسیون<sup>۱</sup> یا میان قطب<sup>۲</sup>
- سیم‌پیچ‌های جبران‌کننده<sup>۳</sup>

هر یک از این روش‌ها دارای نقاط قوت و ضعفی



میدان مغناطیسی مخالف با میدان عرضی رتور است. برای ایجاد این میدان مغناطیسی قطب‌های کوچکی به نام «قطب‌های کموتاسیون<sup>۱</sup>» یا «میان قطب<sup>۲</sup>» استفاده می‌شود. قطب‌های 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.



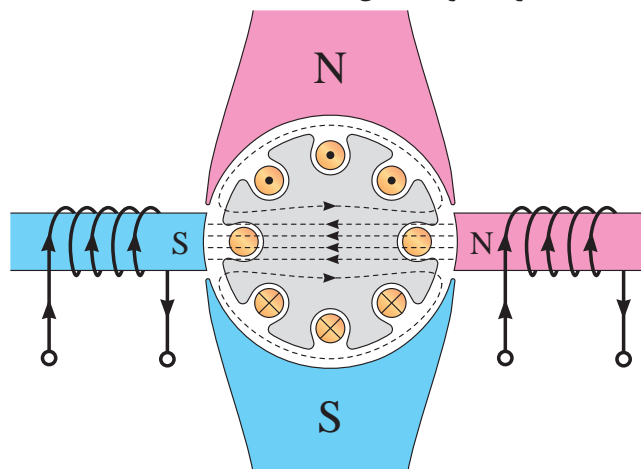
شکل ۱۲۸ - ۲

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

## ۲ - ۱۷ - ۲ - قطب‌های کموتاسیون

روش مناسب مقابله با جرقه زیر جاروبک‌ها ایجاد

هماهنگ خواهد بود (شکل ۱۲۹ - ۲).



شکل ۱۲۹ - 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



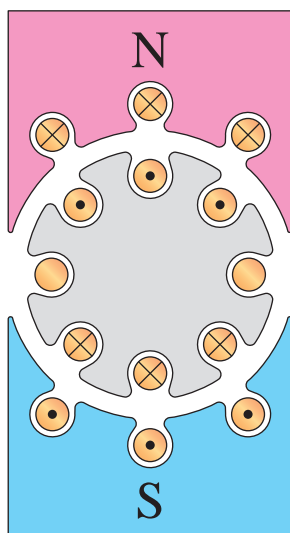
آرمیچر وجود دارد.

## ۳ - ۱۷ - ۲ - سیم‌پیچی‌های جبران‌کننده

برای خنثی کردن عکس‌العمل آرمیچر و بهبود اعوجاج میدان طولی قطب‌ها از «سیم‌پیچی جبران‌کننده»<sup>۳</sup> استفاده می‌شود.

سیم‌پیچی‌های جبران‌کننده درون شیارهایی در کف قطب‌ها به موازات شیارهای آرمیچر قرار می‌گیرند و این سیم‌پیچی‌ها، با سیم‌پیچی آرمیچر سری می‌شوند

به طوری که هرگاه جریان آرمیچر تغییر کرد، جریان سیم‌پیچی‌های جبران کننده نیز تغییر کند. میدان مغناطیسی سیم‌پیچی‌های جبران کننده باید مخالف میدان مغناطیسی هادی‌های آرمیچر باشد. لذا آنها قرار می‌گیرد (شکل ۱۳۰ - ۲).



شکل ۱۳۰ - ۲

..... قوی‌تر خواهد شد.

۴ - صفحه خنثی در اثر عکس‌العمل آرمیچر ..... می‌شود.

۵ - سیم‌پیچی قطب‌های کموتاسیون با سیم‌پیچی آرمیچر ..... هستند.

۶ - برای خنثی کردن عکس‌العمل آرمیچر و بهبود اعوجاج در میدان طولی قطب از ..... استفاده می‌شود.

۷ - جهت جریان در سیم‌پیچی‌های جبران کننده ..... جهت جریان ..... است.

### پرسش‌های صحیح، غلط

۱ - با قرار گرفتن هر یک از کلاف‌های آرمیچر در موقعیت صفحه خنثی نیروی محرکه در آنها القا می‌شود.

هرچند سیم‌پیچی‌های جبران کننده، اعوجاج در میدان طولی و جرقه زیر جاروبک‌ها را از بین می‌برند، اما نصب آنها قیمت ماشین‌های جریان مستقیم را افزایش می‌دهد. لذا سیم‌پیچی‌های جبران کننده در ماشین‌های جریان مستقیم با توان بالا که نصب آنها توجیه اقتصادی دارد استفاده می‌شود.

## پرسش ۱۱ - ۲

### پرسش‌های کامل کردنی

۱ - میدان مغناطیسی میان دو قطب غیرهمنام ..... نام دارد.

۲ - با قرار گرفتن هر یک از کلاف‌های آرمیچر در موقعیت ..... نیروی محرکه در آنها القا نمی‌شود.

۳ - هر قدر جریان آرمیچر ..... باشد میدان

- ۳ - روش‌های مقابله با عکس‌العمل آرمیچر را نام ببرید.
- ۴ - وظیفه قطب‌های کموتاسیون را بنویسید.
- ۵ - چرا قطب‌های کموتاسیون اثری در بهبود اعوجاج میدان طولی ندارند؟
- ۶ - چرا سیم‌پیچی‌های جبران کننده با سیم‌پیچی آرمیچر سری می‌شوند؟

☐ صحیح ☐ غلط

۲ - میزان جابه‌جایی صفحه خنثی تابع جریان آرمیچر است.

☐ صحیح ☐ غلط

۳ - محل نصب قطب‌های کموتاسیون در فاصله بین قطب‌های اصلی ماشین جریان مستقیم است.

☐ صحیح ☐ غلط

۴ - قطب‌های کموتاسیون جرقه زیر جاروبک‌ها را رفع می‌کند.

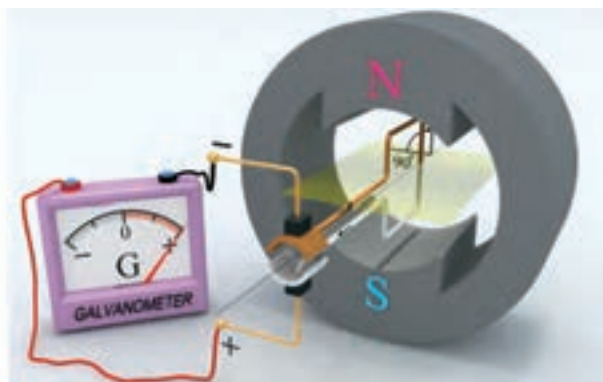
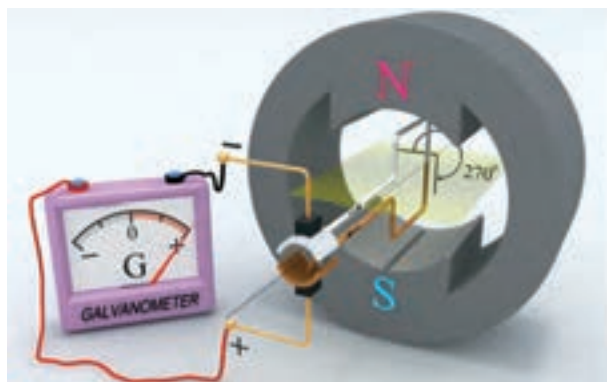
☐ صحیح ☐ غلط

## ۱۸ - ۲ - کموتاسیون

در بخش ۲ - ۵ - 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 - ۲).

## پرسش‌های تشریحی

- ۱ - میدان عرضی را تعریف کنید.
- ۲ - عکس‌العمل آرمیچر را توضیح دهید.



شکل ۱۳۱ - ۲

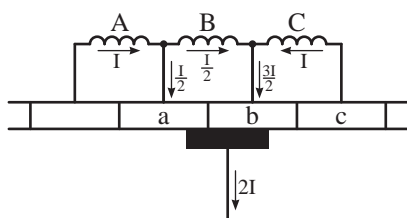
برای بررسی پدیده کموتاسیون یا معکوس شدن جهت جریان کلاف‌های آرمیچر در طی زمان کموتاسیون، قسمتی از کموتاتور و تعدادی از کلاف‌های آرمیچر در شکل (۱۳۲ - ۲) نشان داده شده است.

تغییر جهت جریان در کلاف‌های آرمیچر را «کموتاسیون»<sup>۱</sup> گویند. به هنگام کموتاسیون جاروبک‌ها از یک تیغه به تیغه دیگر کموتاتور می‌روند. مدت زمانی که طول می‌کشد تا جاروبک از یک تیغه به تیغه دیگر کموتاتور برود را «زمان کموتاسیون» گویند. و آن را با  $\Delta t$  نشان می‌دهند.

۱. Commutation

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.

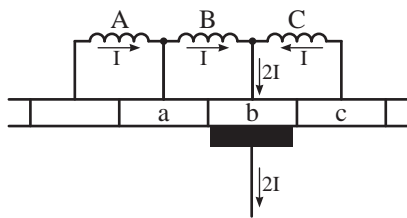
با گردش رتور سطح تماسی جاروبک با تیغه b کموتاتور بیش‌تر از تیغه a می‌شود و کلاف B از صفحه خنثی خارج خواهد شد و در آن نیروی محرکه القا می‌شود و جهت جریان آن معکوس می‌شود (شکل ۱۳۵ - ۲).



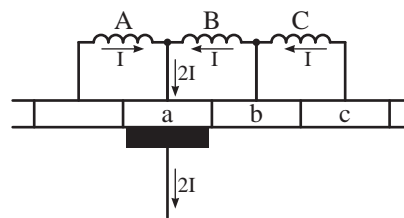
شکل ۱۳۵ - ۲

این شکل لحظه‌ای را نشان می‌دهد که کلاف B از صفحه خنثی خارج شده است و در اثر القای نیروی محرکه جریان آن به  $\frac{I}{2}$  رسیده است. سطح تماس جاروبک با تیغه‌های a و b باعث شده است که سهم کلاف A کمتر از سهم کلاف C در تأمین جریان آرمیچر باشد.

در ادامه گردش رتور جاروبک با تیغه b کموتاتور تماس می‌یابد و جریان کلاف‌های B و C را انتقال می‌دهد (شکل ۱۳۶ - ۲).



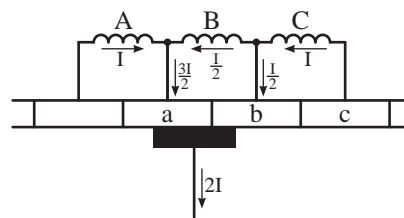
شکل ۱۳۶ - ۲



شکل ۱۳۲ - ۲

در این شکل هر کلاف I آمپر جریان دارد و جاروبک با تماس به تیغه a کموتاتور جریان کلاف‌های A و B را انتقال می‌دهد.

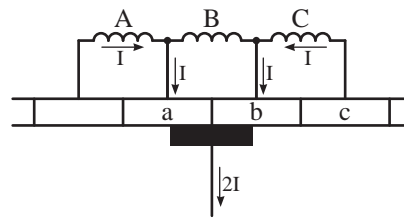
با گردش رتور لحظه‌ای فرا می‌رسد که جاروبک به تیغه‌های a و b کموتاتور تماس می‌یابد (شکل ۱۳۳ - ۲).



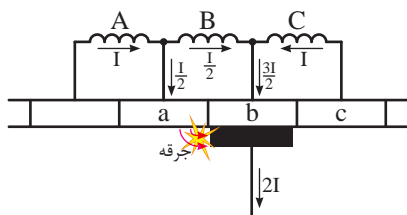
شکل ۱۳۳ - ۲

این شکل لحظه‌ای را نشان می‌دهد که جریان کلاف B در اثر کاهش القای نیروی محرکه به  $\frac{I}{2}$  کاهش یافته است و توسط جاروبک اتصال کوتاه شده است. سطح تماسی 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 جاروبک با تیغه‌های a و b کموتاتور مساوی می‌شود (شکل ۱۳۴ - ۲).



شکل ۱۳۴ - ۲



شکل ۱۳۷ - ۲ نمایش کموتاسیون بد

در این شکل فرض شده است جریان کلاف B در پایان زمان کموتاسیون به  $\frac{I}{2}$  رسیده است. بنابراین  $\frac{3I}{2}$  جریان آرمیچر توسط کلاف‌های B و C، و  $\frac{I}{2}$  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 معکوس کننده 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

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 - در طی زمان کموتاسیون تغییر جریان در کلاف اتصال کوتاه شده نیروی ضد محرکه  $U_{Cemf}$  القا می‌کند که از رابطه (۲۶ - ۲) به‌دست می‌آید.

$$U_{Cemf} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (2-26)$$

در این رابطه:

$U_{Cemf}$  نیروی ضد محرکه

$L$  ضریب خودالقایی کلاف اتصال کوتاه شده

$\Delta I$  تغییرات جریان

$\Delta t$  زمان انجام کموتاسیون

نیروی ضد محرکه  $U_{Cemf}$  طبق قانون لنز با عامل به‌وجودآورنده‌اش یعنی «تغییرات جریان  $\Delta I$ » مخالفت می‌کند و مانع تغییر جهت جریان به‌طور کامل در پایان زمان کموتاسیون می‌شود و جریان کلاف به  $I$  نمی‌رسد (شکل ۱۳۷ - ۲).

### پرسش‌های صحیح، غلط

۱ - تغییر جریان در کلاف‌های آرمیچر را عکس‌العمل آرمیچر می‌نامند.

☐ صحیح ☐ غلط

۲ - برای بهبود کموتاسیون باید اثر نیروی ضدمحرکه القایی را از بین برد.

☐ صحیح ☐ غلط

### پرسش‌های تشریحی

۱ - کموتاسیون را تعریف کنید.

۲ - پیامد کموتاسیون ناقص چیست؟

۳ - به منظور بهبود کموتاسیون در ماشین‌های جریان مستقیم چه تدبیری اتخاذ می‌شود؟

کموتاسیون علاوه بر تعدیل عکس‌العمل آرمیچر، نقش خنثی‌کننده اثر خود القایی کلاف اتصال کوتاه شده سیم‌پیچی آرمیچر را در زمان کموتاسیون نیز به عهده دارد.

۲ - از دیگر علل ایجاد جرقه هنگام کموتاسیون، 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
  - کشیف شدن سطح تیغه‌های کموتاتور در اثر ذرات چربی یا گرد و غبار
  - قرار گرفتن پلیسه‌های 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 ۱۲-۲

### پرسش‌های کامل کردنی

۱ - تغییر جهت جریان در کلاف‌های آرمیچر را ..... می‌نامند.

۲ - مدت زمانی که طول می‌کشد تا جاروبک از یک تیغه به تیغه دیگر کموتاتور برود ..... نام دارد.

۳ - در مدت زمان کموتاسیون جهت جریان کلاف ..... 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.

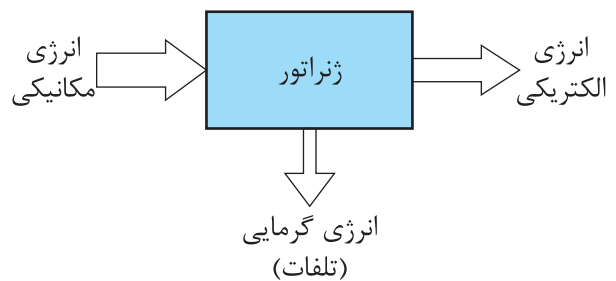
● تمرین‌های این فصل را حل نماید.

## مقدمه

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 به وسیله چند ژنراتور جریان مستقیم که به طور موازی با هم کار می‌کنند تامین می‌شود.

در شکل (۲ - ۳) یک ژنراتور جریان مستقیم نشان داده شده است.

ژنراتورهای جریان مستقیم<sup>۱</sup> 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 - ۳).



شکل ۱-۳

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 - آمپر منحصر به خود را دارند.

قسمت ساکن یا استاتور قطب‌های برجسته دارد. در صورتی که 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<sup>۲</sup> 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 صورتی که توان الکتریکی مورد نیاز تحریک  $P_F$  توسط خود 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.

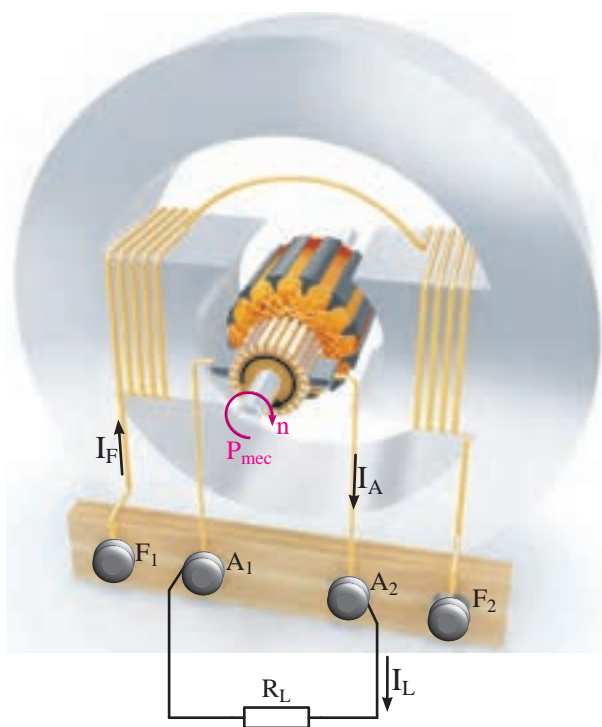
مقداری از توان ورودی  $P_{in}$  که در اثر اصطکاک



شکل ۲-۳ ژنراتور جریان مستقیم

### ۱-۳- پخش توان<sup>۱</sup> و تلفات در ژنراتورهای جریان مستقیم

طرح ساختمانی ژنراتور جریان مستقیم در شکل (۳-۳) نشان داده شده است.



شکل ۳-۳ طرح ساختمانی ژنراتور جریان مستقیم

توان تبدیل شده  $P_{conv}$  شکل الکتریکی دارد و از رابطه (۱-۳) نیز قابل محاسبه است.

$$P_{conv} = E_A \cdot I_A \quad (۱-۳)$$

در این رابطه:

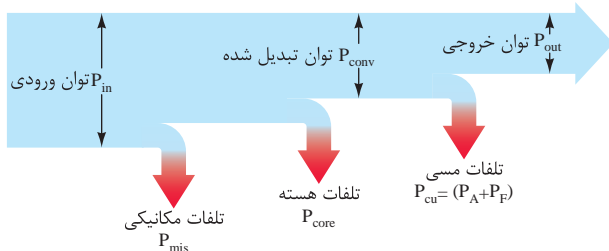
$P_{conv}$  توان تبدیل شده [w]

$E_A$  نیروی محرکه القایی آرمیچر [V]

$I_A$  جریان آرمیچر [A]

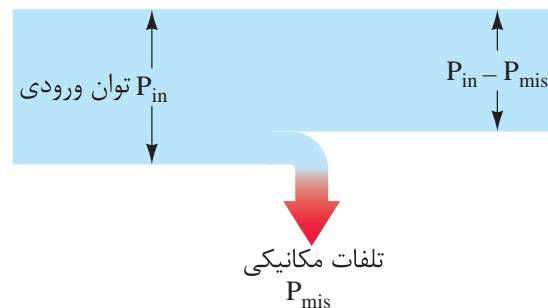
می باشد.

با جاری شدن جریان در سیم پیچی های آرمیچر و تحریک، این سیم پیچی ها گرم می شوند. مقداری از توان تبدیل شده  $P_{conv}$  که در سیم پیچی ها به گرما تبدیل می شود را «تلفات مسی»<sup>۴</sup> گویند و با  $P_{cu}$  نشان می دهند. بخشی از تلفات مسی که در سیم پیچی آرمیچر می باشد را «تلفات آرمیچر» گویند و با  $P_A$  نشان می دهند. بخش دیگر تلفات مسی در سیم پیچی تحریک بوده و آن را «تلفات تحریک» گویند و با  $P_F$  نشان می دهند.<sup>۵</sup> تلفات مسی  $(P_A + P_F)$  از توان تبدیل شده  $P_{conv}$  می کاهد و بعد از کم شدن، توان باقی مانده را «توان خروجی» گویند و با  $P_{out}$  نشان می دهند. این فرآیند در شکل (۶-۳) نشان داده شده است. به این شکل «نمودار پخش توان»<sup>۶</sup> در ژنراتورهای جریان مستقیم گویند.



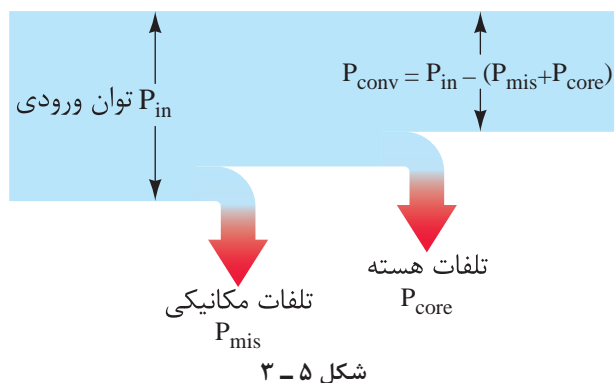
شکل ۶-۳ نمودار پخش توان در ژنراتورهای جریان مستقیم

به گرما تبدیل می شود را «تلفات مکانیکی»<sup>۱</sup> گویند و با  $P_{mis}$  نشان می دهند. تلفات مکانیکی  $P_{mis}$  از توان ورودی  $P_{in}$  می کاهد. این فرآیند در شکل (۴-۳) نشان داده شده است.



شکل ۴-۳

با جاری شدن فوران در هسته استاتور و رتور و در اثر گرداندن رتور، تلفات فوکو  $P_F$  و تلفات هیستریزیس  $P_H$  در هسته استاتور و رتور به وجود می آید. مقداری از توان ورودی  $P_{in}$  که در اثر تلفات فوکو و هیستریزیس درون هسته به گرما تبدیل می شود را «تلفات هسته»<sup>۲</sup> گویند و با  $P_{core}$  نشان می دهند. تلفات هسته  $P_{core}$  همراه با تلفات مکانیکی  $P_{mec}$  از توان ورودی  $P_{in}$  می کاهد و بعد از کم شدن، توان باقی مانده را «توان تبدیل شده»<sup>۳</sup> یا «توان الکترومغناطیسی» می گویند و با  $P_{conv}$  نشان می دهند. این فرآیند در شکل (۵-۳) نشان داده شده است.



شکل ۵-۳

توان تبدیل شده توانی است که از شکل مکانیکی به

شکل الکتریکی تبدیل شده است.

۴. Copper Losses

۳. Converted Power

۲. Core Losses

۱. Miscellaneous Losses

۵. معمولاً تلفات جاروبک ها در تلفات آرمیچر منظور می شود. در صورت وجود سیم پیچی جبران گر 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 - ۳) نیز قابل محاسبه است.

$$P_{out} = V_T \cdot I_L \quad (۳-۲)$$

که در این رابطه:

$P_{out}$  توان خروجی [W]

$V_T$  ولتاژ ترمینال‌های ژنراتور [V]

$I_T$  جریان بار [A]

مثال ۱ - ۳ - ژنراتور جریان مستقیمی ۴ kW با

تلفات مسی ۳۰۰ W و هسته ۵۰۰ W و مکانیکی ۲۰۰ W مفروض است. مطلوب است:

الف - توان تبدیل شده  $P_{conv}$

ب - توان ورودی  $P_{in}$

حل:

واحد توان خروجی را به وات تبدیل می‌نماییم:

$$P_{out} = 4_{KW} \times 1000 = 4000 [W]$$

با توجه به نمودار پخش توان شکل (۶ - ۳) داریم:

$$P_{conv} = P_{out} + (P_A + P_F)$$

$$P_{conv} = 4000 + (300) = 4300 [W]$$

$$P_{in} = P_{conv} + P_{core} + P_{mis}$$

$$P_{in} = 4300 + 500 + 200 = 5000 [W]$$

## ۲ - ۳ - تلفات کل ژنراتورهای جریان مستقیم

حاصل جمع تلفات در ژنراتورهای جریان مستقیم را «تلفات کل» گویند و آن را با  $\Delta P$  نشان می‌دهند. با توجه به نمودار پخش توان شکل (۶ - ۳) تلفات کل برابر است با:

تلفات مسی + تلفات هسته + تلفات مکانیکی = تلفات کل

و به صورت رابطه (۳ - ۳) نوشته می‌شود:

$$\Delta P = P_{mis} + P_{core} + P_{cu} \quad (۳-۳)$$

تفاوت بین توان ورودی  $P_{in}$  و توان خروجی  $P_{out}$  تلفات کل  $\Delta P$  است و آن را با رابطه (۴ - ۳) نشان می‌دهند:

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (۳-۴)$$

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 مصرف‌کننده با تغییر مصرف‌کننده، تغییر می‌کند، لذا تلفات مسی تغییر می‌کند.

مثال ۲ - ۳ - یک ژنراتور جریان مستقیم توسط موتور دیزلی به قدرت ۱۰ HP گردانده می‌شود. اگر

تلفات مکانیکی  $W_{250}$  و تلفات هسته  $W_{165}$  و تلفات مسی  $W_{625}$  باشد مطلوب است:

الف - تلفات کل

ب - توان خروجی

حل:

از رابطه (۳ - ۳) تلفات کل به دست می آید:

$$\Delta P = P_{\text{mis}} + P_{\text{core}} + (P_A + P_F)$$

$$\Delta P = 250 + 165 + 625 = 1040 \text{ [W]}$$

واحد توان ورودی بر حسب اسب بخار HP است؛ آن را به وات تبدیل می کنیم:

$$P_{\text{in}} = 10_{\text{HP}} \times 746 = 7460 \text{ [W]}$$

توان خروجی از رابطه (۳ - ۴) به دست می آید:

$$\Delta P = P_{\text{in}} - P_{\text{out}}$$

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}} - \Delta P$$

$$P_{\text{out}} = 7460 - 1040 = 6420 \text{ [W]}$$

### ۳ - ۳ - بازده ژنراتورهای جریان مستقیم

در ژنراتورهای جریان مستقیم توان ورودی  $P_{\text{in}}$  مکانیکی است و توان خروجی  $P_{\text{out}}$  الکتریکی می باشد. نسبت توان خروجی به توان ورودی را «بازده» یا راندمان گویند و آن را با نشان  $\eta$  می دهند و از رابطه (۳ - ۵) به دست می آید:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (3-5)$$

بازده را بر حسب درصد بیان می کنند و از رابطه (۳ - ۶) محاسبه می شود:

$$\% \eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100 \quad (3-6)$$

بازده بدون واحد است؛ زیرا نسبت دو توان خروجی و ورودی است.

هر چه بازده به  $100\%$  نزدیک شود تلفات ژنراتور کمتر خواهد شد.

مثال ۳ - ۳ - یک ژنراتور جریان مستقیم  $4 \text{ kW}$ ،  $V = 200$  با بازده  $80\%$  مفروض است. مطلوب است:

الف - توان ورودی  $P_{\text{in}}$

ب - جریان بار  $I_L$

حل:

از رابطه (۳ - ۵) توان ورودی به دست می آید:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}$$

$$P_{\text{in}} = \frac{P_{\text{out}}}{\eta}$$

بازده  $80\%$  است؛ یعنی  $\frac{80}{100}$  که برابر  $0.8$  است.

$$P_{\text{in}} = \frac{4 \text{ kW}}{0.8} = 5 \text{ [kW]}$$

جریان بار از رابطه (۳ - ۲) به دست می آید:

$$P_{\text{out}} = V_T \cdot I_L$$

$$I_L = \frac{P_{\text{out}}}{V_T}$$

### پرسش‌های تشریحی

- ۱ - ژنراتور الکتریکی را تعریف کنید.
- ۲ - نمودار پخش توان در ژنراتورهای جریان مستقیم را رسم نمایید و کمیت‌های الکتریکی را بر روی آن مشخص کنید.
- ۳ - تلفات مکانیکی را تعریف کنید.
- ۴ - مفهوم توان تبدیل شده در ژنراتورهای جریان مستقیم را بیان کنید.
- ۵ - تلفات تحریک را تعریف کنید.
- ۶ - تلفات ثابت در ژنراتورهای جریان مستقیم کدام‌اند؟ چرا؟
- ۷ - بازده را تعریف کنید.
- ۸ - آیا بازده ژنراتورها به  $100\%$  می‌رسد؟ چرا؟

### تمرین ۱ - ۳

- ۱ - ژنراتور جریان مستقیمی با توان  $5\text{ HP}$  گردانده می‌شود. در صورتی که تلفات هسته  $150\text{ W}$  و تلفات مسی  $220\text{ W}$  و تلفات مکانیکی  $130\text{ W}$  باشد. مطلوب است:
  - الف - توان تبدیل شده
  - ب - توان خروجی
- ۲ - ژنراتور جریان مستقیم  $1\text{ kW}$  توسط موتور دیزلی به قدرت  $2\text{ HP}$  گردانده می‌شود. اگر تلفات ثابت  $100\text{ W}$  باشد مطلوب است:
  - الف - تلفات کل
  - ب - تلفات متغیر
- ۳ - یک ژنراتور جریان مستقیم  $12\text{ V}$ ،  $15\text{ A}$  توسط موتور بنزینی با قدرت  $250\text{ W}$  گردانده می‌شود. مطلوب است:

توان خروجی بر حسب  $\text{kW}$  است آن را به  $W$

تبدیل می‌کنیم:  $P_{\text{out}} = 4_{\text{KW}} \times 1000 = 4000 [\text{W}]$

$$I_L = \frac{4000}{200} = 20 [\text{A}]$$

### پرسش ۱ - ۳

### پرسش‌های کامل کردنی

- ۱ - فرآیند تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی توسط ..... صورت می‌گیرد.
- ۲ - توانی که در اثر ..... و ..... در هسته به گرما تبدیل می‌شود را ..... گویند.
- ۳ - تلفات مکانیکی تابع ..... است.
- ۴ - از مزایای ژنراتورهای جریان مستقیم این است که دارای مشخصه‌های کاری هستند که به ..... قابل ..... است.

### پرسش‌های صحیح، غلط

- ۱ - در ماشین‌های الکتریکی فرآیند تبدیل انرژی برگشت‌پذیر است.  
☐ صحیح ☐ غلط
- ۲ - حاصل جمع تلفات در ژنراتورهای جریان مستقیم را تلفات کل گویند.  
☐ صحیح ☐ غلط
- ۳ - تلفات آرمیچر و تلفات تحریک را تلفات ثابت گویند.  
☐ صحیح ☐ غلط
- ۴ - از ژنراتور جریان مستقیم در جوشکاری و اندازه‌گیری گشتاور استفاده می‌شود.  
☐ صحیح ☐ غلط

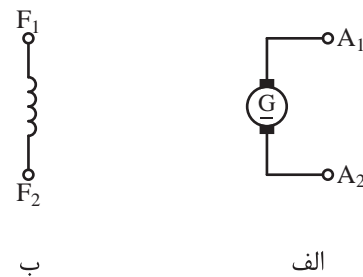
الف - توان خروجی

ب - بازده

### ۴ - ۳ - علامت اختصاری و مدار الکتریکی

#### معادل ژنراتور جریان مستقیم

طرح ساختمانی ژنراتور جریان مستقیم شکل (۳ - ۳) دو قسمت مجزا از یکدیگر را نشان می‌دهد. یکی سیم‌پیچ تحریک درون استاتور و دیگری سیم‌پیچ آرمیچر بر روی رتور می‌باشد. علامت اختصاری این دو قسمت در شکل (۳ - ۷) نشان داده شده است. به کمک علامت‌های اختصاری می‌توان نمایش ساده‌ای از ژنراتورهای جریان مستقیم ارائه کرد.



شکل ۳ - ۷ الف - علامت اختصاری آرمیچر

ب - علامت اختصاری سیم‌پیچ تحریک

از علامت اختصاری برای نشان دادن اتصالات الکتریکی در ژنراتورهای جریان مستقیم استفاده می‌شود.

تحلیل الکتریکی ژنراتورهای جریان مستقیم به منظور محاسبه کمیت‌های الکتریکی ولتاژ، جریان و توان با استفاده از مدار الکتریکی معادل امکانپذیر است. مدار الکتریکی معادل سیم‌پیچ تحریک یک مدار RL سری می‌باشد که در شکل (۳ - ۸) نشان داده شده است.



شکل ۳ - ۸ مدار الکتریکی معادل سیم‌پیچ تحریک

در این شکل:

$R_F$  معادل مقاومت اهمی سیم‌پیچ تحریک

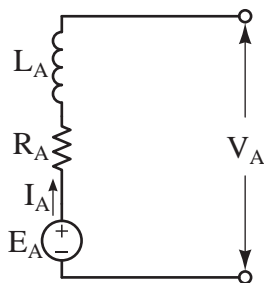
$L_F$  ضریب خود القایی سیم‌پیچ تحریک

$I_F$  جریان سیم‌پیچ تحریک

مدار الکتریکی معادل سیم‌پیچ آرمیچر یک منبع

ولتاژ مستقل جریان مستقیم سری با یک مقاومت

می‌باشد که در شکل (۳ - ۹) نشان داده شده است.



شکل ۳ - ۹ 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 [ $\Omega$ ]

$L_A$  ضریب خود القایی سیم‌پیچی آرمیچر [H]

$I_A$  جریان سیم‌پیچی آرمیچر [A]

$V_A$  ولتاژ دو سر آرمیچر [V]

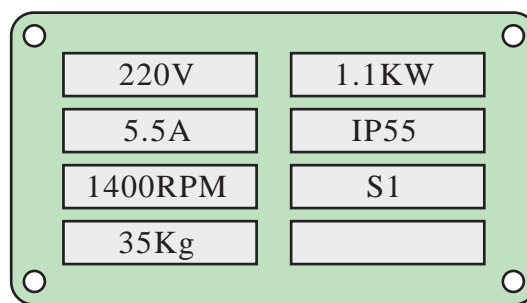


## ۵-۳- مشخصات ژنراتورهای جریان

### مستقیم

ژنراتورهای جریان مستقیم توسط کارخانه سازنده مورد آزمایش‌های متعددی قرار می‌گیرند. نتایجی که از این آزمایش‌ها به‌دست می‌آید به عنوان «مشخصات ژنراتور جریان مستقیم» ارایه می‌شوند. این مشخصات در سه گروه دسته‌بندی می‌شوند. در ادامه به هر یک از این گروه‌ها پرداخته شده است.

۱- گروه اول شامل مشخصاتی است که به روی پلاک ماشین ثبت می‌شود. در شکل (۱۰-۳) پلاک یک ژنراتور جریان مستقیم نشان داده شده است.



شکل ۱۰-۳

مشخصاتی که بر روی پلاک ثبت می‌شوند را «مقادیر نامی» می‌نامند. معمولاً ژنراتورها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که به ازای مقادیر نامی آسیب نبینند.

مشخصات پلاک شکل (۱۰-۳) مربوط به ژنراتور جریان مستقیم ۲۲۰ ولتی ۵/۵ آمپری است که با سرعت ۱۴۰۰ دور بر دقیقه باید گردانده شود. توان نامی این ژنراتور ۱/۱ کیلووات است و دارای وزن ۳۵ کیلوگرم و کلاس حفاظتی IP55 و شرایط کاری S1 می‌باشد.

## ۱-۳ فعالیت

درباره کلاس‌های عایقی و شرایط کاری تحقیق کنید.

۲- گروه دوم شامل مشخصاتی است که نتایج آزمایش‌های بی‌باری و بارداری ژنراتور را پس از تنظیم، ترسیم می‌کنند و «منحنی مشخصه<sup>۱</sup>» نامیده می‌شوند. در ادامه به این منحنی مشخصه‌ها پرداخته شده است.

### ۱-۵-۳- 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 سرعت 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.

### ۲-۵-۳- 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.

### ۳-۵-۳- منحنی مشخصه تنظیم $I_F=f(I_L)$

منحنی مشخصه تنظیم تغییر جریان تحریک  $I_F$  را به ازای تغییر جریان بار  $I_L$  در سرعت ثابت و ولتاژ ثابت نشان می‌دهد.

۳- گروه سوم شامل مشخصاتی است که از تجزیه و تحلیل اطلاعات مشخصات دسته اول و دوم به‌دست می‌آید و محاسبه می‌شوند. یکی از این مشخصات کمیت «تنظیم ولتاژ<sup>۲</sup>  $V_R$ » است که تغییرات ولتاژ خروجی بدون بار نسبت به ولتاژ بار را نشان می‌دهد و از رابطه (۷-۳) به‌دست می‌آید.

به ازای تغییر جریان بار در سرعت متغیر و ولتاژ ثابت نشان می‌دهد.

☐ غلط ☐ صحیح

۲ - نتایجی که از آزمایش‌های ژنراتور به دست می‌آید منحنی مشخصه ژنراتور جریان مستقیم نام دارد.

☐ غلط ☐ صحیح

### پرسش‌های تشریحی

۱ - کاربرد علامت اختصاری در ژنراتورهای جریان مستقیم را بیان کنید.

۲ - کاربرد مدار الکتریکی معادل ژنراتورهای جریان مستقیم را توضیح دهید.

۳ - اطلاعات پلاک شکل (۱۰ - ۳) را استخراج نمایید و هر یک را توضیح دهید.

۴ - منحنی مشخصه بی‌باری را تعریف کنید.

۵ - مدار الکتریکی معادل سیم‌پیچ تحریک و آرمیچر را رسم کنید و کمیت آنها را مشخص نمایید.

۶ - درصد تنظیم ولتاژ را تعریف کنید و رابطه آن را بنویسید.

۷ - منحنی مشخصه بارداری را تعریف کنید.

### ۶-۳ - طبقه‌بندی ژنراتورهای جریان

#### مستقیم

ژنراتورهای جریان مستقیم با توجه به نحوه تأمین تغذیه تحریک به ژنراتورهای «تحریک مستقل»<sup>۱</sup> و «خود تحریک»<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی شده‌اند. ژنراتورهای خود تحریک نیز بر اساس ارتباط الکتریکی بین مدار آرمیچر با مدار

$$V_R = \frac{E_A - V_T}{V_T} \quad (3-7)$$

تنظیم ولتاژ  $V_R$  را به صورت درصد بیان می‌کنند و از رابطه (۸ - ۳) محاسبه می‌شود.

$$\% V_R = \frac{E_A - V_T}{V_T} \times 100 \quad (3-8)$$

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 ۲-۲

#### پرسش‌های کامل کردنی

۱ - کمیت‌هایی که بر روی پلاک ثبت می‌شوند را ..... می‌نامند.

۲ - منحنی مشخصه بارداری تأثیر ..... بر ..... در سرعت ثابت و ..... نشان می‌دهد.

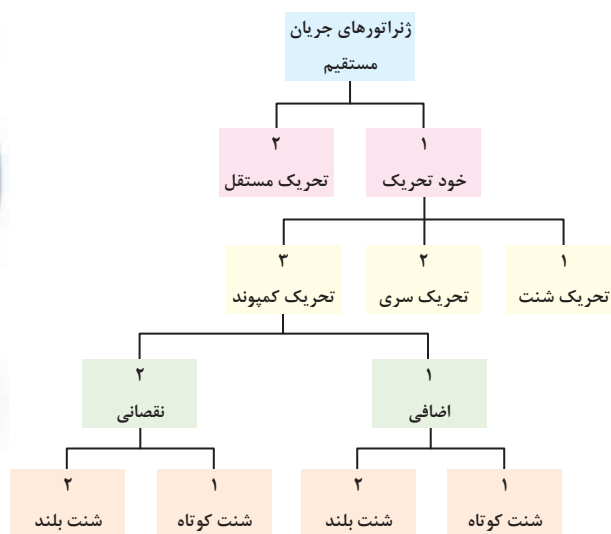
۳ - منحنی مشخصه بی‌باری تأثیر ..... بر ..... را در ..... و بدون بار نشان می‌دهد.

#### پرسش‌های صحیح غلط

۱ - منحنی مشخصه تنظیم تغییر جریان تحریک را

طرح ساختمانی ژنراتور تحریک مستقل در شکل (۱۳ - ۳) نشان داده شده است.

تحریک به ژنراتورهای «تحریک شنت<sup>۱</sup>»، «تحریک سری<sup>۲</sup>» و «تحریک کمپوند<sup>۳</sup>» تقسیم‌بندی می‌شوند. در شکل (۱۱ - ۳) نحوه تقسیم‌بندی ژنراتورهای جریان مستقیم نشان داده شده است.

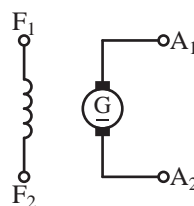


شکل ۱۱ - ۳ تقسیم‌بندی ژنراتورهای جریان مستقیم

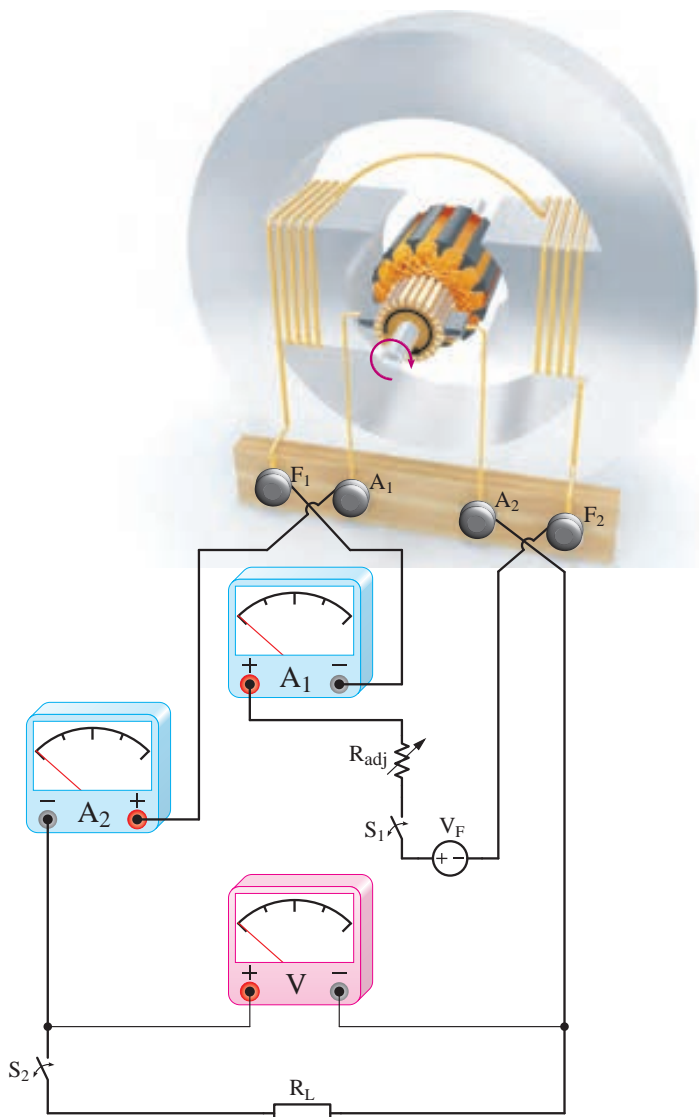
## ۷ - ۳ - ژنراتور جریان مستقیم با تحریک

### مستقل

ژنراتور جریان مستقیم با تحریک مستقل را به اختصار «ژنراتور تحریک مستقل» گویند. در ژنراتور تحریک مستقل ارتباط الکتریکی بین مدار آرمیچر با مدار تحریک وجود ندارد. علامت اختصاری موتور تحریک مستقل در شکل (۱۲ - ۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۲ - ۳ نقشه اختصاری ژنراتور تحریک مستقل



شکل ۱۳ - ۳ طرح ساختمانی ژنراتور تحریک مستقل

در این شکل استاتور دارای دو قطب برجسته می‌باشد. سیم‌پیچی تحریک به دور قطب‌ها پیچیده 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 توسط منبع ولتاژ مستقل  $V_F$  تغذیه شده است. برای

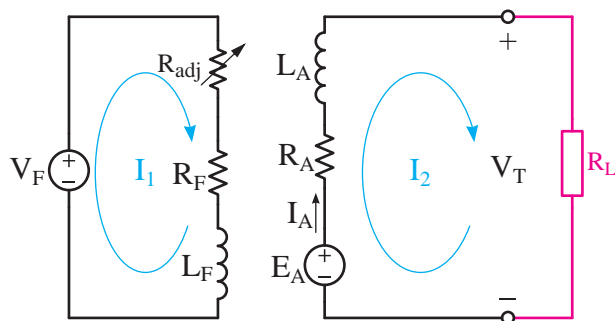
### ۱ - ۸ - ۳ - بهره‌برداری

«تنظیم» و «ثبات» ولتاژ پایانه‌های ژنراتور در محدوده بار نامی را «بهره‌برداری» گویند. به منظور بهره‌برداری از ژنراتور تحریک مستقل شکل (۱۳ - ۳) پس از راه‌اندازی، با بستن کلید  $S_p$  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 - ۳ - مدار الکتریکی معادل ژنراتور تحریک

#### مستقل

محاسبه کمیت‌های الکتریکی ولتاژ، جریان و توان با استفاده از مدار الکتریکی معادل امکان‌پذیر است. در شکل (۱۴ - ۳) مدار الکتریکی معادل سیم‌پیچ تحریک و سیم‌پیچ آرمیچر ژنراتور تحریک مستقل در کنار یکدیگر نشان داده شده است.



شکل ۱۴ - ۳ مدار الکتریکی معادل ژنراتور تحریک مستقل

مدار معادل الکتریکی نشان می‌دهد بین مدار سیم‌پیچ تحریک و سیم‌پیچ آرمیچر ارتباط الکتریکی وجود ندارد.

تغییر و تنظیم جریان تحریک از مقاومت متغیر سری با سیم‌پیچ تحریک استفاده شده است. این مقاومت متغیر را «مقاومت تنظیم‌کننده جریان تحریک» می‌نامند و با  $R_{adj}$  نشان می‌دهند. برای قطع و وصل کردن مدار تحریک از کلید  $S_p$  استفاده شده است. مدار تحریک مستقل است و ارتباط الکتریکی با مدار آرمیچر ندارد. مصرف‌کننده  $R_L$  توسط کلید  $S_p$  به پایانه‌های  $A_1$  و  $A_2$  آرمیچر اتصال داده شده است. برای اندازه‌گیری جریان تحریک  $I_F$  از آمپر متر  $A_1$  و جریان بار  $I_L$  از آمپر متر  $A_2$  استفاده شده است. ولت‌متر  $V$  با اتصال به پایانه‌های ماشین، ولتاژ  $V_T$  که همان ولتاژ بار است را اندازه می‌گیرد.

### ۸ - ۳ - راه‌اندازی ژنراتور تحریک مستقل

برای راه‌اندازی ژنراتور تحریک مستقل ابتدا کلیدهای  $S_p$  و  $S_1$  شکل (۱۳ - 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 سیم‌پیچ تحریک افزایش می‌یابد. فوراً قطب‌ها زیاد می‌شود و در سیم‌پیچ 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.

$$P_F = (R_F + R_{adj}) I_F^2 \quad (3-13)$$

$$P_A = R_A I_A^2 \quad (3-14)$$

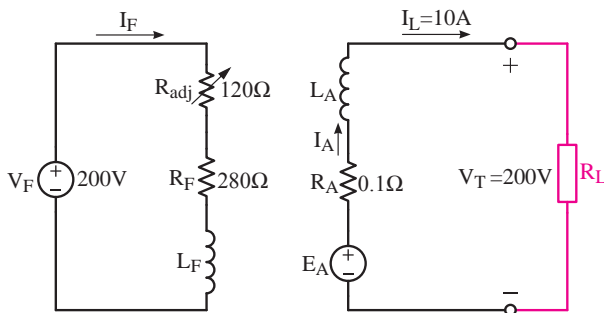
توان خروجی از رابطه (۲ - ۳) به دست می آید.

$$P_{out} = V_T \cdot I_L$$

**مثال ۵ - ۳ -** ژنراتور جریان مستقیمی با تحریک مستقل ۲۰۰ ولتی، ۱۰ آمپری با مدار الکتریکی معادل مطابق شکل (۱۵ - ۳) در نظر است. مطلوب است:

الف - جریان مدار تحریک  $I_F$

ب - نیروی محرکه القایی آرمیچر  $E_A$



شکل ۱۵ - ۳

حل:

- برای مدار تحریک حلقه  $I_1$  را انتخاب می کنیم و KVL می نویسیم.

$$KVL1) \quad -V_F + R_{adj} I_1 + R_F I_1 =$$

$$-200 + 120 I_1 + 280 I_1 = 0$$

$$-200 + 400 I_1 = 0$$

$$400 I_1 = 200$$

$$I_1 = \frac{200}{400} = 0.5 \text{ [A]}$$

مدار الکتریکی تحریک و آرمیچر را با روش حلقه یا روش های دیگر می توان تحلیل کرد. معمولاً در تحلیل مدار الکتریکی اثرات مغناطیسی عکس العمل آرمیچر و کموتاسیون به دلیل پیچیدگی محاسبات در نظر گرفته نمی شود. روش متداول اندازه گیری اثرات مغناطیسی استفاده از منحنی مشخصه های ژنراتور است.

با نوشتن KVL برای حلقه های مدار تحریک و مدار آرمیچر معادلات (۹ - ۳) و (۱۰ - ۳) به دست می آید.

$$KVL1) \quad -V_F + R_{adj} I_1 + R_F I_1 = 0 \quad (3-9)$$

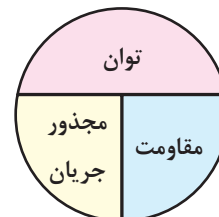
$$KVL2) \quad -E_A + R_A I_r + V_T = 0 \quad (3-10)$$

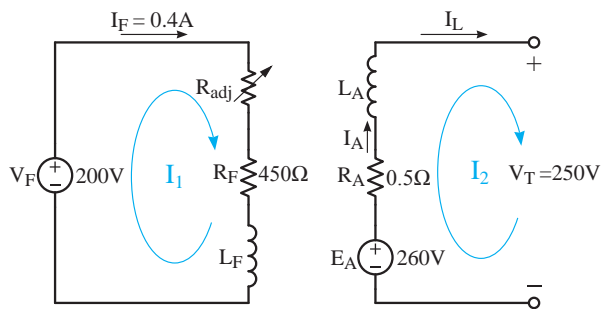
دقت کنید جریان مدارهای تحریک و آرمیچر تغییرات ندارند و مدار در حالت «پایدار» می باشد و همچنین جریان آنها DC است و فرکانس ندارد. لذا در سلف های با ضریب خود القایی  $L_A$  و  $L_F$  افت ولتاژ ایجاد نمی شود و بنابراین در نوشتن KVL لحاظ نخواهد شد. جریان حلقه  $I_1$  از محل جریان  $I_F$  و جریان حلقه  $I_r$  از محل جریان های  $I_A$  و  $I_L$  می گذرد. بنابراین روابط (۱۱ - ۳) و (۱۲ - ۳) را می توان نوشت.

$$I_F = I_1 \quad (3-11)$$

$$I_A = I_L = I_r \quad (3-12)$$

تلفات تحریک از رابطه (۱۳ - ۳) و تلفات آرمیچر از رابطه (۱۴ - ۳) به دست می آید.





- حلقه  $I_1$  از محل  $I_F$  می‌گذرد.

$$I_F = I_1 = 0.4 \text{ [A]}$$

- برای حلقه مدار آرمیچر حلقه  $I_2$  را انتخاب می‌کنیم و KVL می‌نویسیم.

$$\text{KVL}_2) -E_A + R_A I_2 + V_T = 0$$

- حلقه  $I_2$  از محل  $I_L$  می‌گذرد.

$$I_2 = I_L = 1.0 \text{ [A]}$$

$$\text{KVL}_2) -E_A + 0.5(1.0) + 250 = 0$$

$$-E_A + 1 + 250 = 0$$

$$E_A = 251 \text{ [V]}$$

مثال ۶-۳ - کمیت‌های الکتریکی یک ژنراتور جریان مستقیم با تحریک مستقل به شرح زیر است:

$$V_F = 200 \text{ [V]}, I_F = 0.4 \text{ [A]}, R_F = 450 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$E_A = 260 \text{ [V]}, R_A = 0.5 \text{ [}\Omega\text{]}, V_T = 250 \text{ [V]}$$

مطلوب است:

الف - مقدار مقاومت تنظیم‌کننده جریان تحریک

ب - جریان بار و آرمیچر

ج - تلفات مسی و توان خروجی

حل:

- مدار معادل الکتریکی ژنراتور جریان مستقیم با

تحریک مستقل را رسم می‌کنیم و کمیت‌های آن را

می‌نویسیم.

- برای مدار تحریک حلقه  $I_1$  را انتخاب می‌کنیم و KVL می‌نویسیم.

$$\text{KVL}_1) -V_F + R_{adj} I_1 + R_F I_1 = 0$$

- از محل  $I_F$  حلقه  $I_1$  می‌گذرد، لذا:

$$I_1 = I_F = 0.4 \text{ [A]}$$

$$-200 + R_{adj}(0.4) + 450(0.4) = 0$$

$$-200 + 0.4R_{adj} + 180 = 0$$

$$0.4R_{adj} = 20$$

$$R_{adj} = \frac{20}{0.4} = 50 \text{ [}\Omega\text{]}$$

- برای مدار آرمیچر حلقه  $I_2$  را انتخاب می‌کنیم و KVL می‌نویسیم:

$$\text{KVL}_2) -E_A + R_A I_2 + V_T = 0$$

$$-260 + 0.5I_2 + 250 = 0$$

$$0.5I_2 = 10$$

$$I_2 = \frac{10}{0.5} = 20 \text{ [A]}$$

- از محل جریان‌های  $I_A$  و  $I_L$  حلقه  $I_2$  می‌گذرد:

$$I_A = I_L = I_2 = 20 \text{ [A]}$$

۵ - محاسبه کمیت‌های الکتریکی ولتاژ، جریان و توان با استفاده از ..... امکان‌پذیر است.

### پرسش‌های صحیح، غلط

۱ - ژنراتورهای جریان مستقیم به ژنراتورهای تحریک مستقل و خود تحریک تقسیم‌بندی شده‌اند.

صحيح ☐ غلط ☐

۲ - در ژنراتورهای تحریک مستقل ارتباط الکتریکی بین مدار آرمیچر با مدار تحریک وجود دارد.

صحيح ☐ غلط ☐

۳ - استاتور ژنراتور تحریک مستقل دارای قطب برجسته می‌باشد.

صحيح ☐ غلط ☐

۴ - سیم‌پیچی تحریک به گونه‌ای طراحی می‌شود تا نیروی محرکه مغناطیسی مورد نیاز را تامین کند.

صحيح ☐ غلط ☐

۵ - با زیاد کردن مقاومت تنظیم‌کننده، جریان تحریک افزایش می‌یابد.

صحيح ☐ غلط ☐

### پرسش‌های تشریحی

۱ - طرح ساختمانی ژنراتور تحریک مستقل شکل (۱۳ - ۳) را توضیح دهید.

۲ - نحوه راه‌اندازی ژنراتور تحریک مستقل را بیان کنید.

۳ - نقشه اختصاری ژنراتور تحریک مستقل را رسم کنید.

۴ - مدار الکتریکی معادل ژنراتور تحریک مستقل را

- تلفات تحریک از رابطه (۱۱ - ۳) به دست می‌آید.

$$P_F = (R_F + R_{adj}) I_F^2$$

$$P_F = (450 + 50) \times 0.4^2 = 80 [W]$$

- تلفات آرمیچر از رابطه (۱۲ - ۳) به دست می‌آید.

$$P_A = R_A I_A^2$$

$$P_A = 0.5 \times 20^2 = 200 [W]$$

- تلفات مسی از حاصل جمع تلفات تحریک و آرمیچر به دست می‌آید.

$$P_A + P_F = 200 + 80 = 280 [W]$$

- توان خروجی از رابطه (۲ - ۳) به دست می‌آید.

$$P_{out} = V_T \cdot I_L$$

$$P_{out} = 250 \times 20 = 5000 [W]$$

### پرسش ۳-۳

### پرسش‌های کامل کردنی

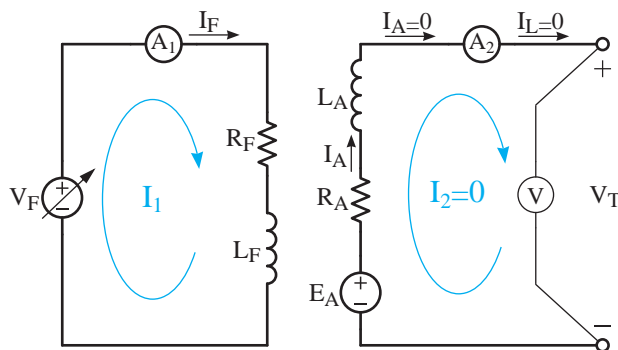
۱ - در ژنراتورهای تحریک مستقل ..... بین مدار آرمیچر با مدار تحریک وجود ندارد.

۲ - برای تغییر و تنظیم جریان تحریک از ..... استفاده شده است.

۳ - برای راه‌اندازی ژنراتور تحریک مستقل رتور را با سرعت ..... و ..... به گردش درمی‌آورند.

۴ - ..... و ..... ولتاژ پایانه‌های ژنراتور در محدوده بار نامی را بهره‌برداری گویند.





شکل ۱۶ - ۳ مدار الکتریکی آزمایش بی‌باری ژنراتور تحریک

مستقل

آمپر متر  $A_1$  جریان تحریک  $I_F$  و آمپر متر  $A_2$  جریان آرمیچر  $I_A$  و ولت متر  $V$  ولتاژ پایانه‌های ژنراتور  $V_T$  را نشان می‌دهند.

نیروی محرکه القایی با رابطه  $(2 - 20)$  بیان می‌شود.

$$E_A = K \cdot \phi \cdot \omega$$

با ثابت نگه داشتن سرعت  $\omega$ ، 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 می‌خوانند  $E_A$  تابعی از  $I_F$ .

در آزمایش بی‌باری، ژنراتور بدون بار می‌باشد و جریان سیم‌پیچی آرمیچر  $I_A = 0$  است. لذا اثرات مغناطیسی ناشی از عکس‌العمل آرمیچر و کموتاسیون به‌وجود نمی‌آید. از طرفی طبق رابطه  $(3 - 10)$  خواهیم داشت:

$$\text{KVL} \quad -E_A + R_A I_A + V_T = 0$$

از آنجایی که  $I_A = 0$  است. پس:

$$\text{KVL} \quad -E_A + R_A (0) + V_T = 0$$

رسم کنید و کمیت‌های الکتریکی آن را معرفی کنید.  
۵ - چرا در نوشتن KVL برای مدار الکتریکی معادل از محاسبه افت ولتاژها  $L_A$  و  $L_F$  صرف‌نظر می‌شود؟

## تمرین ۲ - ۳

۱ - کمیت‌های الکتریکی یک ژنراتور جریان مستقیم

به شرح زیر است:

$$I_F = 0.5 [A], R_F = 200 [\Omega], R_{adj} = 30 [\Omega]$$

$$E_A = 25 [V], R_A = 0.1 [\Omega], I_L = 10 [A]$$

مطلوب است:

الف - ولتاژ ترمینال‌های ژنراتور  $V_T$

ب - ولتاژ تحریک  $V_F$

ج - تلفات مسی آرمیچر و تحریک

۲ - یک ژنراتور جریان مستقیم تحریک مستقل  $5kW$  و  $250V$  با مقاومت سیم‌پیچی آرمیچر  $2\Omega$  مفروض است. مطلوب است:

الف - جریان مدار آرمیچر

ب - توان تبدیل شده

ج - تلفات آرمیچر

## ۱۰ - ۳ - 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  $(3 - 16)$  اتصال می‌دهند.

به دست آمده به «منحنی برگشت بی باری» موسوم است. جداول (۱ - ۳) و (۲ - ۳) نتایج رفت و برگشت آزمایش بی باری ژنراتور ۱ kW، ۲۰۰ RPM، ۱۵۰۰ را نشان می دهند.

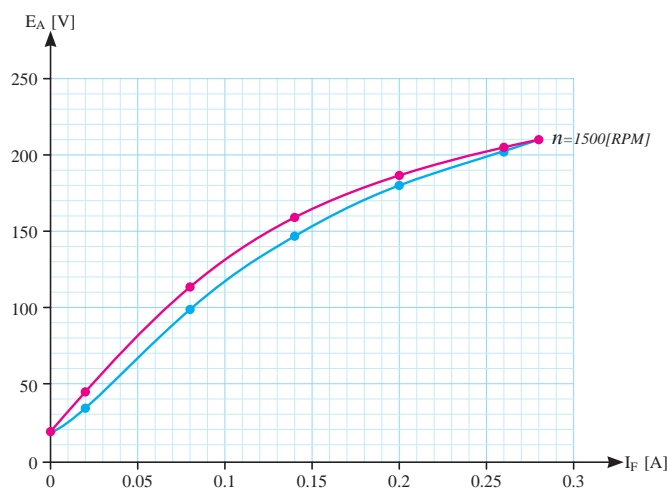
$I_F [A]$	۰	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۱۴	۰/۲	۰/۲۶	۰/۲۸
$E_A [V]$	۱۶/۴	۳۴	۹۹	۱۴۸	۱۸۱	۲۰۳	۲۱۰

جدول ۱ - ۳ نتیجه رفت آزمایش بی باری

$I_F [A]$	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 - ۳ نتیجه برگشت آزمایش بی باری

نقاط نشان دهنده مقدار هر ولتاژ به ازای جریان تحریک معین جداول رفت و برگشت آزمایش بی باری در شکل (۱۷ - ۳) نشان داده شده است. با اتصال نقاط رفت به یکدیگر منحنی رفت و با اتصال نقاط برگشت به یکدیگر منحنی برگشت ترسیم می شود.



شکل ۱۷ - ۳ منحنی رفت و برگشت بی باری

در آزمایش بی باری 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

$$-E_A + 0 + V_T = 0$$

$$E_A = V_T$$

بنابراین در آزمایش بی باری ولت متر  $V$  با اندازه گیری  $V_T$  مقدار  $E_A$  را نشان می دهد.

### ۱ - ۱۰ - ۳ - آزمایش بی باری

در حالی که ژنراتور بدون بار است رتور آن را توسط محرک با سرعت ثابت به گردش در می آورند. سپس با افزایش ولتاژ منبع  $V_F$  جریان تحریک را طی چند مرحله افزایش می دهند و در هر مرحله مقدار نیروی محرکه القایی آرمیچر  $E_A$  را که توسط ولت متر  $V$  اندازه گیری می شود در جدولی یادداشت می نمایند. این کار را آنقدر ادامه می دهند تا جریان تحریک به مقدار نامی برسد.

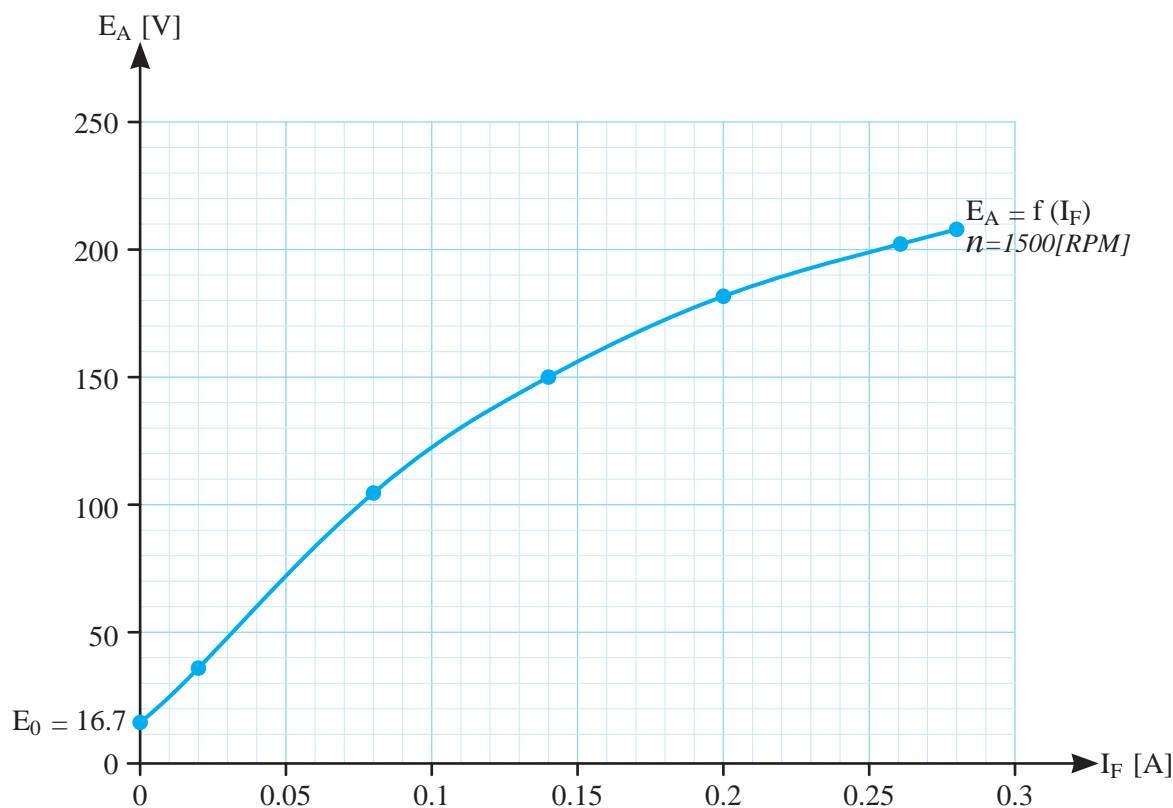
سپس روی یک دستگاه مختصات که محور افقی آن جریان تحریک  $I_F$  و محور عمودی آن نیروی محرکه القایی آرمیچر  $E_A$  است، نقاط نشان دهنده مقدار  $E_A$  به ازای هر جریان تحریک معین را مشخص می نمایند. این نقاط را به یکدیگر وصل می کنند. منحنی به دست آمده به «منحنی رفت بی باری» موسوم است.

در ادامه آزمایش، با کاهش ولتاژ منبع  $V_F$  جریان تحریک را طی چند مرحله کاهش می دهند و در هر مرحله مقدار نیروی محرکه القایی  $E_A$  را که توسط ولت متر  $V$  اندازه گیری می شود یادداشت می نمایند. این کار را آنقدر ادامه می دهند تا جریان تحریک صفر شود. سپس بر روی دستگاه مختصاتی که منحنی رفت بی باری را ترسیم کرده بودند نقاط نشان دهنده مقدار  $E_A$  به ازای هر جریان تحریک را در این حالت مشخص می نمایند. این نقاط را به یکدیگر وصل می کنند. منحنی

را «منحنی مشخصه بی‌باری» گویند که در شکل (۱۸ - ۳) نشان داده شده است.

نیروی محرکه القایی منطبق بر محور  $I_F$  (تابع) انتخاب شده است.

میانگین منحنی رفت و برگشت شکل (۱۷ - ۳)



شکل ۱۸ - ۳ منحنی مشخصه بی‌باری در سرعت ۱۵۰۰ RPM

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 - ۳) این مقدار برابر  $E_0 = 16.7$  [V] است. ولتاژ پس‌ماند به ازای فوران پس‌ماند مغناطیسی قطب‌ها با گردش رتور در سیم‌پیچی آرمیچر القا می‌شود.

**فعالیت ۱ - ۳ -** 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.

منحنی مشخصه بی‌باری شبیه 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 مشخصه بی‌باری به شکل منحنی درمی‌آید. پس از اشباع کامل قطب‌ها افزایش جریان تحریک  $I_F$  بر نیروی محرکه القایی آرمیچر  $E_A$  تقریباً بی‌تأثیر خواهد شد و مقدار  $E_A$  را می‌توان ثابت در نظر گرفت.

مقدار نیروی محرکه القایی در سرعت  $n_1$  را به ازای سرعت  $n_2$  به دست آورد.

$$\frac{E_{A1}}{E_{A2}} = \frac{n_1}{n_2} \quad (3-15)$$

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 مشخصه شکل (۱۸ - ۳) به ازای سرعت  $n_1 = 1500 \text{ RPM}$  رسم شده است. برای ترسیم این مشخصه در سرعت  $n_2 = 1000 \text{ RPM}$  به ازای چند نقطه تحریک  $I_F$ ، مقادیر نیروی محرکه القایی  $E_A$  در سرعت جدید  $n_2$  با استفاده از رابطه (۱۵ - ۳) محاسبه و در جدول (۳ - ۳) یادداشت شده است.

$I_F [\text{A}]$	۰	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۱۴	۰/۲	۰/۲۶	۰/۲۸
$E_{A1} [\text{V}]$	۱۶/۷	۳۹/۵	۱۰۷	۱۵۳/۵	۱۸۴	۲۰۴	۲۱۰
$n_1 = 1500 \text{ RPM}$							
$E_{A2} [\text{V}]$	۱۱/۱	۲۶/۳	۷۱/۳	۱۰۲/۳	۱۲۲/۶	۱۳۶	۱۴۰
$n_2 = 1000 \text{ RPM}$							

جدول ۳ - ۳

$$\frac{E_{A1}}{E_{A2}} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\frac{16/7}{E_{A2}} = \frac{1500}{1000}$$

$$E_{A2} = \frac{1000 \times 16/7}{1500} = 11/1 [\text{V}]$$

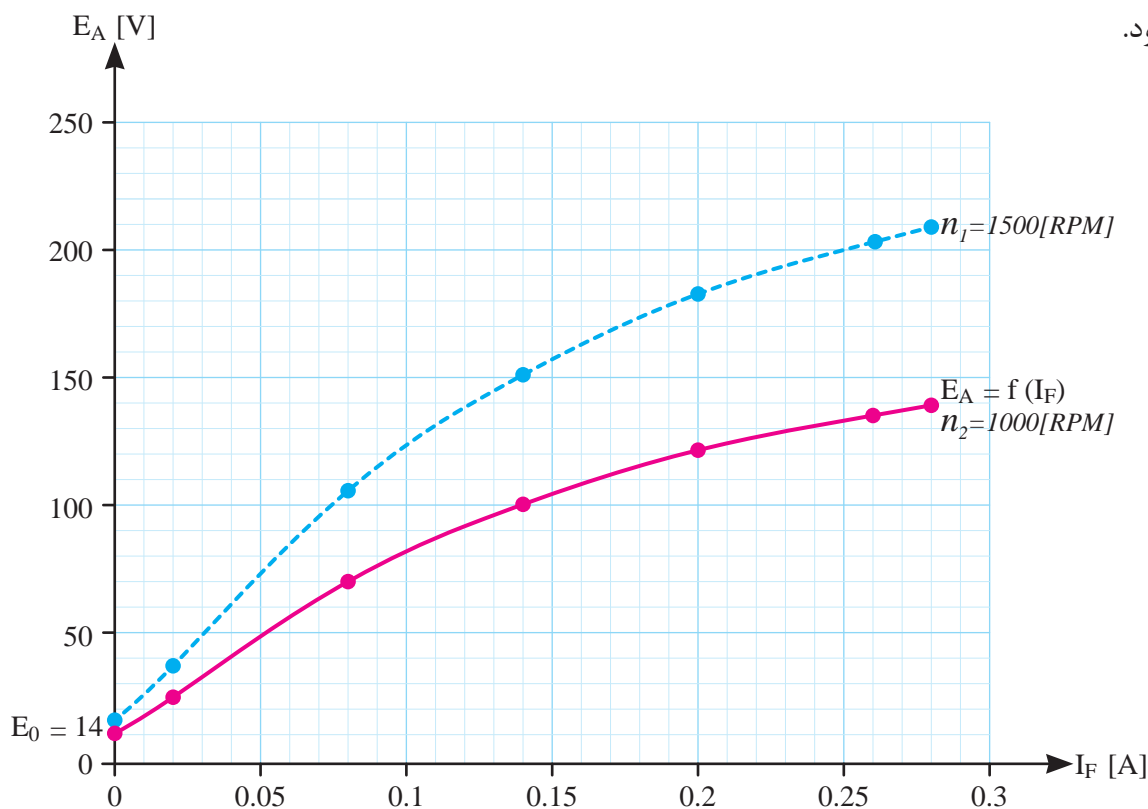
هر مقدار از ولتاژ  $E_{A2}$  به ازای جریان تحریک  $I_F$  جدول (۳ - ۳) در شکل (۱۹ - ۳) با یک نقطه نشان داده شده است و با اتصال این نقاط به یکدیگر منحنی

جریان تحریک مربوط به نقطه کار ژنراتور در انتهای ناحیه خمیدگی و شروع ناحیه اشباع منحنی مشخصه بی باری تنظیم خواهد شد. تا ژنراتور «پایدار» بماند و مقدار ولتاژ آن ثابت شود. در صورتی که جریان تحریک مربوط به نقطه کار ژنراتور در ناحیه خطی منحنی مشخصه بی باری تنظیم شود، به ازای تغییر جزئی جریان تحریک، ولتاژ به شدت تغییر می کند و کار ماشین «ناپایدار» می شود. و چنانچه در ناحیه اشباع منحنی مشخصه بی باری تنظیم شود، امکان تنظیم ولتاژ ماشین «محدود» می شود.

در صورتی که منحنی مشخصه بی باری در دور  $n_1$  به دست آمده باشد می توان آن را بدون تکرار آزمایش بی باری در دور  $n_2$  نیز به دست آورد. برای این منظور با استفاده از رابطه (۱۵ - ۳) در جریان تحریک معین،

نحوه محاسبه  $E_{A2}$  به ازای جریان تحریک  $I_F = 0$  در سرعت  $n_2 = 1000 \text{ RPM}$  به این صورت است که ابتدا از منحنی مشخصه بی باری شکل (۱۸ - ۳) به ازای  $I_F = 0$  مقدار نیروی محرکه القایی  $E_{A1} = 16/7$  به دست می آید. سپس با رابطه (۱۵ - ۳) مقدار  $E_{A2}$  در سرعت  $n_2 = 1000 \text{ RPM}$  محاسبه و در جدول (۳ - ۳) یادداشت شده است. بدیهی است به ازای دیگر مقادیر  $I_F$  نیز به همین ترتیب عمل می شود.

مشخصه بی‌باری در سرعت  $n_p = 1000 \text{ RPM}$  ترسیم می‌شود.



شکل ۱۹ - ۳ منحنی مشخصه بی‌باری در سرعت ۱۰۰۰ RPM

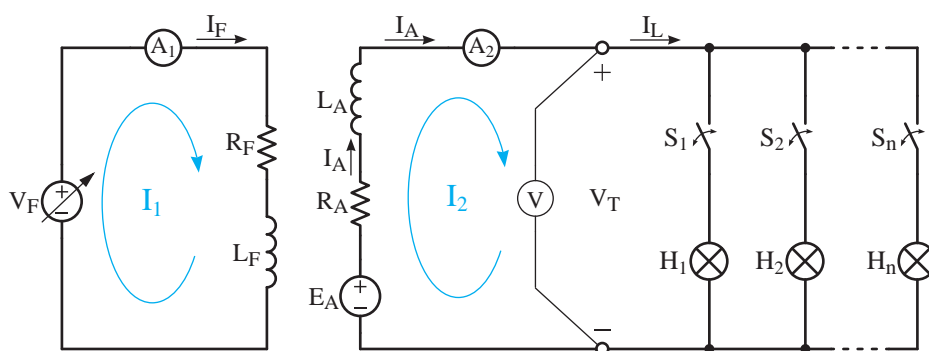
پایانه‌های ژنراتور  $V_T$  در سرعت ثابت و جریان تحریک  $I_F$  ثابت است.

### ۱۱-۳- منحنی مشخصه بارگذاری ژنراتور

#### تحریک مستقل

برای انجام آزمایش بارگذاری، ژنراتور تحریک مستقل را مطابق مدار الکتریکی شکل (۲۰ - ۳) اتصال می‌دهند.

منحنی مشخصه بارگذاری از آزمایش بارگذاری به‌دست می‌آید و هدف تعیین تأثیر جریان بار  $I_L$  بر ولتاژ



شکل ۲۰ - ۳ مدار الکتریکی آزمایش بارگذاری ژنراتور تحریک مستقل

آمپر متر  $A_1$  جریان تحریک  $I_F$  و آمپر متر  $A_2$  جریان بار  $I_L$  را که در ژنراتور تحریک مستقل با جریان آرمیچر  $I_A$  برابر است را نشان می‌دهند. ولت متر  $V$  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 - ۳) به دست خواهد آمد.

$$\text{KVL} \quad -E_A + R_A I_F + V_T = 0$$

$$V_T = E_A - R_A I_F$$

با جایگزینی  $I_L$  به جای  $I_F$  رابطه (۱۶ - ۳) به دست می‌آید:

$$V_T = E_A - R_A I_L \quad (3-16)$$

نیروی محرکه القایی آرمیچر  $E_A = K \cdot \phi \cdot \omega$  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 - ۳) در آزمایش بارداری، ولتاژ ژنراتور  $V_T$  تابع جریان بار  $I_L$  خواهد بود.

در شکل (۲۰ - 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 - ۱۱ - ۳ - 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 - 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 ولت متر  $V$  و جریان بار  $I_L$  که توسط آمپر متر  $A_2$  اندازه‌گیری می‌شوند را در جدولی یادداشت می‌نمایند. این کار آنقدر ادامه می‌یابد تا جریان بار  $I_L$  به مقدار نامی ژنراتور برسد.

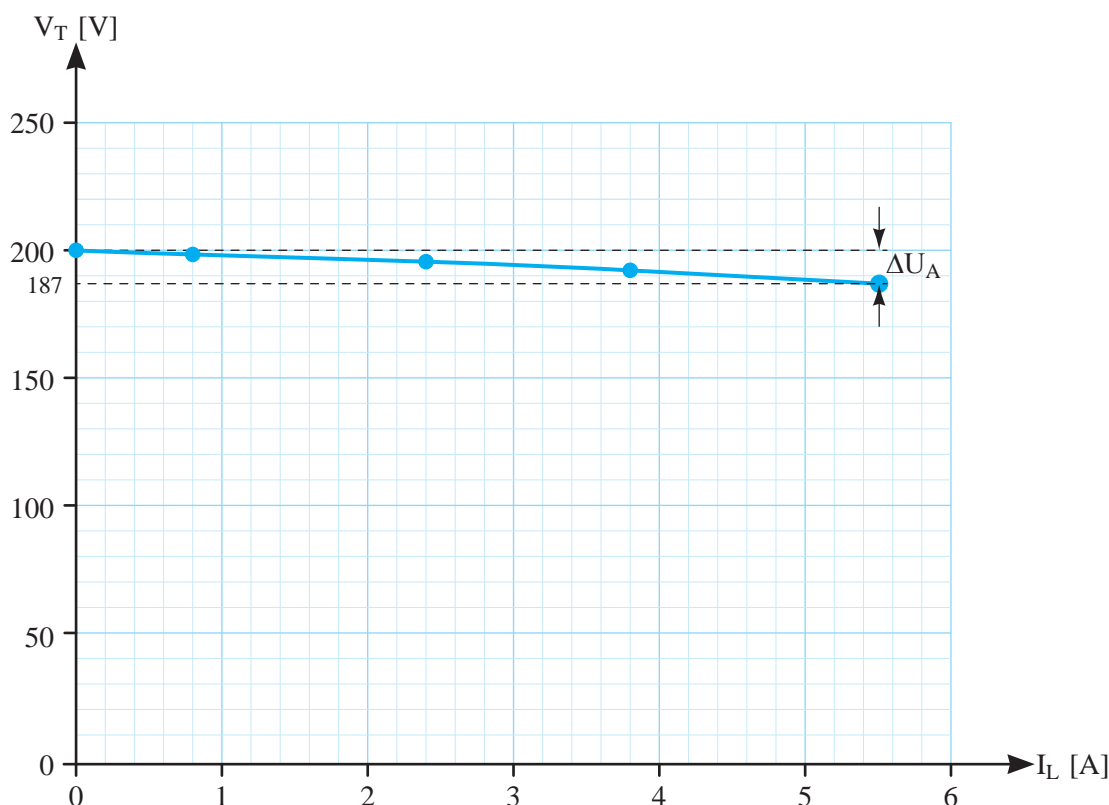
سپس روی یک دستگاه مختصات که محور افقی آن جریان بار  $I_L$  و محور عمودی آن ولتاژ پایانه‌های ژنراتور  $V_T$  معینی را مشخص می‌نمایند تا «منحنی مشخصه بارداری» ژنراتور تحریک مستقل به دست آید.

جدول (۴ - ۳) نتیجه آزمایش بارداری ژنراتور تحریک مستقل  $1 \text{ kW}$ ،  $5/5$  آمپر  $200$  ولتی را در سرعت  $1500 \text{ RPM}$  نشان می‌دهد.

$I_L \text{ [A]}$	۰	۰/۸	۲/۴	۳/۸	۵/۵
$V_T \text{ [V]}$	۲۰۰	۱۹۸	۱۹۵	۱۹۲	۱۸۷

جدول ۴ - ۳ نتیجه آزمایش بارداری

نقاط نشان‌دهنده مقدار هر ولتاژ به ازای جریان بار معین جدول (۴ - ۳) در شکل (۲۱ - ۳) نشان داده شده است. با اتصال نقاط به یکدیگر منحنی مشخصه بارداری ترسیم شده است.



شکل ۲۱-۳ منحنی مشخصه بارگذاری ژنراتور تحریک مستقل

۲- 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 « $\mathcal{E}$ » نشان داده می‌شوند. بنابراین برای افت ولتاژ آرمیچر  $\Delta U_A$  رابطه (۳-۱۷) نوشته خواهد شد.

$$\Delta U_A = R_A I_A + \mathcal{E} \quad (3-17)$$

منحنی مشخصه بارگذاری شکل (۳-۲۱) همچنین نشان می‌دهد، افت ولتاژ آرمیچر  $\Delta U_A$  همان اختلاف ولتاژ ترمینال ژنراتور به ازای  $I_L = 0$  یعنی ولتاژ بی‌باری یا همان  $E_A$  با ولتاژ بارگذاری  $V_T$  است که با رابطه (۳-۱۸) نشان داده می‌شود.

در آزمایش بارگذاری 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 ۲-۳-** با استفاده از برنامه *Excel* نمودار مربوط به جدول (۳-۴) را رسم کنید.

منحنی مشخصه بارگذاری شکل (۳-۲۱) 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  $\Delta U_A$  نشان می‌دهند.

افت ولتاژ آرمیچر  $\Delta U_A$  تابع جریان بار  $I_L$  است و عواملی که سبب ایجاد آن خواهند شد عبارت است از:

۱- مقاومت اهمی سیم‌پیچی آرمیچر



## ۱۲- ۳- 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 ۳-۴

#### پرسش‌های کامل کردنی

- ۱- منحنی مشخصه بی‌باری از ..... به دست می‌آید.
- ۲- منحنی مشخصه بی‌باری دارای سه ناحیه ..... و ..... است.
- ۳- منحنی مشخصه بارداري از ..... به دست می‌آید.

#### پرسش‌های صحیح، غلط

- ۱- هدف از انجام آزمایش بی‌باری تعیین تأثیر جریان تحریک بر نیروی محرکه القایی در سرعت ثابت است.

☐ غلط ☐ صحیح

- ۲- هدف از انجام آزمایش بارداري تعیین تأثیر ولتاژ ژنراتور بر جریان بار در سرعت ثابت است.

☐ غلط ☐ صحیح

- ۳- از ژنراتور تحریک مستقل برای تغذیه تحریک ژنراتورهای جریان متناوب در نیروگاه‌های برق استفاده

$$\Delta U_A = E_A - V_T \quad (3-18)$$

روش متداول اندازه‌گیری افت ولتاژ ناشی از اثرات مغناطیسی  $\mathcal{E}$  استفاده از منحنی مشخصه بارداري و روابط (۱۷-۳) و (۱۸-۳) است که در مثال (۷-۴) آورده شده است.

**مثال ۷-۴- منحنی مشخصه بارداري شکل (۲۱-۳) مربوط به ژنراتور تحریک مستقل با مقاومت اهمی سیم‌پیچی آرمیچر  $R_A = 1/25 \Omega$  است. به ازای جریان بار  $I_L = 5/5 A$  مطلوب است:**

- افت ولتاژ ناشی از اثرات مغناطیسی  $\mathcal{E}$

حل:

- با توجه به منحنی مشخصه بارداري به دست

می‌آوریم.

$$I_L = 0 \Rightarrow V_T = E_A = 200 [V]$$

$$I_L = 5/5 [A] \Rightarrow V_T = 187 [V]$$

- با توجه به رابطه (۱۸-۳) خواهیم داشت.

$$\Delta U_A = E_A - V_T$$

$$\Delta U_A = 200 - 187 = 13 [V]$$

- و از رابطه (۱۷-۳) افت ولتاژ ناشی از اثرات

مغناطیسی به دست می‌آید.

$$\Delta U_A = R_A I_A + \mathcal{E}$$

$$13 = 1/25 \times 5/5 + \mathcal{E}$$

$$\mathcal{E} = 6/125 [V]$$

- درصد تنظیم ولتاژ از رابطه (۸-۳) به دست

می‌آید.

$$\% V_R = \frac{E_A - V_T}{V_T} \times 100$$

$$\% V_R = \frac{200 - 187}{187} \times 100 = \% 6/95$$

می‌شود.

$460\text{ V}$ ،  $40\text{ A}$  با مقاومت اهمی سیم‌پیچ آرمیچر  $\Omega 0.3$  به شرح زیر است.

$I_L[\text{A}]$	0	10	20	30	40
$V_T[\text{V}]$	480	478	475	471	460

مطلوب است:

الف - منحنی مشخصه بارداری

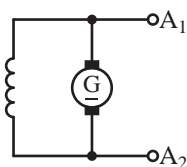
ب - افت ولتاژ آرمیچر در بارنامی

ج - افت ولتاژ ناشی از اثرات مغناطیسی در بارنامی

### ۱۳ - ۳ - ژنراتور جریان مستقیم با تحریک

شنت

ژنراتور جریان مستقیم با تحریک شنت را به اختصار «ژنراتور شنت» 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 - ۳) نشان داده شده است.



شکل ۲۲ - ۳ نقشه اختصاری ژنراتور شنت

طرح ساختمانی ژنراتور شنت در شکل (۲۳ - 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.

☐ صحیح ☐ غلط

### پرسش‌های تشریحی

۱ - نحوه انجام آزمایش بی‌باری ژنراتور تحریک مستقل را شرح دهید.

۲ - چرا در آزمایش بی‌باری سرعت ژنراتور باید ثابت نگه داشته شود؟

۳ - هدف از انجام آزمایش بی‌باری را بنویسید.

۴ - نحوه انجام آزمایش بارداری ژنراتور تحریک مستقل را شرح دهید.

۵ - چرا در آزمایش بارداری سرعت و جریان تحریک باید ثابت نگه داشته شود؟

۶ - هدف از انجام آزمایش بارداری را بنویسید.

۷ - کاربرد ژنراتور تحریک مستقل را بنویسید.

### تمرین ۳ - ۳

۱ - میانگین نتایج رفت و برگشت آزمایش بی‌باری ژنراتور تحریک مستقل در سرعت  $1300\text{ RPM}$  به شرح زیر است.

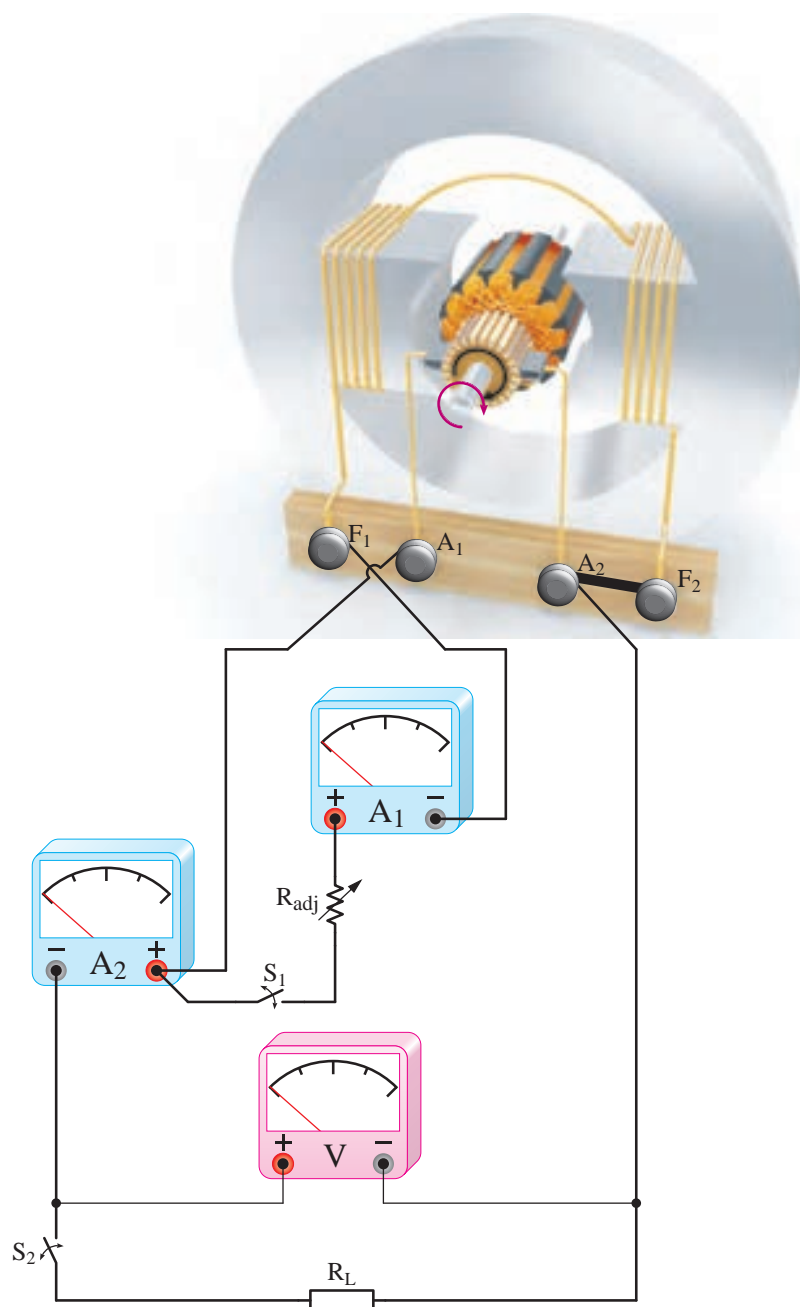
$I_F[\text{A}]$	0	0.2	0.6	0.8	1	1.2
$E_A[\text{V}]$	12	44	98	113	122	127

مطلوب است:

الف - منحنی مشخصه بی‌باری در سرعت  $1300\text{ RPM}$

ب - منحنی مشخصه بی‌باری در سرعت  $1500\text{ RPM}$

۲ - نتیجه آزمایش بارداری ژنراتور تحریک مستقل



شکل ۲۳- ۳ طرح ساختمانی ژنراتور شنت

به ترمینال‌های  $A_1$  و  $A_2$  آرمیچر اتصال داده شده است تا آن نیز همانند سیم‌پیچ تحریک با سیم‌پیچ آرمیچر موازی شود و از ولتاژ و جریان آرمیچر تغذیه کند. برای اندازه‌گیری جریان تحریک  $I_F$ ، آمپر متر  $A_1$  و جریان بار  $I_L$ ، آمپر متر  $A_2$  و ولتاژ پایانه‌های ماشین  $V_T$ ، ولت‌متر  $V$  در مدار قرار داده شده‌اند.

لذا ولتاژ سیم‌پیچ تحریک برابر ولتاژ آرمیچر می‌باشد و جریان آن از ولتاژ آرمیچر تامین می‌شود. برای تغییر و تنظیم جریان تحریک از مقاومت متغیری با سیم‌پیچ تحریک، سری می‌شود. این مقاومت متغیر را «مقاومت تنظیم‌کننده جریان تحریک» می‌نامند و با  $R_{adj}$  نشان می‌دهند. مصرف‌کننده  $R_L$  توسط کلید  $S$

در این شرایط ولتاژی در سیم پیچی آرمیچر القا نخواهد شد و خود تحریکی انجام نمی شود. برای رفع این مشکل، گردش رتور را متوقف می کنند. سرهای سیم پیچی تحریک را از سرهای سیم پیچی آرمیچر جدا می نمایند و با اتصال به منبع ولتاژ DC با ولتاژ مناسب، پس ماند مغناطیسی قطبها «احیا» خواهد شد. مجدداً سرهای سیم پیچی تحریک را به سرهای سیم پیچی آرمیچر اتصال می دهند و ژنراتور را راه اندازی می کنند.

۲ - جهت جریان در سیم پیچی تحریک صحیح نمی باشد.

در این شرایط فورانی که در اثر عبور جریان از سیم پیچی تحریک ایجاد می شود با فوران ناشی از پس ماند مغناطیسی قطبها هم جهت نیست و پس ماند مغناطیسی قطبها را از بین می برد. برای رفع این مشکل، گردش رتور را متوقف می کنند. سرهای سیم پیچی تحریک را از سرهای سیم پیچی آرمیچر جدا می نمایند و پس ماند مغناطیسی قطب را احیا می کنند. سپس سرهای سیم تحریک را برعکس حالت قبل به سرهای سیم پیچی آرمیچر اتصال می دهند و ژنراتور را راه اندازی می کنند.

۳ - جهت گردش رتور صحیح نباشد.

معمولاً بر روی بدنه ماشین های جریان مستقیم جهت گردش رتور را مشخص می کنند. در صورتی که رتور خلاف جهت گرداننده شود پلاریته نیروی محرکه القایی در سیم پیچی آرمیچر معکوس می شود. در نتیجه جهت جریان سیم پیچی تحریک عوض می شود و پس ماند مغناطیسی قطب را از بین می برد در این صورت مطابق بند ۱ باید پس ماند مغناطیسی قطبها

برای راه اندازی ژنراتور شنت کلیدهای  $S_1$  و  $S_2$  شکل (۲۳ - ۳) را باز می گذارند و مقاومت تنظیم کننده جریان تحریک  $R_{adj}$  را در حداقل مقدار خود قرار می دهند. سپس رتور را با سرعت نامی به گردش در می آورند تا فوران ناشی از پس ماند مغناطیسی قطبها، نیروی محرکه القایی پس ماند در سیم پیچی آرمیچر القا کند و ولتاژی در پایانه های آرمیچر ایجاد نماید. در این لحظه با بستن کلید  $S_1$  مدار تحریک موازی با مدار آرمیچر می شود و ولتاژ آرمیچر جریان ضعیفی از سیم پیچی تحریک عبور می دهد. در نتیجه فوران قطبها افزایش می یابد و نیروی محرکه القایی بیشتری در سیم پیچی آرمیچر القا می کند. در این صورت ولتاژ پایانه های آرمیچر بیشتر می شود و جریان سیم پیچی تحریک زیادتر خواهد شد که منجر به افزایش دوباره نیروی محرکه القایی می شود. این عمل آنقدر ادامه می یابد تا قطبها اشباع شوند. در این لحظه ولتاژ پایانه های آرمیچر در حداکثر مقدار خود ثابت خواهد شد. ژنراتور راه اندازی شده است و برای تنظیم ولتاژ پایانه های ژنراتور  $V_T$  به مقدار نامی، مقاومت تنظیم کننده جریان تحریک  $R_{adj}$  را زیاد می کنند تا جریان تحریک کاهش یابد و ولتاژ پایانه های ژنراتور  $V_T$  در حد نامی ثابت شود.

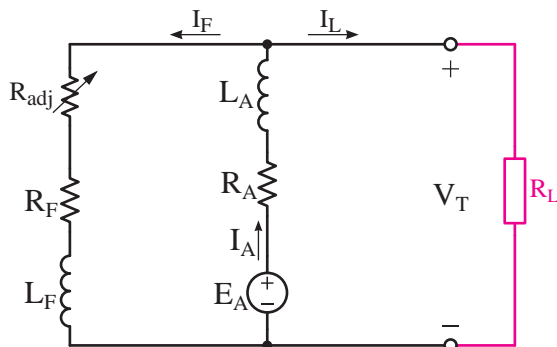
#### ۱ - ۱۴ - ۳ - شرایط راه اندازی

برخی مواقع پس از به گردش در آوردن رتور، ژنراتور شنت راه اندازی نمی شود و اصطلاحاً «ولتاژگیری» نمی نماید. عواملی که سبب عدم راه اندازی ژنراتور شنت خواهند شد عبارتند از:

۱ - عدم وجود پس ماند مغناطیسی در قطبهای

### ۱۵ - ۳ - مدار الکتریکی معادل ژنراتور شنت

محاسبه کمیت‌های الکتریکی ولتاژ، جریان و توان الکتریکی با استفاده از مدار معادل الکتریکی امکان‌پذیر است. در شکل (۲۴ - ۳) مدار الکتریکی معادل ژنراتور شنت نشان داده شده است.



شکل ۲۴ - ۳ مدار الکتریکی معادل ژنراتور تحریک موازی

مدار معادل الکتریکی نشان می‌دهد مدار سیم‌پیچ تحریک، موازی با مدار سیم‌پیچی آرمیچر ارتباط داده شده است.

مدار الکتریکی ژنراتور شنت با روش پتانسیل گره یا روش‌های دیگر می‌توان تحلیل کرد. 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 KCL برای گره مدار تحریک و آرمیچر معادله (۱۹ - ۳) به دست می‌آید.

$$-I_A + I_F + I_L = 0 \quad (3-19) \quad \text{KCL}$$

با به کار بردن قوانین اهم مقادیر جریان‌های  $I_A$  و  $I_F$  به دست خواهد آمد.

$$I_F = \frac{V_T}{R_F + R_{adj}} \quad (3-20)$$

را احیا نمود و پس رتور را در جهت صحیح به گردش درآورد و ژنراتور را راه‌اندازی کرد.

۴ - مقدار مقاومت تنظیم‌کننده جریان تحریک  $R_{adj}$  زیاد باشد.

در این شرایط جریان مدار تحریک کمتر از مقدار نامی خود می‌شود و ولتاژ ژنراتور در کمتر از ولتاژ نامی ثابت می‌شود. برای جلوگیری از بروز این مشکل به هنگام راه‌اندازی مقدار مقاومت تنظیم جریان تحریک  $R_{adj}$  را در حداقل مقدار خود یعنی صفر قرار می‌دهند. ۵ - سرعت گردش رتور کمتر از سرعت نامی باشد.

در این شرایط نیروی محرکه کمتری در سیم‌پیچی آرمیچر القا می‌شود و ولتاژ ژنراتور 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 - ۱۴ - ۳ - بهره‌برداری

پس از راه‌اندازی ژنراتور شنت با بستن کلید  $S_p$  شکل (۲۳ - ۳) بار به ژنراتور متصل خواهد شد و ژنراتور مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. 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  $V_T$  به مقدار نامی تثبیت شود. بدیهی است با قطع بار، ولتاژ پایانه‌های ژنراتور افزایش می‌یابد که به منظور کاهش آن، مقدار  $R_{adj}$  را زیاد می‌کنند تا در اثر کاهش جریان تحریک ولتاژ پایانه‌های ژنراتور  $V_T$  کاهش بیابد. این تنظیم‌ها در محدوده مقادیر نامی امکان‌پذیر است.

جریان مدار آرمیچر  $I_A$  از محل  $E_A$  بسوی  $V_T$  جاری است پس  $E_A > V_T$  و خواهیم داشت.

$$I_A = \frac{E_A - V_T}{R_A} \quad (3-21)$$

از رابطه  $P_{out} = V_T \cdot I_L$  جریان  $I_L$  به دست می آید.

$$I_L = \frac{P_{out}}{V_T} \quad (3-22)$$

تلفات تحریک از رابطه (۱۳ - ۳) و تلفات آرمیچر از رابطه (۱۴ - ۳) به دست می آید.

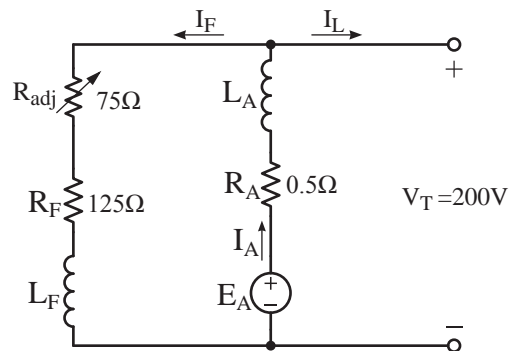
$$P_F = (R_F + R_{adj}) I_F^2$$

$$P_A = R_A I_A^2$$

مثال ۸ - ۳ - ژنراتور شنت  $5 \text{ kW}$ ،  $200 \text{ V}$  با مدار معادل الکتریکی مطابق شکل (۲۵ - ۳) در نظر است. مطلوب است:

الف - جریان آرمیچر  $I_A$

ب - نیروی محرکه القایی آرمیچر



شکل ۲۵ - ۳

حل:

- از رابطه (۲۰ - ۳) جریان مدار تحریک  $I_F$  به دست می آید.

$$I_F = \frac{V_T}{R_F + R_{adj}} = \frac{200}{125 + 75} = 1 \text{ [A]}$$

- و از رابطه (۲۲ - ۳) جریان بار  $I_L$  به دست خواهد آمد.

$$I_L = \frac{P_{out}}{V_T} = \frac{5 \times 10^3}{200} = 25 \text{ [A]}$$

- از رابطه (۱۹ - ۳) جریان آرمیچر  $I_A$  به دست می آید.

$$KCL) -I_A + I_F + I_L = 0$$

$$-I_A + 1 + 25 = 0$$

$$I_A = 26 \text{ [A]}$$

- از رابطه (۲۱ - ۳) نیروی محرکه القایی آرمیچر  $E_A$  به دست می آید.

$$I_A = \frac{E_A - V_T}{R_A}$$

$$26 = \frac{E_A - 200}{0.5}$$

$$26 \times 0.5 = E_A - 200$$

$$E_A = 200 + 26 \times 0.5 = 213 \text{ [V]}$$

$$KCL) -I_A + I_F + I_L = 0$$

$$-\frac{140 - V_T}{1} + \frac{V_T}{30} + 16 = 0$$

- مخرج مشترک می گیریم.

$$\frac{-4200 + 30V_T + V_T + 480}{30} = 0$$

$$31V_T - 3720 = 0$$

$$V_T = \frac{3720}{31} = 120 [V]$$

- اکنون با محاسبه  $V_T$  مقادیر جریان های  $I_F$  و  $I_A$  را از روابط  $(3 - 20)$  و  $(3 - 21)$  به دست می آید.

$$I_A = \frac{E_A - V_T}{R_A} = \frac{140 - 120}{1} = 20 [A]$$

$$I_F = \frac{V_T}{R_F + R_{adj}} = \frac{120}{30 + 0} = 4 [A]$$

- از رابطه  $(3 - 13)$  تلفات تحریک و از رابطه  $(3 - 14)$  تلفات آرمیچر به دست می آید.

$$P_F = (R_F + R_{adj})I_F^2 = (30 + 0) \times 4^2 = 480 [W]$$

$$P_A = R_A I_A^2 = 1 \times 20^2 = 400 [W]$$

### پرسش ۵ - ۳

#### پرسش های کامل کردنی

۱ - در ژنراتور شنت مدار تحریک با مدار آرمیچر به صورت ..... اتصال داده می شود و بین آنها ..... برقرار می باشد.

۲ - سیم پیچی تحریک بر روی ..... قرار داده

### مثال ۹ - ۳ - کمیت های الکتریکی ژنراتور شنت

به شرح زیر است:

$$E_A = 140 [V], R_A = 1 [\Omega], R_F = 30 [\Omega]$$

$$I_L = 16 [A], R_{adj} = 0 [\Omega]$$

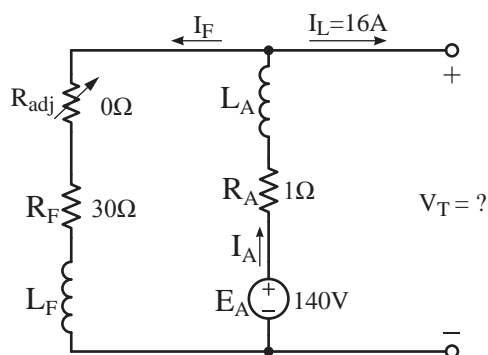
مطلوب است:

الف - ولتاژ ترمینال ژنراتور

ب - تلفات مسی آرمیچر و تحریک

حل:

- مدار معادل الکتریکی ژنراتور تحریک موازی را رسم می کنیم و کمیت های آن را می نویسیم.



- رابطه  $(3 - 20)$  را برای جریان تحریک می نویسیم.

$$I_F = \frac{V_T}{R_F + R_{adj}} = \frac{V_T}{30 + 0} = \frac{V_T}{30}$$

- رابطه  $(3 - 21)$  را برای جریان آرمیچر می نویسیم.

$$I_A = \frac{E_A - V_T}{R_A} = \frac{140 - V_T}{1}$$

- برای گره مدار تحریک و آرمیچر KCL می نویسیم. و مقادیر  $I_L$  و  $I_F$ ،  $I_A$  را جایگزین می کنیم.



شده است.

۳ - برای اندازه‌گیری جریان تحریک از .....  
و برای اندازه‌گیری ولتاژ پایانه‌های ماشین از .....  
استفاده می‌شود.

### پرسش‌های صحیح غلط

۱ - سیم‌پیچی تحریک شنت با تعداد دور کم برای  
جریان زیاد طراحی شده است.  
☐ صحیح ☐ غلط  
۲ - از مقاومت متغیر  $R_{adj}$  برای تنظیم جریان  
تحریک استفاده می‌شود.

☐ صحیح ☐ غلط

۳ - روش متداول اندازه‌گیری اثرات مغناطیسی  
استفاده از منحنی مشخصه‌های ژنراتور است.

☐ صحیح ☐ غلط

### پرسش‌های تشریحی

۱ - طرح ساختمانی ژنراتور شنت شکل (۲۳ - ۳)  
را توضیح دهید.

۲ - نحوه راه‌اندازی ژنراتور شنت را بنویسید.

۳ - برای راه‌اندازی ژنراتور شنت چه نکاتی باید  
رعایت شود؟

۴ - در صورتی که پس‌ماند مغناطیسی قطب‌های  
ژنراتور شنت از بین برود چه باید کرد؟

۵ - ژنراتور شنت به هنگام راه‌اندازی برعکس  
گردانده شده است. اکنون برای راه‌اندازی صحیح آن  
چه باید کرد؟

۶ - مدار الکتریکی معادل ژنراتور شنت را رسم کنید

و کمیت‌های الکتریکی آن را معرفی کنید.

۷ - چرا جهت جریان آرمیچر از سوی نیروی محرکه  
القایی  $E_A$  به سمت ترمینال‌های ژنراتور شنت است؟

### تمرین ۴ - ۳

۱ - ژنراتور شنت با جریان تحریک  $2A$  و آرمیچر  $A$   
۱۲ مفروض است. مقاومت مدار تحریک و تنظیم‌کننده  
جریان تحریک روی هم  $100\Omega$  می‌باشد. اگر مقاومت  
سیم‌پیچی آرمیچر  $0.5\Omega$  باشد مطلوب است:

الف - ولتاژ ترمینال‌های ژنراتور

ب - توان خروجی ژنراتور

پ - نیروی محرکه القایی آرمیچر

۲ - ژنراتور شنت  $4kW$ ،  $200V$  با راندمان  
 $80\%$  مفروض است. مقاومت مدار آرمیچر  $0.2\Omega$  و  
مدار تحریک  $200\Omega$  است. مطلوب است:

الف - نیروی محرکه القایی آرمیچر

ب - توان تبدیل شده

پ - تلفات ثابت

۳ - ژنراتور شنت توسط محرک با توان  $10$  اسب بخار  
گردانده می‌شود و ژنراتور ولتاژ  $500V$  و جریان  $12A$   
به بار می‌دهد، اگر مقاومت مدار تحریک  $R_F = 500\Omega$  و  
آرمیچر  $R_A = 0.2\Omega$  باشد. مطلوب است:

الف - بازده ژنراتور

ب - تلفات مسی

پ - تلفات ثابت

۴ - مقاومت مدار تحریک و آرمیچر یک ژنراتور  
شنت به ترتیب  $200\Omega$  و  $0.1\Omega$  می‌باشد. اگر تلفات  
سیم‌پیچ تحریک  $800W$  و تلفات سیم‌پیچ آرمیچر

$W$  ۱۰۰۰ باشد مطلوب است:

الف - جریان آرمیچر و بار

ب - نیروی محرکه القایی آرمیچر

پ - بازده ژنراتور در صورتی که تلفات

ثابت  $W$  ۱۵۰۰ باشد.

مطابق آنچه که در قسمت ۱۰ - ۳ توضیح داده شد آزمایش بی‌باری را انجام می‌دهند.

منحنی مشخصه بی‌باری ژنراتور شنت مشابه منحنی مشخصه بی‌باری ژنراتور تحریک مستقل است.

### ۱۷ - ۳ - منحنی مشخصه بارداری ژنراتور

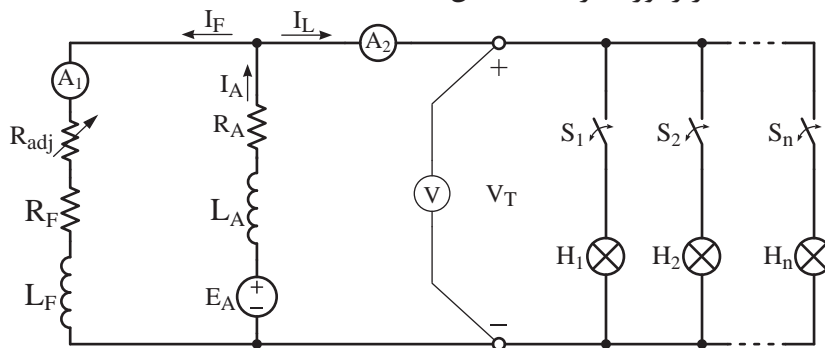
شنت

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 - ۳) اتصال می‌دهند.

### ۱۶ - ۳ - 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



شکل ۲۶ - ۳ مدار الکتریکی آزمایش بارداری ژنراتور شنت

می‌آید.

$$I_A = \frac{E_A - V_T}{R_A}$$

$$R_A I_A = E_A - V_T$$

$$V_T = E_A - R_A I_A \quad (۳-۲۳)$$

در آزمایش بارداری سرعت و جریان تحریک ثابت نگه داشته می‌شوند. لذا نیروی محرکه القایی  $E_A$

آمپر متر  $A_1$  جریان تحریک  $I_F$  و آمپر متر  $A_2$  جریان بار  $I_L$  و ولت متر  $V$  ولتاژ پایانه‌های ژنراتور  $V_T$  را نشان می‌دهند.

ولتاژ پایانه‌های ژنراتور  $V_T$  از رابطه (۲۱ - ۳) به‌دست

مقداری ثابت خواهد داشت. جریان آرمیچر  $I_A$  متاثر از جریان بار  $I_L$  است. پس با توجه به رابطه (۲۳ - ۳) ولتاژ پایانه‌های ژنراتور  $V_T$  تابعی از جریان بار  $I_L$  می‌باشد. در شکل (۲۶ - 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 - ۱۷ - ۳ - آزمایش بارداری

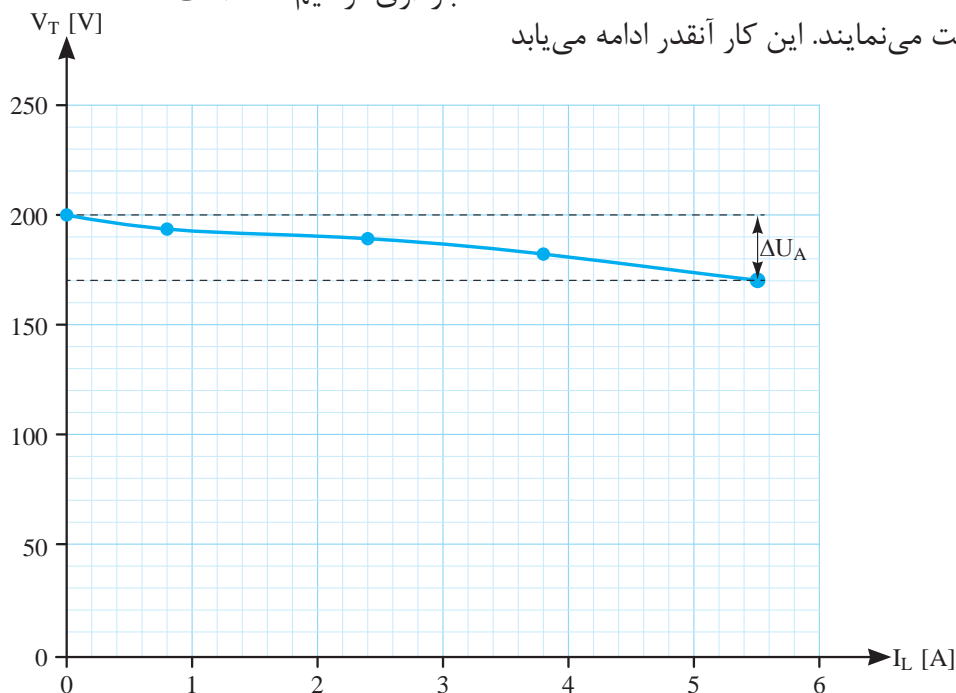
برای انجام آزمایش بارداری ابتدا رتور ژنراتور توسط محرک با سرعت ثابت گردانده می‌شود. سپس با کاهش مقاومت تنظیم‌کننده جریان تحریک  $R_{adj}$  جریان تحریک را افزایش می‌دهند تا ولتاژ پایانه‌های ژنراتور  $V_T$  به مقدار نامی برسد. اکنون کلیدهای  $S_1$  تا  $S_n$  شکل (۲۶ - ۳) را به ترتیب می‌بندند و با روشن 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 آمپر متر  $A_p$  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 به دست آید. جدول (۵ - ۳) نتیجه آزمایش بارداری ژنراتور شنت  $1\text{ kW}$ ،  $5/5\text{ A}$  و  $200\text{ V}$  را در سرعت  $1500\text{ RPM}$  نشان می‌دهد. این همان ماشینی است که بر روی آن آزمایش بی‌باری و باداری در بخش ۱۱ - ۳ انجام شده است.

$I_L [\text{A}]$	۰	۰/۸	۲/۴	۳/۸	۵/۵
$V_T [\text{V}]$	۲۰۰	۱۹۳/۵	۱۸۹	۱۸۲	۱۷۰

جدول ۵ - ۳ نتیجه آزمایش بارداری ژنراتور شنت

نقاط نشان‌دهنده‌ی مقدار هر ولتاژ به ازای جریان بار معین جدول (۵ - ۳) در شکل (۲۷ - ۳) نشان داده شده است. با اتصال نقاط به یکدیگر منحنی مشخصه بارداری ترسیم شده است.



شکل ۲۷ - ۳ منحنی مشخصه بارداری ژنراتور شنت

**فعالیت ۳-۳-** با استفاده از برنامه *Excel* نمودار مربوط به جدول (۵-۳) را رسم نمایید.

**مثال ۹-۴-** منحنی مشخصه بارداری شکل (۲۷-۳) مربوط به ژنراتور شنت با مقاومت اهمی سیم پیچی آرمیچر  $R_A = 1/25 \Omega$  است. به ازای جریان بار  $I_L = 5/5A$  درصد تنظیم ولتاژ  $V_R$  را به دست آورید.

حل:

با توجه به منحنی مشخصه بارداری به دست می آوریم:

$$I_L = 0 \Rightarrow V_T = E_A = 200 [V]$$

$$I_L = 5/5[A] \Rightarrow V_T = 170 [V]$$

با توجه به رابطه (۸-۳) درصد تنظیم ولتاژ به دست می آید.

$$\% V_R = \frac{E_A - V_T}{V_T} \times 100$$

$$\% V_R = \frac{200 - 170}{170} \times 100 = 17\%$$

### ۱۸-۳- کاربرد ژنراتور شنت

ژنراتور شنت بیش از ژنراتورهای تحریک مستقل کاربرد پیدا می کند زیرا به منبع ولتاژ مستقل برای تحریک احتیاج ندارد.

از طرفی سیم پیچی آرمیچر ژنراتورهای شنت، موظف به تامین جریان بار  $I_L$  و جریان تحریک  $I_F$  است. بنابراین سیم پیچی آرمیچر ژنراتور شنت تحت جریان بیشتری نسبت به ژنراتور تحریک مستقل قرار می گیرد. به همین دلیل افت ولتاژ ناشی از مقاومت

اهمی سیم پیچی آرمیچر  $R_A I_A$  و اثرات مغناطیسی آرمیچر  $\mathcal{E}$  بیش تر خواهد شد. این موضوع از مقایسه مثال های (۷-۴) و (۹-۴) کاملاً مشهود است. ژنراتورهای شنت در شارژ باتری ها و تغذیه تحریک ژنراتورهای نیروگاه ها کاربرد دارند.

### پرسش ۶-۳

- ۱- نحوه انجام آزمایش بارداری ژنراتور شنت را شرح دهید.
- ۲- هدف از انجام آزمایش بارداری را بنویسید.
- ۳- بین ژنراتورهای شنت با ژنراتورهای تحریک مستقل از دیدگاه کاربرد، مقایسه ای انجام دهید.
- ۴- کاربرد ژنراتور شنت را بنویسید.

### تمرین ۵-۳

- ۱- نتایج آزمایش بی باری و بارداری ژنراتور شنت  $400V$ ،  $40kW$  با مقاومت اهمی سیم پیچ آرمیچر  $R_A = 0/3 \Omega$  و سیم پیچ تحریک  $R_F = 300 \Omega$  به شرح زیر است:

$I_F [A]$	0/2	0/4	0/6	0/8	1	1/2	1/4	1/5
$E_A [V]$	147	278	374	425	457	485	512	523

$I_L [A]$	0	20	30	50	70	80	100
$V_T [V]$	450	440	433	416	393	379	346

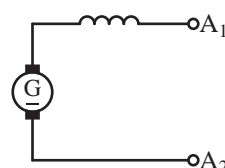
مطلوب است:

- الف- جریان سیم پیچ تحریک و آرمیچر در بار نامی
- ب- افت ولتاژ ناشی از اثرات مغناطیسی در بار نامی

## ۱۹-۳- ژنراتورهای جریان مستقیم با تحریک

### سری

ژنراتور جریان مستقیم با تحریک سری را به اختصار «ژنراتور سری<sup>۱</sup>» گویند. در ژنراتور سری مدار تحریک با مدار آرمیچر به صورت سری اتصال داده می‌شود و بین آنها ارتباط الکتریکی برقرار می‌باشد. نقشه اختصاری ژنراتور سری در شکل (۲۸-۳) نشان داده شده است.



شکل ۲۸-۳ نقشه اختصاری ژنراتور سری

طرح ساختمانی ژنراتور سری در شکل (۲۹-۳) 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 آمپر متر  $A$  و ولتاژ پایانه‌های ماشین  $V_T$  توسط ولت متر  $V$  اندازه‌گیری می‌شود.



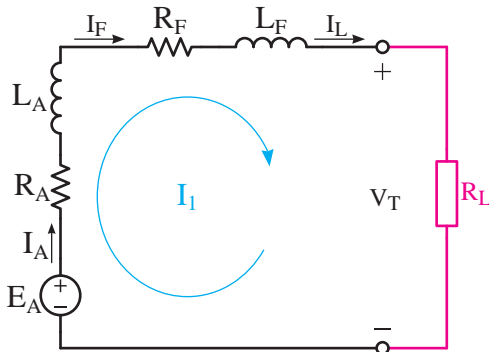
شکل ۲۹-۳ طرح ساختمانی ژنراتور سری

## ۲۰-۳- راه‌اندازی ژنراتور سری

برای راه‌اندازی ژنراتور سری کلید  $S$  شکل (۲۹-۳) را باز می‌گذارند. سپس رتور را با سرعت نامی به گردش درمی‌آورند تا فوران ناشی از پس‌ماند مغناطیسی قطب‌ها، نیروی محرکه القایی پس‌ماند  $E_0$  در سیم‌پیچی آرمیچر القا کند. در این لحظه ولتاژ پایانه‌های ژنراتور به حداقل مقدار خود که برابر نیروی محرکه القایی پسماند  $E_0$  است می‌رسد. در این حال ژنراتور راه‌اندازی شده است و آماده برای اتصال به بار است.

### ۲۱ - ۳ - مدار الکتریکی معادل ژنراتور سری

محاسبه کمیت‌های الکتریکی ولتاژ، جریان و توان با استفاده از مدار معادل الکتریکی امکان‌پذیر است. در شکل (۳ - ۳۰) مدار الکتریکی معادل ژنراتور سری نشان داده شده است.



شکل ۳۰ - 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 (۳ - ۲۳) به‌دست می‌آید.

$$-E_A + R_A I_L + R_F I_L + V_T = 0 \quad (3-24) \text{ (KVL)}$$

جریان حلقه  $I_1$  از محل جریان‌های  $I_A$ ،  $I_F$  و  $I_L$  می‌گذرد و رابطه (۳ - ۲۵) به‌دست می‌آید.

پس از راه‌اندازی ژنراتور تحریک سری با بستن کلید S شکل (۳ - ۲۹) بار به پایانه‌های ژنراتور متصل خواهد شد و مدار سری شامل بار، سیم‌پیچی تحریک و سیم‌پیچی آرمیچر ایجاد می‌شود. نیروی محرکه القایی پسماند  $E_0$  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 - ۲۰ - ۳ - 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 - پسماند مغناطیسی در قطب‌ها وجود ندارد.
  - ۲ - جهت جریان سیم‌پیچی تحریک صحیح نیست.
  - ۳ - جهت گردش رتور صحیح نیست.
  - ۴ - سرعت گردش رتور کمتر از سرعت نامی است.
- برای رفع اشکال ناشی از عوامل بالا مطابق آنچه که در بخش ۱ - ۱۴ - ۳ توضیح داده شد اقدام می‌شود.

- KVL را طبق رابطه (۲۴ - ۳) برای جریان حلقه

$I_1$  می‌نویسیم:

$$\text{KVL)} -E_A + R_A I_1 + R_F I_1 + V_T = 0$$

$$-E_A + 0/2(5) + 0/3(5) + 200 = 0$$

$$-E_A + 1 + 1/5 + 200 = 0$$

$$E_A = 202/5 \text{ [V]}$$

**مثال ۱۱ - ۳ -** ژنراتور جریان مستقیم تحریک سری

با نیروی محرکه القایی آرمیچر  $V = 50$  و ولتاژ ترمینال  $V = 40$  مفروض است. مقاومت مدار تحریک و آرمیچر روی هم  $0.8 \Omega$  است. مطلوب است:

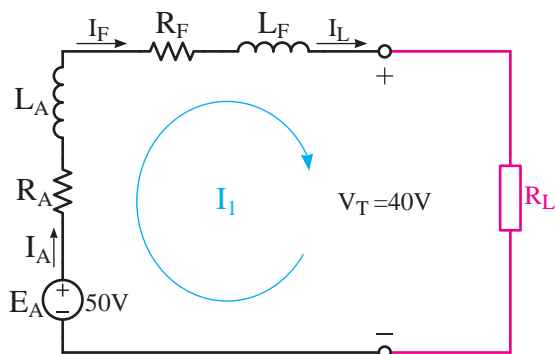
الف - توان خروجی

ب - بازده در صورتی که تلفات ثابت  $W = 75$  باشد.

حل:

- ابتدا مدار معادل الکتریکی ژنراتور تحریک سری را

رسم می‌کنیم و کمیت‌های الکتریکی آن را می‌نویسیم و جریان حلقه  $I_1$  را نشان می‌دهیم.



- KVL را طبق رابطه (۲۴ - ۳) برای جریان حلقه

$I_1$  می‌نویسیم:

$$\text{KVL)} -E_A + R_A I_1 + R_F I_1 + V_T = 0$$

$$I_A = I_F = I_L = I_1 \quad (3-25)$$

با توجه به رابطه (۲۵ - ۳) جریان  $I_L$  را جایگزین  $I_1$  در رابطه (۲۴ - ۳) می‌شود.

$$-E_A + R_A I_L + R_F I_L + V_T = 0$$

از  $I_L$  فاکتور گرفته می‌شود و رابطه (۲۶ - ۳) به دست

می‌آید.

$$-E_A + (R_A + R_F) I_L + V_T = 0$$

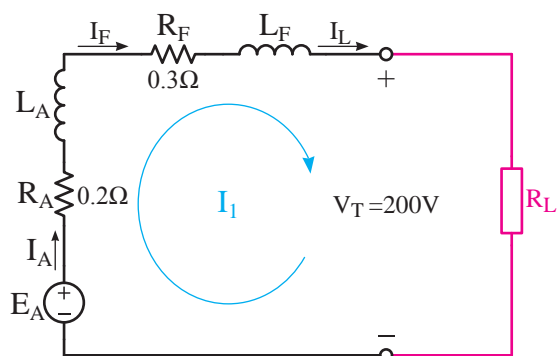
$$V_T = E_A - (R_A + R_F) I_L \quad (3-26)$$

**مثال ۱۰ - ۳ -** ژنراتور جریان مستقیم تحریک

سری  $1 \text{ kW}$ ،  $V = 200$  با مدار معادل الکتریکی مطابق شکل (۳۱ - ۳) در نظر است. مطلوب است:

الف - جریان بار

ب - نیروی محرکه القایی آرمیچر



شکل ۳۱ - ۳

- از رابطه (۲۲ - ۳) جریان بار به دست می‌آید.

$$I_L = \frac{P_{out}}{V_T} = \frac{1 \times 10^3}{200} = 5 \text{ [A]}$$

- از رابطه (۲۵ - ۳) خواهیم داشت:

$$I_A = I_F = I_L = I_1 = 5 \text{ [A]}$$



- در ژنراتور تحریک سری طبق رابطه (۲۶ - ۳)،  
 $I_A = I_F$  است. با جایگزینی  $I_A$  به جای  $I_F$  خواهیم داشت:

$$P_A + P_F = R_A I_A^2 + R_F I_F^2$$

$$P_A + P_F = (R_A + R_F) I_A^2$$

$$P_A + P_F = (0.8)(12/5)^2 = 125 \text{ [W]}$$

- تلفات کل از رابطه (۳ - ۳) به دست می آید.

$$\Delta P = P_{\text{mec}} + P_{\text{core}} + P_a + P_F$$

$$\Delta P = 75 + 125 = 200 \text{ [W]}$$

- توان ورودی از رابطه (۴ - ۳) به دست می آید.

$$\Delta P = P_{\text{in}} - P_{\text{out}}$$

$$P_{\text{in}} = P_{\text{out}} + \Delta P$$

$$P_{\text{in}} = 500 + 200 = 700 \text{ [W]}$$

- بازده از رابطه (۵ - ۳) به دست می آید.

$$\% \eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100$$

$$\% \eta = \frac{500}{700} \times 100 = 71\%$$

### پرسش ۷ - ۳

۱- طرح ساختمانی ژنراتور تحریک سری شکل (۲۹ - ۳) را توضیح دهید.

۲- نحوه راه اندازی ژنراتور تحریک سری را بنویسید.

۳- چه نکاتی را هنگام راه اندازی ژنراتور تحریک

- مقادیر  $R_A$  و  $R_F$  به صورت  $0.8$  داده شده است. بنابراین از جریان  $I_A$  در رابطه (۲۴ - ۳) فاکتور می گیریم.

$$KVL) -E_A + (R_A + R_F)I_A + V_T = 0$$

- مقادیر را جایگزین و مقدار جریان حلقه  $I_A$  را به دست می آوریم.

$$-50 + (0.8)I_A + 40 = 0$$

$$0.8I_A = 10$$

$$I_A = 12.5 \text{ [A]}$$

- جریان حلقه  $I_A$  از محل جریان های  $I_A$ ،  $I_F$  و  $I_L$  می گذرد و طبق رابطه (۲۵ - ۳) داریم:

$$I_A = I_F = I_L = I_A = 12.5 \text{ [A]}$$

- توان خروجی از رابطه (۲ - ۳) به دست می آید.

$$P_{\text{out}} = V_T \cdot I_L$$

$$P_{\text{out}} = 40 \times 12.5 = 500 \text{ [W]}$$

- تلفات تحریک از رابطه (۲۶ - ۳) و تلفات آرمیچر از رابطه (۱۴ - ۳) به دست می آید.

$$P_F = R_F I_F^2$$

$$P_A = R_A I_A^2$$

- تلفات مسی از حاصل جمع تلفات تحریک و آرمیچر به دست می آید.

$$P_A + P_F = R_A I_A^2 + R_F I_F^2$$

سری باید رعایت کرد؟

۴ - چرا به هنگام راه‌اندازی ژنراتورهای تحریک سری، قطب‌ها باید پسماند مغناطیسی داشته باشند؟

۵ - مدار معادل الکتریکی ژنراتور تحریک سری را رسم کنید و کمیت‌های الکتریکی آن را معرفی کنید.

۶ - در ژنراتور تحریک سری چرا ولتاژ پایانه‌ها  $V_T$  کوچک‌تر از نیروی محرکه القایی آرمیچر  $E_A$  است؟

### تمرین ۶-۳

۱ - یک ژنراتور جریان مستقیم تحریک سری  $10\text{ kW}$  که جریان تحریک آن  $10\text{ A}$  است دارای تلفات مکانیکی  $650\text{ W}$  و تلفات آهنی  $50\text{ W}$  و مقاومت سیم‌پیچی آرمیچر  $3\Omega$  و سیم‌پیچی تحریک سری  $3/5\Omega$  می‌باشد. مطلوب است:

الف - تلفات کل

ب - توان ورودی ژنراتور

پ - توان الکترومغناطیسی

ت - نیروی محرکه القایی آرمیچر

۲ - یک ژنراتور تحریک سری  $200\text{ V}$ ،  $12\text{ kW}$  با بازده  $80\%$  دارای مقاومت آرمیچر  $0/2\Omega$  و تحریک  $0/3\Omega$  می‌باشد. مطلوب است:

الف - تلفات مسی ژنراتور

ب - تلفات ثابت ژنراتور

۳ - یک ژنراتور سری  $200\text{ V}$ ،  $150\text{ A}$  دارای ۶ قطب می‌باشد. سیم‌پیچی آرمیچر دارای  $600$  هادی و به صورت حلقوی ساده سیم‌بندی شده است. اگر مقاومت آرمیچر و تحریک به ترتیب  $0/2\Omega$  و  $0/4\Omega$  باشد مطلوب است:

الف - نیروی محرکه القایی آرمیچر

ب - سرعت ژنراتور در صورتی که فوران هر قطب  $21\text{ mwb}$  باشد.

### ۲۲ - ۳ - منحنی مشخصه بی‌باری ژنراتور

سری

برای انجام آزمایش بی‌باری ژنراتور سری ابتدا مدار سیم‌پیچی تحریک را از مدار سیم‌پیچی آرمیچر جدا می‌کنند؛ سپس همانند یک ژنراتور تحریک مستقل مطابق آنچه در قسمت ۱۰ - ۳ توضیح داده شد آزمایش بی‌باری را انجام می‌دهند.

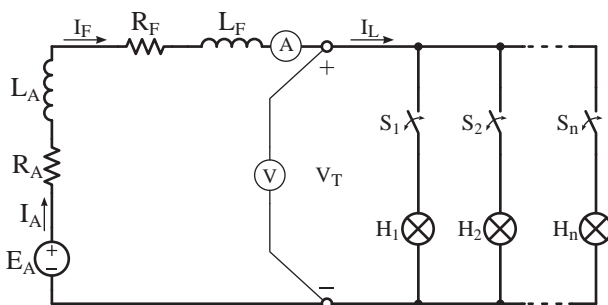
منحنی مشخصه بی‌باری ژنراتور سری مشابه منحنی مشخصه بی‌باری ژنراتور تحریک مستقل است.

### ۲۳ - ۳ - منحنی مشخصه بارداری ژنراتور

تحریک سری

منحنی مشخصه بارداری ژنراتور تحریک سری از آزمایش بارداری به دست می‌آید و هدف تعیین تأثیر جریان بار  $I_L$  بر ولتاژ پایانه‌های ژنراتور  $V_T$  در سرعت  $n$  ثابت است.

برای انجام آزمایش بارداری، ژنراتور تحریک سری را مطابق مدار الکتریکی شکل (۳۲ - ۳) اتصال می‌دهند.



شکل ۳۲ - ۳ مدار الکتریکی آزمایش بارداری ژنراتور تحریک سری

آمپر متر A جریان مدار سری شامل سیم پیچی آرمیچر، تحریک و بار و ولت متر V ولتاژ پایانه های ژنراتور  $V_T$  را نشان می دهند. از لامپ های  $H_1$  تا  $H_n$  به عنوان بار و از کلیدهای  $S_1$  تا  $S_n$  برای اتصال آنها به پایانه های ژنراتور استفاده شده است.

### ۱ - ۲۳ - ۳ - آزمایش بارداری

برای انجام آزمایش بارداری پس از برقراری شرایط راه اندازی، رتور ژنراتور توسط محرک با سرعت ثابت گردانده می شود. سپس کلیدهای  $S_1$  تا  $S_n$  شکل (۳۲ - ۳) را به ترتیب می بندند و با روشن کردن لامپ های  $H_1$  تا  $H_n$  جریان بار  $I_L$  را طی چند مرحله

افزایش می دهند و در هر مرحله مقادیر ولتاژ پایانه های ژنراتور  $V_T$  که توسط ولت متر V و جریان بار  $I_L$  که توسط آمپر متر A اندازه گیری می شوند را در جدولی یادداشت می کنند. این کار آن قدر ادامه می یابد 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 می کنند؛ این نقاط را به یکدیگر وصل می کنند تا «منحنی مشخصه بارداری» ژنراتور سری به دست آید.

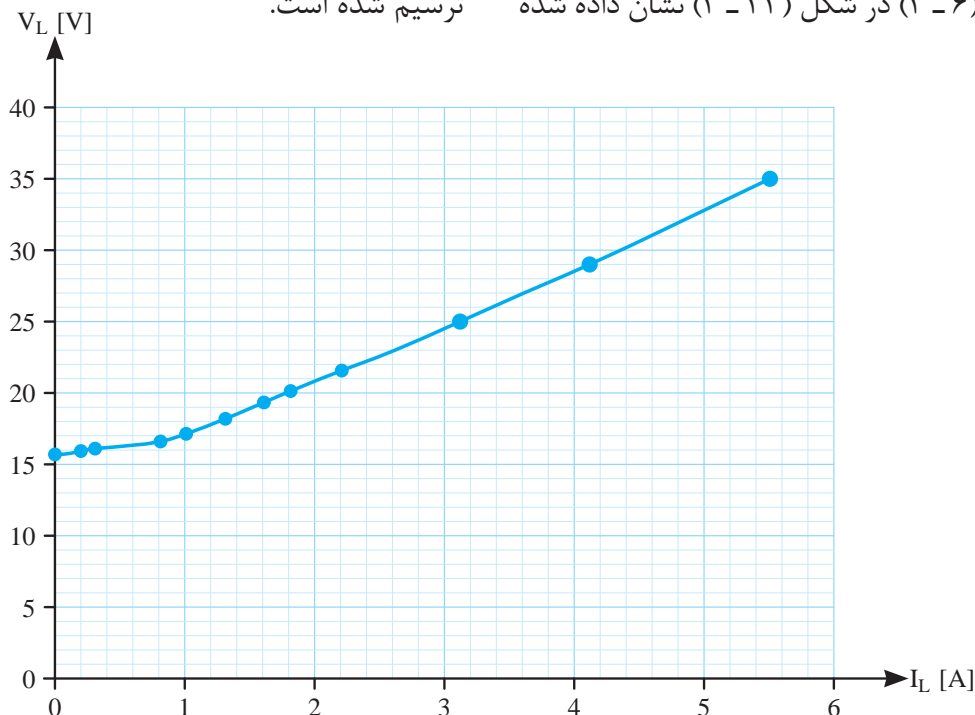
جدول (۳ - ۶) نتیجه آزمایش بارداری ژنراتور سری ۱۹۵ W ، ۵/۵ A و ۳۵ V را در سرعت ۱۵۰۰ RPM نشان می دهد.

$I_L [A]$	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 ۳ - ۶ نتیجه آزمایش بارداری ژنراتور سری

نقاط نشان دهنده مقدار هر ولتاژ به ازای جریان بار معین جدول (۳ - ۶) در شکل (۳۳ - ۳) نشان داده شده ترسیم شده است.

نقاط نشان دهنده مقدار هر ولتاژ به ازای جریان بار معین جدول (۳ - ۶) در شکل (۳۳ - ۳) نشان داده شده ترسیم شده است.



شکل ۳۳ - ۳ منحنی مشخصه بارداری ژنراتور تحریک سری

آرمیچر  $R_A = 1/25 \Omega$  و مقاومت سیم‌پیچی تحریک  $R_F = 0/3 \Omega$  باشد، مطلوب است:

الف - افت ولتاژ ناشی از اثرات مغناطیسی آرمیچر در بارنامی

ب - درصد تنظیم ولتاژ در بارنامی

$I_F [A]$	0	0/3	0/8	1/4	2/3	3/1	4	4/8	5/5
$E_A [V]$	15/6	17/5	19/9	22/5	26/7	31	36/7	41/1	46/6

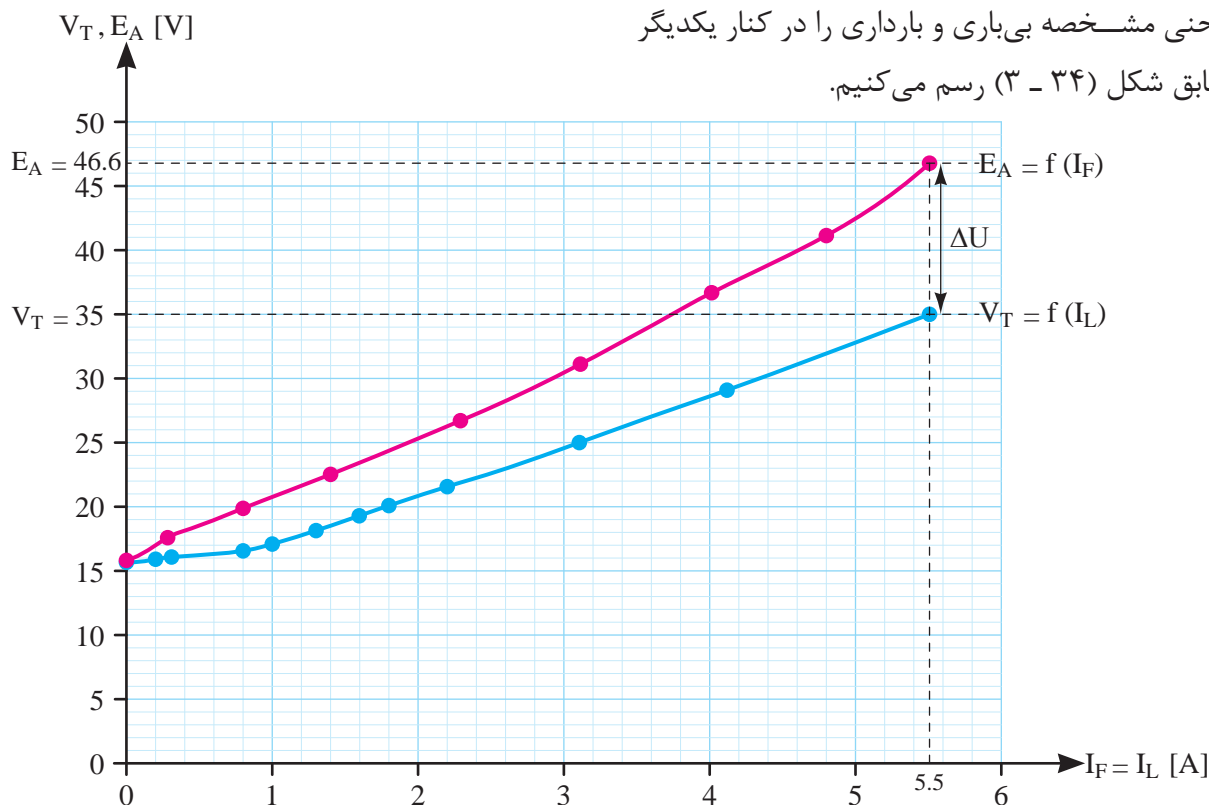
جدول ۳ - ۷ نتیجه آزمایش بی‌باری ژنراتور سری

فعالیت ۳ - ۴ - با استفاده از برنامه *Excel* نمودار مربوط به جدول (۳ - ۶) را رسم نمایید.

مثال ۱۲ - ۳ - جدول (۳ - ۷) نتایج آزمایش بی‌باری ژنراتور سری  $195 W$ ،  $5/5 A$  و  $35 V$  را در سرعت  $1500 \text{ RPM}$  نشان می‌دهد. اگر مقاومت سیم‌پیچی

حل:

با توجه به نتایج جدول (۳ - ۷) و جدول (۳ - ۶) منحنی مشخصه بی‌باری و بارداری را در کنار یکدیگر مطابق شکل (۳ - ۳۴) رسم می‌کنیم.



شکل ۳ - ۳۴

مشخصه بی‌باری و مقدار ولتاژ پایانه‌های ژنراتور  $V_T$  به دست می‌آید.

$$E_A = 46/6 [V]$$

$$V_T = 35 [V]$$

- اختلاف میان منحنی مشخصه بی‌باری و بارداری ژنراتور تحریک سری نشان‌دهنده افت ولتاژ آرمیچر  $\Delta U_A$  است. به ازای جریان نامی ژنراتور  $I_L = 5/5 A$  مقدار نیروی محرکه القایی آرمیچر  $E_A$  از منحنی

## پرسش ۸ - ۳

- ۱ - نحوه انجام آزمایش بارداری ژنراتور تحریک سری را با رسم شکل شرح دهید.
- ۲ - هدف از انجام آزمایش بارداری را بنویسید.
- ۳ - آیا استفاده از ژنراتور تحریک سری برای مصارف روشنایی مناسب است؟ چرا؟
- ۴ - آیا برای ژنراتور سری کاربردی وجود دارد؟ چرا؟
- ۵ - با توجه به منحنی مشخصه بارداری ژنراتورهای تحریک موازی و تحریک سری بین آنها مقایسه‌ای انجام دهید.

## تمرین ۷ - ۳

- ۱ - نتایج آزمایش بی‌باری و بارداری ژنراتور تحریک سری  $V = 60$ ،  $A = 120$  با مقاومت اهمی سیم‌پیچی آرمیچر  $0.07\Omega$  و سیم‌پیچی تحریک  $0.05\Omega$  به شرح زیر است:

$I_F = I_L [A]$	0	20	40	60	80	100	120
$E_A [V]$	4	12	27	50	70	80	79
$V_T [V]$	4	10	20	38	55	60	59

- الف - رسم منحنی مشخصه بی‌باری و بارداری
- ب - افت ولتاژ ناشی از اثرات مغناطیسی در بار نامی

- از رابطه (۱۸ - ۳) افت ولتاژ آرمیچر به دست می‌آید.

$$\Delta U_A = E_A - V_T$$

$$\Delta U_A = 46/6 - 35 = 11/6 [V]$$

- در ژنراتورهای تحریک سری افت ولتاژ آرمیچر شامل افت ولتاژ ناشی از مقاومت اهمی سیم‌پیچی آرمیچر  $R_A I_L$  و افت ولتاژ ناشی از مقاومت اهمی سیم‌پیچی تحریک  $R_F I_L$  و افت ولتاژ ناشی از اثرات مغناطیسی آرمیچر  $\mathcal{E}$  می‌باشد (رابطه ۲۷ - ۳).

$$\Delta U_A = R_A I_L + R_F I_L + \mathcal{E} \quad (3-27)$$

$$\Delta U_A = (R_A + R_F) I_L + \mathcal{E}$$

$$11/6 = (1/25 + 0/3) \times 5/5 + \mathcal{E}$$

$$11/6 = 8/525 + \mathcal{E}$$

$$\mathcal{E} = 3/075 [V]$$

- درصد تنظیم ولتاژ از رابطه (۸ - ۳) به دست می‌آید.

$$\% V_R = \frac{E_A - V_T}{V_T} \times 100$$

$$\% V_R = \frac{46/6 - 35}{35} \times 100 = \% 33$$

## ۲۴ - ۳ - کاربرد ژنراتور سری

منحنی مشخصه بارداری ژنراتور سری عدم پایداری ولتاژ پایانه‌های آن را به ازای تغییر بار به خوبی نشان می‌دهد. پرواضح است چنین ژنراتوری منبع ولتاژ ثابت خوبی نیست و از درصد تنظیم ولتاژ بالایی برخوردار است. لذا برای ژنراتور تحریک سری به دلیل عدم پایداری ولتاژ، کاربردی تعریف نشده است.

## ۲۵-۳- ژنراتورهای جریان مستقیم با تحریک

### کمپوند

ژنراتور جریان مستقیم با تحریک کمپوند را به اختصار «ژنراتور کمپوند»<sup>۱</sup> گویند. طرح ساختمانی ژنراتور کمپوند در شکل (۳-۳۵) نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۵ طرح ساختمانی ژنراتور کمپوند

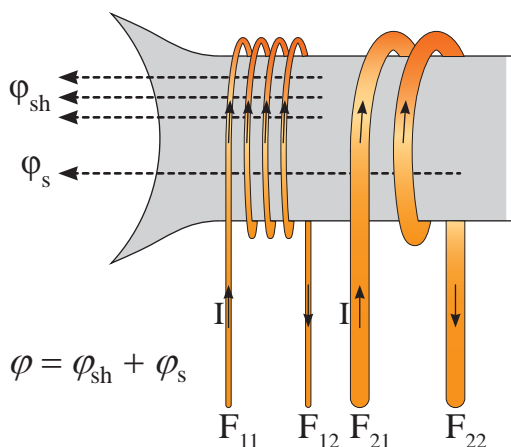
استاتور دارای قطب‌های برجسته می‌باشد. بر روی قطب‌ها دو سیم‌پیچی تحریک قرار داده شده است. فوران قطب‌ها از ترکیب فوران هر دو سیم‌پیچی تحریک به‌دست خواهد آمد.

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- ۲۵-۳- 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  $\phi_s$  به فوران ناشی از سیم‌پیچی تحریک شنت  $\phi_{sh}$  اضافه شود در این صورت ژنراتور را «کمپوند اضافی» گویند (شکل ۳-۳۶).

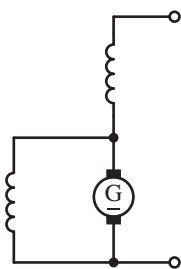


شکل ۳-۳۶ قطب ژنراتور کمپوند اضافی

### ۲- ۲۵-۳- 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  $\phi_s$  از فوران ناشی از سیم‌پیچی تحریک شنت  $\phi_{sh}$  کم شود، در این صورت ژنراتور را «کمپوند نقصانی» گویند (شکل ۳-۳۷).

شنت کوتاه با توجه به جهت فوران‌های تحریک شنت و کوتاه می‌تواند از نوع «اضافی» یا «نقصانی» باشد.

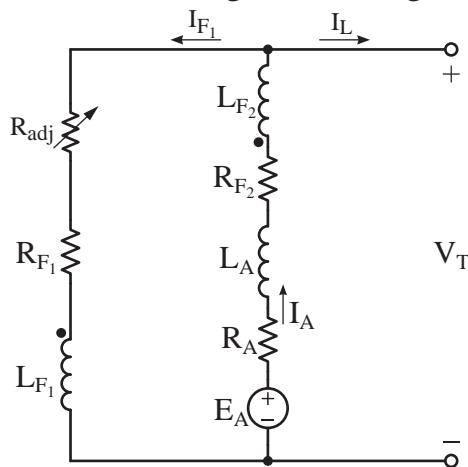


شکل ۳-۳۹ نقشه اختصاری ژنراتور کمپوند با شنت کوتاه

## ۳-۲۶- مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند

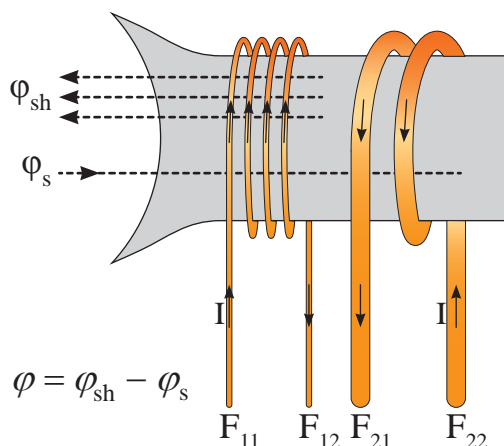
### اضافی با شنت بلند

مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند اضافی با شنت بلند در شکل (۳-۴۰) نشان داده شده است.



شکل ۳-۴۰ مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند اضافی با شنت بلند

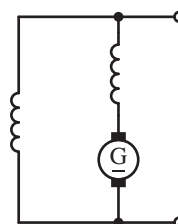
سر سیم‌پیچی‌های تحریک سری و شنت با «نقطه» مشخص شده است. «طبق قرارداد جریانی که از سر سیم‌پیچی تحریک وارد شود فوران مغناطیسی مثبت ایجاد می‌کند.» جریان مدارهای تحریک سری و شنت از سرهای نقطه‌دار وارد می‌شوند. بنابراین فوران آنها مثبت و با یکدیگر هم جهت هستند و با هم جمع می‌شوند. پس ژنراتور کمپوند اضافی است.



شکل ۳-۳۷ قطب ژنراتور کمپوند نقصانی

## ۳-۲۵- ژنراتور کمپوند با شنت بلند

اگر سیم‌پیچی آرمیچر ابتدا با سیم‌پیچی تحریک سری و سپس به سیم‌پیچی تحریک شنت مطابق نقشه اختصاری شکل (۳-۳۸) ارتباط داده شود، ژنراتور را «کمپوند با شنت بلند» می‌نامند.



شکل ۳-۳۸ 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.

## ۳-۲۵- ژنراتور کمپوند با شنت کوتاه

اگر سیم‌پیچی آرمیچر ابتدا با سیم‌پیچی تحریک شنت و سپس به سیم‌پیچی تحریک سری مطابق نقشه اختصاری شکل (۳-۳۹) ارتباط داده شود ژنراتور را «کمپوند با شنت کوتاه» می‌نامند. ژنراتور کمپوند با



مدار معادل الکتریکی ژنراتور کمپوند با شنت بلند  
با روش پتانسیل گره یا روش‌های دیگر و صرف‌نظر از  
اثرات مغناطیسی تحلیل می‌شود.

- با نوشتن KCL برای گره مدار تحریک و آرمیچر  
معادله (۳ - ۱۹) به‌دست می‌آید:

$$KCL) \quad -I_A + I_{F_1} + I_L = 0$$

- با به‌کار بردن قوانین اهم مقادیر جریان‌های  $I_{F_1}$  و  $I_A$  طبق روابط (۳ - ۲۰) و (۳ - ۲۱) به‌دست خواهد  
آمد:

$$I_{F_1} = \frac{V_T}{R_{F_1} + R_{adj}}$$

$$I_A = \frac{E_A - V_T}{R_A + R_{F_r}}$$

- از رابطه (۳ - ۲۲) جریان  $I_L$  به‌دست می‌آید.

$$I_L = \frac{P_{out}}{V_T}$$

- تلفات تحریک موازی از رابطه (۳ - ۱۳) و تلفات  
آرمیچر از رابطه (۳ - ۱۴) به‌دست می‌آید.

$$P_{F_1} = (R_{F_1} + R_{adj}) I_{F_1}^2$$

$$P_A = R_A I_A^2$$

- تلفات تحریک سری از رابطه (۳ - ۲۶) به‌دست  
می‌آید.

$$P_{F_r} = R_{F_r} I_A^2$$

مثال ۱۳ - ۳ - ژنراتور کمپوند اضافی با شنت بلند  
 $R_{F_1} + R_{adj} = 400 \Omega$  با مشخصات  $10 A$ ،  $200 V$   
,  $R_{F_r} = 0.3 [\Omega]$  و  $R_A = 0.2 [\Omega]$  مطابق شکل  
(۳ - ۴۱) مفروض است. مطلوب است محاسبه نیروی  
محركه القایی آرمیچر.

حل:

- از رابطه (۳ - ۲۰) جریان تحریک موازی به‌دست  
می‌آید.

$$I_{F_1} = \frac{V_T}{R_{F_1} + R_{adj}} = \frac{200}{400} = 0.5 [A]$$

- از رابطه (۳ - ۱۹) جریان آرمیچر به‌دست می‌آید.

$$KCL) \quad -I_A + I_{F_1} + I_L = 0$$

$$-I_A + 10 + 0.5 = 0$$

$$I_A = 10.5 [A]$$

- از رابطه (۳ - ۲۱) نیروی محركه القایی آرمیچر  
 $E_A$  به‌دست می‌آید.

$$I_A = \frac{E_A - V_T}{R_A + R_{F_r}}$$

$$10.5 = \frac{E_A - 200}{0.2 + 0.3}$$

$$10.5(0.2 + 0.3) = E_A - 200$$

$$E_A = 200 + 10.5(0.2 + 0.3) = 205.25 [A]$$

**مثال ۱۴-۳** - ژنراتور کمپوند اضافی با شنت بلند، ۴ kW، ۱۰۰ V و بازده ۸۰٪ مفروض است. اگر  $R_A = ۰/۰۷ \Omega$  و  $R_F = ۰/۰۳ \Omega$ ،  $R_{F_1} + R_{adj} = ۵۰ \Omega$  باشد، مطلوب است:

الف - تلفات تحریک سری و شنت و تلفات آرمیچر  
ب - تلفات مکانیکی و هسته روی هم

حل:

- از رابطه (۳-۲۲) جریان بار  $I_L$  به دست می آید.

$$I_L = \frac{P_{out}}{V_T} = \frac{۴ \times ۱۰^۳}{۱۰۰} = ۴۰ [A]$$

- از رابطه (۳-۲۰) جریان تحریک موازی به دست می آید.

$$I_F = \frac{V_T}{R_{F_1} + R_{adj}} = \frac{۱۰۰}{۵۰} = ۲ [A]$$

- از رابطه (۳-۱۹) جریان آرمیچر به دست می آید.

$$KCL) -I_A + I_{F_1} + I_L = 0$$

$$-I_A + ۲ + ۴۰ = 0$$

$$I_A = ۴۲ [A]$$

- از رابطه (۳-۱۳) تلفات تحریک شنت و از رابطه (۳-۲۶) تلفات تحریک سری به دست می آید.

$$P_{F_1} = (R_{F_1} + R_{adj}) I_{F_1}^2 = (۵۰) \times ۲^2 = ۲۰۰ [W]$$

$$P_{F_2} = R_{F_2} I_A^2 = ۰/۰۳ \times ۴۲^2 = ۵۲/۹۲ [W]$$

- از رابطه (۳-۱۴) تلفات آرمیچر به دست می آید.

$$P_A = R_A I_A^2 = ۰/۰۷ \times ۴۲^2 = ۱۲۳/۴۸ [W]$$

- از رابطه (۳-۵) توان ورودی  $P_{in}$  به دست می آید.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{۴}{۰/۸} = ۵ [kW]$$

- از رابطه (۳-۴) تلفات کل به دست می آید.

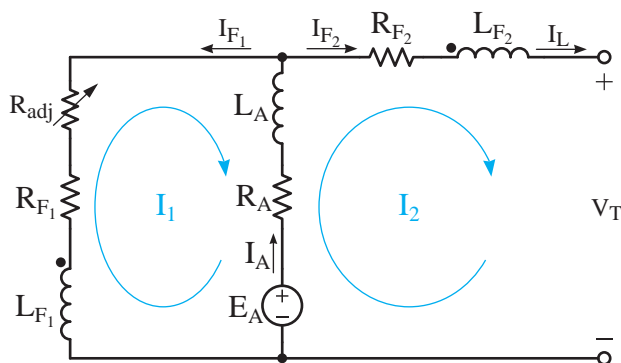
$$\Delta P = P_{in} - P_{out} = ۵ - ۴ = ۱ [kW] \text{ یا } ۱۰۰۰ [W]$$

- از رابطه (۳-۳) تلفات هسته و مکانیکی به دست می آید.

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_{mis} + P_{core} + P_A + P_{F_2} + P_{F_1} \\ ۱۰۰۰ &= (P_{mis} + P_{core}) + ۱۲۳/۴۸ + ۵۲/۹۲ + ۲ \\ P_{mis} + P_{core} &= ۱۰۰۰ - ۱۲۳/۴۸ - ۵۲/۹۲ - ۲ \\ P_{mis} + P_{core} &= ۶۲۳/۶ [W] \end{aligned}$$

### ۲۷-۳ - مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند اضافی با شنت کوتاه

مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند اضافی با شنت کوتاه در شکل (۳-۴۱) نشان داده شده است.



شکل ۴۱-۳ مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند اضافی با شنت کوتاه

با نوشتن KVL برای جریان حلقه‌های  $I_1$  و  $I_2$  معادلات (۳-۲۸) و (۳-۲۹) به دست می‌آید.

$$\text{KVL}_1) (R_{F1} + R_{adj}) I_1 + R_A (I_1 - I_2) + E_A = 0 \quad (3-28)$$

$$\text{KVL}_2) -E_A + R_A (I_2 - I_1) + R_{F2} I_2 + V_T = 0 \quad (3-29)$$

- از رابطه (۳-۲۸) خواهیم داشت:

$$\text{KVL}_1) R_{F1} I_1 + R_A (I_1 - I_2) + E_A = 0$$

$$\text{KVL}_1) 108 I_1 + 1(I_1 - 8) + E_A = 0$$

$$\text{KVL}_1) 109 I_1 + E_A = 8$$

- از رابطه (۳-۲۹) خواهیم داشت:

$$\text{KVL}_2) -E_A + R_A (I_2 - I_1) + R_{F2} I_2 + V_T = 0$$

$$\text{KVL}_2) -E_A + 1(8 - I_1) + 2 \times 8 + 200 = 0$$

$$\text{KVL}_2) -I_1 - E_A = -224$$

- معادلات  $\text{KVL}_1$  و  $\text{KVL}_2$  را در یک دستگاه

قرار می‌دهیم:

$$\text{KVL}_1) 109 I_1 + E_A = 8$$

$$\text{KVL}_2) \frac{-I_1 - E_A = -224}{108 I_1 + 0 = -216}$$

$$I_1 = \frac{-216}{108} = -2$$

- از رابطه (۳-۳۰) جریان تحریک شنت به دست

می‌آید:

$$I_{F1} = -I_1 = -(-2) = 2 \text{ [A]}$$

- از رابطه (۳-۳۰) جریان آرمیچر به دست می‌آید:

$$I_A = -I_1 + I_2 = -(-2) + 8 = 10 \text{ [A]}$$

- از رابطه  $\text{KVL}_1$  مقدار  $E_A$  به دست می‌آید:

مدار معادل الکتریکی ژنراتور کمپوند اضافی با شنت کوتاه با روش جریان حلقه یا روش‌های دیگر و صرف نظر از اثرات مغناطیسی تحلیل می‌شود.

پس از حل معادلات (۳-۲۸) و (۳-۲۹) جریان

حلقه‌های  $I_1$  و  $I_2$  به دست می‌آید و خواهیم داشت:

$$I_{F1} = -I_1 \quad (3-30)$$

$$I_{F2} = I_L = I_2 \quad (3-31)$$

$$I_A = -I_1 + I_2 \quad (3-32)$$

**مثال ۱۵-۳** - یک ژنراتور کمپوند اضافی با

شنت کوتاه  $200 \text{ V}$ ،  $1600 \text{ W}$  با  $R_A = 1 \Omega$ ،

$R_{F1} + R_{adj} = 108 \Omega$  و  $R_{F2} = 2 \Omega$  مفروض است.

مطلوب است:

الف - جریان آرمیچر

ب - نیروی محرکه القایی آرمیچر

حل:

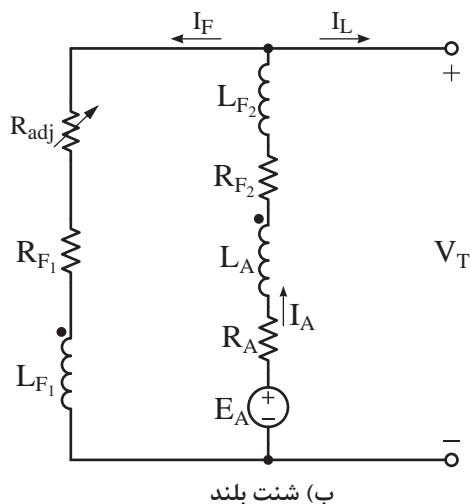
- از رابطه (۳-۲۲) جریان بار  $I_L$  به دست می‌آید:

$$I_L = \frac{P_{out}}{V_T} = \frac{1600}{200} = 8 \text{ [A]}$$

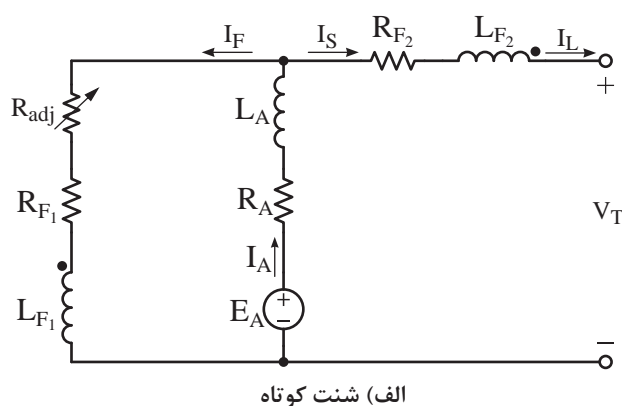
- از رابطه (۳-۳۱) در می‌یابیم:

$$I_L = I_{F2} = I_2 = 8 \text{ [A]}$$

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 می‌کند.» 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.



ب) شنت بلند



الف) شنت کوتاه

شکل ۴۲ - ۳ مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند نقصانی

پایانه‌های ژنراتور  $V_T$  جریان  $I_L$  را در بار  $R_L$  جاری می‌کند. جریان در سیم‌پیچی آرمیچر افت ولتاژهای ناشی از اثرات مغناطیسی  $\mathcal{E}$  و مقاومت اهمی سیم‌پیچی آرمیچر  $R_A I_A$  و در سیم‌پیچی تحریک سری افت ولتاژ  $R_F I_F$  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

$$\text{KVL1) } 109I_A + E_A = 8$$

$$109(-2) + E_A = 8$$

$$E_A = 226 \text{ [V]}$$

## ۲۸- ۳- مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند

### نقصانی

مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند نقصانی با شنت کوتاه و بلند در شکل (۳-۴۲) نشان داده

## ۱۹- ۳- راه‌اندازی و شرایط راه‌اندازی ژنراتور

### کمپوند

راه‌اندازی ژنراتور کمپوند مشابه توضیحات بخش ۱۴- ۳ راه‌اندازی ژنراتور تحریک موازی است. شرایط راه‌اندازی آن نیز مطابق توضیحات بخش ۱- ۱۴- ۳ می‌باشد.

## ۳۰- ۳- بهره‌برداری از ژنراتور کمپوند اضافی

پس از راه‌اندازی ژنراتور کمپوند اضافی و اتصال بار به آن، ژنراتور مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. ولتاژ

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 - 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»<sup>۱</sup> 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 - 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»<sup>۲</sup> می‌نامند.

۳ - با زیاده‌تر کردن تعداد دور سیم‌پیچی تحریک سری، نیروی محرکه مغناطیسی ( $\theta = NI$ ) و فوران آن زیاده‌تر 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»<sup>۳</sup> می‌نامند.

### ۳۱-۳ - 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 ۹-۳

۱ - تفاوت ژنراتور کمپوند اضافی و نقصانی را توضیح دهید.

۲ - نحوه راه‌اندازی ژنراتور کمپوند را توضیح دهید.

۳ - به هنگام راه‌اندازی ژنراتور کمپوند چه نکاتی باید رعایت شود؟

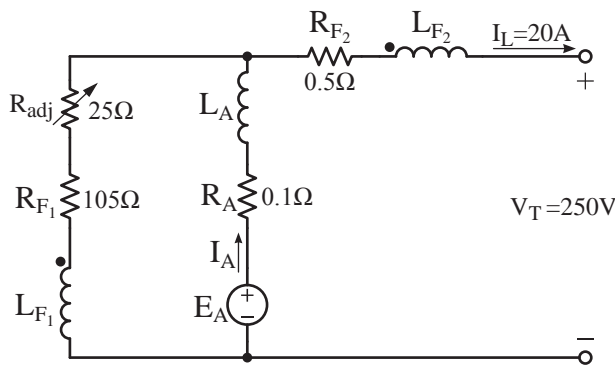
۴ - به هنگام بهره‌برداری از ژنراتور کمپوند اضافی چند حالت پیش می‌آید؟ علت آن را توضیح دهید.

۵ - علت کاهش ولتاژ ژنراتور کمپوند نقصانی به

هنگام بهره‌برداری چیست؟ توضیح دهید.

۶ - مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند اضافی با شنت بلند را رسم کنید و کمیت‌های الکتریکی آن را تعریف کنید.

۷ - مدار الکتریکی معادل ژنراتور کمپوند نقصانی با شنت کوتاه را رسم کنید و کمیت‌های الکتریکی آن را تعریف کنید.

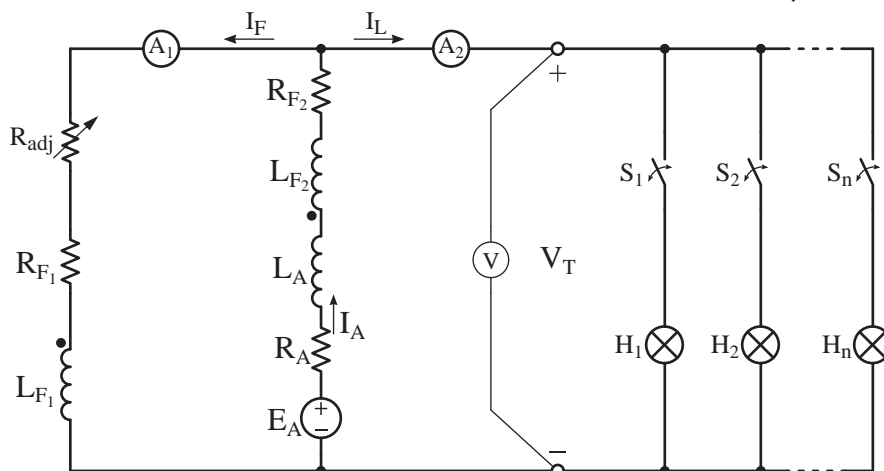


### ۳۲ - ۳ - منحنی مشخصه بارداری ژنراتور

#### کمپوند اضافی

منحنی مشخصه بارداری از آزمایش بارداری به دست می‌آید و هدف تعیین تأثیر جریان بار بر ولتاژ پایانه‌های ژنراتور  $V_T$  در سرعت  $n$  ثابت و جریان تحریک موازی ثابت است. در ژنراتور کمپوند جریان تحریک سری تابعی از جریان بار است. پس در آزمایش بارداری مقدار آن ثابت نیست.

نتایج آزمایش بارداری ژنراتور کمپوند اضافی با شنت بلند و کوتاه بسیار نزدیک به یکدیگر است و تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارند. لذا برای انجام آزمایش بارداری، ژنراتور کمپوند را به صورت شنت بلند مطابق شکل (۴۳ - ۳) اتصال داده‌اند.



شکل ۴۳ - ۳ مدار الکتریکی آزمایش بارداری ژنراتور کمپوند اضافی

### تمرین ۸ - ۳

۱ - یک ژنراتور کمپوند اضافی با شنت بلند توسط محرکی با توان ۱۰ HP و سرعت ۱۲۰۰ PRM گردانده می‌شود و توان ۶ kW با ولتاژ ۲۰۰ V به بار می‌دهد. اگر  $R_{F_1} = 0.1 \Omega$ ،  $R_{F_2} + R_{adj} = 400 \Omega$  و  $R_A = 0.2 \Omega$  باشد، مطلوب است:

الف - نیروی محرکه القایی در آرمیچر

ب - تلفات هسته و مکانیکی روی هم

۲ - یک ژنراتور کمپوند اضافی با شنت کوتاه مطابق شکل مقابل مفروض است. مطلوب است:

الف - نیروی محرکه القایی آرمیچر

ب - بازده در صورتی که تلفات هسته ۲۵۰ W و تلفات مکانیکی ۳۰۰ W باشد.

آمپر متر  $A_1$  جریان تحریک شنت  $I_F$  و آمپر متر  $A_2$  جریان بار  $I_L$  و ولت متر  $V$  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 متأثر از جریان بار  $I_L$  است.

در شکل (۳ - ۴۳) 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 - ۲ - ۳ - آزمایش بارداری

آزمایش بارداری ژنراتور کمپوند مشابه توضیحات بخش ۱ - ۱۷ - ۳ ژنراتور شنت انجام خواهد شد.

پس از ترسیم نتایج آزمایش بارداری برای ولتاژ

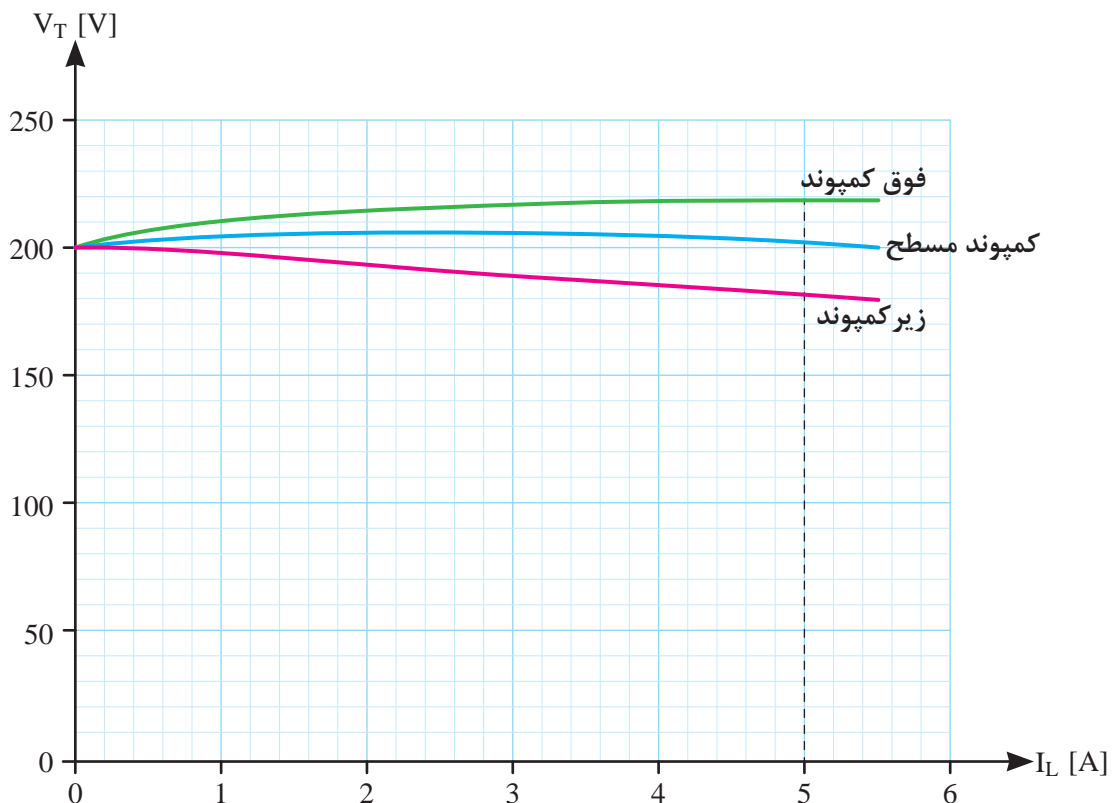
پایانه‌های ژنراتور  $V_T$  بر حسب جریان بار  $I_L$  سه حالت ممکن پیش می‌آید:

۱ - با افزایش جریان بار  $I_L$  ولتاژ پایانه‌های ژنراتور تقریباً ثابت می‌ماند. در این صورت ژنراتور «کمپوند مسطح» است.

۲ - با افزایش جریان بار  $I_L$  ولتاژ پایانه‌های ژنراتور کاهش می‌یابد. در این صورت ژنراتور «زیر کمپوند» است.

۳ - با افزایش جریان بار  $I_L$  ولتاژ پایانه‌های ژنراتور افزایش می‌یابد. در این صورت ژنراتور «فوق کمپوند» است.

منحنی مشخصه بارداری ژنراتور کمپوند اضافی در سه حالت در شکل (۳ - ۴۴) نشان داده شده است.



شکل ۳ - ۴۴ منحنی مشخصه بارداری ژنراتور کمپوند اضافی



### ۳۳ - ۳ - کاربرد ژنراتور کمپوند اضافی

ژنراتور کمپوند اضافی در حالت «کمپوند مسطح» دارای کمترین درصد تنظیم ولتاژ می‌باشد و ولتاژ تقریباً ثابتی در اختیار مصرف‌کننده‌ها 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 - ۳ را ببینید.

### ۳۴ - ۳ - منحنی مشخصه بارداری ژنراتور

#### کمپوند نقصانی

برای انجام آزمایش بارداری ژنراتور کمپوند نقصانی،

مثال ۱۶ - ۳ - منحنی مشخصه بارداری شکل

(۴۴ - ۳) مربوط به ژنراتور کمپوند اضافی  $V = 200$ ،  $A = 5/5$  است. درصد تنظیم ولتاژ  $V_R$  به ازای سه حالت زیر کمپوند، کمپوند مسطح و فوق کمپوند را به‌دست آورید.

حل:

- با توجه به منحنی مشخصه بارداری به‌دست می‌آوریم.

$$I_L = 0 \Rightarrow V_T = E_A = 200 [V]$$

$$I_L = 5/5 [A] \begin{cases} V_T = 210 [V] & \text{فوق کمپوند} \\ V_T = 198 [V] & \text{کمپوند مسطح} \\ V_T = 180 [V] & \text{زیر کمپوند} \end{cases}$$

- با توجه به رابطه (۱۸ - ۳) درصد تنظیم ولتاژ به‌دست می‌آید.

$$\% V_R = \frac{E_A - V_T}{V_T} \times 100$$

- در حالت فوق کمپوند

$$\% V_R = \frac{200 - 210}{210} \times 100 = -4.76\%$$

در حالت کمپوند مسطح

$$\% V_R = \frac{200 - 198}{198} \times 100 = 1\%$$

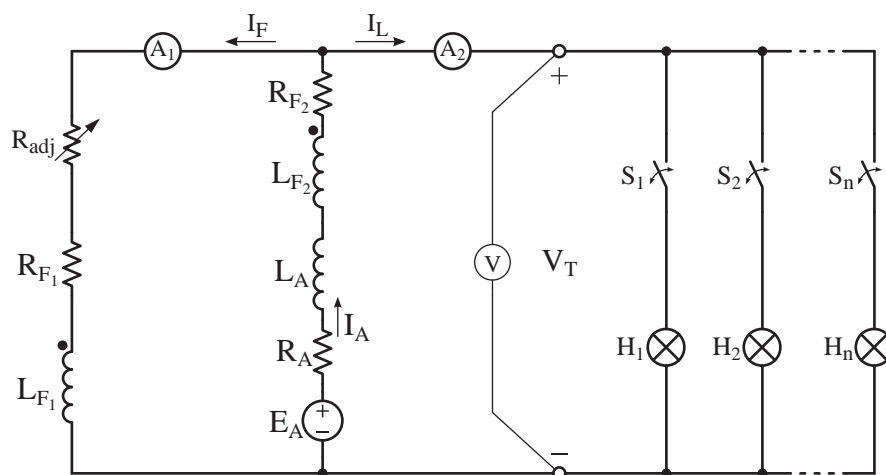
در حالت زیر کمپوند

$$\% V_R = \frac{200 - 180}{180} \times 100 = 11\%$$

معکوس شود.

مدار الکتریکی آزمایش بارداري ژنراتور کمپوند نقصاني با شنت بلند در شکل (۳ - ۴۵) نشان داده شده است.

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

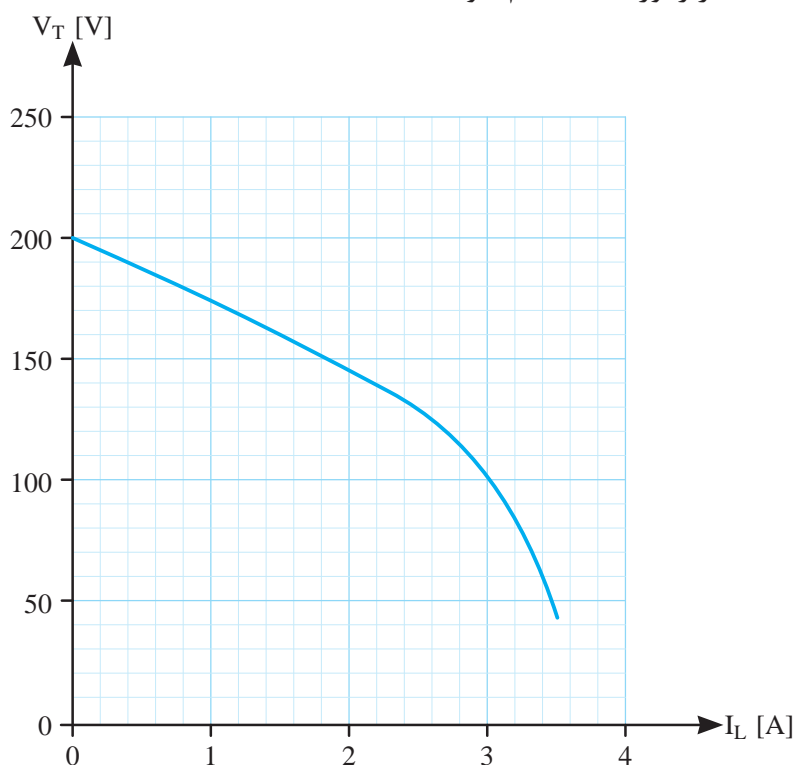


شکل ۳ - ۴۵ مدار الکتریکی آزمایش بارداري ژنراتور کمپوند نقصاني

پس از ترسیم نتایج آزمایش بارداري، منحنی مشخصه بارداري ژنراتور کمپوند نقصاني به صورت شکل (۳ - ۴۶) به دست می‌آید.

۱ - ۳۴ - ۳ - آزمایش بارداري

آزمایش بارداري ژنراتور کمپوند نقصاني مشابه توضیحات بخش ۱ - ۱۷ - ۳ ژنراتور شنت انجام خواهد شد.



شکل ۳ - ۴۶ منحنی مشخصه بارداري ژنراتور کمپوند نقصاني

مثال ۱۷-۳ - منحنی مشخصه بارداری شکل (۳-۴۶) مربوط به ژنراتور کمپوند نقصانی  $5/5A$ ،  $200V$  است. درصد تنظیم ولتاژ  $V_R\%$  را به ازای بار  $3A$  چقدر است.

حل:

- با توجه به منحنی بارداری به دست می آوریم:

$$I_L = 0 \Rightarrow V_T = E_A = 200 [V]$$

$$I_L = 3 [A] \Rightarrow V_T = 100 [V]$$

- با توجه به رابطه (۱۸-۳) درصد تنظیم ولتاژ به دست می آید.

$$\% V_R = \frac{E_A - V_T}{V_T} \times 100$$

$$\% V_R = \frac{200 - 100}{100} \times 100 = \% 100$$

### ۳۵-۳ - کاربرد ژنراتور کمپوند نقصانی

ژنراتور کمپوند نقصانی دارای بیشترین درصد تنظیم ولتاژ می باشد. و در بار کامل ولتاژ پایانه های آن به شدت کاهش می یابد. از این ژنراتور در جوشکاری به روش «قوس الکتریکی» استفاده می شود.

### پرسش ۱۰-۳

۱ - هدف از انجام آزمایش بارداری را شرح دهید.

۲ - نحوه انجام آزمایش بارداری ژنراتور کمپوند اضافی را توضیح دهید.

۳ - چگونه ژنراتور کمپوند اضافی را تبدیل به کمپوند نقصانی می کنند؟

۴ - کاربرد ژنراتور کمپوند اضافی را بنویسید.

۵ - چرا ژنراتور کمپوند اضافی به حالت «زیر کمپوند» در می آید؟ آیا این حالت مطلوب است؟

۶ - کمترین و بیشترین درصد تنظیم ولتاژ مربوط به کدام ژنراتور کمپوند است؟ چرا؟

۵ - کاربرد ژنراتور کمپوند نقصانی را بنویسید.

### ۳۶-۳ - تنظیم ولتاژ ژنراتورهای جریان مستقیم

تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز مصرف کننده های الکتریکی تحت «ولتاژ معین» به عهده ژنراتورها می باشد. مصرف کننده های الکتریکی به عنوان بار به پایانه های ژنراتور متصل می شوند و جریان  $I_L$  را تحت ولتاژ پایانه های ژنراتور  $V_T$  دریافت می کنند. در صورت تغییر ولتاژ پایانه های ژنراتور  $V_T$ ، جریان بار تغییر می کند و کیفیت کار مصرف کننده تحت تأثیر قرار می گیرد. به طور مثال برای روشن کردن لامپ های  $220V$  نیاز به ژنراتوری با ولتاژ پایانه های  $220V$  می باشد. افزایش ولتاژ پایانه ها باعث سوختن لامپ ها می شود و کاهش ولتاژ پایانه ها منجر به کم نور شدن لامپ ها خواهد شد. بنابراین تنظیم ولتاژ پایانه های ژنراتور به منظور جلوگیری از آسیب دیدن مصرف کننده ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

ولتاژ پایانه های ژنراتور  $V_T$  ناشی از نیروی محرکه القایی آرمیچر  $E_A$  است (رابطه ۱۶-۳).

$$V_T = E_A - R_A I_A$$

با تنظیم نیروی محرکه القایی آرمیچر  $E_A$  ولتاژ پایانه های ژنراتور  $V_T$  تنظیم می شود. نیروی محرکه

القایی آرمیچر طبق رابطه تابع «سرعت رتور» و «فوران قطب‌ها» است. در ادامه به تنظیم این دو کمیت اشاره شده است.

### ۱ - ۳۶ - ۳ - سرعت رتور

رتور ژنراتورهای جریان مستقیم توسط محرک‌های مکانیکی یا توربین گرداننده می‌شود. منظور از محرک‌های مکانیکی، موتورهایی هستند که انرژی سوخت‌های فسیلی از قبیل گازوئیل 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<sup>۱</sup>» 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.

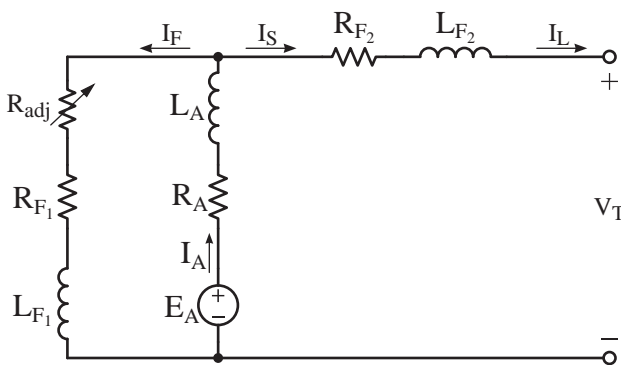
### ۲ - ۳۶ - ۳ - فوران قطب‌ها

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<sup>۲</sup>» تغییر می‌دهند.

با کاهش مقاومت مدار سیم‌پیچی تحریک، جریان تحریک زیاد می‌شود. با زیاد شدن جریان سیم‌پیچی تحریک، فوران قطب‌ها  $\phi$  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 (۳ - ۴۷) نحوه قرار گرفتن مقاومت متغیر در مدار سیم‌پیچی تحریک موازی را نشان می‌دهد.



شکل ۴۷ - 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<sup>۳</sup>» 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.

## پرسش ۱۱ - ۳

### پرسش‌های تشریحی

۱ - ضرورت تنظیم ولتاژ در ژنراتورها را توضیح دهید.

۲ - روش‌های تنظیم ولتاژ در ژنراتورهای جریان مستقیم را شرح دهید. کدام روش اجرا می‌شود؟

۳ - وظیفه گاورنر را بنویسید.

۴ - جریان سیم‌پیچی تحریک در ژنراتورهای کمپوند چگونه تنظیم می‌شود؟

۵ - 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.

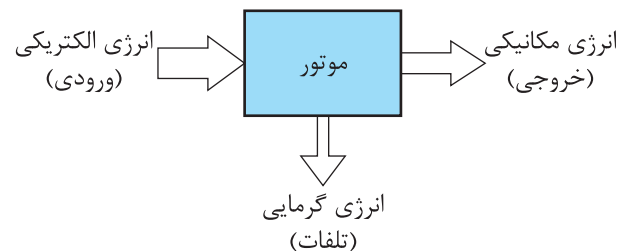
## مقدمه

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<sup>۲</sup> است. یعنی یک ماشین الکتریکی جریان مستقیم می‌تواند به صورت موتور یا ژنراتور مورد

موتورهای جریان مستقیم<sup>۱</sup> 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 - ۴).



شکل ۱-۴

ویژگی موتورهای جریان مستقیم تنوع آنها است که با ترکیب‌های متنوع در مدار تحریک آنها می‌توان مشخصه‌های گشتاور - دور گوناگونی به دست 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.

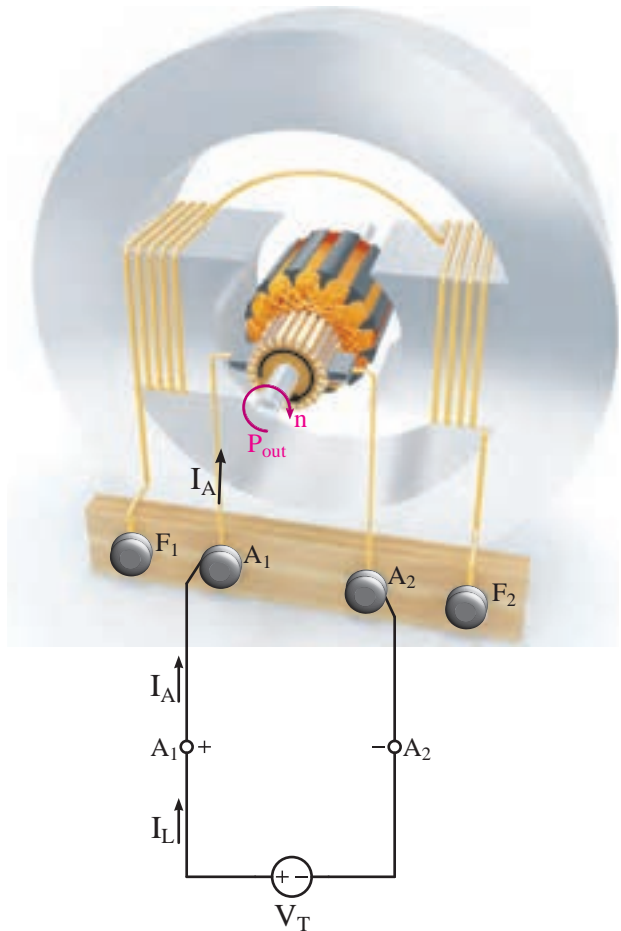


بهره‌برداری قرار گیرد. لذا ساختمان داخلی و شکل ظاهری موتورهای جریان مستقیم با ژنراتورهای جریان مستقیم تفاوت نخواهد داشت.

#### ۱-۴- پخش توان و تلفات در موتورهای

##### جریان مستقیم

طرح ساختمانی موتور جریان مستقیم در شکل (۲-۴) نشان داده شده است.



شکل ۲-۴ طرح ساختمانی موتور جریان مستقیم

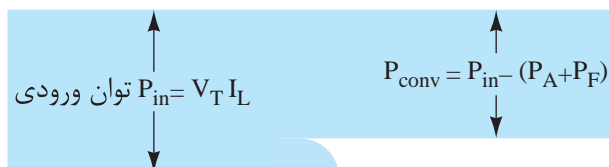
استاتور قطب‌های برجسته دارد. در صورتی که سیم‌پیچی قطب‌ها توسط جریان  $I_F$  تحریک شوند فوراً ناشی از آن در فاصله هوایی توزیع خواهد شد. سیم‌پیچی آرمیچر درون میدان قطب‌ها قرار دارد و با

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 (۱-۴) به دست می‌آید.

$$P_{in} = V_T \cdot I_L \quad (۱-۴)$$

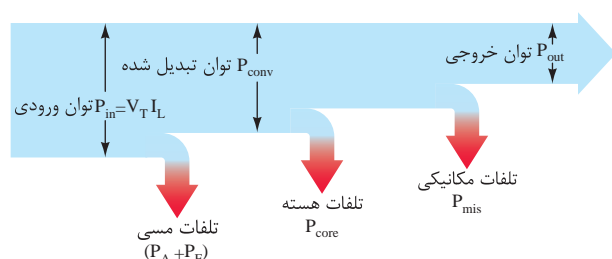
با جاری شدن جریان در سیم‌پیچی‌های آرمیچر و تحریک، این سیم‌پیچی‌ها گرم می‌شوند. مقداری از توان ورودی  $P_{in}$  که در سیم‌پیچی‌های آرمیچر و تحریک به گرما تبدیل می‌شود را «تلفات مسی» گویند و با  $P_{cu}$  نشان می‌دهند. بخشی از تلفات مسی که در سیم‌پیچی آرمیچر می‌باشد را «تلفات آرمیچر» گویند و با  $P_A$  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 (۳-۴) نشان داده شده است.



$$P_{cu} = P_A + P_F$$

شکل ۳-۴

از توان مکانیکی ورودی  $P_{in}$  که در اثر اصطکاک به گرما تبدیل می‌شود را «تلفات مکانیکی» گویند و با  $P_{mis}$  نشان می‌دهند. تلفات مکانیکی  $P_{mis}$  همراه با تلفات هسته  $P_{core}$  از توان تبدیل شده  $P_{conv}$  می‌کاهد و بعد از کم شدن، توان باقی‌مانده را «توان خروجی» گویند و با  $P_{out}$  نشان می‌دهند. این فرآیند در شکل (۵ - ۴) نشان داده شده است. به این شکل «نمودار پخش توان» موتورهای جریان مستقیم گویند.



شکل ۵ - ۴ نمودار پخش توان در موتورهای جریان مستقیم

**مثال ۱ - ۴ -** موتور جریان مستقیم  $V = 200$ ،  $I_A = 10$  با تلفات مسی  $50$  W و هسته  $40$  W مکانیکی  $60$  W مفروض است.

مطلوب است:

الف - توان ورودی

ب - توان تبدیل شده

ج - توان خروجی

حل:

- با توجه به نمودار پخش توان شکل (۴ - ۴)

داریم:

$$P_{in} = V_T I_L = 200 \times 10 = 2000 [W]$$

$$P_{conv} = P_{in} - (P_A + P_F)$$

$$P_{conv} = 2000 - 50 = 1950 [W]$$

توان تبدیل شده  $P_{conv}$ ، توان الکتریکی است که به توان مکانیکی تبدیل شده است. توان تبدیل شده  $P_{conv}$  از رابطه (۱ - ۳) نیز قابل محاسبه است.

$$P_{conv} = E_A \cdot I_A$$

در این رابطه:

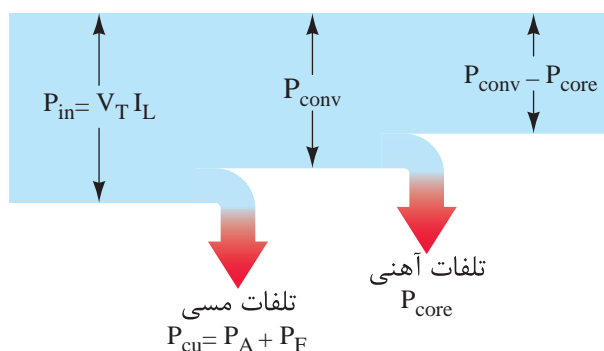
$P_{conv}$  توان تبدیل شده.  $[W]$

$E_A$  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 هیستریزیس به وجود می‌آید. مقداری از توان الکتریکی ورودی  $P_{in}$  که در اثر تلفات فوکو و هیستریزیس به گرما تبدیل می‌شود را «تلفات هسته» گویند و با  $P_{core}$  نشان می‌دهند.

تلفات هسته  $P_{core}$  از توان تبدیل شده  $P_{conv}$  می‌کاهد. این فرآیند در شکل (۴ - ۴) نشان داده شده است.



شکل ۴ - ۴

با گردش رتور، اصطکاک میان قسمت‌های ساکن و متحرک ایجاد می‌شود. بخشی از این اصطکاک در یاتاقان‌ها و بخش دیگر آن در اثر اصطکاک قسمت متحرک و هوای درون ماشین به وجود می‌آید. مقداری

ج) توان خروجی

حل:

$$P_A + P_F = 30 + 20 = 50 \text{ W} = \text{تلفات متغیر}$$

$$P_{\text{core}} + P_{\text{mis}} = 60 + 40 = 100 \text{ W} = \text{تلفات ثابت}$$

- توان ورودی از رابطه (۱ - ۴) به دست می آید.

$$P_{\text{in}} = V_T I_L = 220 \times 16 / 5 = 3630 \text{ [W]}$$

- تلفات کل از رابطه (۳ - ۳) به دست می آید.

$$\Delta P = P_A + P_F + P_{\text{core}} + P_{\text{mis}}$$

$$\Delta P = 30 + 20 + 60 + 40 = 150 \text{ [W]}$$

- توان نیز خروجی از رابطه (۴ - ۳) به دست می آید.

$$\Delta P = P_{\text{in}} - P_{\text{out}}$$

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}} - \Delta P$$

$$P_{\text{out}} = 3630 - 150 = 3480 \text{ [W]}$$

### ۳ - ۴ - بازده موتورهای جریان مستقیم

در موتورهای جریان مستقیم توان ورودی  $P_{\text{in}}$  الکتریکی است و توان خروجی  $P_{\text{out}}$  مکانیکی می باشد. نسبت توان خروجی به توان ورودی را «بازده» یا راندمان نامیده و آن را با  $\eta$  نشان می دهند که از رابطه (۵ - ۳) به دست می آید.

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}$$

$$P_{\text{out}} = P_{\text{conv}} - P_{\text{mis}} - P_{\text{core}}$$

$$P_{\text{out}} = 1950 - 40 - 60 = 1850 \text{ [W]}$$

### ۲ - ۴ - تلفات کل موتورهای جریان مستقیم

حاصل جمع تلفات موتورهای جریان مستقیم را «تلفات کل» گویند و آن را با  $\Delta P$  نشان می دهند. با توجه به نمودار پخش توان شکل (۴ - ۴) تلفات کل برابر است با:

تلفات مکانیکی + تلفات هسته + تلفات مسی = تلفات کل

که در فصل قبل آن را با رابطه (۳ - ۳) نشان دادیم:

$$\Delta P = (P_A + P_F) + P_{\text{core}} + P_{\text{mis}}$$

تفاوت بین توان ورودی  $P_{\text{in}}$  و توان خروجی  $P_{\text{out}}$ ، تلفات کل  $\Delta P$  است و آن را با رابطه (۴ - ۳) نشان دادیم.

$$\Delta P = P_{\text{in}} - P_{\text{out}}$$

تلفات مکانیکی  $P_{\text{mis}}$  و تلفات هسته  $P_{\text{core}}$  مطابق آنچه که در بخش ۲ - 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 - ۱ -** موتور جریان مستقیم  $V = 220$ ،  $A = 16/5$  مفروض است. تلفات آرمیچر  $W = 30$  و تلفات تحریک  $W = 20$  می باشد. اگر تلفات هسته  $W = 60$  و تلفات مکانیکی  $W = 40$  باشد مطلوب است:

الف) تلفات متغیر

ب) تلفات ثابت

#### ۴ - ۴ - گشتاور موتورهای جریان مستقیم

گشتاور آرمیچر موتورهای جریان مستقیم ناشی از جاری شدن جریان در سیم‌پیچی آرمیچر واقع در میدان مغناطیسی قطب‌های استاتور است. با عبور جریان از سیم‌پیچی آرمیچر  $I_A$ ، از طرف فوران مغناطیسی میدان قطب‌های استاتور  $\phi$  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 - ۲) به دست می‌آید.

$$T_A = K\phi I_A$$

با ایجاد گشتاور، سیم‌پیچی آرمیچر شروع به گردش در فوران مغناطیسی قطب‌های استاتور می‌کند و در آن  $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$  پدید آمده و طبق قانون القای الکترومغناطیسی فاراده نیروی محرکه  $E_A$  در سیم‌پیچی آرمیچر القا می‌شود. نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچی آرمیچر  $E_A$  از رابطه (۲۰ - ۲) به دست می‌آید.

$$E_A = K \cdot \phi \cdot \omega$$

مشاهده می‌شود در ماشین‌های الکتریکی جریان مستقیم پدیده‌های ژنراتوری و موتوری به طور هم زمان در سیم‌پیچی آرمیچر شکل می‌گیرند.

مقدار ضریب  $K$  از رابطه‌های (۲۵ - ۲) و (۲۰ - ۲) به دست می‌آید. رابطه (۲ - ۴)

$$K = \frac{T_A}{\phi I_A} = \frac{E_A}{\phi \omega} \quad (۴-۲)$$

گشتاور آرمیچر  $T_A$  از تناسب رابطه (۲ - ۴) قابل

بازده را بر حسب درصد بیان می‌کنند و از رابطه

(۶ - ۳) محاسبه می‌شود.

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$$

مثال ۳ - ۴ - یک موتور جریان مستقیم ۴ KW،

$V = ۲۵۰$ ،  $A = ۲۰$  مفروض است. مطلوب است محاسبه:

الف - بازده بر حسب درصد

ب - تلفات

حل:

- توان ورودی از رابطه (۱ - ۴) به دست می‌آید.

$$P_{in} = V_T \cdot I_L = ۲۵۰ \times ۲۰ = ۵۰۰۰ [W]$$

- توان خروجی بر حسب KW است که آن را به W تبدیل می‌کنیم.

$$P_{out} = ۴_{kw} \times ۱۰۰۰ = ۴۰۰۰ [W]$$

- بازده بر حسب درصد از رابطه (۶ - ۳) به دست

می‌آید.

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$$

$$\% \eta = \frac{۴۰۰۰}{۵۰۰۰} \times 100 = ۸۰ \%$$

- تلفات از رابطه (۴ - ۳) به دست می‌آید.

$$\Delta P = P_{in} - P_{out}$$

$$\Delta P = ۵۰۰۰ - ۴۰۰۰ = ۱۰۰۰ [W]$$

محاسبه است. رابطه (۳ - ۴)

حل:

- سرعت زاویه موتور از رابطه (۱۹ - ۲) به دست می آید.

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \times 3 / 14 \times 1500}{60} = 157 \left[ \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$$

- از رابطه (۳ - ۴) گشتاور آرمیچر به دست می آید.

$$T_A = \frac{E_A I_A}{\omega} = \frac{750 \times 125}{157} = 597 / 1 \text{ [N.m]}$$

- از رابطه (۵ - ۴) گشتاور بار به دست می آید.

$$T_{\text{load}} = \frac{P_{\text{out}}}{\omega} = \frac{80 \times 10^3}{157} = 509 / 5 \text{ [N.m]}$$

## پرسش ۱ - ۴

### پرسش های کامل کردنی

- ۱ - فرآیند تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی توسط ..... صورت می گیرد.
- ۲ - مقداری از توان که در اثر ..... در ..... تبدیل به ..... می شود را تلفات مکانیکی گویند.
- ۳ - نسبت توان ..... به سرعت ..... را گشتاور آرمیچر نامند.
- ۴ - نسبت توان ..... به سرعت ..... را گشتاور بار نامند.

$$T_A = \frac{E_A I_A}{\omega} \quad (4-3)$$

در رابطه (۳ - ۴) مقدار  $E_A I_A$  بیانگر توان تبدیل شده  $P_{\text{conv}}$  است. با جایگزینی آن، رابطه (۴ - ۴) به دست خواهد آمد.

$$T_A = \frac{P_{\text{conv}}}{\omega} \quad (4-4)$$

رابطه (۴ - ۴) تعریف جدیدی برای گشتاور آرمیچر ارائه می دهد. طبق این تعریف «نسبت توان تبدیل شده  $P_{\text{conv}}$  به سرعت زاویه ای رتور  $\omega$  گشتاور آرمیچر  $T_A$  نامیده می شود.» بر اساس همین تعریف «نسبت توان خروجی  $P_{\text{out}}$  به سرعت زاویه ای رتور  $\omega$ ، گشتاور بار  $T_{\text{load}}$  می نامند» و از رابطه (۵ - ۴) به دست می آید.

$$T_{\text{load}} = \frac{P_{\text{out}}}{\omega} \quad (4-5)$$

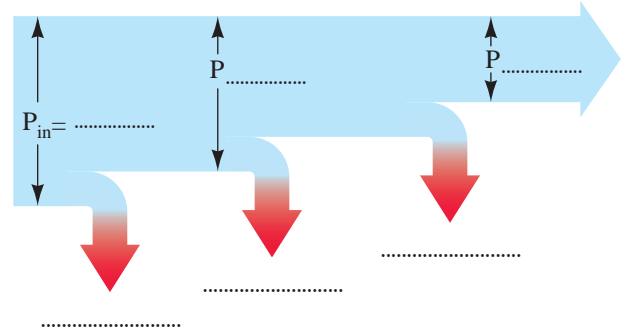
بدیهی است توان تبدیل شده  $P_{\text{conv}}$  بزرگ تر از توان خروجی  $P_{\text{out}}$  است در نتیجه گشتاور آرمیچر نیز بیشتر از گشتاور بار خواهد شد.

مثال ۴ - 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 - گشتاور آرمیچر  $T_A$

ب - گشتاور بار  $T_{\text{load}}$

۵ - نمودار پخش توان موتور جریان مستقیم شکل زیر را تکمیل کنید.



۶ - تلفات در موتورهای جریان مستقیم را تعریف کنید.

۷ - به چه دلیل به تلفات مسی، تلفات متغیر گویند؟

### تمرین ۱ - ۴

۱ - موتور جریان مستقیم  $1 \text{ kW}$ ،  $200 \text{ V}$  با توان تبدیل شده  $1100 \text{ W}$  و تلفات مسی  $50 \text{ W}$  مفروض است. مطلوب است:

الف - تلفات مکانیکی و هسته روی هم

ب - توان ورودی موتور

پ - جریان موتور

۲ - موتور جریان مستقیم  $10 \text{ kW}$ ،  $500 \text{ V}$  با تلفات ثابت  $700 \text{ W}$  و متغیر  $800 \text{ W}$  مفروض است. مطلوب است:

الف - تلفات کل

ب - توان ورودی

پ - توان تبدیل شده

۳ - یک موتور جریان مستقیم  $10 \text{ HP}$ ،  $250 \text{ V}$  با بازده  $74/5\%$  مفروض است. مطلوب است:

الف - توان ورودی

ب - جریان موتور

۴ - یک موتور جریان مستقیم  $45 \text{ kW}$  باری را با گشتاور  $430 \text{ N.m}$  به گردش درآورده است. سرعت رتور را بر حسب  $\text{RPM}$  به دست آورید.

۵ - یک موتور جریان مستقیم  $90 \text{ kW}$  با تلفات ثابت  $2/5 \text{ kW}$  باری را با سرعت  $1200 \text{ RPM}$  می گرداند. مطلوب است:

### پرسش های صحیح، غلط

۱ - حاصل جمع تلفات مکانیکی و تلفات تحریک و تلفات آرمیچر را تلفات کل گویند.

☐ صحیح ☐ غلط

۲ - تلفات مکانیکی و تلفات هسته را تلفات متغیر گویند.

☐ صحیح ☐ غلط

### پرسش های تشریحی

۱ - مفهوم توان تبدیل شده در موتورهای جریان مستقیم را شرح دهید.

۲ - تلفات آرمیچر را شرح دهید.

۳ - ویژگی های موتورهای جریان مستقیم را بنویسید.

۴ - تلفات متغیر در موتورهای جریان مستقیم کدامند؟

۵ - علت پیدایش حالت موتور و ژنراتوری در ماشین های جریان مستقیم را شرح دهید؟

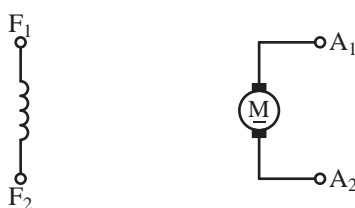
الف - گشتاور بار

ب - گشتاور آرمیچر

## ۴ - ۶ - علامت اختصاری و مدار الکتریکی

### معادل موتورهای جریان مستقیم

طرح ساختمانی موتور جریان مستقیم شکل (۲ - 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 (۴ - ۶) نشان داده شده است. به کمک علامت‌های اختصاری می‌توان نمایش ساده‌ای از موتورهای جریان مستقیم ارائه کرد.



ب

الف

شکل ۴ - ۶ الف - علامت اختصاری آرمیچر

ب - 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 - ۴) نشان داده شده است.

## ۴ - ۵ - پدیده مهار گسستگی در موتورهای

### جریان مستقیم

افزایش سرعت موتورهای جریان مستقیم در اثر کاهش فوران مغناطیسی قطب‌ها را «مهار گسستگی»<sup>۱)</sup> گویند.

نیروی محرکه القایی آرمیچر از رابطه به‌دست می‌آید. بر اساس این رابطه سرعت از رابطه (۴ - ۶) تعیین می‌شود.

$$\omega = \frac{E_A}{K \cdot \varphi} \quad (4-6)$$

گشتاور آرمیچر موتورهای جریان مستقیم از رابطه (۲۵ - 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  $\varphi$  کم می‌شود و طبق رابطه (۲۵ - 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 صورتی که موتور بدون بار باشد کاهش فوران طبق رابطه (۴ - ۶) 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.



## ۷-۴ - مشخصات موتورهای جریان مستقیم

موتورهای جریان مستقیم توسط کارخانه سازنده مورد آزمایش‌های متعددی قرار خواهند گرفت. نتایجی که از این آزمایش‌ها به دست می‌آید به عنوان «مشخصات موتور جریان مستقیم» ارایه خواهند شد. این مشخصات به سه گروه تقسیم می‌شوند.

۱ - 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 - 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 ثابت  $V_T$  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 - سرعت

منحنی مشخصه گشتاور - سرعت تأثیر تغییرات گشتاور بار  $T_{load}$  بر سرعت گردش رتور  $n$  را در ولتاژ  $V_T$  ثابت نشان می‌دهد.



شکل ۷-۴ مدار الکتریکی معادل سیم‌پیچی تحریک

در این شکل:

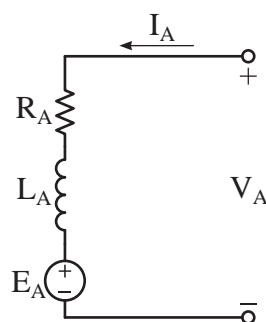
$R_F$  معادل مقاومت اهمی سیم‌پیچی تحریک

$L_F$  ضریب خود القایی سیم‌پیچی تحریک

$I_F$  جریان سیم‌پیچی تحریک

مدار الکتریکی معادل سیم‌پیچی آرمیچر در شکل

(۸-۴) نشان داده شده است.



شکل ۸-۴ 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 [ $\Omega$ ]

$I_A$  جریان سیم‌پیچی آرمیچر [A]

$V_A$  ولتاژ دو سر آرمیچر [V]

$L_A$  ضریب خود القایی سیم‌پیچی آرمیچر

۳ - گروه سوم شامل مشخصاتی است که از تجزیه و تحلیل اطلاعات مشخصات گروه اول و دوم به دست آمده و محاسبه می‌شوند. یکی از این مشخصات کمیت «تنظیم سرعت  $S_R$ » است که تغییرات سرعت نسبت به سرعت بارداری را نشان می‌دهد و از رابطه (۷ - ۴) به دست می‌آید.

$$S_R = \frac{n_o - n}{n} \quad (۴-۷)$$

تنظیم سرعت را به صورت درصد بیان می‌کنند و از رابطه (۸ - ۴) محاسبه می‌شود.

$$\%S_R = \frac{n_o - n}{n} \times 100 \quad (۴-۸)$$

که در این رابطه:

$S_R$  تنظیم سرعت

$n_o$  سرعت بی‌باری رتور

$n$  سرعت بارداری رتور

هرچه درصد تنظیم سرعت کمتر باشد، در اثر افزایش گشتاور بار سرعت رتور کمتر کاهش می‌یابد. بنابراین سرعت رتور از پایداری بیشتری برخوردار است.  
مثال ۵ - ۴ - یک موتور جریان مستقیم ۲ KW در بی‌باری با سرعت ۱۵۰۰ RPM و در بار کامل با سرعت ۱۴۴۰ RPM می‌گردد. مطلوب است:

الف - درصد تنظیم سرعت

ب - گشتاور بار

حل:

- درصد تنظیم سرعت از رابطه (۸ - ۴) به دست

می‌آید.

$$\%S_R = \frac{n_o - n}{n} \times 100$$

$$\%S_R = \frac{1500 - 1440}{1440} \times 100 = 4.1\%$$

- از رابطه (۹ - ۲) سرعت زاویه‌ای به دست می‌آید.

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \times 3.14 \times 1440}{60} = 150.72 \left[ \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \right]$$

- از رابطه (۵ - ۴) گشتاور بار به دست می‌آید.

$$T_{\text{load}} = \frac{P_{\text{out}}}{\omega} = \frac{2 \times 10^3}{150.72} = 13.26 \text{ [N.m]}$$

## پرسش ۲ - ۴

### پرسش‌های کامل کردنی

۱ - منحنی مشخصه الکترومکانیکی تأثیر تغییرات ..... بر ..... را نشان می‌دهد.

۲ - هرچه درصد تنظیم سرعت ..... باشد، سرعت رتور از پایداری ..... برخوردار است.

### پرسش‌های صحیح، غلط

۱ - منحنی مشخصه گشتاور - سرعت تأثیر گشتاور بار بر سرعت گردش رتور را نشان می‌دهد.

☐ غلط ☐ صحیح

۲ - هرچه درصد تنظیم سرعت بیشتر باشد سرعت

ر تور از پایداری بیشتری برخوردار است.

□ صحیح □ غلط

۳ - موتورهای جریان مستقیم با تحریک شنت<sup>۳</sup>

۴ - موتورهای جریان مستقیم با تحریک سری<sup>۴</sup>

۵ - موتورهای جریان مستقیم با تحریک کمپوند<sup>۵</sup>

### پرسش‌های تشریحی

۱ - علامت اختصاری سیم‌پیچی تحریک و آرمیچر موتور جریان مستقیم را رسم کنید. کاربرد آن را بنویسید.

۲ - مدار الکتریکی معادل موتور جریان مستقیم را رسم کنید هر یک از عناصر آن را شرح دهید.

۳ - مقادیر نامی موتورهای جریان مستقیم را تعریف نمایید.

۴ - منحنی مشخصه الکترومغناطیسی را تعریف کنید.

۵ - درصد تنظیم سرعت را تعریف کنید و رابطه آن را بنویسید.

### تمرین ۲ - ۴

۱ - 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 - ۴ - طبقه‌بندی موتورهای جریان مستقیم

موتورهای جریان مستقیم با توجه به نوع تحریک و نحوه تامین تغذیه تحریک به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند.

۱ - موتورهای جریان مستقیم با آهن‌ربای دائم<sup>۱</sup>

PMDC

۲ - موتورهای جریان مستقیم با تحریک مستقل<sup>۲</sup>

### ۹ - ۴ - 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 - ۴) موتور جریان مستقیم با آهن‌ربای دایم نشان داده شده است.



شکل ۹ - ۴ موتور جریان مستقیم با آهن‌ربای دایم

موتورهای جریان مستقیم با آهن‌ربای دایم دارای قطب‌های صاف هستند. شکل (۱۰ - ۴) طرح ساختمانی موتور DC با آهن‌ربای دایم را نشان می‌دهد.

و پایین و بالابر شیشه و هم‌چنین در مسواک‌ها به کار می‌روند. به‌طور کلی در جاهایی که نیاز به موتور کوچک و ارزان قیمت باشد این موتورها پیشنهاد خواهند شد. سالانه میلیون‌ها موتور جریان مستقیم با آهن‌ربای دایم در دنیا تولید و استفاده می‌شوند.

### پرسش ۳ - ۴

#### پرسش‌های کامل کردنی

۱ - موتورهای PMDC با حجم ..... و توان ..... دارای گشتاور ..... هستند.

۲ - موتورهای PMDC با آهن‌ربای ..... دارای قطب‌های ..... هستند.

#### پرسش‌های صحیح، غلط

۱ - در موتورهای PMDC پوسته بیرونی از جنس آهن‌ربای دایم است.

☐ غلط ☐ صحیح

#### پرسش‌های تشریحی

۱ - موتورهای جریان مستقیم چگونه طبقه‌بندی می‌شوند؟

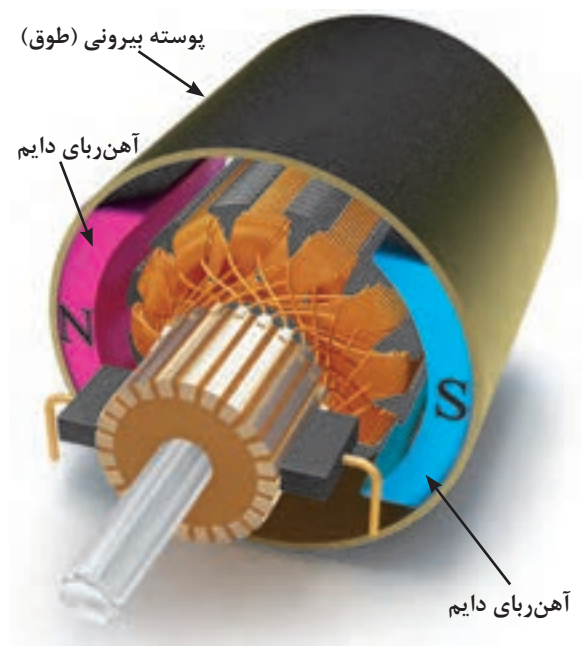
۲ - انواع موتورهای جریان مستقیم را نام ببرید.

۳ - ساختمان موتورهای جریان مستقیم با آهن‌ربای دایم را شرح دهید.

۴ - وظیفه پوسته در موتورهای PMDC را بنویسید.

۵ - مزایا و معایب موتورهای جریان مستقیم با آهن‌ربای دایم را بنویسید.

۶ - کاربرد موتورهای PMDC را بنویسید.



شکل ۱۰-۴ طرح ساختمانی موتور DC با آهن‌ربای دایم

پوسته بیرونی یا طوقه از جنس آلیاژ آلومینیومی یا فلزاتی دیگر است و آهن‌رباهای دایم که همان قطب‌ها هستند را نگه می‌دارد. رتور نیز مانند دیگر ماشین‌های DC، شیارهایی برای سیم‌پیچی دارد و شامل یک کموتاتور و چند جاروبک است.

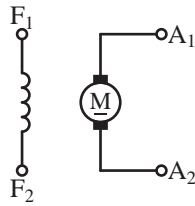
موتورهای DC با آهن‌ربای دایم PMDC به جای سیم‌پیچی تحریک دارای آهن‌ربای دایم هستند و ساختمان ساده‌تری دارند. عدم نیاز به تحریک خارجی برای تولید میدان مغناطیسی و نبود تلفات تحریک نیز از مزایای آنها به شمار می‌آید. از طرف دیگر تضعیف میدان مغناطیس آهن‌رباهای دایم در اثر عکس‌العمل آرمیچر و عدم کنترل بر میدان مغناطیسی قطب‌ها از معایب موتورهای DC با آهن‌ربای دایم است.

### ۱ - ۹ - ۴ - کاربرد

موتورهای DC با آهن‌ربای دایم در اسباب‌بازی‌ها و در خودروها به عنوان موتور برف پاک‌کن و پمپ شیشه‌شوی

## ۱۰- ۴- موتورهای جریان مستقیم با تحریک

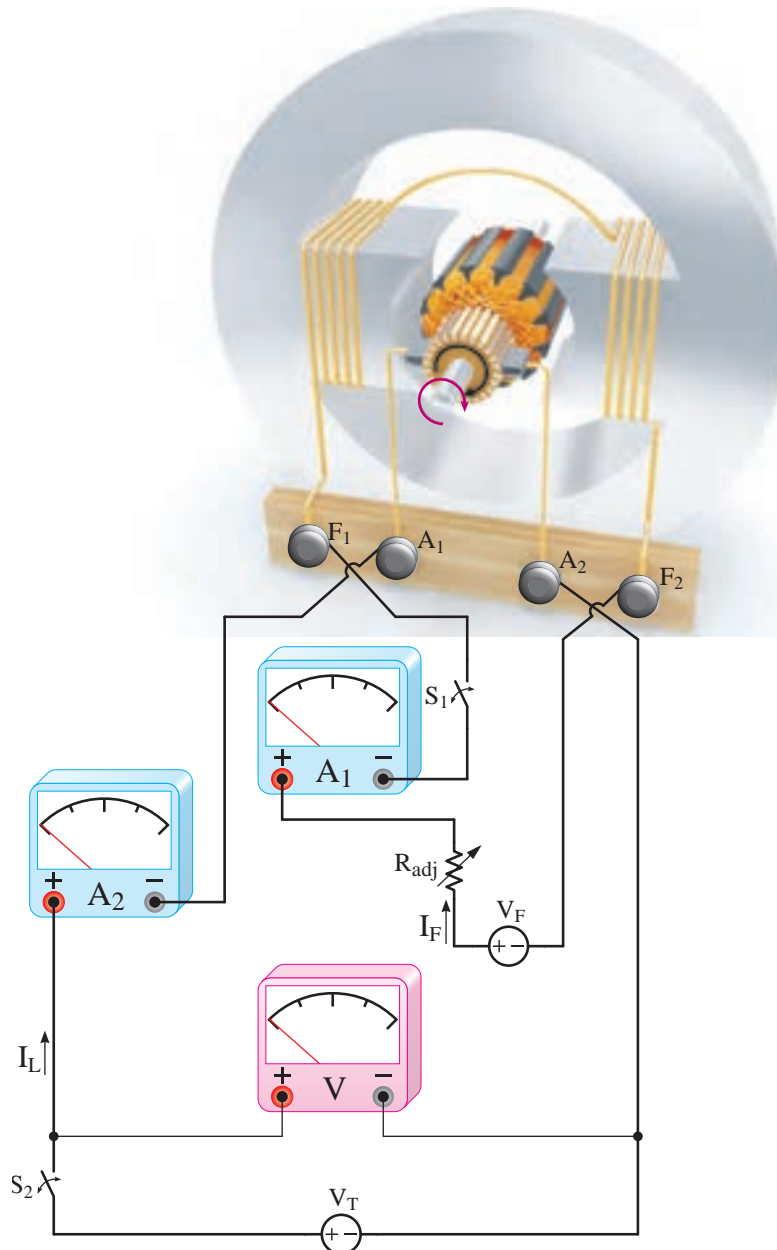
### مستقل



شکل ۱۱- ۴ علامت اختصاری موتور تحریک مستقل

طرح ساختمانی موتور تحریک مستقل در شکل (۱۲- ۴) نشان داده شده است.

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- ۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۲- ۴ طرح ساختمانی موتور تحریک مستقل

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 (۹-۴) و (۱۰-۴) به دست می‌آید.

$$\text{KVL}_1) -V_F + R_{adj}I_1 + R_F I_1 = 0 \quad (4-9)$$

$$\text{KVL}_2) -V_T + R_A I_2 + E_A = 0 \quad (4-10)$$

جریان حلقه  $I_1$  از محل  $I_F$  و جریان حلقه  $I_2$  از محل جریان‌های  $I_A$  و  $I_L$  می‌گذرد. بنابراین روابط (۱۱-۴) و (۱۲-۴) را می‌توان نوشت.

$$I_F = I_1 \quad (4-11)$$

$$I_A = I_L = I_2 \quad (4-12)$$

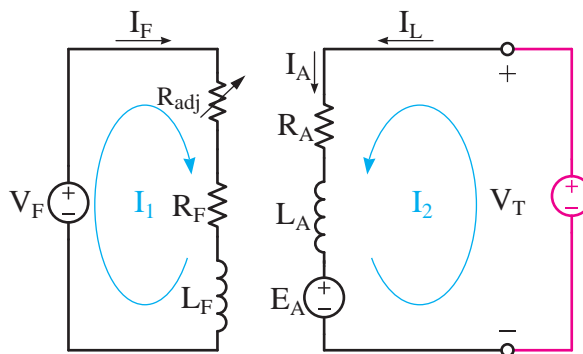
تلفات تحریک از رابطه (۱۳-۴) و تلفات آرمیچر از رابطه (۱۴-۴) به دست می‌آید.

$$P_F = (R_F + R_{adj})I_F^2 \quad (4-13)$$

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 آمپر متر  $A_1$  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 آمپر متر  $A_2$  استفاده شده است.

### ۱- ۱۰- ۴- مدار الکتریکی معادل

مدار الکتریکی معادل موتور تحریک مستقل در شکل (۱۳-۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۳-۴ مدار الکتریکی معادل موتور تحریک مستقل

این مدار با توجه به توضیحات بخش ۴-۳ و طرح ساختمانی شکل (۱۲-۴) به دست 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

$$P_A = R_A I_A^2 \quad (۴-۱۴)$$

- برای مدار آرمیچر حلقه  $I_F$  را در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت انتخاب می‌کنیم و KVL می‌نویسیم.

$$KVL_2) -V_T + R_A I_F + E_A = 0$$

- حلقه  $I_F$  از محل  $I_A$  و در جهت آن می‌گذرد؛ بنابراین خواهیم داشت:

$$I_A = I_L = I_F = 10 [A]$$

- با جایگزینی  $I_F$  در رابطه  $KVL_2$  خواهیم داشت:

$$KVL_2) -200 + 0.1(10) + E_A = 0$$

$$E_A = 199 [V]$$

- پس از محاسبه تلفات  $I_A$  و  $I_F$  تلفات تحریک و آرمیچر به‌دست می‌آید.

$$P_F = (R_A + R_{adj}) I_F^2$$

$$P_F = (280 + 120) \times 10^2 = 4000 [W]$$

$$P_A = R_A I_A^2$$

$$P_A = 0.1 \times 10^2 = 10 [W]$$

### تمرین ۳-۴

۱- یک موتور جریان مستقیم با تحریک مستقل ۴ KW، ۲۵۰ V با بازده ۸۰٪ و مقاومت سیم‌پیچی آرمیچر  $5\Omega$  مفروض است. مطلوب است:

الف - جریان موتور

ب - توان الکترو مغناطیسی

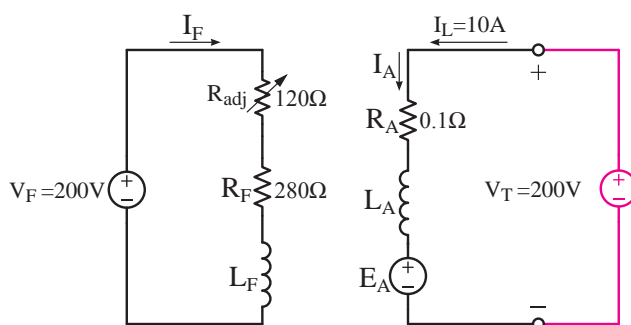
۲- یک موتور جریان مستقیم با تحریک مستقل با

مثال ۶-۴ - موتور جریان مستقیم با تحریک مستقل ۲۰۰ ولتی، ۱۰ آمپری با مدار الکتریکی معادل مطابق شکل (۴-۱۴) در نظر است. مطلوب است:

الف) جریان مدار تحریک  $I_F$

ب) نیروی محرکه القایی آرمیچر  $E_A$

پ) تلفات تحریک و آرمیچر



شکل ۴-۱۴

حل:

- برای مدار تحریک حلقه  $I_A$  را در جهت حرکت عقربه‌های ساعت انتخاب می‌کنیم و KVL می‌نویسیم تا جریان تحریک به‌دست آید.

$$KVL_1) -V_F + R_{adj} I_A + R_F I_A = 0$$

$$-200 + 120 I_A + 280 I_A = 0$$

$$-200 + 400 I_A = 0$$

$$400 I_A = 200$$

$$I_A = \frac{200}{400} = 0.5 [A]$$

- حلقه  $I_A$  از محل  $I_F$  می‌گذرد.

$$I_F = I_A = 0.5 [A]$$

مشخصات زیر مفروض است:

$$V_F = 200V, I_F = 0.5A, V_T = 200V$$

$$E_A = 190V, R_A = 0.5\Omega$$

مطلوب است:

الف - مقاومت مدار تحریک

ب - جریان موتور

ج - اگر تلفات ثابت  $W = 200$  باشد بازده موتور چند

درصد است؟

۳ - ۱۰ - ۴ - آزمایش بارداری

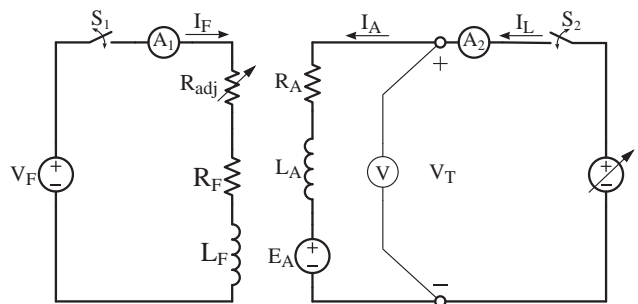
منحنی مشخصه‌های الکترومکانیکی، الکترومغناطیسی و گشتاور - سرعت از آزمایش بارداری به دست می‌آید.

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 آمپرتر و گشتاور بار را توسط گشتاورسنج<sup>۱</sup> 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» به دست آید. اکنون بر روی دستگاه مختصات دیگری که محور افقی آن جریان آرمیچر و محور عمودی آن گشتاور بار  $T_{load}$  است، نقاط نشان دهنده  $T_{load}$  به ازای جریان آرمیچر  $I_A$  معینی را مشخص کنید تا «منحنی مشخصه الکترومغناطیسی»

۲ - ۱۰ - ۴ - 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 - ۴) مدار آرمیچر را از طریق آمپرتر  $A_p$  و ولت‌متر  $V$  به منبع ولتاژ متغیر و مدار تحریک را از طریق مقاومت متغیر  $R_{adj}$  و آمپرتر  $A_1$  به منبع ولتاژ  $V_F$  وصل کنید.



شکل ۱۵ - ۴ مدار الکتریکی راه‌اندازی موتور تحریک مستقل

مقاومت متغیر  $R_{adj}$  را در حداقل خود قرار دهید تا با بستن کلید  $S_1$  مدار تحریک با حداکثر جریان، بیشترین فوران را تولید کند. اکنون با بستن کلید  $S_p$  ولتاژ منبع



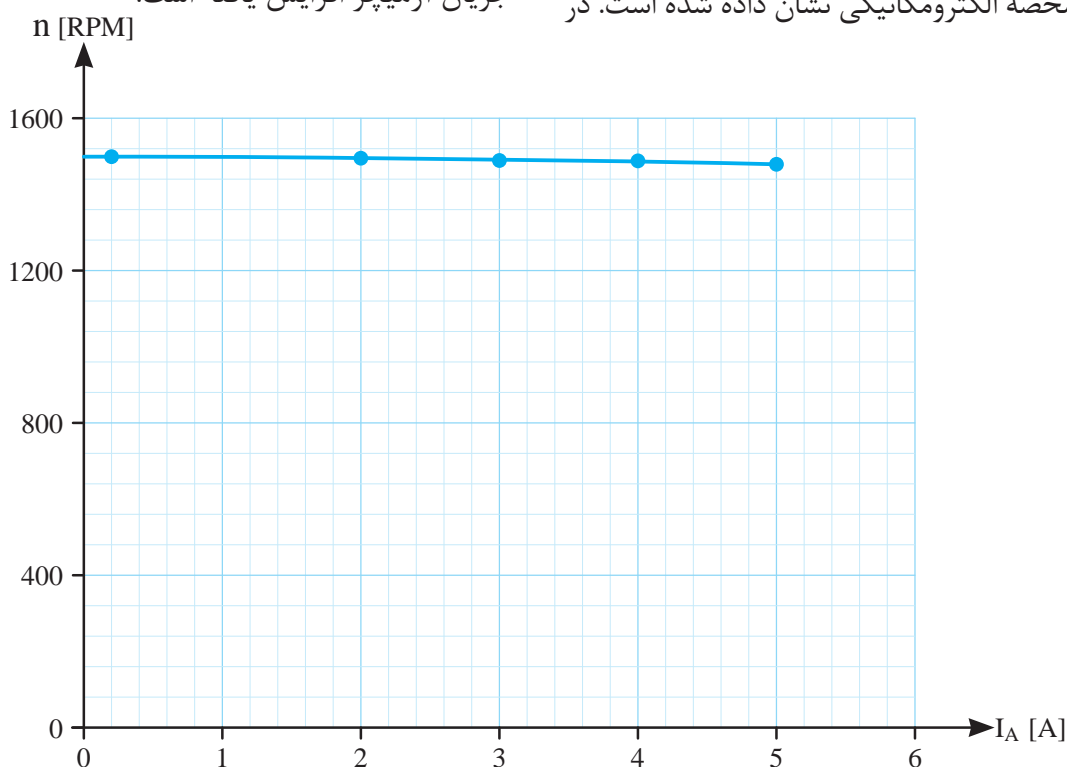
به دست می آید.

جدول (۱ - ۴) نتایج آزمایش بارگذاری موتور تحریک مستقل  $220\text{ V}$ ،  $1\text{ KW}$ ،  $5\text{ A}$  را نشان می دهد.

$V_T$	$220\text{ V}$				
$n[\text{RPM}]$	۱۵۰۰	۱۴۹۶	۱۴۹۰	۱۴۸۹	۱۴۸۰
$I_A[\text{A}]$	۰/۲	۲	۳	۴	۵
$T_{\text{load}}[\text{Nm}]$	۰	۳	۴/۵	۶	۷/۵

جدول ۱ - ۴ نتایج آزمایش بارگذاری موتور تحریک مستقل

مشخصه الکترومکانیکی مشاهده می شود در اثر افزایش گشتاور بار که منجر به کاهش سرعت رتور شده است، جریان آرمیچر افزایش یافته است.



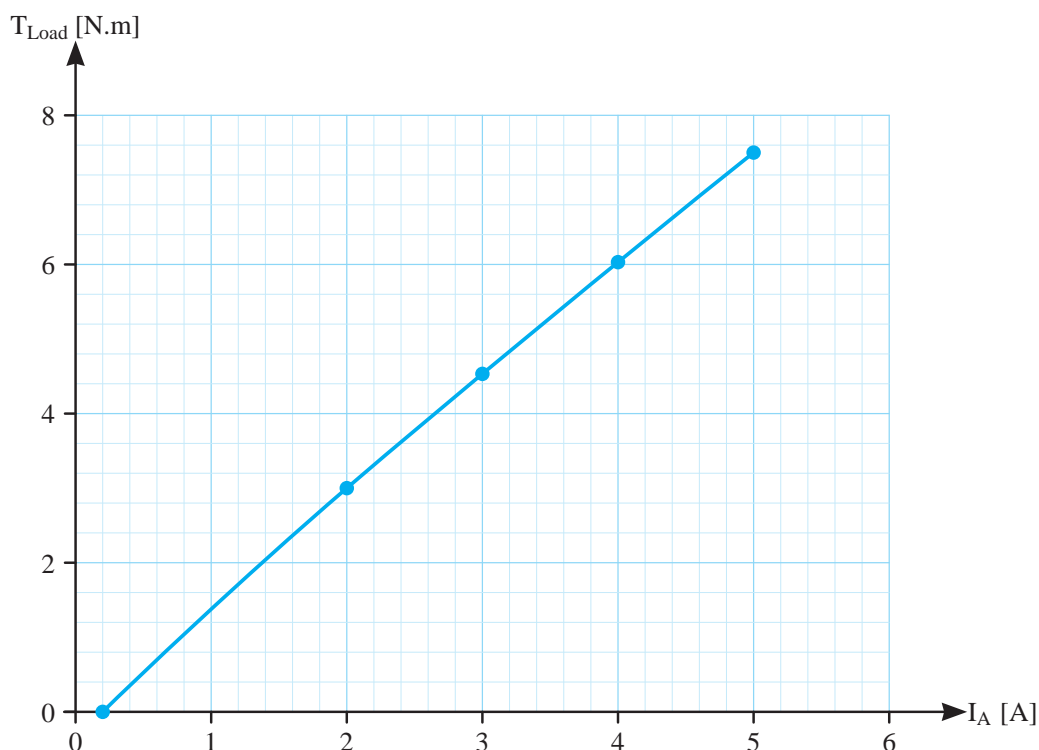
شکل ۱۶ - ۴ منحنی مشخصه الکترومکانیکی موتور تحریک مستقل

افزایش گشتاور بار  $T_{\text{load}}$ ، موتور تحریک مستقل سعی می کند سرعت خود را ثابت نگه دارد اما جریان آرمیچر  $I_A$  را افزایش می دهد.

به دست آید. اگر نقاط نشان دهنده سرعت  $n$  به ازای گشتاور  $T_{\text{load}}$  معینی را بر روی دستگاه مختصاتی که محور افقی آن گشتاور  $T_{\text{load}}$  و محور عمودی آن سرعت  $n$  باشد نشان دهیم «منحنی مشخصه گشتاور - سرعت»

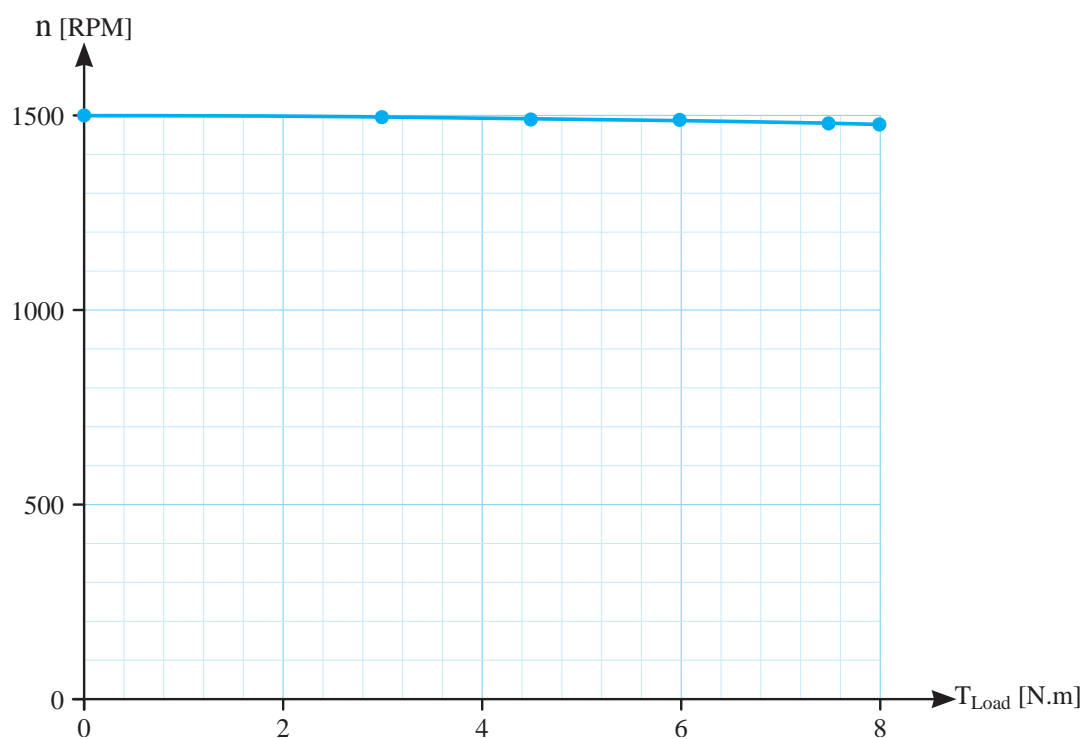
نقاط نشان دهنده مقدار هر سرعت  $n$  به ازای جریان  $I_A$  معین جدول (۱ - ۴) در شکل (۱۶ - ۴) تحت عنوان مشخصه الکترومکانیکی نشان داده شده است. در

نقاط نشان دهنده مقدار هر گشتاور  $T_{\text{load}}$  به ازای  $I_A$  معین جدول (۱ - ۴) در شکل (۱۷ - ۴) تحت عنوان مشخصه الکترومغناطیسی نشان داده شده است. در مشخصه الکترومغناطیسی مشاهده می شود در اثر



شکل ۴-۱۷ منحنی مشخصه الکترومغناطیسی موتور تحریک مستقل

نقاط نشان دهنده مقدار هر سرعت  $n$  به ازای  
 گشتاور  $T_{load}$  معین جدول (۴-۱) در شکل (۴-۱۸) است. در مشخصه گشتاور - سرعت مشاهده می شود در  
 اثر افزایش گشتاور بار  $T_{load}$  سرعت رتور اندکی کاهش  
 تحت عنوان مشخصه گشتاور - سرعت نشان داده شده می یابد.



شکل ۴-۱۸ منحنی مشخصه گشتاور - سرعت موتور تحریک مستقل

**فعالیت ۱-۴-** 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 تقریباً 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 تقریباً 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 به کار 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 - آزمایش بارداری موتور تحریک مستقل در ولتاژ ثابت انجام خواهد شد.

صحيح ☐ غلط ☐

- ۲ - با افزایش گشتاور بار موتور تحریک مستقل جریان آرمیچر کاهش می‌یابد.

صحيح ☐ غلط ☐

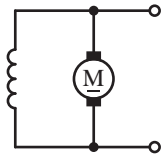
#### پرسش‌های تشریحی

- ۱ - علامت اختصاری موتور تحریک مستقل را رسم کنید و اجزای آن را شرح دهید.
- ۲ - کاربرد مدار الکتریکی معادل را بنویسید.
- ۳ - مدار الکتریکی معادل موتور تحریک مستقل را رسم کنید و اجزای آن را شرح دهید.
- ۴ - قبل از راه‌اندازی موتور تحریک مستقل چه باید کرد؟
- ۵ - نحوه راه‌اندازی موتور تحریک مستقل را شرح دهید.
- ۶ - نحوه انجام آزمایش بارداری موتور تحریک مستقل را بنویسید.
- ۷ - کاربرد موتورهای تحریک مستقل را بنویسید.
- ۸ - ویژگی‌های موتور تحریک مستقل را شرح دهید.

- ۹ - افزایش بیش از حد مقاومت متغیر  $R_{adj}$  چه مشکلی ایجاد می‌کند؟

## ۱۱- ۴- موتورهای جریان مستقیم با تحریک

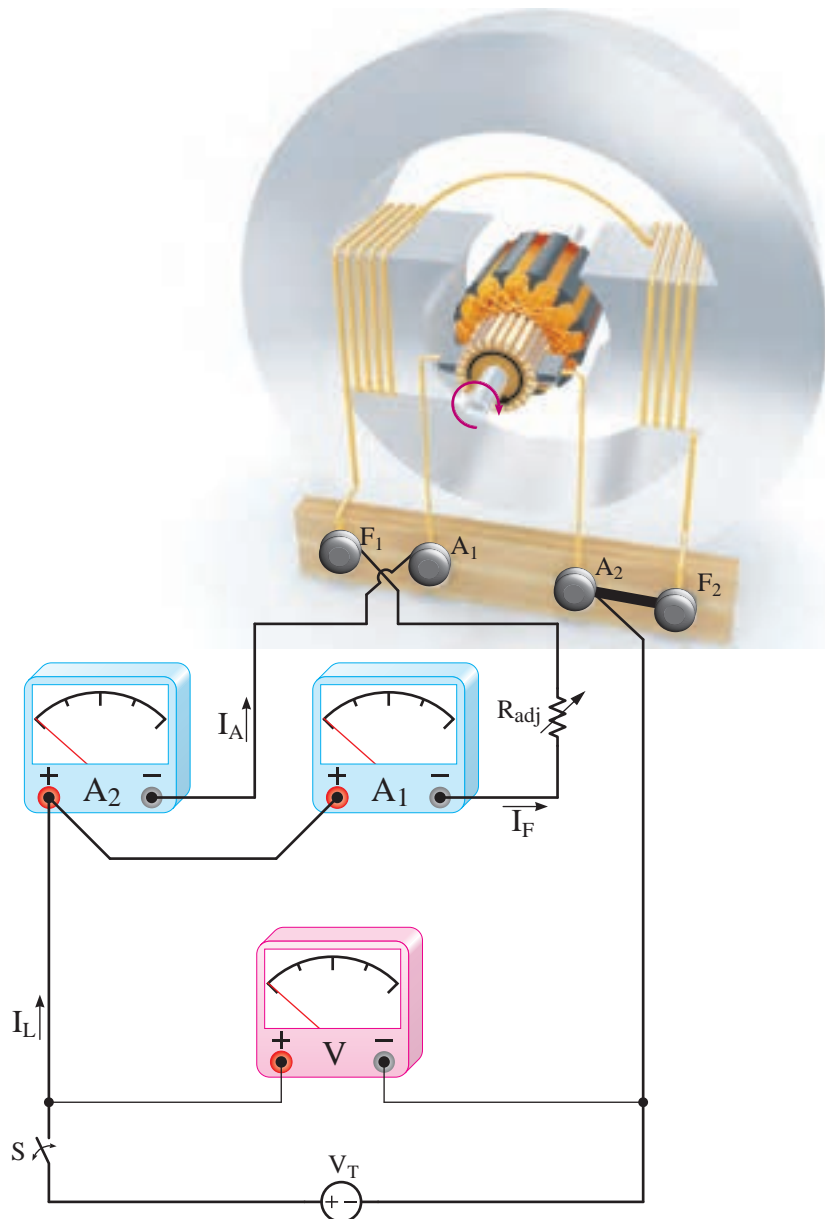
### شنت



شکل ۱۹- ۴ علامت اختصاری موتور شنت

طرح ساختمانی موتور شنت در شکل (۲۰- ۴) نشان داده شده است.

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- ۴) نشان داده شده است.



شکل ۲۰- ۴ طرح ساختمانی موتور شنت

از اثرات خودالقایی  $L_A$  و  $L_F$  صرف نظر خواهد شد.  
با نوشتن KCL برای گره مدار تحریک و آرمیچر  
معادله (۴-۱۵) به دست می آید.

$$(۴-۱۵) \quad -I_L + I_A + I_F = 0 \quad (\text{KCL})$$

با به کار بردن قانون اهم مقادیر جریان های  $I_A$  و  $I_F$   
به دست خواهد آمد.

$$(۴-۱۶) \quad I_F = \frac{V_T}{R_F + R_{adj}}$$

جریان آرمیچر  $I_A$  از سمت  $V_T$  به سوی  $E_A$  جاری  
است. پس  $V_T > E_A$  می باشد و خواهیم داشت:

$$(۴-۱۷) \quad I_A = \frac{V_T - E_A}{R_A}$$

از رابطه  $P_{in} = V_T \cdot I_L$  جریان  $I_L$  به دست می آید.

$$(۴-۱۸) \quad I_L = \frac{P_{in}}{V_T}$$

تلفات تحریک از رابطه (۴-۱۳) و تلفات آرمیچر از  
رابطه (۴-۱۴) هم چنان قابل محاسبه است.

$$P_F = (R_F + R_{adj}) I_F^2$$

$$P_A = R_A I_A^2$$

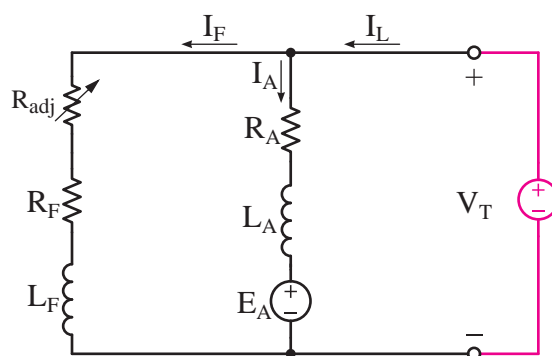
**مثال ۷-۴** - موتور شنت  $V = ۲۰۰$ ،  $۱۰$  آمپری با  
مدار الکتریکی معادل مطابق شکل (۴-۲۲) در نظر  
است. مطلوب است:

الف) جریان مدار تحریک  $I_F$

سیم پیچی تحریک با تعداد دور زیاد برای جریان کم  
به دور قطب ها پیچیده شده است. سیم پیچی تحریک  
با سیم پیچی آرمیچر به صورت موازی ارتباط داده شده  
است. برای تغییر و تنظیم جریان تحریک، مقاومت  
تنظیم کننده جریان تحریک  $R_{adj}$  در مدار تحریک قرار  
داده شده است و برای اندازه گیری جریان های تحریک  
و آرمیچر از آمپر مترهای  $A_A$  و  $A_F$  و برای اندازه گیری  
ولتاژ  $V_T$  از ولت متر  $V$  استفاده شده است.

### ۱- ۱۱- ۴ مدار الکتریکی معادل

مدار الکتریکی معادل موتور شنت با توجه به طرح  
ساختمانی شکل (۴-۲۰) در شکل (۴-۲۱) نشان  
داده شده است.

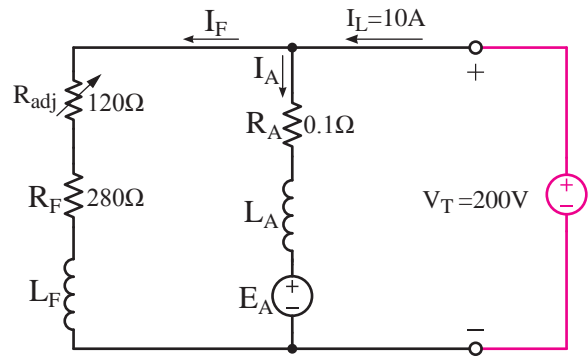


شکل ۲۱- ۴ مدار الکتریکی معادل موتور شنت

مدار الکتریکی معادل موتور شنت را با روش  
پتانسیل گره یا روش های دیگر می توان تحلیل  
کرد. معمولاً در تحلیل مدار الکتریکی معادل اثرات  
مغناطیسی عکس العمل آرمیچر و کموتاسیون به دلیل  
پیچیدگی محاسبات در نظر گرفته نمی شود. روش  
متداول اندازه گیری اثرات مغناطیسی استفاده از منحنی  
مشخصه های موتور است. جریان موتور DC است و  
فرکانس ندارد؛ لذا برای نوشتن معادلات جریان و ولتاژ

(ب) نیروی محرکه القایی آرمیچر  $E_A$

(پ) تلفات تحریک و آرمیچر



شکل ۲۲-۴

حل:

- با قانون اهم جریان تحریک به دست می آید.

$$I_F = \frac{V_T}{R_F + R_{adj}} = \frac{200}{280 + 120} = 0.5 \text{ [A]}$$

- با نوشتن KCL برای گره مدار تحریک و آرمیچر،  
جریان آرمیچر به دست خواهد آمد.

$$\text{KCL) } -I_L + I_A + I_F = 0$$

$$-10 + I_A + 1 = 0$$

$$I_A = 9 \text{ [A]}$$

- با نوشتن جریان آرمیچر، نیروی محرکه القایی  
آرمیچر به دست می آید.

$$I_A = \frac{V_T - E_A}{R_A}$$

$$9 = \frac{200 - E_A}{0.1}$$

$$9 \times 0.1 = 200 - E_A$$

$$E_A = 200 - 9 \times 0.1 = 200.9 \text{ [V]}$$

- اکنون تلفات تحریک و آرمیچر به دست می آید.

$$P_F = (R_F + R_{adj}) I_F^2$$

$$P_F = (280 + 120) 1^2 = 400 \text{ [W]}$$

$$P_A = R_A I_A^2$$

$$P_A = 0.1 \times 9^2 = 8.1 \text{ [W]}$$

#### تمرین ۴-۴

۱- یک موتور شنت  $4 \text{ KW}$ ،  $250 \text{ V}$  با  
بازده  $80\%$  و مقاومت آرمیچر  $0.5 \Omega$  و تحریک  
 $R_A + R_{adj} = 250 \Omega$  مفروض است. مطلوب است:

(الف) جریان موتور

(ب) توان الکترومغناطیسی

(پ) تلفات ثابت

۲- یک موتور شنت در اتصال به شبکه  $220 \text{ V}$  ولتی  
جریان  $10 \text{ A}$  دریافت می کند و با سرعت  
 $1200 \text{ RPM}$  می گردد. در صورتی که مقاومت مدار  
آرمیچر  $0.2 \Omega$  و مدار تحریک  $440 \Omega$  باشد، مطلوب  
است:

(الف) جریان مدار آرمیچر

(ب) نیروی محرکه القایی آرمیچر

(پ) بازده در صورتی که تلفات ثابت  $150 \text{ W}$  باشد.

#### ۲- ۱۱- ۴- راه اندازی

برای راه اندازی موتور شنت پس از یادداشت مقادیر  
نامی ولتاژ، جریان و سرعت از پلاک مشخصات موتور،  
مدار الکتریکی آرمیچر و تحریک را مطابق شکل  
(۲۳-۴) ببندید.

باعث می‌شود موتور شنت رفتاری شبیه به رفتار موتور مستقل از خود داشته باشد و منحنی مشخصه‌های آنها یکسان باشد.

#### ۴ - ۱۱ - ۴ - کاربرد

منحنی مشخصه‌های موتور شنت مشابه موتورهای تحریک مستقل می‌باشد. لذا کاربرد و ویژگی‌هایی که در بخش ۴ - ۱۰ - ۴ برای موتور تحریک مستقل ارائه شد برای موتور شنت نیز صدق می‌کند.

#### پرسش ۵ - ۴

##### پرسش‌های کامل کردنی

- ۱ - در موتور ..... مدار ..... با مدار ..... به صورت موازی ارتباط پیدا می‌کند.
- ۲ - به هنگام راه‌اندازی موتور شنت مقاومت  $R_{adj}$  را در ..... قرار می‌دهند.
- ۳ - افزایش بیش از حد مقاومت مدار ..... یا قطع مدار ..... باعث مهار گسستگی می‌شود.

##### پرسش‌های صحیح، غلط

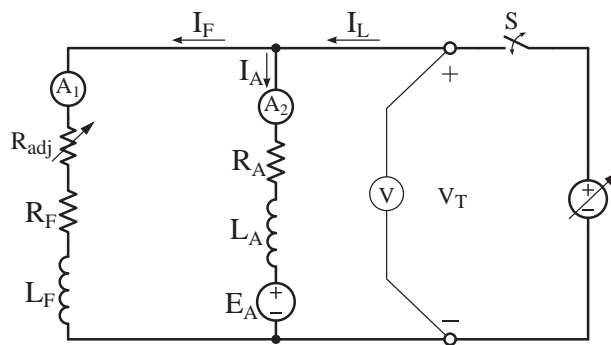
- ۱ - برای تحلیل مدار الکتریکی معادل شنت در حالت پایدار اثرات خود القایی  $L_A$  و  $L_F$  را در نظر می‌گیرند.

☐ صحیح ☐ غلط

- ۲ - پس از راه‌اندازی برای تنظیم سرعت مقاومت  $R_{adj}$  را تغییر می‌دهند.

☐ صحیح ☐ غلط

- ۳ - افزایش بیش از حد مقاومت  $R_{adj}$  در موتور شنت



شکل ۲۳ - ۴ مدار الکتریکی راه‌اندازی موتور شنت

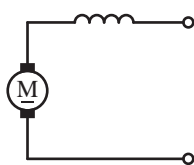
مقاومت متغیر  $R_{adj}$  را در حداقل خود قرار دهید و پس از بستن کلید S ولتاژ منبع متغیر را به آرامی زیاد نمایید تا ولت‌متر V ولتاژ نامی موتور را نشان دهد. در صورتی که سرعت موتور به سرعت بی‌باری  $n_0$  نرسیده بود با افزایش مقاومت  $R_{adj}$ ، جریان تحریک را کاهش دهید تا سرعت افزایش یابد و به سرعت موردنظر برسد. بدیهی است افزایش بیش از حد مقاومت مدار تحریک یا قطع مدار تحریک مطابق آنچه که در بخش ۴ - ۵ توضیح داده شد باعث بروز مشکلاتی خواهد شد.

#### ۳ - ۱۱ - ۴ - آزمایش بارداری

نحوه انجام آزمایش بارداری و نتایج حاصل از آن در موتورهای شنت دقیقاً شبیه به موتور تحریک مستقل می‌باشد. بنابراین مشخصه‌های الکترومکانیکی شکل (۱۵ - ۴)، الکترومغناطیسی شکل (۱۶ - ۴) و گشتاور - سرعت شکل (۱۷ - ۴) موتور تحریک مستقل برای موتور تحریک موازی نیز صادق است. در واقع در موتور تحریک مستقل از دو منبع برای تغذیه مدار آرمیچر و تحریک استفاده می‌شود در حالی که در موتور شنت از یک منبع برای تغذیه مدار آرمیچر و تحریک استفاده شده است. از آنجایی که در هر دو موتور جریان آرمیچر  $I_A$  و جریان تحریک  $I_F$  ارتباطی با یکدیگر پیدا نمی‌کنند

مجاز است.

(۲۴ - ۴) نشان داده شده است.



☐ غلط

☐ صحیح

### پرسش‌های تشریحی

۱ - علامت اختصاری موتور شنت را رسم کنید و اجزای آن را شرح دهید.

۲ - مدار الکتریکی معادل موتور شنت را رسم کنید. اجزای آن را شرح دهید.

۳ - قبل از راه‌اندازی موتور شنت چه باید کرد؟

۴ - نحوه راه‌اندازی موتور شنت را شرح دهید.

۵ - اگر پس از راه‌اندازی بخواهیم سرعت موتور شنت را افزایش دهیم چه باید کرد؟

۶ - چرا رفتار موتورهای شنت و مستقل مشابه یکدیگر است؟

۷ - کاربرد موتورهای شنت را بنویسید.

۸ - قطع مدار تحریک چه مشکلاتی برای موتور شنت ایجاد می‌کند؟

۹ - چرا نمی‌توان مقاومت مدار تحریک موتور شنت را بیش از حد زیاد کرد؟

۱۰ - نحوه انجام آزمایش بارداری موتور شنت را شرح دهید.

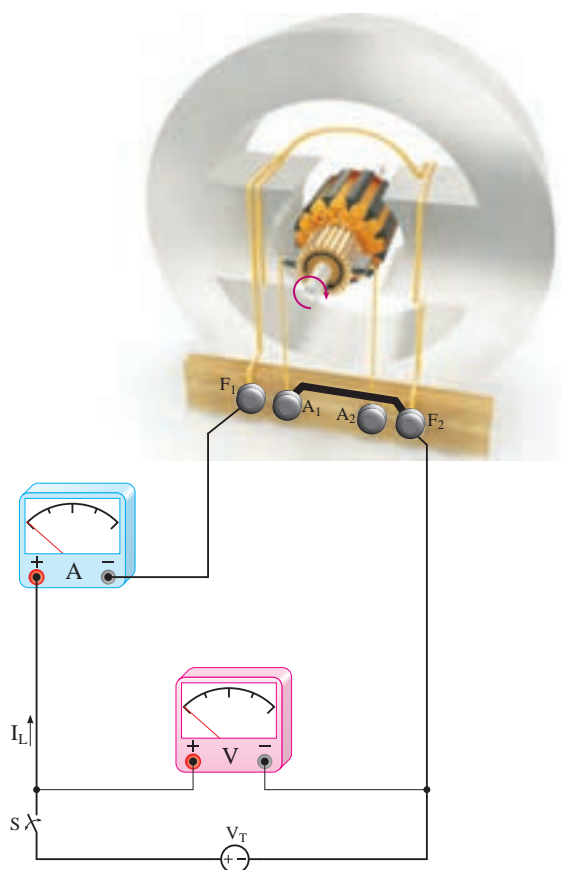
### ۱۲ - ۴ - موتورهای جریان مستقیم با تحریک

#### 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

شکل ۲۴ - ۴ علامت اختصاری موتور سری

طرح ساختمانی موتور سری در شکل (۲۵ - ۴) نشان داده شده است.



شکل ۲۵ - ۴ طرح ساختمانی موتور سری

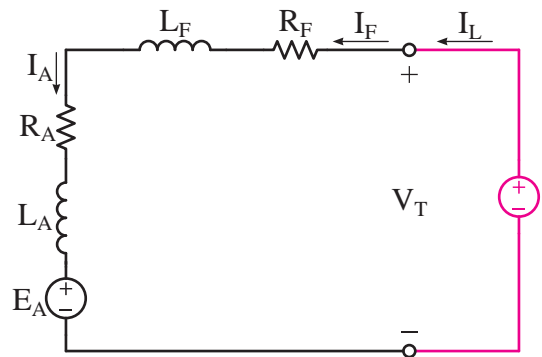
سیم‌پیچی تحریک با تعداد دور کم برای جریان زیاد به دور قطب‌ها پیچیده شده است. سیم‌پیچی تحریک با سیم‌پیچی آرمیچر به صورت سری ارتباط داده شده



است. برای اندازه‌گیری جریان مدار تحریک و آرمیچر از آمپر متر A و برای اندازه‌گیری ولتاژ منبع  $V_T$  از ولت‌متر V استفاده شده است.

#### ۱ - ۱۲ - ۴ - مدار الکتریکی معادل

مدار الکتریکی معادل موتور سری با توجه به طرح ساختمانی شکل (۴ - ۲۵) در شکل (۴ - ۲۶) نشان داده شده است.



شکل ۴ - ۲۶ 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 (۴ - ۱۹) به‌دست می‌آید.

$$\text{KVL) } -V_T + R_F I_1 + R_A I_1 + E_A = 0 \quad (4-19)$$

جریان حلقه  $I_1$  از محل جریان‌های  $I_F$  و  $I_A$  و  $I_L$  می‌گذرد و رابطه (۴ - ۲۰) به‌دست می‌آید.

$$I_A = I_F = I_L = I_1 \quad (4-20)$$

با توجه به رابطه (۴ - ۲۰) جریان  $I_L$  جایگزین  $I_1$  در رابطه (۴ - ۱۹) می‌شود.

$$-V_T + R_F I_L + R_A I_L + E_A = 0$$

از  $I_L$  فاکتور گرفته می‌شود و رابطه (۴ - ۲۱) به‌دست می‌آید.

$$-V_T + (R_F + R_A) I_L + E_A = 0 \quad (4-21)$$

تلفات تحریک از رابطه (۴ - ۲۲) و تلفات آرمیچر از رابطه (۴ - ۲۳) به‌دست می‌آید.

$$P_F = R_F I_F^2 \quad (4-22)$$

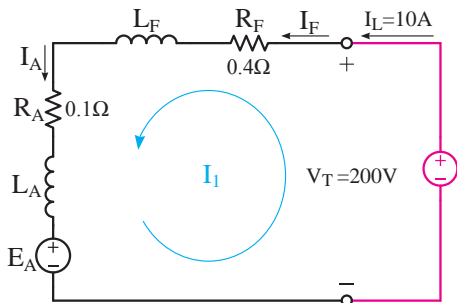
$$P_A = R_A I_A^2 \quad (4-23)$$

**مثال ۸ - ۴ -** موتور جریان مستقیم سری  $V = 200$ ،  $A = 10$  با مدار الکتریکی معادل مطابق شکل (۴ - ۲۷) در نظر است. مطلوب است:

(الف) جریان مدار آرمیچر تحریک

(ب) نیروی محرکه القایی آرمیچر

(پ) تلفات تحریک و آرمیچر



شکل ۴ - ۲۷

حل:

- منبع ولتاژ با تحریک و آرمیچر مدار سری تشکیل داده است. پس:

$$I_A = I_F = I_L = 10 \text{ [A]}$$

- برای حلقه مدار الکتریکی معادل KVL می نویسیم و از آن  $V_T$  به دست می آید.

$$-V_T + (R_F + R_A)I_L + E_A = 0$$

$$-200 + (0.1 + 0.4) \times 10 + E_A = 0$$

$$E_A = 200 - (0.5) \times 10 = 195 \text{ [V]}$$

- تلفات تحریک از رابطه (۲۲ - ۴) به دست می آید.

$$P_F = R_F I_F^2$$

$$P_F = 0.4 \times 10^2 = 40 \text{ [W]}$$

- تلفات آرمیچر از رابطه (۲۳ - ۴) به دست می آید.

$$P_A = R_A I_A^2$$

$$P_A = 0.1 \times 10^2 = 10 \text{ [W]}$$

## تمرین ۵ - ۴

۱ - یک موتور سری در اتصال به شبکه  $V = 110$  جریان  $A = 10$  دریافت و با سرعت  $600 \text{ RPM}$  می گردد. اگر مقاومت مدار آرمیچر  $0.4 \Omega$  و مقاومت مدار تحریک  $0.6 \Omega$  باشد مطلوب است:

الف) نیروی محرکه القایی آرمیچر

ب) بازده در صورتی که تلفات ثابت  $W = 50$  باشد.

۲ - یک موتور سری  $1 \text{ kW}$ ،  $V = 250$  با بازده  $80\%$  و مقاومت مدار تحریک و آرمیچر روی هم  $0.5 \Omega$  مفروض

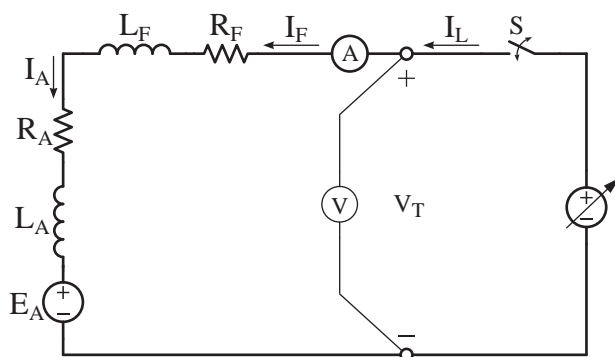
است. مطلوب است:

الف) جریان موتور

ب) تلفات ثابت

## ۲ - ۱۲ - ۴ - راه اندازی

برای راه اندازی 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 - ۴) ببندید.



شکل ۲۸ - ۴ مدار الکتریکی راه اندازی موتور سری

بارنامی را به موتور اعمال کنید. پس از بستن کلید S ولتاژ منبع متغیر را به تدریج زیاد کنید تا ولت متر V ولتاژ نامی و آمپر متر 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 راه اندازی می کنند و برای جلوگیری از بی بار شدن، آنها را به صورت مستقیم یا با چرخ دنده به بار متصل می کنند.

در صورتی که موتور سری بدون بار راه اندازی شود جریان موتور کاهش خواهد یافت. از آنجایی که  $I_A = I_F = I_L$  می باشد جریان مدار تحریک کم

می‌شود و فوران قطب‌ها کاهش می‌یابد و مطابق آنچه که در بخش ۵ - ۴ توضیح داده شد سرعت موتور بیش از حد افزایش می‌یابد و پدیده فرار روی می‌دهد.

### ۳ - ۱۲ - ۴ - آزمایش بارداری

برای 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 سرعت رتور را توسط دورسنج و جریان آرمیچر را توسط آمپر متر و گشتاور بار را توسط گشتاورسنج اندازه‌گیری و نتایج را در جدولی یادداشت کنید. این کار را تا جایی ادامه دهید که موتور بدون بار نشود.

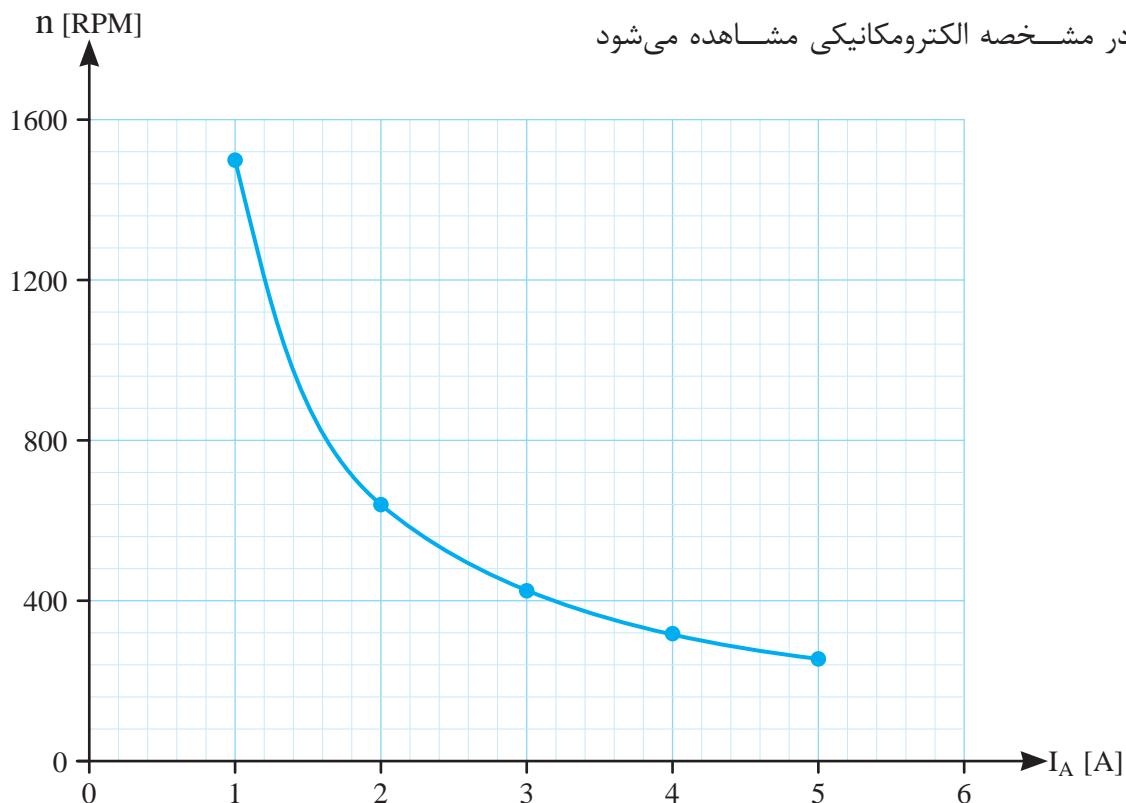
جدول (۲ - ۴) نتایج آزمایش بارداری موتور تحریک سری  $V = 220$ ،  $kW = 1$ ،  $A = 5$  را نشان می‌دهد.

$V_T$	۲۲۰ V 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 - ۴ نتایج آزمایش بارداری موتور تحریک سری

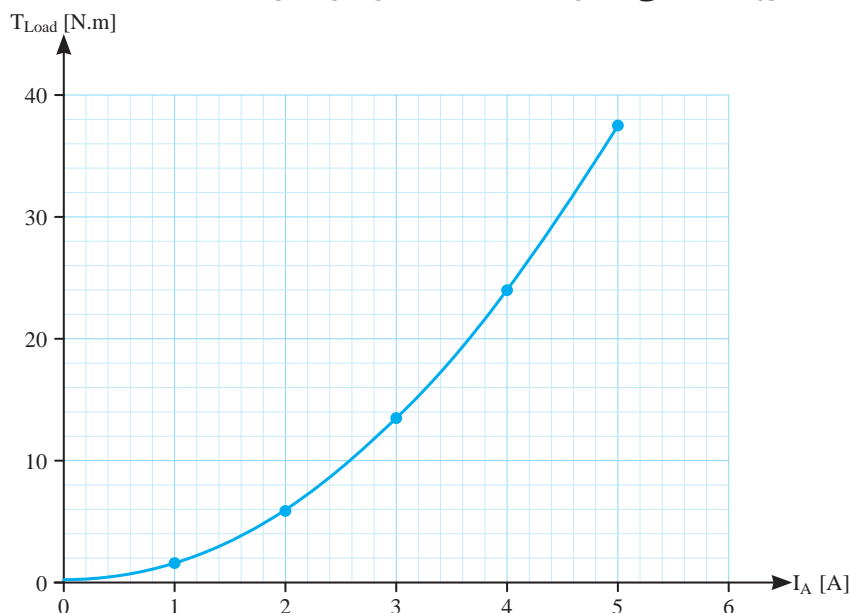
در اثر افزایش گشتاور بار، موتور سری سرعت خود را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد ولی جریان آرمیچر افزایش قابل ملاحظه‌ای نداشته است.

نقاط نشان‌دهنده مقدار هر سرعت  $n$  به ازای جریان آرمیچر  $I_A$  معین جدول (۲ - ۴) در شکل (۲۹ - ۴) تحت عنوان مشخصه الکترومکانیکی نشان داده شده است. در مشخصه الکترومکانیکی مشاهده می‌شود



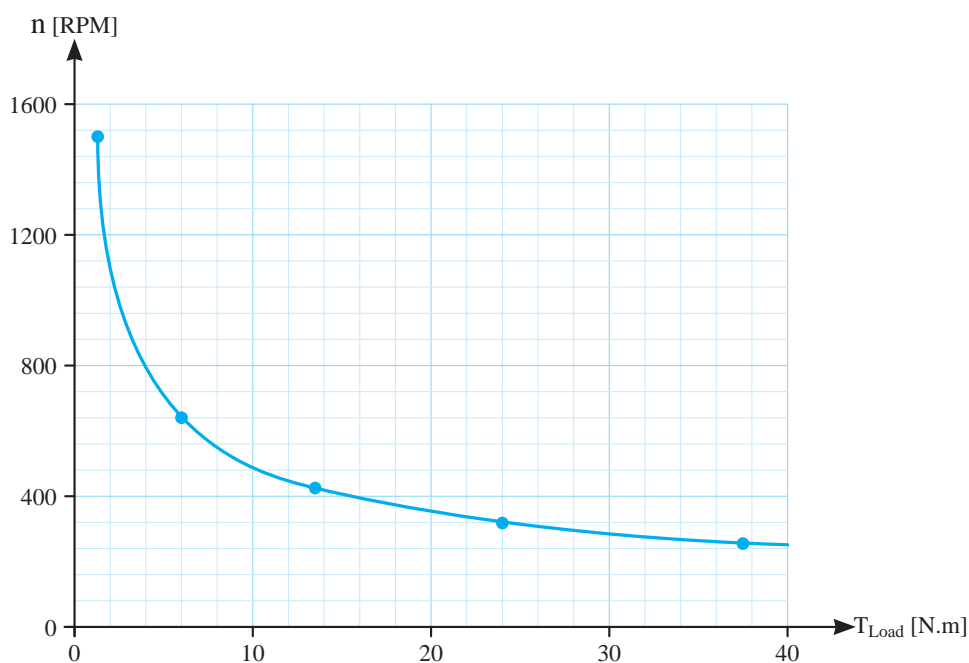
شکل ۲۹ - ۴ منحنی مشخصه الکترومکانیکی موتور سری

است. در مشخصه الکترومغناطیسی مشاهده می‌شود  
به ازای افزایش گشتاور بار  $T_{load}$  جریان آرمیچر  $I_A$   
افزایش قابل ملاحظه‌ای نداشته است.



شکل ۴-۳۰ منحنی مشخصه الکترومغناطیسی موتور سری

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 ۴-۳۱ منحنی مشخصه گشتاور - سرعت موتور تحریک سری

نقاط نشان‌دهنده مقدار هر گشتاور  $T_{load}$  به ازای  
جریان  $I_A$  معین جدول (۴-۲) در شکل (۴-۳۰)  
تحت عنوان مشخصه الکترومغناطیسی نشان داده شده

نقاط نشان‌دهنده مقدار هر سرعت  $n$  به ازای گشتاور  
 $T_{load}$  معین جدول (۴-۱) در شکل (۴-۳۱)  
تحت عنوان منحنی مشخصه گشتاور سرعت نشان داده

**فعالیت ۲-۴** - با استفاده از برنامه صفحه گسترده Excel از برنامه‌های مجموعه Microsoft Office منحنی مشخصه‌های مربوط به جدول (۲-۴) را رسم نمایید.

#### ۴-۱۲-۴ کاربرد

موتورهای سری دارای تغییرات سرعت زیادی از بی‌باری تا بار کامل می‌باشند و گشتاور راه‌اندازی آنها بسیار زیاد است. این موتورها با افزایش گشتاور بار در محدوده بارنامی سرعت خود را کاهش داده و جریان خود را افزایش می‌دهند. موتورهای سری در جاهایی به کار 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 ۶-۴

#### پرسش‌های کامل کردنی

- ۱ - در موتور سری مدار ..... با مدار آرمیچر ..... ارتباط می‌یابد.
- ۲ - به منظور جلوگیری از بروز پدیده فرار، موتور تحریک را ..... راه‌اندازی می‌کنند.
- ۳ - برای جلوگیری از بی‌بار شدن، موتور سری را به صورت ..... یا با ..... به بار متصل می‌کنند.
- ۴ - در موتور سری با افزایش گشتاور بار سرعت ..... و جریان آرمیچر ..... می‌یابد.

#### پرسش‌های صحیح، غلط

- ۱ - در موتورهای سری مدار آرمیچر با مدار تحریک،

سری می‌شود.

☐ صحیح ☐ غلط

۲ - رابطه  $V_T + (R_A + R_F)I_A - E_A = 0$  در موتور تحریک سری صادق است.

☐ صحیح ☐ غلط

۳ - تلفات مسی در موتور تحریک سری از رابطه  $(R_A + R_F)I_A^2$  به دست می‌آید.

☐ صحیح ☐ غلط

#### پرسش‌های تشریحی

- ۱ - علامت اختصاری سری را رسم کنید و اجزای آن را شرح دهید.
- ۲ - مدار الکتریکی معادل موتور سری را رسم کنید اجزای آن را شرح دهید.
- ۳ - قبل از راه‌اندازی موتور سری چه نکاتی را باید مورد توجه قرار داد؟
- ۴ - نحوه راه‌اندازی موتور سری را شرح دهید.
- ۵ - چرا موتورهای سری را زیر بار راه‌اندازی می‌کنند؟
- ۶ - آیا اتصال موتور سری توسط تسمه به بار صحیح است؟ چرا؟
- ۷ - نحوه انجام آزمایش بارداری موتور سری را شرح دهید.
- ۸ - از مقایسه منحنی مشخصه‌های موتور سری با موتور تحریک شنت (یا مستقل) چه نتیجه‌ای به دست می‌آید؟

۹ - کاربرد موتور سری را بنویسید؟

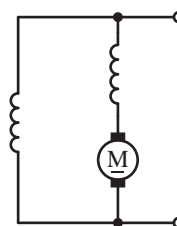
۱۰ - ویژگی‌های موتور سری را بنویسید؟

## ۱۳- ۴- موتورهای جریان مستقیم با تحریک

### کمپوند

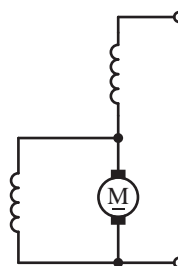
موتورهای جریان مستقیم با تحریک کمپوند را به اختصار «موتور کمپوند» گویند. در موتور کمپوند فوران قطب‌ها «ترکیبی»<sup>۱</sup> از فوران دو سیم‌پیچی تحریک موازی و سری است.

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 (۴-۳۲) نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۲ موتور کمپوند با شنت بلند

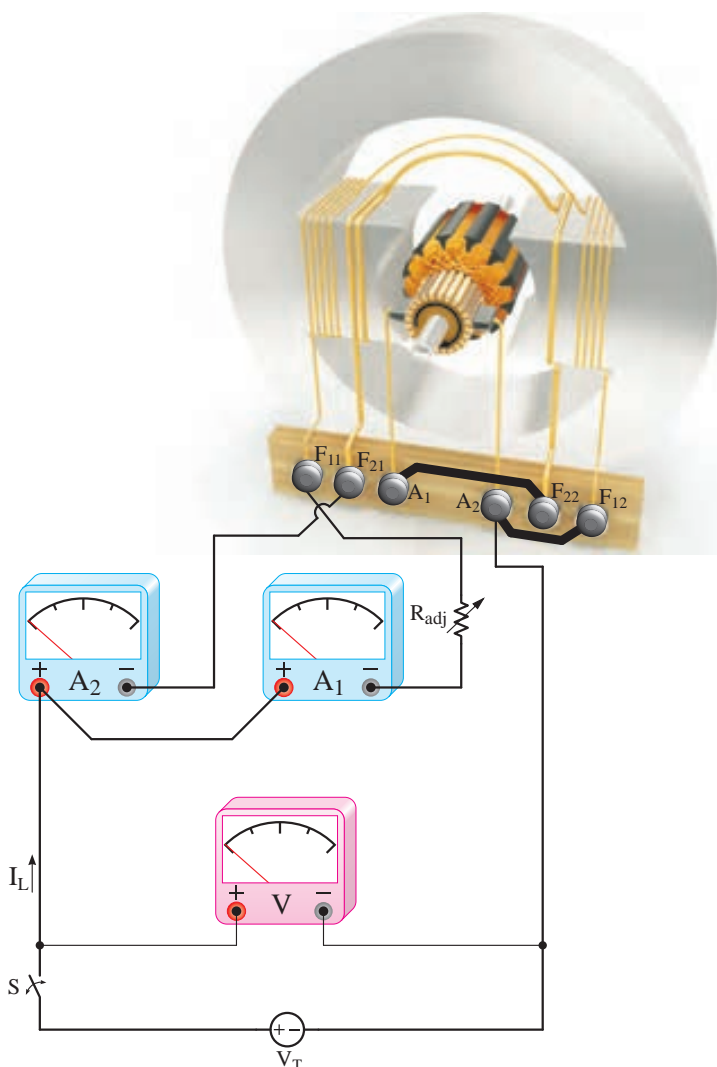
اگر سیم‌پیچی آرمیچر ابتدا با سیم‌پیچی تحریک موازی و سپس با سیم‌پیچی سری ارتباط پیدا کند موتور را «کمپوند با شنت کوتاه» گویند. علامت اختصاری موتور کمپوند با شنت کوتاه در شکل (۴-۳۳) نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۳ 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. در صورتی که فوران سیم‌پیچی تحریک موازی و سری هم جهت نباشد در این صورت موتور، «کمپوند نقصانی» خواهد شد.

طرح ساختمانی موتور کمپوند با شنت بلند در شکل (۴-۳۴) نشان داده شده است.

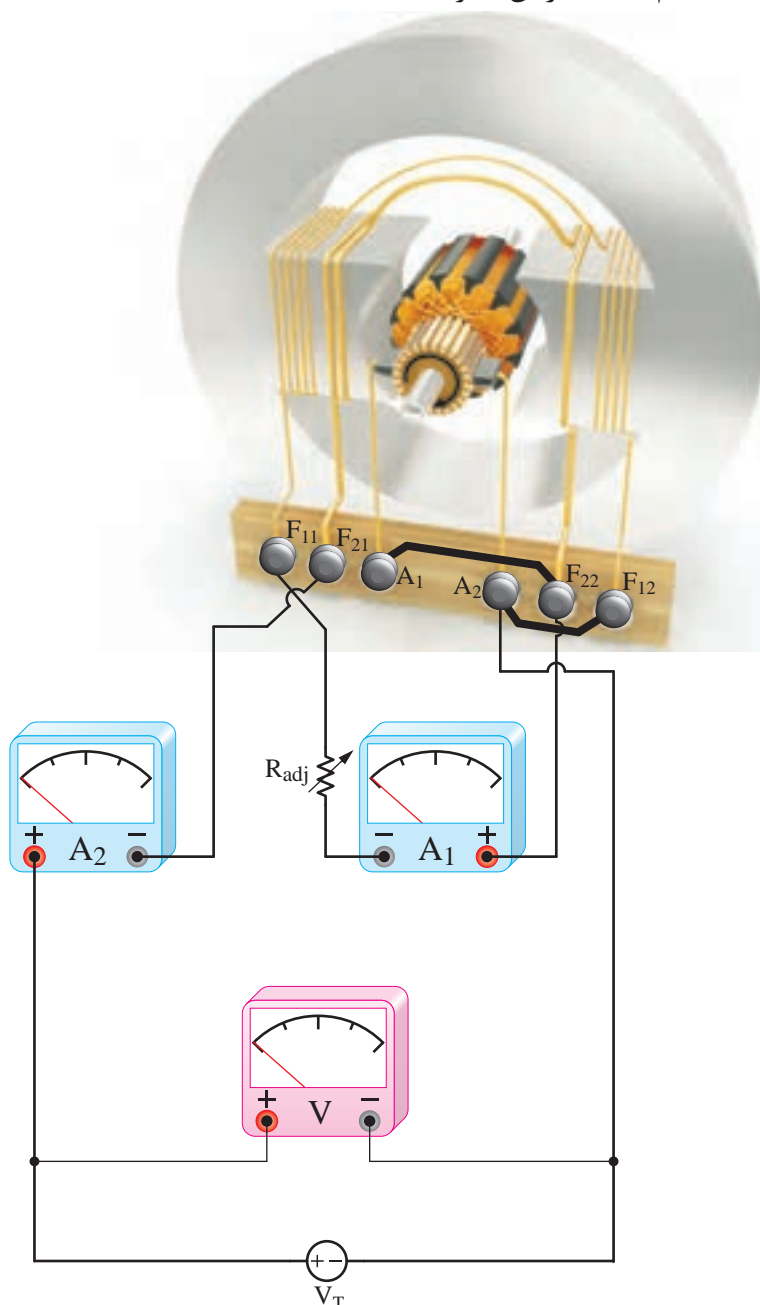


شکل ۴-۳۴ طرح ساختمانی موتور کمپوند با شنت بلند

$R_{adj}$  استفاده شده است و برای اندازه‌گیری جریان‌های تحریک موازی و آرمیچر از آمپرترهای  $A_1$  و  $A_2$  و برای اندازه‌گیری ولتاژ  $V_T$  از ولت‌متر  $V$  استفاده شده است.

طرح ساختمانی موتور کمپوند با شنت کوتاه در شکل (۳۵ - ۴) نشان داده شده است.

سیم‌پیچی تحریک سری با تعداد دور کم برای جریان زیاد و سیم‌پیچی تحریک موازی با تعداد دور زیاد برای جریان‌های کم به دور قطب‌ها پیچیده شده است. سروت‌ه سیم‌پیچی تحریک موازی با حروف  $F_{11}$  و  $F_{21}$  و سیم‌پیچی تحریک سری با حروف  $F_{22}$  و  $F_{12}$  مشخص شده است. برای تغییر و تنظیم جریان سیم‌پیچی تحریک موازی از مقاومت تنظیم‌کننده جریان تحریک

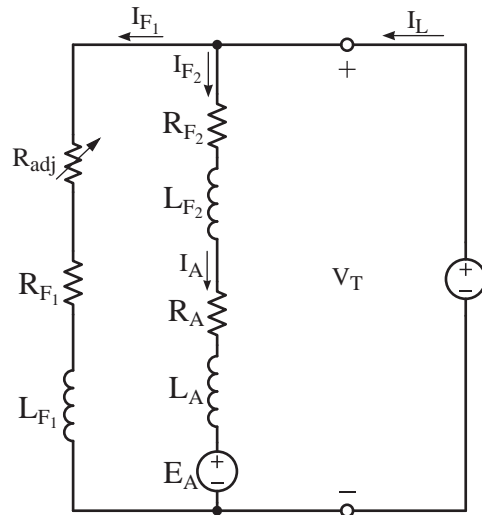


شکل ۳۵ - ۴ طرح ساختمانی موتور کمپوند با شنت کوتاه

## ۱ - ۱۳ - ۴ - مدار الکتریکی معادل موتور کمپوند

با شنت بلند

مدار الکتریکی معادل موتور کمپوند با شنت بلند با توجه به طرح ساختمانی شکل (۳۴ - ۴) در شکل (۳۶ - ۴) نشان داده شده است.



شکل ۳۶ - ۴ مدار الکتریکی معادل موتور کمپوند با شنت بلند در این شکل:

$R_{F1}$  مقاومت اهمی مدار تحریک موازی

$L_{F1}$  ضریب خودالقایی سیمپیچ تحریک موازی

$R_{F\gamma}$  مقاومت اهمی مدار تحریک سری

$L_{F\gamma}$  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 که در حالت پایدار جریان موتور DC است و فرکانس ندارد لذا در نوشتن معادلات جریان و ولتاژ از اثرات خودالقایی  $L_{F1}$ ،  $L_{F\gamma}$  و  $L_A$  صرف‌نظر خواهد شد.

با نوشتن KCL برای گره مدار تحریک سری و موازی با منبع ولتاژ، معادله (۲۴ - ۴) به دست می‌آید.

$$KCL) -I_L + I_{F\gamma} + I_{F1} = 0 \quad (4-24)$$

مدار تحریک سری با مدار آرمیچر، سری شده است. لذا:

$$I_A = I_{F\gamma} \quad (4-25)$$

با به کار بردن قانون اهم مقادیر جریان‌ها به دست خواهد آمد.

$$I_{F1} = \frac{V_T}{R_{F1} + R_{adj}} \quad (4-26)$$

$$I_A = I_{F\gamma} = \frac{V_T - E_A}{R_A + R_{F\gamma}} \quad (4-27)$$

از رابطه  $P_{in} = V_T \cdot I_L$  جریان  $I_L$  به دست می‌آید.

$$I_L = \frac{P_{in}}{V_T} \quad (4-28)$$

تلفات تحریک موازی از رابطه (۲۹ - ۴) و تلفات تحریک سری از رابطه (۳۰ - ۴) و تلفات آرمیچر از رابطه (۳۱ - ۴) به دست می‌آیند.

$$P_{F1} = (R_{F1} + R_{adj}) I_{F1}^2 \quad (4-29)$$

$$P_{F\gamma} = R_{F\gamma} I_{F\gamma}^2 \quad (4-30)$$

$$P_A = R_A I_A^2 \quad (4-31)$$

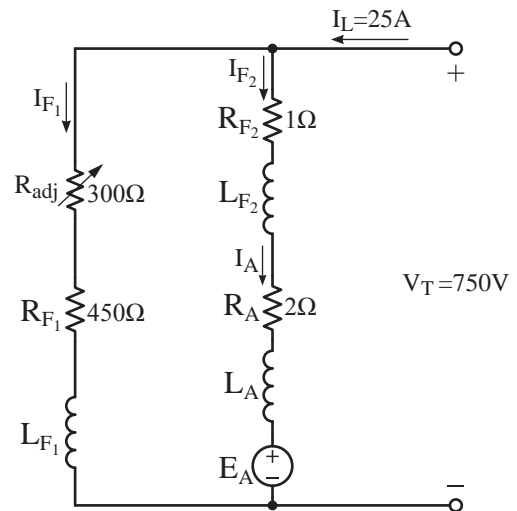


مثال ۹-۴ - موتور کمپوند با شنت بلند  $V = 750$ .

۲۵ A با مدار الکتریکی معادل مطابق شکل (۳۷-۴) در نظر است. مطلوب است:

الف) نیروی محرکه القایی آرمیچر

ب) بازده در صورتی که تلفات ثابت  $W = 1522$  باشد.



شکل ۳۷-۴

حل:

- برای محاسبه نیروی محرکه الکتریکی ابتدا جریان مدار تحریک موازی و سپس جریان مدار تحریک سری و آرمیچر به دست می آید.

$$I_{F1} = \frac{V_T}{R_{F1} + R_{adj}} = \frac{750}{450 + 300} = 1 [A]$$

$$KCL) -I_L + I_{F1} + I_{F2} = 0$$

$$-25 + I_{F1} + 1 = 0$$

$$I_{F2} = 24 [A]$$

$$I_{F2} = I_A = 24 [A]$$

$$I_A = I_{F2} = \frac{V_T - E_A}{R_A + R_{F2}}$$

$$24 = \frac{750 - E_A}{1 + 2}$$

$$24 \times 3 = 750 - E_A$$

$$E_A = 750 - 72 = 678 [V]$$

- برای محاسبه بازده، تلفات مسی نیاز می باشد. لذا تلفات تحریک ها و آرمیچر را از روابط (۲۹-۴)، (۳۰-۴) و (۳۱-۴) به دست می آوریم.

$$P_{F1} = (R_{F1} + R_{adj}) I_{F1}^2$$

$$P_{F1} = (450 + 300) \times 1^2 = 750 [W]$$

$$P_{F2} = R_{F2} I_{F2}^2$$

$$P_{F2} = 1 \times 24^2 = 576 [W]$$

$$P_A = R_A I_A^2$$

$$P_A = 2 \times 24^2 = 1152 [W]$$

- تلفات کل از رابطه (۳-۳) به دست می آید.

$$\Delta P = P_{core} + P_{F1} + P_{F2} + P_A$$

$$\Delta P = 1522 + 750 + 576 + 1152 = 4000 [W]$$

- توان ورودی از رابطه (۱-۴) به دست می آید.

$$P_{in} = V_T \cdot I_L$$

$$P_{in} = 750 \times 25 = 18750 [W]$$

- توان خروجی از رابطه (۴-۳) به دست می آید.

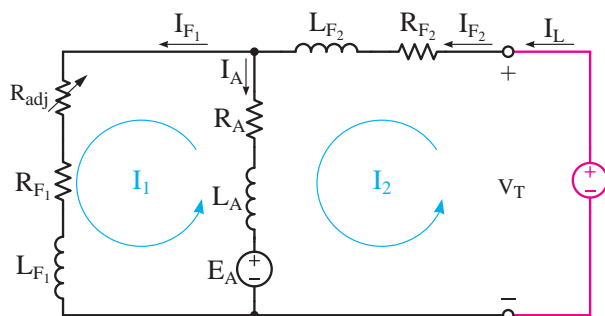
$$\Delta P = P_{in} - P_{out}$$

$$P_{out} = P_{in} - \Delta P$$

$$P_{out} = 18750 - 4000 = 14750 [W]$$

- بازده از رابطه (۶-۳) به دست می آید.

عقربه‌های ساعت انتخاب شده است.



شکل ۳۸ - ۴ مدار الکتریکی معادل موتور کمپوند با شنت کوتاه  
جریان موتور DC است و فرکانس ندارد. لذا در  
حالت پایدار برای نوشتن معادلات KVL از اثرات  
خودالقایی  $L_{F_1}$ ,  $L_{F_2}$  و  $L_A$  صرف نظر خواهد شد.  
با نوشتن KVL برای حلقه‌های  $I_1$  و  $I_2$  معادلات  
(۳۲ - ۴) و (۳۳ - ۴) به دست می‌آید.

$$\text{KVL1)} \quad R_{F_1} I_1 - E_A + R_A (I_1 - I_2) = 0 \quad (4-32)$$

$$\text{KVL2)} \quad -V_T + R_{F_2} I_2 + R_A (I_2 - I_1) + E_A = 0 \quad (4-33)$$

$$P_{F_1} = R_{F_1} I_{F_1}^2 \quad (4-38)$$

$$P_A = R_A I_A^2 \quad (4-39)$$

مثال ۱۰ - ۴ - موتور کمپوند با شنت کوتاه  
۴ KW، ۲۵۰ V با بازده ۸۰٪ و مدار الکتریکی معادل  
مطابق شکل (۳۹ - ۴) در نظر است. مطلوب است:

الف - نیروی محرکه القایی آرمیچر  $E_A$

ب - تلفات ثابت  $P_{\text{mis}} + P_{\text{core}}$

$$\% \eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100$$

$$\% \eta = \frac{14750}{18750} \times 100 = 78\%$$

۲ - ۱۳ - ۴ - مدار الکتریکی معادل موتور کمپوند

با شنت کوتاه

مدار الکتریکی معادل موتور کمپوند با شنت کوتاه  
با توجه به طرح ساختمانی شکل (۳۵ - ۴) در شکل  
(۳۸ - ۴) نشان داده شده است.

مدار الکتریکی معادل موتور کمپوند با شنت کوتاه  
را با روش حلقه یا روش‌های دیگر می‌توان تحلیل کرد.  
برای شکل (۳۸ - ۴) حلقه‌های  $I_1$  و  $I_2$  در جهت حرکت

پس از حل معادلات (۳۲ - ۴) و (۳۳ - ۴) جریان  
حلقه‌های  $I_1$  و  $I_2$  به دست می‌آید و خواهیم داشت:

$$I_{F_2} = I_L = I_2 \quad (4-34)$$

$$I_{F_1} = I_1 \quad (4-35)$$

$$I_A = -I_1 + I_2 \quad (4-36)$$

تلفات تحریک سری از (۳۷ - ۴)، تلفات تحریک  
شنت از (۳۸ - ۴) و تلفات آرمیچر از رابطه (۳۹ - ۴)  
به دست می‌آید.

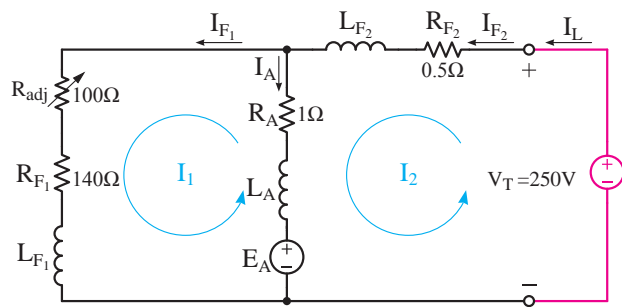
$$P_{F_2} = R_{F_2} I_{F_2}^2 \quad (4-37)$$

$$\text{KVL}1) \quad 241I_1 - E_A = 20$$

$$\text{KVL}2) \quad -I_1 + E_A = 220$$

$$240I_1 + 0 = 240$$

$$I_1 = \frac{240}{240} = 1[\text{A}]$$



شکل ۳۹ - ۴

- با قرار دادن  $I_1$  در یکی از معادلات KVL مقدار

$E_A$  به دست می آید.

حل:

$$\text{KVL}2) \quad -I_1 + E_A = 220$$

$$-1 + E_A = 220$$

$$E_A = 221[\text{V}]$$

- با محاسبه تلفات مسی و کل تلفات می توان تلفات

ثابت را به دست آورد.

- از رابطه بازده، توان ورودی به دست می آید و از

رابطه توان، جریان  $I_L$  محاسبه می شود. سپس با تشکیل

معادلات KVL، جریان ها و  $E_A$  به دست می آیند.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{4\text{kw}}{0.8} = 5[\text{kw}] = 5000[\text{w}]$$

$$P_{in} = V_T \cdot I_L$$

$$I_L = \frac{P_{in}}{V_T} = \frac{5000}{250} = 20[\text{A}]$$

$$\text{KVL}1) \quad (R_{adj} + R_{F1})I_1 - E_A + R_A(I_1 - I_2) = 0$$

$$\text{KVL}2) \quad -V_T + R_{F2}I_2 + R_A(I_2 - I_1) + E_A = 0$$

- با جایگزین کردن مقادیر معلوم و

$$\text{KVL}1 \text{ و } \text{KVL}2 \text{ در } I_L = I_2 = 20[\text{A}]$$

خواهیم داشت:

$$\text{KVL}1) \quad (100 + 140)I_1 - E_A + 1(I_1 - 20) = 0$$

$$\text{KVL}2) \quad -250 + 0.5(20) + 1(20 - I_1) + E_A = 0$$

- پس از ساده سازی معادلات KVL1 و KVL2 را

در یک دستگاه قرار می دهیم.

## تمرین ۴-۶

الف - نیروی محرکه القایی آرمیچر

ب - بازده در صورتی که تلفات ثابت  $W = 50$  باشد.

### ۳-۱۳-۴ - راهاندازی

راهاندازی و رفتار موتورهای کمپوند باشند بلند و کوتاه مشابه یکدیگر است. لذا به منظور تشریح راهاندازی، موتور کمپوند باشند 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 (۴-۴۰) ببندید.

۱ - یک موتور کمپوند باشند با شنت بلند

$40 \text{ KW}$ ،  $500 \text{ V}$  با بازده  $80\%$  و  $R_A = 0.4 \Omega$

$R_{F_1} = 0.1 \Omega$ ،  $R_{F_2} = 250 \Omega$  مفروض است.

مطلوب است:

الف - نیروی محرکه القایی آرمیچر

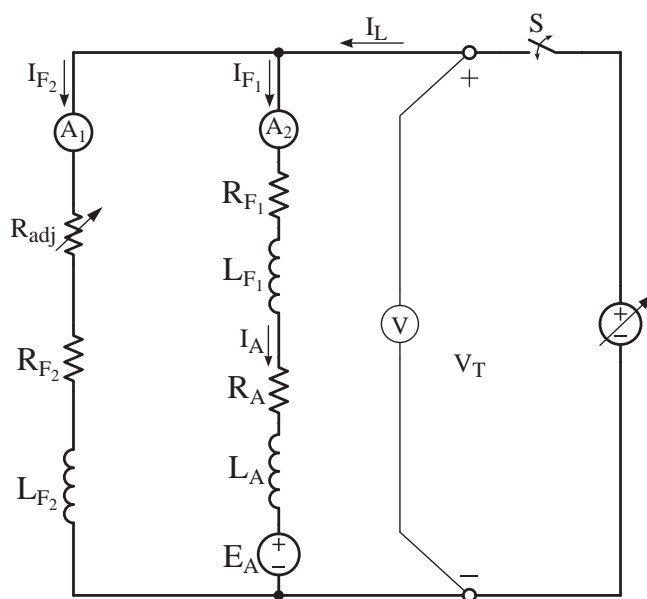
ب - تلفات ثابت

۲ - یک موتور کمپوند باشند با شنت کوتاه در اتصال

به شبکه  $200 \text{ V}$  جریان  $10 \text{ A}$  دریافت می‌کند و با

سرعت  $1200 \text{ RPM}$  می‌گردد. اگر  $R_{F_2} = 0.2 \Omega$ ،

$R_{F_1} = 198 \Omega$ ،  $R_A = 0.5 \Omega$  باشد مطلوب است:



شکل ۴-۴۰ مدار الکتریکی راهاندازی موتور کمپوند باشند

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.

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 صورتی که سرعت موتور به سرعت بی‌باری  $n_0$  نرسیده بود با افزایش مقاومت متغیر  $R_{adj}$ ، جریان

## ۴ - ۱۳ - ۴ - آزمایش بارداری

جدول (۴ - ۴) نتایج آزمایش بارداری موتور کمپوند

اضافی  $220\text{ V}$ ،  $1\text{ kW}$ ،  $5\text{ A}$  را نشان می‌دهد.

نحوه انجام آزمایش بارداری موتور کمپوند مطابق

توضیحات بخش ۳ - ۱۰ - ۴ می‌باشد.

$V_T$	$220\text{ V}$				
$n\text{ [RPM]}$	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۷۲۰	۴۵۰	۳۲۰
$I_A\text{ [A]}$	۰/۲	۲	۳	۴	۵
$T_{load}\text{ [Nm]}$	۰	۴	۸	۱۷	۳۰

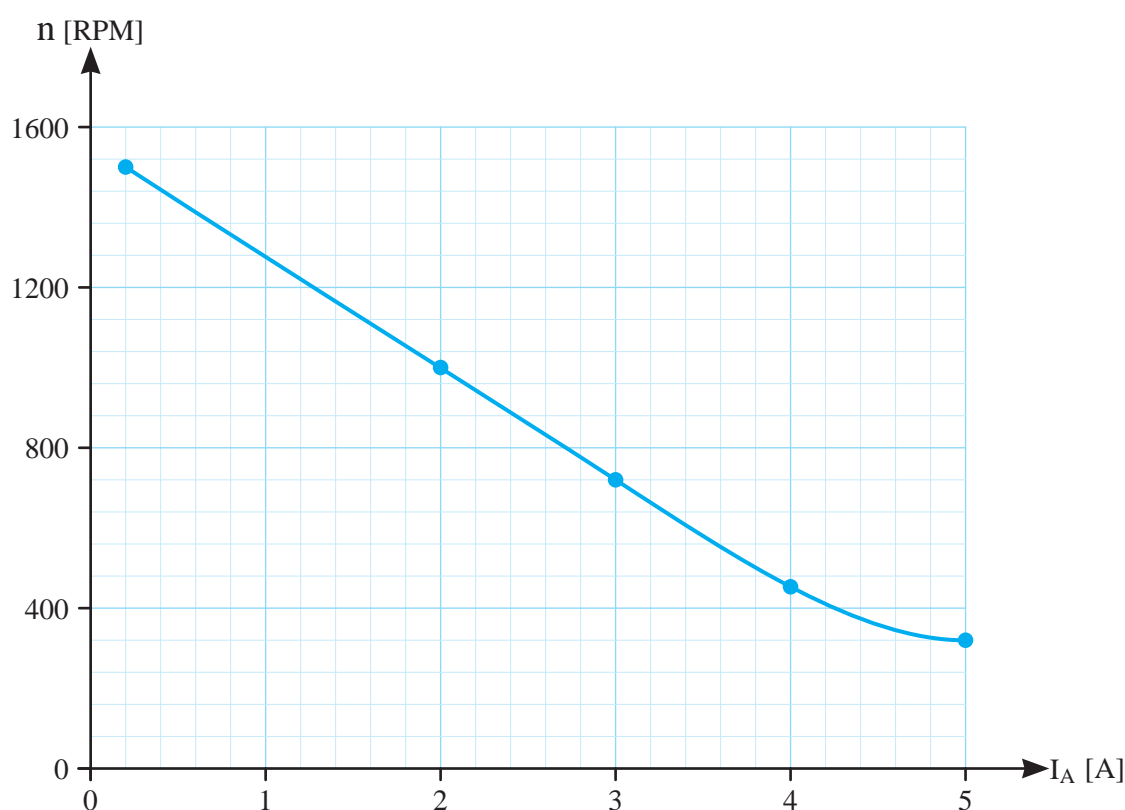
جدول ۴ - ۴ نتایج آزمایش بارداری موتور کمپوند اضافی

الکترومکانیکی موتور کمپوند اضافی در شکل (۴ - ۴۱)

نشان داده شده است.

نقاط نشان‌دهنده مقدار هر سرعت  $n$  به ازای

جریان  $I_A$  معین جدول (۴ - ۴) تحت عنوان مشخصه



شکل ۴ - ۴۱ منحنی مشخصه الکترومکانیکی موتور کمپوند اضافی

جریان  $I_A$  معین جدول (۴ - ۴) در شکل (۴ - ۴۲)

تحت عنوان منحنی مشخصه الکترومغناطیسی نشان

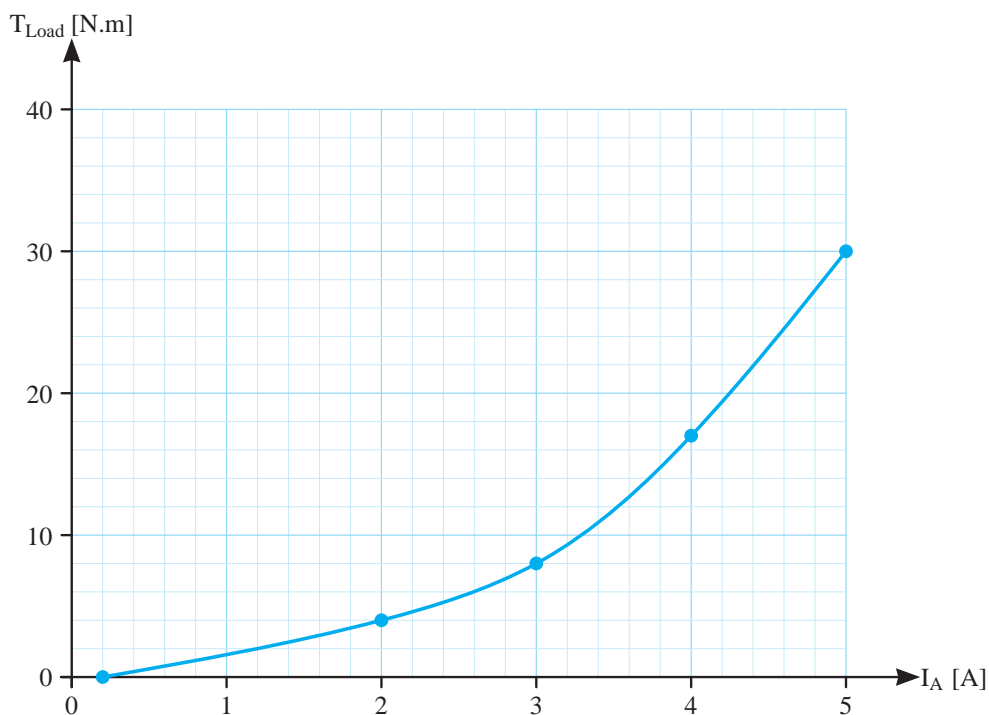
داده شده است.

در این شکل مشاهده می‌شود در اثر افزایش گشتاور

بار که منجر به کاهش سرعت شده است موتور جریان

$I_A$  را افزایش می‌دهد.

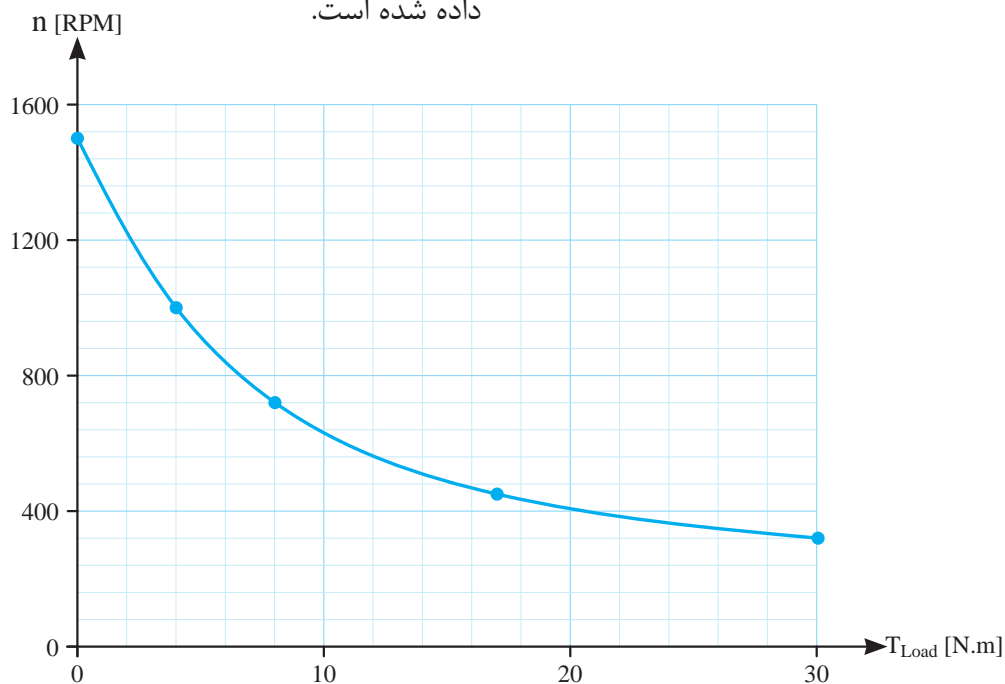
نقاط نشان‌دهنده مقدار هر گشتاور  $T_{load}$  به ازای



شکل ۴-۴۲ 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 (۴-۴) در شکل (۴-۴۳) تحت عنوان منحنی مشخصه گشتاور - سرعت نشان داده شده است.



شکل ۴-۴۳ منحنی مشخصه گشتاور - سرعت موتور کمپوند اضافی

در این شکل مشاهده می‌شود افزایش گشتاور بار منجر به کاهش سرعت می‌شود.

**فعالیت ۳-۴-** با استفاده از برنامه صفحه گسترده Excel از برنامه‌های مجموعه Microsoft Office منحنی مشخصه‌های مربوط به جدول ۴-۴ را رسم نمایید.

### ۵-۱۳-۴- کاربرد

موتورهای کمپوند اضافی دارای تغییرات سرعتی کمتر از موتور سری 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 به کار گرفته می‌شوند که به گشتاور راه‌اندازی زیاد و سرعت تقریباً ثابت نیاز داشته باشند.

موتورهای کمپوند نقصانی موارد استفاده چندانی ندارند. این موتورها را می‌توان طوری طراحی کرد که بتوانند در حالت بارداری سرعت تقریباً ثابتی داشته باشند. از موتور کمپوند نقصانی در ماشین برش کارخانجات لوله‌سازی استفاده می‌شود.

### پرسش ۷-۴

### پرسش‌های کامل کردنی

- ۱- در موتورهای کمپوند فوران قطب‌ها ..... از فوران سیم‌پیچی تحریک ..... و ..... است.
- ۲- اگر سیم‌پیچی آرمیچر ابتدا با سیم‌پیچی تحریک موازی و سپس با سیم‌پیچی تحریک سری ارتباط پیدا کند موتور ..... است.

- ۳- اگر سیم‌پیچی آرمیچر ابتدا با سیم‌پیچی تحریک ..... و سپس با سیم‌پیچی تحریک ..... ارتباط پیدا کند موتور کمپوند با شنت بلند است.
- ۴- راه‌اندازی و رفتار موتور کمپوند با شنت بلند و کوتاه ..... است.
- ۵- منحنی مشخصه الکترومغناطیسی تأثیر ..... بر ..... را در ولتاژ ثابت نشان می‌دهد.

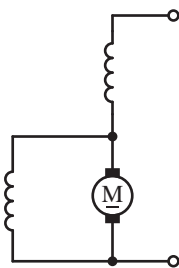
- ۶- منحنی مشخصه ..... تأثیر گشتاور بار بر سرعت را در ولتاژ ثابت نشان می‌دهد.

### پرسش‌های صحیح، غلط

- ۱- 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- علامت اختصاری موتور کمپوند با شنت کوتاه به صورت زیر است.



☐ صحیح ☐ غلط

- ۳- در نوشتن معادلات ولتاژ و جریان در حالت پایدار موتورهای DC از اثرات خودالقایی صرف‌نظر نمی‌شود.

☐ صحیح ☐ غلط

- ۴- در لحظه راه‌اندازی موتور کمپوند مقاومت  $R_{adj}$

را در حداقل قرار می دهند.

☐ غلط ☐ صحیح

۵ - پس از راه اندازی موتور کمپوند به منظور تنظیم سرعت مقاومت  $R_{adj}$  را تغییر می دهند.

☐ غلط ☐ صحیح

### پرسش های تشریحی

۱ - علامت اختصاری موتور کمپوند با شنت بلند را رسم کنید.

۲ - چرا موتور کمپوند نقصانی کاربرد ندارد؟

۳ - با توجه به شکل (۴-۳۶) طرح ساختمانی موتور کمپوند را شرح دهید.

۴ - چرا در تحلیل موتورهای DC از اثرات خودالقایی صرف نظر می شود؟

۵ - نحوه راه اندازی موتور کمپوند را شرح دهید.

۶ - آیا در موتورهای کمپوند پدیده فرار روی می دهد؟ چرا؟

۷ - نحوه تنظیم سرعت پس از راه اندازی موتور کمپوند را شرح دهید.

۸ - نحوه انجام آزمایش بارداری موتور کمپوند را شرح دهید.

### ۱۴ - ۴ - راه اندازی موتورهای جریان مستقیم

موتورهای جریان مستقیم در لحظه راه اندازی چندین برابر جریان نامی از منبع تغذیه دریافت می کنند.

جریان راه اندازی زیاد مشکلات جدی را ایجاد می کند از جمله:

• آسیب رسیدن به سیم پیچی آرمیچر، کموتاتور و

جاروبک ها

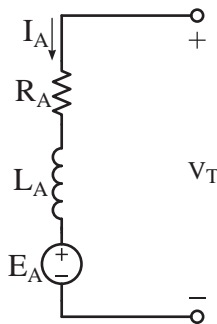
• ایجاد افت ولتاژ بسیار شدید در منبع تغذیه

• آسیب رسیدن به کابل های اتصال موتور به منبع تغذیه

• قطع فیوزهای موتور

• ایجاد ضربات شدید مکانیکی به رتور و آسیب رسیدن به محور و یاتاقان

علت جریان راه اندازی زیاد با توجه به مدار الکتریکی معادل سیم پیچی آرمیچر شکل (۴-۴۴) قابل توجیه است.



شکل ۴-۴۴

با توجه به شکل (۴-۴۴) جریان آرمیچر از رابطه (۴-۴۰) به دست می آید.

$$I_A = \frac{V_T - E_A}{R_A} \quad (4-40)$$

نیروی محرکه القایی با رابطه  $E_A = K \cdot \phi \cdot \omega$  تعیین می شود. در لحظه راه اندازی رتور در حال سکون است و سرعت  $\omega = 0$  است و نیروی محرکه القایی  $E_A = 0$  می شود. بنابراین رابطه جریان آرمیچر در لحظه راه اندازی به صورت رابطه (۴-۴۱) در می آید.

$$I_{Ast} = \frac{V_T - 0}{R_A} \quad (4-41)$$

۱. ضریب خودالقایی  $L_A$  در محاسبه جریان راه اندازی دخالت دارد و باعث کاهش آن می شود. به دلیل پیچیدگی محاسبات از اثر  $L_A$  در جریان راه اندازی صرف نظر 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  $220\text{ V}$ ،  $1\text{ KW}$ ،  $5\text{ A}$  با مقاومت آرمیچر  $2\Omega$  را در نظر بگیرید. جریان آرمیچر این موتور در لحظه راهاندازی برابر است با:

$$I_{A_{st}} = \frac{V_T - 0}{R_A}$$

$$I_{A_{st}} = \frac{220 - 0}{2} = 110\text{ [A]}$$

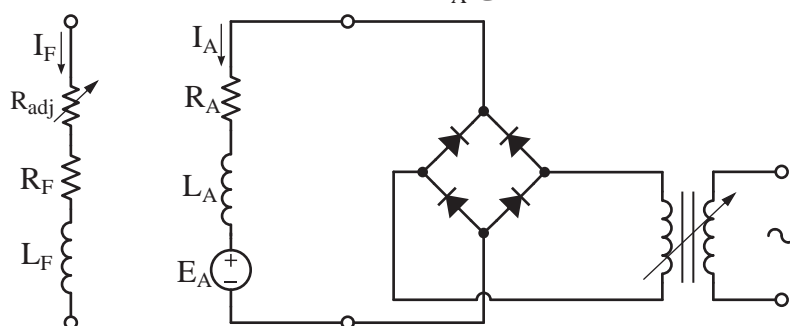
افزایش می‌یابد و باعث کاهش جریان آرمیچر می‌شود. برای کاهش جریان آرمیچر در لحظه راهاندازی طبق رابطه (۴۱ - ۴) باید ولتاژ  $V_T$  را کاهش یا مقاومت مدار آرمیچر  $R_A$  را افزایش داد. بدین منظور روش‌هایی ابداع شده است که به آنها پرداخته می‌شود.

### ۱ - ۱۴ - ۴ - 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 راه‌اندازی ولتاژ را به تدریج افزایش می‌دهند تا به ولتاژ نامی برسد.

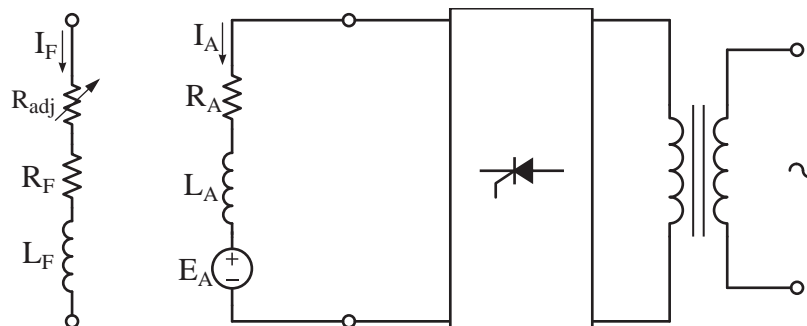
یک نمونه از منبع ولتاژ DC متغیر در شکل (۴۵ - ۴) نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود جریان آرمیچر در لحظه راهاندازی  $220$  برابر جریان نامی موتور است. البته پس از راهاندازی موتور و سرعت گرفتن رتور نیروی محرکه القایی  $E_A$



شکل ۴۵ - ۴

در شکل (۴۵ - ۴) از یک ترانس متغیر برای تغییر ولتاژ و یک مدار الکترونیکی یکسو کننده دیودی برای تبدیل ولتاژ AC به DC استفاده شده است.



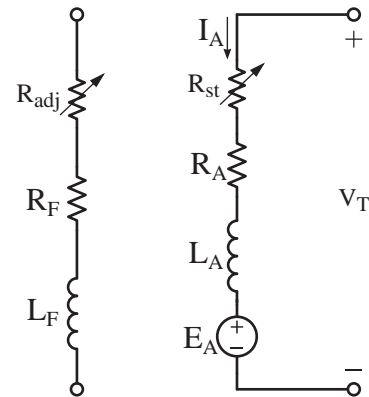
شکل ۴۶ - ۴

در این شکل از یک ترانس برای تبدیل ولتاژ و یک مدار الکترونیکی یکسوکننده تریستوری تمام موج کنترل شده برای تغییر ولتاژ و تبدیل AC به DC استفاده شده است.

استفاده از منبع ولتاژ DC متغیر در راهاندازی موتورهای DC به دلیل بازده زیاد بسیار مناسب است.

#### ۴ - ۱۴ - ۴ - راهاندازی با مقاومت راهانداز

در این روش با استفاده از مقاومت متغیر به نام «مقاومت راهانداز»<sup>۱</sup> که با مدار آرمیچر سری می‌شود مقاومت مدار آرمیچر را افزایش می‌دهند و پس از راهاندازی، مقاومت راهانداز را به تدریج کم می‌کنند تا به صفر برسد. نحوه قرار گرفتن مقاومت راهانداز در مدار آرمیچر در شکل (۴۷ - ۴) نشان داده شده است.



شکل ۴۷ - ۴

استفاده از مقاومت راهانداز با توجه به تلفات حرارتی بسیار زیاد آن توصیه نشده است.

#### پرسش ۸ - ۴

#### پرسش‌های کامل کردنی

۱ - جریان راهاندازی زیاد باعث ایجاد ..... بسیار شدید در منبع تغذیه می‌شود.

۲ - در لحظه راهاندازی سرعت ..... است و نیروی محرکه القایی ..... می‌شود.

۳ - پس از راهاندازی و سرعت گرفتن رتور نیروی محرکه القایی ..... و جریان آرمیچر ..... می‌یابد.

۴ - در منبع تغذیه ولتاژ متغیر وظیفه ترانسفورمر ..... و وظیفه پل دیودی ..... است.

#### پرسش‌های صحیح، غلط

۱ - یکی از مشکلات جریان راهاندازی زیاد قطع فیوزهای مدار است.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ - در لحظه راهاندازی نیروی محرکه القایی آرمیچر برابر ولتاژ موتور است.

صحیح ☐ غلط ☐

#### پرسش‌های تشریحی

۱ - مشکلاتی که جریان راهاندازی زیاد ایجاد می‌کند را بنویسید.

۲ - چرا موتورهای جریان مستقیم در لحظه راهاندازی جریان زیاد می‌کشند؟

۳ - راهاندازی موتور DC با منبع ولتاژ متغیر را شرح دهید.

۴ - نحوه راهاندازی موتور DC با مقاومت راهانداز را شرح دهید.

۵ - مزایای راهاندازی موتور DC با منبع ولتاژ متغیر نسبت به راهاندازی با مقاومت راهانداز را بنویسید.

۶ - معایب راهاندازی موتور DC با مقاومت راهانداز را بنویسید.

## ۱۵ - ۴ - کنترل سرعت موتورهای جریان

### مستقیم

صنعت همواره نیاز به موتورهای با گشتاور بالا با امکان کنترل سرعت وسیع و دقیق دارد. قطارهای مترو، اتوبوس‌های برقی و خطوط تولید کارخانجات نورد فولاد و سکوها 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  $E_A = K \cdot \phi \cdot \omega$  تعیین می‌شود و از آن رابطه (۴۲ - ۴) برای سرعت به دست می‌آید.

$$\omega = \frac{E_A}{K \cdot \phi} \quad (۴-۴۲)$$

برای موتورهای تحریک مستقل و شنت نیروی محرکه القایی  $E_A$  از رابطه (۴۳ - ۴) به دست می‌آید.

$$E_A = V_T - R_A I_A \quad (۴-۴۳)$$

اگر از مقاومت مدار تحریک سری در موتورهای سری و کمپوند صرف نظر شود رابطه (۴۳ - ۴) برای آنها نیز صادق خواهد شد. با جایگزین کردن رابطه (۴۳ - ۴) در رابطه (۴۲ - ۴) رابطه سرعت به شکل رابطه

(۴۴ - ۴) در می‌آید.

$$\omega = \frac{V_T - R_A I_A}{K \cdot \phi} \quad (۴-۴۴)$$

با توجه به رابطه (۴۴ - 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 - کنترل سرعت از طریق کنترل ولتاژ

سرعت در موتورهای DC طبق رابطه (۴۴ - ۴) با ولتاژ نسبت مستقیم دارد. روش کنترل ولتاژ برای کنترل سرعت از صفر تا سرعت نامی به کار 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 - کنترل سرعت از طریق کنترل مقاومت مدار آرمیچر

سرعت در موتورهای DC طبق رابطه (۴۴ - 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 - کنترل سرعت از طریق کنترل فوران قطب‌ها

سرعت در موتورهای DC طبق رابطه (۴۴ - ۴) با فوران قطب‌ها نسبت عکس دارد. روش کنترل فوران

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 - فضای کمی اشغال می‌کند.
- ۲ - بازده بالا دارد.
- ۳ - امکان کنترل سریع ولتاژ خروجی
- ۴ - ارزان و اقتصادی هستند.

● معایب سیستم کنترل سرعت الکترونیکی:

- ۱ - تولید اعوجاج و نوسانات در شبکه برق

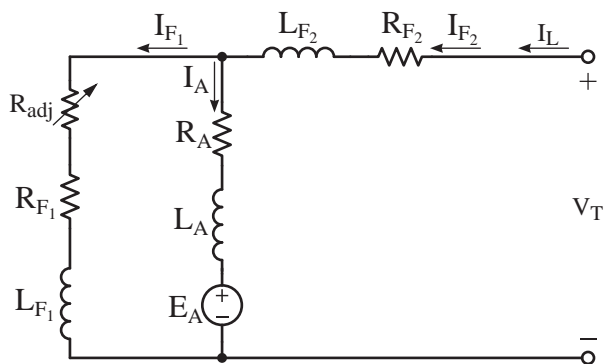
## پرسش ۹ - ۴

### پرسش‌های کامل کردنی

- ۱ - صنعت نیاز به موتورهای با گشتاور ..... با امکان کنترل ..... دارد.
- ۲ - کنترل ..... و کنترل ..... از روش‌های کنترل سرعت موتورهای DC هستند.
- ۳ - سرعت در موتورهای DC با فوران نسبت ..... دارد.

برای کنترل سرعت فراتر از سرعت نامی به کار 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 - ۴).

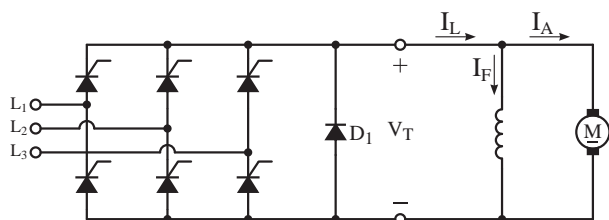


شکل ۴۸ - ۴ نحوه اتصال مقاومت  $R_{adj}$

سیستم‌های کنترل سرعت موتورهای DC، روش‌های کنترل ولتاژ و فوران را به صورت ترکیبی به کار می‌گیرند و ضمن کنترل سرعت، راه‌اندازی موتور را نیز انجام می‌دهند.

## ۱ - ۱۵ - ۴ - 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 - ۴) نشان داده شده است.



شکل ۴۹ - ۴ مدار ساده کنترل ولتاژ DC موتور شنت

## پرسش‌های صحیح، غلط

چگونه است؟ چرا؟

۸ - مزایای سیستم کنترل سرعت الکترونیکی را بنویسید؟

۱ - موتورهای DC از نقطه نظر کنترل سرعت نقش ارزنده‌ای ایفا می‌کنند.

☐ صحیح ☐ غلط

۲ - سرعت در موتورهای DC با ولتاژ نسبت عکس دارد.

☐ صحیح ☐ غلط

## ۱۶ - ۴ - 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.

۳ - روش کنترل سرعت از طریق کنترل مقاومت آرمیچر در موتورهای DC توصیه نشده است.

☐ صحیح ☐ غلط

۴ - سیستم‌های کنترل سرعت وظیفه راه‌اندازی موتور را نیز انجام می‌دهند.

☐ صحیح ☐ غلط

## پرسش‌های تشریحی

۱ - دلیل لزوم کنترل سرعت در موتورهای DC را شرح دهید.

۲ - عواملی که بر سرعت موتورهای DC تأثیر گذارند را بنویسید.

۳ - روش کنترل سرعت از طریق کنترل ولتاژ را شرح دهید.

۴ - چرا روش کنترل سرعت موتورهای DC از طریق کنترل مقاومت مدار آرمیچر توصیه نشده است؟  
۵ - کنترل سرعت از طریق کنترل فوران را شرح دهید.

۶ - هر یک از روش‌های کنترل سرعت در چه محدوده‌ای کاربرد دارند؟ توضیح دهید.

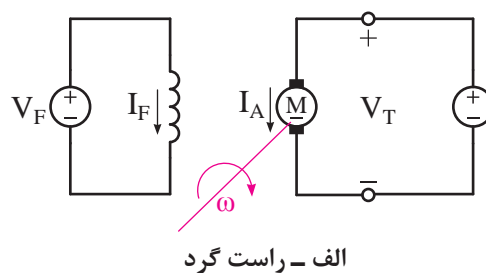
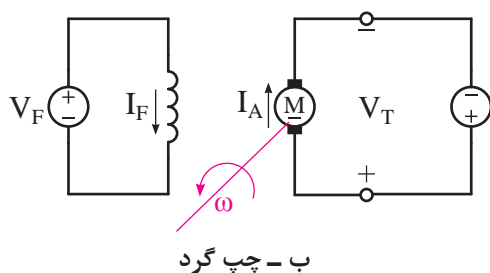
۷ - نحوه نصب مقاومت‌های  $R_{adj}$  در مدار تحریک

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 - قطع مدار تحریک در لحظه تغییر جهت گردش باعث بروز پدیده مهار گسستگی خواهد شد.

۲ - تغییر جهت جریان تحریک پلاریته قطب‌های موتور را عوض می‌کند در این صورت در کار قطب‌های کمکی و سیم‌پیچی‌های جبران‌گر اختلال ایجاد خواهد شد.

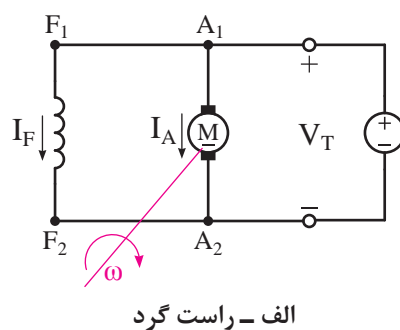
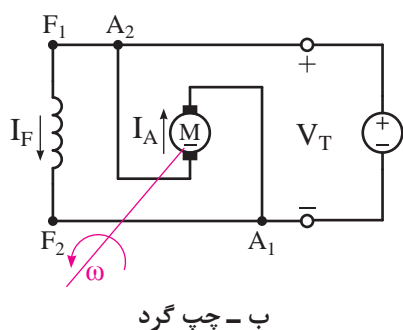
در موتور تحریک مستقل کافی است پلاریته منبع ولتاژ مدار آرمیچر را عوض کرد تا جهت گردش موتور تغییر کند (شکل ۵۰ - ۴).



شکل ۴-۵۰ نقشه اختصاری تغییر جهت گردش موتور تحریک مستقل

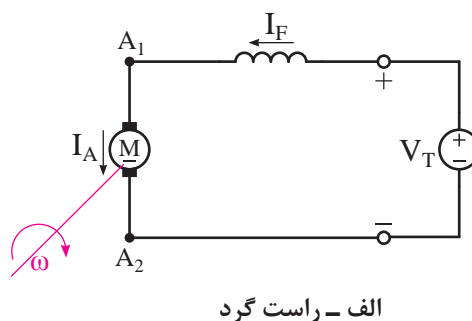
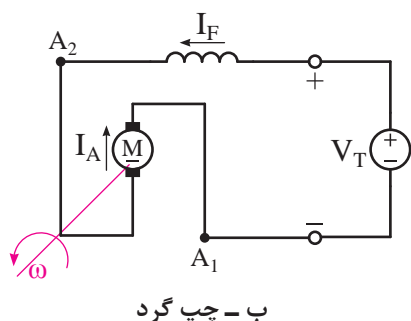
تغییر کند. در شکل (۴-۵۱) نقشه اختصاری تغییر جهت گردش موتور شنت نشان داده شده است.

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



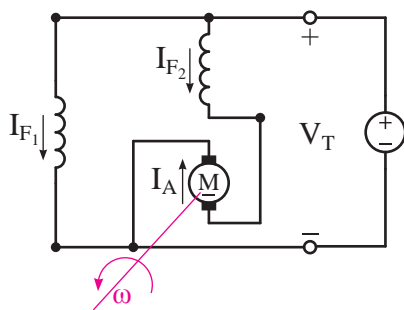
شکل ۴-۵۱ نقشه اختصاری تغییر جهت گردش موتور شنت

در شکل (۴-۵۲) نقشه اختصاری تغییر جهت گردش موتور سری نشان داده شده است.

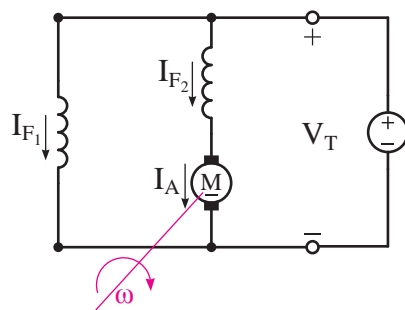


شکل ۴-۵۲ نقشه اختصاری تغییر جهت گردش موتور سری

در شکل (۴-۵۳) نقشه اختصاری تغییر جهت گردش موتور کمپوند با شنت بلند نشان داده شده است.



ب - چپ گرد



الف - راست گرد

شکل ۵۳ - ۴ نقشه اختصاری تغییر جهت گردش موتور کمپوند با شنت بلند

مستهلك می‌کند تا رتور متوقف شود. سه روش ترمز برای موتورهای DC به کار می‌رود:

۱ - ترمز دینامیکی

۲ - ترمز با جریان مخالف

۳ - ترمز ژنراتوری

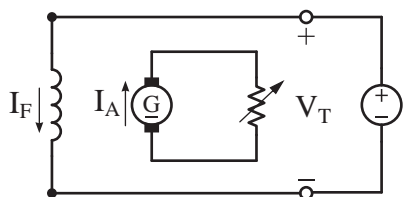
در موتورهای شنت، سری و کمپوند با تعویض پلاریته‌های منبع ولتاژ جهت جریان مدار آرمیچر و تحریک عوض می‌شود از این رو جهت گردش تغییر نخواهد کرد.

### ۱۷ - ۴ - ترمز در موتورهای جریان مستقیم

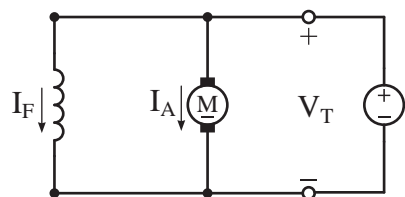
در بسیاری از بارهای صنعتی مانند نقاله‌ها، قطارهای مترو و خودروهای برقی... که توسط موتورهای جریان مستقیم به حرکت در می‌آیند پس از قطع از منبع تغذیه، رتور به خاطر انرژی جنبشی تا مدتی به حرکت خود ادامه می‌دهد و سپس متوقف می‌شود. در صورتی که نیاز به توقف سریع رتور باشد باید از حالت‌های ترمزی موتورهای جریان 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

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 - ۴) نشان داده شده است.



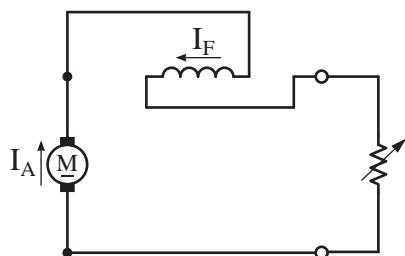
ب - حالت ترمز



الف - حالت کار

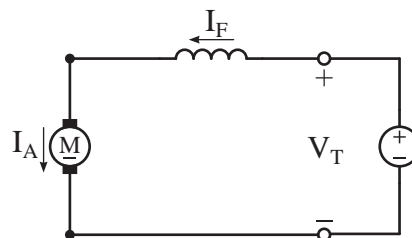
شکل ۵۴ - ۴ نقشه اختصاری موتور شنت

ترمزی جابه‌جا می‌شود تا جهت جریان آن مانند حالت کار موتور باقی بماند و پس‌ماند قطب‌ها از بین نرود. نقشه اختصاری حالت کار و ترمز دینامیکی موتور سری در شکل (۵۵ - ۴) نشان داده شده است.



ب - حالت ترمز

در موتورهای سری برای ایجاد حالت ترمز دینامیکی، موتور از منبع تغذیه جدا می‌شود و مدار آرمیچر و تحریک سری به مقاومت متغیر متصل می‌شوند؛ با این تفاوت که دو سر سیم‌پیچی تحریک سری در حالت



الف - حالت کار

شکل ۵۵ - ۴ نقشه اختصاری موتور سری

## ۲ - ۱۷ - ۴ - ترمز با جریان مخالف

در این روش برای ایجاد نیروی ترمزی جهت گردش موتور را با جابه‌جا کردن سرهای مدار آرمیچر عوض می‌کنند تا جهت گشتاور 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. اما در این روش ضربات شدید مکانیکی به محور و یاتاقان‌ها وارد می‌شود و مدارهای الکتریکی موتور، باید جریان‌های شدید لحظه‌ای را تحمل کند.

## ۳ - ۱۷ - ۴ - ترمز ژنراتوری

در مواردی که بار تحت تأثیر انرژی جنبشی خود بتواند سرعت رتور را به بیش از سرعت بی‌باری برساند (مانند حرکت خودرو در سرازیری)، نیروی محرکه القایی آرمیچر  $E_A$  بزرگ‌تر از ولتاژ  $V_T$  می‌شود. لذا

در موتورهای کمپوند برای ایجاد حالت ترمز دینامیکی، مدار آرمیچر و تحریک سری مشابه آنچه که برای موتور سری شرح داده شد به مقاومت متغیر وصل می‌شود و مدار تحریک موازی به منبع تغذیه متصل می‌ماند.

در روش ترمز دینامیکی لازم است سیم‌پیچی 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 اتوبوس‌های برقی مجهز به ترمز دینامیکی، مقاومت متغیر از طریق یک پدال در زیر پای راننده قرار داده شده است. راننده با فشار بر پدال ضمن قطع مدار آرمیچر از منبع تغذیه آن را به مقاومت متغیر وصل می‌کند. فشار بیشتر بر پدال، مقاومت متغیر را کم می‌کند تا نیروی ترمز قوی‌تری ایجاد شود.



..... توسط ..... فراهم باشد.

### پرسش‌های صحیح، غلط

۱ - تغییر جهت گردش موتورهای DC با تعویض جهت گشتاور آرمیچر امکان‌پذیر است.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ - با تعویض پلاریته منبع ولتاژ مدار آرمیچر، جهت گردش موتور تحریک مستقل تغییر می‌کند.

صحیح ☐ غلط ☐

۳ - با تعویض پلاریته منبع ولتاژ جهت گردش موتور شنت تغییر می‌کند.

صحیح ☐ غلط ☐

۴ - در روش ترمز دینامیکی انرژی جنبشی رتور به انرژی الکتریکی تبدیل نمی‌شود.

صحیح ☐ غلط ☐

۵ - نیروی ترمزی جریان مخالف به مراتب بیشتر از ترمز دینامیکی است.

صحیح ☐ غلط ☐

۶ - روش ترمز ژنراتوری در موتور سری کاربرد دارد.

صحیح ☐ غلط ☐

### پرسش‌های تشریحی

۱ - تغییر جهت گردش در موتورهای DC چگونه انجام می‌شود؟

۲ - چرا از تعویض جهت جریان تحریک به منظور تغییر جهت گردش خودداری می‌شود؟

۳ - نقشه اختصاری تغییر جهت گردش موتور شنت را رسم نموده و توضیح دهید.

موتور تبدیل به ژنراتور خواهد شد و انرژی جنبشی رتور به انرژی الکتریکی تبدیل و به منبع تغذیه برگردانده می‌شود و آن را شارژ می‌کند. در این صورت نیروی ترمزی ایجاد می‌شود که مانع افزایش سرعت رتور می‌شود. این روش تولید نیروی ترمزی را «ترمز ژنراتوری» گویند.

در روش ترمز ژنراتوری باید امکان جذب انرژی الکتریکی توسط منبع تغذیه فراهم باشد در غیر این صورت نیروی ترمزی پدید نمی‌آید. ترمز مولدی باعث توقف رتور نخواهد شد بلکه از افزایش سرعت رتور جلوگیری می‌کند.

روش ترمزی ژنراتوری در موتورهای سری پدید نمی‌آید؛ زیرا رسیدن به بیش از سرعت بی‌باری به معنای وقوع پدیده فرار یا مهار گسستگی است.

### پرسش ۱۰ - ۴

### پرسش‌های کامل کردنی

۱ - برای تغییر جهت گردش موتور DC باید جهت جریان ..... یا ..... را عوض کرد.

۲ - قطع مدار تحریک در لحظه تغییر جهت گردش باعث بروز پدیده ..... خواهد شد.

۳ - اساس کار ترمز موتورهای DC مستهلک کردن انرژی ..... است.

۴ - در روش ترمز دینامیکی انرژی ..... رتور به انرژی ..... تبدیل می‌شود.

۵ - در روش ترمز دینامیکی لازم است سیم‌پیچی ..... در مدار باقی بماند تا رفتار ..... پدید آید.

۶ - در روش ترمز ژنراتوری باید امکان جذب انرژی

- ۴ - چرا در موتورهای شنت، سری و کمپوند با تعویض پلاریته منبع ولتاژ، جهت گردش تغییر نمی‌کند؟
- ۵ - لزوم استفاده از ترمز در موتورهای الکتریکی را بنویسید.
- ۶ - اساس کار ترمز را شرح دهید.
- ۷ - انواع روش‌های ترمز را بنویسید.
- ۸ - روش ترمز دینامیکی را توضیح دهید.
- ۹ - با رسم شکل نحوه ترمز دینامیکی موتور شنت را توضیح دهید.
- ۱۰ - با رسم شکل نحوه ترمز دینامیکی موتور سری را توضیح دهید.
- ۱۱ - نحوه ترمز دینامیکی در موتور کمپوند را توضیح دهید.
- ۱۲ - ترمز با جریان مخالف را توضیح دهید.
- ۱۳ - ترمز ژنراتوری را توضیح دهید.
- ۱۴ - چرا ترمز ژنراتوری در موتور سری پدید نمی‌آید؟

1-Electric Machinery – 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 - ماشین‌های الکتریکی، تئوری، عملکرد و کاربردها - تالیف پروفیسور بیم بهارا - ترجمه دکتر سلطانی، دکتر لسانی

۶ - ماشین‌های الکتریکی، تحلیل، بهره‌برداری، کنترل - تالیف پی سی سن - ترجمه دکتر عابدی، نبوی

