بسم الله الرحمن الرحیم

ماشین‌های الکتریکی AC

رشتهٔ الکتروتکنیک

زمینهٔ صنعت

شاخهٔ آموزش فنی و حرفه‌ای

شمارهٔ درس ۲۱۳۴

۶۲۱
/۳۱
۱۴۶ م
۱۳۹۴

علی مددی، محمد

ماشـین‌های الکتریکی AC/ مؤلفان : محمد علی مددی، علی‌اکبر مطیع بیرجندی. ـ تهران : شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۴.

۲۰۷ص. : مصور. ـ (آموزش فنی و حرفه‌ای؛ شمارهٔ درس ۲۱۳۴)

متون درسی رشتهٔ الکتروتکنیک، زمینهٔ صنعت.

برنامه‌ریزی و نظارت، بررسـی و تصویب محتوا : کمیسیون برنامه‌ریزی و تألیف کتاب‌های درسی رشتهٔ الکتروتکنیک دفتر تألیف کتاب‌های درسی فنی و حرفه‌ای و کاردانش وزارت آموزش و پرورش.

۱. ماشین‌آلات برقی. ۲. برق ـ جریان متناوب. الف. علی مددی، محمد. ب. ایران. وزارت آموزش و پرورش. کمیسیون برنامه‌ریزی و تألیف کتاب‌های درسی رشتهٔ الکتروتکنیک. ج. عنوان. د. فروست.

۱۳۹۴

همکاران محترم و دانش‌آموزان عزیز :

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

پیام‌نگار(ایمیل) **info@tvoccd.sch.ir**

وب‌گاه (وب سایت) **www.tvoccd.sch.ir**

جدول هدف محتوای کتاب ماشین‌های الکتریکی AC در سال ۱۳۸۸ با توجه به فناوری‌های جدید، نیازهای جامعه و درخواست هنرآموزان و گروه‌های آموزشی سراسر کشور و تأیید کمیسیون تخصصی رشتهٔ الکتروتکنیک، مورد بازنگری و اصلاحات کلی قرار گرفت و سپس در سال‌های ۱۳۹۰ و 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 AC ــ ۴۹۰/۲**

شمارهٔ درس : **۲۱۳۴**

مؤلفان : **محمد علی‌مددی، علی‌اکبر مطیع بیرجندی**

ویراستار فنی : **محمد حیدری**

اعضای کمیسیون تخصصی الکتروتکنیک : **شهرام خدادادی ــ امیرحسین ترکمانی ــ محمدحسن اسلامی ــ مجتبی انصاری‌پور ــ نقی اصغری**

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

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

تلفن : ۹ــ۸۸۸۳۱۱۶۱ دورنگار : ۸۸۳۰۹۲۶۶ کدپستی : ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹

وب‌سایت : www.chap.sch.ir

رسامی و تصویرسازی رایانه‌ای : **علیرضا سیاحی، مریم دهقان‌زاده**

طراح جلد : **حامد موسوی**

صفحه آرا : **غزاله نجمی، غزاله کشمیری**

حروفچین : **زهرا ایمانی نصر**

مصحح : **سیما لطفی، پریسا پژوهی پاد**

امورآماده‌سازی خبر : **سپیده ملک‌ایزدی**

امورفنی رایانه‌ای : **حمید ثابت کلاچاهی، راحله زادفتح‌الله**

ناشر : **شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران : تهران ــ کیلومتر ۱۷ جادّهٔ مخصوص کرج ــ خیابان ۶۱ (داروپخش)**

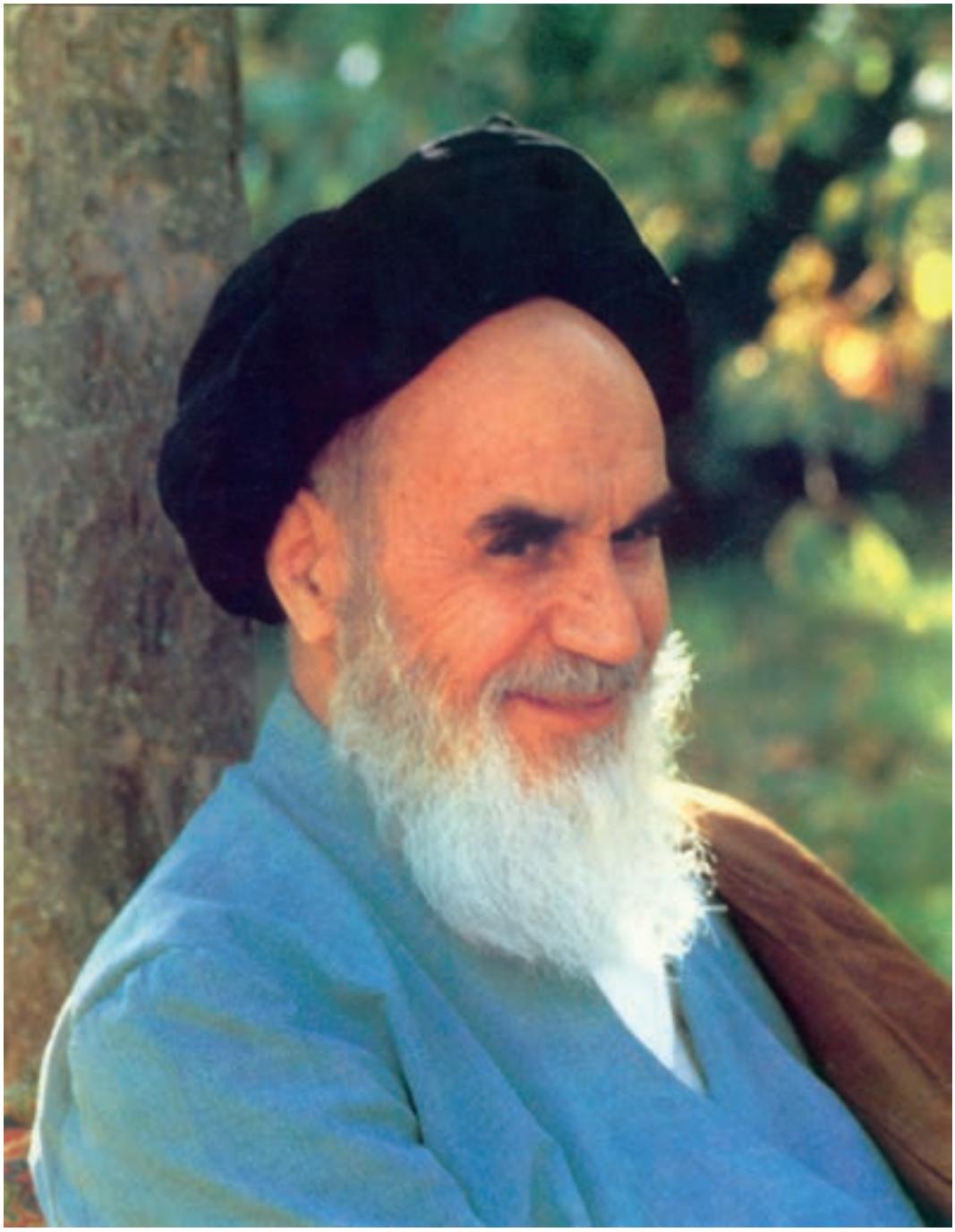
تلفن ۵ــ۴۴۹۸۵۱۶۱ ــ دورنگار ۴۴۹۸۵۱۶۰ ــ صندوق پستی ۱۳۹ــ۳۷۵۱۵

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

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

حقّ چاپ محفوظ است.

شابک ۳ــ۲۰۸۳ــ۰۵ــ۹۶۴ــ۹۷۸ **ISBN 978-964-05-2083-3**



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

امام خمینی «قدّس سرّه الشّریف»

فهرست

فصل ۱

مقدمه ۱۷

۱ـ۱ـ ساختمان ترانسفورماتور ۱۷

۱ـ۱ـ۱ـ هسته ۱۸

۱ـ۱ـ۲ـ سیم پیچ ۲۰

۱ـ۲ـ تئوری و طرز کار ترانسفورماتور ۱۲

۱ـ۳ـ ترانسفورماتور ایده‌آل ۲۳

۱ـ۳ـ۱ـ کلیات ۲۳

۱ـ۳ـ۲ـ روابط اساسی ترانسفورماتور ۲۴

۱ـ۳ـ۳ـ تبدیل امپدانس ـ انتقال امپدانس ۲۵

۱ـ۳ـ۴ـ نتیجه گیری از روابط اساسی ترانسفورماتور ایده‌آل ۲۶

۱ـ۴ـ ترانسفورماتور واقعی ۲۷

۱ـ۴ـ۱ـ مدار معادل ترانسفورماتور واقعی در حالت بی‌باری ۲۷

۱ـ۴ـ۲ـ مدار معادل ترانسفورماتور واقعی در حالت بارداری ۳۰

۱ـ۵ـ دیاگرام برداری حالت بارداری ۳۴

۱ـ۶ـ تعیین مقادیر پارامترهای مدار معادل به‌کمک آزمایش‌های تجربی ۳۸

۱ـ۶ـ۱ـ آزمایش حالت بی‌باری ۳۹

۱ـ۶ـ۲ـ آزمایش اتصال کوتاه ۴۰

۱ـ۷ـ ولتاژ اتصال کوتاه در ترانسفورماتور ۴۲

۱ـ۸ـ جریان اتصال کوتاه واقعی در ترانسفورماتور ۴۲

۱ـ۹ـ تلفات در ترانسفورماتور ۴۳

۱ـ۹ـ۱ـ تلفات هسته (آهنی) ۴۳

۱ـ۹ـ۲ـ تلفات اهمی سیم پیچ (مسی) ۴۵

۱ـ۱۰ـ راندمان یا بازده ترانسفورماتور ۴۶

۱ـ۱۱ـ انواع ترانسفورماتورهای تکفاز خاص ۴۸

۱ـ۱۱ـ۱ـ ترانسفورماتور ایزوله ۴۸

۱ـ۱۱ـ۲ـ ترانسفورماتور جریان ۴۹

۱ـ۱۱ـ۳ـ ترانسفورماتور ولتاژ ۵۱

۱ـ۱۱ـ۴ـ ترانسفورماتور جوشکاری ۵۲

۱ـ۱۱ـ۵ـ اتوترانسفورمر ۵۲

۱ـ۱۱ـ۶ـ مقایسه بین ترانسفورماتور معمولی و اتو ترانسفورمر ۵۳

پرسش‌های پایان فصل(۱) ۵۷

مسائل پایان فصل(۱) ۵۸

فصل ۲

مقدمه

۲ـ۱ـ دلیل استفاده از ترانسفورماتور سه فاز ۶۴

۲ـ۲ـ ساختمان ترانسفورماتور سه فاز از نقطه نظر مغناطیسی و الکتریکی ۶۵

۲ـ۲ـ۱ـ هسته ۶۵

۲ـ۲ـ۲ـ چیدمان هسته ۶۷

۲ـ۲ـ۳ـ سیم پیچ ۶۸

۲ـ۳ـ ساختمان ترانسفورماتور سه فاز از نقطه نظرعایق بندی وتهویه ۶۹

۲ـ۳ـ۱ـ ترانسفورماتورهای روغنی ۶۹

۲ـ۴ـ ترانسفورماتورهای خشک ۷۱

۲ـ۵ـ تجهیزات جانبی ترانسفورماتور ۷۲

۲ـ۵ـ۱ـ رله بوخ هلتس ۷۲

۲ـ۵ـ۲ـ ترمومتر(دماسنج ترانسفورماتور) ۷۴

۲ـ۵ـ۳ـ سیستم کنترل دما به کمک سنسور RTD ۷۶

۲ـ۵ـ۴ـ رطوبت گیر (محفظه سلیکاژل) ۷۶

۲ـ۵ـ۵ـ روغن نما ۷۷

۲ـ۵ـ۶ـ شیر فشار شکن یا اطمینان ۷۸

۲ـ۵ـ۷ـ فشار و خلأ سنج ۷۸

۲ـ۵ـ۸ـ کلید تنظیم ولتاژ ۷۹

۲ـ۵ـ۹ـ پیچ اتصال بدنه ۸۰

۲ـ۵ـ۱۰ـ جعبه ترمینال ۸۰

۲ـ۵ـ۱۱ـ بوشینگ ۸۱

۲ـ۶ـ انواع اتصالات مورد استفاده در ترانسفورماتورهای سه فاز ۸۲

۲ـ۶ـ۱ـ اتصال ستاره ۸۲

۲ـ۶ـ۲ـ اتصال مثلث ۸۳

۲ـ۶ـ۳ـ مقایسهٔ اتصال مثلث و اتصال ستاره در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور ۸۵

۲ـ۶ـ۴ـ اتصال زیگزاگ ۸۵

۲ـ۷ـ تقسیم‌بندی ترانسفورماتورهای سه فاز بر اساس نوع اتصال ورودی و خروجی ۸۶

۱ـ۷ـ۲ـ اتصال ستاره ـ ستاره (y_Y) ۸۶
۲ـ۷ـ۲ـ اتصال مثلث ـ ستاره (D_y) ۸۷
۳ـ۷ـ۲ـ اتصال ستاره ـ زیگزاگ (Y_z) ۸۷
۴ـ۷ـ۲ـ اتصال مثلث باز (V_V) ۸۸
۵ـ۷ـ۲ـ گروه ترانسفورماتور ۸۹
۸ـ۲ـ موازی کردن ترانسفورماتورها ۸۹
۱ـ۸ـ۲ـ شرایط موازی کردن ۸۹
۲ـ۸ـ۲ـ چگونگی موازی کردن دو ترانسفورماتور ۹۰
۳ـ۸ـ۲ـ موازی کردن ترانسفورماتور تک‌فاز ۹۰
۴ـ۸ـ۲ـ موازی بستن دو ترانسفورماتور سه‌فاز ۹۱
۹ـ۲ـ محاسبه قدرت ظاهری ترانسفورماتور پس از اتصال موازی ۹۲
۱۰ـ۲ـ تلفات و راندمان ۹۴
۱۱ـ۲ـ پلاک‌خوانی ترانسفورماتور ۹۸
پرسش‌های پایان فصل(۲) ۱۰۰
مسائل پایان فصل(۲) ۱۰۰

فصل ۳

مقدمه ۱۰۴
۱ـ۳ـ ساختمان ماشین‌های القایی ۱۰۵
۱ـ۱ـ۳ـ استاتور ۱۰۵
۲ـ۱ـ۳ـ سیم پیچ ۱۰۶
۳ـ۱ـ۳ـ رتور ۱۰۷
۴ـ۱ـ۳ـ رتور قفسی ۱۰۷
۵ـ۱ـ۳ـ رتور سیم‌پیچی شده (wound rotor) ۱۰۸
۲ـ۳ـ اساس کار موتورهای القایی ۱۰۹
۳ـ۳ـ پدیده میدان دوار در ماشین‌های القایی ۱۰۹
۴ـ۳ـ تغییر جهت چرخشی میدان دوار ۱۱۴
۵ـ۳ـ عوامل مؤثر در سرعت میدان دوار ۱۱۶
۶ـ۳ـ نحوهٔ ایجاد چرخش رتور در موتورهای القایی ۱۱۷
۷ـ۳ـ موتورهای القایی از نوع رتور قفس سنجابی ۱۱۹
۸ـ۳ـ لغزش در ماشین‌های القایی ۱۲۰
۹ـ۳ـ رفتار ماشین‌های القایی در لغزش‌های مختلف ۱۲۱
۱ـ۹ـ۳ـ لغزش در زمان راه‌اندازی ۱۲۱
۲ـ۹ـ۳ـ لغزش در سرعت سنکرون ۱۲۱
۳ـ۹ـ۳ـ لغزش موتور در حین کار ۱۲۱
۴ـ۹ـ۳ـ لغزش منفی ۱۲۲
۵ـ۹ـ۳ـ لغزش‌های بزرگتر از واحد (بیش از ۱۰۰٪) ۱۲۲
۱۰ـ۳ـ کمیت‌های الکتریکی رتور ۱۲۳
۱ـ۱۰ـ۳ـ فرکانس ولتاژ القایی مدار رتور ۱۲۳
۲ـ۱۰ـ۳ـ راکتانس رتور ۱۲۴
۳ـ۱۰ـ۳ـ مقاومت مدار رتور ۱۲۴
۴ـ۱۰ـ۳ـ ولتاژ رتور ۱۲۴
۵ـ۱۰ـ۳ـ امپدانس رتور ۱۲۴
۶ـ۱۰ـ۳ـ جریان رتور ۱۲۵
۷ـ۱۰ـ۳ـ ضریب قدرت مدار رتور ۱۲۶
۱۱ـ۳ـ گشتاور ماشین‌های القایی ۱۲۶
۱۲ـ۳ـ ناحیه‌بندی ماشین القایی براساس مشخصه گشتاور ـ دور ۱۲۹
۱۳ـ۳ـ مشخصه گشتاور ـ دور موتور القایی ۱۲۹
۱۴ـ۳ـ مشخصه ضریب قدرت ـ سرعت موتور القایی ۱۳۳
۱۵ـ۳ـ تأثیر فاصله هوایی میان رتور و استاتور بر مقدار ضریب قدرت موتور ۱۳۴
۱۶ـ۳ـ روش‌های راه‌اندازی موتورهای القایی ۱۳۵
۱ـ۱۶ـ۳ـ راه‌اندازی مستقیم DOL ۱۳۵
۲ـ۱۶ـ۳ـ راه‌اندازی ستاره ـ مثلث ۱۳۶
۳ـ۱۶ـ۳ـ راه‌اندازی با اتو ترانسفورماتور ۱۳۷
۴ـ۱۶ـ۳ـ راه‌اندازی با تجهیزات الکترونیک قدرت ـ راه‌اندازی نرم ۱۳۸
۵ـ۱۶ـ۳ـ روش راه‌اندازی رتوری ۱۳۹
۱۷ـ۳ـ تغییر سرعت موتورهای القایی ۱۴۱
۱ـ۱۷ـ۳ـ کنترل هم‌زمان فرکانس و ولتاژ ۱۴۱
۲ـ۱۷ـ۳ـ تغییر قطب‌های سیم‌بندی ۱۴۳
۳ـ۱۷ـ۳ـ موتور دالاندر ۱۴۴
۴ـ۱۷ـ۳ـ قراردادن دو سیم‌بندی مجزا در داخل استاتور ۱۴۴
۵ـ۱۷ـ۳ـ تغییر مقدار لغزش ۱۴۵
۱۸ـ۳ـ ترمز موتورهای القایی ۱۴۶
۱ـ۱۸ـ۳ـ ترمز جریان مخالف ۱۴۷
۲ـ۱۸ـ۳ـ ترمز با جریان مستقیم ۱۴۷

۳ـ۱۸ـ۳ـ ترمز ژنراتوری ۱۴۹
۴ـ۱۸ـ۳ـ ترمز الکترومکانیکی ۱۵۰
۱۹ـ۳ـ رفتار ژنراتوری ماشین القایی ۱۵۱
۱ـ۱۹ـ۳ـ اتصال ژنراتور القایی به شبکه برق ۱۵۲
۲ـ۱۹ـ۳ـ استفاده از خازن (مولد القایی در حالت منفرد) ۱۵۳
۲۰ـ۳ـ تلفات و راندمان ۱۵۳
۲۱ـ۳ـ مقایسه موتورهای رتور قفسی و رتور سیم‌پیچی ۱۵۶
۲۲ـ۳ـ پلاک‌خوانی موتورهای القایی و استفاده از برگ مشخصات فنی ۱۵۷
پرسش‌های پایان فصل (۳) ۱۶۰
مسایل پایان فصل (۳) ۱۶۲

فصل ۴

مقدمه ۱۶۵
۱ـ۴ـ اصول کار ژنراتورهای سنکرون ۱۶۵
۲ـ۴ـ ساختمان ژنراتورهای سنکرون ۱۶۷
۱ـ۲ـ۴ـ استاتور ۱۶۷
۲ـ۲ـ۴ـ رتور ۱۶۷
۳ـ۴ـ انواع رتور ماشین‌های سنکرون ۱۶۸
۱ـ۳ـ۴ـ رتور با قطب صاف یا استوانه‌ای ۱۶۸
۲ـ۳ـ۴ـ رتور با قطب برجسته ۱۶۹
۴ـ۴ـ کمیت‌های ژنراتور سنکرون ۱۶۹
۱ـ۴ـ۴ـ فرکانس ژنراتور سنکرون ۱۶۹
۵ـ۴ـ ولتاژ ژنراتور سنکرون ۱۷۰
۶ـ۴ـ موازی کردن ژنراتورهای سنکرون ۱۷۲
۷ـ۴ـ تلفات و راندمان در ژنراتورهای سنکرون ۱۷۲
۸ـ۴ـ انواع نیروگاه‌های برق ۱۷۴
۱ـ۸ـ۴ـ نیروگاه حرارتی ۱۷۴
۲ـ۸ـ۴ـ نیروگاه بخاری ۱۷۴
۳ـ۸ـ۴ـ نیروگاه گازی ۱۷۴
۴ـ۸ـ۴ـ نیروگاه هسته‌ای ۱۷۵
۵ـ۸ـ۴ـ نیروگاه سیکل ترکیبی ۱۷۶
۶ـ۸ـ۴ـ نیروگاه آبی ۱۷۶
۷ـ۸ـ۴ـ نیروگاه بادی ۱۷۷
۸ـ۸ـ۴ـ جمع‌بندی ۱۷۷
۹ـ۴ـ ساختمان موتور سنکرون ۱۷۸
۱۰ـ۴ـ اصول کار موتور سنکرون ۱۷۸
۱۱ـ۴ـ روش‌های راه‌اندازی موتور سنکرون ۱۷۹
۱ـ۱۱ـ۴ـ راه‌اندازی داخلی ۱۷۹
۲ـ۱۱ـ۴ـ راه‌اندازی خارجی ۱۷۹
۱۲ـ۴ـ رفتار موتور سنکرون در زیر بار ۱۷۹
۱۳ـ۴ـ حالات کاری موتور سنکرون ۱۸۰
۱۴ـ۴ـ کاربرد موتور سنکرون ۱۸۱
پرسش‌های پایان فصل(۴) ۱۸۲
مسائل پایان فصل(۴) ۱۸۲

فصل ۵

مقدمه ۱۸۶
۱ـ۵ـ موتورهای القایی تک‌فاز ۱۸۷
۱ـ۱ـ۵ـ چگونگی ایجاد چرخش در موتورهای القایی تک‌فاز ۱۸۷
۲ـ۱ـ۵ـ موتورهای القایی تک‌فاز با فاز شکسته ۱۹۰
۳ـ۱ـ۵ـ موتورهای القایی با خازن راه‌انداز ۱۹۱
۴ـ۱ـ۵ـ موتور القایی با خازن دائم کار ۱۹۲
۵ـ۱ـ۵ـ موتورهای القایی دو خازنی (خازن راه‌انداز و دائم کار) ۱۹۲
۶ـ۱ـ۵ـ موتور القایی قطب چاک‌دار ۱۹۳
۷ـ۱ـ۵ـ تغییر جهت گردش در موتورهای القایی تک‌فاز ۱۹۴
۸ـ۱ـ۵ـ مقایسه موتورهای القایی تک‌فاز ۱۹۵
۲ـ۵ـ موتور یونیورسال ۱۹۵
۳ـ۵ـ استفاده از موتورهای سه فاز در شبکه برق تک‌فاز ۱۹۷
پرسش‌های پایان فصل(۵) ۱۹۹

پیوست I : الفبای یونانی ۲۰۰
پیوست II : واژه‌نامه ۲۰۱
فهرست مراجع کتاب ۲۰۷

هدف کلی

تحلیل ماشین‌های الکتریکی جریان متناوب (AC)

به نام خدا

سخنی با همکاران

همکاران عزیز، کتاب حاضر براساس مصوبات کمیسیون تخصصی رشتهٔ الکتروتکنیک و مطابق با اهداف رفتاری پیش‌بینی شده، تألیف گردیده است.

همانگونه که مستحضرید، درس ماشین‌های الکتریکی AC از دروس مهّم رشتهٔ الکتروتکنیک بوده که با توجه به مباحث کاربردی مطرح در این درس، مورد توجه تکنسین‌ها و کارشناسان صنعت برق می‌باشد. لذا در مباحث کتاب سعی شده است، ضمن رعایت اختصار و توجه به بازه زمانی محدود تعیین شده (۴ ساعت آموزش) و اهداف رفتاری، مباحث به صورت کاربردی و صنعت محور ارائه شوند.

بدین ترتیب در تدوین مباحث علاوه بر بسط هدف‌های رفتاری ، مطالب درسی منطبق بر نیاز صنعت ارائه شده است تا هنرجویان بتوانند با استفاده از این درس پاسخ‌گوی نیاز خود در صنعت باشند.

موارد ذیل را می‌توان از ویژگی‌های کتاب برشمرد :

۱ــ در این کتاب برای تسهیل آموزش و تطبیق با واقعیات موجود به استفاده از تصاویر واقعی، طرح واژه‌های ابتکاری و نیز ارائه نمودار اولویت داده شده است.

۲ــ دروس به صورت تشریحی با روش استقرایی از کل به جز ارائه شده‌اند و با طرح سؤال‌هایی حین متن، ذهن هنرجویان را به یافتن و کاوش هدایت نموده است.

۳ــ از روش کشف راه‌حل مسئله در برخورد با موضوعات و پدیده‌ها برای هنرجو، استفاده شده است تا خلاقیت را در ایشان بارور نماید. لذا توصیه می‌شود در روش تدریس به این موضوع توجه شود.

۴ــ در ارائه دروس به اصول پیش‌نیازی و هم نیازی با مباحث سایر کتب درسی توجه شده است.

۵ــ از آموخته‌های سایر دروس همچون درس تحلیل مدارهای الکتریکی و کاربرد آن ، جهت تقویت فهم موضوعات استفاده شده است.

۶ــ سعی شده است در تدوین مطالب، منابع علمی به روز به کار گرفته شوند.

۷ــ به منظور افزایش اطلاعات هنرجویان و جلوگیری از شیوهٔ حفظ محوری در روابط ، بخشی به نام «بیشتر بدانید» در کتاب گنجانیده شده است که به چگونگی شکل‌گیری بعضی از روابط پرداخته است. لازم به یادآوری است که اثبات هیچ رابطه‌ای جزو اهداف رفتاری کتاب نیست و لذا نباید مورد آزمون و پرسش قرار گیرند، بلکه کاربرد آنها مورد توجه می‌باشد.

۸ــ برای ترغیب هنرجویان به تحقیق در مورد موضوعات مطرح شده و ایجاد روحیهٔ پژوهش، بخشی به نام «تحقیق کنید » به کتاب افزوده شده است که به طرح موضوعاتی مرتبط با درس اما فراتر از سطح کتاب می‌پردازد، که نباید به عنوان سؤال درس تلقی شوند. هنرجویان علاقه‌مند می‌توانند با کمک هدایت شما عزیزان و با استفاده از منابع کمک درسی و یا سایت‌های فنی وتخصصی به کشف موضوع بپردازند.

۹ــ پرسش‌ها و مسائل میان فصلی و انتهای هر فصل به یادآوری مفاهیم مرتبط با هدف‌های رفتاری آن فصل می‌پردازند که می‌توانند به عنوان الگوی طرح سؤال شما عزیزان نیز مورد استفاده قرار گیرند.

با توجه به اهداف رفتاری پیش‌بینی شده برای این درس و ارتباط افقی و عمودی با سایر دروس موضوعات این

درس به ترتیب ذیل مرتب شده اند.

در فصل اول با کمک مفاهیم اولیه الکتریسیته و مغناطیس چگونگی ایجاد ترانسفورماتور تشریح و سپس به تحلیل عملکرد و کاربرد آن پرداخته شده است.

در فصل دوم ساختمان ترانسفورماتورهای سه‌فاز و تجهیزات جانبی آنها بیان شده و همچنین رفتار ترانسفورماتورهای سه فازه با اتصالات کاربردی مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل‌سوم ماشین‌های القایی سه فاز، آسنکرون با رویکرد ارائه مفاهیم‌اولیه و بررسی رفتار آن ارائه شده‌است.

در فصل چهارم، ماشین‌های سنکرون و نیز انواع نیروگاه‌ها معرفی و مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در فصل پنجم، مطالبی پیرامون روش عملکرد انواع موتورهای تکفازه ارائه شده است.

به نظر می‌رسد اگر موارد ذیل رعایت شوند، آموزش به نتایج بهتری دست خواهد یافت :

۱ــ با توجه به حجم مطالب و ارتباط با سایر دروس، پیشنهاد می‌شود در نیم سال اول فصل اول و دوم و فصل سوم ، چهارم و پنجم در نیم سال دوم برای تدریس بودجه‌بندی شوند ضمن آنکه مطالب ارائه شده در این کتاب برای چهارساعت تدریس در هفته در یک سال تحصیلی مدون شده‌اند. هرچند می‌توان برای حل تمرین‌های بیشتر مطابق شرایط هنرستان ، برنامه فوق العاده لحاظ نمود.

۲ــ می‌توان به جهت پیشبرد اهداف این کتاب از بضاعت کارگاهی هنرستان‌ها (نظیر کارگاه‌های سیم‌پیچی و برق صنعتی) استفاده نمود. به عنوان نمونه می‌توان به صورتی برنامه‌ریزی نمود که هر فراگیر بتواند آزمایش‌های بی‌باری و اتصال کوتاه ترانسفورماتوری که خود وی پیچیده است انجام داده و مدار معادل و مقادیر مورد نیاز را از آزمایش استخراج و رفتار ترانسفورماتور را تحلیل نماید.

امیدواریم کتاب حاضر بتواند در رشد و ارتقای دانش علمی و عملی هنرجویان و هماهنگی با نیازهای صنعت برق گامی مؤثر بردارد. بدون شک در این راستا و به منظور تحقق این هدف آرمانی و اهداف تعیین شدهٔ این کتاب به همکاری کلیه شما عزیزان نیازمند بوده و هستیم چرا که نقش‌آفرینی معلم درامر آموزش بر هیچ کس پوشیده نیست.

از آنجایی که هیچ کاری خالی از اشتباه و نقص نیست خواهشمند است ما را ازنقطه نظرات سازندهٔ خود بی‌نصیب نگذارید. این موارد را می‌توانید از طریق گروه‌های آموزشی و یا به صورت مستقیم به دفتر تألیف کتاب‌های درسی فنی و حرفه‌ای گروه تخصصی رشتهٔ الکتروتکنیک و یا به آدرس پست الکترونیکی motiebirjandi@srttu.edu و m.alimadadi@sahetce.com اعلام نمایید.

با تشکر ــ مؤلفان

سخنی با هنرجویان

هنرجوی گرامی، درس ماشین‌های الکتریکی AC یکی از دروس مهم و پایه‌ای در رشتهٔ الکتروتکنیک است و این کتاب برای درک پایه‌ای منطبق بر نیازهای فردای شما در صنعت تدوین شده است. به نظر می‌رسد یکی از راهکارهای موفقیت شما در رشتهٔ الکتروتکنیک به میزان تسلط شما به ماشین‌های الکتریکی وابسته است، چرا که در هر قسمت صنعت برق شما می‌توانید نقش‌آفرینی ماشین‌های الکتریکی AC را مشاهده نمایید.

اکنون به منظور بهره‌برداری هرچه بیشتر از کتاب ، توجه شما را به نکات زیر جلب می‌نماید :

۱ــ لازم است مطالب پایه‌ای مربوط به دروس مبانی برق، ریاضیات ۱ و ۲ را در ابتدای شروع سال تحصیلی دوره نمایید.

۲ــ به هدف‌های رفتاری که در جدول هدف و محتوای درسی تنظیم شده‌اند (وبگاه دفتر تألیف مراجعه شود) و مفاهیم پایه‌ای که در متن کتاب آورده شده است دقت نمایید چرا که از شما انتظار می‌رود در پایان فصل به اهداف ذکر شده دست یابید.

۳ــ سؤالاتی در متن درس و نیز در پایان هرفصل ارائه شده است. ضمن پاسخگویی به آنها سعی نمایید خودتان نیز سؤالاتی منطبق بر هدف‌های رفتاری مطرح و به آنها پاسخ دهید.

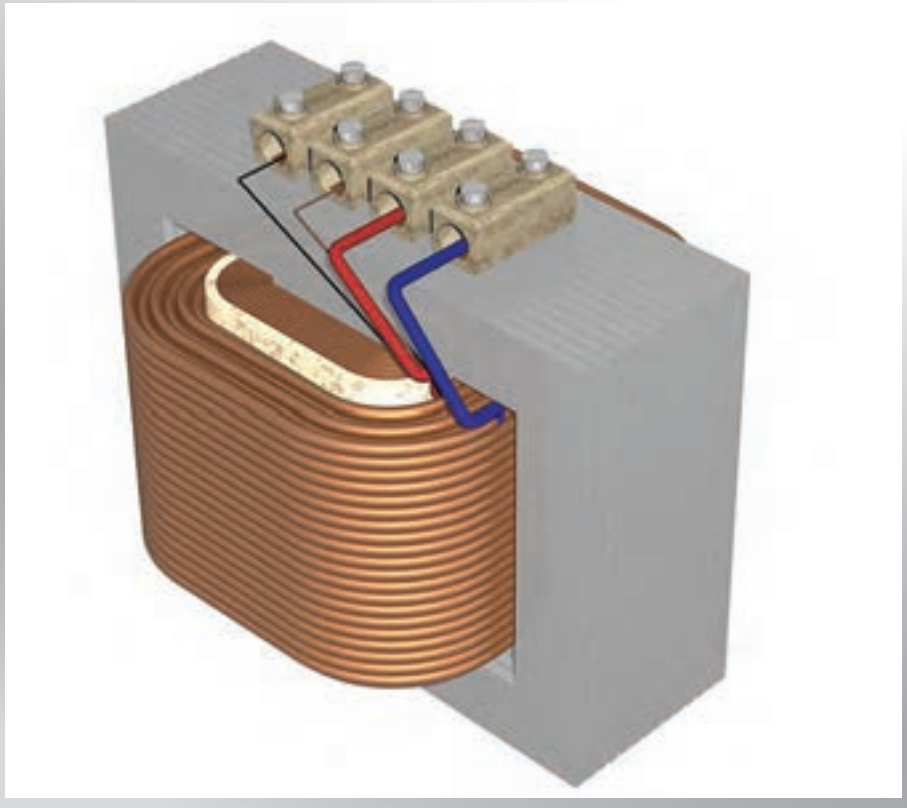
۴ــ استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز می‌تواند شما را در دریافت مفاهیم کمک نماید. بنابراین تلاش کنید مدارهای معادل ارائه شده را در نرم افزار مدارهای الکتریکی مورد شبیه‌سازی قرار داده شود.

۵ ــ در محیط زندگی روزمره خود به پلاک‌های ماشین‌های الکتریکی توجه نمایید و انطباق مطالب درسی با آنها را مورد کاوش قرار دهید. البته رعایت نکات ایمنی جزو اصول اولیه است که انتظار می‌رود به آن توجه داشته باشید.

۶ــ مباحثی که با عنوان بیشتر بدانید یا تحقیق کنید در کتاب شما آمده است، تنها برای توجه دادن شما به موضوعاتی فراتر از سطح کتاب است، بنابراین توصیه می‌شود در اوقات فراغت خود با کمک معلم درس، به این موضوعات توجه نمایید.

۱

ترانسفورماتورهای تک فاز



۱

هدف‌های رفتاری :

ـ شار متغیر مغناطیسی را تشریح کند.
ـ ضریب تزویج (کوپلینگ) مغناطیسی K را تعریف کند.
ـ رابطه بین φ و K را توضیح دهد.
ـ ضریب القای متقابل M را تعریف کند.
ـ رابطهٔ بین K و m را توضیح دهد.
ـ اجزای تشکیل‌دهنده ترانسفورمر را نام ببرد.
ـ طرز کار هریک از اجزای ترانسفورمر را توضیح دهد.
ـ طرز کار ترانسفورمر را توضیح دهد.
ـ رابطهٔ نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه را توضیح دهد.
ـ مثال داده شده درباره نیروی محرکه القایی را تشریح کند.
ـ رابطه اساسی در ترانسفورمر را توضیح دهد.
ـ مثال داده شده دربارهٔ رابطه اساسی ترانسفورمر را تشریح کند.
ـ تمرین در رابطه اساسی و نیروی محرکه القایی را حل کند.
ـ ترانسفورمر ایده‌آل را تعریف کند.
ـ رابطه اساسی در ترانسفورمرهای ایده‌آل را توضیح دهد.
ـ مثال داده‌شده درباره رابطه اساسی ترانسفورمر ایده‌آل را تشریح کند.
ـ تمرین درباره رابطه اساسی ترانسفورمر ایده‌آل را حل کند.
ـ تلفات را تعریف کند.
ـ انواع تلفات را نام ببرد.
ـ تلفات هیسترزیس را تعریف کند.
ـ تلفات هیسترزیس در ترانسفورمر را توضیح دهد.
ـ روش کاهش تلفات هیسترزیس را توضیح دهد.
ـ تلفات فوکو را تعریف کند.
ـ تلفات فوکو در ترانسفورمر را توضیح دهد.
ـ روش کاهش تلفات فوکو در ترانسفورمر را توضیح دهد.
ـ تلفات مسی را تعریف کند.
ـ تلفات مسی در ترانسفورمر را توضیح دهد.
ـ روش کاهش تلفات مسی در ترانسفورمر را توضیح دهد.
ـ بلوک دیاگرام توان در ترانسفورمر را ترسیم کند.
ـ ارتباط عناصر در بلوک دیاگرام توان‌ها را توضیح دهد.
ـ بازده در یک ترانسفورمر را تعریف کند.

ـ رابطه بازده در یک ترانسفورمر را توضیح دهد.
ـ مثال داده شده درباره بلوک دیاگرام توان و بازده را تشریح کند.
ـ تمرین درباره بلوک دیاگرام توان و بازده را حل کند.
ـ حالت بی‌باری ترانسفورمر را تعریف کند.
ـ طرز کار ترانسفورمر در حالت بی‌باری را توضیح دهد.
ـ جریان مغناطیس‌کننده I_m را شرح دهد.
ـ جریان اهمی تلفات هسته را شرح دهد.
ـ مدل‌کردن هسته به کمک R_{Fe} و X_m را توضیح دهد.
ـ مدار معادل هسته با R_{Fe} و X_m را رسم کند.
ـ مثال داده شده در رابطه با مدار معادل هسته را تشریح کند.
ـ تمرین در رابطه با مدار معادل را حل کند.
ـ مدل‌کردن فوران فراری اولیه به کمک X_1 را توضیح دهد.
ـ مدل‌کردن افت ولتاژ تلفات مسی اولیه به کمک R_1 را توضیح دهد.
ـ مدار معادل سیم‌پیچ اولیه را رسم کند.
ـ مدار معادل ترانسفورمر در حالت بی‌باری را رسم کند.
ـ دیاگرام برداری حالت بی‌باری ترانسفورمر را رسم کند.
ـ حالت بارداری ترانسفورمر را تعریف کند.
ـ طرز کار ترانسفورمر در حالت بارداری را توضیح دهد.
ـ اثر بار در جریان اولیه از طریق شارهای مغناطیسی را شرح دهد.
ـ خودتنظیمی ترانسفورمر را توضیح دهد.
ـ مدل‌کردن فوران فراری ثانویه به کمک X_2 را توضیح دهد.
ـ مدل‌کردن افت ولتاژ و تلفات مسی به کمک R_2 را توضیح دهد.
ـ مدار معادل سیم‌پیچ ثانویه را رسم کند.
ـ مدار معادل واقعی ترانسفورمر را از دیدگاه اولیه رسم کند.
ـ انواع بارهای الکتریکی را نام ببرد (RC, RL, R).
ـ دیاگرام برداری حالت بارداری در بار اهمی خالص را توضیح دهد.
ـ دیاگرام برداری حالت بارداری در بار اهمی خالص را رسم کند.
ـ اثر بار اهمی خالص بر روی ولتاژ خروجی را توضیح دهد.
ـ رابطه افت ولتاژ درونی ترانس با توجه به دیاگرام برداری بار اهمی خالص را به‌دست آورد.
ـ مثال مربوط به محاسبه افت ولتاژ بار اهمی را از دیدگاه اولیه تشریح کند.
ـ تمرین مربوط به محاسبه افت ولتاژ بار اهمی را از دیدگاه اولیه حل کند.

ـ دیاگرام برداری حالت بارداری در بار اهمی سلفی را توضیح دهد.
ـ دیاگرام برداری حالت بارداری در بار اهمی سلفی را ترسیم کند.
ـ اثر بار اهمی سلفی بر ولتاژ خروجی را توضیح دهد.
ـ رابطه افت ولتاژ درونی ترانس با توجه به دیاگرام برداری بار اهمی سلفی را به‌دست آورد.
ـ مثال مربوط به محاسبه افت ولتاژ بار اهمی سلفی را از دیدگاه اولیه تشریح کند.
ـ تمرین مربوط به محاسبه افت ولتاژ بار اهمی سلفی را از دیدگاه اولیه حل کند.
ـ دیاگرام برداری حالت بارداری در بار اهمی خازنی را توضیح دهد.
ـ دیاگرام برداری حالت بارداری در بار اهمی خازنی را ترسیم کند.
ـ اثر بار اهمی خازنی بر ولتاژ خروجی را توضیح دهد.
ـ رابطهٔ افت ولتاژ درونی ترانس با توجه به دیاگرام برداری بار اهمی خازنی را به‌دست آورد.
ـ مثال مربوط به محاسبه افت ولتاژ بار اهمی خازنی را از دیدگاه اولیه تشریح کند.
ـ تمرین مربوط به محاسبه افت ولتاژ بار اهمی خازنی را از دیدگاه اولیه حل کند.
ـ دلیل آزمایش بی‌باری ترانسفورمر را بیان کند.
ـ مدار آزمایش بی‌باری را ترسیم کند.
ـ نحوه انجام آزمایش بی‌باری را توضیح دهد.
ـ نتایج حاصل از آزمایش بی‌باری را تجزیه و تحلیل کند.
ـ اثر تغییرات بار و ولتاژ اولیه بر تلفات آهنی را تشریح کند.
ـ با استفاده از نتایج آزمایش بی‌باری پارامترهای مدار معادل را به‌دست آورد.
ـ مثال مربوط به نتایج آزمایش بی‌باری را تشریح کند.
ـ تمرین مربوط به نتایج آزمایش بی‌باری را حل کند.
ـ دلیل آزمایش اتصال کوتاه ترانسفورمر را بیان کند.
ـ مدار آزمایش اتصال کوتاه را ترسیم کند.
ـ نحوه انجام آزمایش اتصال کوتاه را توضیح دهد.
ـ نتایج حاصل از آزمایش اتصال کوتاه را تجزیه و تحلیل کند.
ـ اثر تغییرات بار بر تلفات مسی را توضیح دهد.
ـ با استفاده از نتایج آزمایش اتصال کوتاه پارامترهای مدار معادل را به‌دست آورد.
ـ مثال مربوط به نتایج آزمایش اتصال کوتاه را تشریح کند.
ـ تمرین مربوط به نتایج آزمایش اتصال کوتاه را حل کند.
ـ ولتاژ اتصال کوتاه را تعریف کند.
ـ درصد ولتاژ اتصال کوتاه را با ذکر رابطه تعریف کند.
ـ مثال مربوط به محاسبه درصد ولتاژ اتصال کوتاه را تشریح کند.

ـ تمرین مربوط به محاسبه درصد ولتاژ اتصال کوتاه را حل کند.
ـ اتصال کوتاه در ترانسفورمر را تعریف کند.
ـ جریان اتصال کوتاه در ترانسفورمر را شرح دهد.
ـ رابطه جریان اتصال کوتاه دائم در ترانسفورمر را تعریف کند.
ـ مثال مربوط به محاسبه جریان اتصال کوتاه دائم را تشریح کند.
ـ تمرین مربوط به محاسبه جریان اتصال کوتاه دائم را حل کند.
ـ راندمان را تعریف کند.
ـ دیاگرام توازن قدرت در ترانسفورمر را ترسیم کند.
ـ روابط توان‌های ورودی، خروجی در ترانسفورمر را توضیح دهد.
ـ مثال مربوط به محاسبه راندمان و تلفات در ترانسفورمر را تشریح کند.
ـ تمرین مربوط به محاسبه راندمان و تلفات در ترانسفورمر را حل کند.
ـ اثر تغییر ضریب قدرت و بار را بر روی راندمان ترانسفورمر تعریف کند.
ـ نمودار مربوط به تأثیر بار و ضریب قدرت بر ترانسفورمر را تحلیل کند.
ـ مثال مربوط به تغییر بار و ضریب قدرت بر راندمان ترانسفورمر را تشریح کند.
ـ تمرین مربوط به تغییر بار و ضریب قدرت بر راندمان ترانسفورمر را حل کند.
ـ شرط راندمان ماکزیمم را تعریف کند.
ـ مثال مربوط به محاسبه راندمان ماکزیمم را تشریح کند.
ـ تمرین مربوط به محاسبه راندمان ماکزیمم را حل کند.
ـ موازی‌کردن ترانسفورمر را تعریف کند.
ـ علت موازی‌کردن ترانسفورمرها را شرح دهد.
ـ شرایط موازی‌کردن ترانسفورمرها را شرح دهد.
ـ نحوه موازی‌کردن ترانسفورمرها را از روی شکل شرح دهد.
ـ ترانسفورمر کاهنده و افزاینده را تعریف کند.
ـ کاربرد ترانسفورمر کاهنده و افزاینده را توضیح دهد.
ـ ترانسفورمر ایزوله را تعریف کند.
ـ کاربرد ترانسفورمر ایزوله را توضیح دهد.
ـ ترانسفورمرهای CT را تعریف کند.
ـ کاربرد ترانسفورمر CT را توضیح دهد.
ـ ترانسفورمر PT را تعریف کند.
ـ کاربرد ترانسفورمر PT را توضیح دهد.
ـ ترانسفورمر جوشکاری را تعریف کند.

۱

ـ کاربرد ترانسفورمر جوشکاری را توضیح دهد.
ـ اتو ترانسفورمر را تعریف کند.
ـ ساختمان داخلی اتو ترانسفورمر افزاینده کاهنده را با رسم شکل توضیح دهد.
ـ دیاگرام توازن قدرت در اتوترانسفورمر را رسم کند.
ـ روابط اساسی اتو ترانسفورمر را توضیح دهد.
ـ مثال مربوط به اتوترانسفورمر را تشریح کند.
ـ تمرین مربوط به اتوترانسفورمر را حل کند.
ـ کاربردهای اتوترانسفورمر را بیان کند.
ـ اطلاعات اصلی بر روی پلاک ترانسفورمر را فهرست کند.
ـ با استفاده از یک پلاک اطلاعات خواسته شده را استخراج کند.
ـ تمرین‌های مربوط به ترانسفورمر و اتوترانسفورمر را حل کند.

مقدمه

با عبور جریان الکتریکی از یک‌سیم‌پیچ درون آن میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. مجموع خطوط قوای میدان مغناطیسی سیم‌پیچ فوران یا شار مغناطیسی نامیده می‌شود. اگر جریان الکتریکی DC از سیم‌پیچ بگذرد، شار سیم‌پیچ مقداری ثابت خواهد داشت.

اگر جریان الکتریکی AC از سیم‌پیچ عبور داده شود شار تولید شده مقدار متغیری خواهد داشت که نسبت به زمان تغییر خواهد کرد.

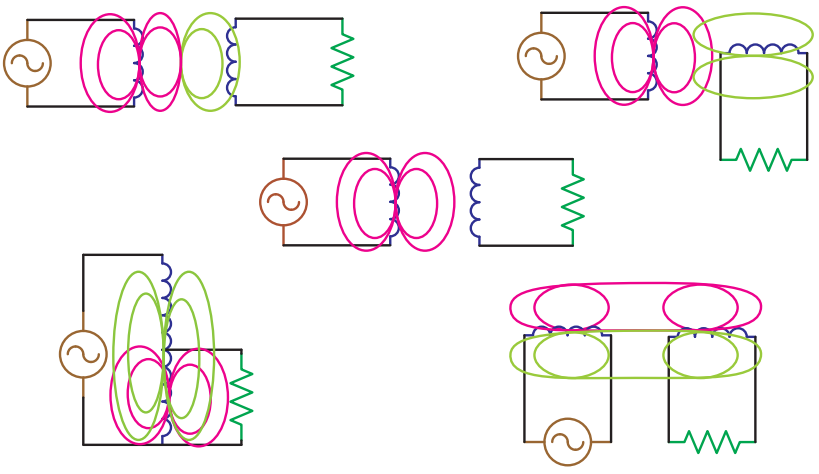
همچنین هرگاه دو سیم‌پیچ در نزدیک یکدیگر قرار گیرند به‌طوری که خطوط قوای مغناطیسی متغیر تولید شده در یکی از سیم‌پیچ‌ها بتواند حلقه‌های سیم‌پیچ دوم را قطع کند، در آن سیم‌پیچ نیروی محرکه القا می‌کند و در صورتی که مسیر عبور جریان از سیم‌پیچ دوم نیز مهیا باشد، میدان مغناطیسی تولید می‌کند و شار مغناطیسی آن نیز روی سیم‌پیچ اول نیروی محرکه القا می‌کند این پدیده را القای متقابل (M) می‌گویند.

مقدار نیروی محرکه القایی ناشی از القای متقابل به ضریب القای متقابل M بستگی دارد هرچه خطوط میدان مغناطیسی بیشتری بین دو سیم‌پیچ برقرار شود ضریب القای متقابل M بزرگتر می‌شود. ضریب القای متقابل به چگونگی قرارگیری سیم‌پیچ‌ها و فاصله آنها از یکدیگر بستگی دارد. القای متقابل کامل در سیم‌پیچ زمانی اتفاق می‌افتد که تمام خطوط قوای مغناطیسی یک سیم‌پیچ به سیم‌پیچ دوم برسد. اگر هیچ یک از خطوط قوای مغناطیسی دو سیم‌پیچ از داخل هم عبور نکنند، القای متقابل بین آنها وجود نخواهد داشت و ضریب القای متقابل صفر است. برای درک بهتر مطالب فوق به شکل(۱) توجه کنید.

خود را بیازمایید

۱) القای متقابل چیست؟

۲) ضریب القای متقابل دو سیم‌پیچ به چه عواملی بستگی دارد؟



شکل ۱ــ وابستگی القای متقابل به چگونگی استقرار سیم‌پیچ‌ها

۱ــ۱ــ ساختمان ترانسفورماتور

ترانسفورماتور وسیله ای است که از پیچیدن دو سیم‌پیچ یا بیشتر بر روی یک هسته مغناطیسی ساخته می‌شود. شکل (۲) ساختمان یک ترانسفورماتور ساده را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است هر سیم‌پیچ بر روی یک بازوی هسته مغناطیسی پیچیده شده است.

سیم‌پیچی که به منبع ولتاژ متناوب متصل می‌شود را

۱

سیم‌پیچ اولیه و سیم‌پیچی که به مصرف کننده الکتریکی متصل می‌شود را سیم‌پیچ ثانویه گویند.

به‌علاوه سیم‌پیچ با ولتاژ بیشتر را سیم‌پیچ فشار قوی (H.V) و سیم‌پیچ با ولتاژ کمتر را سیم‌پیچ فشار ضعیف (L.V) می‌نامند.

طبق تعریف اگر سیم‌پیچ فشار قوی یک ترانسفورماتور در سمت اولیه و سیم‌پیچ فشار ضعیف آن در سمت ثانویه باشد آن را ترانسفورماتور کاهنده ولتاژ می‌نامند و در صورتی که سیم‌پیچ فشار قوی یک ترانسفورماتور در سمت ثانویه و سیم‌پیچ فشار ضعیف آن در سمت اولیه باشد آن را ترانسفورماتور افزاینده می‌گویند.

از ترانسفورماتور کاهنده و افزاینده به‌ترتیب برای کاهش و افزایش ولتاژ و برای تأمین ولتاژ مناسب جهت تغذیه مصرف‌کننده‌های الکتریکی استفاده می‌شود.

ساختمان ترانسفورماتور از دو قسمت تشکیل شده است که عبارت‌اند از :

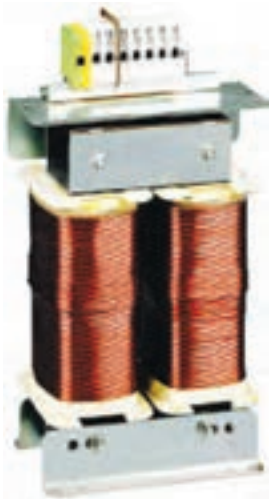
- هسته مغناطیسی
- سیم‌پیچ

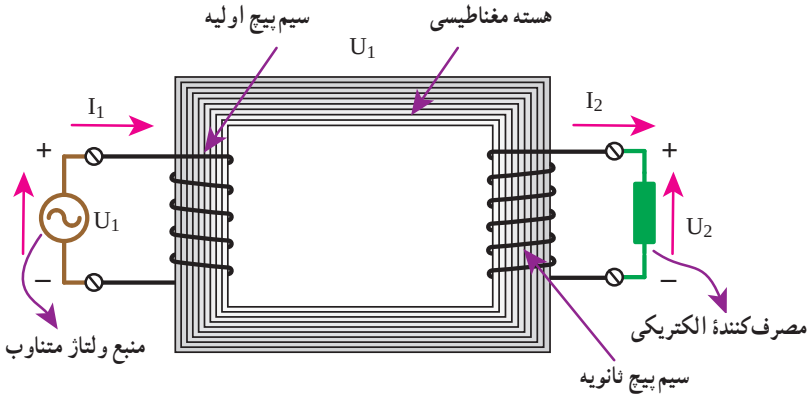
خود را بیازمایید

۱ــ منظور از سیم‌پیچ اولیه وثانویه چیست؟

۲ــ ترانسفورماتور افزاینده را تعریف کنید.

۳ــ منظور از سیم‌پیچ فشارقوی و ضعیف چیست؟



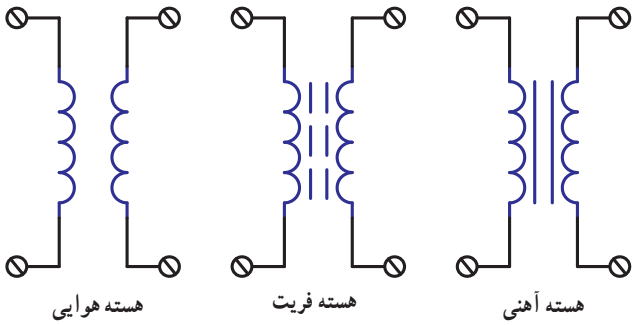


شکل ۲ــ نمای ظاهری و ساختمان داخلی یک ترانسفورماتور

۱ــ۱ــ۱ــ هسته : هسته ترانسفورماتور مسیر عبور شار مغناطیسی بین سیم‌پیچ‌ها را برقرار می‌کند تا القای متقابل بین آنها برقرار شود.

جنس هسته مغناطیسی ترانسفورماتورها می‌تواند از جنس هوا، فریت و یا فولاد الکتریکی باشد.

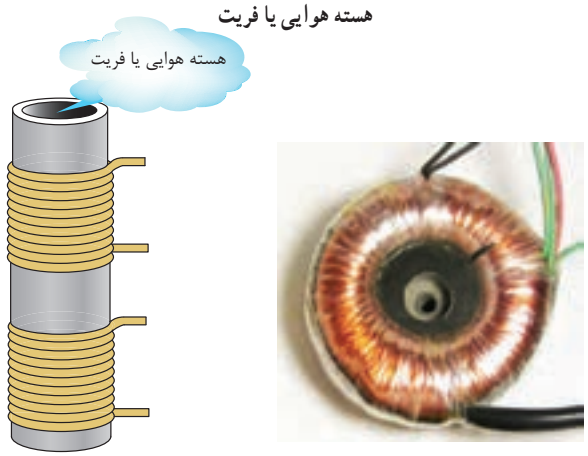
علامت اختصاری هریک از این ترانسفورماتورها در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳ــ علائم اختصاری ترانسفورماتور با هسته‌های مختلف

هسته‌های هوایی و فریت[1] در ترانسفورماتورهای با فرکانس بالا[2] و در صنایع مخابراتی کاربرد فراوان دارند.

سیم‌پیچ های این نوع ترانسفورماتور مطابق شکل (۴) با حداقل ضریب القای متقابل روی هسته پیچیده می شوند.



شکل ۴ــ نمایی از یک ترانسفورماتور با هسته هوایی یا فریت

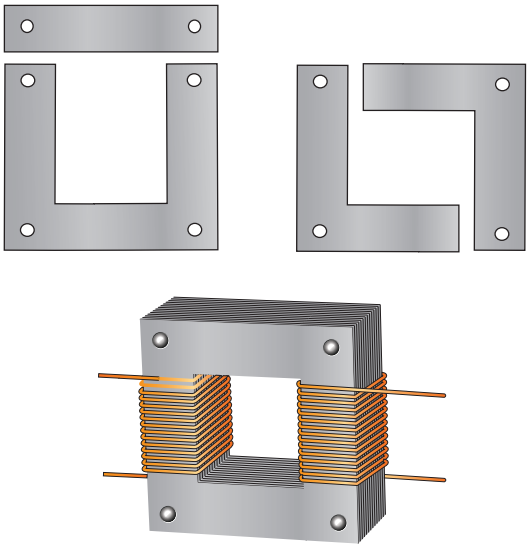
از هسته مغناطیسی با جنس فولاد الکتریکی در ترانسفورماتورهای قدرت و تقویت کننده‌های صوتی(AF)[3] استفاده می شود.

آنچه در این کتاب مورد توجه می‌باشد، بررسی ترانسفورماتورهای قدرت است. ترانسفورماتورهای قدرت ترانسفورماتورهایی را گویند که در صنعت انتقال و توزیع انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجاکه هسته این نوع ترانسفورماتورها فولاد الکتریکی است بنابراین در ادامه فقط به آنها پرداخته خواهد شد.

از نظر ساختمانی ترانسفورماتورهای تکفاز با توجه به قرارگرفتن سیم‌پیچ‌ها روی هسته ترانسفورماتور به دو دسته تقسیم می‌شوند.

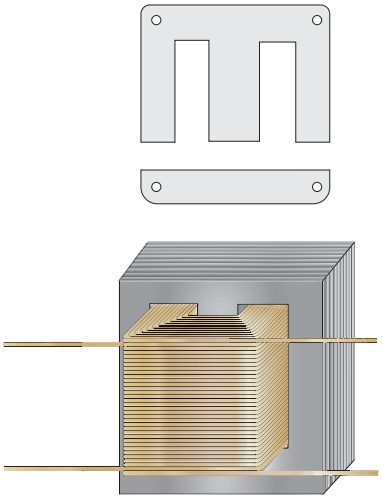
الف) اگر هر سیم‌پیچ روی یک پایه هسته پیچیده شود به آن هستهٔ ستونی می‌گویند. شکل (۵) ورقه‌های این نوع هسته و نمای کامل ترانسفورماتور با این نوع هسته را نمایش می دهد.

شکل ورقه‌های این هسته به‌صورت دو ورقه L یا ورقه U و I می‌باشد.



شکل ۵ــ نمایی از یک ترانسفورماتور ستونی و شکل ورقه‌های آن

ب) اگر هر دو سیم‌پیچ مطابق شکل (۶) روی یک پایه پیچیده شوند، ترانسفورماتور را با هسته زرهی می‌گویند ورقه این نوع هسته ها به صورت E و I ساخته می‌شوند.



شکل ۶ــ نمای یک ترانسفورماتور با هسته زرهی و شکل ورقه‌های آن

۱ــ فریت نوعی آلیاژ فرو مغناطیسی پودری می‌باشد، که فشرده شده است.

۲ــ فرکانس های بالای ۲۰KHz

۳ــ Audio Amplifier

۱

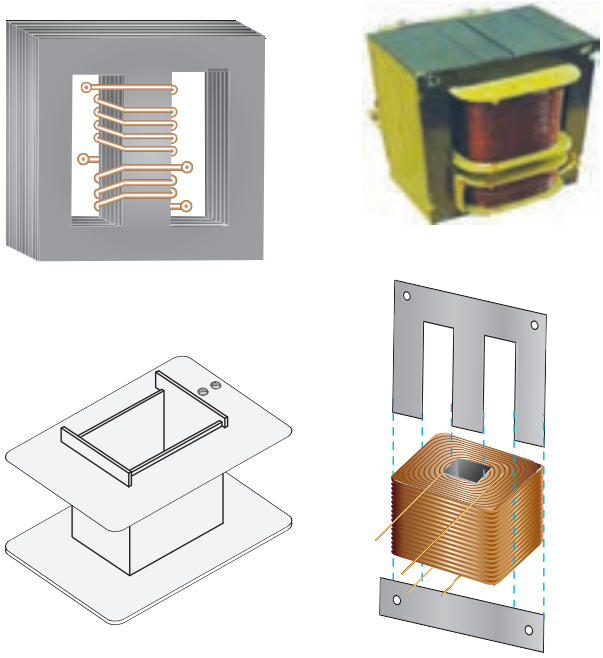
با توجه به شکل(۵)، در ترانسفورماتورهای ستونی، سیم‌پیچ‌ها بخش قابل ملاحظه‌ای از محیط هسته را اشغال می‌کنند و روی دو قرقره پیچیده می‌شوند. در صورتی که در ترانسفورماتورهای زرهی، هسته ترانسفورماتور، سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه را در برمی‌گیرد. بنابراین از آنجا که در ترانسفورماتورهای زرهی برای پیچیدن سیم‌پیچ از یک قرقره استفاده می شود در نتیجه ضریب القای متقابل سیم‌پیچ‌ها بزرگتر می‌شود. در ترانسفورماتور، شار مغناطیسی از طریق هسته عبور می‌کند پس برای ایجاد حداکثر ضریب القای متقابل باید مقاومت مغناطیسی آن بسیار کم باشد به همین دلیل جنس هستهٔ مغناطیسی از فولاد الکتریکی انتخاب می‌شود برای کاهش تلفات فوکو در هسته آن‌را ورقه‌ورقه می‌کنند و هر ورق را با لاک عایقی نازک می‌پوشانند که معمولاً دارای ضخامتی بین ۰/۳۵ تا ۰/۵ میلی متر می‌باشند.

خود را بیازمایید

۱ــ وظیفه هسته مغناطیسی در ترانسفورماتور را شرح دهید.

۲ــ جنس هسته های مغناطیسی در ترانسفورماتورهای توزیع و قدرت از چیست؟

۲ــ۱ــ۱ــ سیم پیچ : سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور مطابق شکل (۷) بر روی قرقره پیچیده می‌شوند سپس هسته را درون قرقره جا می‌زنند.



شکل ۷ــ شکل‌های متفاوتی از اجزای داخلی ترانسفورماتور

سطح مقطع سیم در مقدار جریان عبوری از سیم‌پیچ مؤثر است و نیروی محرکه القایی سیم‌پیچ نیز بستگی به تعداد دور سیم‌پیچ دارد بنابراین هر سیم‌پیچ برای ولتاژ و جریان مشخصی طراحی می‌شود که به آن ولتاژ و جریان نامی سیم‌پیچ می‌گویند.

با عبور جریان از سیم‌پیچ به‌دلیل وجود مقاومت الکتریکی سیم در آن باعث ایجاد حرارت می شود. هر چقدر جریان بیشتر باشد تلفات حرارتی بیشتر خواهد شد.

در طراحی ترانسفورماتورها سعی می‌کنند تا حرارت

ایجاد شده در سیم‌پیچ به خارج آن منتقل شود تا مانعِ از بین رفتن عایق آن جلوگیری شود.

خود را بیازمایید

۱ــ قطر سیم‌پیچ ترانسفورماتور چه تأثیری بر جریان و ولتاژ نامی آن دارد؟

۲ــ تعداد دور سیم‌پیچ ترانسفورماتور چه تأثیری بر جریان و ولتاژ نامی آن دارد؟

۳ــ برای کاهش دمای سیم‌پیچ های ترانسفورماتور چه راه هایی پیشنهاد می‌کنید.

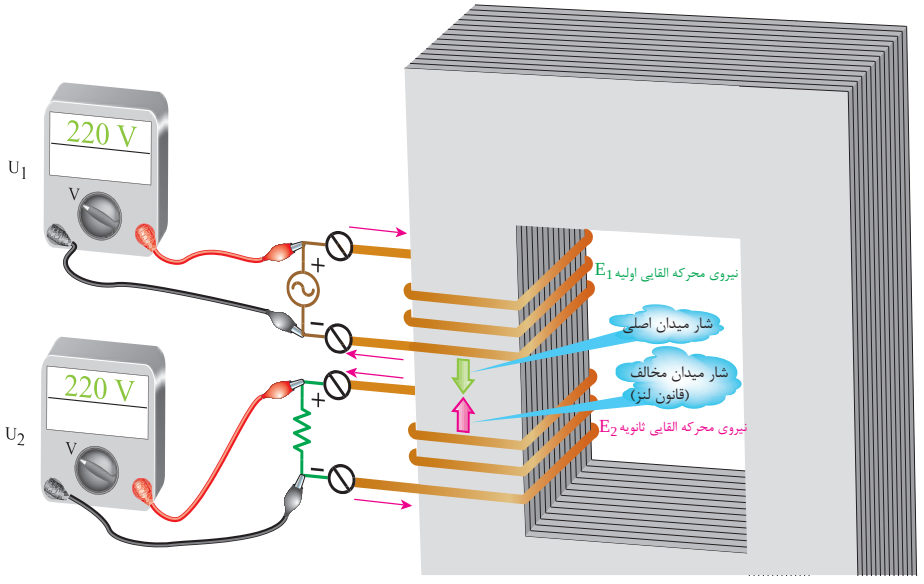
۲ــ۱ــ تئوری و طرز کار ترانسفورماتور

هنگامی که یکی از سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور به منبع ولتاژ متناوب متصل گردد، از آن جریان عبور می‌کند. عبور جریان از سیم‌پیچ باعث تولید شار مغناطیسی درون سیم‌پیچ می‌شود این شار از داخل هسته عبور می‌کند. مقدار شار ایجاد شده به تعداد دور و جریان سیم‌پیچ بستگی دارد.

با عبور این شار از سیم‌پیچ دوم که به مصرف کننده متصل است نیروی محرکه الکتریکی در آن القا می‌کند، زیرا مقدار آن به‌طور متناوب تغییر می‌کند.[۱]

مقدار نیروی محرکه القا شده به تعداد دورهای سیم‌پیچ ثانویه و تغییرات شار نسبت به زمان بستگی دارد بنابراین می‌توان با انتخاب تعداد دور سیم‌پیچ به ولتاژهای مختلفی دست یافت. از طرفی به‌دلیل بسته بودن مدار، جریانی متناسب با بار از سیم‌پیچ دوم عبور می‌کند بدین ترتیب انرژی الکتریکی از طریق یک ارتباط مغناطیسی از سیم‌پیچ اول به سیم‌پیچ دوم منتقل می‌شود.

در واقع پدیده فوق بیانگر همان قانون القای فاراده می‌باشد زیرا تغییرات جریان عبوری در سیم‌پیچ باعث تغییرات فوران (شار) سیم‌پیچ شده و در نتیجه ولتاژی در هر دو سیم‌پیچ القا می‌کند.



شکل۸ــ مسیر عبور جریان در سیم‌پیچ‌ها و عبور شار مغناطیسی از هسته

۱ــ شار عبوری از سیم پیچ با عبور جریان متناوب ایجاد شده پس ماهیتی متناسب با جریان متناوب دارد.

۱

با توجه به قانون ولتاژ فاراده داریم :

$$E = -N\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \qquad (۱ــ۲)$$

در رابطه (۱ــ۲)

$\Delta\varphi$ تغییرات فوران مغناطیسی

Δt تغییرات زمان

N تعداد دور سیم‌پیچ

E نیروی محرکه الکتریکی القایی

چون جریان متناوب سینوسی است فوران هم متناوب سینوسی می‌باشد.

یعنی :

$$\varphi_{(t)} = \varphi_m \sin\omega t \qquad (۱ــ۳)$$

بیشتر بدانید

$$E = -N\frac{d\varphi}{dt} = -N\frac{d(\varphi_m \sin\omega t)}{dt} = N\varphi_m\omega\cos\omega t$$

$$E_m = N\varphi_m\omega \Rightarrow E = \frac{N\varphi_m\omega}{\sqrt{۲}}$$

$$E = \frac{NB_mA(۲\pi f)}{\sqrt{۲}} \Rightarrow E = ۴/۴۴NB_mAf$$

$$E = ۴/۴۴NB_mAf \qquad (۱ــ۴)$$

در رابطه (۴-۱)

E مقدار نیروی محرکه القایی مؤثر برحسب V

N تعداد دور سیم‌پیچ

B_m حداکثر چگالی میدان مغناطیسی بر حسب T

A سطح مقطع هسته بر حسب $m^۲$

f فرکانس برق بر حسب HZ

مثال ترانسفورماتوری دارای یک هسته با سطح مقطع $۱۰cm^۲$ می‌باشد. اگر تعداد حلقه‌های یکی از سیم‌پیچ‌های آن ۱۰۰۰ دور و حداکثر چگالی میدان مغناطیسی در هسته ۱/۱۲۶ T باشد.

نیروی محرکه القایی سیم‌پیچ در فرکانس ۵۰ هرتز چند ولت است؟

$$E = ۴/۴۴NB_mAf$$

$$= ۴/۴۴ \times ۱۰۰۰ \times ۱/۱۲۶ \times ۱۰ \times ۱۰^{-۴} \times ۵۰ \approx ۲۵۰V$$

در صورت استفاده از سیم‌پیچ فوق به‌عنوان اولیه امکان استفاده از آن در ولتاژی بالاتر از ۲۵۰ V وجود ندارد.

از آنجا که هرسه کمیت چگالی میدان مغناطیسی هسته «B_m»، سطح مقطع هسته«A»و فرکانس شبکه «f» در ترانسفورماتور ثابت هستند و تعداد دور سیم‌پیچ اولیه و ثانویه در ترانسفورماتورها می‌تواند متفاوت اختیار شود، پس رابطه (۱ــ۴) را می توان به صورت روابط (۱ــ۵) و (۱ــ۶) نوشت.

$$E_۱ = ۴/۴۴N_۱B_mAf \qquad (۱ــ۵)$$

$$E_۲ = ۴/۴۴N_۲B_mAf \qquad (۱ــ۶)$$

بنابراین در سیم‌پیچ اولیه و ثانویه هر ترانسفورماتور متناسب با تعداد دور سیم‌پیچ، نیروی محرکه در آن القا می‌شود.

با توجه به رابطه (۱ــ۵) و (۱ــ۶) رابطه (۱ــ۷) به‌دست می‌آید و آن را رابطه کلی ترانسفورماتور گویند.

$$\frac{E_۱}{E_۲} = \frac{N_۱}{N_۲} \qquad (۱ــ۷)$$

نسبت $\frac{N_۱}{N_۲}$ را نسبت تبدیل ترانسفورماتور می‌گویند و آن را با a نمایش می‌دهند. گاهی از عکس این نسبت در روابط استفاده می‌شود که آن را با K نمایش می‌دهند و آن را ضریب تبدیل گویند. بنابراین داریم :

$$a = \frac{N_۱}{N_۲} \qquad (۱ــ۸)$$

$$K = \frac{N_۲}{N_۱} \qquad (۱ــ۹)$$

معمولاً در مشخصات فنی یک ترانسفورماتور به‌ندرت تعداد دور سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه آورده می‌شود و غالباً ولتاژهای اولیه و ثانویه ترانسفورماتور روی پلاک آن درج می‌شود. سازندگان ترانسفورماتور هم بر اساس ولتاژ مورد نیاز مصرف‌کننده و ولتاژ منبع، تعداد دور متناسب هر سیم‌پیچ را محاسبه می‌کنند که با چگونگی محاسبه آن در کتاب سیم‌پیچی آشنا خواهید شد.

مثال اگر سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتوری دارای ۲۰۰ دور و سیم‌پیچ ثانویه ۵۰ دور باشد نسبت تبدیل و ضریب تبدیل ترانسفورماتور چقدر است؟

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{200}{50} = 4$$

$$K = \frac{N_2}{N_1} = \frac{50}{200} = 0/25$$

خود را بیازمایید

۱ــ شارمغناطیسی ایجاد شده در یک ترانسفورماتور به چه عواملی بستگی دارد؟

۲ــ نسبت تبدیل ترانسفورماتور چیست؟

۳ــ ترانسفورماتوری دارای هسته با سطح مقطع $40\ cm^2$ و چگالی شار ۱/۲۵ تسلا می باشد، تعداد دور سیم‌پیچ این ترانسفورماتور با ولتاژ القایی ۱۱۰ ولت در شبکه ۵۰ هرتز چقدر است؟

۳ــ۱ــ ترانسفورماتور ایده‌آل

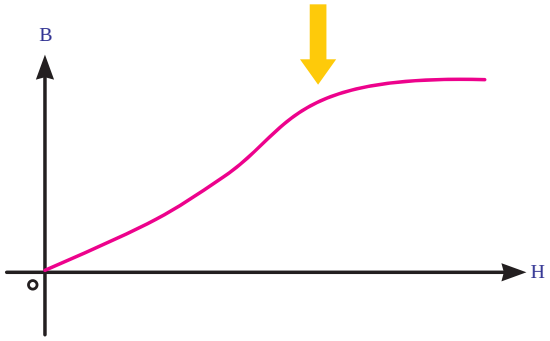
۱ــ۳ــ۱ــ کلیات : با اینکه در طبیعت هیچ چیز ایده‌آلی وجود ندارد ولی گاهی اوقات برای تشریح یک موضوع علمی لازم است در ابتدا ایده‌آل آن، مورد بررسی قرار گیرد. بررسی ترانسفورماتور ایده‌آل نیز صرفاً به‌خاطر تشریح رفتار واقعی ترانسفورماتور مورد توجه می‌باشد.

به‌طور کلی ترانسفورماتوری را ایده آل می‌گویند که دارای شرایط زیر باشد :

- مقاومت الکتریکی سیم‌پیچ ها صفر باشد (یعنی هیچگونه افت ولتاژ الکتریکی وجود نداشته باشد).

تمامی شار مغناطیسی تولید شده در سیم‌پیچ اولیه به سیم‌پیچ ثانویه برسد یعنی همهٔ شار از داخل هسته عبور کند و شار پراکندگی یا خارج شده از هسته وجود نداشته باشد و ضریب القای متقابل حداکثر باشد.

- با افزایش شدت میدان مغناطیسی، چگالی میدان مغناطیسی نیز زیاد شود. اما در واقعیت این‌طور نیست یعنی با افزایش شدت میدان مغناطیسی H مطابق منحنی شکل (۹) هسته اشباع خواهد شد.



شکل ۹ــ منحنی مغناطیسی در هسته‌های آهنی و نمایش نقطه اشباع

۲ــ۳ــ۱ــ روابط اساسی ترانسفورماتور : با توجه به مدار شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که در ترانسفورماتورهای ایده‌آل ولتاژ اعمال شده به ترمینال سیم‌پیچ اولیه یعنی U_1 (یا همان ولتاژ ورودی) با نیروی محرکه القایی سیم‌پیچ اولیه یعنی E_1 برابر است همچنین نیروی محرکه القا شده در سیم‌پیچ ثانویه یعنی E_2 هم برابر با ولتاژ ترمینال خروجی ترانسفورماتور یعنی U_2 است. دلیل برابری این ولتاژها صرف نظر کردن از همان مقاومت سیم‌پیچ ها و همچنین عدم پراکندگی میدان در سیم‌پیچ اولیه و ثانویه می‌باشد. بنابراین :

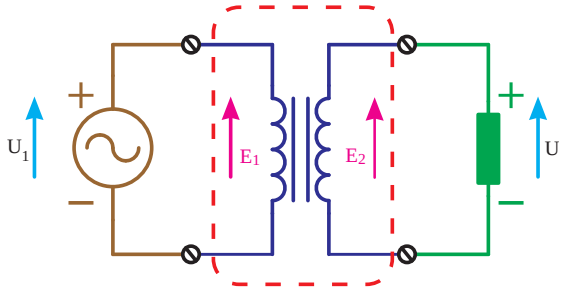
$$U_1 = E_1 \qquad (۱ــ۱۰)$$

$$U_2 = E_2 \qquad (۱ــ۱۱)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad (۱ــ۱۲)$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad (۱ــ۱۳)$$

در ترانسفورماتور ایده‌آل نسبت ولتاژ سیم‌پیچ‌ها با نسبت تعداد حلقه های آنها برابر است.



ترانسفورماتور ایده آل

شکل ۱۰ــ اتصال ترانسفورماتور ایده‌آل به منبع ولتاژ و مصرف کننده

مثال در یک ترانسفورماتور ایده‌آل سیم‌پیچ اولیه ۵۰۰ دور و سیم‌پیچ ثانویه ۱۵۰۰ دور می‌باشد. اگر سیم‌پیچ اولیه به منبع ولتاژ متناوبی با ولتاژ مؤثر ۱۲۰ ولت متصل شود ولتاژ خروجی چقدر خواهد بود؟

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{۱۲۰}{U_2} = \frac{۵۰۰}{۱۵۰۰} \Rightarrow U_2 = \frac{۱۵۰۰ \times ۱۲۰}{۵۰۰} = ۳۶۰\,V$$

پس این ترانسفورماتور یک ترانسفورماتور افزاینده ولتاژ می‌باشد.

وقتی سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور به مصرف کننده متصل می‌شود جریانی متناسب با بار مصرف کننده از آن عبور می‌کند. همانطور که گفته شد در ترانسفورماتور ایده‌آل توان ورودی و خروجی با هم برابر است یعنی :

$$S_1 = S_2 \qquad (۱ــ۱۴)$$

$$U_1 \times I_1 = U_2 \times I_2 \qquad (۱ــ۱۵)$$

رابطه (۱ــ۱۵) را می‌توان به صورت رابطه (۱ــ۱۶) نیز نوشت :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \qquad (۱ــ۱۶)$$

در ترانسفورماتور ایده‌آل نسبت ولتاژ سیم‌پیچ‌ها با عکس نسبت جریان عبوری از آنها برابر است.

با توجه به رابطه (۱ــ۱۳)، (۱ــ۱۶) رابطه (۱ــ۱۷) را می توان نوشت :

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \qquad (۱ــ۱۷)$$

در ترانسفورماتور ایده‌آل نسبت تعداد حلقه های سیم‌پیچ با عکس نسبت جریان عبوری از آنها برابر است.

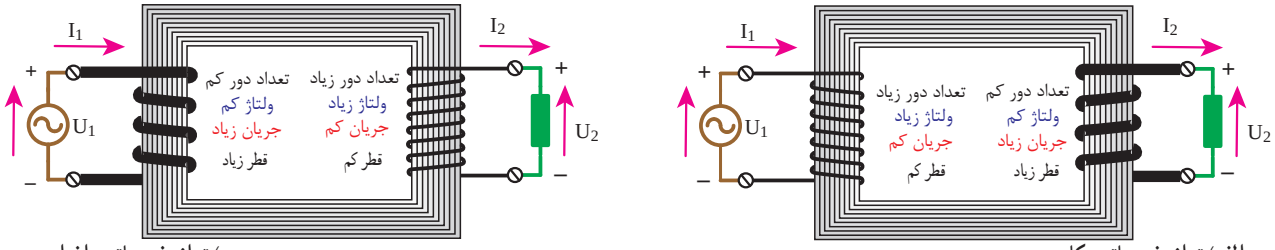
در ترانسفورماتور ایده‌آل با توجه به رابطه (۱ــ۱۷)، جریان عبوری از سیم‌پیچی که تعداد دور بیشتری دارد کمتر است و همین‌طور جریان عبوری از سیم‌پیچی که تعداد دورکمتری دارد، بیشتر می‌باشد.

جریان سیم‌پیچ سمت فشار ضعیف (LV) نیز مطابق رابطه (۱۶ــ۱) همواره بیشتر از جریان سیم‌پیچ سمت فشار قوی (HV) می‌باشد. به همین دلیل سطح مقطع سیم‌های سیم‌پیچ فشار ضعیف نسبت به سیم‌پیچ فشار قوی بیشتر و تعداد دور آن کمتر از سیم‌پیچ‌های فشار قوی می‌باشد در نتیجه با دیدن سیم‌پیچ‌های یک ترانسفورماتور می‌توان سیم‌پیچ فشار ضعیف را از سیم‌پیچ فشار قوی تشخیص داد. این نکته در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

مثال در یک ترانسفورماتور ایده‌آل سیم‌پیچ اولیه ۱۰۰۰ دور و سیم‌پیچ ثانویه ۱۰۰ دور سیم دارد اگر از سیم‌پیچ ثانویه ۵ آمپر عبور کند از سیم‌پیچ اولیه چند آمپر می‌گذرد؟

$$\frac{N_1}{N_2}=\frac{I_2}{I_1}$$

$$\frac{1000}{100}=\frac{5}{I_1}\Rightarrow I_1=\frac{5\times100}{1000}=0/5A$$



الف) ترانسفورماتور کاهنده — ب) ترانسفورماتور افزاینده

شکل ۱۱ــ تأثیر تعداد دور سیم‌پیچ در تشخیص سیم‌پیچ فشار ضعیف یا فشار قوی

خود را بیازمایید

۱ــ قطر سیم‌پیچ فشار ضعیف..... از سیم‌پیچ فشار قوی می باشد. (کمتر / بیشتر)

۲ــ تعداد دور سیم‌پیچ فشار قوی..... از سیم‌پیچ فشار ضعیف می باشد. (کمتر / بیشتر)

۳ــ در ترانسفورماتور سیم‌پیچی که تعداد دورآن بیشتر است جریان آن..... است. (کمتر / بیشتر)

۴ــ یک ترانسفورماتور دارای ولتاژ اولیه ۴۰۰ V و ثانویهٔ ۱۰۰ ولت است، اگر سیم‌پیچ ثانویهٔ این ترانسفورماتور دارای ۸۰ دور سیم باشد، سیم‌پیچ اولیه آن چند دور است؟

۳ــ۳ــ۱ــ تبدیل امپدانس ــ انتقال امپدانس :

یک ترانسفورمر ایده‌آل مطابق شکل (۱۲) در اتصال به منبع ولتاژ متناوب جریان I_1 را دریافت کرده و بار z_2 را در ثانویه با جریان I_2 تغذیه می‌نماید با توجه به قانون اهم می‌توان نوشت :

$$Z_2=\frac{U_2}{I_2} \qquad (۱ــ۱۸)$$

از طرفی ولتاژ جریان سیم‌پیچ اولیه U_1 و I_1 نیز تداعی یک امپدانس را می‌کنند و می‌توان نوشت :

$$Z_1=\frac{U_1}{I_1} \qquad (۱ــ۱۹)$$

امپدانس Z_1 در واقع اثر امپدانس Z_2 در طرف اولیه می‌باشد و آن را امپدانس انتقالی گویند. بین امپدانس Z_1 و Z_2 رابطه (۲۰ــ۱) برقرار است.

$$Z_1=a^2Z_2 \qquad (۱ــ۲۰)$$

بیشتر بدانید

بنابراین خواهیم داشت :

$$\frac{Z_1}{Z_2}=\frac{U_1/I_1}{U_2/I_2}=\frac{U_1\times I_2}{U_2\times I_1}\Rightarrow\frac{Z_1}{Z_2}=\frac{U_1}{U_2}\times\frac{I_2}{I_1}$$

$$\frac{Z_1}{Z_2}=\frac{N_1}{N_2}\times\frac{N_1}{N_2}\Rightarrow\frac{Z_1}{Z_2}=(\frac{N_1}{N_2})^2\Rightarrow\frac{Z_1}{Z_2}=a^2$$

در رابطه (۲۰ــ۱)

a نسبت تبدیل

Z_2 امپدانس بار در سمت ثانویه (Ω)

Z_1 امپدانس انتقالی بار به سمت اولیه (Ω)

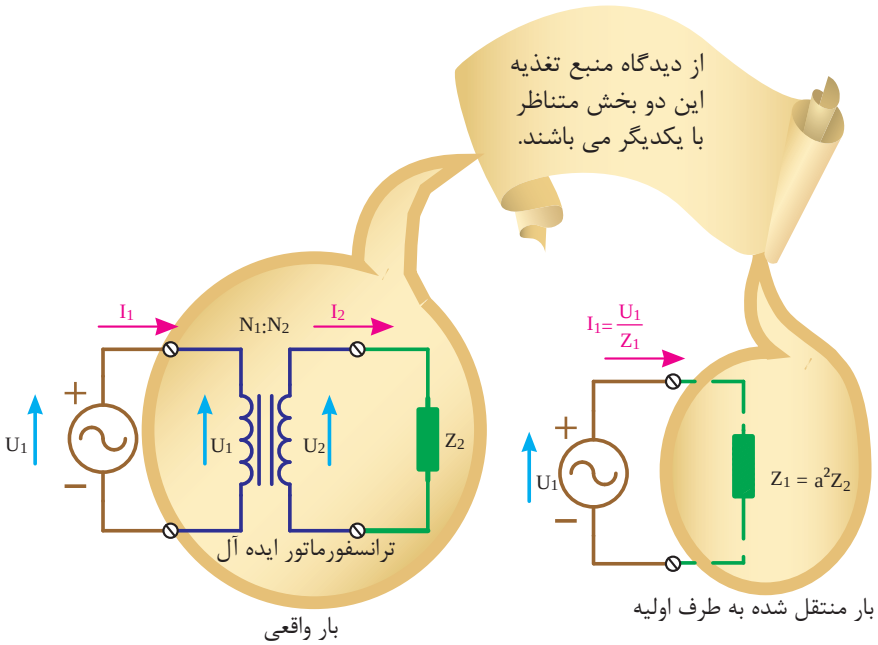
مثال بار ۸Ω به سیم‌پیچ ثانویه یک ترانسفورماتور ایده‌آل متصل است اگر سیم‌پیچ اولیه این ترانسفورماتور ۵۰۰ دور و سیم‌پیچ ثانویه آن ۵۰ دور باشد از دیدگاه اولیه ترانسفورماتور این بار الکتریکی چند اهم دیده می‌شود؟

$N_1 = ۵۰۰$

$N_2 = ۵۰$

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{۵۰۰}{۵۰} = ۱۰$$

$$Z_1 = a^2 Z_2 \Rightarrow Z_1 = ۱۰^2 \times ۸ = ۸۰۰\Omega$$



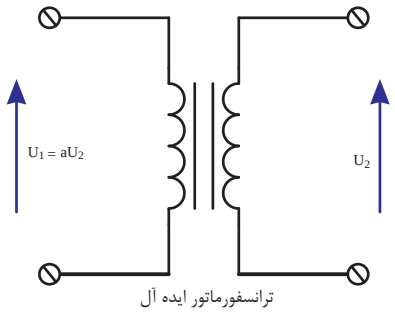
شکل۱۲ ــ نمایش امپدانس بار در ثانویه و انتقال آن به اولیه ترانسفورماتور

می دانید که ترانسفورماتور مثال قبلی یک ترانسفورماتور کاهنده ولتاژ است و همانطور که گفته شد در ترانسفورماتور کاهنده جریان در سمت ثانویه بیشتر از سمت اولیه است. پس می توان تصور کرد از آنجا که امپدانس انتقالی در سمت اولیه بیشتر شده است مقدار جریان اولیه نیز کمتر است. بدین معنی که امپدانس ۸ اهمی در چنین ترانسفورماتوری از سمت اولیه ۸۰۰Ω دیده می شود.

۴ــ۳ــ۱ــ نتیجه‌گیری از روابط اساسی ترانسفورماتور

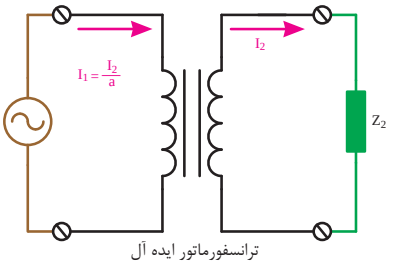
ایده‌آل : از ترانسفورماتور ایده آل به‌طور خلاصه نتایج زیر حاصل می شود :

ولتاژ طرف ثانویه با نسبت مستقیم ضریب تبدیل (a) به طرف اولیه منتقل می شود.



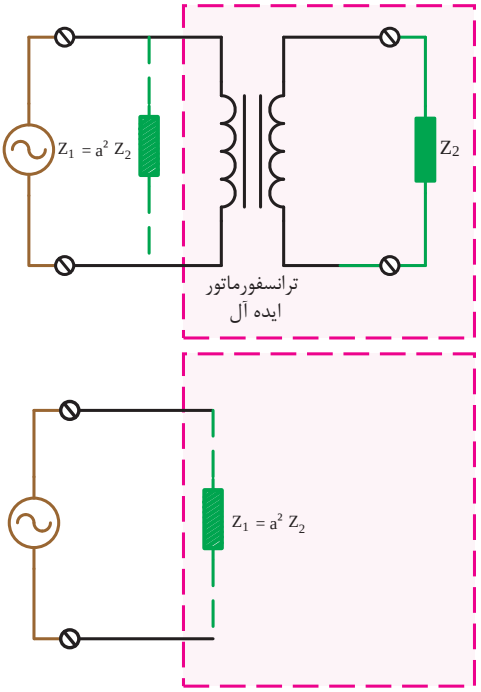
شکل۱۳ــ انتقال ولتاژ ثانویه به سمت اولیه ترانسفورماتور ایده‌آل

جریان طرف ثانویه با عکس نسبت تبدیل $(\frac{۱}{a})$ به طرف اولیه منتقل می شود.



شکل۱۴ــ انتقال جریان از طرف ثانویه به سمت اولیه ترانسفورماتور ایده‌آل

مقاومت‌های ظاهری با نسبت مجذور ضریب تبدیل (a^2) از طرف ثانویه به طرف اولیه منتقل می‌شوند.



شکل ۱۵ــ انتقال امپدانس (مقاومت ظاهری) از طرف ثانویه به سمت اولیه ترانسفورماتور ایده‌آل

توان ظاهری ترانسفورماتور ایده‌آل در دو طرف اولیه و ثانویه بدون تغییر می‌باشد.

خود را بیازمایید

۱) مقاومت $0/04\ \Omega$ در ثانویه یک ترانسفورماتور به اولیه منتقل و $1\ \Omega$ دیده می‌شود. ضریب تبدیل ترانسفورماتور چقدر است؟

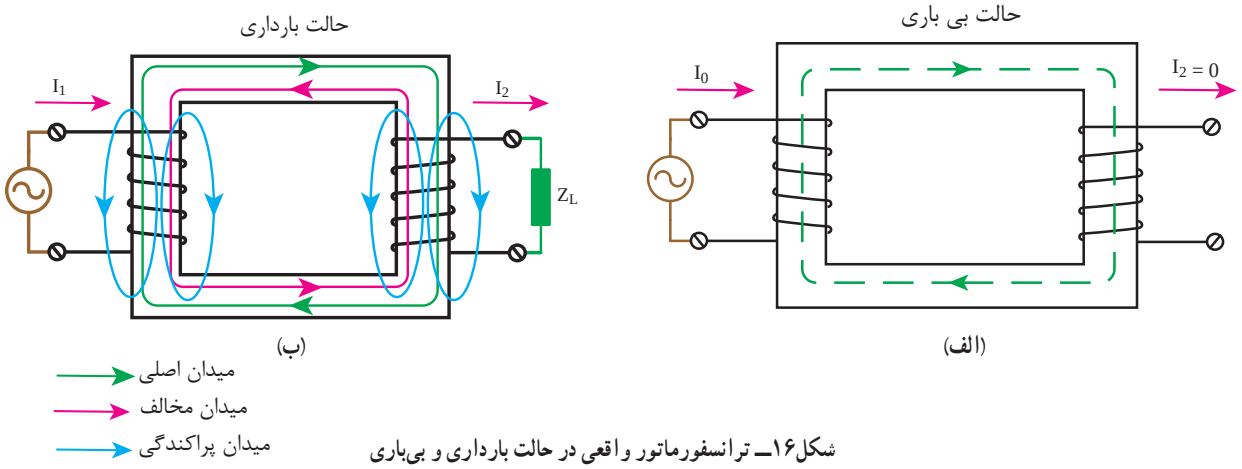
۴ــ۱ــ ترانسفورماتور واقعی

در عمل هیچکدام از ترانسفورماتورهایی که مورد استفاده قرار می‌گیرند ایده‌آل نیستند یعنی سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه دارای مقاومت اهمی R_1 و R_2 می‌باشند. همچنین شار ایجاد شده به‌وسیلهٔ جریان‌های سیم‌پیچ اولیه و یا ثانویه همگی از مدار مغناطیسی هسته عبور نمی‌کنند و بخشی از آن مسیر خود را از طریق هوا می‌بندند. این شارهای مغناطیسی را شار پراکندگی می‌گویند.

با توجه به شکل (۱۶) وضعیت ترانسفورماتور واقعی در حالت بی‌باری و بارداری به‌طور کامل نشان داده شده است.

۱ــ۴ــ۱ــ مدار معادل ترانسفورماتور واقعی

در حالت بی‌باری : اگر سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور مطابق شکل (۱۶ــالف) به یک منبع ولتاژ متناوب سینوسی متصل گردد، در حالی که مدار ثانویه آن باز باشد، از سیم‌پیچ ثانویه این ترانسفورماتور جریانی عبور نمی‌کند به عبارتی $I_2 = 0$ است.



شکل۱۶ــ ترانسفورماتور واقعی در حالت بارداری و بی‌باری

از طرفی به‌دلیل بسته بودن مدار سیم‌پیچ اولیه از آن جریانی عبور می‌کند که به آن **جریان بی‌باری** ترانسفورماتور گفته می‌شود و آن را با I_0 نمایش می‌دهند. گاهی اوقات به جریان بی‌باری **جریان تحریک** ترانسفورماتور نیز می‌گویند. عبور جریان بی‌باری از سیم‌پیچ اولیه دو پیامد دارد :

پیامد اول :

جریان بی‌باری باعث مغناطیس شدن هسته ترانسفورماتور می‌شود. در نتیجه از هسته فوران مغناطیسی φ_0 عبور می‌کند که باعث القای نیروی محرکه E_1 و E_2 در سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه می‌شود. قسمتی از جریان بی‌باری که به مغناطیس شدن هسته و تولید فوران مغناطیسی φ_0 می انجامد را با I_m نشان می دهند و آن را جریان مغناطیس‌کننده می‌نامند.

از آنجا که این جریان اثر مغناطیسی درپی دارد، آن را معادل جریان یک سلف فرض می‌کنند. بنابراین در ترسیم برداری کمیت‌ها، جریان I_m نسبت به نیروی محرکه القایی E_1 سیم‌پیچ اولیه 90° پس فاز است.

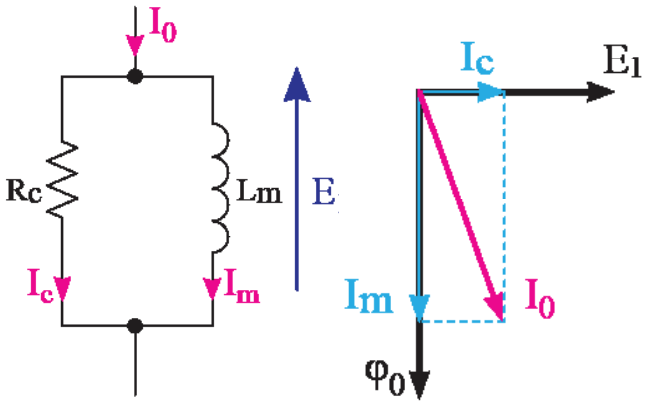
پیامد دوم :

گرم شدن هسته ترانسفورماتور نشان می‌دهد که بخش دیگری از جریان بی‌باری صرف تولید گرما در هسته ترانسفورماتور می شود این تلفات حرارتی در هسته را می توان با عبور جریان از یک مقاومت الکتریکی فرضی مدلسازی نمود، چرا که با عبور جریان الکتریکی از مقاومت اهمی نیز گرما پدید می آید. این بخش از جریان، مؤلفه تولید حرارت جریان بی‌باری است که باعث گرم شدن هسته ترانسفورماتور می شود و آن را با I_C نمایش می دهند.

جریان I_C با نیروی محرکه القایی سیم‌پیچ اولیه هم فاز است.

با توجه به دو پیامد حاصل از جریان بی‌باری، می توان نتیجه گرفت، که این جریان علاوه بر مغناطیس کردن هسته باعث ناخواسته گرم شدن هسته نیز می شود. برای نمایش مدار معادل هسته، المان‌های الکتریکی فرضی (سلف و مقاومت) را به‌صورت موازی در نظر می گیرند.

در شکل (۱۷) بردارهای جریان در حالت بی‌باری نمایش داده شده است.



شکل۱۷ــ مدار معادل هسته

در شکل (۱۷) اندازه بردار I_C بزرگنمایی شده است. در واقعیت این جریان خیلی کوچک‌تر از I_m می‌باشد. به همین خاطر می توان گفت که جریان تحریک I_0 نسبت به E_1 (نیروی محرکه القایی سیم‌پیچ اولیه) حدوداً 90° درجه پس فاز می‌باشد. بنابرآنچه گفته شد نقش جریان تحریک در ترانسفورماتور واقعی را می توان معادل با مدار شکل (۱۷) در نظر گرفت. در شکل (۱۷) L_m نمایانگر خود القایی است که با عبور جریان I_m، میدان اصلی در هسته ترانسفورماتور تولید می‌کند و R_C هم معرف همان مقاومتی است که تلفات حرارتی در هسته را مدل می‌کند و نشان دهنده تلفات در هسته می‌باشد.

همچنین چون در ترانسفورماتورهای واقعی هر سیم‌پیچ از تعداد دور مشخصی، سیم با سطح مقطع معینی تشکیل شده است، بنابراین دارای مقاومت اهمی معینی است. این مقاومت را با R_1 نمایش می دهند. لذا عبور جریان از سیم‌پیچ اولیه، افت ولتاژ اهمی در آن ایجاد می کند.

از طرف دیگر همه شار مغناطیسی ایجاد شده به‌وسیله جریان مغناطیس‌کننده I_m از هسته عبور نمی‌کند بلکه درصورت اشباع هسته، بخشی از آن مسیر خود را از طریق هوا می بندد، بنابراین آن بخشی از شار مغناطیسی که فقط از یک سیم‌پیچ می‌گذرد و مسیر خود را از هوا می بندد **شار پراکندگی**، نشتی یا فراری می‌نامند. لازم به‌ذکر است که آن قسمت از شار که مسیر خود را از داخل هسته می بندد شار **میدان اصلی** نام دارد. با عبورشار میدان اصلی از داخل سیم‌پیچ‌ها نیروی محرکه در آنها القا می شود.

شار پراکندگی را با یک سلف یا ضریب خودالقایی L_1 مدل می کنند.

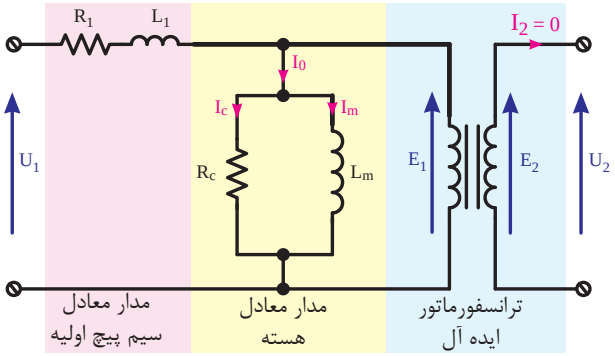
چون شار پراکندگی و مقاومت اهمی سیم‌پیچ اولیه هر دو باعث افت ولتاژ در سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور می شوند هر دو المان R_1 و L_1 را، در ورودی ترانسفورماتور به‌صورت سری با یکدیگر باید در نظر گرفت. در نتیجه R_1 باعث افت ولتاژ اهمی و L_1 باعث افت ولتاژ سلفی و برآیند برداری آنها افت ولتاژ در سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور را نشان می‌دهد.

شکل ۱۸ــ مدار معادل سیم‌پیچ اولیه

بنابراین عبور جریان از سیم‌پیچ اولیه، افت ولتاژ اهمی و افت ولتاژ پراکندگی در آن به‌وجود می آید. در نتیجه نیروی محرکه القا شده در سیم‌پیچ از نیروی محرکه ورودی کوچک‌تر می شود.

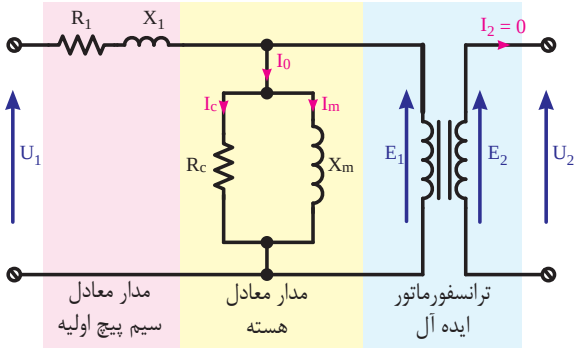
به خاطر داشته باشید که در ترانسفورماتورهای ایده‌آل از مقاومت الکتریکی (اهمی) سیم‌پیچ ها و شار پراکندگی صرف‌نظر شد و به همین دلیل ولتاژ القایی سیم‌پیچ اولیه E_1 با ولتاژ ورودی U_1 برابر گردید.

با جمع‌بندی آنچه دربارهٔ اثرات جریان بی‌باری گفته شد مدار معادل شکل (۱۹) برای حالت بی‌باری ترانسفورماتور در نظر گرفته می‌شود.



شکل۱۹ــ مدار معادل واقعی ترانسفورماتور در حالت بی‌باری

نکته مهم دیگر آنکه در ترانسفورماتورهای قدرت چون فرکانس ثابت است برای مدل کردن سلف‌ها به‌جای قرار دادن ضریب خود القایی غالباً راکتانس آنها مورد توجه قرار می‌گیرد یعنی به‌جای L_1 معادل راکتانس پراکندگی X_1 و به‌جای L_m معادل راکتانس میدان اصلی X_m مطابق شکل (۲۰) در مدار معادل قرار داده می شوند.

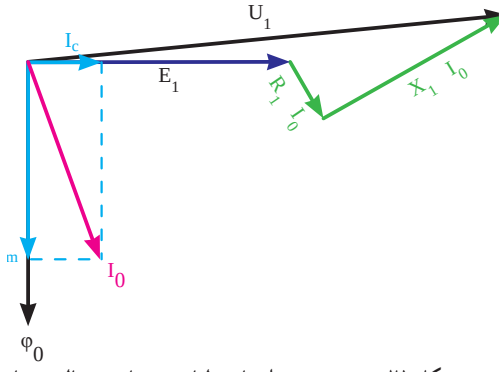


$X_m = 2\pi f L_m$

$X_1 = 2\pi f L_1$

شکل ۲۰ــ مدار معادل واقعی ترانسفورماتور در حالت بی‌باری

در ترانسفورماتور واقعی به‌دلیل افت ولتاژ ناشی از مقاومت اهمی و پراکندگی سیم‌پیچ اولیه ولتاژ القایی E_1 از ولتاژ U_1 کوچک‌تر می‌باشد.



شکل ۲۱ــ وضعیت بردارهای ولتاژ و جریان در حالت بی‌باری

در دیاگرام برداری شکل (۲۱) افت ولتاژ اهمی سیم‌پیچ با جریان تحریک I_0 هم فاز است. بنابراین برداری همسنگ با بردار I_0 ولی در امتداد با ولتاژ E_1 و اندازه $R_1 I_0$ ترسیم کرده و عمود بر آن بردار افت ولتاژ بر اثر شار پراکندگی را رسم می‌نمائیم. این بردار 90° از جریان تحریک I_0 جلوتر و اندازه آن معادل $X_1 I_0$ می‌باشد.

با توجه به نمودار شکل (۲۱)، همواره رابطه(۲۱ــ۱) بین نیروی محرکه القایی اولیه و ولتاژ ورودی ترانسفورماتور واقعی بی بار برقرار است.

$$\overline{U_1} = \overline{E_1} + \overline{R_1 I} + \overline{X_1 I} \qquad (۲۱\text{ــ}۱)$$

در ترانسفورماتورها چگالی میدان مغناطیسی به مقدار جریان تحریک وابسته است. از این‌رو جریان تحریک بیانگر نقطه کار ترانسفورماتور می‌باشند. نقطه کار ترانسفورماتورهای قدرت، نقطه اشباع می‌باشد. با توجه به شکل (۲۰) مشاهده می‌شود جریان تحریک تابع ولتاژ ورودی V_1 می‌باشد لذا افزایش ولتاژ ورودی ترانسفورماتور بیش از مقدار نامی جریان تحریک را افزایش می‌دهد و نقطه کار جابه‌جا می‌شود و هسته ترانسفورماتور به ناحیه اشباع مغناطیسی وارد می‌شود. با زیادشدن جریان تحریک از یک مقدار مشخص تلفات حرارتی در هسته زیاد می‌شود و باعث آسیب رسیدن به سیم‌پیچ‌ها می‌شود لذا از افزایش ولتاژ در ورودی از ترانسفورماتور باید محافظت کرد.

خود را بیازمایید

۱ــ منظور از جریان تحریک ترانسفورماتور چیست؟

۲ــ شار پراکندگی در یک ترانسفورماتور چگونه به‌وجود می‌آید و به چه عواملی بستگی دارد؟

۳ــ چرا راکتانس معادل پراکندگی و مقاومت سیم‌پیچ را در ورودی ترانسفورماتور به‌صورت سری در نظر می‌گیرند؟

۲ــ۴ــ۱ــ مدار معادل ترانسفورماتور واقعی در حالت بارداری

شکل (۱۶ــ ب) ترانسفورماتوری را که سیم‌پیچ اولیه آن تحت ولتاژ U_1 به منبع متناوب سینوسی و سیم‌پیچ ثانویه آن به باری با امپدانس Z_L متصل شده است نشان می‌دهد.

در حالت بی‌باری فقط فوران مغناطیسی φ_0 که معادل همان شار میدان اصلی است در هسته گردش می‌کند و در سیم‌پیچ ثانویه نیروی محرکه E_2 القا می‌شود. حال که مدار در سمت ثانویه بسته شده است، در مدار ثانویه جریان I_2 جاری می‌شود. سپس آمپر دوری برابر $N_2 I_2$ که معادل نیروی محرکه

مغناطیسی سمت ثانویه است، در آن ایجاد می‌شود. نیروی محرکه مغناطیسی نیز شار مغناطیسی تولید می‌کند. بخشی از این شار مغناطیسی مسیر خود را از داخل هسته می بندد که آن را با $\varphi_{۲}$ نشان می دهند و طبق قانون لنز سعی در خنثی کردن میدان اصلی شار $\varphi_{۰}$ دارد. و جزئی از آن فقط از سیم‌پیچ ثانویه عبور می‌کند و مسیر خود را از هوا می بندد که همان شار پراکندگی یا فراری سیم‌پیچ ثانویه است. کاهش شار مغناطیسی $\varphi_{۰}$ باعث کاهش نیروی محرکه القایی سیم‌پیچ اولیه و ثانویه می‌شود ولی از آنجا که سیم‌پیچ اولیه به منبع ولتاژ $U_{۱}$ متصل است، برای مقابله با این پدیده و ثابت نگاه داشتن $\varphi_{۰}$ جریان بیشتری از منبع ولتاژ دریافت می‌کند. مقدار این جریان به قدری است که نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچ اولیه تغییر نکند بنابراین مقدار جریان $I_{۰}$ از حالت بی‌باری به جریان $I_{۱}$ در حالت بارداری افزایش می یابد و متناسب با آن فوران مغناطیسی $\varphi_{۱}$ در هسته جاری می شود. به‌عبارتی جمع برداری فوران $\varphi_{۱}$ و $\varphi_{۲}$ همواره ثابت و برابر مقدار $\varphi_{۰}$ می‌باشد. یعنی

$$\bar{\varphi}_{۱} + \bar{\varphi}_{۲} = \bar{\varphi}_{۰} \qquad (۱_۲۲)$$

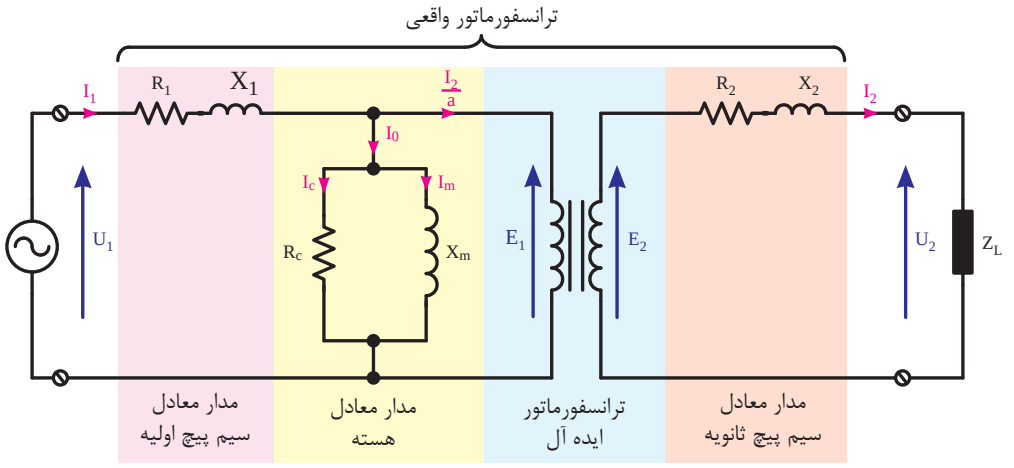
نکته قابل توجه اینکه با افزایش جریان در سیم‌پیچ ثانویه، فوران پراکندگی سیم‌پیچ نیز افزایش می یابد این موضوع سبب کاهش ولتاژ خروجی $U_{۲}$ ترانسفورماتور می‌شود. به همین خاطر فوران پراکندگی در سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور معادل $X_{۲}I_{۲}$ در نظر گرفته می شود. همچنین به‌دلیل مقاومت اهمی سیم‌پیچ ثانویه جریان عبوری از آن باعث افت ولتاژ اهمی در سیم‌پیچ می شود که معادل $R_{۲}I_{۲}$ می‌باشد. مشابه آنچه برای سیم‌پیچ اولیه گفته شد در ترانسفورماتور واقعی در حالت بارداری، ثانویه ترانسفورماتور با یک مقاومت اهمی $R_{۲}$ سری شده با راکتانس پراکندگی $X_{۲}$ مطابق شکل (۲۲)، مدل سازی می شود.

$$X_{2} = 2\pi f L_{2}$$

شکل۲۲ــ مدار معادل سیم‌پیچ ثانویه

شکل (۲۳)، مدار معادل سیم‌پیچ اولیه، هسته و سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور را در حالت واقعی نمایش می دهد.

در مدار معادل شکل (۲۳) بخشی که مربوط به ترانسفورماتور ایده‌آل است، تمام خصوصیات آن را دربرداشته و در نتیجه روابط ترانسفورماتور ایده‌آل برای آن صادق است.



شکل ۲۳ــ مدار معادل ترانسفورماتور واقعی در حالت بارداری

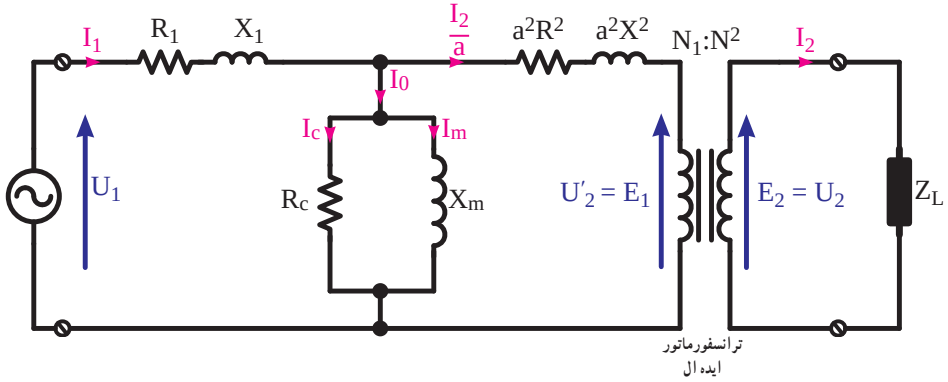
۱

اجزای مدار معادل ترانسفورماتور واقعی به تفکیک عبارتند از :

- مدار معادل سیم‌پیچ اولیه
- مدار معادل هسته
- مدار معادل سیم‌پیچ ثانویه

همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد می‌توان امپدانس را در طرفین ترانسفورماتور ایده‌آل با توجه به رابطه (۲۰ــ۱) انتقال داد. برای ساده تر کردن مدار معادل شکل (۲۳)، سیم‌پیچ ثانویه به سمت اولیه منتقل شده تا شکل (۲۴) به‌دست آید.

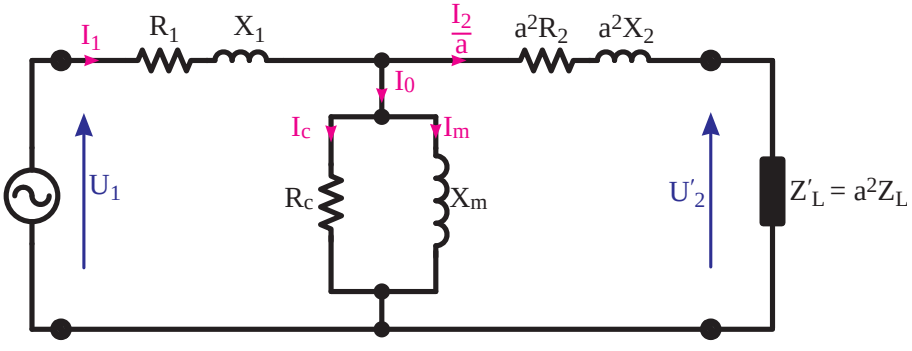
مدار معادل ترانسفورماتور واقعی را می‌توان با حذف ترانسفورماتور ایده‌آل ساده تر نیز نمود چرا که انتقال امپدانس از سمتی به سمت دیگر با توجه به نسبت تبدیل صورت گرفته و هیچ تأثیری در تحلیل مدار آن ندارد لذا می‌توان آن بخش را از مدار معادل حذف کرد و به خاطر سپرد.



شکل ۲۴ــ مدار معادل ترانسفورماتور واقعی در حالت بارداری

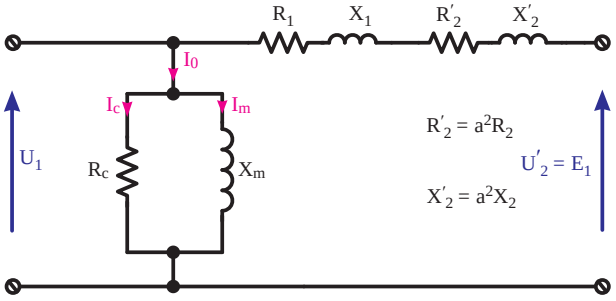
در محاسبات دقیق ترانسفورماتورهای قدرت باید از مدار معادل واقعی شکل (۲۵) استفاده شود ولی برای سادگی تحلیل و حل مسائل این کتاب لازم است با مدار معادل‌های تقریبی ترانسفورماتورهای قدرت نیز آشنا شوید.

تقریب اول : در ترانسفورماتورهای قدرت، جریان تحریک (جریان بی‌باری I_0) بسیار کم و در حدود ۲ تا ۶ درصد مقدار نامی جریان است و از طرفی مقدار مقاومت سیم‌پیچ و راکتانس پراکندگی بزرگ نیست.



شکل ۲۵ــ مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با انتقال بار به اولیه

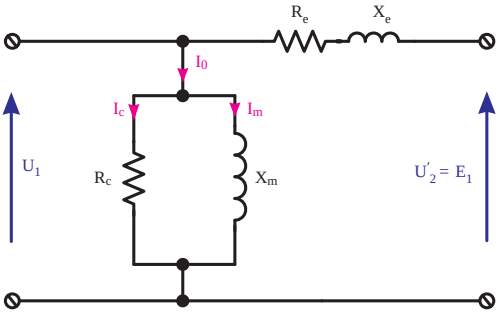
بنابراین می توان با جابه جایی شاخه موازی (مدار معادل هسته) مطابق شکل (۲۶) به طرف ورودی، مدار معادل را بطور محسوسی ساده کرد.



شکل ۲۶ــ جابه جایی شاخه موازی (مدار معادل هسته) به طرف ورودی

در این‌صورت با سری شدن مقاومت‌های اهمی و راکتانس پراکندگی طرف اولیه وثانویه و با توجه به روابط $R_e=R_1+R'_2$ و $X_e=X_1+X'_2$ مدار معادل تقریبی شکل (۲۷) به دست می آید.

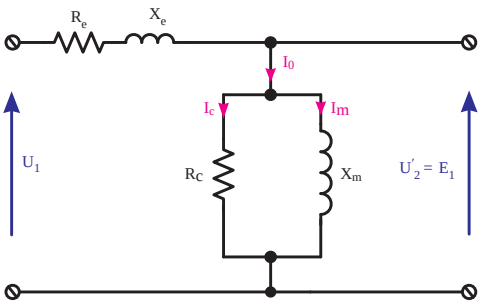
در این تقریب از تأثیر جریان تحریک در ایجاد افت ولتاژ در امپدانس سیم‌پیچ اولیه صرف‌نظر شده است.



شکل ۲۷ــ مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با احتساب تقریب اول

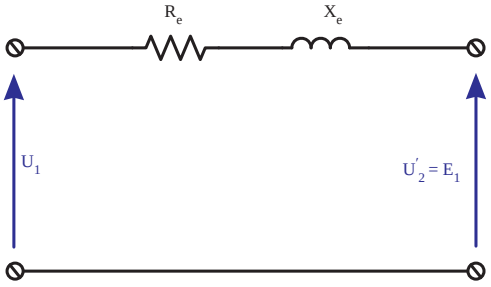
تقریب دوم: با استدلالی مشابه آنچه در تقریب اول گفته شد می‌توان شاخه موازی را به طرف خروجی جابه جا کرد. سپس مقاومت‌های اهمی و راکتانس پراکندگی طرف اولیه وثانویه سری را با توجه به روابط $R_e=R_1+R'_2$ و $X_e=X_1+X'_2$ ساده نموده و مدار معادل تقریبی شکل (۲۸) را به‌دست آورد.

در این تقریب، اثر جریان تحریک در ایجاد افت ولتاژ سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور در نظر گرفته می شود.



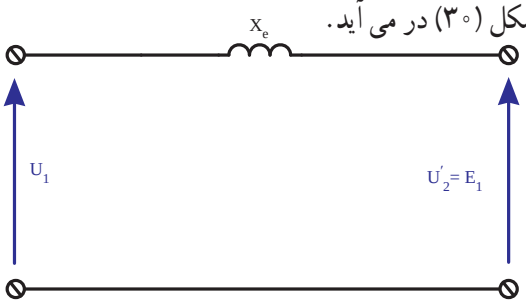
شکل ۲۸ــ مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با احتساب تقریب دوم

تقریب سوم: هنگامی که ترانسفورماتور زیر بار باشد و بیش از نصف جریان نامی از آن بارگیری شود می توان از اثر جریان تحریک ترانسفورماتور (جریان بی‌باری I_0) در مقابل جریان اولیه صرف‌نظر کرد. پس مدار معادل به شکل (۲۹) تبدیل می شود.



شکل ۲۹ــ مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با احتساب تقریب سوم

تقریب چهارم: در ترانسفورماتورهای قدرتی که توان آنها از MVA۱ بیشتر باشد مقدار راکتانس معادل سیم‌پیچ ها خیلی بزرگ‌تر از مقاومت اهمی آن‌ها است. به عبارتی $R_e<<X_e$ می‌باشد. این موضوع به‌دلیل سطح مقطع بالای سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور است. در این حالت می توان از مقدار مقاومت اهمی «R_e» در مقابل راکتانس «X_e» صرف‌نظر کرد. لذا مدار معادل ترانسفورماتورهای قدرت در ترانسفورماتورهای پرقدرت به شکل (۳۰) در می آید.



شکل ۳۰ ــ مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با احتساب تقریب چهارم

خود را بیازمایید

۱ــ شارهای مغناطیسی ایجاد شده ترانسفورماتور در حالت بارداری را نام برده و هر یک را توضیح دهید.
۲ــ اجزای مدار معادل ترانسفورماتور واقعی را نام ببرید.
۳ــ چرا در تقریب سوم می توان از اثر جریان تحریک صرف‌نظر کرد؟
۴ــ مدار معادل ترانسفورماتورهای پرقدرت را رسم نموده کمیت‌های آن را معرفی کنید.

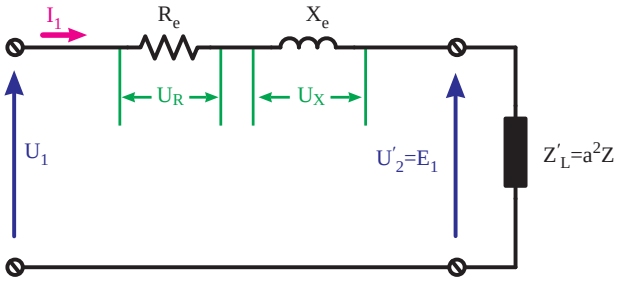
تحقیق کنید

در یک مثلث قائم الزاویه طول یک ضلع ۱ cm و ضلع دیگر ۱۰ cm است، اندازه تقریبی وتر چقدر است؟ (آیا می توانید تقریب‌های دیگری از این دست بیابید)

۵ــ۱ــ دیاگرام برداری حالت بارداری

در تحلیل بارداری ترانسفورماتور و رفتار آن با انواع بارهای مختلف می‌توان از مدار معادل واقعی ترانسفورماتور استفاده کرد ولی مدار معادل های تقریبی بدست آمده از روی مدل واقعی نیز با در نظر گرفتن شرایط تقریب مفید می‌باشند. در تقریب سوم قید شد که در صورت زیر بار رفتن ترانسفورماتور بیش از نصف جریان نامی، می توان از اثر جریان تحریک ترانسفورماتور(جریان بی‌باری I_0) در مقابل جریان اولیه صرف‌نظر کرد. از آنجا که در تحلیل بارداری ترانسفورماتورهای قدرت و دیاگرام برداری حالت بارداری آن مورد نظر می‌باشد به همین خاطر از تقریب نوع سوم استفاده می شود.

مدار معادل ترانسفورماتور در تقریب نوع سوم مجدداً در شکل (۳۱) آورده شده است.



شکل ۳۱ــ مدار معادل واقعی ترانسفورماتور در زیر بار

رابطه ولتاژ جریان در مدار شکل (۳۱) به صورت زیر می‌باشد :

$$\overline{U_1} = \overline{U_R} + \overline{U_X} + \overline{U'_2} \qquad (۱ــ۲۳)$$

رابطه (۱ــ۲۳) نشان می‌دهد با جمع برداری سه بردار U_x، U_R و U'_2، بردار U_1 به‌دست می آید.

$$\overline{U_1} = \overline{R_e I_1} + \overline{X_e I_1} + \overline{U'_2} \qquad (۱ــ۲۴)$$

$$U_R = R_e I_1 \qquad (۱ــ۲۵)$$

$$U_X = X_e I_1 \qquad (۱ــ۲۶)$$

در رابطه (۱ــ۲۵) و (۱ــ۲۶) U_R افت ولتاژ ناشی از مقاومت اهمی سیم‌پیچ‌ها و U_X افت ولتاژ ناشی از پراکندگی سیم‌پیچ‌ها می‌باشد.

بنابراین :

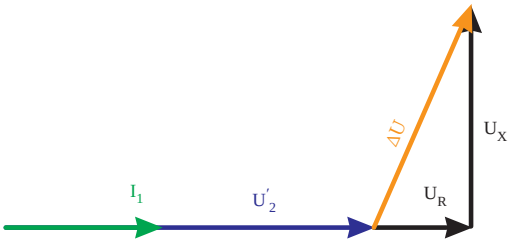
برای ترسیم این بردارها ابتدا بردار ولتاژ E_1 را که حالا معادل ولتاژ ترمینال خروجی از دیدگاه اولیه (U'_2) نیز هست به عنوان مبنا در جهت صفر مثلثاتی ترسیم می‌شود آنگاه با توجه به مقدار و نوع بار مصرفی بردار جریان I_1 با زاویه مناسب نسبت به بردار ولتاژ E_1 یا U'_2 کشیده می‌شود. در بار اهمی خالص ولتاژ و جریان با یکدیگر مطابق شکل (۳۲) هم فاز می‌باشند.

شکل ۳۲ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری ترانسفورماتور با بار اهمی خالص (مرحله ۱)

در ادامه بردار U_R که معادل افت ولتاژ اهمی است و هم‌فاز با جریان می‌باشد همسنگ با بردار I_1 و از انتهای بردار E_1 یا U'_2 مطابق شکل (۳۳) ترسیم می‌شود.

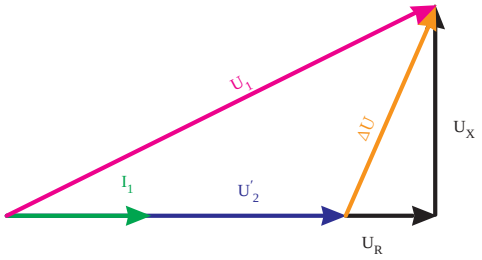
شکل۳۳ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی خالص (مرحله ۲)

سپس بردار U_X نیز که معادل افت ولتاژ پراکندگی است و همواره ۹۰° جلوتر از جریان I_1 می‌باشد در ادامه بردار U_R رسم می‌شود. شکل (۳۴)، برآیند بردارهای U_R و U_X بیانگر افت ولتاژ کلی ΔU می‌باشد.



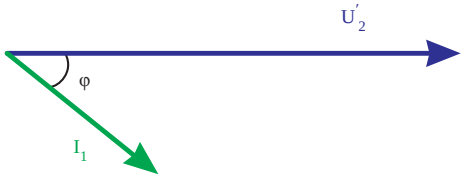
شکل ۳۴ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی خالص (مرحله ۳)

حالا ابتدای بردار E_1 یا U'_2 به انتهای بردار U_X مطابق شکل (۳۵) وصل می‌شود تا برآیند U_R، U'_2 و U_X به‌دست آید. این بردار، بردار U_1 ولتاژ ورودی است.



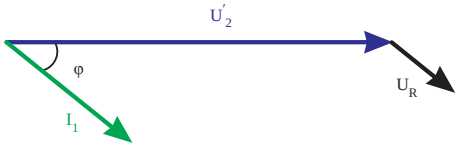
شکل ۳۵ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی خالص (مرحله ۴)

مجدداً مراحل فوق برای ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری برای بار اهمی ــ سلفی تکرار می‌شود. ابتدا بردار ولتاژ ترمینال خروجی از دیدگاه اولیه (U'_2) به عنوان مبنا در جهت صفر مثلثاتی ترسیم می‌شود آنگاه با توجه به مقدار و نوع بار مصرفی بردار جریان I_1 با زاویه مناسب نسبت به بردار ولتاژ U'_2 کشیده می‌شود. در بار اهمی ــ سلفی مطابق شکل (۳۶)جریان به اندازه زاویه φ از ولتاژ عقب‌تر است.



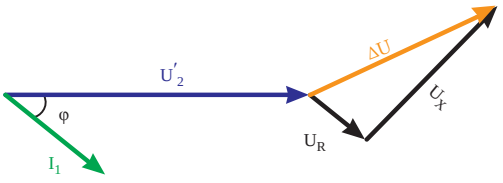
شکل۳۶ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی – سلفی (مرحله ۱)

در ادامه بردار U_R که معادل افت ولتاژ اهمی است و هم‌فاز با جریان می‌باشد همسنگ با بردار I_1 و از انتهای بردار U'_2 مطابق شکل (۳۷) ترسیم می‌شود.



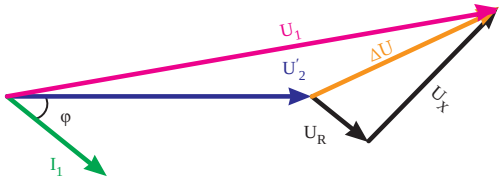
شکل۳۷ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی ــ سلفی (مرحله ۲)

سپس بردار U_X نیز که معادل افت ولتاژ پراکندگی است و همواره ۹۰° جلوتر از جریان I_1 می‌باشد در ادامه بردار U_R ترسیم می‌شود. شکل (۳۸)



شکل۳۸ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی ــ سلفی (مرحله ۳)

حالا ابتدای بردار U'_2 به انتهای بردار U_X مطابق شکل (۳۹) وصل می‌شود تا برآیند U_R ، U'_2 و U_X به‌دست آید. این بردار، بردار U_1 ولتاژ ورودی است.

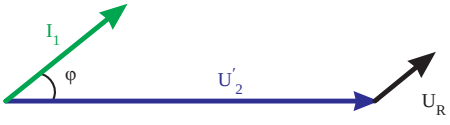


شکل ۳۹ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی ــ سلفی (مرحله ۴)

مراحل فوق برای ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری برای بار اهمی ــ خازنی نیز تکرار می‌شود. ابتدا بردار ولتاژ ترمینال خروجی از دیدگاه اولیه (U'_2) به عنوان مبنا در جهت صفر مثلثاتی ترسیم می‌شود آنگاه با توجه به مقدار و نوع بار مصرفی بردار جریان I_1 با زاویه مناسب نسبت به بردار ولتاژ U'_2 کشیده می‌شود. در بار اهمی ــ خازنی مطابق شکل (۴۰) جریان به اندازه زاویه φ از ولتاژ جلوتر است.

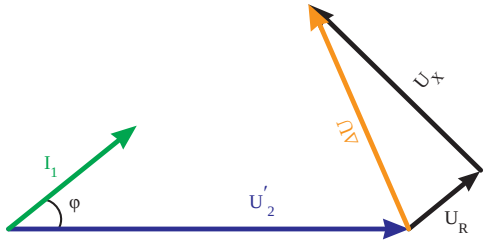
شکل ۴۰ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی ــ خازنی (مرحله ۱)

در ادامه بردار U_R که معادل افت ولتاژ اهمی است و هم‌فاز با جریان می‌باشد همسنگ با بردار I_1 و از انتهای بردار U'_2 مطابق شکل (۴۱) ترسیم می‌شود.



شکل ۴۱ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی ــ خازنی (مرحله ۲)

سپس بردار U_X نیز که معادل افت ولتاژ پراکندگی است و همواره 90° جلوتر از جریان I_1 می‌باشد در ادامه بردار U_R ترسیم می‌شود (شکل ۴۲).

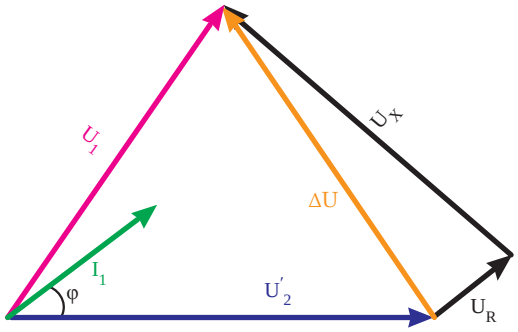


شکل ۴۲ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی ــ خازنی (مرحله ۳)

حالا ابتدای بردار U'_2 به انتهای بردار U_X مطابق شکل (۴۳) وصل می‌شود. این بردار، بردار U_1 ولتاژ ورودی است.

دیاگرام برداری هریک از بارهای اهمی خالص، اهمی ــ سلفی و اهمی ــ خازنی همگی در شکل (۴۴) نشان داده شده است. در همه دیاگرام‌ها برای مقایسه رفتار ترانسفورماتور در مواجهه با بارهای مختلف، اندازه ولتاژ اولیه U_1 و جریان عبوری I_1 برابر و یکسان ترسیم شده است.

از دیاگرام های شکل (۴۴) نتایج زیر حاصل می‌شود :

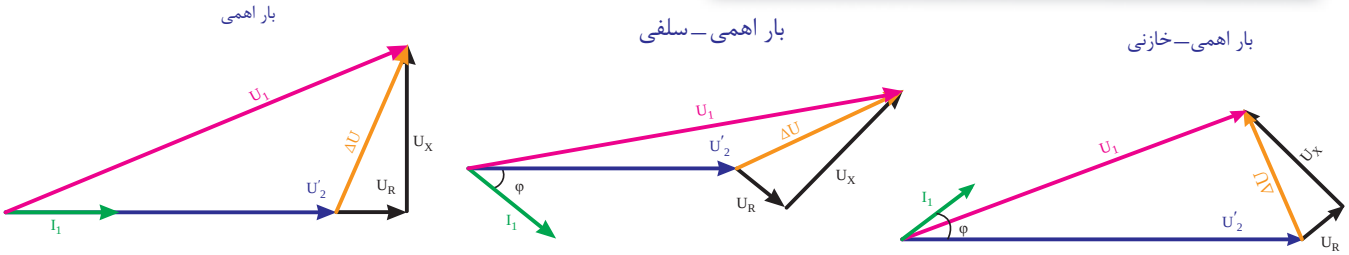


شکل ۴۳ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی ــ خازنی (مرحله ۴)

نکته ۱

در بار اهمی ــ خازنی بردار U'_2 از U_1 بزرگتر شده اما در بار اهمی خالص اندازه بـردار U'_2 کمی از U_1 کوچکتر و در بار اهمی ــ سـلفی این اختلاف بیشتر شده است. با احتساب نوع بار به نظر می رسد در بار سلفی خالص U'_2 بـه کوچکترین اندازه خود نسـبت به U_1 و در بار خازنی خالص U'_2 به بزرگترین مقدار خود نسـبت به U_1 برسد.
به عنوان تمرین این حالت‌ها را ترسیم کنید.
به همین خاطر می توان نتیجه گرفت مقدار ولتاژ خروجی ترانسفورماتور وابسته به نوع بار آن می‌باشد.

ولتاژ خروجی ترانسفورماتور به نوع و مقدار امپدانس بار وابسته می‌باشد.

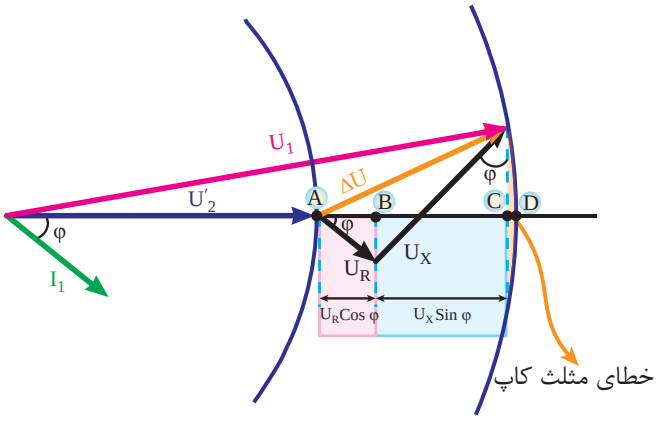


شکل ۴۴ ــ دیاگرام برداری حالت بارداری در بارهای اهمی خالص، اهمی ــ سلفی و اهمی ــ خازنی

نکته ۲

در هر سه نمودار شـکل (۴۴) دو بردار U_R و U_X یک مثلث قائم الزاویه تشکیل داده‌اند که وتر این مثلث معادل بردار افت ولتاژ کل ترانسـفورماتور می‌باشد. اندازه این بردار در بارهای با امپدانس یکسان، مساوی می‌باشد ولی چون وتر ایـن مثلث با تغییر نوع بار تغییر جهت می دهد محاسـبه مقدار افـت ولتـاژ در بارهـای مختلف کمی پیچیده‌تر می‌شود. به این جهت برای محاسبه افت ولتاژ کلی در ترانسفورماتور دو دایره یکی به مرکز مبدأ بردارها و به شـعاع U'_2 و دیگری به همان مرکز ولی به شعاع U_1 ترسیم می شـود. اختلاف شعاع دوایر را با تقریب خوبی می‌توان معادل افت ولتاژ کلی ترانسـفورماتور در زیر بار دانست.

در شکل (۴۵) با ترسیم بزرگتر این مثلث چگونگی محاسبه افت ولتاژ نشان داده شده است. این مثلث به مثلث کاپ[1]، مشهور است.



شکل ۴۵ــ محاسبه افت ولتاژ با استفاده از دیاگرام برداری مثلث کاپ

۱ــ کاپ نام فرد مبتکر این روش است.

در شکل (۴۵) داریم :

$$\overrightarrow{\Delta U} = \vec{U}_R + \vec{U}_X \qquad (۱_۲۷)$$

$$U_{AB} = U_R \cos\varphi \qquad (۱_۲۸)$$

$$U_{BC} = U_X \sin\varphi \qquad (۱_۲۹)$$

$$\Delta U \approx U_{AB} + U_{BC} + U_{CD}$$

U_{CD} = خطای مثلث کاپ

$$\Delta U \approx U_R \cos\varphi + U_X \sin\varphi \qquad (۱_۳۰)$$

بنابراین با تقریب رابطه (۱ـ۳۴) برقرار است.

$$E_۱ = U'_۲ = U_۱ - \Delta U \qquad (۱_۳۱)$$

ΔU ـ افت ولتاژ کلی ترانسفورماتور در زیر بار از دیدگاه اولیه

U_R ـ افت ولتاژ ناشی از مقاومت اهمی سیم‌پیچ ها از دیدگاه اولیه

U_X ـ افت ولتاژ ناشی از پراکندگی شار از دیدگاه اولیه

φ ـ زاویه اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان بار

توجه ۱

در بارهای اهمی ـ سلفی افت ولتاژ باعث کاهش ولتاژخروجی می شود اما در بار اهمی ـ خازنی چون (جریان از ولتاژ جلوتر است) پس φ منفی بوده و مقدار $\sin\varphi$ منفی می‌گردد و از آنجا که مقدار U_X در ترانسفورماتور ها خیلی بیشتر از U_R می‌باشد حاصل ΔU منفی بوده و در نتیجه افت ولتاژ در بار اهمی خازنی سبب افزایش ولتاژ خروجی می شود.

مثال در یک ترانسفورماتور مقدار افت ولتاژ اهمی در سیم‌پیچ‌ها ۱۰ ولت و افت ولتاژ بر اثر پراکندگی میدان ۳۰ ولت می‌باشد. اگر این ترانسفورماتور به ولتاژ ۲۵۰ ولت وصل شود مطلوب است ولتاژ دو سر بار در هریک از حالت های زیر

الف) بار اهمی خالص

در بار اهمی خالص ضریب قدرت یک است.

$$\Delta U = U_R \cos\varphi + U_X \sin\varphi$$

$$\Delta U = ۱۰ \times ۱ + ۳۰ \times ۰ = ۱۰V$$

$$E_۱ = U'_۲ = U_۱ - \Delta U = ۲۵۰ - ۱۰ = ۲۴۰V$$

ب) بار اهمی ـ سلفی با ضریب قدرت ۰/۶

$$\Delta U = U_R \cos\varphi + U_X \sin\varphi$$

$$\Delta U = (۱۰ \times ۰/۶) + (۳۰ \times ۰/۸) = ۳۰V$$

$$E_۱ = U'_۲ = U_۱ - \Delta U = ۲۵۰ - ۳۰ = ۲۲۰V$$

ج) بار اهمی ـ خازنی با ضریب قدرت ۰/۶

چون بار خازنی است پس φ منفی است و مقدار $\sin\varphi$ نیز منفی می‌شود.

$$\Delta U = U_R \cos\varphi + U_X \sin\varphi$$

$$\Delta U = (۱۰ \times ۰/۶) + (۳۰ \times (-۰/۸)) = -۱۸V$$

$$E_۱ = U'_۲ = U_۱ - \Delta U = ۲۵۰ - (-۱۸) = ۲۶۸V$$

خود را بیازمایید

۱ـ مدار معادل ترانسفورماتور واقعی زیر بار را با تقریب سوم رسم نموده و رابطه ولتاژهای آن را بنویسید.

۲ـ با افزایش بار ترانسفورماتور واقعی فوران پراکندگی و افت ولتاژ آن چگونه تغییر می‌کند؟

۳ـ بیشترین افت ولتاژ در کدام نوع بار اتفاق می‌افتد؟

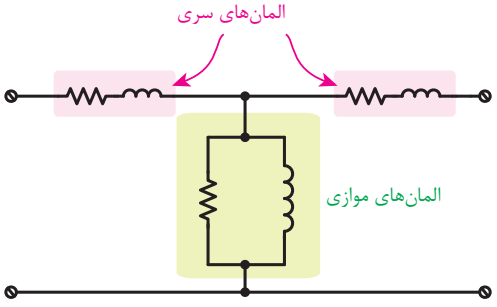
۴ـ ترانسفورماتوری با افت ولتاژ اهمی ۲۵ ولت و افت ولتاژ القایی ۴۰ ولت باری را با ضریب قدرت ۰/۸ پس فاز تحت ولتاژ ۲۴۰ ولت تغذیه می‌کند. ولتاژ بی‌باری خروجی ترانسفورماتور را به‌دست آورید.

۶ـ۱ـ تعیین مقادیر پارامترهای مدار معادل به کمک آزمایش‌های تجربی

مقدار عناصر مدار معادل ترانسفورماتور را می توان با آزمایش بی‌باری و اتصال کوتاه تعیین نمود به‌علاوه به کمک این آزمایش‌ها می توان تلفات ترانسفورماتور را نیز بدست آورد.

همان‌طور که در شکل (۴۶) ملاحظه می‌کنید مدار معادل

ترانسفورماتور شامل تعدادی المان سری و موازی می‌باشد. المان‌های موازی را به کمک آزمایش حالت بی‌باری و المان‌های سری را به کمک آزمایش اتصال کوتاه می‌توان مشخص نمود.



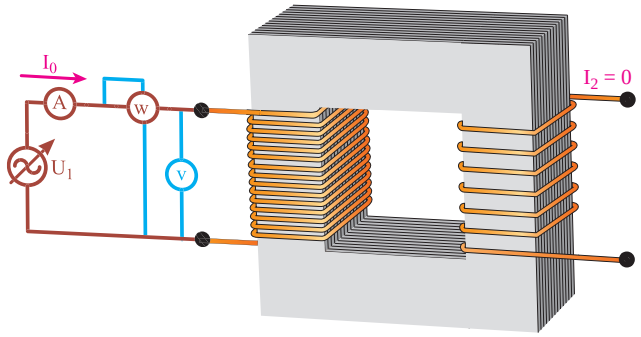
شکل ۴۶ــ نمایش المان‌های سری و موازی بر روی مدار معادل واقعی ترانسفورماتور

۱ــ۶ــ۱ــ آزمایش حالت بی‌باری : هدف از انجام این آزمایش تعیین مقادیر المان‌های مربوط به شاخه موازی مدار معادل یعنی (R_c , X_m) می‌باشد. ابتدا مداری مطابق آنچه در شکل (۴۷ــ الف) نشان داده شده است را فراهم و ترانسفورماتور را در حالتی که سیم‌پیچ ثانویه آن باز است به ولتاژ نامی شبکه متصل می‌کنیم و مدار را مورد آزمایش قرار می‌دهیم و مقادیری را که دستگاه‌های اندازه‌گیری نشان می‌دهند یادداشت می‌نماییم.

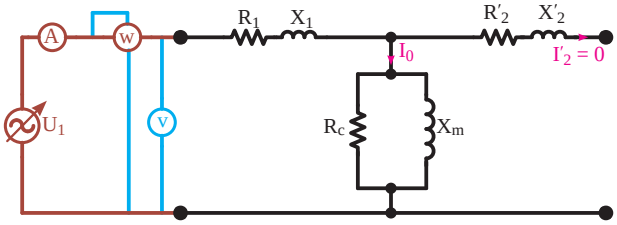
با توجه به مدار معادل شکل(۴۷ــب) مدار ثانویه باز است. لذا جریانی در مدار ثانویه جاری نمی‌شود. بنابراین ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور باعث مغناطیسی شدن هسته ترانسفورماتور می‌شود و جریان بی‌باری I_0 از آمپر متر عبور می‌کند. از آنجایی که جریان I_0 در حدود ۲ تا ۶ درصد جریان نامی است لذا افت ولتاژ ناشی از $R_1 I_0$ و $X_1 I_0$ ناچیز بوده و بطور تقریبی می‌توان نتیجه گرفت $U_1 = E_1$ می‌باشد.

توان مصرفی که توسط وات‌متر اندازه‌گیری می‌شود مطابق شکل (۴۷) شامل توان تلف شده در هسته و تلفات اهمی سیم‌پیچ در سمت اولیه است اما چون جریان بی‌باری درصد ناچیزی از جریان نامی است پس تلفات اهمی سیم‌پیچ اولیه نیز در این حالت درصد ناچیزی از کل تلفات نشان داده شده توسط وات‌متر است. بنابراین توان اندازه‌گیری‌شده توسط وات‌متر P_0 تقریباً همان توان تلف شده در هسته ترانسفورماتور است که به آن تلفات هسته (P_{Core}) می‌گویند. یعنی

$$P_0 \approx P_{Core}$$

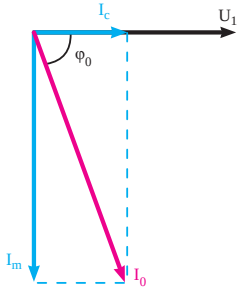


(الف)



(ب)

شکل۴۷ــ مدار یک ترانسفورماتور واقعی در حال آزمایش بی‌باری



شکل ۴۸ــ دیاگرام برداری ولتاژ و جریان در حالت بی‌باری

$$\cos\varphi_{\circ} = \frac{P_{\circ}}{U_1 I_{\circ}} \qquad (۱_۳۲)$$

$$\sin\varphi_{\circ} = \sqrt{1-\cos\varphi_{\circ}^{2}} \qquad (۱_۳۳)$$

$$I_C = I_{\circ}\cos\varphi_{\circ} \qquad (۱_۳۴)$$

$$I_m = I_{\circ}\sin\varphi_{\circ} \qquad (۱_۳۵)$$

$$X_m = \frac{U_1}{I_m} \qquad (۱_۳۶)$$

$$R_C = \frac{U_1}{I_C} \qquad (۱_۳۷)$$

$\cos\varphi_{\circ}$ ضریب قدرت در حالت بی‌باری

$P_{\circ}$ توانی که وات‌متر در آزمایش بی‌باری نشان می‌دهد

U_1 ولتاژ ورودی

$I_{\circ}$ جریان بی‌باری (جریانی که آمپرمتر نشان می‌دهد)

با توجه به مدار معادل، جریان تحریک $I_{\circ}$ مستقل از جریان بار I_2 است، لذا تغییر بار نمی‌تواند باعث تغییر تلفات در هسته شود، زیرا مقدار این تلفات وابسته به المان مقاومتی شاخه موازی است که به‌جای تلفات گرمایی ایجاد شده در هسته مدل شده است. تلفات هسته تابع ولتاژ و فرکانس برق ورودی است که با توجه به ثابت ماندن ولتاژ و فرکانس در شبکه برق، تلفات در هسته ترانسفورماتور را ثابت می‌ماند و آن را تلفات ثابت ترانسفورماتور گویند.

خود را بیازمایید

۱ــ در آزمایش بی باری : ولتاژ اتصالی به اولیه.....و جریان خروجی..... است. و از شبکه جریان..... دریافت می شود.

۲ــ چرا تلفات هسته در ترانسفورماتور را تلفات ثابت می نامند؟

۳ــ چرا در آزمایش بی باری از تلفات سیم‌پیچ صرف نظر می شود؟

۲ــ۶ــ۱ــ آزمایش اتصال کوتاه : هدف از انجام این آزمایش تعیین مقادیر المان‌های مربوط به شاخه سری مدار معادل یعنی (R_1 , X_1) و (R'_2 , X'_2) می‌باشد. در این آزمایش مطابق مدار شکل (۴۹ــ الف) دو سر سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور را اتصال کوتاه می کنند.

از آنجا که در مدار شکل (۴۹) ثانویه اتصال کوتاه شده است یعنی $Z_L=0$ می‌باشد، لذا برای جلوگیری از افزایش شدت جریان در سمت اولیه ترانسفورماتور، باید ترانسفورماتور را توسط یک منبع ولتاژ متناوب متغیر تغذیه نمود. در ابتدای این آزمایش باید از صفر بودن ولتاژ ورودی اطمینان حاصل کرد. سپس ثانویه ترانسفورماتور را اتصال کوتاه می‌کنیم و آنگاه مقدار ولتاژ اولیه را به تدریج افزایش می‌دهیم تا جریان نامی از سیم‌پیچ اولیه عبور کند علت انتخاب جریان نامی به این جهت است که مقادیر به دست آمده در نقطه کار نامی ترانسفورماتور باشد.

آنچه وات‌متر در این آزمایش نشان می دهد مجموع تلفات مسی سیم‌پیچ ها و تلفات هسته است.

P_{SC} توانی که وات‌متر در آزمایش اتصال کوتاه نشان می‌دهد برابر است با :

$$P_{SC} = P_{Cu_1} + P_{Cu_2} + P_{core} \qquad (۱_۳۸)$$

در آزمایش اتصال کوتاه ولتاژ ورودی کوچکتر از ولتاژ نامی است. از طرفی چون فرکانس شبکه برق ثابت است و تلفات هسته متناسب با مجذور ولتاژ ورودی می‌باشد، پس تلفات آهنی نیز به نسبت حالتی که با ولتاژ نامی تغذیه می شود خیلی کوچکتر خواهد بود. بنابراین می‌توان ثابت کرد، در آزمایش اتصال کوتاه، توانی که وات‌متر نشان می دهد تقریباً همان تلفات مسی سیم‌پیچ‌ها است.

در نتیجه با توجه به مدار معادل شکل(۴۹ــ ب) توانی که وات‌متر نشان می‌دهد عبارت است از توان تلف شده در مقاومت های R_1 و R'_2 که به‌صورت حرارت در سیم پیچ ها تلف می‌شود.

$$P_{SC} = R_1 I_n^{2} + R'_2 I_n^{2} \qquad (۱_۳۹)$$

$$P_{SC} = (R_1 + R'_2) I_n^{2} \qquad (۱_۴۰)$$

$$P_{SC} = R_e I_n^2 \qquad (۱_۴۱)$$

$$R_e = \frac{P_{SC}}{I_n^2} \qquad (۱_۴۲)$$

U_{SC} ولتاژی است که ولت‌متر نشان می‌دهد و چون $U_{SC} = Z_e I_n$ بنابراین :

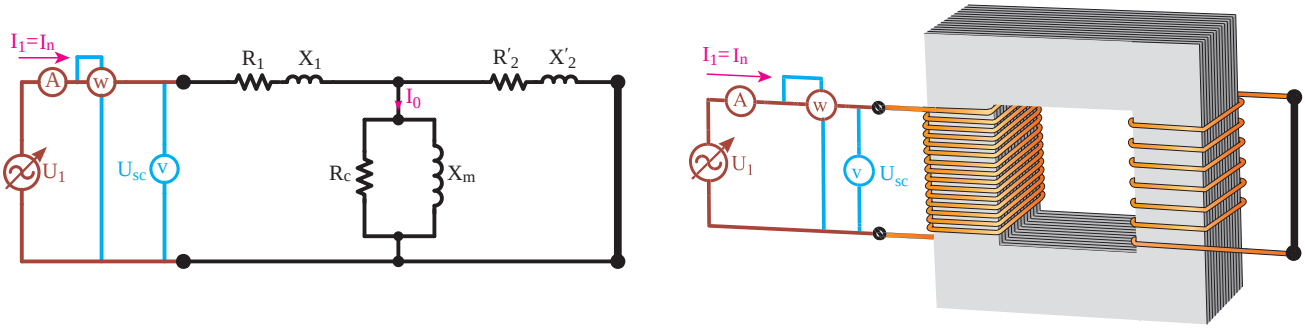
$$Z_e = \frac{U_{SC}}{I_n} \qquad (۱_۴۳)$$

پس می توان مقدار X_e را از رابطه (۱-۴۷) محاسبه کرد.

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} \qquad (۱_۴۴)$$

$$R_e = R_1 + R'_2 \qquad (۱_۴۵)$$

$$X_e = X_1 + X'_2 \qquad (۱_۴۶)$$



(ب) (الف)

شکل۴۹ــ مدار یک ترانسفورماتور واقعی در حال آزمایش اتصال کوتاه

از آنجاکه تلفات مسی ترانسفورماتور وابسته به جریان بار می‌باشد و با تغییرات جریان بار تلفات مسی تغییر می‌کند از این‌رو تلفات مسی ترانسفورماتور را تلفات متغیر نیز می‌نامند. تلفات مسی بدست آمده از آزمایش اتصال کوتاه به‌ازای عبور جریان نامی است که آن را با P_{Cu_n} نمایش می دهند. بنابراین :

$$P_{SC} = P_{Cu_1} + P_{Cu_2} = P_{Cu_n} \qquad (۱_۴۷)$$

در صورتی که تلفات مسی در جریانی غیر از جریان نامی ترانسفورماتور به‌دست آید می‌توان از روابط (۱-۵۱) و (۱-۵۲) استفاده کرد.

$$\frac{P_{Cu}}{P_{Cu_n}} = \frac{R_e I^2}{R_e I_n^2} \Rightarrow$$

$$P_{Cu} = P_{Cu_n} \left(\frac{I}{I_n}\right)^2 \qquad (۱_۴۸)$$

$$P_{Cu} = P_{Cu_n} \left(\frac{U_n I}{U_n I_n}\right)^2 \Rightarrow$$

$$P_{Cu} = P_{Cu_n} \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 \qquad (۱_۴۹)$$

S توان ظاهری بار

S_n توان ظاهری نامی ترانسفورماتور

P_{CU} تلفات مسی در بار S

P_{CU_n} تلفات مسی در بار نامی S_n

در رابطه (۱ــ ۵۰) نسبت $\frac{S}{S_n}$ یا $\frac{I}{I_n}$ را ضریب بار می‌گویند و با حرف A نمایش می دهند.

$$A = \frac{I}{I_n} = \frac{S}{S_n} \qquad (۱_۵۰)$$

پس می توان رابطه (۱ــ۴۸) یا (۱ــ۴۹) را به صورت رابطه (۱ــ۵۴) نوشت :

$$P_{Cu} = P_{Cu_n} A^2 \qquad (۱_۵۱)$$

خود را بیازمایید

۱ــ کدامیک از کمیت‌های الکتریکی مدار معادل ترانسفورماتور را می‌توان از آزمایش اتصال کوتاه مشخص نمود؟

۲ــ مهم‌ترین نکته حفاظتی را که باید هنگام انجام آزمایش اتصال کوتاه رعایت نمود چیست؟

۳ــ چرا در آزمایش اتصال کوتاه از تلفات هسته صرف نظر می‌شود؟

۴ــ یک ترانسفورماتور ۲۰ KVA در آزمایش اتصال کوتاه توان ۸۰۰ وات از شبکه دریافت می‌کند. تلفات مسی آن را در ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد بارنامی محاسبه کنید؟

تحقیق کنید

آزمایش اتصال کوتاه را از طرف ثانویه انجام دهیم بهتر است یا اولیه؟ آزمایش بی‌باری را چطور؟ چرا؟

۷ــ۱ــ ولتاژ اتصال کوتاه در ترانسفورماتور

ولتاژی که ولت‌متر در حالت آزمایش اتصال کوتاه نشان می‌دهد را ولتاژ اتصال کوتاه ترانسفورماتور می‌گویند و آن را با U_{SC} نمایش می‌دهند. نسبت ولتاژ اتصال کوتاه به ولتاژ نامی ترانسفورماتور را ولتاژ اتصال کوتاه نسبی ΔU_k ترانسفورماتور می‌گویند و آن را به‌صورت درصد بر روی پلاک نشان می‌دهند.

$$\% \Delta U_k = \frac{U_{SC}}{U_n} \times ۱۰۰ \qquad (۱ــ۵۲)$$

U_{SC} ولتاژی که ولت‌متر در آزمایش اتصال کوتاه نشان می‌دهد

U_n ولتاژ نامی ترانسفورماتور

در عمل ترانسفورماتورها را بسته به مورد کاربردشان با ولتاژهای اتصال کوتاه متنوع می‌سازند.

جدول (۱) محدودهٔ درصد افت ولتاژ چند نوع ترانسفورماتور واقعی را نشان می‌دهد.

جدول ۱ــ درصد ولتاژ اتصال کوتاه در ترانسفورماتورهای مختلف

نوع ترانسفورماتور	ولتاژ اتصال کوتاه به درصد
ترانسفورماتورهای قدرت سه فاز	۴ تا ۱۰
ترانسفورماتورهای منابع تغذیه	۸ تا ۱۰

خود را بیازمایید

۱ــ ولتاژ اتصال کوتاه را تعریف کنید.

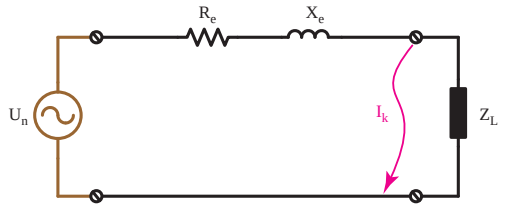
۲ــ ترانسفورماتوری که ولتاژ اتصال کوتاه آن کم است، در زیر بار دارای افت ولتاژ..... می‌باشد.

۳ــ اگر ترانسفورماتوری دارای امپدانس داخلی بزرگ باشد حتما دارای ولتاژ اتصال کوتاه..... است.

۸ــ۱ــ جریان اتصال کوتاه واقعی در ترانسفورماتور

در هنگام بارداری ترانسفورماتورها از تقریب سوم مدار معادل واقعی استفاده می‌شود. این تقریب در تحلیل اتصال کوتاه واقعی هم درست و به واقعیت نزدیک است. لذا از مدار معادل شکل (۵۰) استفاده می‌شود. اگر مطابق شکل (۵۰) به سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور در حالی که دو سر سیم‌پیچ ثانویه آن مستقیماً

بهم وصل شده‌اند ولتاژ نامی به آن اعمال شود، جریان زیادی از سیم‌پیچ‌ها عبور کرده و پس از ایجاد حرارت باعث سوختن سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور می‌شود. این جریان را جریان اتصال کوتاه ترانسفورماتور می‌گویند و آن را با I_K نمایش می‌دهند.



شکل ۵۰ــ مدار معادل ترانسفورماتور در حال اتصال کوتاه واقعی

در شرایط کار ترانسفورماتور باید مراقب بود که هیچ گاه در ترانسفورماتور اتصال کوتاه رخ ندهد. همچنین تمهیدات لازم جهت حفاظت ترانسفورماتور در برابر اتصال کوتاه اندیشیده شود. به همین دلیل در ابتدای آزمایش اتصال کوتاه باید از صفر بودن ولتاژ اولیه مطمئن شد، زیرا در غیر این‌صورت ممکن است اتصال کوتاه واقعی رخ دهد.

جریان اتصال کوتاه از رابطه (۵۳ــ۱) به‌دست می‌آید.

$$I_k = \frac{I_n}{\Delta U_k} \qquad (۵۳ــ۱)$$

جریان I_K را جریان اتصال کوتاه دایم ترانسفورماتور می‌نامند.

این جریان در ترانسفورماتورهایی که ولتاژ اتصال کوتاه کمی دارند، زیاد و بسیار خطرناک و در ترانسفورماتورهایی که ولتاژ اتصال کوتاه آنها زیاد است، کم می‌باشد.

روش‌های محاسبه جریان اتصال کوتاه احتیاج به محاسبات پیشرفته ریاضی و تحلیل همه جانبه کمیت‌های شبکه دارد که از حوصله این کتاب خارج است.[۱]

خود را بیازمایید

۱ــ جریان اتصال کوتاه ترانسفورماتور چیست؟

۲ــ در اجرای آزمایش اتصال کوتاه ترانسفورماتور اولین نکته حفاظتی که باید رعایت شود چیست؟

۳ــ اتصال کوتاه ثانویه ترانسفورماتوری که ولتاژ اتصال کوتاه.....دارد، خطرناک تر است.

۴ــ خروجی یک ترانسفورماتور با ولتاژ اتصال کوتاه ۸٪، اتصالی کرده و جریان ۱۲۰ آمپر از سیم‌پیچ اولیه عبور کرده است، جریان نامی اولیه را محاسبه کنید.

۹ــ۱ــ تلفات در ترانسفورماتور

ترانسفورماتور وسیله‌ای است که انرژی ورودی را با ماهیت الکتریکی از شبکه برق دریافت کرده و در خروجی نیز آن را با همان ماهیت الکتریکی به بار تحویل می‌دهد. اما همه انرژی جذب شده از شبکه برق تحویل بار نمی‌شود، بلکه بخشی از آن در هسته و سیم‌پیچ به گرما تبدیل می‌شود. به مقدار انرژی الکتریکی که در واحد زمان در ترانسفورماتور به گرما تبدیل می‌شود تلفات گویند.

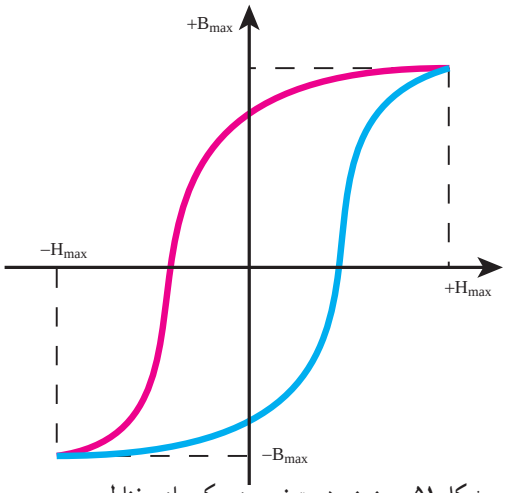
بنابراین تلفات ترانسفورماتور مربوط به هسته و سیم‌پیچ می‌باشد.

۱ــ۹ــ۱ــ تلفات هسته (آهنی): مقدار انرژی الکتریکی که در هسته ترانسفورماتور به گرما تبدیل می‌شود را تلفات هسته گویند و چون جنس هسته عموماً آهن است به آن تلفات آهنی نیز می‌گویند. تلفات در هسته خود شامل تلفات هیسترزیس و فوکو می‌باشد.

۱ــ استاندارد IEC ۶۰۹۰۹ به تحلیل اتصال کوتاه پرداخته است.

۱

تلفات هیسترزیس: اگر نیروی محرکه مغناطیسی در مدار مغناطیسی به‌طور متناوب تغییر جهت دهد در این صورت منحنی B–H یعنی چگالی میدان مغناطیسی برحسب شدت میدان مغناطیسی مطابق شکل (۵۱) خواهد شد.



شکل ۵۱ــ منحنی هیسترزیس در یک ماده مغناطیسی

حلقه نشان داده شده در شکل (۵۱) را حلقه هیسترزیس می‌گویند. این حلقه بیانگر آن است که در هر سیکل برای تغییر جهت میدان مغناطیسی در مولکول‌های هسته انرژی الکتریکی لازم است. هرچه حلقه باریک‌تر باشد مساحت آن کمتر و در نتیجه انرژی تلف شده به صورت گرما در آن کمتر خواهد بود و بالعکس.

به مقدار انرژی الکتریکی که در واحد زمان صرف تغییر جهت شار مغناطیسی در هسته می‌شود را تلفات هیسترزیس گویند.

مقدار تلفات هیسترزیس به فرکانس و جنس هسته بستگی دارد. برای کاهش تلفات هیسترزیس جنس هسته از مواد فرومغناطیس با پسماند کم انتخاب می‌شود.[۱]

هرچه فرکانس شبکه بیشتر باشد عمل تغییر جهت میدان مغناطیسی سریع‌تر صورت می‌گیرد لذا افزایش فرکانس باعث افزایش تلفات هیسترزیس می‌شود اما از آنجا که فرکانس شبکه جنس هسته جزءِ ثابت ساختمان ترانسفورماتور هستند پس مقدار این تلفات ثابت می‌باشد.

خود را بیازمایید

۱ــ تلفات ایجاد شده در ترانسفورماتور مربوط به کدام اجزای آن می باشد؟

۲ــ چه عواملی باعث افزایش تلفات هیسترزیس در ترانسفورماتور می شود؟

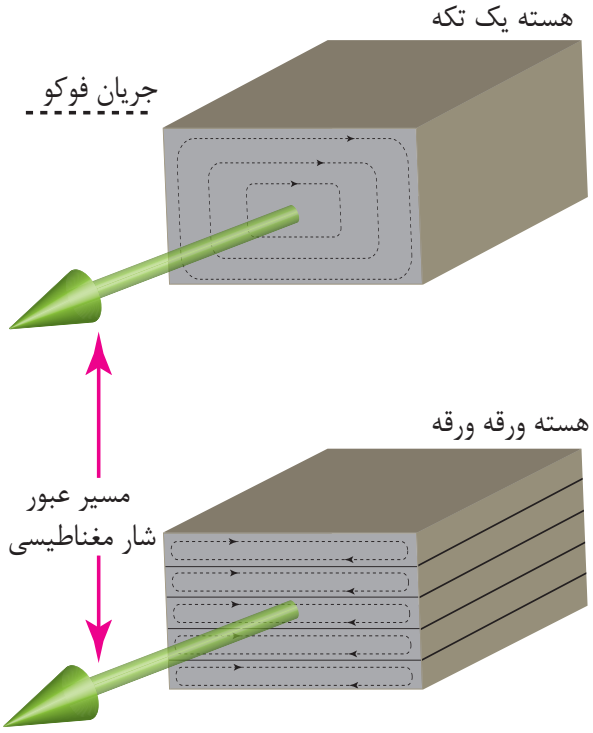
۳ــ تلفات هیسترزیس ثابت است یا متغیر ؟چرا؟

تلفات فوکو: با عبور شار مغناطیسی از هسته، در هستهٔ ترانسفورماتور نیز نیروی محرکه القا می‌شود. و چون هسته ترانسفورماتور هادی است، لذا جریان الکتریکی در آن القا می‌شود. مسیر حرکت جریان القایی هسته عمود بر مسیر عبور شار و مانند گرداب در مقطع هسته می‌باشد به همین خاطر آن را جریان گردابی[۲] می‌گویند. در شکل(۵۲) برش مقطعی از یک هسته و مسیر جریان گردابی نشان داده شده است.

با جاری شدن جریان گردابی در هسته، بدلیل وجود مقاومت الکتریکی آن، هسته ترانسفورماتور گرم می‌شود. مقدار انرژی که در واحد زمان ناشی از جریان‌های گردابی در هسته به گرما تبدیل می‌شود را تلفات فوکو گویند.

۱ــ فولاد سیلیسیم نورد سرد شده دارای خاصیت خوب مغناطیسی می باشد.

۲ ــEddy Current



شکل۵۲ــ نمای عبور جریان فوکو از مقطع هسته ترانسفورماتور

همان طورکه در شکل (۵۲) مشاهده می‌شود با ورقه‌ورقه‌کردن هسته و عایق کردن آنها از یکدیگر مقاومت الکتریکی هسته را افزایش می‌دهند تا تلفات فوکو کاهش یابد.

مقدار تلفات فوکو به حجم هسته، مقاومت الکتریکی و ضخامت ورقه های هسته و همچنین مجذور ولتاژ اعمال شده به ورودی ترانسفورماتور بستگی دارد.

چون ولتاژ شبکه ثابت است و هسته نیز جزو ساختمان ترانسفورماتور محسوب می‌شود پس این تلفات نیز در ترانسفورماتور بدون تغییر بوده و ثابت می‌باشد.

به مجموع تلفات هیسترزیس و فوکو، تلفات هسته ترانسفورماتور گویند و از آنجا که هر ترانسفورماتور در یک ولتاژ نامی و فرکانس نامی به کار گرفته می شود. بنابراین تلفات هسته ثابت خواهد بود. از طرفی چون جنس هسته ترانسفورماتور از ترکیبات آهنی است، به تلفات هسته، **تلفات آهنی** نیز گفته می‌شود. بدلیل ثابت بودن تلفات هسته ترانسفورماتور در محاسبات آن را به عنوان **تلفات ثابت** ترانسفورماتور درنظر می‌گیرند.

خود را بیازمایید

۱ــ جهت جریان‌های گردابی درهسته نسبت به جهت عبور شار مغناطیسی..... است.(عمود ــ موازی)

۲ــ هرچه مقاومت.....هسته بیشتر باشد تلفات فوکو کمتر است.

۳ــ تلفات فوکو در ترانسفورماتور به چه عواملی بستگی دارد؟

۲ــ۹ــ۱ــ تلفات اهمی سیم پیچ (مسی) : سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور معمولاً از تعداد زیادی دور سیم تشکیل می شوند هرچه تعداد دور سیم‌پیچ بیشتر باشد، طول سیم آن بیشتر و بنابراین مقاومت الکتریکی سیم‌پیچ بیشتر خواهد شد به‌علاوه سطح مقطع سیم نیز تأثیر عکس در مقدار مقاومت الکتریکی آن دارد.

وقتی ترانسفورماتور زیر بار قرار می‌گیرد، در سیم‌پیچ‌های آن جریان جاری می‌شود و تلفاتی متناسب با $(R I^2)$ در هر یک از سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه به گرما تبدیل می شود.

به مقدار انرژی الکتریکی که در واحد زمان در سیم‌پیچ اولیه و ثانویه ترانسفورماتور و بر اثر مقاومت اهمی سیم‌پیچ‌ها به گرما تبدیل می شود، تلفات اهمی سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور می‌گویند. و از آنجا که غالباً جنس سیم‌پیچ‌ها مسی است، به این تلفات، تلفات مسی نیز گفته می شود.

تلفات مسی با مجذور جریان متناسب است و از آنجا که جریان عبوری از سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور تابع جریان بار است لذا تلفات مسی جزو تلفات متغیر ترانسفورماتور به حساب می‌آید.

برای کاهش تلفات مسی در ترانسفورماتورها، بارگذاری مناسب برروی آنها توصیه می‌شود تا بدین ترتیب با عبور جریان مناسب تلفات مسی را به‌توان کنترل نمود. افزایش بار مخصوصاً تجاوز آن از مقدار نامی باعث افزایش تلفات مسی در ترانسفورماتور خواهد شد.

خود را بیازمایید

۱ــ هر چه تعداد دور سیم‌پیچ ترانسفورماتور بیشتر باشد مقاومت الکتریکی آن..... و تلفات مسی آن..... است.(بیشتر ــ کمتر)

۲ــ اگر جریان بار یک ترانسفورماتور سه برابر شود تلفات مسی آن..... برابر می‌شود.

۳ــ مناسب‌ترین روش برای کاهش تلفات مسی در ترانسفورماتور چیست؟

۱۰ــ۱ــ راندمان یا بازده ترانسفورماتور

بازده ترانسفورماتور با رابطه(۱ــ۵۴) بر حسب درصد بیان می‌شود.

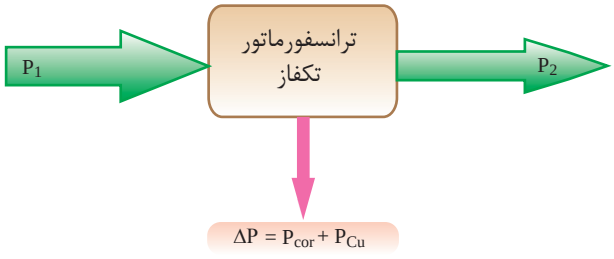
$$\%\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \qquad (۱ــ۵۴)$$

$\eta\%$ بازده یا راندمان بر حسب درصد

P_{out} توان مصرفی (حقیقی) خروجی

P_{in} توان مصرفی (حقیقی) ورودی

دیاگرام توازن توان در ترانسفورماتور مطابق شکل (۵۳) می‌باشد.



شکل۵۳ــ دیاگرام توازن توازن در یک ترانسفورماتور

با توجه به دیاگرام توازن توان در صورتی که مقدار توان حقیقی P_{in} مستقیماً در دسترس نبود، به‌طور غیر مستقیم برای محاسبه مقدار راندمان می توان مطابق روابط زیر عمل نمود.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \qquad (۱ــ۵۵)$$

$$P_{in} = P_{out} + \Delta P \qquad (۱ــ۵۶)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Delta P} \qquad (۱ــ۵۷)$$

$$\Delta P = P_{core} + P_{Cu} \qquad (۱ــ۵۸)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{core} + P_{Cu}} \qquad (۱ــ۵۹)$$

$$P_{out} = U_2 I_2 \cos\varphi \qquad (۱ــ۶۰)$$

و راحت‌تر آنکه رابطه فوق به شکل رابطه (۱ــ۶۱) نوشته شود :

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos\varphi}{U_2 I_2 \cos\varphi + P_{core} + P_{Cu}} \qquad (۱ــ۶۱)$$

در رابطه (۱ــ۶۱)

U_2 ولتاژ نامی مصرف‌کننده بر حسب V

I_2 جریان نامی ثانویه بر حسب A

$\cos\varphi$ ضریب قدرت بار

P_{core} تلفات هسته ترانسفورماتور یا همان تلفات ثابت

P_{Cu} تلفات مسی ترانسفورماتور یا همان تلفات متغیر

البته چون تلفات مسی با تغییر جریان بار تغییر می‌کند، ابتدا باید تلفات مسی به ازای آن مقدار عبور جریان با کمک روابط (۱ــ۴۸)، (۱ــ۴۹) و (۱ــ۵۰) محاسبه شود.

توان ظاهری نامی و تلفات مسی در بار نامی و تلفات هسته از مشخصات اصلی ترانسفورماتور به حساب می‌آید که روی پلاک آنها نوشته شده است. بنابراین با توجه به رابطه (۱ــ۵۰)، (۱ــ۶۱)و (۱ــ۶۲) می توان راندمان را از رابطه (۱ــ۶۹) نیز محاسبه کرد.

$$P_{out} = S\cos\varphi \qquad (۱ــ۶۲)$$

$$\eta = \frac{AS_n \cos\varphi}{AS_n \cos\varphi + P_{core} + A^2 P_{Cu_n}} \qquad (۱ــ۶۳)$$

در رابطه(۱ــ۶۳) :

S_n قدرت ظاهری نامی بر حسب VA

A ضریب بار

$Cos\varphi$ ضریب قدرت بار مصرفی

P_{core} تلفات هسته خروجی آزمایش بی‌باری بر حسب W

P_{Cun} تلفات به‌ازای بار نامی خروجی آزمایش اتصال کوتاه بر حسب W

همان‌طور که در رابطه (۶۳ــ۱) دیده می شود راندمان تابعی از ضریب بار و ضریب قدرت است. زیرا مقادیر توان ظاهری نامی، تلفات آهنی و تلفات مسی در بار کامل به ساختمان ترانسفورماتور بستگی داشته و در ترانسفورماتور قابل تغییر نیستند.

ثابت می شود راندمان ترانسفورماتور زمانی ماکزیمم است که مقدار ضریب بار مطابق رابطه (۶۴ــ۱) باشد.

$$A = \sqrt{\frac{P_{core}}{P_{Cun}}} \qquad (۶۴ــ۱)$$

اصولاً در ساخت ترانسفورماتورهایی که قرار است به‌طور دائم زیر بار کار کنند، سیم‌پیچ آنها را طوری طراحی می‌کنند که در جریان بار کامل یا نامی تلفات آهنی و مسی آنها باهم برابر شوند تا راندمان ترانسفورماتور در موقع کار و در بار کامل ماکزیمم باشد.

بنابراین هرگاه مجموع تلفات مسی و تلفات هسته برابر شد، راندمان ترانسفورماتور حداکثر خواهد شد.

یعنی اگر

$$\eta = \eta_{max} \Rightarrow P_{Cu} = P_{core}$$

تحقیق کنید

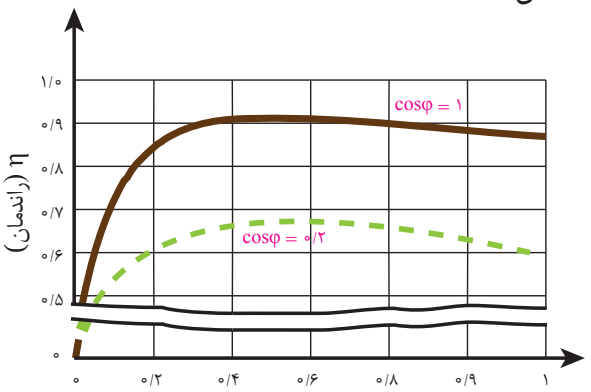
درستی عبارت زیر را ثابت کنید.

$$\eta = \eta_{max} \Rightarrow P_{Cu} = P_{core}$$

بارگیری ترانسفورماتور وابسته به مقدار جریان بار می‌باشد و چون مصرف کننده انرژی ممکن است به‌طور مداوم بار خروجی ترانسفورماتور را تغییر دهد پس راندمان ترانسفورماتور هم کاملاً متغیر می‌باشد و وابسته به بار تغییر خواهد کرد.

با توجه به رابطه (۶۳ــ۱)، راندمان ترانسفورماتور به ضریب قدرت نیز وابسته است و از آنجا که دامنه تغییرات ضریب قدرت از صفر تا یک می‌باشد، لذا به‌طور جدی می تواند باعث کاهش یا افزایش راندمان ترانسفورماتور شود. مقدار ضریب قدرت نیز به نوع بار مصرفی متصل شده به ترانسفورماتور وابسته است.

شکل (۵۴) تغییرات هم‌زمان ضریب بار و ضریب توان را نشان می دهد.



شکل ۵۴ــ منحنی تغییرات راندمان برحسب تغییرات بار و ضریب قدرت

خود را بیازمایید

۱ــ از ثانویه یک ترانسفورماتور ۱۰۰ A جریان عبور می‌کند، اگر جریان نامی این ترانسفورماتور ۱۲۰ A باشد ضریب بار چقدر است؟

۲ــ یک ترانسفورماتور ۱۵۰ KVA باری را با توان ۸۰KVA تغذیه می‌کند ضریب بار چقدر است؟

۳ــ در بار نامی یک ترانسفورماتور تلفات..... از تلفات..... بیشتر است. (هسته ــ مسی)

۴ــ ترانسفورماتوری که در راندمان ماکزیمم کار می‌کند ضریب بار آن حتماً..... از واحد است. (بیشتر ــ کمتر)

۵ــ یک ترانسفورماتور ۴۰KVA باتلفات مسی نامی ۱۲۰۰ وات وتلفات هسته ۸۰۰ وات، بار نامی با ضریب قدرت ۰/۷ پس فاز را تغذیه می‌کند. راندمان ترانسفورماتور چقدر است؟

۶ــ حداکثر راندمانی را که ترانسفورماتور مسئله (۵) می تواند با همان ضریب قدرت تأمین نماید را به‌دست آورید.

۱ــ۱۱ــ انواع ترانسفورماتورهای تکفاز خاص

۱ــ۱۱ــ۱ــ ترانسفورماتور ایزوله: در مصرف‌کننده‌های تکفاز اختلاف پتانسیل یا ولتاژ بین دو سیم فاز و نول وجود دارد که غالبا از طریق ترانسفورماتور توزیع سه فاز با اتصال خروجی ستاره یا زیگزاگ[1] تأمین می شوند. در توزیع انرژی الکتریکی سیم نول را زمین می‌کنند تا خطاهای ناشی از اتصال به زمین فاز برای دستگاه‌های حفاظتی قابل تشخیص باشد.

تحقیق کنید

گاهی اوقات در صنعت برق ترانسفورماتورها را با نسبت تبدیل یک می‌سازند یعنی تعداد دور سیم‌پیچ اولیه و ثانویه آنها برابر بوده و ولتاژ دو سمت ترانسفورماتور باهم برابر است.

آیا به‌نظر شما ساخت چنین ترانسفورماتوری منطقی است؟

حال اگر بدن یک شخص مطابق شکل (۵۵ ــ الف) به طور مستقیم یا غیر مستقیم با سیم فاز برخورد کند جریان از طریق بدن فرد و زمین بسته شده و موجبات برق گرفتگی شخص را فراهم می‌کند.

اما اگر سر راه فاز و نول یک ترانسفورماتور با ضریب تبدیل یک گذاشته شود بدون آنکه ولتاژ تغییری کرده باشد انرژی الکتریکی از طریق القا الکترومغناطیسی به سمت ثانویه منتقل شده و ارتباط الکتریکی سیم نول با زمین قطع خواهد شد. در واقع با این‌کار در خروجی ترانسفورماتور سیم نول وجود ندارد بلکه ولتاژ بین دو سر سیم‌پیچ موجود است و با اتصال یک سر سیم‌پیچ به زمین جریان برقرار نمی‌گردد. در این مدار تنها با اتصالی دوسر سیم‌پیچ ثانویه جریان در آن برقرار می شود.

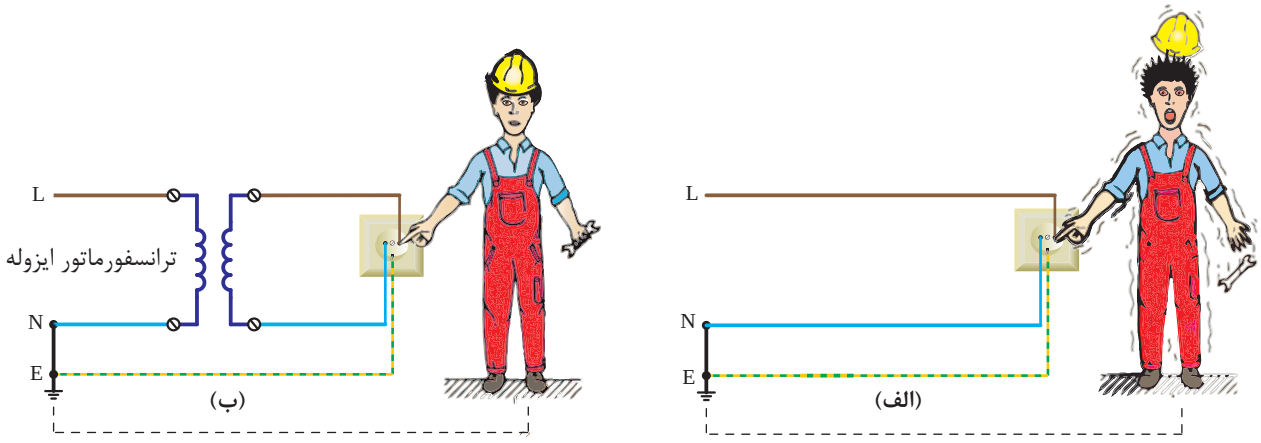
به همین خاطر مطابق استاندارد، پریزهای برق نصب شده در حمام و مکان های مرطوب باید مجهز به این ترانسفورماتور باشند زیرا اتصال ثانویه را از نول یا زمین جدا می‌کند که به آن ترانسفورماتور ایزوله می‌گویند.

خود را بیازمایید

۱ــ نسبت تعداد دور اولیه به ثانویه ترانسفورماتور ایزوله چقدر است؟

۲ــ اتصال شخص به ثانویه ترانسفورماتور ایزوله درچه صورتی باعث برق گرفتگی می‌شود؟

۱ــ با چگونگی این اتصالات در فصل بعد آشنا خواهید شد.



شکل۵۵ ــ نقش ترانسفورماتور ایزوله در زمان اتصال بدن شخص با قسمت برقدار

۲ــ۱۱ــ۱ــ ترانسفورماتور جریان : جریان‌های عبوری از یک سیم در شبکه های برق به منظور کاربردهای کنترلی و حفاظتی باید اندازه‌گیری شود. در شبکه های برق با ولتاژ بالا و جریان‌های زیاد امکان اندازه‌گیری جریان به‌صورت مستقیم وجود ندارد.

از طرفی می دانیم که اطراف سیم حامل جریان، میدان مغناطیسی ایجاد می شود و در صورت عبور جریان متناوب، این میدان نیز متناوباً تغییر خواهد کرد به‌طوری که اندازه این میدان متناسب با مقدار جریان عبوری از سیم می‌باشد.

از همین اثر برای اندازه‌گیری غیر مستقیم جریان در شبکه‌های با ولتاژ و جریان زیاد استفاده می‌شود.

بدین ترتیب با قرار دادن یک هسته مغناطیسی پیرامون سیم حامل جریان، میدان های متغیر حاصل از آن در هسته، تولید شار مغناطیسی کرده و اگر روی همین هسته سیم‌پیچ دیگری با سطح مقطع کم و تعداد دور زیاد داشته باشیم می‌تواند در سمت ثانویه نیروی محرکه القا نماید. در صورت بسته شدن مدار ثانویه نیز جریانی از آن عبور می‌کند که طبق روابط اساسی ترانسفورماتور مقدار جریان عبوری از سیم‌پیچ ثانویه متناسب با جریان سیم حامل جریان شبکه خواهد بود. این ترانسفورماتور را ترانسفورماتور جریان[۱] یا CT می‌گویند.

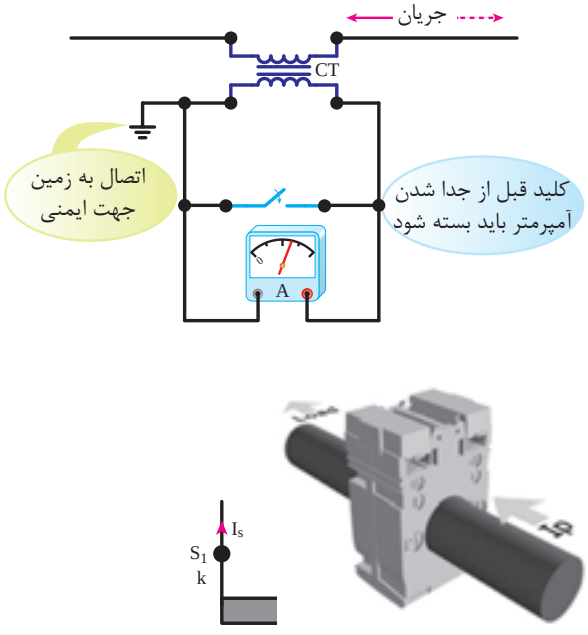
ضریب تبدیل این ترانسفورماتور را به صورت کسری و نسبت جریان اولیه به ثانویه $\frac{I_1}{I_2}$ تعریف می کنند مثلاً ترانسفورماتور جریان $\frac{100A}{5A}$ می تواند جریان عبوری ۱۰۰A مدار را به ۵A در دستگاه اندازه‌گیری تبدیل کند و دیگر جریان‌های عبوری تا ۱۰۰A را به‌صورت خطی در دستگاه اندازه‌گیری با همین نسبت کوچک نماید. ضریب تبدیل ترانسفورماتورهای جریان، شاخصی مؤثر در انتخاب آن محسوب می شود و همواره روی پلاک مشخصات CT درج می‌گردد. البته لازم به‌ذکر است جریان ثانویه این‌گونه ترانسفورماتورها را معمولاً برای ۱A یا ۵A طراحی می‌نمایند.

به‌طورکلی می توان گفت ترانسفورماتور جریان ترانسفورماتوری است که اولیه آن سیم حامل جریان و ثانویه آن به یک وسیله اندازه‌گیری مثلاً آمپرمتر متصل می‌باشد. در شکل(۵۶) نمای ظاهری چند نمونهCT آورده شده است.

چگونگی قرار گرفتن CT وآمپرمتر در شبکه برق در شکل (۵۷) نشان داده شده است. چون CT قرار است نمونهٔ جریان را به وسیلهٔ اندازه‌گیری انتقال دهد، لذا به‌طور سری در مسیر جریان قرار می‌گیرد.

۱ــ Current Transformer

شکل ۵۶ ــ نمای ظاهری چند ترانسفورماتور جریان CT



شکل ۵۷ــ چگونگی اتصال ترانسفورماتور جریان CT در مدار

از طرفی امپدانس داخلی آمپرمتر بسیار ناچیز است پس می توان گفت مدار ثانویه CT در حالت کار اتصال کوتاه می‌باشد به همین خاطر ترانسفورماتور جریان را برای حالت کار اتصال کوتاه در سمت ثانویه محاسبه می‌کنند. یعنی همواره باید شار مخالف حاصل از نیروی محرکه مغناطیسی تولید شده در سیم‌پیچ ثانویه شار میدان اولیه را در هسته خنثی کند.

البته در صورت باز شدن مدار ثانویه شار مخالف در هسته دیگر وجود نخواهد داشت و در نتیجه موارد زیر اتفاق می‌افتد :

- همهٔ شار مربوط به میدان اولیه در هسته به صورت تلفات هسته ظاهر می شود و باعث افزایش گرما در هسته می‌شود.
- از آنجا که CT یک ترانسفورماتور افزاینده است، (تعداد دور ثانویه نسبت به اولیه بیشتر است) ولتاژ در سیم‌پیچ ثانویه به قدری بالا می رود که باعث از بین رفتن عایق‌بندی ترانسفورماتور می‌شود و برای اپراتور نیز خطر در پی دارد.

طرف ثانویه ترانسفورماتور جریان را نباید باز گذاشت یا آن را توسط فیوز محافظت کرد.

همچنین در هنگام باز کردن دستگاه‌های اندازه‌گیری از ثانویه CT مطابق شکل(۵۷) باید ابتدا مدار ثانویه توسط یک کلید اتصال کوتاه و سپس دستگاه اندازه‌گیری را جدا نمود. به‌علاوه جهت حفظ ایمنی یک طرف ثانویه CT ها باید به شبکه زمین متصل شود. گاهی اوقات برای اندازه‌گیری جریان در یک کابل بدون آنکه آن را قطع کنند از آمپرمترهای انبری مطابق شکل (۵۸) استفاده می شود.

شکل ۵۸ــ نمای ظاهری یک آمپرمتر انبری

هسته این ترانسفورماتور به‌طور دو تکه و به شکل انبر ساخته می‌شود چنان که با باز کردن دهانه انبر کابل حامل جریان در داخل هسته قرار می‌گیرد و سپس دهانه انبر بسته می‌شود و آمپرمتری که در مدار ثانویه از داخل متصل شده و روی انبر نصب گردیده است جریان عبوری از کابل را نشان می‌دهد.

۳ــ۱۱ــ۱ــ ترانسفورماتور ولتاژ: به منظور جداسازی مدارهای حفاظتی و اندازه‌گیری از قسمت فشار قوی و تبدیل مقادیر ولتاژ شبکه به مقدار مورد نیاز دستگاه‌های اندازه‌گیری و حفاظتی لازم است از ترانسفورماتورهایی موسوم به ترانسفورماتورهای ولتاژ یا PT استفاده شود. شکل (۵۹) دو نمونه PT رانشان می دهد.

PT یک نوع ترانسفورماتور کاهنده ولتاژ است و در واقع

شکل ۵۹ــ نمای ظاهری ترانسفورماتور ولتاژ PT

تفاوت زیادی بین ساختمان آن و دیگر ترانسفورماتورهای معمولی وجود ندارد ولی چون از دسته ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری است باید دارای دقت بالاتر و تلفات کمتر باشد به‌علاوه چون اختلاف ولتاژ بین سیم‌پیچ اولیه و ثانویه آن غالباً زیاد است،[1] نوع عایق‌بندی در آن اهمیت ویژه‌ای دارد حتی برای اتصال ثانویه PT ها به دستگاه‌های اندازه‌گیری یا حفاظتی از سیم‌هایی با پوشش عایقی ضخیم باید استفاده شود.

ثانویه این ترانسفورماتورها معمولاً با ولتاژهای ۱۰۰v، ۱۲۰v یا ۲۲۰v ساخته می شود. اولیه و ثانویه PT ها برخلاف ترانسفورماتورهای جریان CT باید در برابر جریان اتصال کوتاه محافظت شوند. به همین منظور در اولیه و ثانویه این نوع ترانسفورماتور باید از فیوز استفاده شود.

همچنین جهت حفظ ایمنی یک طرف ثانویه PT ها باید به شبکه زمین متصل شود.

خود را بیازمایید

۱ــ ترانسفورماتور جریان در صنعت برق چه کاربردی دارد؟

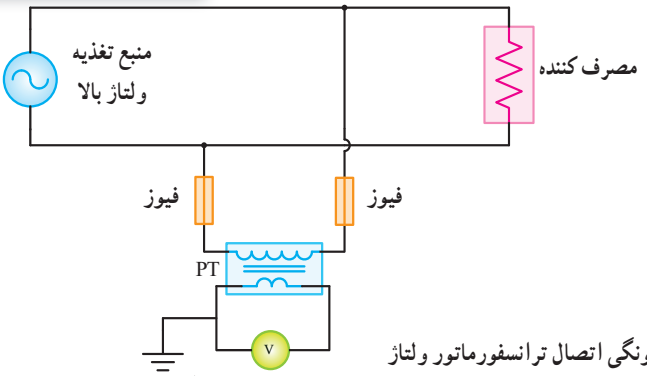
۲ــ ساختمان ترانسفورماتور جریان را شرح داده طریقه نصب آن را در مدار ترسیم نمایید.

۳ــ آیا می‌توان آمپرمتر متصل به ثانویه ترانسفورماتور جریان را هنگام کار باز نمود؟ چرا؟

۴ــ تفاوت PT (ترانسفورماتور ولتاژ اندازه‌گیری) با ترانسفورماتورهای دیگر چیست؟

۵ــ از اولیه یک ترانسفورماتور جریان ۱ / ۱۰۰۰ آمپر، جریان ۷۵۰ آمپر عبور می‌کند. چه جریانی از مدار آمپرمتر عبور می‌کند.

۶ــ ولتاژ اندازه‌گیری شده در ثانویه یک PT، ۲KV/۱۰۰V ۶۵ ولت اندازه‌گیری شده است، ولتاژ شبکه چقدر می‌باشد؟



شکل ۶۰ــ چگونگی اتصال ترانسفورماتور ولتاژ PT در مدار

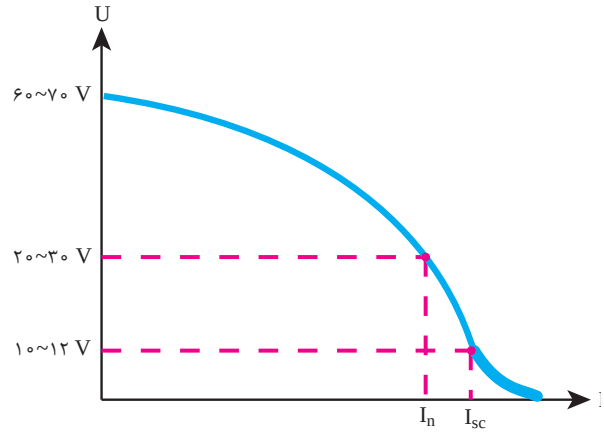
۱ــ ولتاژهای شبکه : ۶ KV، ۲۰KV، ۳۳KV، ۱۳۲KV، ۲۳۰KV و ۴۰۰KV

۴ــ۱۱ــ۱ــ ترانسفورماتور جوشکاری : ترانسفورماتورهای جوشکاری بر حسب نوع و ساختمانشان متنوع هستند. در اینجا ترانسفورماتورهای جوشکاری از نوع قوس الکتریکی مد نظر می‌باشد.

شکل ۶۱ــ نمای ظاهری دستگاه جوش و عملیات جوشکاری

ترانسفورماتور جوشکاری باید مشخصه جریان و ولتاژ خروجی مطابق شکل (۶۲) را دارا باشد. بدین ترتیب که در حالت بی‌باری، ولتاژ حدود ۶۰ تا ۷۰ ولت باشد تا بتواند قوس الکتریکی ایجاد شود همچنین پس از برقراری قوس (چون امپدانس قوس بسیار کم است)، خروجی ترانسفورماتور تقریباً اتصال کوتاه می‌شود و ولتاژ خروجی ترانسفورماتور جوش در حدی است که قوس را در حالت پایدار نگاه دارد.

بنابراین این نوع ترانسفورماتور باید طوری طراحی شود



شکل ۶۲ــ مشخصه جریان و ولتاژ خروجی ترانسفورماتور جوشکاری

که اتصال کوتاه‌های پی در پی باعث آسیب دیدن آن نشود لذا در این ترانسفورماتورها باید امپدانس داخلی در حد قابل توجهی بالا باشد. پس باید ولتاژ اتصال کوتاه نسبی این گونه ترانسفورماتورها بسیار زیاد و نزدیک به صددرصد باشد. برای بالا بردن امپدانس داخلی ترانسفورماتورها یا باید از سیم‌هایی با مقاومت زیاد جهت سیم‌پیچی استفاده کرد که این کار با وجود جریان بالای جوشکاری باعث افزایش تلفات حرارتی در ترانسفورماتور شده و امکان پذیر نیست و راه دیگرایجاد پراکندگی بیشتر میدان است که برای ترانسفورماتور جوشکاری از این راه استفاده می شود. افزایش پراکندگی با در نظر گرفتن یک کوپلینگ ضعیف بین سیم‌پیچ اولیه و ثانویه محقق می‌گردد.

خود را بیازمایید

ــ چرا برای بالا بردن امپدانس داخلی ترانسفورماتور، از سیم‌های با مقاومت الکتریکی بالا استفاده نمی‌شود؟

تحقیق کنید

ــ چه راه‌هایی برای ایجاد کوپلینگ ضعیف در ترانسفورماتورهای جوش وجود دارد؟

ــ آیا راه‌های دیگری برای تأمین جریان جوشکاری می‌شناسید؟

۵ــ۱۱ــ۱ــ اتوترانسفورمر :

کلیات : همه ترانسفورماتورهایی که تا به حال بحث شد دارای دو سیم‌پیچ جدا از هم بودند. نوع دیگری از ترانسفورماتور وجود دارد که فقط شامل یک سیم‌پیچ است. این نوع ترانسفورماتور را اتوترانسفورمر می‌گویند. شکل‌های (۶۳ــ الف و ب) مدار ساده‌ای از یک اتوترانسفورمر کاهنده و افزایندهٔ ولتاژ را نمایش می‌دهند.

مطابق شکل (۶۳) سیم‌پیچ بخش BC بین ورودی و خروجی مشترک است به همین خاطر آن را **سیم‌پیچ مشترک** می‌نامند.

توان الکتریکی ورودی در بخش مشترک سیم‌پیچ، به‌طور مستقیم از منبع تغذیه به بار منتقل می‌شود. این توان را توان الکتریکی هدایت شده توسط سیم‌پیچ به بار می‌گویند.

اگر سیم‌پیچ بخش مشترک (BC) به منبع ولتاژ ورودی متصل شود اتوترانسفورمر باعث افزایش ولتاژ خروجی خواهد شد یعنی اتوترانسفورمر افزایندهٔ ولتاژ می‌شود و بالعکس اگر سیم‌پیچ بخش مشترک (BC) به بار خروجی متصل شود اتوترانسفورمر نقش کاهندگی ولتاژ خروجی را خواهد داشت.

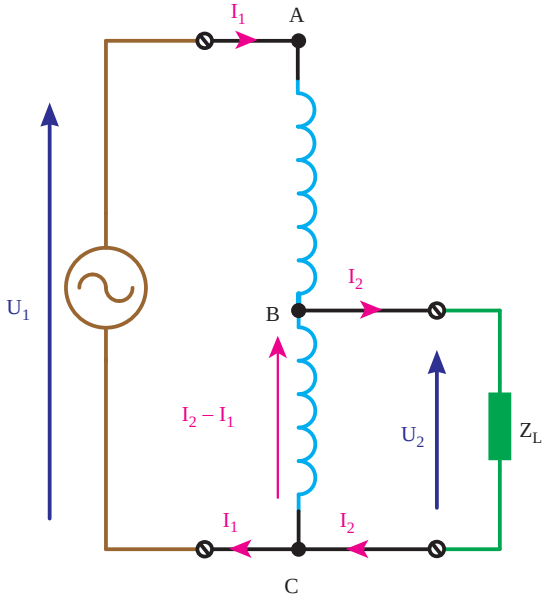
آن بخش از سیم‌پیچ که مطابق شکل (۶۳) بین نقاط A و B قرار گرفته است، **سیم‌پیچ سری** نام گذاری می‌گردد. توان الکتریکی منتقل شده از این بخش سیم‌پیچ به بار مصرفی را **توان تیپ** یا توان انتقالی از طریق هسته می‌نامند. مقدار توان این بخش با توجه به مدار شکل(۶۳ــ الف)، مطابق رابطه (۷۱–۱) می‌باشد.

$$S_B = (U_1 - U_2) \times I_1 \qquad (۱ــ۶۵)$$

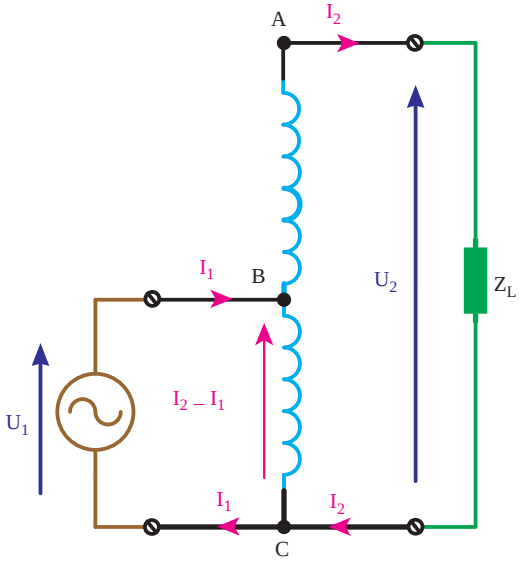
همچنین توان تیپ اتوترانسفورمر شکل(۶۳–ب) از رابطه(۷۲–۱) محاسبه می شود.

$$S_B = (U_2 - U_1) \times I_2 \qquad (۱ــ۶۶)$$

توان تیپ را با S_B نمایش می دهند.



الف) کاهنده



ب) افزاینده

شکل ۶۳ــ مدار یک اتوترانسفورمر کاهنده و افزاینده ولتاژ

تحقیق کنید

صحت رابطهٔ ذیل را تحقیق کنید.

ولتاژ طرف فشار قوی U_H

ولتاژ طرف فشار ضعیف U_L

توان ظاهری اتوترانسفورمر S

توان تیپ S_B

$$S_B = \frac{U_H - U_L}{U_H} S$$

۶ــ۱۱ــ۱ــ مقایسه بین ترانسفورماتور معمولی و اتوترانسفورمر

: در اتوترانسفورمر بین ورودی و خروجی علاوه بر ارتباط مغناطیسی، ارتباط الکتریکی نیز وجود دارد.

۱

نکته ۱

چون بخشی از توان اتوترانسفورمر از طریق هسته و بخش دیگر از طریق هدایت الکتریکی به خروجی منتقل می شود، لذا در شرایط و مشخصات یکسان و در مقایسه با ترانسفورماتور معمولی، تلفات هسته در اتوترانسفورمر کمتر می‌باشد.

نکته ۲

به خاطر استفاده از یک سیم‌پیچ، کوپل مغناطیسی در اتوترانسفورمر خیلی بیشتر از زمانی است که دو سیم‌پیچ به‌طور مجزا از یکدیگر باشند. در نتیجه تلفات پراکندگی نیز در اتوترانسفورمر کاهش می یابد.

نکته ۳

به‌دلیل تفاضل جریان ورودی و خروجی در بخش سیم‌پیچ مشترک، جریان این بخش از سیم‌پیچ کم بوده و در نتیجه تلفات مسی در آن کاهش قابل توجهی دارد.

به‌طور کلی می توان گفت که در اتوترانسفورمر به خاطر تلفات بسیار کم تقریباً راندمان به واحد نزدیک است. بنابراین استفاده از روابط اساسی ترانسفورماتورهای ایده‌آل با تقریب خوبی برای اتوترانسفورمرها جایز است.

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{N_1}{N_2}=\frac{I_2}{I_1}=\frac{1}{K}=a \qquad (۱_۶۷)$$

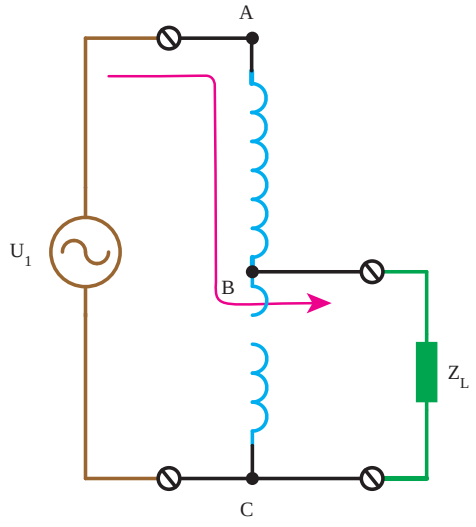
بیشتر بدانید

آیا می‌توانید نشان دهید چرا هر چه نسبت $\frac{\text{تعداد دور سیم‌پیچ بخش مشترک}}{\text{تعداد دور کل سیم‌پیچ}}$ به‌واحد نزدیکتر باشد صرفه‌جویی مصرف سیم در اتوترانسفورمر بیشتر است؟ این نسبت را ضریب صرفه‌ای بودن اتوترانسفورمر می‌گویند.

به همین خاطر در قدرت مشابه و مقادیر ولتاژهای ورودی و خروجی نزدیک به هم، وزن سیم‌پیچ و حجم هسته اتوترانسفورمرها کمتر از ترانسفورماتور معمولی بوده و قیمت آن ارزانتر خواهد شد.

در اتو ترانسفورمر بین مدار سیم‌پیچ اولیه و ثانویه علاوه بر کوپلینگ مغناطیسی اتصال الکتریکی نیز وجود دارد این موضوع سبب می شود که ایجاد عیب (مانند قطعی یا اتصال کوتاه) در هر سمت اتوترانسفورماتور طرف دیگر را تحت تاثیر قرار دهد.

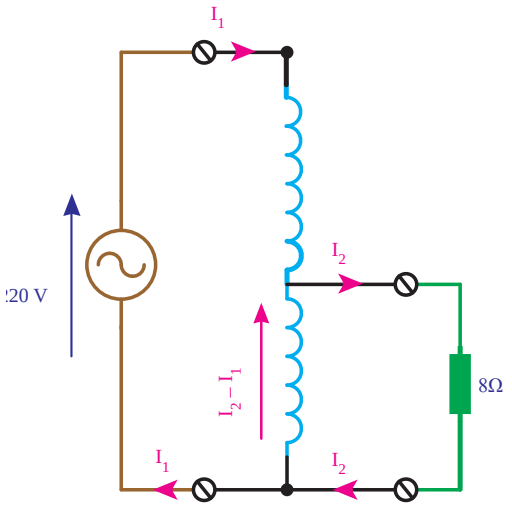
به‌عنوان مثال به مدار شکل (۶۴) دقت کنید. اگر قطعی یا پارگی در سیم‌پیچ مشترک رخ دهد ولتاژ زیاد منبع تغذیه روی بار ظاهر می شود که بسیار خطرناک خواهد بود.



شکل ۶۴ ــ پارگی سیم‌پیچ بخش مشترک

همچنین به‌دلیل ارتباط الکتریکی دو طرف اتوترانسفورمر، از این ترانسفورماتور به‌عنوان ترانسفورماتور ایزوله نمی‌توان استفاده نمود.

مثال یک اتوترانسفورماتور مطابق شکل ۶۵ زیر با ولتاژ ورودی ۲۲۰V، ولتاژ ۱۶۰V را برای یک مقاومت ۸Ω در سمت دیگر مهیا می‌کند. اگر تعداد دور کل حلقه‌ها ۳۰۰ دور باشد. مطلوب است :



شکل ۶۵

الف)تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ مشترک

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{220}{160}=\frac{300}{N_2}\Rightarrow N_2=\frac{160\times300}{220}\approx218$$

ب) جریان بار $I_2=\frac{U_2}{R_2}=\frac{160}{8}=20A$

ج) جریان بخش سیم‌پیچ مشترک

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{I_2}{I_1}\Rightarrow\frac{220}{160}=\frac{20}{I_1}\Rightarrow I_1=\frac{160\times20}{220}\approx14/5A$$

جریان بخش مشترک $=I_2-I_1=20-14/5=5/5A$

د) توان الکتریکی منتقل شده توسط هسته (توان تیپ)

$$S_B=(U_1-U_2)\times I_1=(220-160)\times14/5=870VA$$

موارد کاربرد: یکی از مهمترین کاربردهای اتو ترانسفورمر استفاده از آن برای راه‌اندازی موتورهای سه فازه القایی است که در فصل ۳ به تفصیل تشریح خواهد شد. همچنین در شبکه‌های انتقال برق و برای جبران افت ولتاژ خطوط انتقال از اتوترانسفورماتور استفاده می‌شود.

در آزمایشگاه‌های برق نیز برای ایجاد یک منبع AC با ولتاژ خروجی متغیر از اتوترانسفورمر متغیر استفاده می‌شود. نام تجاری این نوع اتوترانسفورمرها واریاک می‌باشد.

رفتار این نوع اتوترانسفورمر بسیار شبیه پتانسیومتر در مدار است. یعنی می‌توان با آن ولتاژ متغیری در خروجی داشت. البته پتانسیومتر با عمل تقسیم ولتاژ، ولتاژ مورد نظر را برای مصرف‌کننده مهیا می‌کند. اما تفاوت های اساسی بین اتوترانسفورمر و پتانسیومتر وجود دارد که آنها را ازهم متمایز می‌سازد که موارد زیر از آن جمله می‌باشند :

- در پتانسیومتر قدرت الکتریکی تنها از راه هدایت الکتریکی به بار انتقال می یابد در صورتی که در اتوترانسفورمر علاوه بر انتقال قدرت از طریق هدایت الکتریکی بخش دیگر از طریق کوپلینگ مغناطیسی و نیروی محرکه الکتریکی تولیدی در سیم‌پیچ منتقل می‌شود.
- با اتوترانسفورمر افزاینده می‌توان ولتاژی بالاتر از ولتاژ منبع تولید کرد در صورتی که پتانسیومتر حداکثر می تواند ولتاژ اعمال شده به ورودی را به خروجی تحویل دهد.
- در پتانسیومتر جریان ورودی همواره بیش از جریان خروجی است در حالی که در اتو ترانسفورمر کاهنده مقدار جریان سمت خروجی از ورودی بیشتر است.
- پتانسیومتر هم در جریان مستقیم و هم در جریان متناوب عمل می‌کند ولی اتو ترانسفورمر فقط در جریان متناوب قابل استفاده است.

شکل ۶۶ شمای مداری یک اتوترانسفورمر متغیر (واریاک) راکه دارای یک هسته مشترک چنبره‌ای می‌باشد نشان می دهد. با لغزش جاروبک زغالی روی محیط هسته و اتصال آن با سیم‌پیچ توسط یک دسته متحرک ولتاژ خروجی اتوترانسفورمر تغییر می‌کند.

شکل۶۶ــ نمای ظاهری و شماتیک اتوترانسفورمر متغیر (واریاک)

پرسش‌های پایان فصل(۱)

۱) اجزای اصلی یک ترانسفورماتور را نام برده و وظیفه هر یک را بنویسید.

۲) ورودی یک ترانسفورماتور به منبع ولتاژ مستقیم متصل شده است، خروجی آن چند ولت است؟چرا؟

۳) عوامل مؤثر در مقدار ولتاژ القایی ثانویه ترانسفورماتور را بیان کنید.

۴) ویژگی‌های یک ترانسفورماتور ایده‌آل را نام ببرید.

۵) محل نقطه کار ترانسفورماتورهای قدرت و اندازه‌گیری را روی منحنی اشباع نشان دهید و آن را تحلیل کنید.

۶) چگونه جریان اولیه با افزایش بار ترانسفورماتور بیشتر می‌شود؟

۷) در چه شرایطی از جریان بی‌باری در برابر جریان واقعی ترانسفورماتور صرف‌نظر می‌شود؟

۸) هر چه تلفات هسته بیشتر باشد مقدار مقاومت الکتریکی مدل شده برای آن.....(کمتر ــ بیشتر) است.

۹) مدار معادل ترانسفورماتوری را ترسیم کنید که از تلفات هسته آن صرفنظر شده باشد.

۱۰) منظور از شار پراکندگی چیست؟

۱۱) چرا افزایش ولتاژ ورودی ترانسفورماتور بیش از حد نامی مجاز نیست؟

۱۲) دیاگرام برداری ترانسفورماتور با بار اهمی ــ سلفی را از دیدگاه اولیه رسم کنید.

۱۳) آیا امکان دارد در ترانسفورماتور زیر بار، $U'_2=U_1$ گردد؟(کدام نوع بار؟)

۱۴) تلفات هیسترزیس یک ترانسفورماتور به چه عواملی بستگی دارد؟

۱۵) ایجاد امپدانس داخلی مناسب در ترانسفورماتور جوشکاری چگونه انجام می‌شود؟

۱۶) تفاوت‌های عمده اتوترانسفورمر و پتانسیومتر را بنویسید.

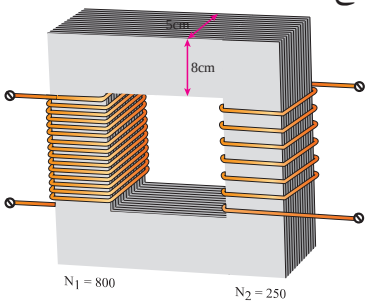
۱۷) دو عیب مهم اتوترانسفورمر را نسبت به ترانسفورماتور معمولی، بنویسید.

۱۸) کاربردهای اتوترانسفورمر را بیان کنید.

مسائل پایان فصل(۱)

۱) نیروی محرکه مغناطیسی بوبینی با ۵۰۰ دور سیم‌پیچ که از آن جریان ۲ آمپر عبور می‌کند چقدر است؟

۲) ترانسفورماتوری طبق شکل زیر در شبکه ۵۰HZ دارای هسته‌ای با چگالی شار ۱/۲۵ T می‌باشد. ولتاژ القایی در سیم‌پیچ اولیه وثانویه را به‌دست آورید.

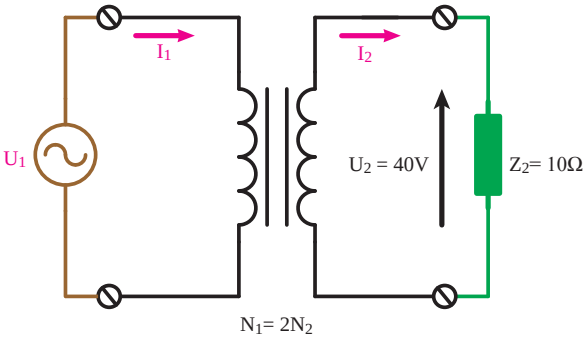


۳) یک ترانسفورماتور با ضریب تبدیل a= ۸ دارای ۲۰۰۰ دور سیم‌پیچ در اولیه می‌باشد. تعداد دور ثانویه چقدر است؟

۴) مقاومت بار ۰/۰۴ اهم در ترانسفورماتور با ضریب تبدیل a=۱۰ در سمت اولیه چقدر دیده می‌شود؟

۵) نسبت تبدیل و عکس نسبت تبدیل یک ترانسفورماتوری که دارای ۱۰۰۰ دور سیم‌پیچ اولیه و ۲۰۰ دور سیم‌پیچ ثانویه می‌باشد را محاسبه کنید.

۶) ترانسفورماتور ایده‌آل مطابق شکل زیر موجود است :



الف) ولتاژ U_1

ب) جریان I_1

ج) امپدانس انتقالی به اولیه

۷) نتایج به‌دست آمده از آزمایش بی‌باری و اتصال کوتاه مطابق ذیل می‌باشد :

در آزمایش اتصال کوتاه مقادیر وات متر= ۸۰w

ولت متر= ۴۰ V

آمپرمتر = ۲۰A

و در آزمایش بی‌باری مقادیر وات متر= ۸۰ W

ولت متر=۴۰۰ V

آمپرمتر= ۲ A مطلوب است :

الف) مقادیر تلفات آهنی ــ تلفات مسی نامی ــ جریان بی‌باری ــ جریان نامی ــ درصد ولتاژ اتصال کوتاه ــ جریان اتصال کوتاه دائم

ب) مدار معادل و مقادیر المان‌های موازی ترانسفورماتور

ج) مدار معادل و مقادیر المان‌های سری به شرطی که $R_1 = R'_2$ ، $X_1 = 3X'_2$.

د) مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با ذکر مقادیر

ه) مدار معادل ترانسفورماتور با احتساب تقریب اول، دوم و سوم

۸) در یک ترانسفورماتور واقعی۱۰۰۰V/۱۰۰V، مقاومت معادل تلفات هسته ۲KΩ و راکتانس میدان اصلی ۱۰۰۰Ω می‌باشد.جریان بی‌باری و تلفات هسته را با احتساب تقریب اول به‌دست آورید.

۹)یک ترانسفورماتور در بار نامی دارای افت ولتاژ اهمی ۲۵ ولت و افت ولتاژ القایی ۴۰ولت و ولتاژ نامی ۲۰۰ولت می‌باشد. ولتاژ دو سر بار را از دیدگاه اول در حالات خواسته شده به‌دست آورید :

الف) بار اهمی خالص

ب) بار پیش فاز با ضریب قدرت ۰/۸

پ) بار سلفی خالص

۱۰) جریان اتصال کوتاه دائم یک ترانسفورماتور با

جریان نامی ۵ آمپر و ولتاژ اتصال کوتاه نسبی ۲۵ درصد را بدست آورید.

۱۱) تلفات مسی یک ترانسفورماتور با توان نامی ۱۰ KVA برابر با ۸۰۰ وات است. تلفات مسی آن را در ۰/۷۵ بار نامی به دست آورید.

۱۲) یک ترانسفورماتورKVA ۵ در آزمایش بی‌باری۲۵۰ وات و و در آزمایش اتصال کوتاه ۴۰۰ وات، توان از شبکه دریافت می‌کند راندمان این ترانسفورماتور را در بارهای زیر محاسبه کنید.

الف) بار نامی اهمی خالص

ب)۵۰٪ بار نامی با ضریب قدرت ۰/۷

ج) راندمان ماکزیمم در باری با ضریب قدرت ۰/۸

۱۳) یک ترانسفورماتورKVA۸ در آزمایش بی‌باری ۳۰۰ وات و در آزمایش اتصال کوتاه ۵۰۰ وات توان از شبکه دریافت می‌کند. به‌دست آورید :

الف) ضریب بار در ضریب قدرت یک که در آن راندمان ماکزیمم می‌شود

ب) راندمان ماکزیمم در ضریب قدرت یک

۱۴) ورودی یک اتوترانسفورمر به ولتاژ ۴۰۰ ولت و خروجی آن با ولتاژ ۷۵۰ ولت به باری با امپدانس Ω ۷۵ وصل است به شرطی که تعداد حلقه های سیم‌پیچی کل آن ۱۵۰۰ دور باشد. مطلوب است :

الف) تعداد حلقه های سیم‌پیچ مشترک

ب) جریان بار

ج) جریان عبوری از سیم‌پیچ مشترک

د) توان تیپ

۱۵) اتوترانسفورمری که ۴۰۰ دور سیم‌پیچ مشترک آن به شبکه ۴۰۰ ولتی متصل است، جریان ۵ آمپر را به بار الکتریکی تحت ولتاژ۸۰۰ ولت می‌دهد. جریان سیم‌پیچ مشترک و توان تیپ راحساب کنید.

۲

ترانسفورماتورهای سه فاز

هدف‌های رفتاری :

ـ ترانسفورمر سه فاز را تعریف کند.
ـ ترانسفورمر سه فاز را با یک فاز مقایسه کند.
ـ علت استفاده از ترانسفورمرهای سه فاز را شرح دهید.
ـ ساختمان ظاهری و داخلی ترانسفورمرهای سه فاز تا ۲۰KV را توضیح دهد.
ـ طرز کار ترانسفورمر سه فاز را توضیح دهد.
ـ اتصال ستاره در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور را با رسم شکل تعریف کند.
ـ کاربرد اتصال ستاره را توضیح دهد.
ـ اتصال مثلث در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور را با رسم شکل تعریف کند.
ـ کاربرد اتصال مثلث را توضیح دهد.
ـ اتصال زیگزاگ در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور را با رسم شکل تعریف کند.
ـ کاربرد اتصال زیگزاگ را توضیح دهد.
ـ انواع اتصالات (λ-λ، Δ-λ، ζ-λ) را شرح دهد.
ـ کاربرد هر یک از اتصالات (λ-λ، Δ-λ، ζ-λ) را بیان کند.
ـ چگونگی تنظیم ولتاژ در ترانسفورمرهای سه فاز را شرح دهد.
ـ ترانسفورمرهای سه فاز با اتصال V را شرح دهد.
ـ حفاظت در ترانسفورمر را تعریف کند.
ـ انواع حفاظت در ترانسفورمر را نام ببرد.
ـ عدد گروه در ترانسفورمر را تعریف کند.
ـ انواع گروه‌های ترانسفورمر را نام ببرد.
ـ شرایط موازی کردن ترانسفورمرهای سه فاز را توضیح دهد.
ـ تقسیم بار بین دو ترانسفورمر موازی را تعریف کند.
ـ چگونگی تقسیم بار بین دو ترانسفورمر را شرح دهد.
ـ مثال مربوط به چگونگی تقسیم بار بین دو ترانسفورمر موازی را تشریح کند.
ـ تمرین مربوط به چگونگی تقسیم بار بین دو ترانسفورمر موازی را حل کند.
ـ تلفات در ترانسفورمرهای سه فاز را تعریف کند.
ـ راندمان و روابط مربوط در ترانسفورمرهای سه فاز را توضیح دهد.
ـ مثال مربوط به محاسبه راندمان در ترانسفورمرهای سه فاز را تشریح کند.
ـ تمرین مربوطه به محاسبه راندمان در ترانسفورمرهای سه فاز را حل کند.
ـ کاربردهایی از ترانسفورمرهای سه فاز را بیان کند.
ـ مشخصات ترانسفورمرهای سه فاز را از روی پلاک استخراج کند.
ـ تمرین‌های مربوط به ترانسفورمرهای سه فاز را حل کند.

۲

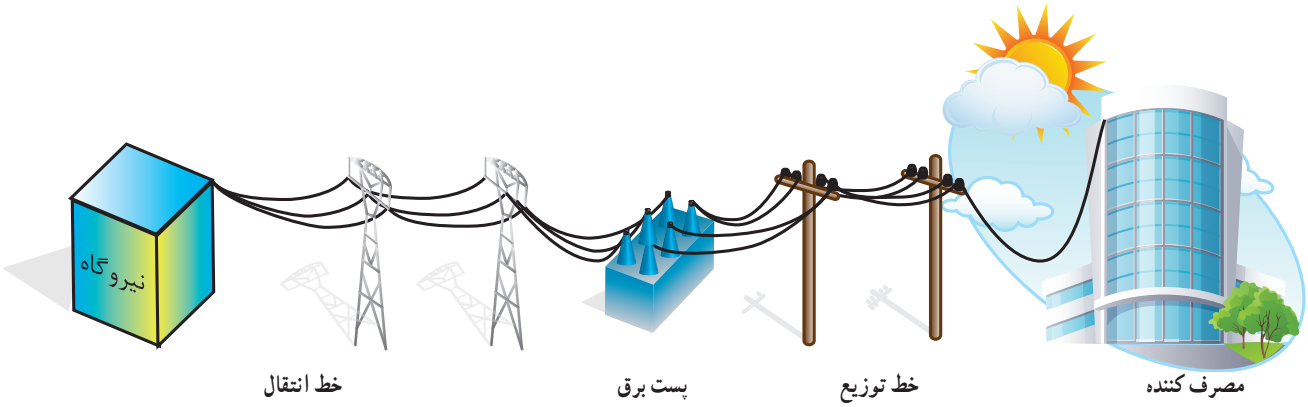
مقدمه

نیروگاه‌ها انرژی الکتریکی را از تبدیل سایر انرژی‌ها به‌دست می‌آورند. از طرفی به لحاظ زیست محیطی و دسترسی به انرژی، احداث آنها در داخل شهر امکان پذیر نیست. از سوی دیگر چون اغلب مصرف کننده‌ها در شهر و حومهٔ آنها متمرکز می‌باشند در نتیجه فاصله بین نیروگاه‌ها و مصرف کننده‌های برق غالباً طولانی است. بنابراین اگر بخواهیم برق تولید شده را با ولتاژ مورد نیاز مصرف‌کننده انتقال دهیم سهم زیادی از انرژی الکتریکی در خطوط انتقال به حرارت تبدیل می‌شود.

شکل ۱ــ نمایی از یک سد و نیروگاه آبی که در کنار آن قرار دارد[1].

شکل ۲ــ نمایی از یک نیروگاه گازی[2]

ترانسفورماتورها می‌توانند با افزایش سطح ولتاژ و کاهش جریان با کمترین تلفات ممکن انرژی الکتریکی را از محل تولید که گاهی هزاران کیلومتر دورتر می‌باشد تا نقاط مصرف، برسانند این تغییر ولتاژ در محلی به‌نام پست برق صورت می‌گیرد. شکل(۳) طرح واره‌ای از مراحل تولید، انتقال و مصرف انرژی الکتریکی را نشان می‌دهد.



شکل ۳ــ طرح وارهٔ کلی از تولید، انتقال و توزیع برق

۱ــ استفاده از انرژی این آب برای تولید برق فقط در نقاط بلند کوهستانی و دره‌های اطراف آن امکان‌پذیر است.

۲ــ این نوع نیروگاه‌ها به‌دلیل ایجاد آلودگی ، در داخل شهرها ساخته نمی‌شوند.

نیروگاه‌ها برای تولید انرژی الکتریکی از ژنراتورهای سه‌فاز استفاده می‌کنند که ولتاژ خروجی آنها به‌صورت سه فاز می‌باشد و بسته به میزان قدرتشان دارای سطح ولتاژی از KV ۳ تا KV ۲۱ و در موارد خاص این ولتاژ تا KV ۳۰ نیز می‌رسد. سپس در شبکه‌های انتقال برق به کمک ترانسفورماتور و در چند مرحله، این ولتاژ به ولتاژ هایی نظیر KV ۶۳، KV ۱۳۲، KV ۲۳۰، KV ۴۰۰ و حتی در بعضی از کشورها تا KV ۷۵۰ یا KV ۱۰۰۰ نیز تبدیل می‌شوند. در محل مصرف، مجدداً مقدار ولتاژ در چند مرحله توسط ترانسفورماتور به میزان مناسب کاسته می‌شود و به این ترتیب شرایط استفاده از انرژی الکتریکی تولید شده برای مصرف کننده‌ها را فراهم می‌کند. شکل (۴) انواع پست‌های برق را نشان می‌دهد.

الف) پست فوق توزیع

ب) پست انتقال

ج) پست توزیع صنعتی

هـ) پست توزیع هوایی

د) پست توزیع زمینی

شکل ۴ــ انواع پست برق

در شبکه برق ایران سطوح ولتاژی مختلفی تعریف شده است.

این سطوح ولتاژ عبارتند از :

ــ سطح ولتاژ سراسری

ــ سطح ولتاژ فوق توزیع

ــ سطح ولتاژ توزیع

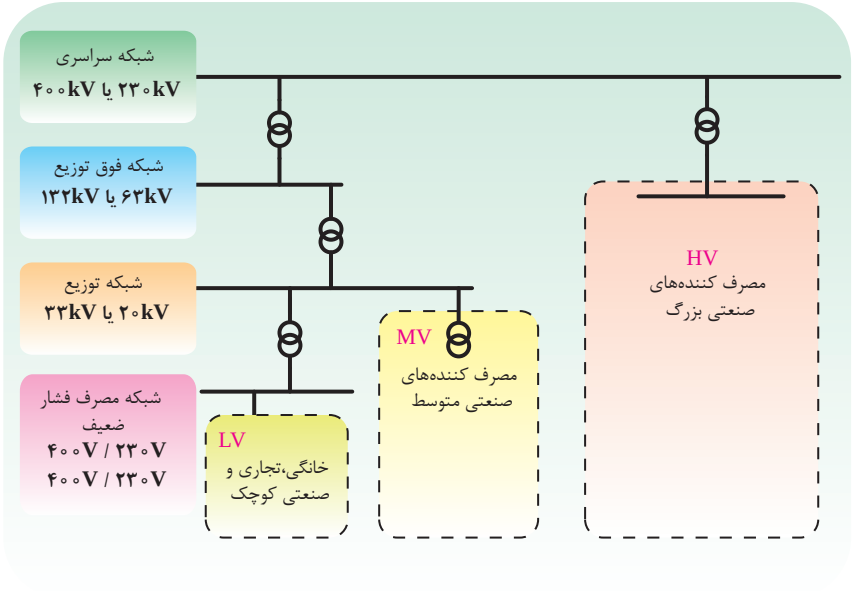
ــ سطح ولتاژ مصرف یا فشار ضعیف

برق تولیدی نیروگاه‌ها باید توسط ترانسفورماتور به شبکه سراسری متصل شود. این شبکه، برق را به تمام مناطق کشور می‌رساند سپس با توجه به نیاز هر مصرف کننده مطابق شکل (۵) از سطح ولتاژ خاصی انشعاب گرفته می‌شود.

به ترانسفورماتوری که سطح ولتاژ MV (فشار متوسط KV ۲۰) را به سطح ولتاژ LV (فشار ضعیف V ۴۰۰ یا V ۳۸۰) تبدیل می‌کند، ترانسفورماتور توزیع گفته می‌شود. در این فصل سعی شده بیشتر به توضیح در مورد این نوع ترانسفورماتور پرداخته شود.

ترانسفورماتورهای توزیع از نوع کاهنده بوده و جهت تأمین مصارف صنایع کوچک، تجاری و خانگی استفاده می‌شوند. میزان ولتاژ مصرف در این شبکه به‌صورت سه فاز V ۴۰۰ و یا تک‌فاز V ۲۳۰ می‌باشد.

تنوع سطوح ولتاژ هم در تولید، انتقال و مصرف وجود دارد. انتخاب هر یک از این ولتاژها بر اساس مطالعاتی صورت گرفته که به لحاظ اقتصادی کمترین هزینه را در پی داشته باشد.



شکل ۵ــ چگونگی توزیع انرژی برق

خود را بیازمایید

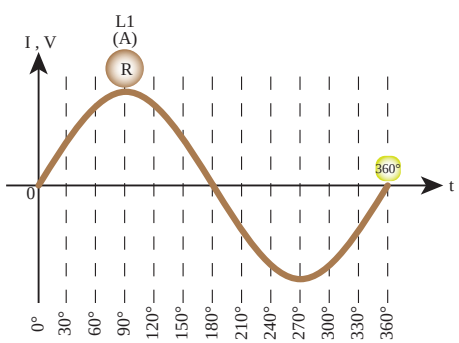
۱ــ وظیفه ترانسفورماتور در شبکه برق چیست؟

۲ــ ولتاژ خروجی مولدهای نیروگاهی معمولاً در چه سطحی است؟

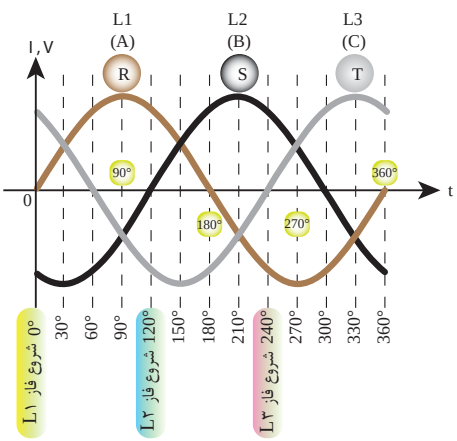
۱ــ۲ــ دلیل استفاده از ترانسفورماتور سه فاز

در سیستم سه فاز، سه ولتاژ در اختیار می‌باشد، که دامنهٔ آنها با هم یکسان ولی از نظر مکانی هر یک با دیگری ۱۲۰° اختلاف فاز دارند.

شکل (۶) مقایسه‌ای کلی بین شکل موج ولتاژ سیستم تک‌فاز با سیستم سه فاز را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود مقدار لحظه‌ای ولتاژ در سیستم تک‌فاز لحظاتی به صفر می‌رسد ولی در شبکه‌های سه فاز اینگونه نیست. لذا در زمان صفر شدن ولتاژ لحظه‌ای شبکه‌های تک‌فاز، توان صفر می‌شود اما در شبکه‌های سه فاز هیچ‌گاه توان لحظه‌ای به صفر نمی‌رسد. از این جهت، استفاده از سیستم سه فاز در شبکه‌های تولید، انتقال و مصرف اقتصادی می‌باشد. بنابراین با توجه به سه فاز بودن شبکه برق لازم است ترانسفورماتور نیز به‌صورت سه‌فاز طراحی شود تا قابلیت اتصال به این شبکه را دارا باشد.



ب) سیستم تک‌فاز



الف) سیستم سه فاز

شکل ۶ــ نمایش ولتاژ وجریان سیستم‌های سه فاز و تک‌فاز

خود را بیازمایید

۱ــ برتری سیستم سه فاز الکتریکی نسبت به تک فاز را توضیح دهید.

۲ــ۲ــ ساختمان ترانسفورماتور سه فاز از نقطه‌نظر مغناطیسی و الکتریکی

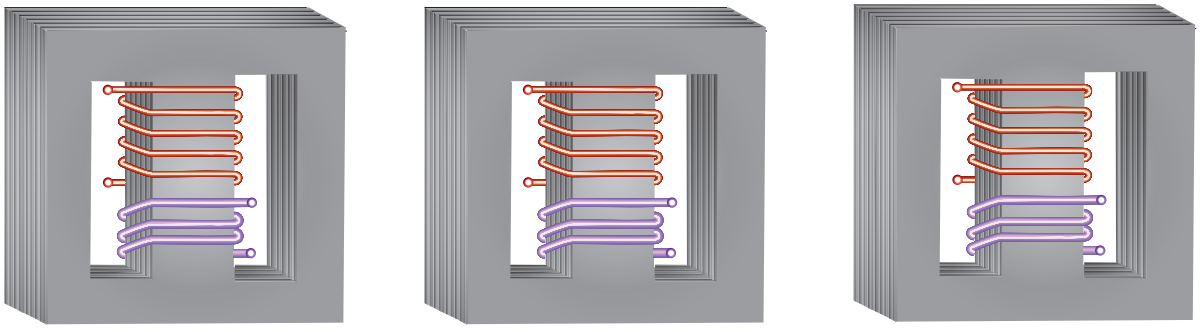
اجزای اصلی ترانسفورماتور سه فاز نیز همان هسته و سیم‌پیچ می‌باشند.

۱ــ۲ــ۲ــ هسته : در ترانسفورماتورهای سه فاز نیز مانند ترانسفورماتور تک‌فاز جهت عبور شار مغناطیسی و انتقال انرژی الکتریکی از یک سمت به سمت دیگر باید از هسته آهنی استفاده شود.

ترانسفورماتورهای سه فاز را با توجه به نوع هسته به دو دسته مجزا و یکپارچه تقسیم می‌کنند.

۱ــ۲ــ۲ــ الف ــ هسته‌های مجزا : ساده‌ترین راه ایجاد ترانسفورماتور سه فاز استفاده از سه ترانسفورماتور مشابه تک‌فاز است. این سیستم را بانک ترانسفورماتور سه فاز نیز می‌نامند. بنابراین هسته های هر فاز مجزا از یکدیگر می‌باشند و مدار مغناطیسی جدا از هم دارند.

مطابق شکل (۷) سه ترانسفورماتور تک‌فاز کنار هم قرار می‌گیرند و ورودی و خروجی آنها با یکی از اتصالات سه فاز سربندی می‌شوند. بدین ترتیب سه بوبین اولیه به فازهای L_1، L_2، L_3 به شبکه وصل می‌شوند. چون هسته مغناطیسی هر فاز مجزا است. بنابراین جریان‌های مغناطیس‌کننده هر فاز در هسته مربوط به خود، فورانی متناظر با همان جریان ایجاد می‌نماید. به عبارتی در هسته اول φ_A، در هسته دوم φ_B، و در هسته سوم، φ_C گردش می‌کند به همین دلیل این ترانسفورماتورها به ترانسفورماتور با هسته مجزا یا بانک معروف هستند.

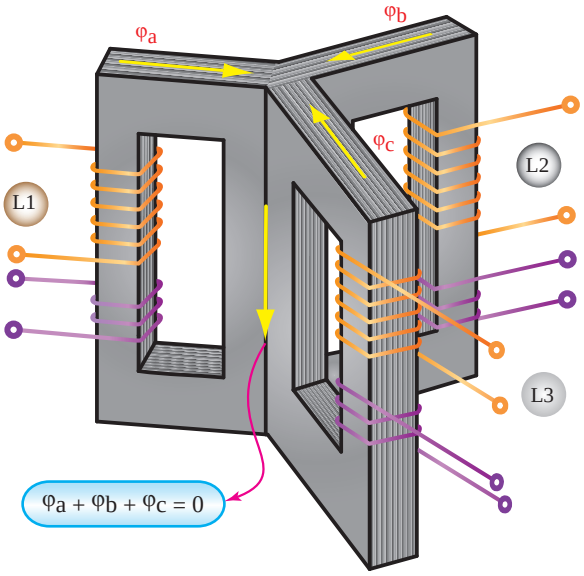


شکل ۷ــ ترانسفورماتور سه فاز با هسته های مجزا

در گذشته این نوع ترانسفورماتورها در شبکه‌های توزیع استفاده می‌شد. در این ترکیب معمولاً در کنار سه ترانسفورماتور، یک دستگاه ترانسفورماتور اضافی نیز به‌عنوان یدکی قرار می‌گیرد تا در زمان خرابی از آن استفاده شود.

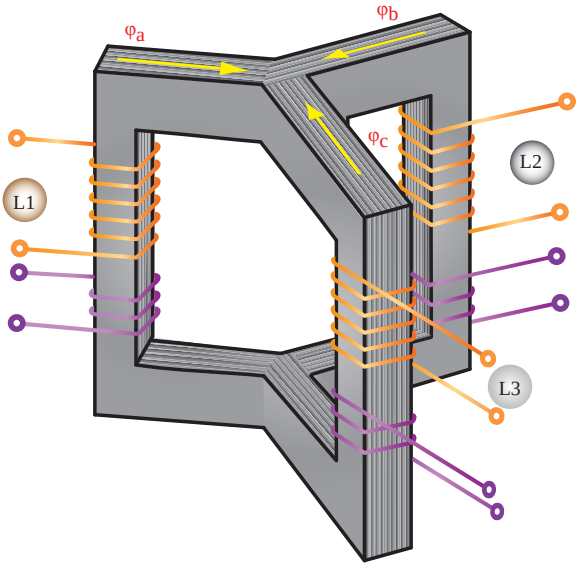
در حال حاضر به‌دلیل بالا رفتن تکنولوژی عایق‌بندی و دستیابی به عایق‌های خوب و به دلایلی که اشاره خواهد شد از این ترکیب به‌ندرت استفاده می‌شود.

اگر هسته‌های آهنی سه ترانسفورماتور تک‌فاز مطابق شکل (۸) در کنار هم قرار داده شوند. شارهای مغناطیسی جاری شده در هر بازو φ_A، φ_B و φ_C (مربوط به فاز مستقل) از بازوی مشترک نیز عبور می‌کنند.



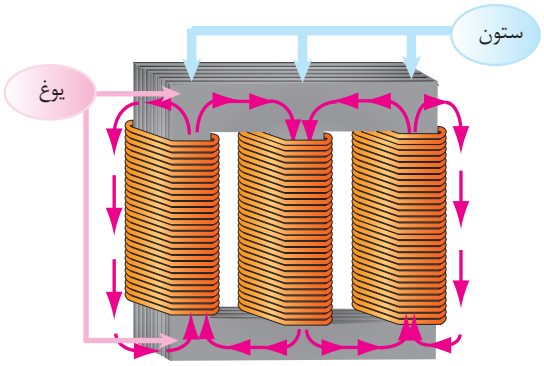
شکل ۸ــ هسته ترانسفورماتور سه فاز با ستون مشترک بهم چسبیده

اما همان‌طور که مجموع جریان‌های سه فاز با دامنه مساوی متعادل برابر صفر است[1]، مجموع شارهای مغناطیسی سه‌فاز که از بازوی وسط هسته می‌گذرند نیز صفر می‌شود؛ بنابراین می‌توان از بازوی وسط هسته صرف‌نظر و آن را حذف نمود. به این ترتیب هسته ترانسفورماتور را می‌توان به‌صورت یکپارچه مطابق شکل (۹) ساخت.



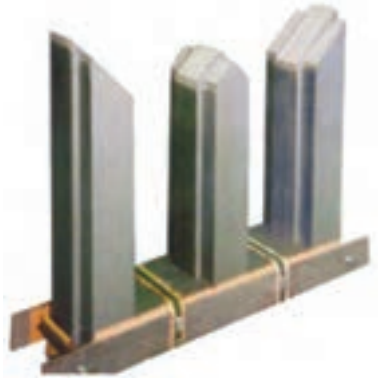
شکل ۹ــ هسته ترانسفورماتور سه فاز یکپارچه ابتدایی

۱ــ۲ــ۲ــ ب ــ هسته‌های یکپارچه : در عمل، ترانسفورماتورهای سه فاز با هسته یکپارچه به‌صورت شکل (۱۰) ساخته می‌شوند :



شکل ۱۰ــ هسته یکپارچه

در این ترکیب هسته از سه ستون تشکیل شده و سیم‌پیچ‌ها در آن قرار می‌گیرند، سپس دو یوغ طرفین آن را مهار می‌کنند. بنابراین هر سیم‌پیچ روی یک ستون قرار می‌گیرد. به این نوع هسته، **هسته ستونی** می‌گویند.



شکل ۱۱ــ هسته ستونی

۱ــ مجموع سه بردار مساوی با اختلاف سه‌فاز ۱۲۰ صفر می‌شود.

در شکل(۱۱) یک نمونه هسته ستونی که یوغ بالای آن هنوز قرار داده نشده است مشاهده می‌شود.

مزایا و معایب ترانسفورماتورهای سه فاز با مدار مغناطیسی پیوسته نسبت به سه ترانسفورماتور تک‌فاز مشابه که به‌صورت سه فاز سربندی و در یک قدرت یکسان استفاده می‌شوند عبارتند از :

مزایا :

- در ترانسفورماتور سه فاز یکپارچه از آهن کمتری استفاده شده است.
- وزن آن سبک‌تر و حجم آن کوچک‌تر است.
- قیمت تمام شده آن کمتر است.
- راندمان بیشتری دارد.
- در عمل به سیم‌پیچ، اتصالات و عایق‌بندی کمتری نیاز دارد (با دانش فنی امروز)

معایب :

- هزینه نگهداری و تعمیر آن بیشتر است.
- با ایجاد اشکال حتی در یکفاز ترانسفورماتور باید کل ترانسفورماتور از مدار خارج و جهت تعمیر آن اقدام شود. در صورتی‌که اگر از سه ترانسفورماتور تک‌فاز استفاده شده‌بود به‌راحتی فقط ترانسفورماتور معیوب از مدار خارج می‌شد و ترانسفورماتور ذخیره که قبلاً به آن اشاره شد جای آن را می‌گرفت.

خود را بیازمایید

۱ــ چرا در ترانسفورماتور با هسته یکپارچه از بازوی مشترک می‌توان صرف‌نظر کرد؟

۲ــ ترانسفورماتورهای سه فاز با هسته یکپارچه را نسبت به ترانسفورماتور با هسته مجزا مقایسه کنید.

۲ــ۲ــ۲ــ چیدمان هسته : هسته ترانسفورماتورهای سه فاز نیز مانند ترانسفورماتورهای تک‌فاز از ورق‌های مغناطیس تشکیل شده است. شکل(۱۲) یک قرقره ورق مغناطیسی آماده برشکاری در خط تولید ورق هسته را نشان می‌دهد.

شکل ۱۲ــ قرقره ورق مغناطیسی در خط تولید ورق هسته

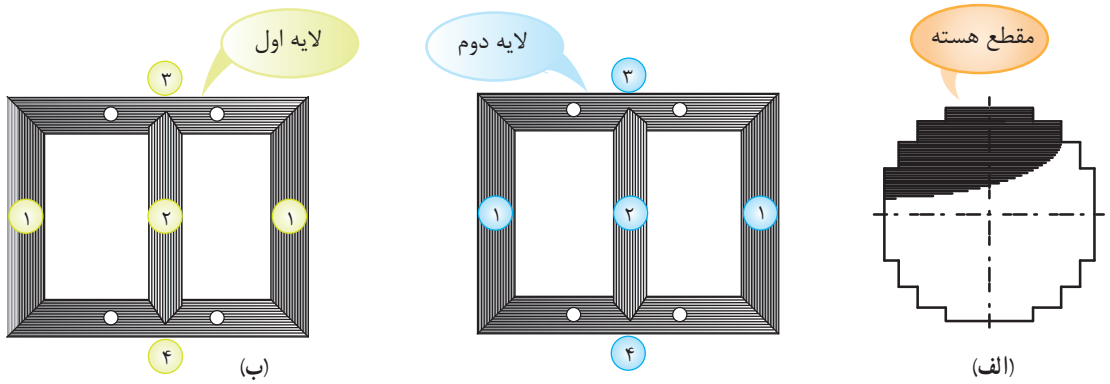
برای تولید هسته، قرقره های ورق فولاد مغناطیسی را با اندازه مناسب در جهت نورد شده برش زده و طوری آن را کنار هم قرار می‌دهند که شار مغناطیسی همیشه در راستای نورد شده از آن عبور کند زیرا در این صورت مقاومت مغناطیسی هسته کمتر خواهد شد. برای راحتی کار در هنگام جا زدن بوبین‌هاو پرکردن فضای داخل بوبین و کاهش حجم ترانسفورماتور، پهنای ورقه‌ها را مانند شکل (۱۳ــ الف) متفاوت درست می‌کنند تا سطح مقطع هسته به‌صورت پله‌ای به شکل دایره نزدیک‌تر شود. به این ترتیب حجمی از یک هسته کامل ایجاد می‌شود.

برای محکم شدن ورقه‌ها روی یکدیگر مطابق شکل(۱۳ــ ب) سه قطعه ورق ۲، ۳ و ۴ را در هر لایه برعکس می‌گذارند و در نهایت این ورقه‌ها را با عبور پرچ‌های عایق شده از داخل سوراخ‌های هسته محکم می‌کنند.

خود را بیازمایید

۱ــ چرا در ترانسفورماتورهای سه فاز پهنای ورقه‌های یک بازو متفاوت است؟

۲ــ چرا در ترانسفورماتورها ورقه‌های هسته را در راستای نورد شده بریده و کنار هم قرار می‌دهند؟



شکل ۱۳ــ چگونگی قرارگیری هسته ها روی یکدیگر

۳ــ۲ــ۲ــ سیم پیچ : در ترانسفورماتورهای توزیع درصد ولتاژ اتصال کوتاه باید حتی‌الامکان کوچک باشد. جدول (۱) مقادیر درصد ولتاژ اتصال کوتاه را برای ترانسفورماتورهای توزیع نشان می دهد. در عمل برای کاهش ولتاژ اتصال کوتاه سیم‌پیچ‌های فشار قوی و ضعیف را روی یک بازو یا ستون می‌پیچند تا شار پراکندگی کمتر شود. از آنجا که ولتاژ فشار ضعیف نسبت به فشار قوی پتانسیل کمتری تا زمین دارد از نظر عایقی بهتر است ابتدا سیم‌پیچ فشار ضعیف را روی هسته بپیچند و سپس سیم پیچ فشار قوی را روی آن قرار دهند.

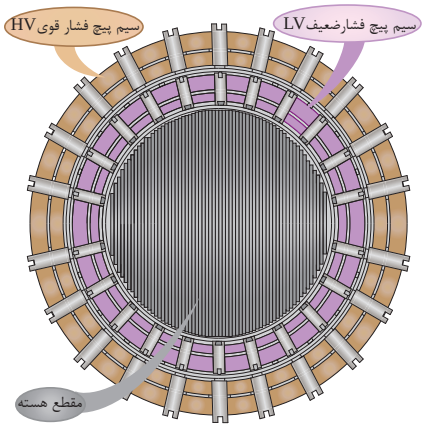
سیم‌های استفاده شده برای سیم‌پیچ دارای سطح مقطع گرد یا چهار گوش بوده و با عایق لاکی پوشیده می‌شوند. دور هر لایه از سیم‌پیچ کاغذهای آغشته به روغن مخصوص پیچیده می‌شود همچنین برای عایق کاری بین سیم‌پیچ‌ها از چوب طبیعی و مصنوعی نیز استفاده می‌گردد (شکل ۱۴).

خود را بیازمایید

ــ اگر در یک ترانسفورماتور سه فاز سیم‌پیچ فشار ضعیف و سیم‌پیچ فشارقوی روی یک بازو پیچیده شود ولتاژ اتصال کوتاه آن..... و ولتاژ اتصال کوتاه آن..... می‌یابد.(افزایش ــ کاهش)

جدول ۱ــ مقادیر تلفات بی باری (آهنی)، بارداری (مسی) و ولتاژ اتصال کوتاه ترانسفورماتورهای توزیع

ولتاژ اتصال کوتاه (٪)	تلفات مسی در بارنامی (W)	تلفات بی باری (W)	توان نامی (KVA)
۴	۱۱۰۰	۱۹۰	۵۰
۴	۱۷۵۰	۳۲۰	۱۰۰
۴	۲۳۵۰	۴۶۰	۱۶۰
۴	۳۲۵۰	۶۵۰	۲۵۰
۴	۴۶۰۰	۹۳۰	۴۰۰
۴	۶۵۰۰	۱۳۰۰	۶۳۰
۶	۶۷۵۰	۱۲۰۰	۶۳۰
۶	۱۰۵۰۰	۱۷۰۰	۱۰۰۰
۶	۱۷۰۰۰	۲۶۰۰	۱۶۰۰
۶	۲۶۵۰۰	۳۸۰۰	۲۵۰۰



شکل ۱۴ــ ساختمان سیم پیچ ترانسفورماتورهای سه فاز

۳ــ۲ــ ساختمان ترانسفورماتور سه فاز از نقطه نظر عایق بندی و تهویه

با توجه به اینکه چگونگی خنک‌سازی ترانسفورماتورها با هم متفاوت است به همین دلیل لازم است نحوه تهویه ترانسفورماتور با یک کد مشخص بر روی پلاک درج شود. انواع پر کاربرد روش‌های خنک‌سازی عبارتند از :

۱ــ خنک سازی با گردش عادی هوا که به اختصار با AN (Air Natural) نمایش داده می‌شود.

۲ــ خنک سازی با گردش اجباری هوا (یعنی از طریق فن) که به اختصار با AF (Air Forced) نمایش داده می‌شود.

۳ــ خنک‌سازی با گردش عادی روغن که به اختصار با ON (Oil Natural) نمایش داده می‌شود.

۴ــ خنک‌سازی با گردش اجباری روغن (یعنی از طریق پمپ روغن) که به اختصار با OF (Oil Forced) نمایش داده می‌شود.

به عنوان مثال ترانسفورماتوری که با کدONAN نشان داده شده است. یعنی ترانسفورماتور روغنی که روغن در آن به صورت عادی گردش می‌کند و از تهویه طبیعی(بدون استفاده از فن) نیز بهره می‌گیرد.

ممکن است یک ترانسفورماتور دارای مشخصهٔ ONAN/ONAF باشد. یعنی در صورتی که گرما از حد خاصی بالاتر رود سیستم تهویه اجباری از طریق فن وارد مدار می‌شود.

خود را بیازمایید

ــ در ترانسفورماتورها خنک سازی با گردش روغن به چند صورت انجام می‌شود ؟کد آنها را بنویسید.

ترانسفورماتورهای توزیع قدرت را می‌توان به دو دسته تقسیم نمود :

- ترانسفورماتورهای روغنی
- ترانسفورماتورهای خشک

۱ــ۳ــ۲ــ ترانسفورماتورهای روغنی : در ترانسفورماتورهای روغنی، وظیفهٔ روغن، عایق کردن سیم پیچ‌ها و بدنه از یکدیگر و خنک‌سازی آن می‌باشد و لذا هسته و سیم‌پیچ‌ها را مطابق شکل(۱۵) پس از ساخت به صورت غوطه‌ور در داخل یک مخزن روغن قرار می‌دهند.

شکل ۱۵ــ نحوهٔ قرار دادن هسته وسیم‌پیچ‌ها در داخل مخزن روغن

حال با توجه به اینکه روغن نسبت به محیط خارج از ترانسفورماتور آب‌بندی باشد یا خیر این ترانسفورماتورها خود به دو دسته تقسیم می‌شوند :

- ترانسفورماتورهای روغنی با مخزن انبساط
- ترانسفورماتورهای روغنی با مخزن بسته

خود را بیازمایید

۱ــ وظیفه روغن در ترانسفورماتور روغنی چیست؟

۱ــ۳ــ۲ــ الف ــ ترانسفورماتورهای روغنی با منبع انبساط : در این ترانسفورماتورها ارتباط روغن با هوای بیرون از طریق منبع انبساط می‌باشد. زیرا روغن در اثر گرما افزایش حجم داده و در منبع انبساط جمع می‌شود. برای جلوگیری از نفوذ رطوبت به داخل و تخریب روغن از رطوبت‌گیر استفاده می‌شود(شکل ۱۶).

شکل ۱۶ــ ترانسفورماتور روغنی با منبع انبساط

۱ــ۳ــ۲ــ ب ــ ترانسفورماتورهای روغنی با مخزن بسته(هرمتیک) : در این ترانسفورماتورها روغن در مخزن بسته بوده و هیچ تماسی با محیط و هوای بیرون ندارد، لذا خاصیت عایقی روغن بیشتر حفظ می‌شود و در نتیجه نیازی به بازدید دوره‌ای روغن در این ترانسفورماتورها نیست (شکل ۱۷).

از آنجا که در مکان‌های شرجی و مرطوب جذب رطوبت توسط روغن زیاد است، توصیه می‌شود از ترانسفورماتورهای روغنی با مخزن بسته استفاده شود.

با گرم شدن روغن در داخل این نوع ترانسفورماتور، حجم آن زیاد شده و چون ترانسفورماتور مخزن انبساط ندارد به دو روش این اضافه حجم ایجاد شده کنترل می‌شود :

- *ترانسفورماتور بدون بالشتک گازی[1] :* در این ترانسفورماتور بدنهٔ ترانسفورماتور پس از گرم شدن طوری منبسط می‌شود تا بتواند اضافه حجم روغن ایجاد شده را در خود جای دهد. این ترانسفورماتورها کاملاً پر از روغن هستند و برای همیشه آب‌بندی می‌شوند.

شکل ۱۷ــ ترانسفورماتور روغنی بدون بالشتک گازی

۱ــ۳ــ۲ــ پ ــ ترانسفورماتور روغنی با بالشتک گازی[2] : در این ترانسفورماتور بدنه را کمی بزرگ‌تر از حجم روغن در نظر می‌گیرند و فضای خالی بالای روغن را با گاز نیتروژن پر

۱ــ Hermetically sealed without gas cushion

۲ــ Hermetically sealed with gas cushion

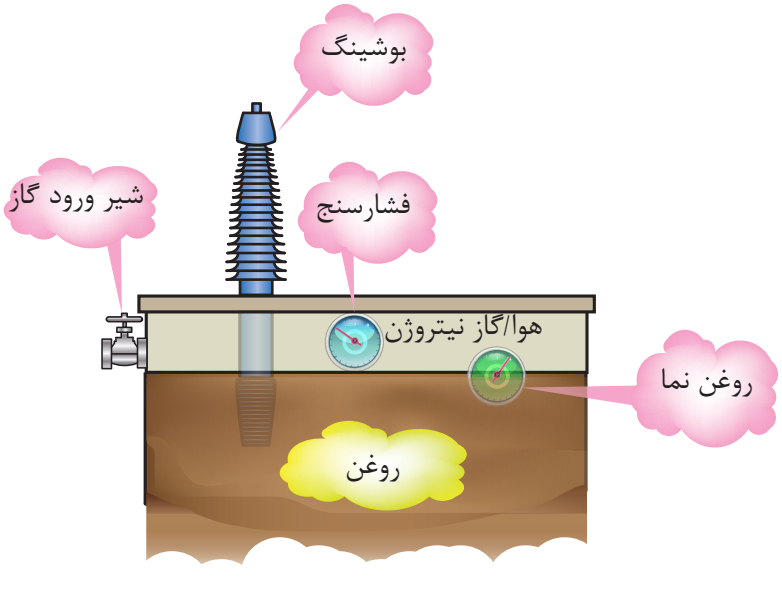
می‌کنند. لذا پس از انبساط روغن، حجم اضافه شده به سطح گاز فوقانی فشار آورده و روغن در آن فضا جا به جا می‌شود. در واقع انبساط و انقباض روغن سبب می‌شود تا گاز نیتروژن واقع در بالای سطح روغن تغییر فشار دهد (شکل ۱۸).

خود را بیازمایید

۱ــ علت استفاده از مخزن انبساط در بعضی ترانسفورماتورهاچیست؟

۲ــ ترانسفورماتورهای روغنی با مخزن بسته برای چه مکان‌هایی توصیه می‌شود؟

۳ــ انواع ترانسفورماتور روغنی با مخزن بسته را نام ببرید.



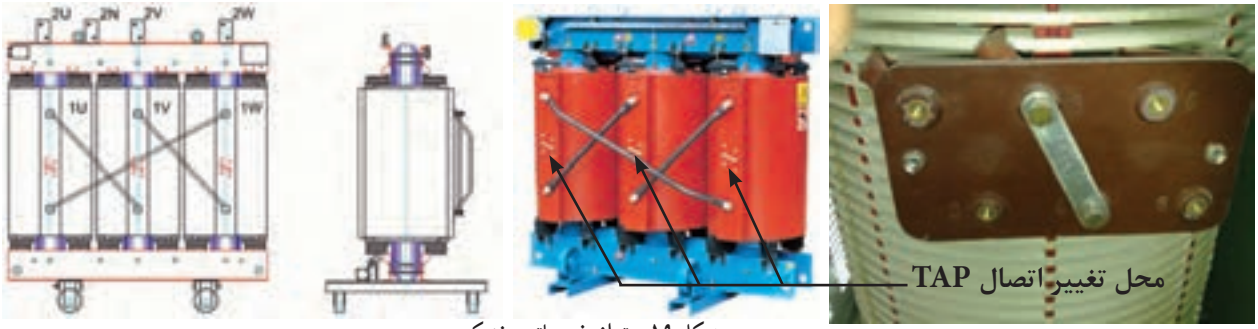
شکل ۱۸ــ ترانسفورماتور روغنی با بالشتک گازی

۴ــ۲ــ ترانسفورماتورهای خشک

در این ترانسفورماتورها به‌منظور عایق‌بندی سیم‌پیچ‌ها از بدنه از مواد عایقی خشک استفاده شده است. این ترانسفورماتورها فقط از طریق هوا خنک می‌شوند. و چون در ساختمان آنها از روغن استفاده نشده است، احتمال آتش‌سوزی آن بسیار کم است. به همین خاطر ترانسفورماتور خشک در پست‌های توزیع ایستگاه‌های مترو، برج‌های مسکونی، فرودگاه‌ها و... کاربرد دارد. استفاده از این ترانسفورماتور برای محیط‌های بیرون ساختمان و مکان‌هایی که سیستم تهویه ندارند مناسب نیست (شکل ۱۹).

این ترانسفورماتورها در حال حاضر تا قدرت ۳۱۵۰KVA ساخته می‌شوند و برای قدرت‌های بالاتر از این اقتصادی نیستند.

۲



شکل ۱۹ــ ترانسفورماتور خشک

خود را بیازمایید

۱ــ ترانسفورماتور خشک چگونه خنک می‌شود؟

۲ــ از ترانسفورماتور خشک در چه مکان‌هایی استفاده می‌شود؟

۵ــ۲ــ تجهیزات جانبی ترانسفورماتور

تجهیزات جانبی به تجهیزاتی گفته می‌شود که مستقیماً جزو ساختمان ترانسفورماتور به حساب نمی‌آیند ولی وجود آنها یا باعث حفاظت از ترانسفورماتور می‌شود یا قابلیت آن را افزایش می‌دهد.

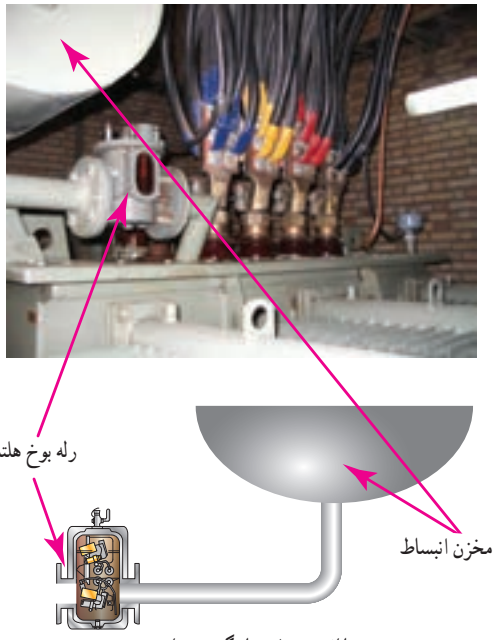
شکل (۲۰) ترانسفورماتور را در حال انفجار و آتش‌سوزی نشان می‌دهد. به کمک تجهیزات حفاظتی ترانسفورماتور می‌توان قبل از بروز خطا، نوع خطا را شناسایی و از پیامدهای زیان‌بار آن جلوگیری کرد.

شکل ۲۰ــ انفجار ترانسفورماتور قدرت

۱ــ۵ــ۲ــ رله بوخ هلتس: برای حفاظت ترانسفورماتورهای روغنی مجهز به منبع انبساط از رله بوخ‌هلتس استفاده می‌شود. در ساختمان ترانسفورماتور روغنی هر یک ازخطاهای زیر می‌تواند رخ دهد :

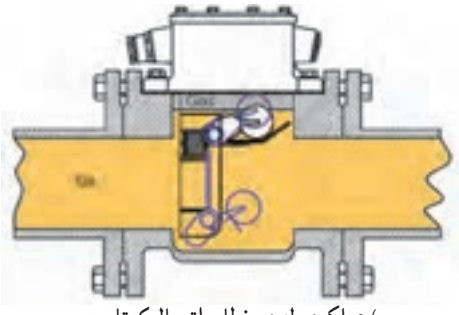
- تنش حرارتی در هستهٔ ترانسفورماتور که سبب ایجاد گاز می‌شود.
- افزایش حرارت سیم‌پیچ‌ها بر اثر اتصال کوتاه بین حلقه‌های سیم‌پیچ که سبب ایجاد گاز می‌شود.
- ایجاد شکست الکتریکی در مقره‌ها و عایق سیم‌پیچ‌ها که سبب ایجاد گاز می‌شود.
- اتصال بدنه یا اتصال زمین در داخل ترانسفورماتورکه سبب ایجاد گاز می‌شود.
- ایجاد جرقه در اثر شل بودن ترمینال‌های داخلی که سبب ایجاد گاز می‌شود.
- کاهش سطح روغن به‌دلیل نشت از مخزن

پس از وقوع هر یک از خطاهای فوق (به‌جز کاهش سطح روغن)، روغن داخل مخزن ترانسفورماتور علاوه بر ایجاد گاز، به‌شدت گرم و منبسط می‌شود، در نتیجه با سرعت به سمت منبع انبساط جریان می‌یابد. گاز ایجاد شده نیز برای رهایی از فشار به طرف مخزن انبساط می‌رود. به همین دلیل این رله بوخ‌هلتس را بین مخزن اصلی و منبع انبساط قرار می‌دهند (شکل ۲۱).

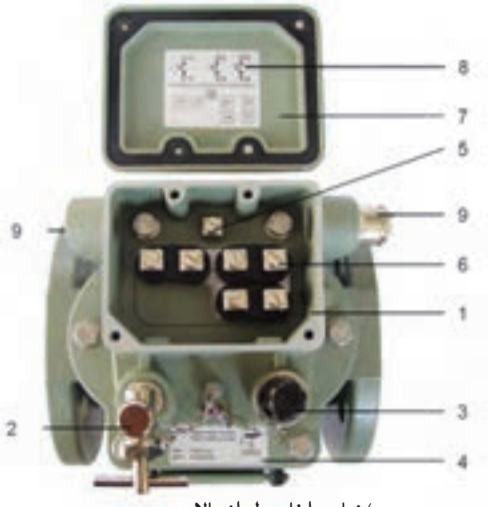


الف) محل قرارگیری رله

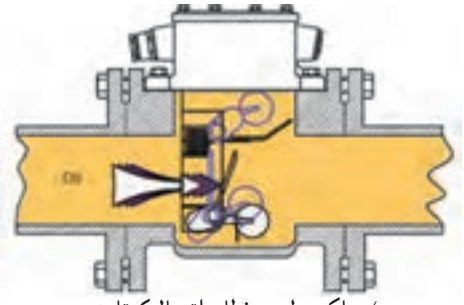
ث) نمای ظاهری رله



ب) عملکرد رله در خطای اتصال کوتاه جزیی



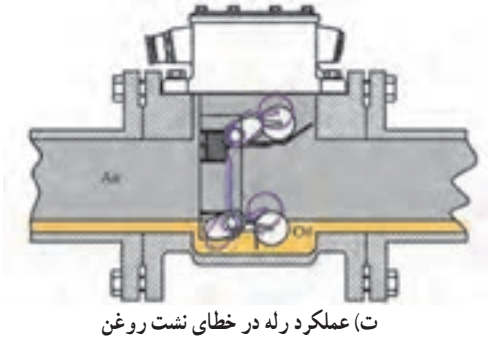
ج) نمای داخلی رله از بالا



پ) عملکرد رله در خطای اتصال کوتاه شدید

۱) جعبه ترمینال
۲) شیر تست
۳) کلید تست
۴) پلاک
۵) ترمینال اتصال زمین
۶) ترمینال های آلارم و تریپ
۷) درب جعبه ترمینال
۸) پلاک کنتاکت‌های رله
۹) محل کابل ورودی و خروجی

چ) نمای داخلی رله از پایین



ت) عملکرد رله در خطای نشت روغن

شکل ۲۱ــ نمای ظاهری، ساختمان داخلی و محل قرارگیری رله بوخ‌هلتس

این رله شامل یک محفظهٔ روغن از فولاد ریختگی و دو کلید عمل کننده برای آلارم و تریپ است. کلید بالایی، فعال‌کننده سیستم هشدار و کلید پایینی فعال‌کننده مدار کنترل برای خارج کردن ترانسفورماتور از مدار است.

هریک از کلیدها دارای یک شناور با محفظه آلومینیومی است که به راحتی می‌تواند حول محور خودش بچرخد. کلید نیز در یک محفظه جیوه‌ای جا دارد که به دلیل مایع بودن جیوه در هنگام حرکت شناور جابه‌جا می‌شود و سبب قطع یا وصل کنتاکت می‌گردد.

به جز نشت روغن همه خطاهای داخلی سبب ایجاد گاز در روغن می‌شوند. گاز ایجاد شده به‌دلیل سبک‌تر بودن نسبت به روغن به سمت منبع انبساط حرکت کرده و در مسیر خود حتماً از رله بوخ‌هلتس می‌گذرد. اگر میزان گاز جمع شده در روغن کم باشد کلید بالایی فعال شده و مدار فرمان آلارم را ارسال می‌کند. اما اگر شدت خطا خیلی زیاد باشد، گاز ایجاد شده باعث تحریک و اتصال کلید پایین خواهد شد و فرمان قطع لحظه‌ای (آنی) ترانسفورماتور ارسال می‌گردد. مسلماً نشتی روغن نیز ابتدا باعث تحریک شناور بالایی و در صورت ادامه تحریک شناور پایینی می‌شود که به ترتیب فرمان آلارم و قطع صادر خواهد شد. به منظور اطمینان از صحت عملکرد کلیدهای رله و آزمایش آن برروی قسمت بالای رله دکمه‌ای فشاری قرار داده شده است که با فشردن آن کلیدهای رله عمل خواهند نمود. بر روی محفظه رله بوخ هلتس یک شیر جهت تخلیه و نمونه‌برداری از گازهای جمع شده در بالای آن تعبیه شده است که پس از عملکرد رله باید سریعاً نمونه‌برداری از گاز صورت پذیرد.

در رله‌های بوخ هلتس می‌توان از طریق رنگ گاز جمع شده پس از عملکرد رله به نوع اشکال پی برد

این رله غالباً برای ترانسفورماتورهای روغنی با قدرت بالاتر از ۸۰۰KVA که دارای مخزن انبساط می‌باشند، باید نصب شود.

خود را بیازمایید

۱ــ چهار مورد از خطاهای ترانسفورماتور را بیان کنید.
۲ــ رله بـوخ هلتس دارای چند کلید عمل کننده بوده و وظیفه هر یک چیست؟
۳ــ در چه ترانسفورماتورهایی از رله بوخ‌هلتس استفاده می‌شود؟
۴ــ عملکرد رله بوخ هلتس در برابر کاهش روغن چگونه است؟
۵ــ دلیل قرارگرفتن شیر روی رله بوخ هلتس چیست؟

۲ــ۵ــ۲ــ ترمومتر (دماسنج ترانسفورماتور) :

برای اندازه‌گیری و نمایش دمای ترانسفورماتور از وسیله‌ای به‌نام ترمومتر استفاده می‌شود.

در ترانسفورماتورهای روغنی امکان نصب دو نوع ترمومتر وجود دارد :

- ترمومتر روغن (که معمولاً در قدرت‌های بالاتر از ۶۳۰KVA نصب می‌شود)
- ترمومتر سیم پیچ (که معمولاً در قدرت های بالاتر از ۱۲۵۰KVA نصب می‌شود)

عمر عایق ترانسفورماتور به حرارت ایجاد شده در داخل ترانسفورماتور وابسته می‌باشد. عوامل مختلفی همچون دمای محیط، محل نصب و شرایط بارگیری در میزان گرم شدن ترانسفورماتور تأثیر دارد.

خود را بیازمایید

ــ برای اندازه گیری و نمایش دمای روغن ترانسفورماتور از..... استفاده می‌شود.

۱ــ۲ــ۵ــ۲ــ ساختمان و روش اندازه‌گیری

ترمومتر روغن : بخش حسگر ترمومتر از بیمتالی تشکیل شده که توسط یک غلاف فلزی از بالای ترانسفورماتور در داخل مخزن روغن قرار می‌گیرد و بخش نشان‌دهنده آن نیز روی بدنه ترانسفورماتور نصب می‌شود.

در شکل (۲۲) ترمومتر ساده کنتاکت دار نشان داده شده است.

شکل ۲۲ــ ترمومتر ساده کنتاکت‌دار و محل نصب آن روی مخزن ترانسفورماتور

شکل ۲۳ــ چند نمونه ترمومتر با رابط جیوه‌ای

صفحه نمایش ترمومتر غالباً دارای دو عقربه به رنگ‌های متفاوت است که یکی (مثلاً قرمز) دمای فعلی ترانسفورماتور را نمایش می‌دهد و دیگری (مثلاً زرد) بیشترین دمای ایجاد شده در ترانسفورماتور را نشان می‌دهد. مکانیزم عملکرد این دو عقربه به این صورت است که در زمان حرکت عقربه به سمت زیادتر شدن دما هر دو عقربه با هم حرکت می‌کنند. وقتی دما کاهش می‌یابد فقط عقربه‌ای که دمای فعلی را نشان می‌دهد به عقب برمی‌گردد. بدین ترتیب عقربه زرد بالاترین دمای ایجاد شده در ترانسفورماتور را ثبت می‌نماید. اگر بار دیگر عقربه قرمز به سمت بالا حرکت کند تا قبل از رسیدن به عقربه زرد به تنهایی و اگر دما باز هم بالاتر بود هر دو عقربه باهم حرکت می‌کنند (شکل ۲۳).

خود را بیازمایید

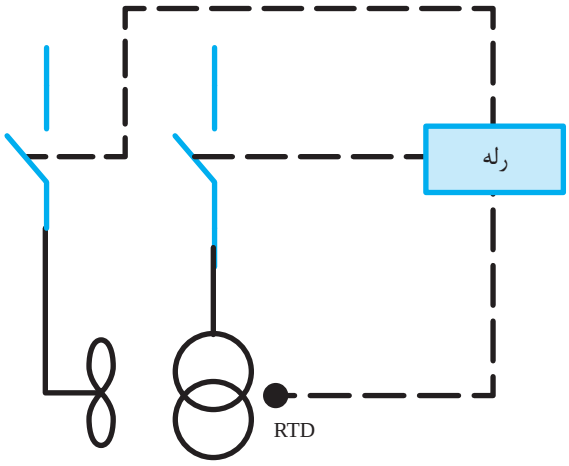
۱ــ دمای هشدار ودمای قطع در ترانسفورماتورهای روغنی به چه صورت تنظیم می‌شوند؟

۲ــ در اغلب ترمومترها صفحهٔ نمایش چند عقربه دارد وعملکرد هر یک چگونه است؟

۲ــ۲ــ۵ــ۲ــ ترمومتر سیم‌پیچ : در ساختمان ترمومتر سیم‌پیچ یک مقاومت سیمی (فیلار) پیش‌بینی شده است. جریان عبوری یکی از فازهای سمت فشار ضعیف را از طریق ترانسفورماتور جریان (CT) (که برای همین موضوع در بوشینگ ترانسفورماتور از قبل جاسازی شده) نمونه‌برداری و به مقاومت سیمی ترمومتر وصل می‌کنند. عبور جریان از مقاومت حرارت تولید می‌کند و حرارت ایجاد شده در آن متناسب با میزان جریان عبوری از سیم‌پیچ می‌باشد. بنابراین سیستم نمایشگر ترمومتر می‌تواند میزان گرمای تولید شده در مقاومت، یعنی همان دمای سیم‌پیچ ترانسفورماتور را اندازه‌گیری نموده و نشان دهد (شکل ۲۴).

شکل ۲۴ــ محل نصب ترمومتر سیم‌پیچ و روغن روی یک نمونه ترانسفورماتور

۳ــ۵ــ۲ــ سیستم کنترل دما به کمک سنسور RTD[1] : در ترانسفورماتورهای نوع خشک، حرارت ایجاد شده در سیم‌پیچ به هر دلیلی (افزایش بار و یا اتصال کوتاه) مستقیماً باعث گرم شدن عایق اطراف سیم‌پیچ می‌شود. لذا برای کنترل دمای این نوع ترانسفورماتورها از سنسورهای RTD استفاده می‌شود. این سنسورها به کلید قطع کننده ترانسفورماتور و فن مربوط به آن فرمان می‌دهند (شکل ۲۵).



شکل ۲۵ــ طرح وارهٔ عملکرد سیستم کنترل دما توسط RTD

خود را بیازمایید

۱ــ در ترمومتر سیم‌پیچ از کدام سمت ترانسفورماتور جریان را نمونه برداری می‌کنند؟

۲ــ ترمومتر سیم‌پیچ چگونه دمای سیم‌پیچ ترانسفورماتور را اندازه می‌گیرد؟

۳ــ برای اندازه‌گیری دمای ترانسفورماتورهای خشک از.....استفاده می‌شود.

۴ــ۵ــ۲ــ رطوبت‌گیر (محفظه سلیکاژل) : وجود رطوبت در روغن باعث کاهش مقاومت عایقی آن می‌شود و با پایین آمدن مقاومت عایق احتمال شکست عایق و اتصال کوتاه داخلی در ترانسفورماتور بالا می‌رود. به همین دلیل در ترانسفورماتورهای روغنی با مخزن انبساط باید از نفوذ رطوبت و گرد و غبار به داخل ترانسفورماتور جلوگیری کرد.

۱ــ آشکار ساز مقاومت حساس به دما Resistance Temperature Detector

شکل ۲۶ــ رنگ ماده رطوبت گیر قبل و بعد از جذب رطوبت

برای جلوگیری از نفوذ رطوبت به‌داخل ترانسفورماتور قسمت فوقانی مخزن انبساط از طریق یک لوله به محفظهٔ شیشه‌ای حاوی مواد رطوبت‌گیر (سلیکاژل) متصل می‌شود. وجود این ماده سبب جذب رطوبت در هنگام ورود هوا به داخل می‌گردد و در نتیجه هوای خشک وارد مخزن می‌شود. (یعنی از ورود رطوبت به داخل ترانسفورماتور جلوگیری می‌کند). رنگ مادهٔ رطوبت گیر در حالت عادی، آبی پر رنگ است و با جذب رطوبت رنگ آن تغییر می‌کند به‌طوری که ابتدا به بنفش و سپس به رنگ صورتی و سفید تغییر رنگ می‌دهد.

وقتی رنگ مادهٔ رطوبت‌گیر تغییر کرد یعنی از رطوبت اشباع شده است و دیگر توان انجام وظیفه خود را ندارد لذا باید نسبت به تعویض فوری آن در چنین شرایطی اقدام نمود (شکل ۲۶).

خود را بیازمایید

۱ــ محفظه شیشه‌ای رطوبت‌گیر در چه قسمتی از ترانسفورماتور قرار دارد؟

۲ــ رنگ ماده (سلیکاژل) رطوبت گیر در صورت اشباع شدن از رطوبت به رنگ.....در می‌آید.

۳ــ از رطوبت‌گیر در ترانسفورماتورهای..... استفاده می‌شود.

(روغنی با مخزن انبساط ــ روغنی با مخزن بسته ــ خشک)

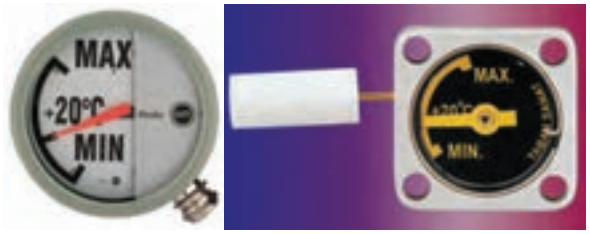
۵ــ۵ــ۲ــ روغن نما: برای کنترل سطح روغن ترانسفورماتور از روغن نما استفاده می‌شود.

دو نوع روغن نما وجود دارد :

روغن‌نمای‌عقربه‌ای(در ترانسفورماتورهای‌با‌مخزن‌انبساط)

روغن نمای چشمی (در ترانسفورماتورهای با مخزن بسته)

۵ــ۵ــ۲ــ الف ــ روغن‌نمای‌عقربه‌ای: روغن نمای عقربه‌ای بر روی منبع انبساط نصب می‌شود. برخی از این روغن نماها دارای دو کنتاکت بوده که یکی برای ارسال فرمان آلارم و دیگری برای فرمان قطع به کار می‌رود (شکل۲۷).



شکل ۲۷ــ انواع روغن نماهای عقربه ای

۵ــ۵ــ۲ــ ب ــ روغن‌نمای‌چشمی: در ترانسفورماتورهای روغنی با مخزن بسته برای حصول اطمینان از سطح روغن در بدنه سوراخی به عمق مورد اطمینان تعبیه می‌شود. برای نشان دادن سطح روغن لوله‌ای حاوی یک گوی روغن‌نما که از محیط بیرون ایزوله شده است، داخل این سوراخ جاسازی می‌شود. قرار داشتن این گوی در بالا، نشانه مناسب بودن سطح روغن است. بعضی از این روغن نماها دارای دو کنتاکت جهت فرمان آلارم و قطع می‌باشند (شکل ۲۸).

خود را بیازمایید

۱ــ انواع روغن نماها را در ترانسفورماتور نام ببرید.

۲ــ روغن‌نمای چشمی در ترانسفورماتورهای ..... کاربرد دارد.

۳ــ دلیل استفاده از کنتاکت‌های آلارم و قطع در روغن‌نما چیست؟

شکل ۲۸ــ روغن نمای چشمی

۶ــ۵ــ۲ــ شیر فشار شکن یا شیر اطمینان[1] : در هنگام افزایش بیش از حد فشار داخلی مخزن بر اثر ایجاد گازهای ناشی از اتصال کوتاه این شیر به‌طور خودکار عمل نموده و روغن با فشار از این شیر بیرون می‌ریزد تا از وقوع انفجار جلوگیری کند. به همین دلیل به این وسیله شیر اطمینان نیز می‌گویند. بعضی از این شیرها دارای یک کنتاکت قطع نیز می‌باشند تا در زمان عملکرد، به ترانسفورماتور فرمان قطع نیز صادر شود (شکل ۲۹).

شکل ۲۹ــ شیر فشار شکن

۷ــ۵ــ۲ــ فشار و خلأ سنج[2] : این وسیله فقط در ترانسفورماتورهای روغنی با مخزن بسته مورد استفاده قرار می‌گیرد و وظیفهٔ آن نمایش فشار داخلی مخزن می‌باشد (شکل ۳۰).

شکل ۳۰ــ فشار سنج

خود را بیازمایید

۱ــ فشارسنج در چه ترانسفورماتورهایی استفاده می‌شود؟

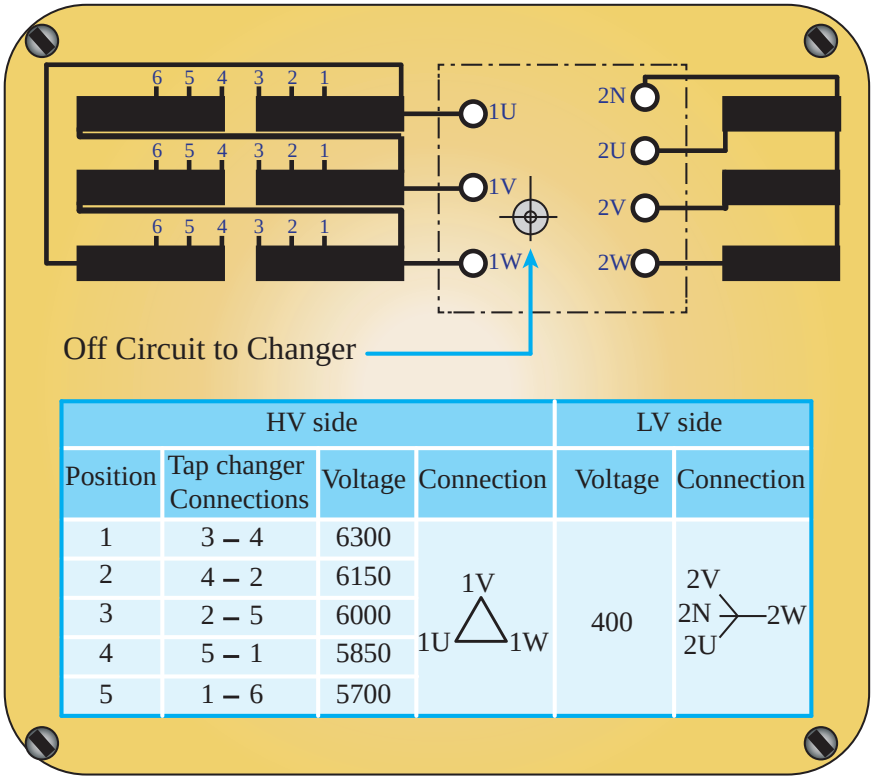
۲ــ عملکرد رله فشار ناگهانی در ترانسفورماتور با مخزن بسته چگونه است؟

۱ــ Pressur Relief Valve

۲ــ Pressure and Vacuum Gauge

۸ــ۵ــ۲ــ کلید تنظیم ولتاژ[۱] : برای اینکه بتوان ولتاژ شبکه در ثانویه ترانسفورماتور را درحد مطلوب نگه داشت از کلید تنظیم ولتاژ استفاده می‌شود. این کلید مانند یک سلکتور سوئیچ چند پله (معمولاً ۳ یا ۵ پله) عمل می‌کند. از آنجا که در ترانسفورماتورهای توزیع سمت اولیه جریان کمتری نسبت به ثانویه دارد این کلید در سمت فشار قوی نصب می‌شود. مقادیر ولتاژ مورد نظر در کنار هر وضعیت کلید حک شده است. در کلید تنظیم ولتاژ، سیستم قفل کننده‌ای روی آن پیش‌بینی شده است تا اتصال کلید در وضعیت خود محکم باشد. تغییر محل دادن کلید بسته به قدرت ترانسفورماتور و ابعاد واندازه کلید ممکن است دستی و یا موتوری باشد. میزان تنظیم ولتاژ در هر پله کلید غالباً از ۲/۵ درصد بیشتر نیست. بهره‌بردار بنابه شرایط ولتاژ خروجی می‌تواند پله مناسب را انتخاب کرده و ولتاژ خروجی را بر آن اساس تنظیم کند.

معمولاً برای دستیابی به هر ولتاژ در ترانسفورماتورها محل قرارگیری **tap** روی پلاک مشخص می‌شود. لازم به ذکر است، برای تغییر ولتاژ ترانسفورماتورهای خشک به‌جای کلید تنظیم ولتاژ از ترمینال‌های بیرون آمده از سیم‌پیچ مطابق شکل (۱۹) صفحهٔ ۷۶ استفاده می‌شود. معمولاً چگونگی اتصال ترمینال‌ها برای ولتاژهای مختلف روی پلاک ترانسفورما تورها مشخص می‌شوند (شکل ۳۱).



HV side				LV side	
Position	Tap changer Connections	Voltage	Connection	Voltage	Connection
1	3 – 4	6300	1V / 1U 1W	400	2V / 2N 2U — 2W
2	4 – 2	6150			
3	2 – 5	6000			
4	5 – 1	5850			
5	1 – 6	5700			

شکل ۳۱ــ چگونگی اتصالات کلید تنظیم

انواع کلیدهای tap changer عبارتند از :

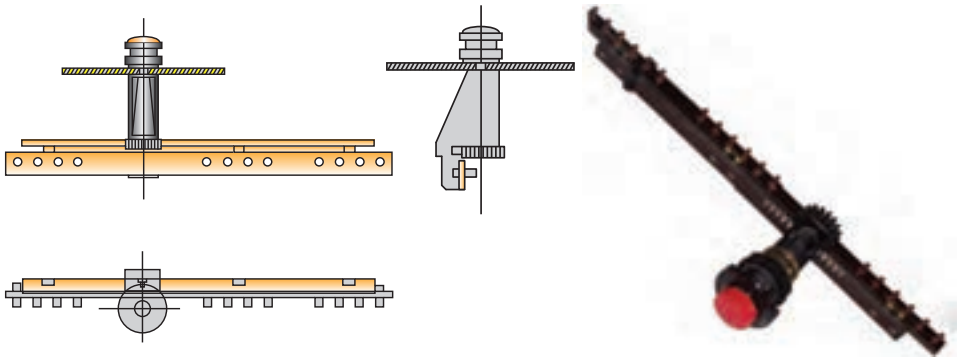
الف) کلید از نوع off Load

ب) کلید از نوع on Load

۱ــ Tap Changer

۲

۸ــ۵ــ۲ــ الف ــ کلید از نوع Off Load : در این کلیدها، هنگام برق‌دار بودن ترانسفورماتور امکان تنظیم ولتاژ وجود ندارد. در نتیجه بهره‌بردار باید قبل از تنظیم ولتاژ برق ترانسفورماتور را قطع کند (شکل ۳۲).



شکل ۳۲ــ کلید تنظیم ولتاژ off-load

۸ــ۵ــ۲ــ ب ــ کلید از نوع On Load : این کلیدها با تغییر خودکار وضعیت کلید، ولتاژ خروجی ترانسفورماتور را ثابت نگه می‌دارند. مسلماً این کلیدها بسیار گران‌تر از کلیدهای Off Load می‌باشند و در ترانسفورماتورهای توزیع به‌ندرت استفاده می‌شوند.

خود را بیازمایید

۱ــ وظیفه کلید تنظیم ولتاژ چیست؟

۲ــ کلید تنظیم ولتاژ در کدام قسمت از ترانسفورماتور قرار می‌گیرد؟ چرا؟

۳ــ انواع کلیدهای تنظیم ولتاژ را نام برده و تفاوت آنها را بنویسید.

تحقیق کنید

چرا در ترانسفورماتورهای خشک از کلید تنظیم ولتاژ استفاده نمی‌شود؟

۹ــ۵ــ۲ــ پیچ اتصال بدنه : برای حفاظت اشخاص در برابر برق گرفتگی بدنهٔ فلزی کلیهٔ دستگاه‌هایی که با برق کار می‌کنند، به‌طور مناسب باید به زمین[1] متصل شوند. ترانسفورماتورها نیز از این امر مستثنی نیستند. بنابراین سازندگان غالباً روی بدنه ترانسفورماتور دو پیچ جهت اتصال بدنه ترانسفورماتور به سیم زمین پیش بینی می‌کنند تا ترانسفورماتور پس از نصب حتماً به سیم زمین پست متصل گردد (شکل ۳۳).

شکل ۳۳ــ محل اتصال سیم زمین

۱۰ــ۵ــ۲ــ جعبه ترمینال[2] : برق ورودی به ترانسفورماتورهای توزیع معمولاً از طریق سیم هوایی یا کابل متصل می‌شود. همچنین برق خروجی این نوع ترانسفورماتورها غالباً از طریق کابل وصل می‌گردند. سازندهٔ ترانسفورماتور می‌تواند برای انجام اتصالات، جعبه ترمینال در نظر بگیرد. مخصوصاً در ترانسفورماتورهایی که تعداد کابل‌ها زیاد است، استفاده از جعبه ترمینال یک مزیت به‌شمار می‌آید (شکل ۳۴).

۱ــ Earthing System

۲ــ Terminal Box

الف) ترانسفورماتور با جعبه ترمینال

ب) ترانسفورماتور بدون جعبه ترمینال

شکل ۳۴ــ اتصال کابل به ترانسفورماتور

۱۱ــ۵ــ۲ــ بوشینگ[1]: بوشینگ وسیله‌ای برای هدایت هادی‌های داخل ترانسفورماتور با بیرون مخزن ترانسفورماتور می‌باشد. این وسیله از یک استوانه ضخیم عایق ساخته شده که از درون آن هادی عبور می‌کند (شکل ۳۵). در سطح ولتاژهای توزیع، جنس بوشینگ‌ها از چینی (porcelain) و یا عایق رزینی می‌باشد.

الف) بوشینگ سوکتی

ب) بوشینگ چینی فشار ضعیف

ج) بوشینگ چینی فشار قوی

شکل ۳۵ــ انواع بوشینگ

خود را بیازمایید

ــ ساختمان بوشینگ را مختصر توضیح دهید.

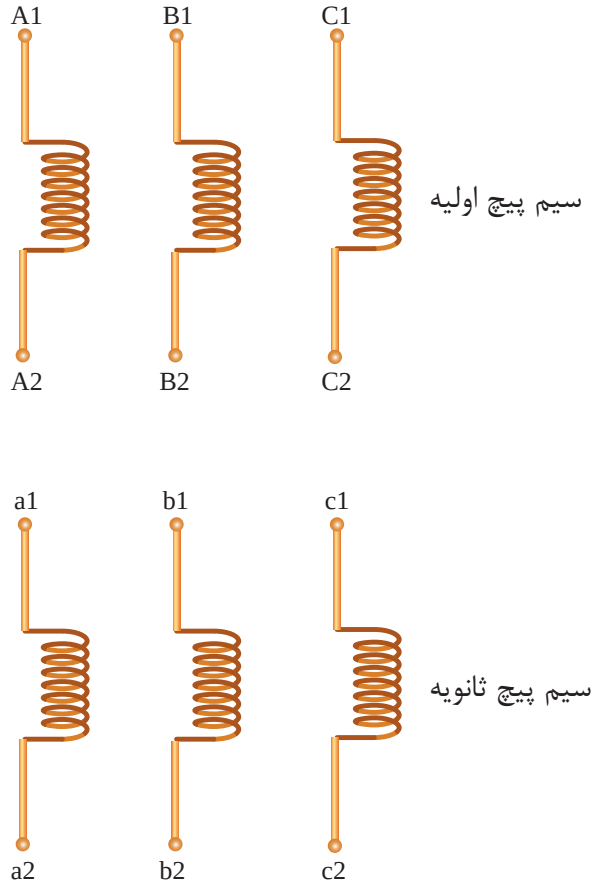
۱ــ Bushing

۲

۶ــ۲ــ انواع اتصالات مورد استفاده در ترانسفورماتورهای سه فاز

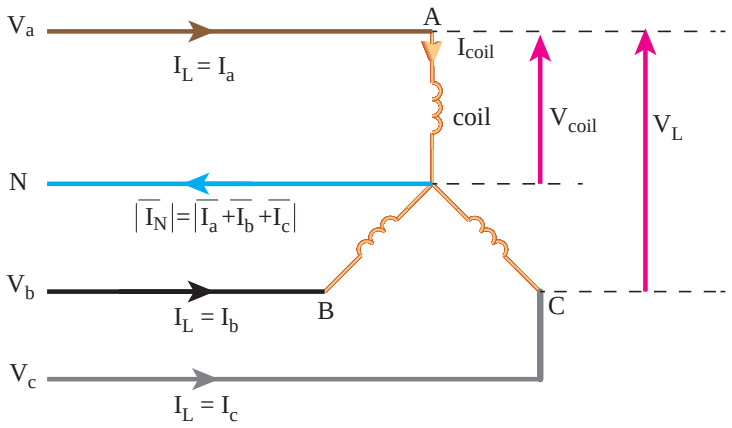
ترانسفورماتور سه فاز از سه سیم پیچ در سمت اولیه و سه سیم‌پیچ در سمت ثانویه تشکیل شده است که هر یک از این سیم‌پیچ‌ها دارای سه سر و سه ته می‌باشند (شکل ۳۶).

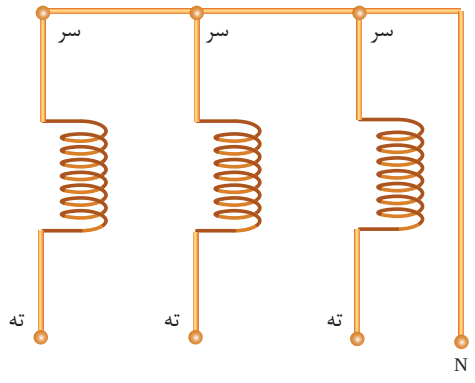
سیم‌پیچ‌های هر طرف ترانسفورماتور را می‌توان به صورت ستاره،مثلث و یا زیگزاگ به هم متصل نمود.

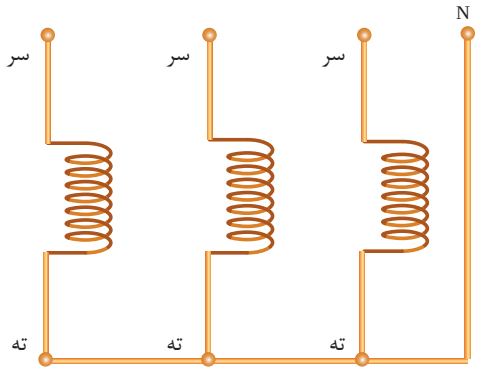


شکل ۳۶ــ سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور سه فاز

۱ــ۶ــ۲ــ اتصال ستاره : در اتصال ستارهٔ سه سر یا سه ته سیم‌پیچ‌های سه‌فاز را به هم اتصال داده و طرف دیگر را به صورت آزاد برای اتصال به شبکه باقی می‌گذارند. بدین ترتیب این اتصال را اتصال ستاره می‌نامند و آن را به اختصار با حرف Y بزرگ درسمت فشار قوی و حرف y کوچک درسمت فشار ضعیف نمایش می‌دهند (شکل ۳۷).







شکل ۳۷ــ اتصال ستاره

از خصوصیات مهم این اتصال می‌توان به موارد زیر اشاره کرد :

- جریان عبوری از هر بوبین با جریان همان خط برابر است.

$$I_L = I_{Coil}$$

- ولتاژ دو سر بوبین به اندازهٔ ولتاژ فازی می‌باشد و از ولتاژ خط $\sqrt{3}$ برابر کوچک‌تر است.

$$V_{Coil} = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

با استفاده از این اتصال می‌توان به نقطهٔ خنثی (یا صفر) اتصال ستاره یعنی محل تعادل جریان سه فاز $\vec{I_N} = \vec{I_a} + \vec{I_b} + \vec{I_c}$ نیز دست یافت. اگر مرکز خنثی اتصال ستاره از طریق سیم به بیرون آورده شده باشد و در دسترس قرار گیرد بعد از علامت اتصال ستاره (Y) یک حرف n نیز اضافه می‌شود. برای مثال (Yn) دلالت بر دسترسی به نقطه خنثی اتصال ستاره دارد.

۲ــ۶ــ۲ــ اتصال مثلث : هرگاه سه سیم‌پیچ را مطابق شکل (۳۸) با یکدیگر سری کنند یعنی ابتدای یک سیم‌پیچ را به انتهای دیگری اتصال داده تا سه سیم‌پیچ تشکیل یک حلقه دهند، اتصال مثلث ایجاد خواهد شد.

این اتصال نیز می‌تواند مطابق شکل (۳۸) به یکی از دو حالت نشان داده شده اجرا شود.

در هر دو اتصال مطابق شکل (۳۸)، سیم‌پیچ‌ها می‌توانند از یک سمت (سر و یا ته) به ترمینال خروجی متصل شوند. از خصوصیات مهم این اتصال عبارتند از :

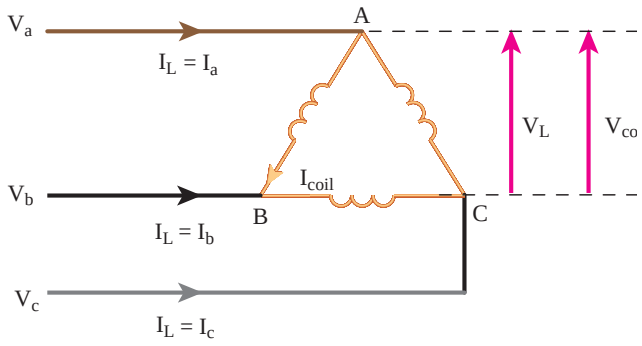
۱ــ برابری ولتاژ دو سر هر بوبین با ولتاژ خط $V_{Coil} = V_L$

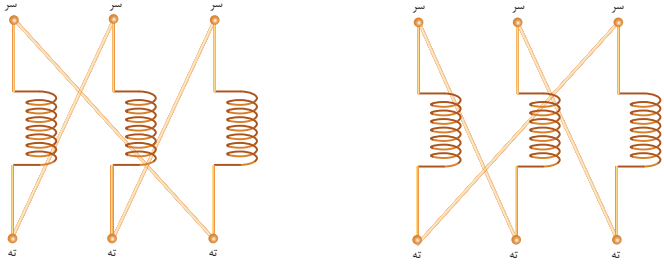
۲ــ در صورت متعادل بودن بار سه فاز، جریان عبوری از هر سیم‌پیچ به اندازه $\sqrt{3}$ برابر از جریان خط کوچک‌تر است.

$$I_{coil} = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

۲

اتصال مثلث را با اختصار با حرف D بزرگ در سمت فشار قوی ترانسفورماتور وحرف d کوچک در سمت فشار ضعیف نمایش می‌دهند.





شکل ۳۸ــ اتصال مثلث

۳ــ۶ــ۲ــ مقایسهٔ اتصال مثلث و اتصال ستاره در سیم پیچ‌های ترانسفورماتور :

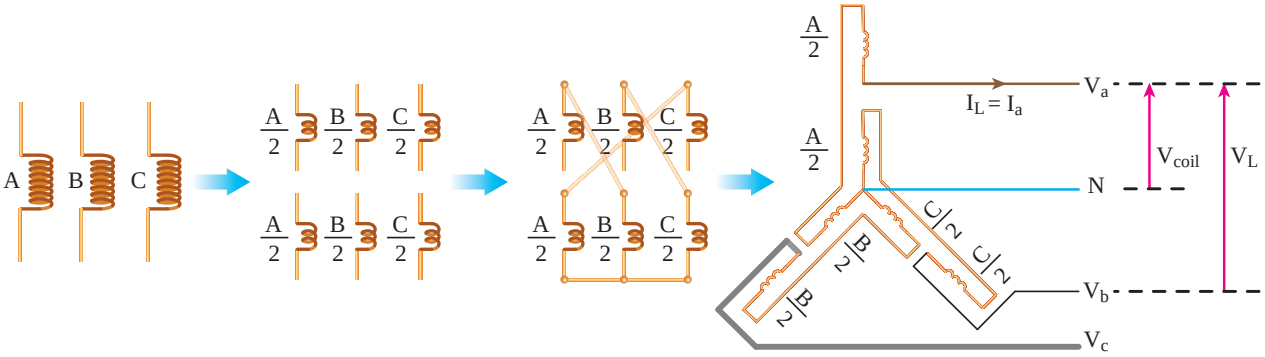
چون ولتاژ دو سر هر سیم پیچ در اتصال ستاره $V_{coil} = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$ و در اتصال مثلث $V_{coil} = V_L$ است، در نتیجه در اتصال مثلث تعداد دور سیم‌پیچ برای هر فاز $\sqrt{3}$ برابر بیشتر از اتصال ستاره می‌شود و دیگر آنکه جریان عبوری از هر سیم‌پیچ و جریان خط در اتصال ستاره با هم برابرند در صورتی که در اتصال مثلث به شرط متعادل بودن بار سه فاز جریان خط $\sqrt{3}$ برابر از جریان سیم‌پیچ بیشتر است. بنابراین اگر جریان خط در دو اتصال با هم برابر باشند، در اتصال مثلث می‌توان سطح مقطع سیم را کمتر در نظر گرفت.

در نتیجه در ولتاژهای بالا، اقتصادی‌تر آن است که از اتصال ستاره و در جریان‌های زیاد از اتصال مثلث استفاده شود. زیرا در جریان‌های زیاد مقطع هادی سیم‌پیچ نسبت به اتصال ستاره کمتر است و در ولتاژهای بالا تعداد دور سیم‌پیچ اتصال ستاره نسبت به اتصال مثلث کمتر است.

البته اگر دسترسی به مرکز خنثی در هر سمت ترانسفورماتور مد نظر باشد باید از اتصال ستاره در همان طرف استفاده کرد.

۴ــ۶ــ۲ــ اتصال زیگزاگ : این اتصال مخصوص ترانسفورماتورها است و در دیگر تجهیزات برقی صورت نمی‌پذیرد، همچنین از این اتصال فقط در ثانویه ترانسفورماتور استفاده می‌شود. برای انجام این اتصال مطابق شکل (۳۹) هر بوبین به دو قسمت مساوی تقسیم می‌شود. بنابراین شش بوبین خواهیم داشت. نیمی از بوبین‌ها (نیمه بالایی یا پایینی) را به‌صورت ستاره با یکدیگر اتصال می‌دهند. آنگاه ادامهٔ هر بوبین متصل به اتصال ستاره، با بوبین مربوط به فاز دیگر در جهت عکس سری می‌شود.

به همین خاطر این اتصال را، به‌نام اتصال ستاره شکسته نیز می‌شناسند. چگونگی این اتصال در شکل (۳۹) ملاحظه می‌شود.



شکل ۳۹ــ اتصال زیگزاگ

جریان عبوری از بوبین اتصال زیگزاگ با حالت اتصال ستاره برابر می‌باشد، در حالی که ولتاژ فازی اتصال زیگزاگ از اتصال ستاره کمتر است.

از مزایای این اتصال جاری شدن جریان یک فاز در دو ستون هسته ترانسفورماتور می‌باشد. این موضوع سهم به‌سزایی در متعادل کردن جریان در سمت فشار قوی ترانسفورماتور دارد. به همین جهت در صنعت از این اتصال در سمت ثانویه ترانسفورماتور استفاده می‌شود.

همچنین در این اتصال امکان دسترسی به نقطه خنثی سیم‌پیچ وجود دارد که از دیگر مزایای این اتصال به شمار می‌رود. اتصال زیگزاگ را به‌اختصار با Z نمایش می‌دهند.

خود را بیازمایید

۱ــ اتصال ستاره سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور سه فاز را رسم وروابط ولتاژ وجریان آنها را بنویسید.

۲ــ برای ایجاد نیروی محرکه مغناطیسی مساوی ، تعداد دور و سطح مقطع سیم‌پیچ را در دو اتصال ستاره و مثلث مقایسه کنید.

۳ــ اتصال زیگزاگ در کدام سمت از ترانسفورماتور استفاده شده و چه مزیتی نسبت به اتصال ستاره دارد؟

تحقیق کنید

رابطهٔ ولتاژ فاز با ولتاژ خط در اتصال زیگزاگ چگونه است؟

۷ــ۲ــ تقسیم‌بندی ترانسفورماتورهای سه فاز بر اساس نوع اتصال ورودی و خروجی

هر ترانسفورماتور سه فاز حداقل دارای سه سیم پیچ در سمت اولیه و سه سیم پیچ در سمت ثانویه است. چنین ترانسفورماتورهایی را ترانسفورماتور سه فاز متقارن می‌نامند.

البته ترانسفورماتورهای سه فازی که از این قاعده مستثنی باشند نیز وجود دارند.

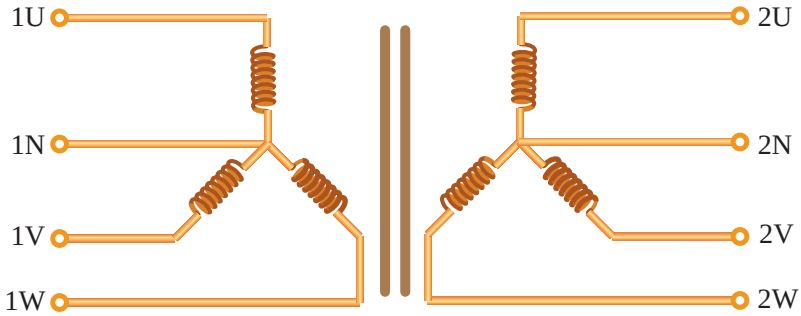
بر اساس سه نوع اتصال ذکر شده و مستقل از اینکه این اتصالات در سمت اولیه یا در سمت ثانویه ترانسفورماتور صورت گیرد انواع اتصالات متقارن عبارتند از :

۱ــ اتصال ستاره ــ ستاره $Y - y$

۲ــ اتصال مثلث ــ ستاره $D - y$

۳ــ اتصال ستاره ــ زیگزاگ $Y - z$

۱ــ۷ــ۲ــ اتصال ستاره ــ ستاره (Y_y) : این اتصال در ترانسفورماتورهایی که دسترسی به نقطه خنثی مد نظر باشد کاربرد دارد. چگونگی این اتصال در شکل (۴۰) مشاهده می‌شود.



شکل ۴۰ــ ترانسفورماتور با اتصال ستاره ــ ستاره

همچنین در ترانسفورماتورهایی که ولتاژ سمت اولیه و ثانویه آن بسیار زیاد باشد، می‌توان از این اتصال استفاده کرد. با توجه به اینکه ولتاژ هرسیم‌پیچ $\sqrt{3}$ برابر کمتر از ولتاژ خط است، بنابراین سبب کاهش مقدار عایق مورد استفاده شده در هر بوبین می‌شود.

در ولتاژهای کمتر از یک کیلوولت تأثیر قابل ملاحظه‌ای بین مقدار عایق مصرفی به‌ازای ولتاژ خط و ولتاژ فاز وجود ندارد. اما در ولتاژهای بالاتر این اختلاف قابل ملاحظه است. به‌عنوان مثال اگر ولتاژ خط ۱۳۲ Kv در یک سمت قرار گیرد با استفاده از این اتصال ولتاژی که به هر سیم‌پیچ می‌رسد در حدود ۷۲ Kv خواهد شد که قطعاً هزینه عایق‌بندی برای این ولتاژ بسیار کمتر از ولتاژ ۱۳۲Kv خواهد بود.

در صورتی که ثانویه این نوع ترانسفورماتور از طریق یک‌فاز زیر بار برود هرسه فاز اولیه زیر بار می‌رود و باعث بالا رفتن جریان بی‌باری و زیاد شدن تلفات در ترانسفورماتور می‌گردد. همچنین ولتاژ در یک فاز در ثانویه افزایش و در فازهای دیگر کاهش یابد. به همین دلیل زیر بار رفتن ترانسفورماتورهای با اتصال Yy (ستاره ــ ستاره) به‌صورت تک‌فاز یا نامتعادل نامطلوب است و استاندارد میزان نامتعادلی را تا ۱۰ درصد توان نامی مجاز می‌داند. در شبکه‌های توزیع از این اتصال به‌ندرت استفاده می‌شود.

خود را بیازمایید

۱ــ معمولاً از ترانسفورماتور ستاره ــ ستاره در چه جایی استفاده می‌شود؟

۲ــ آیا می‌توان ترانسفورماتور ستاره ــ ستاره را از طریق یک فاز زیر بار برد؟ چرا؟

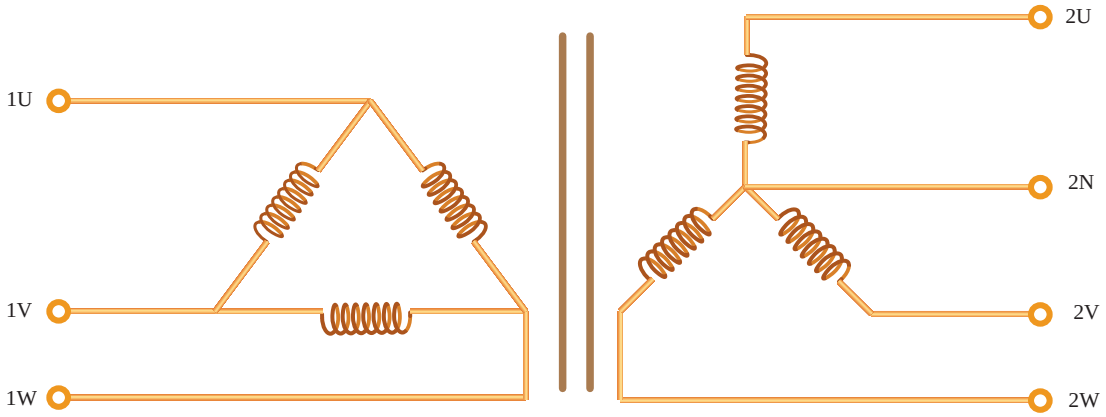
۳ــ ثانویه یک ترانسفورماتور با ولتاژ خط ۴۰۰ ولت دارای اتصال ستاره ــ ستاره می‌باشد و بار متعادلی را با جریان ۲۰آمپر تغذیه می‌کند. بدست آورید :

الف)جریان عبوری از هر بوبین ثانویه

ب) ولتاژ دو سر هر بوبین در ثانویه

۲ــ۷ــ۲ــ اتصال مثلث ــ ستاره (D_y) : این روش اتصال در ترانسفورماتورهای کاهنده و در شبکه‌های توزیع بسیار کاربرد دارد. در کشور ما اغلب مصرف‌کننده‌های توزیع از طریق ترانسفورماتور با اتصال Dyn ۲۰/۰/۴ KV تغذیه می‌شوند.

مصرف کننده‌های تک فاز به سیم نول احتیاج دارند و در شبکهٔ توزیع بسیار فراوان هستند. از خصوصیات مهم این اتصال دسترسی به مرکز اتصال ستاره یعنی نقطهٔ خنثی در سمت مصرف کننده است که امکان اتصال این گونه مصرف‌کننده‌ها نیز به آن وجود دارد. از دیگر محاسن این نوع اتصال این است که اگر یکی از فازهای ثانویه به تنهایی زیر بار برود مشکلات مربوط به اتصال ستاره ــ ستاره را ندارد (شکل ۴۱).



شکل ۴۱ــ ترانسفورماتور با اتصال مثلث ــ ستاره

۳ــ۷ــ۲ــ اتصال ستاره ــ زیگزاگ (Y_z) : این نوع اتصال در ترانسفورماتورهای توزیع با مصرف‌کننده‌های سه فاز نامتعادل کاربرد دارد.

در اتصال زیگزاگ ولتاژ سیم پیچ‌های هر فاز طبق رابطهٔ (۱ــ۲) ۸۶٪ حالت ستاره می‌باشند.

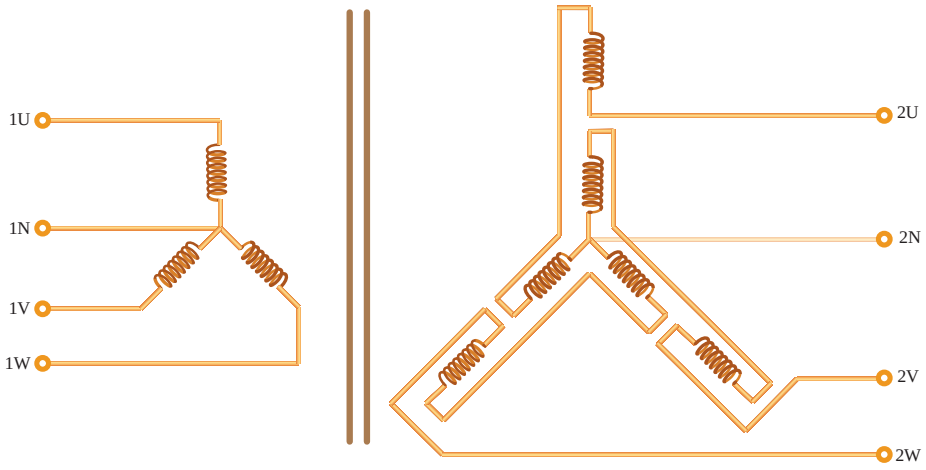
$$V_{Coil-Zigzag} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_{Coil-Star} \qquad (۱ــ۲)$$

با توجه به رابطه (۱ــ۲) مشاهده می‌شود، اگر بخواهیم ولتاژ فازی اتصال زیگزاگ برابر با ولتاژ هر فاز اتصال ستاره شود، تعداد حلقه‌های هر فاز را باید به نسبت $\frac{2}{\sqrt{3}}$ برابرافزایش داد بنابراین با توجه به افزایش تعداد دور (حدوداً ۱۵درصدی[1]) هر بوبین وزن مس مصرفی اتصال Yz نسبت به اتصال Yy افزایش می‌یابد. البته از مزایای این اتصال جاری شدن جریان یک فاز در بوبین‌های دو ستون ترانسفورماتور سمت ثانویه می‌باشد که سبب القا ولتاژ نیز در آن می‌شود. این عمل باعث متعادل شدن جریان در سمت فشار قوی خواهد شد.

دسترسی به نقطهٔ خنثی نیز از دیگر مزایای این ترانسفورماتور محسوب می‌شود یعنی غالباً این اتصال به‌صورت Yzn ارائه می‌گردد. این نیز از خواص اتصال ستاره می‌باشد (شکل ۴۲).

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت مزیت این اتصال ترکیب محاسن اتصال ستاره و مثلث است و عیب آن هزینه بیشتر به‌ازای دریافت قدرت یکسان نسبت به ترانسفورماتور Yyn می‌باشد.

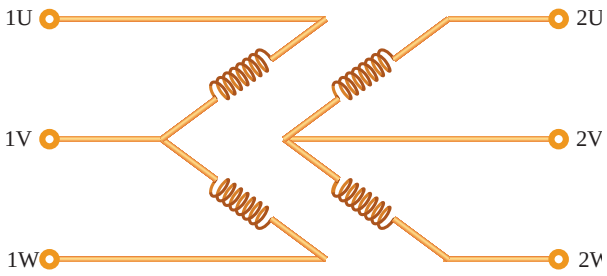
۱ــ $\frac{2}{\sqrt{3}} = 1/15$



شکل ۴۲ــ ترانسفورماتور با اتصال ستاره ــ زیگزاگ

۴ــ۷ــ۲ــ اتصال مثلث باز (V ــ V) : گاهی اوقات با اتصال دو ترانسفورماتور تک‌فاز مشابه نیز می‌توان انرژی الکتریکی سه فاز را از یک طرف به سمت دیگر منتقل نمود. یکی از این اتصالات را که فقط در سیستم سه فاز سه سیمه با بار کاملاً متعادل کاربرد دارد، اتصال مثلث باز یا V ــ V می‌گویند. زیرا مانند اتصال مثلثی است که از یک طرف باز شده است و البته چون شبیه حرف **V** لاتین نیز هست به این نام شناخته می‌شود (شکل ۴۳).

اگر در سیستم سه فاز از سه ترانسفورماتور تک‌فاز استفاده شود و یکی از این ترانسفورماتورها دچار اشکال شود، می‌توان به‌جای آنکه کل شبکه را بی برق نمود، ترانسفورماتور معیوب را از مدار خارج کرده و اولیه وثانویه دو ترانسفورماتور دیگر را به‌صورت اتصال V به هم متصل نمود. البته از این اتصال فقط در شبکه سه فاز سه سیمه با بار متعادل می‌توان استفاده کرد.



شکل ۴۳ــ ترانسفورماتور با اتصال V

در اتصال V توان تحویلی به بار کمتر از مجموع توان دو ترانسفورماتور تک‌فاز است. بنابراین این ترانسفورماتور از نظر صنعتی اقتصادی نمی‌باشد و در موارد بسیار خاص و محدود از آن استفاده می‌شود.

مثال توان خروجی دو ترانسفورماتور تک‌فاز با ولتاژ نامی ۴۰۰V و جریان نامی ۱۰A در صورتی که یکبار با اتصال V به عنوان ترانسفورماتور سه فاز مورد استفاده قرار گیرند و بار دیگر به‌صورت تک‌فاز استفاده شوند را با هم مقایسه کنید.

در صورت استفاده از ترانسفورماتور به‌صورت تک‌فاز

$S = U_2 I_2 = ۴۰۰ \times ۱۰ = ۴۰۰۰ VA$

چون تعداد ترانسفورماتورها در صورت استفاده به‌صورت تک‌فاز، دوتا می‌باشند پس مجموعاً ۸۰۰۰VA توان خروجی خواهد داشت.

در صورت استفاده از ترانسفورماتور به‌صورت سه فاز با اتصال V داریم :

$S = \sqrt{۳} U_2 I_2 = \sqrt{۳} \times ۴۰۰ \times ۱۰ = ۶۹۳۰ VA$

تحقیق کنید

چرا در ترانسفورماتورهای اندازه گیری ولتاژ «PT» از اتصال مثلث باز استفاده می‌شود؟

خود را بیازمایید

۱ــ از اتصال مثلث باز در چه شبکه وچه نوع باری می‌توان استفاده کرد؟

۲ــ یک ترانسفورماتور سه فاز با اتصال مثلث باز، باری را با جریان ۲۵ آمپر تحت ولتاژ نامی ۴۰۰ ولت تغذیه می‌کند. اگر همین ترانسفورماتور درشبکه تک‌فاز همان بار را تغذیه کند، مطلوب است مقایسه توان های دریافتی بار در هر دو حالت.

۵ــ۷ــ۲ــ گروه ترانسفورماتور : گروه ترانسفورماتور عددی است قراردادی که به‌ازای هر ۳۰° اختلاف فاز بین ولتاژ اولیه و ثانویه اطلاق می‌شود.

مثلاً اگر گروه یک ترانسفورماتور ۵ باشد. یعنی ولتاژ فاز L_1 در سمت ثانویه ۵×۳۰° به عبارتی ۱۵۰° نسبت به فاز مشابه در سمت اولیه پس فاز یا عقب‌تر است.

به‌طور کلی فقط چهار گروه اصلی وجود دارند که عبارتند از گروه ۰ و ۵ و ۶ و ۱۱.

گروه برداری یک شاخص مهم برای ترانسفورماتورهای سه فاز محسوب می‌شود که همیشه بعد از علامت اختصاری اتصالات ترانسفورماتور آورده می‌شود.

به‌طور مثال در ترانسفورماتور Dyn۱۱ اتصال اولیه آن مثلث سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور ستاره و نقطهٔ خنثی (مرکز اتصال ستاره) با سیم به بیرون ترانسفورماتور کشیده شده و ترانسفورماتور دارای گروه ۱۱ است. یعنی بین ولتاژهای همنام اولیه و ثانویه ۳۳۰° اختلاف فاز وجود دارد.

۸ــ۲ــ موازی کردن ترانسفورماتورها

در بعضی موارد ظرفیت توان در یک پست توزیع برق ممکن است از ۲۵۰۰KVA تجاوز کند به‌طور مثال ممکن است مصرف داخلی یک واحد صنعتی ۸۰۰۰KVA شود، بدین ترتیب استفاده از یک ترانسفورماتور با این ظرفیت معقول نیست. زیرا هزینه ساخت ترانسفورماتور را بالا می‌برد و خارج از اندازه‌های رایج می‌باشد. در عمل استفاده از چهار ترانسفورماتور ۲۰۰۰KVA به‌صورت موازی ساده‌تر بوده و ضریب اطمینان شبکه را بالا می‌برد.

مزایای اصلی استفاده از ترانسفورماتورهای موازی در شبکهٔ برق عبارت است از :

۱ــ بالا بردن ضریب اطمینان مثلاً زمانی که یک ترانسفورماتور با ایجاد خطا از مدار خارج شود برق کل شبکه قطع نمی‌گردد.

۲ــ امکان برنامه‌ریزی مناسب جهت انجام سرویس تعمیر و نگهداری تجهیزات برقی (مثلاً ترانسفورماتور، تابلوها، کلیدها، ...) بدون آنکه بی برقی کامل در شبکه به‌وجود آید.

۱ــ۸ــ۲ــ شرایط موازی کردن : شرایط موازی کردن ترانسفورماتورها عبارت اند از :

نکتهٔ ۱

الف) ولتاژ دو سمت ترانسفورماتور با هم برابر باشند (که نتیجه می‌گیریم در ترانسفورماتورهای موازی شده با یکدیگر نسبت تبدیل باید برابر باشد)

ب) اختلاف فاز ولتاژ بین فازهای متناظر سمت ثانویه که به هم متصل می‌شوند وجود نداشته باشد یعنی گروه برداری ترانسفورماتورهای موازی نیز باید با هم برابر باشند.

نکتهٔ ۲

حتی‌الامکان همه ترانسفورماتورها به یک نسبت زیر بار رفته و جریان به یک نسبت بین آنها تقسیم شود برای دستیابی به این هدف نیز موارد ذیل باید رعایت شوند :

الف) نسبت توان ترانسفورماتورهای موازی شده از سه برابر تجاوز نکند (بهترین حالت برابری توان همه ترانسفورماتورهای موازی شده است)

ب) ولتاژ اتصال کوتاه ترانسفورماتورها باید با هم برابر باشند. البته ولتاژ اتصال کوتاه ترانسفورماتور با توان کمتر می‌تواند تا ۱۰٪ از ولتاژ اتصال کوتاه ترانسفورماتور با توان بیشتر بزرگ‌تر باشد.

تحقیق کنید

چرا هیچگاه برای موازی کردن چند ترانسفورماتور، ترانسفورماتور با قدرت کمتر نباید ولتاژ اتصال کوتاه کمتر نیز داشته باشد؟

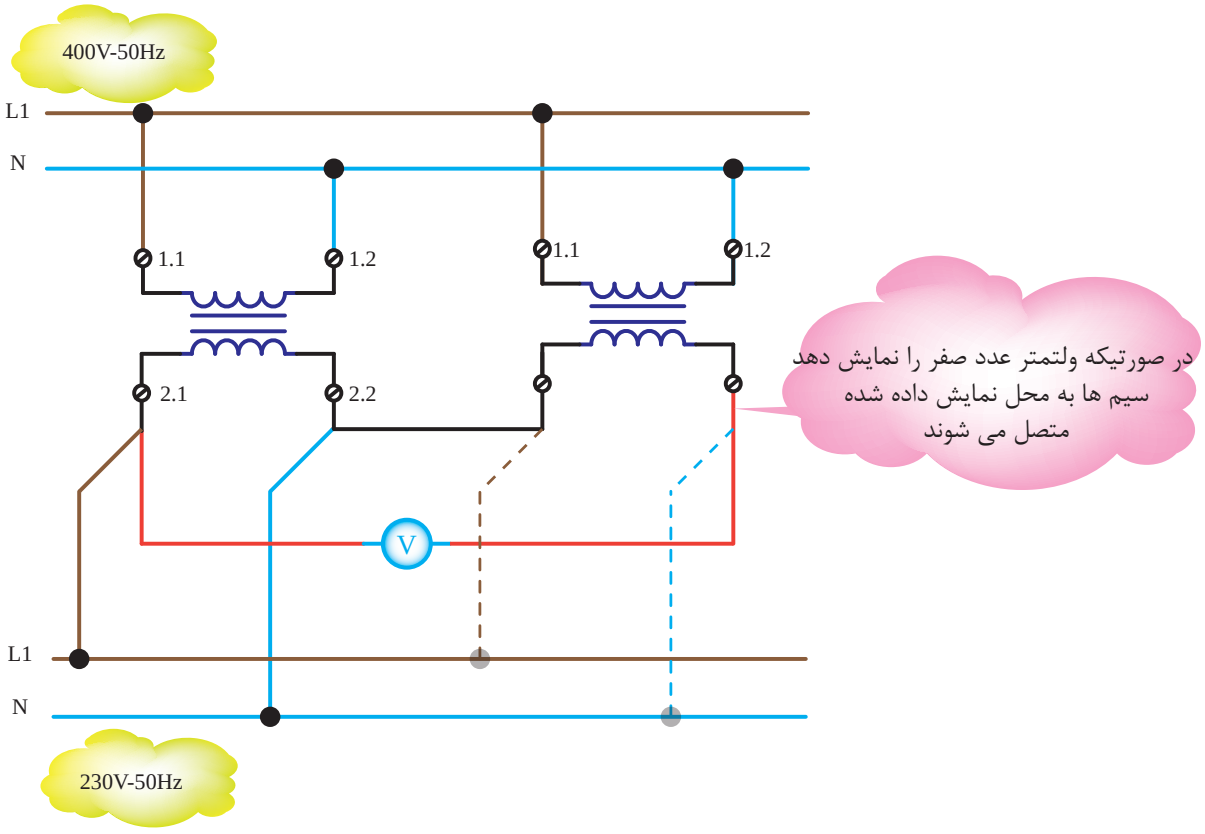
۲ــ۸ــ۲ــ چگونگی موازی کردن دو ترانسفورماتور :

همان‌گونه که ملاحظه شد برای موازی بستن ترانسفورماتورها داشتن مقادیری مانند ولتاژ سمت اولیه و ثانویه گروه ترانسفورماتور، ولتاژ اتصال کوتاه و توان نامی آنها لازم است به همین دلیل همه این موارد در پلاک مشخصه ترانسفورماتور باید توسط سازنده درج شود.

۳ــ۸ــ۲ــ موازی کردن دو ترانسفورماتور

تک‌فاز : برای موازی کردن دو ترانسفورماتور تک‌فاز مطابق شکل (۴۴) ابتدا سیم‌پیچ اولیه هر دو ترانسفورماتور را به شبکه بالادست متصل نموده سپس یکی از سیم‌های سیم‌پیچ ثانویه هر دو ترانسفورماتور به شبکه پایین دست متصل می‌شوند. آنگاه دو سر آزاد بر جای مانده دو سیم‌پیچ ثانویه از طریق ولت‌متر به هم وصل می‌شوند.

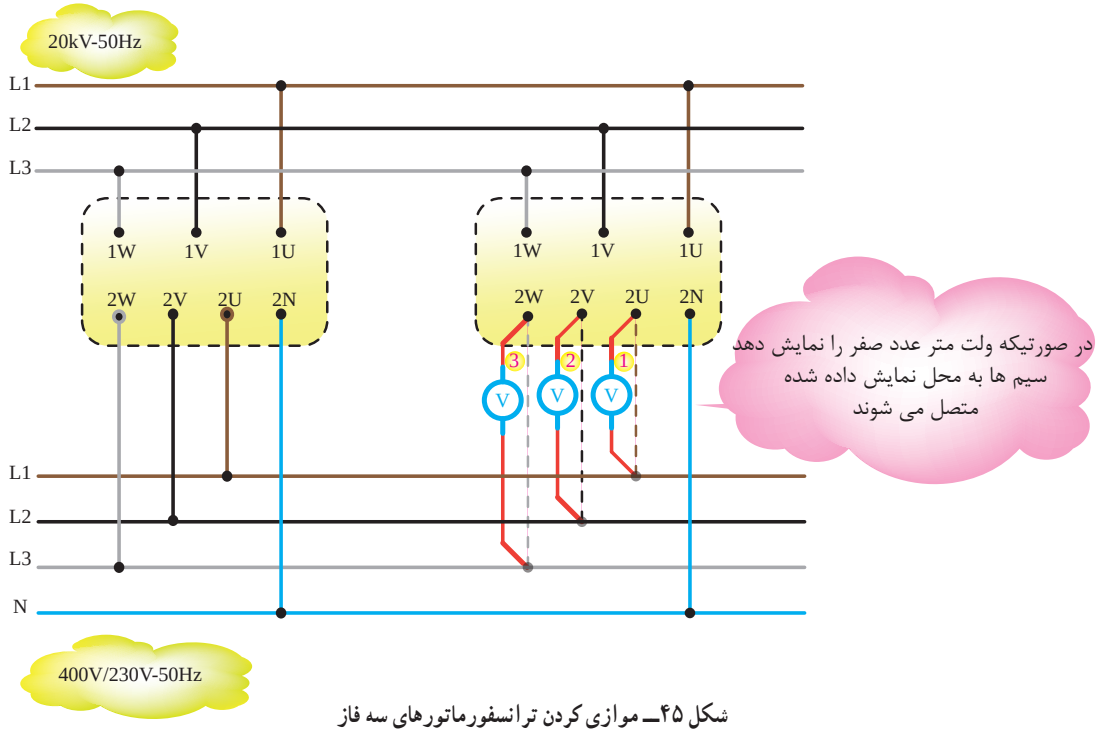
در صورتی که ولت‌متر ولتاژ صفر را نشان داد می‌توانند آن دو سر را نیز به هم وصل کنند. اما اگر ولتاژ نمایش داده شده حدوداً دو برابر ولتاژ نامی ترانسفورماتور بود، باید جای دو اتصال در ثانویه جابه‌جا و سپس با هم موازی شوند.



شکل ۴۴ــ موازی کردن ترانسفورماتورهای تک‌فاز

۴ــ۸ــ۲ــ موازی بستن دو ترانسفورماتور سه فاز :

پس از بررسی و اطمینان از شرایط اولیه جهت موازی بستن ترانسفورماتورها مداری مطابق شکل (۴۵) فراهم نموده و اتصال صحیح فازها با ولت‌متر بررسی می‌شوند. در صورتی‌که اتصال فازها درست باشد ولت‌متر عدد صفر را نشان می‌دهد. فقط در چنین حالتی می‌توان همه اتصالات ثانویه را به شبکه پایین دست متصل نمود.



شکل ۴۵ــ موازی کردن ترانسفورماتورهای سه فاز

در ترانسفورماتورهای سه فاز امکان موازی بستن ترانسفورماتورها بدون توجه به گروه اتصال آنها وجود ندارد. در عمل و با توجه به‌اینکه سربندی و اتصال ترانسفورماتورها در داخل ترانسفورماتور صورت می‌گیرد امکان تعویض گروه ترانسفورماتور وجود ندارد. البته با توجه به تشابه برداری و تنها با تعویض اتصالات مطابق جدول (۲) با تغییر جای فازها،گروه ۵ و۱۱ را می‌توان به هم تبدیل کرد.

جدول۲ــ تبدیل گروه‌های ۵ و ۱۱ با تعویض محل اتصال از بیرون

عدد مشخصه موجود	عدد مشخصه مورد نیاز	نحوهٔ اتصال فازها به سیم‌پیچ ها					
		قسمت فشار قوی			قسمت فشار ضعیف		
		L۱	L۲	L۳	L۱	L۲	L۳
۵	۵	۱U	۱V	۱W	۲U	۲V	۲W
۱۱		۱U	۱W	۱V	۲W	۲V	۲U
۱۱	۱۱	۱U	۱V	۱W	۲U	۲V	۲W
۵		۱U	۱W	۱V	۲W	۲V	۲U

۲

در عمل برای پیدا کردن فازهای مشابه امروزه از دستگاه توالی سنج استفاده می‌شود، این دستگاه بدون نیاز به بستن مدار شکل(۴۶) می‌تواند نوع فازهای خروجی را قبل از اتصال به هم تشخیص دهد.

شکل ۴۶ــ نمای ظاهری دستگاه توالی سنج

خود را بیازمایید

۱ــ گروه اتصال را تعریف کنید.

۲ــ گروه اتصال Dyn۵ را تشریح کنید.

۳ــ گروه های اصلی اتصال ترانسفورماتور سه فاز را نام ببرید.

۴ــ مزایای استفاده از یک ترانسفورماتور به‌جای چند ترانسفورماتور موازی را بنویسید.

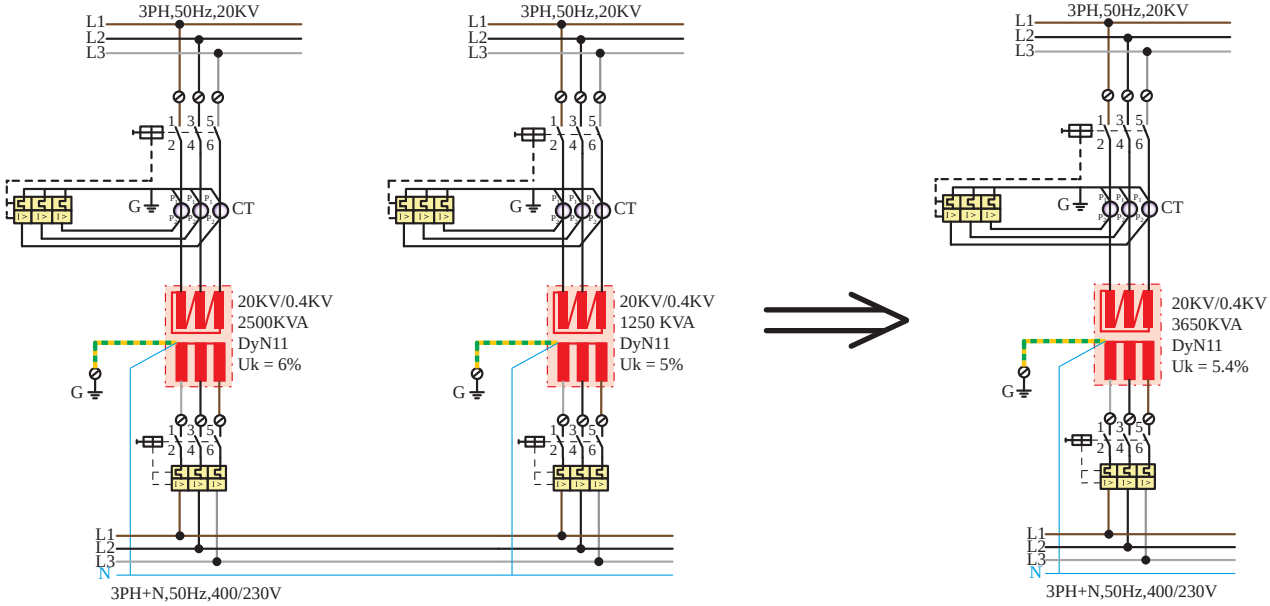
۵ــ شرایط اصلی و لازم برای موازی بستن ترانسفورماتورها را به‌طور کامل شرح دهید.

۶ــ نحوهٔ اتصال دو ترانسفورماتور تک‌فاز را به‌صورت موازی در شبکه توضیح دهید.

۷ــ کدام دو گروه از ترانسفورماتورها را می‌توان با تغییر اتصال به صورت موازی به شبکه اتصال داد؟ چگونه؟

۹ــ۲ــ محاسبه قدرت ظاهری ترانسفورماتور پس از اتصال موازی

وقتی چند ترانسفورماتور با هم موازی می‌شوند مشابه یک ترانسفورماتور بزرگ‌تر عمل می‌کنند (شکل ۴۷).



شکل ۴۷ــ ترانسفورماتورهای موازی و ترانسفورماتورمعادل آن

اگر چند ترانسفورماتور با قدرت ظاهری $S_{n_1}, S_{n_2}, S_{n_3}, \ldots$ که ولتاژ اتصال کوتاه آنها به‌ترتیب $U_{K_1}, U_{K_2}, U_{K_3}, \ldots$ باشد، و با حفظ شرایط لازم با هم موازی شوند، چنانچه کل بار الکتریکی تحمیل شده از سوی مصرف کننده $\sum S$ باشد همواره رابطه (۲ـ۲) در ترانسفورماتورهای موازی صدق می‌کند.

$$\frac{S_i}{\sum S} = \frac{U_{k_{eq}}}{U_{ki}} \times \frac{S_{ni}}{\sum S_n} \qquad (۲ـ۲)$$

$$S_i = \frac{U_{k_{eq}}}{U_{ki}} \times \frac{S_{ni}}{\sum S_n} \times \sum S \qquad (۲ـ۳)$$

در رابطه (۳ـ۲)

S_i توان ظاهری یکی از ترانسفورماتورهای مفروض موازی شده، مثلاً $S_1, S_2, S_3, \ldots$ است.

$U_{k_{eq}}$ درصد ولتاژ اتصال کوتاه نسبی معادل کل ترانسفورماتورهاست که از رابطه (۵ـ۲) باید محاسبه شود.

S_{n_i} توان نامی ظاهری ترانسفورماتور مفروض مثلاً S_{n_1} $S_{n_2}, S_{n_3}, \ldots$ می‌باشد.

$\sum S_n$ مجموع توان‌های نامی همه ترانسفورماتورهای موازی شده است.

از طرفی در ترانسفورماتورهای موازی شده با یکدیگر سهم مشارکت هر ترانسفورماتور برای زیر بار رفتن، نسبت قدرت نامی به ولتاژ اتصال کوتاه خودش تعریف می‌شود :

$$\text{سهم مشارکت هر ترانسفورماتور} = \frac{S_{ni}}{U_{ki}} \qquad (۲ـ۴)$$

بنابراین برای همه ترانسفورماتورهای موازی شده می‌توان نوشت :

مجموع سهم مشارکت هر ترانسفورماتور با سهم مشارکت ترانسفورماتورهای معادل کل برابر است.

عبارت ریاضی جمله فوق مطابق رابطه (۵ـ۲) می‌باشد.

$$\frac{\sum S_n}{U_{k_{eq}}} = \frac{S_{n_1}}{U_{k_1}} + \frac{S_{n_2}}{U_{k_2}} + \frac{S_{n_3}}{U_{k_3}} + \ldots \qquad (۲ـ۵)$$

چون در رابطه (۵ـ۲) توان نامی و درصد ولتاژ اتصال کوتاه نسبی همه ترانسفورماتورهای موازی شده معلوم است و با جمع توان نامی همه ترانسفورماتورها به‌راحتی می‌توان ΣS_n را نیز به‌دست آورد پس با انجام یک طرفین ساده می‌توان $U_{k_{eq}}$ را به‌دست آورد.

$$U_{k_{eq}} = \frac{\sum S_n}{\frac{S_{n_1}}{U_{k_1}} + \frac{S_{n_2}}{U_{k_2}} + \frac{S_{n_3}}{U_{k_3}} + \ldots} \qquad (۲ـ۶)$$

با توجه به رابطه (۶ـ۲) در صورتی که درصد ولتاژ اتصال کوتاه نسبی همه ترانسفورماتورها با هم برابر باشند درصد ولتاژ اتصال کوتاه نسبی معادل کل آنها نیز برابر درصد ولتاژ اتصال کوتاه نسبی تک تک ترانسفورماتورها خواهد شد. پس در این حالت خاص می‌توان از رابطه (۲ـ۲)، رابطه (۷ـ۲) را نتیجه گرفت.

$$\frac{S_i}{\sum S} = \frac{S_{ni}}{\sum S_n} \qquad (۲ـ۷)$$

مثال سه دستگاه ترانسفورماتور با مشخصات ذیل موازی شده‌اند :

$S_{n_1} = ۴۰۰\text{KVA}$ $S_{n_2} = ۶۳۰\text{KVA}$ $S_{n_3} = ۸۰۰\text{KVA}$

$U_{k_1} = ۶٪$ $U_{k_2} = ۵٪$ $U_{k_3} = ۴٪$

اگر کل بار الکتریکی اعمال شده به این ترانسفورماتور $\Sigma S = ۱۰۰۰\text{KVA}$ باشد میزان قدرت اخذ شده توسط هر ترانسفورماتور چقدر است؟

$$U_{k_{eq}} = \frac{\sum S_n}{\frac{S_{n_1}}{U_{k_1}} + \frac{S_{n_2}}{U_{k_2}} + \frac{S_{n_3}}{U_{k_3}}} =$$

$$= \frac{۱۸۳۰}{\frac{۴۰۰}{۰/۰۶} + \frac{۶۳۰}{۰/۰۵} + \frac{۸۰۰}{۰/۰۴}} \approx ۰/۰۴۶۶$$

$$S_1 = \frac{U_{k_{eq}}}{U_{k_1}} \times \frac{S_{n_1}}{\sum S_n} \times \sum S =$$

$$= \frac{۰/۰۴۶۶}{۰/۰۶} \times \frac{۴۰۰}{۱۸۳۰} \times ۱۰۰۰ = ۱۶۹/۸\text{KVA}$$

$$S_2 = \frac{U_{k_{eq}}}{U_{k_2}} \times \frac{S_{n_2}}{\sum S_n} \times \sum S =$$

$$= \frac{۰/۰۴۶۶}{۰/۰۵} \times \frac{۶۳۰}{۱۸۳۰} \times ۱۰۰۰ = ۳۲۰/۹\text{KVA}$$

$$S_۳ = \frac{U_{k_{eq}}}{U_{k۳}} \times \frac{S_{n۳}}{\sum S_n} \times \sum S =$$

$$= \frac{۰/۰۴۶۶}{۰/۰۴} \times \frac{۸۰۰}{۱۸۳۰} \times ۱۰۰۰ = ۵۰۹/۳ KVA$$

همان‌طور که از پاسخ مسئله پیداست به‌دلیل رعایت کردن شرط دوم موازی در ترانسفورماتورها، بار به درستی بین ترانسفورماتورها تقسیم شده است.

مثال سه دستگاه ترانسفورماتور با احتساب شرایط موازی با مشخصات ذیل موازی شده اند.

$S_{n۱} = ۵۰ KVA \quad S_{n۲} = ۲۵۰ KVA \quad S_{n۳} = ۸۰۰ KVA$

$U_{k۱} = ۴٪ \quad U_{k۲} = ۸٪ \quad U_{k۳} = ۵٪$

اگر کل بار الکتریکی اعمال شده به این ترانسفورماتور $\Sigma S = ۱۰۰۰ KVA$ باشد میزان قدرت اخذ شده توسط هر ترانسفورماتور چقدر است؟

$$U_{k_{eq}} = \frac{\sum S_n}{\frac{S_{n۱}}{U_{k۱}} + \frac{S_{n۲}}{U_{k۲}} + \frac{S_{n۳}}{U_{k۳}}} =$$

$$= \frac{۱۱۰۰}{\frac{۵۰}{۰/۰۴} + \frac{۲۵۰}{۰/۰۸} + \frac{۸۰۰}{۰/۰۵}} \approx ۰/۰۵۴$$

$$S_۱ = \frac{U_{k_{eq}}}{U_{k۱}} \times \frac{S_{n۱}}{\sum S_n} \times \sum S =$$

$$= \frac{۰/۰۵۴}{۰/۰۴} \times \frac{۵۰}{۱۱۰۰} \times ۱۰۰۰ = ۶۱/۳ KVA$$

$$S_۲ = \frac{U_{k_{eq}}}{U_{k۲}} \times \frac{S_{n۲}}{\sum S_n} \times \sum S =$$

$$= \frac{۰/۰۵۴}{۰/۰۸} \times \frac{۲۵۰}{۱۱۰۰} \times ۱۰۰۰ = ۱۵۳/۳ KVA$$

$$S_۳ = \frac{U_{k_{eq}}}{U_{k۳}} \times \frac{S_{n۳}}{\sum S_n} \times \sum S =$$

$$= \frac{۰/۰۵۴}{۰/۰۵} \times \frac{۸۰۰}{۱۱۰۰} \times ۱۰۰۰ = ۷۸۵/۴ KVA$$

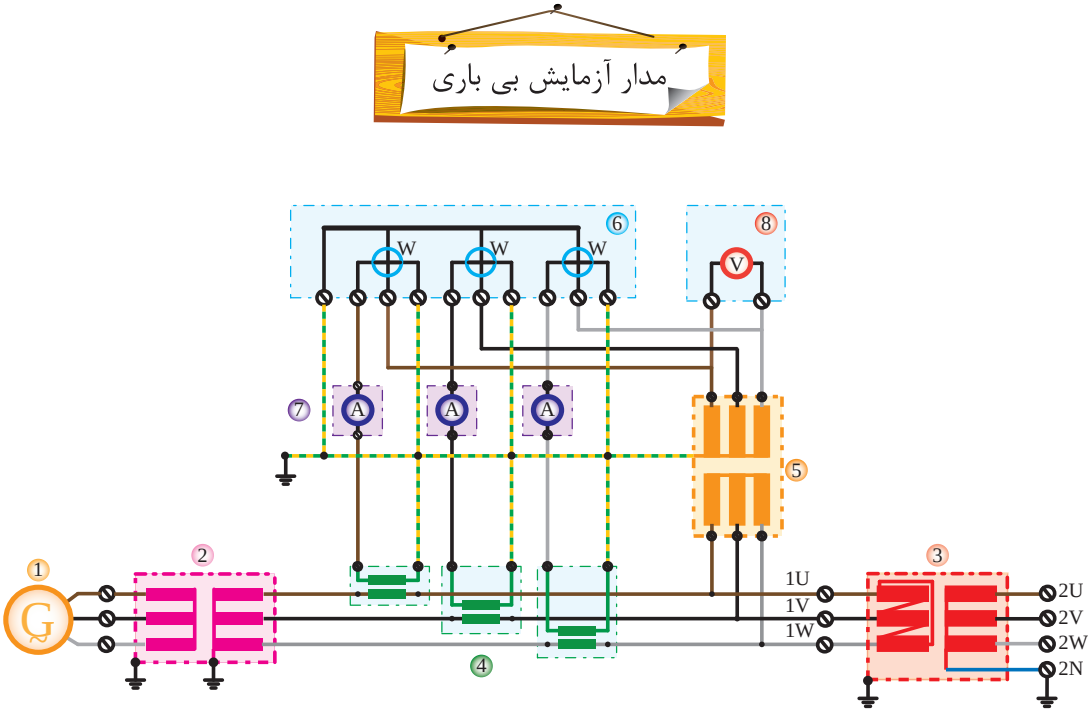
ملاحظه می‌شود ترانسفورماتور اوّل در وضعیت اضافه بار(over load)، ترانسفورماتور دوم در وضعیت کاهش بار (under load) و ترانسفورماتور سوم در نزدیکی قدرت نامی ترانسفورماتور زیر بار رفته‌اند که مسلماً شراکت بار به‌خوبی انجام نشده است.

خود را بیازمایید

ـ دو ترانسفورماتورموازی با توان‌های ۴۵ KVA و ۶۰ KVA به ترتیب دارای ولتاژ اتصال کوتاه ۶٪ و ۵/۵٪ می‌باشند و هر دو باری با توان ۸۰ KVA راتغذیه می‌کنند. سهم هر یک از دو ترانسفورماتور را در تقسیم بار محاسبه کنید.

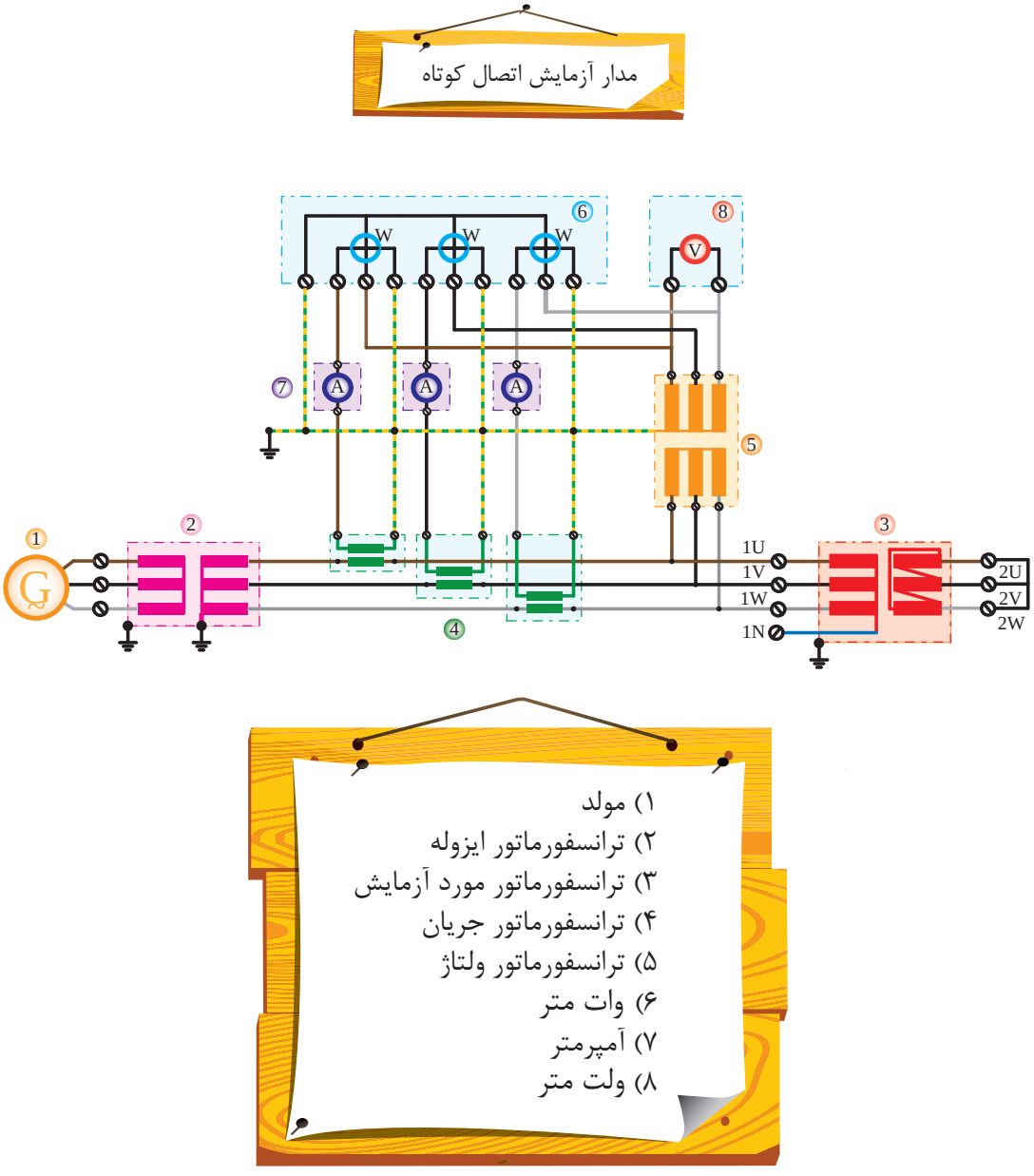
۱۰ـ۲ـ تلفات و راندمان

در ترانسفورماتورهای سه فاز نیز مانند ترانسفورماتورهای تک‌فاز تلفات شامل تلفات هسته P_{core} و تلفات مسی P_{Cu} می‌باشد که تلفات هستهٔ ترانسفورماتور را می‌توان با آزمایش بی‌باری و تلفات مسی را با آزمایش اتصال کوتاه بدست آورد. در شکل (۴۸) مدار مربوط به هر آزمایش ترانسفورماتور سه فاز نمایش داده شده است.



شکل ۴۸ــ الف) مدار مربوط به آزمایش بی باری ترانسفورماتور

۲



شکل ۴۸ــ ب) مدار مربوط به آزمایش اتصال کوتاه ترانسفورماتور

در اینجا نیز تلفات هسته به‌دلیل ثابت بودن ولتاژ ورودی جزو تلفات ثابت و تلفات مسی به‌دلیل تغییر بار مصرف کننده جزو تلفات متغیر محسوب می‌شوند.

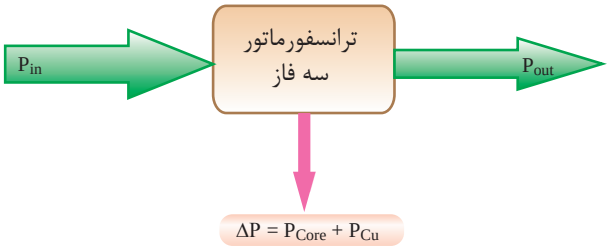
راندمان در تمام ماشین‌های الکتریکی از رابطه (۸ ــ ۲) محاسبه می‌شود با این تفاوت که در هر ماشین باید از روابط منحصر به آن استفاده نمود.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times ۱۰۰ \qquad (۸ــ۲)$$

در سیستم سه فاز توان الکتریکی حقیقی از رابطه (۹ــ۲) محاسبه می‌شود.

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos\varphi = S\cos\varphi \qquad (۲_۹)$$

از طرفی دیاگرام توازن توان در ترانسفورماتورهای سه فاز مطابق شکل (۴۹) می‌باشد.



شکل ۴۹ــ دیاگرام توازن توان در ترانسفورماتور سه فاز

با توجه به دیاگرام توازن توان و رابطه (۸ــ۲) داریم :

$$P_۱ = P_۲ + P_{core} + P_{Cu} \qquad (۲_۱۰)$$

$$\eta = \frac{P_۲}{P_۲ + P_{core} + P_{Cu}} \qquad (۲_۱۱)$$

با استفاده از دو رابطه (۹ــ۲) و (۱۱ــ۲) می‌توان نتیجه گرفت :

$$\eta = \frac{S_۲ \cos\varphi}{S_۲ \cos\varphi + P_{core} + P_{Cu_i}} \qquad (۲_۱۲)$$

ضریب بار با رابطه (۱۳ــ۲) تعریف می‌شود.

$$A = \frac{I}{I_n} = \frac{S}{S_n} \qquad (۲_۱۳)$$

بنابراین می‌توان تلفات مسی در بارهای متفاوت را از رابطه (۱۴ــ۲) بدست آورد.

$$A = \frac{P_{Cu_i}}{P_{Cu_n}} = (\frac{S_۲}{S_n}) \Rightarrow$$

$$P_{Cu} = P_{Cu_n} A^۲ \qquad (۲_۱۴)$$

با جاگذاری رابطه (۱۴ــ۲) در رابطه (۱۲ــ۲)، راندمان هر ترانسفورماتور را می‌توان با رابطه (۱۵ــ۲) بدست آورد.

$$\eta = \frac{AS_n \cos\varphi}{AS_n \cos\varphi + P_{Fe} + A^۲ P_{Cu_n}} \qquad (۲_۱۵)$$

S توان ظاهری قرار داده شده روی ترانسفورماتور برحسب VA

P_{Fe} تلفات بی‌باری (آهنی) خروجی آزمایش بی‌باری برحسب W

P_{Cu_n} تلفات بارداری (مسی) خروجی آزمایش اتصال کوتاه بر حسب W

P_{Cu} تلفات مسی متناظر با توان ظاهری بار روی ترانسفورماتور بر حسب W

S_n قدرت ظاهری نامی بر حسب VA

A ضریب بار

Cosφ ضریب قدرت بار مصرفی

در ترانسفورماتورهای سه فاز نیز مانند ترانسفورماتورهای تک‌فاز در صورتی که ضریب بار $A = \sqrt{\frac{P_{core}}{P_{Cu_n}}}$ باشد، راندمان به ماکزیمم مقدار خود خواهد رسید.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، چگونگی محاسبه تلفات و راندمان در ترانسفورماتورهای تک‌فاز و سه فاز شبیه یکدیگر است و تنها محاسبات ولتاژ و جریان در دو سیستم تک‌فاز و سه فاز با هم متفاوت است.

مثال یک ترانسفورماتور سه فاز ۱۰۰۰ KVA با ولتاژ ۲۰KV/۴۰۰V و گروه اتصال Dyn۱۱ در آزمایش بی‌باری ۱۷۰۰ W و در آزمایش اتصال کوتاه ۱۰۵۰۰W توان از شبکه دریافت می‌کند مطلوبست محاسبه : با ولتاژ

الف) راندمان ترانسفورماتور در صورتی که باری را با جریان و ولتاژ نامی و ضریب قدرت ۰/۸ پس فاز تغذیه کند.

جواب : وقتی جریان و ولتاژ بار نامی باشد بنابراین توان ظاهری آن نیز برابر توان نامی ترانسفورماتور یعنی ۱۰۰۰ KVA خواهد بود در این‌صورت توان مصرفی و راندمان برابر است با :

$$\eta = \frac{AS_n \cos\varphi}{AS_n \cos\varphi + P_{Fe} + A^۲ P_{Cu_n}}$$

$$= \frac{۱۰۰۰۰۰۰ \times ۰/۸}{۱۰۰۰۰۰۰ \times ۰/۸ + ۱۷۰۰ + ۱۰۵۰۰} = ۹۸/۵$$

ب) ماکزیمم راندمان این ترانسفورماتور در چه باری رخ

می‌دهد و در ضریب قدرت ۰/۸ راندمان آن چقدر است؟

$$A=\sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{Cu_n}}}=\sqrt{\frac{۱۷۰۰}{۱۰۵۰۰}}=۰/۴$$

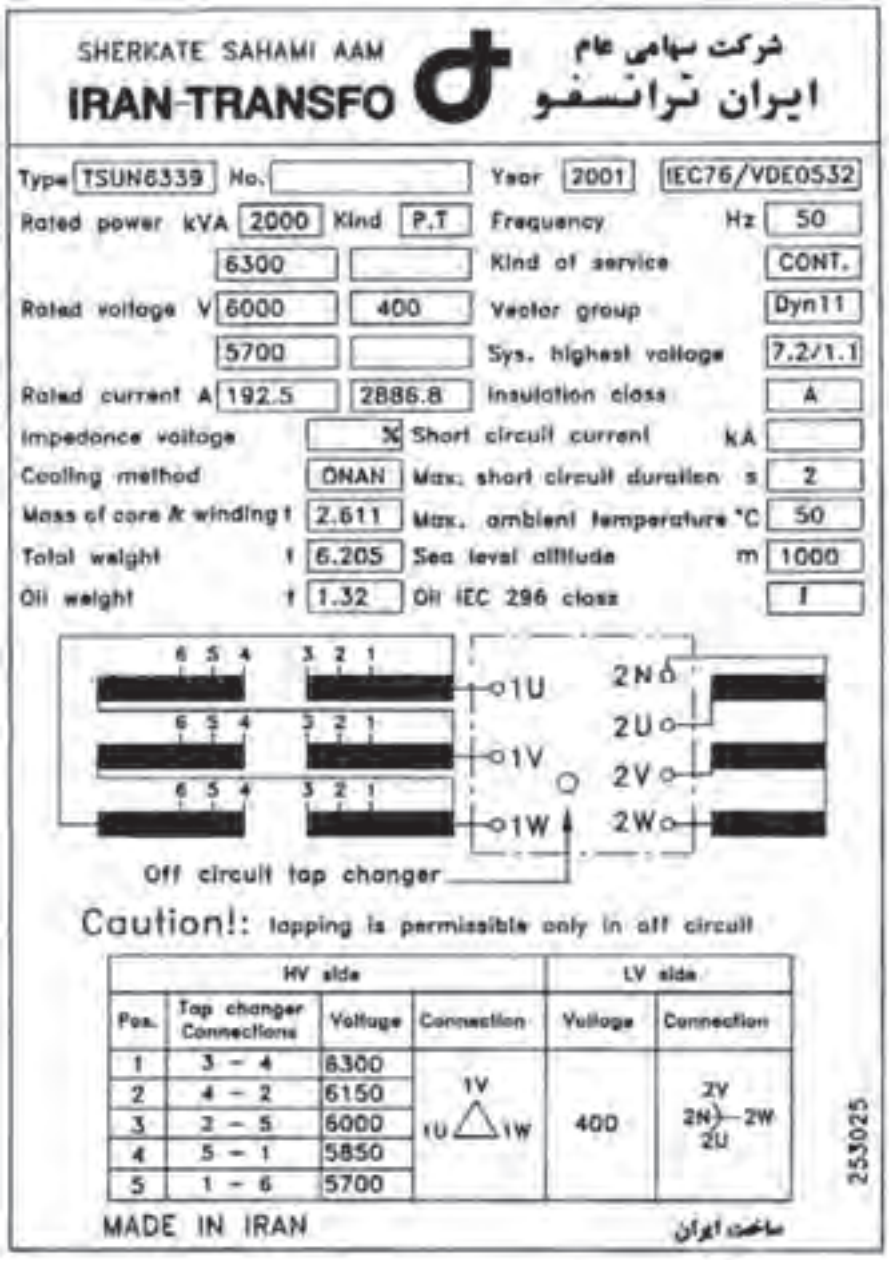
$$A=\frac{S}{S_n}\Rightarrow S=A\times S_n=۰/۴\times ۱۰۰۰=۴۰۰KVA$$

$$\eta=\frac{AS_n\cos\varphi}{AS_n\cos\varphi+P_{Fe}+A^۲P_{Cu_n}}$$

$$=\frac{۰/۴\times ۱۰۰۰۰۰۰\times ۰/۸}{۰/۴\times ۱۰۰۰۰۰۰\times ۰/۸+۱۷۰۰+(۰/۴^۲\times ۱۰۵۰۰)}\approx ۹۹$$

۱۱ــ۲ــ پلاک‌خوانی ترانسفورماتور

مشخصات هر ترانسفورماتور روی پلاک آن آورده می‌شود. در شکل (۵۰) پلاک یک ترانسفورماتور نشان داده شده است. پلاک هر ترانسفورماتور غالباً از جنس فولاد ضد زنگ یا سایر موارد غیر قابل‌خوردگی و مقاوم در برابر هوا ساخته شده و نوشته‌ها روی آن حکاکی می‌گردد.



شکل ۵۰ــ پلاک یک ترانسفورماتور توزیع

مشخصه	توضیحات
Type no.	نوع ترانسفورماتور با توجه به کد کارخانه
Year	سال تولید ۲۰۰۱ به میلادی
IEC76 / VDE 0532	شماره استاندارد ساخت ترانسفورماتور
Rated power	قدرت نامی به ۲۰۰۰KVA
Kind (PT)	نوع ترانسفورماتور (ترانسفورماتور ولتاژ)
Rated voltage	ولتاژ نامی (۴۰۰/۶۳۰۰–۶۰۰۰–۵۷۰۰ به ولت)
Kind of service	نوع کار (دائم CONT. =)
Vector group	گروه برداری (Dyn۱۱)
Frequency	فرکانس (۵۰ هرتز)
Rated current	جریان نامی (۲۸۸۶ /۱۹۲ آمپر)
System highest voltage	بیشترین ولتاژ قابل تحمل (۱/۱ / ۷/۲ کیلو ولت)
Insulation class	کلاس عایقی A
Impedance voltage	درصد ولتاژ اتصال کوتاه
Cooling method	روش خنک سازی ترانسفورماتور ONAN
Short circuit current	جریان اتصال کوتاه به آمپر
MAX. Short circuit duration	بیشترین زمان تحمل جریان اتصال کوتاه (۲ ثانیه)
MAX. Ambient temperature	بیشترین دمای مجاز محیط (۵۰°C)
Mass of core & winding	وزن هسته وسیم‌پیچ (۲/۶۱۱ تن)
Total weight	وزن کل (۶/۲۰۵ تن)
Oil weight	وزن روغن (۱/۳۲ تن)
Sea level altitude	ارتفاع از سطح دریا (۱۰۰۰ متر)
Oil IEC ۲۹۶ class	کلاس روغن براساس استاندارد IEC ۲۹۶ (I)

پرسش‌های پایان فصل(۲)

۱ــ وظیفهٔ ترانسفورماتور توزیع چیست؟

۲ــ چرا انتقال و مصرف انرژی الکتریکی در شبکه سه فاز اقتصادی‌تر است؟

۳ــ در ترانسفورماتور توزیع قدرت سیم‌پیچ فشار ضعیف و فشار قوی را به چه نحوی روی هسته می‌پیچند؟

۴ــ روش‌های تهویه و خنک‌سازی ترانسفورماتور را نام ببرید.

۵ــ مزایای ترانسفورماتورهای روغنی با مخزن بسته را نسبت به ترانسفورماتورهای روغنی با مخزن انبساط بیان کنید.

۶ــ ساختمان ترانسفورماتور با بالشتک گازی را شرح دهید.

۷ــ مزایای ترانسفورماتور خشک نسبت به روغنی چیست؟

۸ ــ محل قرار گرفتن رله بوخ‌هلتس در ترانسفورماتور کجاست؟ چرا؟

۹ــ رله بوخ‌هلتس در برابر چه خطاهایی عمل می‌کند؟

۱۰ــ چگونه دمای ترانسفورماتور نوع خشک کنترل می‌شود؟

۱۱ــ تأثیر رطوبت در ترانسفورماتور روغنی چیست؟

۱۲ــ شیر اطمینان در ترانسفورماتورها چه وظیفه‌ای دارد؟

۱۳ــ وظیفه بوشینگ را بنویسید.

۱۴ــ کدامیک از انواع اتصالات سه فاز در ولتاژهای بالا اقتصادی تر است؟

۱۵ــ وظیفه رله بوخ‌هلتس را بنویسید.

۱۶ــ منظور از گروه اتصال ترانسفورماتور چیست؟

۱۷ــ شرایط موازی کردن دو ترانسفورماتور با توان‌های نابرابر را بیان کنید.

مسائل پایان فصل(۲)

۱ــ دو ترانسفورماتور تک‌فاز کاملاً مشابه، با ولتاژ نامی ۴۴۰ولت و جریان نامی ۲۵ آمپر با اتصال مثلث باز به یکدیگر اتصال دارند؛

الف) توان نامی این دو ترانسفورماتور در شبکه سه فاز چقدر است؟

ب) اگر ترانسفورماتورها در شبکه تک‌فاز به صورت مجزا استفاده شوند، مجموع توان نامی آنها چقدر است؟

۲ــ دو ترانسفورماتور سه فاز با توانهای ۳۰ KVA و ۴۵KVA با ولتاژ اتصال کوتاه برابر بار ۶۰ KVA را تغذیه می‌کنند. سهم بار هر یک را بدست آورید.

۳ــ سه ترانسفورماتور سه فاز با توانهای ۲۰ KVA و ۳۵KVA و ۵۰ KVA به ترتیب دارای ولتاژاتصال کوتاه۶ و ۵/۴ و ۵ درصد می‌باشد. اگر توان تحمیلی بار ۹۰ KVA باشد مطلوب است : سهم بار هر یک از ترانسفورماتورها

۴ــ یک ترانسفورماتور سه فاز ۲۰Kv/۴۰۰v با توان ظاهری ۸۰ KVA دارای تلفات ثابت ۸۵۰W و تلفات متغیر ۱۲۵۰ W می‌باشد. راندمان ترانسفورماتوردر بار نامی و با ضریب قدرت ۰/۷۵ پس فاز را بدست آورید.

۵ ــ یک ترانسفورماتور ۶KV/۴۰۰V با توان نامی ۲۰KVA دارای تلفات آهنی و مسی نامی به ترتیب ۲۵۰W و۴۰۰W می‌باشد. بدست آورید :

الف) راندمان ترانسفورماتور در ۰/۷۵ بار نامی اهمی خالص

ب) راندمان ماکزیمم

۳

ماشین های القایی سه فاز

۳

هدف‌های رفتاری :

ـ مفاهیم آسنکرون و سنکرون را تعریف کند.
ـ ماشین آسنکرون را در دو حالت موتوری و مولدی تعریف کند.
ـ ساختمان ظاهری و داخلی ماشین آسنکرون را از روی شکل توضیح دهد.
ـ اساس کار موتورهای آسنکرون را توضیح دهد.
ـ چگونگی تولید میدان دوار در یک استاتور سه‌فاز دوقطبی را توضیح دهد.
ـ تأثیر فرکانس و تعداد قطب برسرعت میدان دوار را توضیح دهد.
ـ مثال مربوط به سرعت میدان دوار را تشریح کند.
ـ تمرین مربوط به سرعت میدان دوار را حل کند.
ـ لغزش را تعریف کند.
ـ علت ایجاد لغزش در موتورهای آسنکرون را توضیح دهد.
ـ مثال مربوط به محاسبه لغزش را تشریح کند.
ـ تمرین مربوط به محاسبه لغزش را حل کند.
ـ لغزش در حالت‌های مختلف موتور آسنکرون را توضیح دهد.
ـ اثر تغییرات لغزش بر مدار رتور را توضیح دهد.
ـ مشخصه‌های $T = f(s)$, $T = f(n)$ را رسم کند.
ـ با استفاده از مشخصه‌های $T = f(s)$, $T = f(n)$ گشتاورهای راه‌اندازی و بحرانی را نشان دهد.
ـ ساختمان داخلی روتور موتورهای قفسی را در کلاس‌های مختلف توضیح دهد.
ـ روش‌های راه‌اندازی موتورهای روتور قفسی را بیان کند.
ـ کاربرد موتورهای روتور قفسی را بیان کند.
ـ ساختمان داخلی موتورهای روتور سیم‌پیچی را توضیح دهد.
ـ اثر تغییر مقاومت مدار روتور سیم‌پیچی را در دو حالت راه‌اندازی و زیربار توضیح دهد.
ـ کاربرد موتورهای روتور سیم‌پیچی را بیان کند.
ـ انواع تلفات در موتورهای آسنکرون را تعریف کند.
ـ دیاگرام توازن قدرت در موتورهای آسنکرون را رسم کند.
ـ روابط توان، تلفات و بازده را توضیح دهد.
ـ مثال مربوط به توان و بازده را تشریح کند.
ـ تمرین مربوط به توان و بازده را حل کند.
ـ روش‌های کنترل سرعت در موتورهای القایی را شرح دهد.

ـ روش‌های ترمز در موتورهای القایی را شرح دهد.
ـ اطلاعات لازم را از پلاک موتورهای القایی استخراج کند.
ـ حالت مولدی ماشین‌های آسنکرون را توضیح دهد.
ـ تمرین‌های پایان فصل را حل کند.

۳

مقدمه

موتورهای القایی سه فاز، پرکاربردترین موتورهایی هستند که برای به حرکت درآوردن، چرخ‌های صنعت از آنها استفاده می‌شود. طراحی ساده و مستحکم، قیمت ارزان، هزینه نگهداری پایین و اتصال آسان به منبع سه فاز امتیازات اصلی موتورهای القایی هستند. با اینکه ساختمان موتورهای القایی سه فاز به مراتب ساده‌تر از موتورهای DC است. ولی مکانیزم عملکرد، کنترل سرعت و گشتاور در این نوع موتورها نیازمند درک عمیق‌تری از مفاهیم الکتریسیته و مغناطیس می‌باشد.

این نوع موتور در قدرت‌های متنوع (کسری از کیلو وات تا چند ده مگا وات) ساخته و بهره‌برداری می‌شوند.

شکل ۱ ــ انواع موتورهای الکتریکی و کاربرد آن در صنعت

۱ــ۳ــ ساختمان ماشین‌های القایی

به‌طور کلی هر ماشین القایی (موتور یا مولد القایی) از دو بخش استاتور و رتور تشکیل شده است. استاتور بخش ثابت و رتور بخش متحرک ماشین می‌باشد.

در شکل(۲) ساختمان ماشین القایی نشان داده شده است.

۱ــ۱ــ۳ــ استاتور : استاتور ماشین القایی، شامل بدنه، هسته مغناطیسی، سیم‌پیچ‌ها و یاتاقان‌ها می‌باشد.[۱]

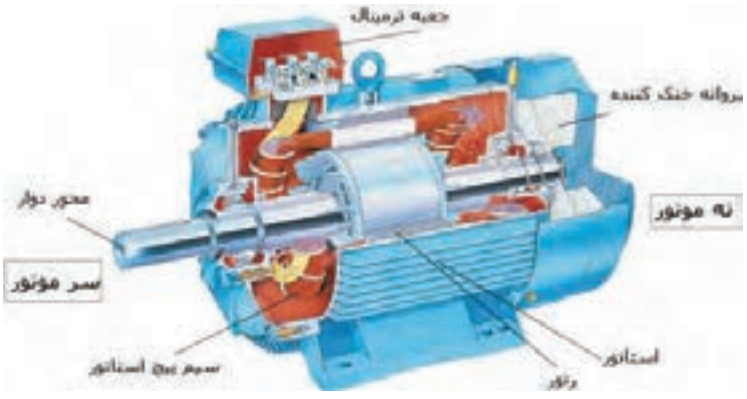
هسته استاتور، مجموعه‌ای از ورق‌های فولادی است که دارای شیار در سطح داخلی آن مطابق شکل (۳ــ الف) می‌باشد که پس از قرار گرفتن در کنار هم تشکیل یک حجم استوانه‌ای توخالی را مطابق شکل (۳ــ ب) می‌دهد.

سیم‌پیچ‌های سه فاز ماشین القایی در داخل همین شیارها قرار می‌گیرند.

در فصل۱ با پدیده هیسترزیس و فوکو آشنا شدید. در ماشین‌های القایی نیز به دلیل تلفات هیسترزیس، جنس هسته باید از فولاد الکتریکی با پسماند کم[۲] انتخاب شود تا تلفات هیسترزیس ماشین به حداقل ممکن برسد. همچنین برای کاهش تلفات فوکو نیز از روش ورق، ورق کردن هسته بهره می‌گیرند.

ابعاد هسته استاتور به‌گونه‌ای است که به‌راحتی در بدنهٔ فولادی، چدنی یا آلومینیومی استاتور محکم می‌شود این بدنه به‌صورت پره دار ساخته می‌شود تا برای تهویه بهتر، سطح تماس بیشتری با هوای محیط (سطح بیرونی) خود داشته باشد.

وظیفهٔ بدنه، پوشش نهایی ماشین القایی می‌باشد که هسته و سیم‌پیچ‌ها را در خود جای داده است و ضمن محافظت ماشین در برابر ورود اجسام خارجی امکان نصب ماشین را فراهم می‌کند. همچنین برای اتصال سیم‌پیچ ها روی بدنهٔ ماشین جعبه ترمینال[۳] قرار می‌گیرد.



شکل ۲ ــ اجزای تشکیل دهنده یک موتور القایی

۱ــ درصورت نیاز ممکن است به منظور خنک سازی ماشین القایی و یا حفاظت آن از لوازم بیشتری نظیر فن، هیتر یا گرم کن، سنسور لرزش، مقاومت‌های متغیر با دما و ... در آن استفاده شود.

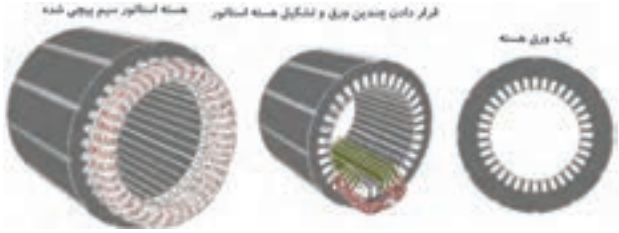
۲ــ فولاد سیلیس‌دار

۳ــ Terminal Box

۳

به علاوه دو درپوش و یاتاقان‌های طرفین ماشین به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که قسمت متحرک ماشین (رتور) به‌راحتی در داخل استاتور بچرخد و تکیه‌گاه مکانیکی مناسبی برای رتور فراهم شود. این بخش در ساختار الکتریکی ماشین نقشی ندارد و جزو تجهیزات مکانیکی ماشین به‌حساب می‌آید.

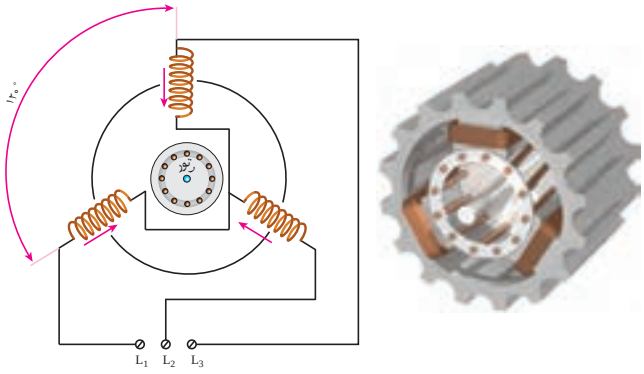
در موتورهای سنگین که جابه‌جایی آن برای افراد میسر نیست، یک قلاب در بالای بدنه ماشین پیش‌بینی می‌شود که بتوان با جرثقیل آن را جابه‌جا نمود.



(ج) (ب) (الف)

شکل ۳ــ هسته استاتور، بدنه و سیم‌پیچ استاتور

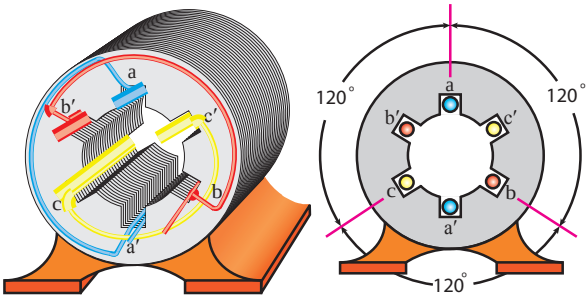
۲ــ۱ــ۳ــ سیم پیچ : استاتور ماشین القایی سه فاز با توجه به محیط 360° دایره‌ای شکل خود باید حداقل دارای سه سیم‌پیچ با اختلاف زاویه 120° مکانی از هم مطابق شکل (۴) باشد.



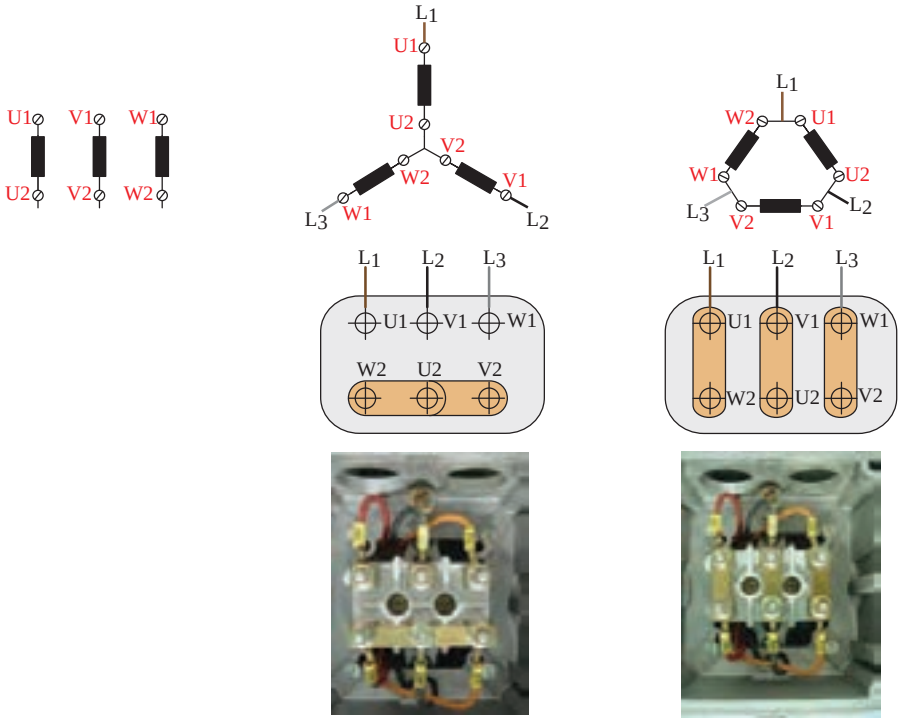
به اختلاف مکانی ۱۲۰ درجه سیم‌پیچ توجه کنید.

شکل ۴ ــ استقرار سیم‌پیچ‌های ماشین القایی ومدار الکتریکی آن

در عمل سیم‌پیچ‌های سه فاز استاتور ماشین القایی احتیاج به حداقل ۶ شیار مطابق شکل (۵) دارند. سیم‌پیچ‌ها به‌گونه‌ای جاسازی می‌شوند که هر سیم‌پیچ با دیگری 120° درجه اختلاف فاز مکانی داشته باشد. در این شکل سه دسته سیم‌پیچ با حروف (aa′, bb′, cc′) مشخص شده‌اند. در ماشین‌های القایی صنعتی شیارهای استاتور بیشتر از این تعداد می‌باشند.



شکل ۵ــ استاتورماشین الکتریکی سه فاز دو قطب شامل سه کلاف تک حلقه



شکل ۶ ــ نحوه اتصال سر سیم‌ها در ترمینال ماشین القایی سه فاز

در ماشین‌های القایی، سر و ته سیم‌پیچ‌ها (aa′, bb′, cc′)را به داخل جعبه ترمینال می‌آورند تا به ترمینال‌های خروجی متصل شوند. بدین ترتیب تغییر اتصال ستاره و یا مثلث در جعبه ترمینال بسیار ساده مانند شکل (۶) می‌باشد.

۳ــ۱ــ۳ــ رتور : رتور ماشین‌های القایی بر دو نوع است :

- رتور قفسی
- رتور سیم‌پیچی شده

هسته هر دو نوع رتور از ورقه‌های مغناطیسی دایره‌ای شکلی تشکیل شده‌اند که از مرکز آن محور فولادی رتور عبورکرده است. محور فولادی رتور بایستی از نظر مکانیکی از استحکام کافی برخوردار بوده ولی از نظر خاصیت مغناطیسی ضعیف باشد.

۴ــ۱ــ۳ــ رتور قفسی : این نوع رتور، از تعدادی میله‌های مسی یا آلومینیومی مطابق شکل (۲۱) تشکیل شده است که آنها را در داخل شیارهای ورقه مغناطیسی رتور تعبیه کرده‌اند. سپس این میله‌ها از هر دو طرف توسط دو حلقه هم‌جنس با میله‌ها (آلومینیوم یا مس) به هم متصل شده‌اند. شکل(۷) ابعاد چند نوع رتور قفسی را نشان می‌دهد.

شکل ۷ــ رتور قفسی در ابعاد مختلف

۵ــ۱ــ۳ــ رتور سیم‌پیچی شده (Wound rotor) :

بر روی این نوع رتور سه دسته سیم‌پیچ با اختلاف مکانی ۱۲۰ درجه مانند استاتور ماشین القایی سه فاز با همان تعداد قطب پیچیده می‌شوند. این سیم‌پیچ‌ها نسبت به بدنه رتور عایق شده است.

نمایی از این نوع رتور در شکل (۸) دیده می‌شود.

شکل ۸ ــ رتور سیم پیچی شده در ابعاد مختلف

نکات قابل توجه در رابطه با ماشین‌های القایی رتور سیم‌پیچی عبارتست از :

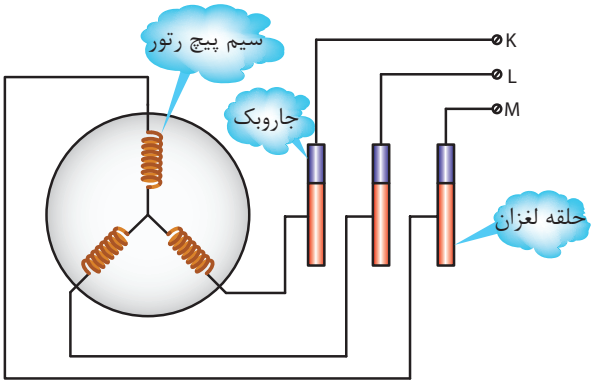
الف) تعداد شیارهای رتور همواره کمتر از تعداد شیارهای استاتور است.

ب) تعداد قطب‌های سیم پیچی رتور باید برابر با تعداد قطب‌های سیم‌پیچی استاتور باشد.

سیم پیچ‌های رتور اغلب با اتصال ستاره[1] به هم وصل می‌شوند و سه سر دیگر سیم پیچ‌ها توسط حلقه‌های لغزان[2] و جاروبک به بیرون رتور جهت اتصال به مقاومت راه‌انداز انتقال داده می شوند.

بدین ترتیب در ماشین‌های القایی رتور سیم‌پیچی، امکان دسترسی به مدار داخلی رتور وجود دارد.

مدار الکتریکی و اتصال سیم پیچ‌های رتور به حلقه‌های لغزان در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹ ــ مدار الکتریکی رتور سیم پیچی

خود را بیازمایید

۱ــ مزیت‌های ماشین القایی جریان متناوب نسبت به ماشین های جریان مستقیم را بیان کنید.

۲ــ به قسمت ثابت ماشین القایی...و به قسمت متحرک آن... می گویند.

۳ــ قسمت‌های اصلی استاتور ماشین القایی را نام ببرید.

۴ــ چرا هسته استاتور ماشین‌های القایی را به‌صورت ورقه ورقه و با پسماند کم می‌سازند؟

۵ــ اجزای تشکیل دهنده رتور قفسی را نام ببرید.

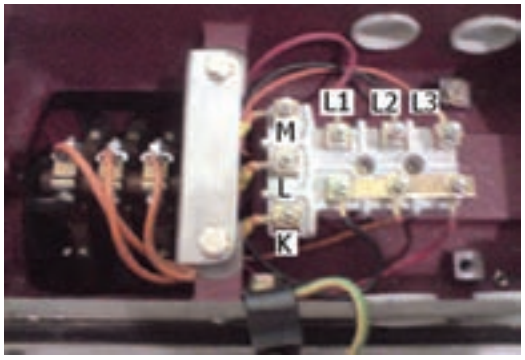
۱ــ گاهی در صنعت می‌توان موتورهای القایی رتور سیم پیچی شده‌ای یافت که سیم پیچ‌های رتور آن با اتصال مثلث به هم وصل شده باشند.

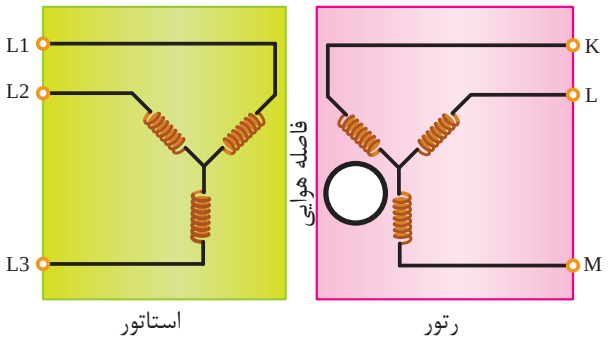
۲ــ Slip ring

۲ــ۳ــ اساس کار موتورهای القایی

مطابق شکل (۱۰)، مدار الکتریکی موتور القایی سه فاز رتور سیم پیچی شده مانند یک ترانسفورماتور سه فاز است. در واقع هر دو از اثر القای نیروی محرکه در سیم پیچ طرف دیگر استفاده می کنند لذا به این موتورها، موتورهای القایی گفته می‌شود.

البته در ساختار موتور القایی بین سیم استاتور (اولیه) و رتور (ثانویه) علاوه بر هسته مغناطیسی، فاصله هوایی نیز وجود دارد و از آنجا که در قدرت‌های یکسان، نیروی محرکه مغناطیسی بیشتری جهت غلبه بر تلفات مکانیکی رتور و مقاومت مغناطیسی ناشی از فاصله هوایی بین استاتور و رتور مورد نیاز است، بنابراین در قدرت یکسان جریان بی باری موتورهای القایی نسبت به ترانسفورماتورها بیشتر می‌باشد.





شکل ۱۰ ــ مدار الکتریکی(پایین) و جعبه ترمینال(بالا) موتور القایی با رتور سیم پیچی شده

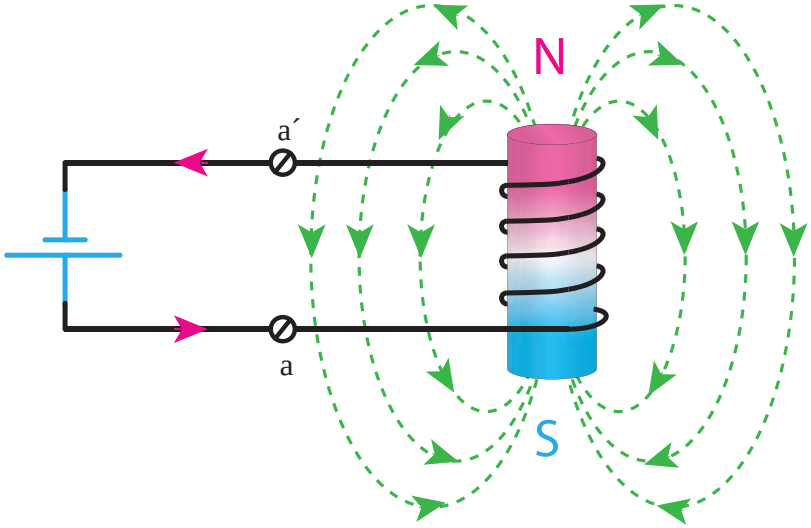
۳ــ۳ــ پدیده میدان دوار در ماشین‌های القایی

در این بخش پس از معرفی ساختار ماشین القایی سه فاز، ثابت می‌شود که چگونه با عبور جریان سه فاز از سه سیم پیچ استاتور ماشین القایی می‌توان میدان دوار ایجاد کرد به‌طوری‌که این میدان پیرامون هسته استاتور گردش نموده و بدین ترتیب شرایط لازم برای چرخش رتور را فراهم کند.

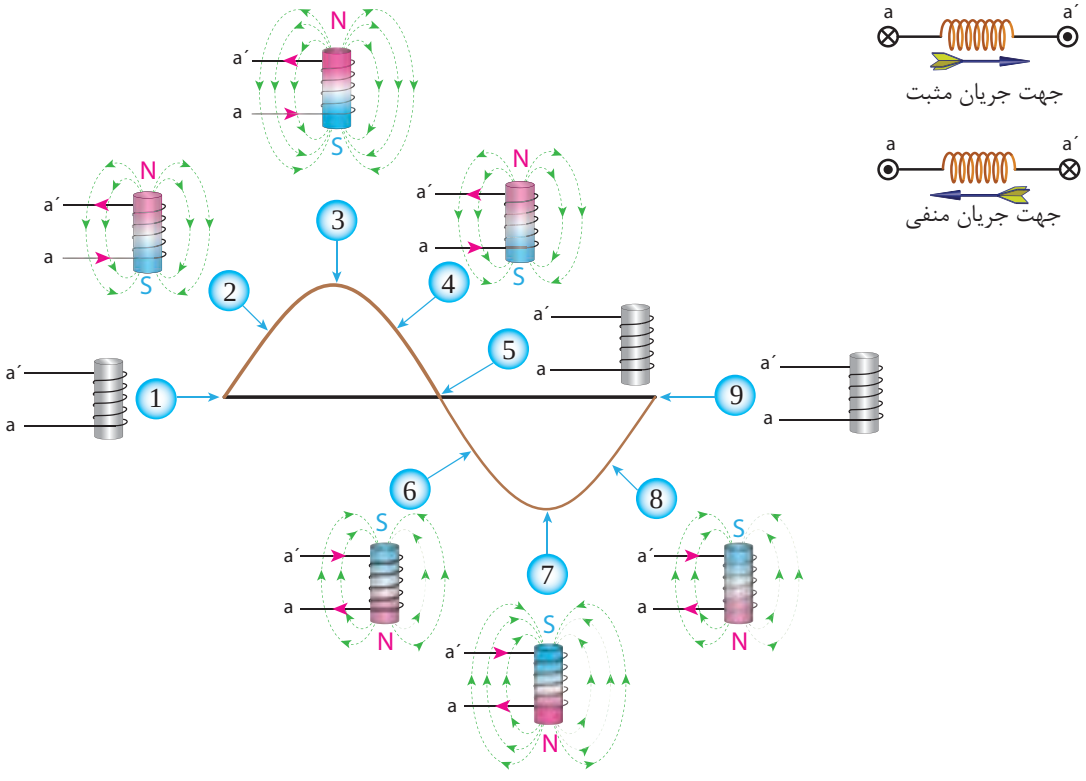
البته برای اثبات موضوع فوق از معادلات ریاضی بهره می‌گیرند ولی از آنجا که می‌توان این موضوع را با دلایل فیزیکی نیز شرح داد، لذا برای اثبات میدان دوار از تشریح فیزیکی میدان استفاده می‌گردد.

در آغاز انواع میدان‌های ایجاد شده توسط جریان‌های مستقیم و متناوب یادآوری می‌شود. مطابق شکل (۱۱) با عبور جریان DC از یک سیم‌پیچ می‌توان میدان ثابت ایجاد کرد. زیرا اندازه و جهت این میدان همواره ثابت است. همچنین با عبور

جریان متناوب تک فاز میدانی متغیر ایجاد می‌شود که به‌صورت ضربانی جهت آن در هر نیم سیکل مرتب تغییر می کند که به آن میدان ضربانی می‌گویند. جهت میدان‌های مغناطیسی اطراف سیم‌پیچ در جریان متناوب تکفاز مطابق شکل (۱۲) می‌باشد.



شکل ۱۱ــ میدان مغناطیسی حاصل از منبع جریان مستقیم

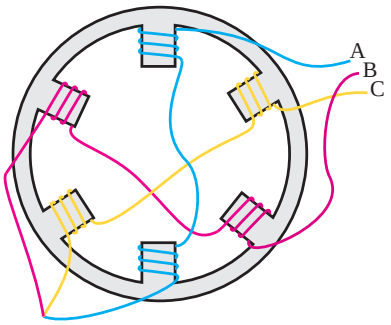


شکل ۱۲ــ جهت میدان مغناطیسی سیم پیچ در جریان متناوب

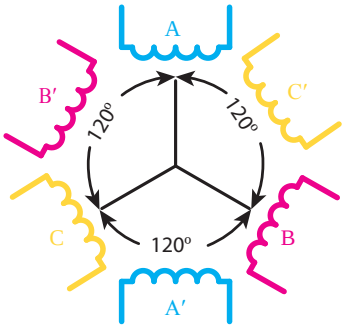
پیکان نشان داده شده در شکل ۱۲ جهت جریان فرضی وارد و خارج شده از سیم‌پیچ را نشان می‌دهد.

در ادامه نشان داده می‌شود که با عبور جریان‌های متناوب سه فاز در سه سیم‌پیچ مطابق شکل (۱۳) میدان‌های گردشی یا دوار ایجاد خواهد شد.

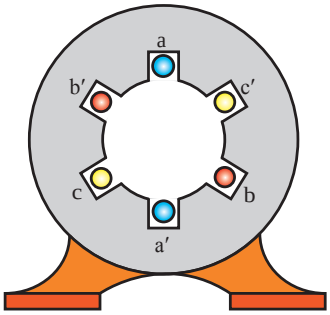
شکل (۱۳ــ الف) سیم‌بندی سه فازه ماشین القایی دوقطبی ساده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۳ــ ب، ج)، سیم‌پیچ‌های سه فاز c,b,a در بدنه استاتور، با اختلاف ۱۲۰ درجه مکانی نسبت به یکدیگر جاسازی شده‌اند در این ماشین بازوی برگشت سیم‌پیچ‌های هر فاز استاتور، ماشین



الف)شمای واقعی با ماشین القایی با سیم پیچ متمرکز



ب) نمایش کلاف‌ها بر اساس موقعیت مکانی



ج) شمای تک حلقه سیم‌بندی ماشین القایی با سیم پیچ گسترده بر اساس موقعیت مکانی

د) شکل واقعی ماشین القایی سیم پیچ متمرکز مدل آزمایشگاهی

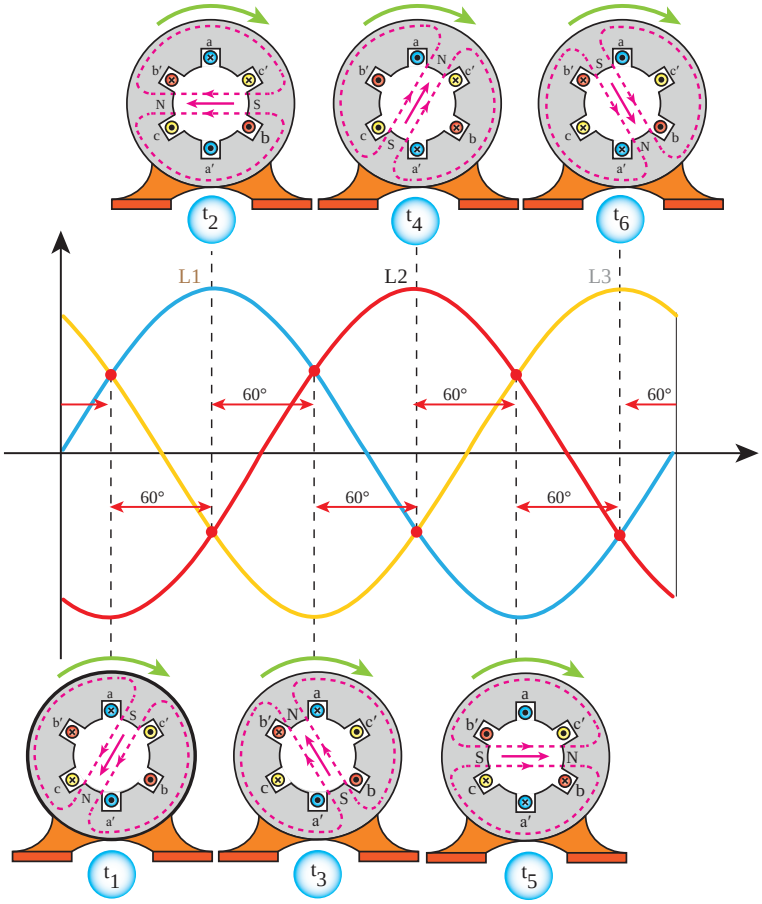
شکل ۱۳ــ ماشین القایی سه فاز

را به دو نیم تبدیل نموده است یعنی بازوی رفت سیم‌پیچ مثلاً a با بازوی برگشت آن یعنی a′، ۱۸۰ درجه اختلاف مکانی دارد بنابراین در این ماشین القایی میدان دو قطبی ایجاد می‌شود.

برای شروع انتهای سیم‌پیچ‌های سه فاز استاتور یعنی (a′,b′,c′) را با اتصال ستاره به هم متصل کرده و ابتدای آنها یعنی (a,b,c) را به منبع برق سه فاز با ولتاژ مناسب، وصل می‌کنند.

بلافاصله پس از اتصال برق سه فاز به سیم‌پیچ‌های استاتور، جریان الکتریکی در آن جاری می‌شود و سپس در هادی‌های هر سیم‌پیچ متناسب با جهت جریان عبوری از آن میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود.

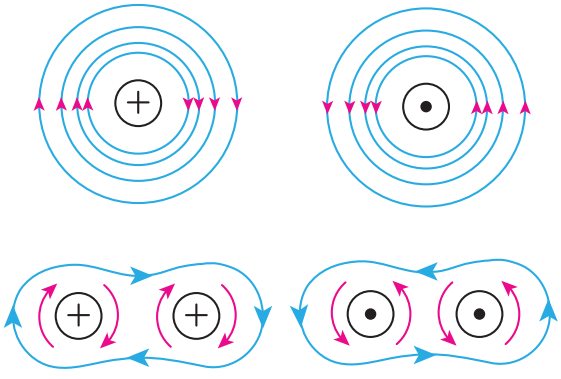
برای تحلیل آسان‌تر میدان دوار، اندازه و جهت جریان‌های سه فازه شکل (۱۴) در زمان‌های t_1 تا t_6 در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه فاصله هر یک از نمونه‌های زمانی ۶۰ درجه از یکدیگر می‌باشد. بنابراین با تحلیل این ۶ نقطه می‌توان گردش کامل میدان دوار را در مسیر دایره‌ای (یعنی ۳۶۰ درجه) بررسی نمود.



شکل ۱۴ــ میدان دوار استاتور در یک دوره تناوب

جدول (۱) تحلیل جهت جریان هر یک از سیم‌پیچ‌ها را در یک دوره تناوب شکل موج سه فاز نشان می‌دهد. جهت جریان هادی‌های هر شیار و وضعیت میدان‌های مغناطیسی استاتور در هر یک از زمان‌های t_1 تا t_6 به کمک جدول (۱) به‌دست می‌آید.

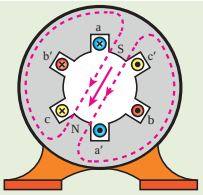
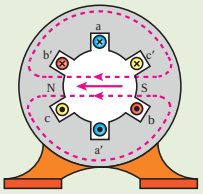
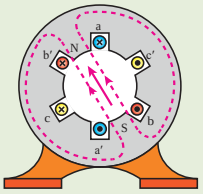
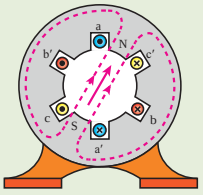
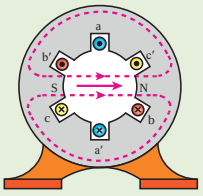
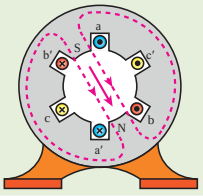
از آنجا که شیارهای استاتور، هادی‌های هر فاز را در خود جای داده‌اند و جهت جریان هادی‌های هر شیار در هر لحظه با توجه به فرض فوق قابل علامت‌گذاری هستند. لذا می‌توان جدول(۱) را کامل نمود. بنابراین با توجه به میدان مغناطیسی اطراف هادی‌های هم جوار، جهت میدان مغناطیسی ایجاد شده در هر لحظه به‌دست می‌آید.



شکل ۱۵ــ میدان مغناطیسی اطراف سیم حامل جریان و دو سیم مجاور یا جریان هم جهت

به عنوان نمونه با توجه به شکل موج جریان‌های سینوسی سه فاز، در لحظه t_1، فاز a مثبت، فاز b منفی و فاز c مثبت است. پس علامت جهت جریان در ابتدای سیم‌پیچ a، ⊗ و در انتهای آن یعنی a′، ⊙ درج می‌شود. این علامت‌ها برای فازهای دیگر نیز به همین ترتیب در سطر مربوط به هر زمان قرار داده می‌شود. با در نظر گرفتن جهت میدان مغناطیسی ایجاد شده از زمان t_1 تا t_6 می‌توان نتیجه گرفت که میدان مغناطیسی در هسته استاتور می‌چرخد. این میدان در حال گردش را میدان دوار می‌گویند.

جدول ۱ــ جهت جریان سیم پیچ‌های استاتور

	علامت جریان هر فاز			جهت جریان در مقاطع سیم پیچ						
	I_a	I_b	I_c	a	c′	b	a′	c	b′	
t_1	+	−	+	⊗	⊙	⊙	⊙	⊗	⊗	
t_2	+	−	−	⊗	⊗	⊙	⊙	⊙	⊗	
t_3	+	+	−	⊗	⊗	⊗	⊙	⊙	⊙	
t_4	−	+	−	⊙	⊗	⊗	⊗	⊙	⊙	
t_5	−	+	+	⊙	⊙	⊗	⊗	⊗	⊙	
t_6	−	−	+	⊙	⊙	⊙	⊗	⊗	⊗	

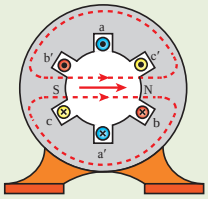
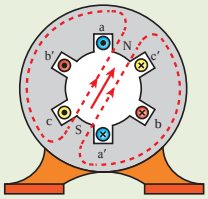
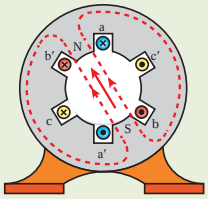
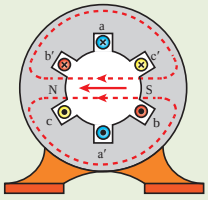
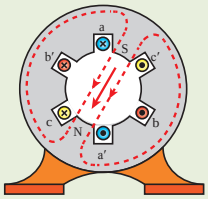
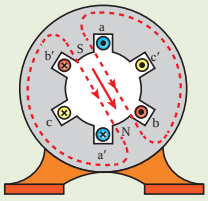
جهت گردش میدان ←

۴ــ۳ــ تغییر جهت چرخشی میدان دوار

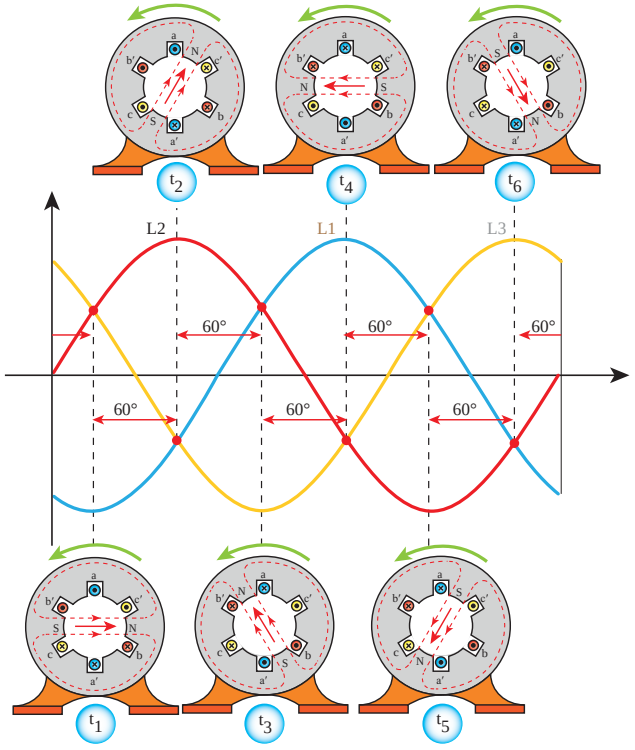
در صورتی که جای دو فاز از سه فاز متصل شده به ماشین القایی به اختیار عوض شود، میدان دوار ماشین القایی سه فاز تغییر جهت می‌دهد. این تغییر در جدول (۲) بر اساس شکل (۱۶) انجام شده است.

شکل (۱۶) جهت چرخش میدان مغناطیسی دوار را با تعویض جای فاز a و b نمایش می‌دهد. از این روش برای تغییر جهت گردش موتور القایی استفاده می‌شود.

جدول ۲ــ اثر تغییر جای دو فاز بر جهت میدان دوار

زمان	علامت جریان هر فاز			جهت جریان در مقاطع سیم پیچ						
	I_a	I_b	I_c	a	c′	b	a′	c	b′	
t_1	−	+	+	⊙	⊙	⊗	⊗	⊗	⊙	
t_2	−	+	−	⊙	⊗	⊗	⊗	⊙	⊙	
t_3	+	+	−	⊗	⊗	⊗	⊙	⊙	⊙	
t_4	+	−	−	⊗	⊗	⊙	⊙	⊙	⊗	
t_5	+	−	+	⊗	⊙	⊙	⊙	⊗	⊗	
t_6	−	−	+	⊙	⊙	⊙	⊗	⊗	⊗	

جهت گردش میدان ←



شکل ۱۶ــ جهت جریان سیم‌پیچ‌های استاتور و تغییر جهت میدان دوار در یک دوره تناوب

خود را بیازمایید

۱ــ چرا جریان بی‌باری موتورهای القایی بیشتر از ترانسفورماتورها می‌باشد؟

۲ــ آیا می‌توان با جریان مستقیم میدان دوار ایجاد کرد؟

۳ــ با توجه به علامت جریان‌های داده شده در جدول زیر، جهت جریان در سیم‌پیچ‌های ماشین القایی و جهت میدان دوار را تعیین کنید.

زمان	علامت جریان هر فاز			جهت جریان در مقاطع سیم‌پیچ					
	I_a	I_b	I_c	a	c′	b	a′	c	b′
t_1	+	+	−						
t_2	−	+	−						
t_3	−	+	+						
t_4	−	−	+						
t_5	+	−	+						
t_6	+	−	−						

۵ــ۳ــ عوامل مؤثر در سرعت میدان دوار

همانطور که ملاحظه کردید برای ترسیم میدان دوار از شکل موج جریان‌های سه فاز در فواصل منظم و در یک دوره تناوب استفاده می‌شود. حالا تصور کنید هر چه دوره تناوب در زمان کوتاه‌تری تکرار گردد مسلماً سرعت چرخشی میدان دوار نیز بیشتر خواهد شد و بالعکس با افزایش زمان دوره تناوب سرعت میدان دوار کندتر می‌شود.

یکی از کمیت‌های شبکه برق متناوب، فرکانس f است که با دوره تناوب T نسبت عکس دارد. پس می توان نتیجه گرفت یکی از عوامل مؤثر بر سرعت میدان دوار، فرکانس شبکه برق می‌باشد ولی از آنجا که فرکانس متناسب با عکس زمان تناوب است، بنابراین با کاهش فرکانس، سرعت چرخش میدان دوار، کم می‌شود و با افزایش فرکانس، سرعت چرخش میدان دوار زیاد می‌شود.

سرعت میدان دوار ماشین القایی را با n_s نمایش می‌دهند و آن را سرعت سنکرون می‌نامند.

سرعت میدان دوار متناسب با فرکانس است بنابراین می‌نویسیم :

$$n_s \propto f$$

از آنجا که جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها در یک دوره تناوب فقط یکبار تغییر جهت می‌دهند، می‌توان نتیجه گرفت که قطب‌های N و S میدان دوار در این مدت فقط یکبار عوض می‌شود. بنابراین در یک ماشین دو قطبی که قطب‌ها (۳۶۰ درجه) محیط استاتور را اشغال کرده‌اند در یک دوره تناوب، میدان دوار یک دور محیط استاتور را طی می‌کند در حالی که در یک ماشین چهار قطبی که هر دو قطب آن (۱۸۰ درجه) محیط استاتور را اشغال کرده است در یک دوره تناوب، میدان دوار تنها نیم دور (۱۸۰ درجه) محیط استاتور را طی می‌کند. پس می‌توان نتیجه گرفت، افزایش تعداد قطب‌های استاتور باعث کم‌شدن سرعت میدان دوار می‌شود.

بنابراین عامل دیگر تعیین کننده سرعت میدان دوار، تعداد قطب‌های سیم بندی ماشین القایی می‌باشد.

با مراجعه به جدول(۳) دیده می‌شود که میدان دوار ماشین ۴ قطبی در مقایسه با ماشین ۲ قطبی در یک دوره تناوب نیم دور محیط استاتور را طی می‌کند.

با توجه به جدول (۳) سرعت میدان دوار با رابطه $\frac{۲}{P}$ متناسب است.

$$n_s \propto \frac{۲}{P}$$

p تعداد قطب‌ها

n_s سرعت میدان دوار

جدول۳ــ اثر افزایش تعداد قطب ماشین القایی بر سرعت رتور

چرخش میدان در یک دوره تناوب	محیط اشغال شده توسط یک جفت قطب	تعداد قطب‌ها
$\frac{۲}{۲}$ = یک دور کامل	$\frac{۳۶۰^\circ}{\frac{۲}{۲}} = \frac{۳۶۰^\circ}{۱} = ۳۶۰^\circ$	۲
$\frac{۲}{۴}$ = نیم دور	$\frac{۳۶۰^\circ}{\frac{۴}{۲}} = \frac{۳۶۰^\circ}{۲} = ۱۸۰^\circ$	۴
$\frac{۲}{۶}$ = ثلث دور	$\frac{۳۶۰^\circ}{\frac{۶}{۲}} = \frac{۳۶۰^\circ}{۳} = ۱۸۰^\circ$	۶
...	...	...
$\frac{۲}{P}$ دور	$\frac{۳۶۰^\circ}{\frac{P}{۲}}$	p

رابطه سرعت میدان دوار با در نظر گرفتن هر دو عامل فرکانس و تعداد قطب‌های سیم‌پیچی به صورت زیر نوشته می‌شود :

$$n_s = \frac{۲ \times f}{P} \qquad (۳_۱)$$

(n_s بر حسب دور در ثانیه)

سرعت میدان دوار در رابطه (۳ـ۱) بر حسب دور بر ثانیه می‌باشد ولی از آنجا که سرعت ماشین‌های دوار را معمولاً بر حسب دور بر دقیقه[۱] (RPM) نمایش می‌دهند، لذا رابطه سرعت میدان دوار به صورت رابطه (۳ـ۲) خواهد شد.

$$n_s = \frac{۱۲۰ \times f}{P} \qquad (۳_۲)$$

در رابطه (۳ـ۲) :

n_s سرعت میدان دوار بر حسب RPM

f فرکانس شبکه برق بر حسب Hz

P تعداد قطب‌های سیم‌بندی ماشین القایی

به یاد داشته باشید که فرکانس در شبکه های برق ثابت است در نتیجه حداکثر سرعت میدان دوار در ماشین القایی دو قطبی ایجاد می‌شود.

مثال : سرعت میدان دوار یک ماشین ۲ قطبی در شبکه برق ایران با فرکانس (۵۰Hz) چقدر است؟

$$n_s = \frac{۱۲۰f}{P} = \frac{۱۲۰ \times ۵۰}{۲} = ۳۰۰۰ RPM$$

این سرعت بیشترین مقداری است که میدان دوار ماشین القایی در اتصال به شبکه برق کشور ایران می‌تواند داشته باشد.

خود را بیازمایید

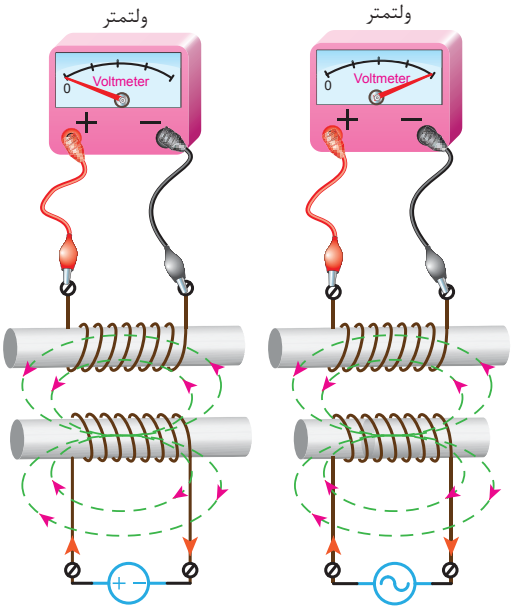
۱ـ در ماشین القایی هر چقدر دوره تناوب بزرگ‌تر باشد سرعت میدان دوار ..... است.

۲) چرا در ماشین‌های القایی هر چقدر تعداد قطب‌ها بیشتر باشد سرعت میدان دوار کمتر می‌شود؟

۳) سرعت میدان دوار ماشین القایی ۱۰۰۰ RPM و فرکانس شبکه ۵۰ Hz می‌باشد. تعداد قطب‌های ماشین را به‌دست آورید.

۶ـ۳ـ نحوه ایجاد چرخش رتور در موتورهای القایی

تغییرات فوران عامل ایجاد نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچ است. از آنجاکه جریان DC فوران با مقدار ثابت تولید می‌کند لذا سیم‌پیچ حامل جریان DC در سیم‌پیچ مجاور خود نیروی محرکه القا نمی‌کند.

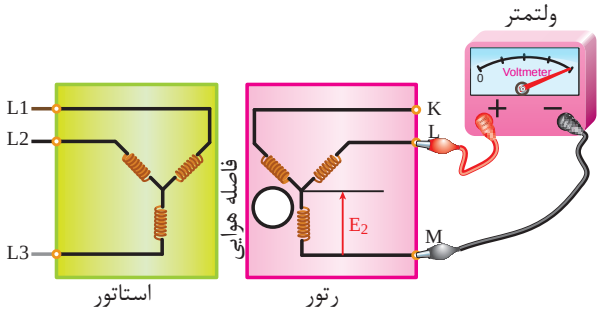


شکل ۱۷ـ ایجاد ولتاژ القایی باولتاژ متناوب (سمت راست) عدم ایجاد ولتاژ القایی با ولتاژ جریان مستقیم(سمت چپ)

۱ـ Revolution Per Minute

۳

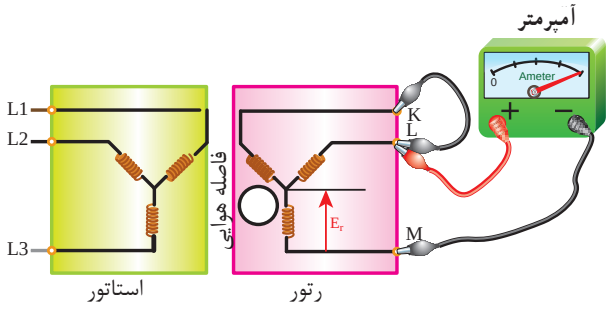
با اتصال سیم‌پیچ استاتور ماشین القایی رتور سیم‌پیچی شده به منبع ولتاژ متناوب و ایجاد میدان دوار در استاتور طبق قانون القای فارادی، نیروی محرکه‌ای متناسب با آهنگ تغییرات فوران در سیم‌پیچ‌های رتور القاء خواهد شد. اما، با باز بودن مدار خروجی M,L,K رتور شکل(۱۸)، رتور حرکت نمی‌کند و با قرار دادن یک ولت‌متر مطابق شکل (۱۸) در دو سر سیم‌پیچی رتور می‌توان مقدار نیروی محرکه القایی سیم‌پیچی رتور را اندازه گرفت. از آنجا که رتور در این حالت ساکن است و چرخش ندارد، این نیروی محرکه القایی را ولتاژ حالت سکون رتور می‌نامند و آن را با E_2 نمایش می‌دهند.



شکل ۱۸ ــ مدار الکتریکی ماشین القایی رتور سیم پیچی شده در حالی که استاتور آن توسط منبع سه فاز برقدار گردیده و مدار رتور آن باز است

در واقع با ایجاد میدان دوار استاتور، نیروی محرکه E_2 در سیم‌پیچی رتور القاء می‌شود ولی از آنجا که جریانی از مدار رتور عبور نمی‌کند در نتیجه نیروی لورنس هم به سیم‌پیچی رتور وارد نمی‌شود.

در صورتی که بخواهیم به رتور نیروی لورنس وارد شود باید در سیم‌پیچی رتور جریان جاری شود. بنابراین اگر حلقه‌های خروجی مدار رتور مطابق شکل (۱۹) به یکدیگر اتصال داده شوند و آمپرمتر در مسیر M و L قرار گیرد، مدار رتور بسته می‌شود و در سیم‌پیچی رتور جریان جاری می‌شود و نیروی لورنس پدید می‌آید لذا رتور حول محورش می‌گردد و تا زمانی که سیم‌پیچ استاتور به برق اتصال داشته باشد رتور به حرکت خود ادامه خواهد داد.



شکل ۱۹ــ مدار الکتریکی ماشین القایی رتور سیم پیچی شده در حالی که استاتور آن توسط منبع سه فاز برقدار و مدار رتورآن اتصال کوتاه است

ولتاژ القاء شده در مدار بستهٔ رتور باعث جاری شدن جریان در سیم‌پیچ‌های آن می‌شود.

آمپرمتر شکل (۱۹) جریان یکی از فازهای سیم‌پیچ رتور را نشان می دهد. این جریان را جریان رتور می‌نامند و آن را با I_r نمایش می‌دهند.

خود را بیازمایید

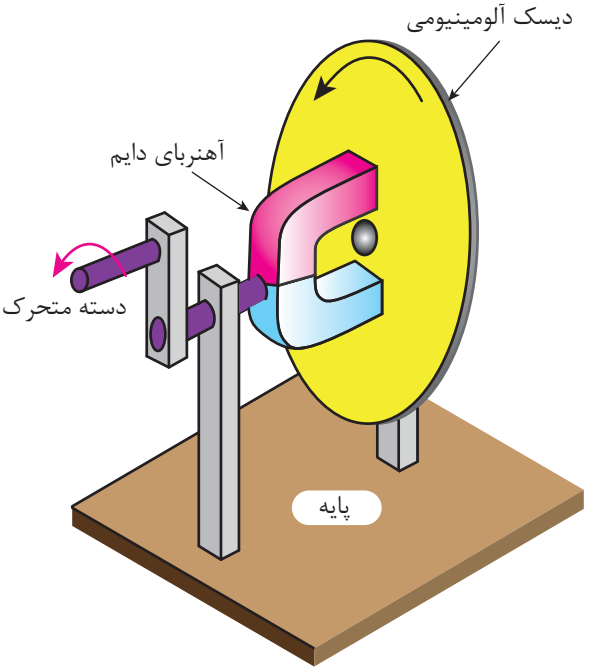
۱ــ چرا برای به چرخش در آمدن رتور ماشین القایی علاوه بر میدان دوار، سیم پیچی رتور نیز باید حامل جریان باشد؟

۲ــ منظور از ولتاژ حالت سکون در ماشین القایی با رتور سیم پیچی شده چیست؟

۳ــ هرچقدر اختلاف سرعت رتور ومیدان دوار کمتر باشد ولتاژ القایی در رتور ..... است.

۷ــ۳ــ موتورهای القایی رتور قفس سنجابی

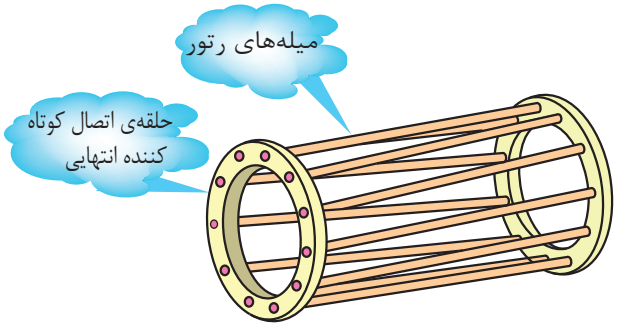
شکل (۲۰) چگونگی چرخش رتور قفسی در موتورهای القایی را به سادگی نمایش داده است. شما می‌توانید با تهیه وسایل نشان داده شده، این آزمایش را انجام دهید. در این آزمایش با چرخاندن دسته متحرک، آهنربای دائم می‌چرخد و در پی آن دیسک آلومینیومی نیز که اندکی از آهنربا فاصله دارد به حرکت در می‌آید.

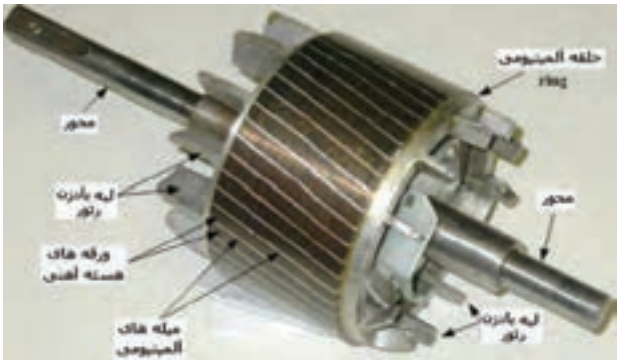


شکل ۲۰ ــ یک وسیله ساده برای فهم بهتر اثر میدان دوار در چرخش دیسک

آیا با توجه به چرخش میدان و تغییر میدان مغناطیسی در دیسک آلومینیومی مطابق آنچه در شکل (۲۰) می‌بینید، می‌توان نتیجه گرفت که عامل چرخش دیسک القای نیروی محرکه و ایجاد جریان القایی در آن است؟

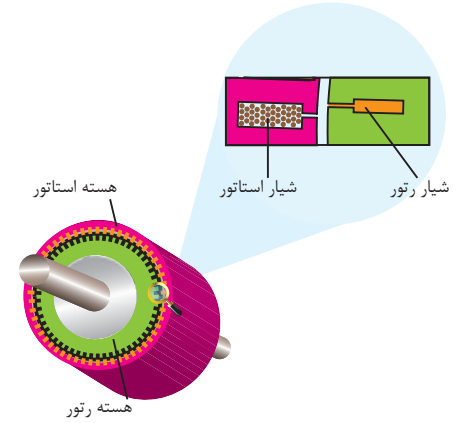
در شکل (۲۱) ابتدا و انتهای مفتول‌ها به یکدیگر متصل و در نتیجه مدار اتصال کوتاه شده‌ای در هادی‌های رتور ایجاد شده است و از آنجا که شکل ایجاد شده شبیه یک قفس است، به همین دلیل به رتور شکل (۲۱) رتور قفسی می‌گویند. برای ساختن این نوع رتور ابتدا ورقه‌های هسته رتور را کنار یکدیگر قرار می دهند تا هسته یکپارچه رتور تشکیل شود سپس

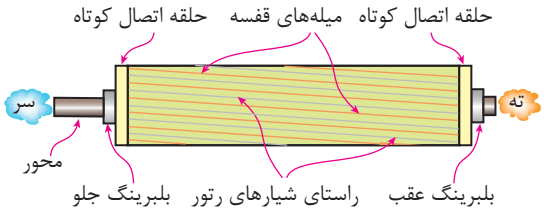




شــکل۲۱ــ ساختمان رتور قفسی(ســمت راســت) رتور کامل با معرفی اجزای آن(سمت چپ)

آلومینیوم و یا گاهی مس ذوب شده را به داخل هسته رتور تزریق می‌نمایند. مادهٔ مذاب تزریق شده در هسته پس از سرد شدن به شکل مفتول‌هایی درمی‌آیند که در داخل هسته قالب‌گیری شده است. لذا این هادی‌ها نسبت به هسته عایق نیستند.





شکل ۲۲ــ نمایش انحراف شیارهای رتور نسبت به امتداد شیارهای استاتور

از آنجا که شکل (۲۱) شبیه قفس سنجاب به‌نظر می‌رسد، ماشین‌های القایی که ساختمان رتور آنها این‌گونه است را قفس سنجابی نیز می گویند.

مطابق شکل (۲۲) در اغلب ماشین‌های القایی شیارهای رتور با محور ماشین موازی نیستند یعنی شیارها نسبت به محور ماشین مورب است. این عمل باعث کاهش سر و صدای رتور در زمان چرخش آن می‌شود. معمولاً انحراف شیارهای رتور به اندازهٔ پهنای یک شیار استاتور در نظر گرفته می‌شود. در ماشین‌های القایی با شیارهای مورب، راه‌اندازی سریعتر بوده و قابلیت تحمل اضافه بار در چنین ماشین‌هایی بیشتر است.

ماشین‌های القایی قفس سنجابی از نظر ساختمان ساده تر و از نظر اقتصادی به صرفه تر از ماشین‌های رتور سیم‌پیچی شده هستند و کمتر به تعمیر و نگهداری احتیاج دارند.

خود را بیازمایید

ــ وظیفه دو حلقه ای که در طرفین میله‌های رتور قفسی به مفتول‌ها متصل می شوند، چیست؟

تحقیق کنید

چرا جریان القاشده در هادی‌های رتور قفسی با اینکه رتور عایق نشده است، به بدنه ماشین منتقل نمی‌شود؟

۸ــ۳ــ لغزش در ماشین‌های القایی

در ماشین القایی به اختلاف سرعت رتور (n_r) با سرعت میدان دوار (n_s) سرعت لغزش می گویند. و آن را با رابطه (۳ــ۳) نشان می دهند.

$$\Delta n = n_s - n_r \qquad (۳ــ۳)$$

از آنجا که سرعت رتور متغیر است لذا سرعت لغزش هم به تناسب آن تغییر می‌کند. نسبت سرعت لغزش به سرعت میدان دوار را لغزش می‌گویند و آن را با S نمایش می‌دهند.

$$S = \frac{\Delta n}{n_s} \qquad (۳ــ۴)$$

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \qquad (۳ــ۵)$$

معمولاً لغزش را در ماشین‌های القایی به صورت درصد نمایش می‌دهند و آن را از رابطه زیر محاسبه می‌کنند.

$$\% S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times ۱۰۰$$

مثال رتور موتور القایی چهار قطب در فرکانس ۵۰ HZ با سرعت ۱۴۵۰ RPM می‌چرخد مطلوب است. سرعت لغزش و لغزش این موتور القایی :

$$n_s=\frac{۱۲۰f}{P}=\frac{۱۲۰\times۵۰}{۴}=۱۵۰۰RPM$$

$$\Delta n=n_s-n_r=۱۵۰۰-۱۴۵۰=۵۰RPM$$

$$S=\frac{\Delta n}{n_s}=\frac{۵۰}{۱۵۰۰}=۰/۰۳$$

$$۰/۰۳\times۱۰۰=۳٪$$

با توجه به رابطه (۵ـ۳) می‌توان نوشت :

$$S=\frac{n_s-n_r}{n_s}\Rightarrow sn_s=n_s-n_r\Rightarrow n_r=n_s-sn_s$$

$$n_r=n_s(۱-s) \qquad (۳ـ۶)$$

از رابطه (۶ـ۳) برای محاسبه سرعت رتور می‌توان استفاده نمود.

مثال اگر لغزش یک موتور القایی چهار قطب در فرکانس ۵۰ HZ، ده درصد باشد، سرعت رتور را محاسبه نمایید.

$$n_s=\frac{۱۲۰f}{P}=\frac{۱۲۰\times۵۰}{۴}=۱۵۰۰RPM$$

$$S=۱۰٪=\frac{۱۰}{۱۰۰}=۰/۱$$

$$n_r=n_s(۱-S)=۱۵۰۰(۱-۰/۱)=۱۳۵۰RPM$$

۹ـ۳ـ رفتار ماشین‌های القایی در لغزش های مختلف

در بخش قبل گفته شد که لغزش ماشین القایی با مقادیر مختلف سرعت رتورتغییر می‌کند. در این قسمت مقادیر لغزش در سرعت‌های متفاوت رتور بررسی می‌گردد.

۱ـ۹ـ۳ـ لغزش در زمان راه‌اندازی : به محض اتصال سیم پیچ‌های استاتور ماشین القایی سه فاز به برق یعنی هنگام راه‌اندازی سرعت رتور صفر است ولی میدان دوار با سرعت سنکرون می‌چرخد. بنابراین خواهیم داشت :

$$n_r=۰\Rightarrow S=\frac{n_s-۰}{n_s}=۱$$

$$\Delta n=n_s$$

لغزش ماشین در زمان **راه‌اندازی** برابر ۱ یا ۱۰۰٪ است.

۲ـ۹ـ۳ـ لغزش در سرعت سنکرون : اگر رتور بتواند با سرعتی برابر سرعت سنکرون و یا با همان سرعت میدان دوار گردش کند لغزش ماشین صفر می‌شود.

$$n_r=n_s\Rightarrow S=\frac{n_s-n_s}{n_s}=۰$$

$$\Delta n=۰$$

این‌کار زمانی امکان‌پذیر است که رتور ماشین القایی به کمک یک نیروی محرکه خارجی به اندازه سرعت میدان دوار در همان جهت چرخانده شود.

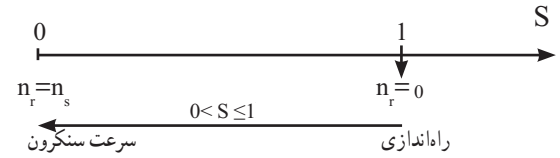
لغزش ماشین القایی در **سرعت سنکرون** صفر است.

۳ـ۹ـ۳ـ لغزش موتور در حین کار : رتور موتور القایی پس از راه‌اندازی دور می‌گیرد و سرعت آن به تدریج افزایش می‌یابد. با زیاد شدن سرعت رتور، اختلاف سرعت رتور با سرعت میدان دوار کم می‌شود. این افزایش سرعت تا جایی که نزدیک به سرعت سنکرون است می‌تواند ادامه یابد. زیرا اگر سرعت رتور با میدان دوار برابر شود، میدان استاتور هم نمی‌تواند هادی‌های رتور را قطع نماید و در نتیجه نیرویی به رتور وارد نمی‌شود. با وجود وزن خود رتور و نیروی اصطکاک یاتاقان‌ها و هوا، سرعت رتور هرگز به سرعت سنکرون نمی‌رسد بلکه در نزدیک آن پایدار می‌شود. از آنجا که در موتورهای القایی بین

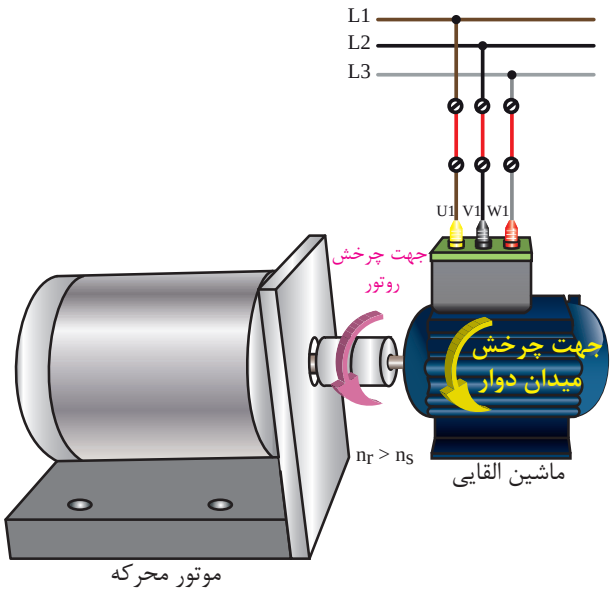
سرعت میدان دوار و سرعت رتور همواره اختلاف وجود دارد در نتیجه به آنها موتورهای آسنکرون[1] نیز گفته می‌شود.

لغزش موتور القایی در حین کار کمتر از لغزش زمان راه‌اندازی است.

لغزش موتور القایی در حین کار بیش از لغزش در سرعت سنکرون است.



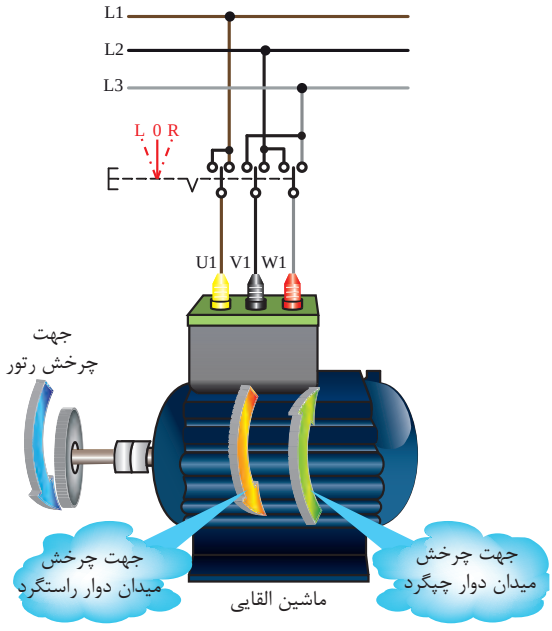
۴ــ۹ــ۳ــ لغزش منفی: اگر محور رتور ماشین القایی متصل شده به شبکه برق توسط وسیله‌ای با سرعتی بیش از سرعت سنکرون در جهت چرخش میدان دوار چرخانده شود، بنابراین طبق رابطه(۵ــ۳) چون $n_r > n_s$ می‌باشد مقدار لغزش منفی خواهد شد.



شکل ۲۳ــ نمایش حالت مولدی ماشین القایی

این وضعیت را در ماشین‌های القایی حالت ژنراتوری می‌نامند.

۵ــ۹ــ۳ــ لغزش‌های بزرگ‌تر از واحد (بیش از ۱۰۰٪): شکل (۲۴) یک ماشین القایی را نشان می‌دهد که توسط کلید راستگرد، چپگرد سه فاز به شبکه برق متصل است. اگر این ماشین به حالت موتوری در جهت راستگرد راه‌اندازی شود، رتور آن راستگرد می‌چرخد. حال چنانچه موتور به‌وسیلهٔ کلید ابتدا از شبکه قطع شود و بلافاصله به طور لحظه‌ای چپگرد راه‌اندازی گردد، میدان دوار آن چپگرد شده و سرعت رتور سریعاً به صفر می‌رسد. در نتیجه با توجه به جهت گردش رتور در حالت راستگرد پیش از ایستادن رتور، میدان دوار به حالت چپگرد در آمده و در نتیجه اختلاف سرعت رتور با سرعت سنکرون افزایش می‌یابد و لذا مقدار لغزش بیش از واحد خواهد شد. به این وضعیت عملکرد، حالت ترمزی ماشین القایی می‌گویند.



شکل ۲۴ ــ نمایش حالت ترمزی ماشین القایی

مطابق رابطه (۵ــ۳) داریم :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \Rightarrow S = \frac{n_s - (-n_r)}{n_s} = \frac{n_s + n_r}{n_s} > 1$$

۱ــ غیر هم‌زمان

ماشین القایی در لغزش‌های بزرگ‌تر از واحد، رفتار ترمزی دارد.

خود را بیازمایید

۱ــ با افزایش سرعت رتور، مقدار سرعت لغزش ..... می یابد.

۲ــ رفتار ماشین القایی را در لحظه راه‌اندازی تشریح کنید.

۳ــ آیا امکان دارد موتور القایی در سرعت سنکرون قرار گیرد؟ چرا؟

۴ــ در ماشین‌های القایی اگر رتور با سرعتی بیشتر ودر جهت میدان دوار بچرخد، ماشین در ناحیه.....کار کرده و لغزش آن ..... است.

۵ــ سرعت چرخش رتور موتور القایی ۴ قطب در شبکه ۵۰ HZ برابر با ۱۴۲۵ RPM می‌باشد لغزش آن را به اعشار و درصد محاسبه کنید.

۶ــ لغزش موتور القایی که محور آن با سرعت ۲۵۰۰ RPM می‌گردد برابر با ۱/۵- می‌باشد. سرعت میدان دوار آن چقدر است؟

۱۰ــ۳ــ کمیت‌های الکتریکی رتور

برای استفاده از موتور القایی باید رفتار آن را در مواردی همچون راه‌اندازی، ترمز و کنترل دور بتوان پیش‌بینی نمود. لذا ضروری است که کمیت‌های الکتریکی رتور مورد بررسی قرار گیرند. هر یک از کمیت‌های الکتریکی رتور متناسب با لغزش به گونه‌ای خاص تغییر می‌کنند.

۱ــ۱۰ــ۳ــ فرکانس ولتاژ القایی مدار رتور : موتور القایی مانند ترانسفورماتوری است که سیم پیچ اولیه آن سیم‌پیچ استاتور و ثانویه آن هادی‌های رتور است. اما مهم‌ترین تفاوتی که بین آنها وجود دارد یکسانی فرکانس برق در دو سمت ترانسفورماتور و تفاوت فرکانس برق در استاتور و رتور موتورهای القایی است. زیرا با توجه به امکان گردش رتور موتورهای القایی، فرکانس ولتاژ القایی مدار رتور یعنی (f_r) تغییر نموده و تابع سرعت رتور ماشین می‌باشد.

فرکانس ولتاژ مدار رتور با کاهش سرعت لغزش ($\Delta n = n_s - n_r$) کم و با افزایش آن زیاد می‌شود.

در واقع تنها در صورت ساکن بودن رتور، فرکانس ولتاژ استاتور و رتور برابر است و با افزایش سرعت رتور چون سرعت لغزش کاهش می یابد، فرکانس ولتاژ القایی رتور نیز کم می‌شود[1].

سرعت میدان دوار و رتور در سرعت سنکرون برابر می‌باشند. بنابراین مقدار فرکانس ولتاژ مدار رتور در شرایطی که اختلاف سرعت بین میدان دوار و رتور وجود ندارد، صفر است.

همچنین در حالت سکون ماشین القایی نیز سرعت لغزش به اندازه میدان دوار است در نتیجه فرکانس ولتاژ مدار رتور با فرکانس منبع برابر می‌باشد. بنابراین در لغزش واحد فرکانس ولتاژ مدار رتور با فرکانس میدان دوار برابر است. در سرعت‌هایی هم که بین نقطه سکون و سرعت سنکرون وجود دارد، مقدار فرکانس ولتاژ مدار رتور متناسب با سرعت لغزش مطابق رابطه (۷ــ۳) به‌صورت خطی تغییر می‌کند.

$$f_r = Sf \qquad (۳ــ۷)$$

در رابطه (۷ــ۳)،

f_r فرکانس ولتاژ مدار رتور

S لغزش

f فرکانس ولتاژ استاتور

سوال در سرعت سنکرون، f_r ماشین القایی چقدر می‌شود؟

۱ــ به همین خاطر گاهی به ترانسفورماتورها ماشین‌های الکتریکی ساکن نیز می‌گویند.

۲ــ۱۰ــ۳ــ راکتانس رتور : با عبور جریان از مفتول و یا سیم‌پیچ‌های رتور، در اطراف آن میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود و چون اطراف هادی‌ها را هستهٔ آهنی رتور فرا گرفته است، اثر القایی ناشی از جریان عبوری از آن افزایش می یابد. بدین سبب در مدار رتور اثر سلفی (راکتانس القایی) نیز وجود دارد که آن را با X_r نمایش می‌دهند. اثر راکتانس سلفی با فرکانس جریان عبوری از آن رابطه مستقیم دارد[1]. بنابراین هر چقدر فرکانس رتور کمتر شود (یعنی سرعت رتور به سرعت سنکرون نزدیک‌تر شود) راکتانس آن نیز کاهش می یابد.

با توجه به رابطهٔ راکتانس سلفی و فرکانس رتور نتیجه می‌گیریم :

$$X_r = 2\pi f_r l_r$$

$$f_r = Sf$$

با جایگزینی مقدار f_r داریم : $\Rightarrow X_r = 2\pi S f l_r = S\underbrace{2\pi f l_r}_{X_2}$

$$X_r = SX_2$$

راکتانس رتور ماشین القایی در زمان راه‌اندازی را با X_2 نشان می‌دهند.

۳ــ۱۰ــ۳ــ مقاومت مدار رتور : از آنجا که هادی‌های رتور ماشین القایی دارای طول و سطح مقطع معینی هستند لذا مقدار مقاومت اهمی ثابتی دارند. مقدار مقاومت اهمی هر فاز مدار رتور را با R_2 نشان می‌دهند.

۴ــ۱۰ــ۳ــ ولتاژ رتور : پیش از این چگونگی ایجاد نیروی محرکه القایی در مدار رتور بیان گردید[2] و ملاحظه شد که با ایجاد میدان دوار استاتور، در مدار رتور، نیروی محرکه القا می‌شود.

البته باید توجه داشت که در زمان راه‌اندازی موتور القایی بیشترین نیروی محرکه در مدار رتور القاء می‌گردد. زیرا لغزش ۱۰۰٪ است. این ولتاژ را ولتاژ حالت سکون رتور می‌نامند و آن را با E_2 نمایش می‌دهند.

با افزایش سرعت رتور، لغزش کم می‌شود و چون هادی‌های رتور با سرعت کمتری توسط میدان قطع می‌شوند، نیروی محرکه القایی رتور کاهش می یابد.

نیروی محرکه القایی هر فاز مدار رتور را با E_r نمایش می‌دهند. این نیروی محرکه با افزایش یا کاهش لغزش به‌طور خطی اضافه و یا کم می‌شود و از رابطه (۳ــ۹) پیروی می‌کند.

$$E_r = SE_2 \qquad (۳ــ۹)$$

خود را بیازمایید

۱ــ رفتار موتور القایی در چه شرایطی شبیه ترانسفورماتور می باشد؟

۲ــ در ماشین القایی فرکانس رتور به چه عواملی بستگی دارد؟

۳ــ ولتاژ القایی رتور در لحظه راه‌اندازی..... ودر سرعت سنکرون برابر با..... می باشد.

۴ــ راکتانس القایی مدار رتور از زمان راه‌اندازی تا سرعت سنکرون چگونه تغییر می کند؟

۵ــ یک موتور القائی ۵۰ HZ دارای راکتانس القایی ۱/۶Ω و مقاومت اهمی ۰/۵Ω و ولتاژ القایی ۳۰ V در لحظه راه‌اندازی می باشد کمیت‌های فوق در لغزش ۰/۰۸ چقدر است؟

۵ــ۱۰ــ۳ــ امپدانس رتور : هادی‌های رتور ماشین القایی، دارای مقاومت اهمی R_2 و همچنین راکتانس القایی X_r می‌باشند. بنابراین اثر با هم بودن آنها در مدار جریان متناوب می‌تواند معادل یک مدار سری R ــ L درنظر گرفته شود. درنتیجه امپدانس این مدار مفروض مربوط به رتور بوده و آن را با Zr نمایش می دهند.

۱ــ $X_r = 2\pi f_r l_r$

۲ــ اساس کار ماشین‌های الکتریکی و پدیدهٔ میدان دوار

با جایگزینی رابطه (۳ــ۱۰) راکتانس روتوردر رابطه امپدانس مدار R ــ L سری داریم :

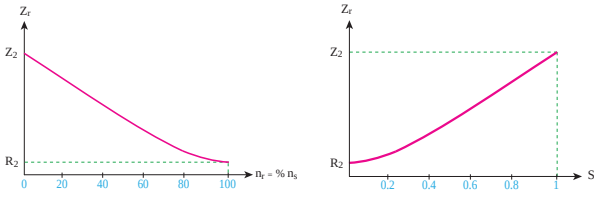
$$Z_r = \sqrt{R_2^2 + X_r^2} \qquad (۳ــ۱۰)$$

$$Z_r = \sqrt{R_2^2 + (SX_2)^2} \qquad (۳ــ۱۱)$$

می‌توان نمودار تغییرات امپدانس مدار رتور را بر اساس لغزش مطابق رابطه (۳ــ۱۰) ترسیم نمود.

البته لازم به یادآوری است، تغییرات امپدانس بر حسب فرکانس مدار R–L سری را در درس مدارهای الکتریکی خوانده اید. این تغییرات با توجه به رابطه (۳ــ۱۱) خطی نیست.

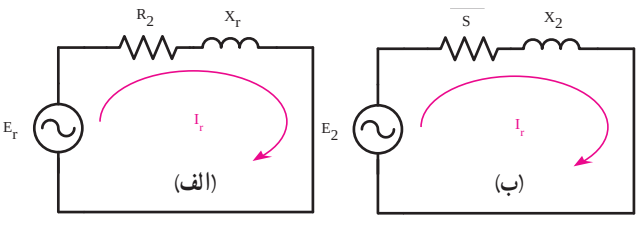
نمودار شکل (۲۵) بر اساس تغییر لغزش و تأثیر آن بر امپدانس مدار رتور ترسیم شده است و نشان می‌دهد که این امپدانس به‌صورت منحنی (غیر خطی) تغییر می نماید.



شکل ۲۵ــ منحنی تغییر امپدانس رتور بر حسب تغییرات لغزش و سرعت رتور

۶ــ۱۰ــ۳ــ جریان رتور : در صورت بسته بودن مسیر سیم‌پیچ یا هادی‌های مدار رتور از آن جریان جاری می‌شود. میزان جریان عبوری از مدار رتور به ولتاژ القاء شده و امپدانس مدار رتور وابسته است. رابطه (۳ــ۱۲) با توجه به مدار معادل شکل(۲۶ــ الف) به‌دست می‌آید :

$$I_r = \frac{E_r}{Z_r} = \frac{E_r}{\sqrt{R_2^2 + X_r^2}} \qquad (۳ــ۱۲)$$



شکل ۲۶ ــ مدار معادل الکتریکی یک فاز رتور

بیشتر بدانید

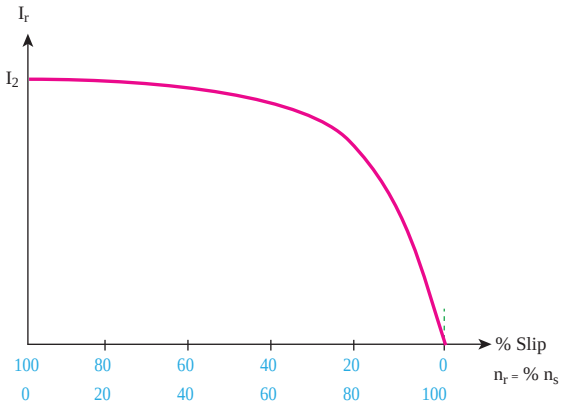
اما از آنجایی که با تغییر لغزش در مدار شکل (۲۶ــ الف) هر دو کمیت (E_r, X_r) با هم تغییر می کنند برای سهولت در تحلیل مدار معادل الکتریکی رتور می‌توان مقادیر مربوط به کمیت‌های (E_r, X_r) را در رابطه (۳ــ۱۲) قرار داده و به رابطهٔ (۳ــ۱۳) رسید.

$$I_r = \frac{E_r}{Z_r} \Rightarrow I_r = \frac{SE_r}{\sqrt{R_2^2 + (SX_2)^2}}$$

$$\Rightarrow I_r = \frac{\not{S}E_2}{\not{S}\sqrt{(\frac{R_2}{S})^2 + X_2^2}}$$

$$I_r = \frac{E_2}{\sqrt{(\frac{R_2}{S})^2 + X_2^2}} \qquad (۳ــ۱۳)$$

شکل (۲۶ــ ب) مدار معادل الکتریکی رتور را بر اساس رابطه (۳ــ۱۳) نشان می‌دهد. در این رابطه تنها کمیت متغیر لغزش است. نمودار این رابطه در شکل (۲۷) نشان داده شده است.



شکل ۲۷ ــ منحنی تغییرجریان رتور بر حسب تغییرات لغزش و سرعت رتور

با توجه به نمودار شکل (۲۷) مشاهده می‌شود که جریان رتور در سرعت سنکرون به صفر می‌رسد. یعنی در این سرعت هیچ جریانی از مدار رتور عبور نمی‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در سرعت سنکرون به دلیل عدم عبور جریان از رتور، هیچ نیرویی به رتور وارد نمی‌شود. همچنین با افزایش لغزش، جریان و به دنبال آن تلفات رتور افزایش می یابد.

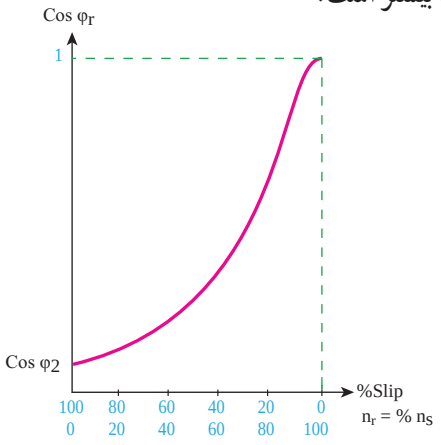
۷ــ۱۰ــ۳ــ ضریب قدرت مدار رتور : ضریب قدرت مدار R–L سری شکل(۲۶ــ الف) با رابطه (۱۴ــ۳) تعریف می‌شود.

$$\cos\varphi_r = \frac{R_2}{Z_r} \qquad (۳\text{ــ}۱۴)$$

که با جایگذاری مقدار Zr در رابطه فوق می‌توان نوشت :

$$\cos\varphi_r = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX_2)^2}} \qquad (۳\text{ــ}۱۵)$$

در لحظه راه‌اندازی ضریب قدرت ماشین مقداری ثابت خواهد داشت ولی با افزایش پی در پی سرعت (کاهش لغزش)، راکتانس سلفی مدار رتور (X_r) به‌طور غیر خطی کاهش می یابد به طوری که در سرعت سنکرون امپدانس مدار رتور برابر با مقدار R_2 می‌شود و در نتیجه ضریب قدرت مدار رتور به مقدار واحد می رسد. ضریب قدرت مدار رتور در لحظه راه‌اندازی را با $\cos\varphi_2$ نمایش می‌دهند. هر چه ضریب قدرت روتور موتور القایی در زمان راه‌اندازی بیشتر باشد، گشتاور راه‌اندازی موتور به نسبت بیشتر است.



شکل ۲۸ ــ منحنی تغییرات ضریب قدرت بر حسب تغییرات لغزش و سرعت رتور

خود را بیازمایید

۱ــ جریان رتور در سرعت سنکرون چقدر است؟ چرا؟

۲ــ مقدار ضریب قدرت مدار رتور در سرعت سنکرون چقدر است؟

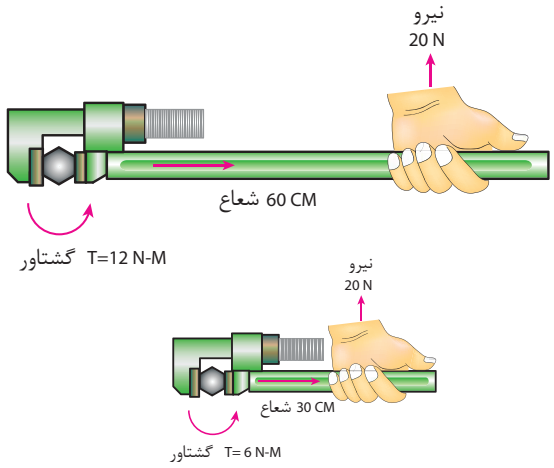
۳ــ مقاومت‌های اهمی و راکتانس القایی رتور یک موتور القایی در راه‌اندازی به ترتیب ۰/۶ و ۲ اهم می باشد. اگر ولتاژ القایی رتور در زمان راه‌اندازی ۴۲ ولت باشد، جریان رتور را در راه‌اندازی و در لغزش ۰/۱۵ به‌دست آورید.

۴ــ با توجه به داده‌های سؤال ۳ ضریب قدرت رتور را در حالات زیر به‌دست آورید :

الف) در لحظه راه‌اندازی ب) در لغزش ۰/۰۵

۱۱ــ۳ــ گشتاور ماشین‌های القایی

به شکل(۲۹) توجه کنید. با کدام آچار باز کردن پیچ آسانتر است؟

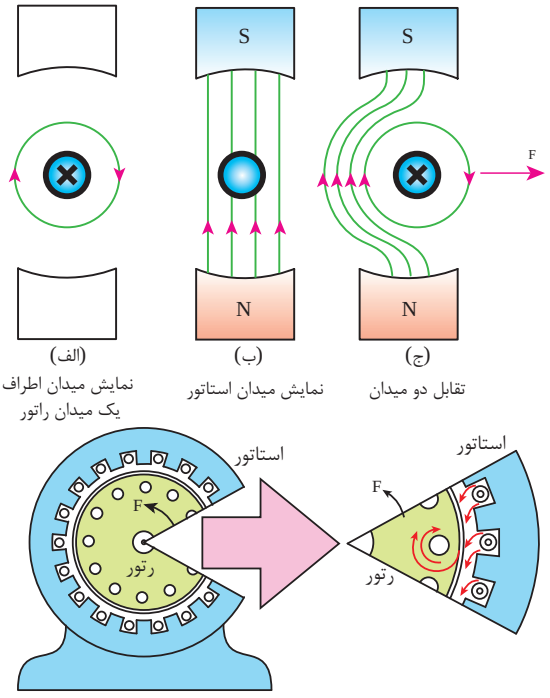


شکل ۲۹ــ مقایسه گشتاور وارد شده به پیچ

در واقع گشتاور وابسته به نیرویی است که در فاصلهٔ مشخص، به جسم وارد می‌شود تا آن را حول یک محور بچرخاند. در شکل(۲۹) با اعمال گشتاور به پیچ، پیچ می‌چرخد.

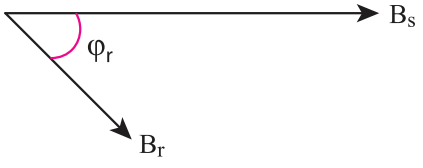
برای چرخش رتور در ماشین‌های القایی نیز به گشتاور احتیاج است. این گشتاور بر اثر نیروی الکترومغناطیسی ایجاد می‌شود. همانطور که در شکل (۳۰ــالف و ب) نشان داده شده است میدان استاتور و یا رتور به تنهایی برای وارد شدن نیرو به رتور کافی نیست و لازم است برای ایجاد گشتاور الکترومغناطیسی دو میدان مغناطیسی بر هم اثر نمایند.

در شکل(۳۰ــ ج و د)، مشاهده می‌شود که گشتاور وارد شده به رتور و گردش آن، با اثر متقابل دو میدان ایجاد شده است. این دو میدان یکی توسط جریان استاتور و دیگری ناشی از جریان رتور می‌باشد.



شکل ۳۰ــ نحوه تولید گشتاور در موتور القایی

میدان‌های استاتور و رتور هر یک دارای اندازه و جهت مشخصی می باشند، پس می‌توان آنها را با بردار نمایش داد از طرفی این دو بردار با هم به میزان φ_r اختلاف فاز دارند.



بنابراین عوامل تعیین کننده گشتاور ماشین القایی، اندازهٔ میدان‌های استاتور و رتور و اختلاف فاز بین آن دو می‌باشد.

بیشتر بدانید

$$T \propto B_s B_r \cos\varphi_r \qquad (۳\text{ــ}۱۶)$$

تقابل دو میدان استاتور(Bs)و رتور (Br) را برای ایجاد گشتاور الکترومغناطیسی می‌توان به‌صورت رابطهٔ (۳ــ۱۷) نوشت.

$$T = K_1 B_s B_r \cos\varphi_r \qquad (۳\text{ــ}۱۷)$$

Bs چگالی میدان مغناطیسی استاتور

Br چگالی میدان مغناطیس رتور

T گشتاور کار ماشین القایی

$\propto$ علامت تناسب

وابستگی ولتاژ القایی رتور به میدان مغناطیسی استاتور را می‌توان با رابطه (۳ــ۱۸) نشان داد.

$$E_r \propto B_s \Rightarrow E_r = K_0 B_s \Rightarrow$$

$$B_s = \frac{1}{K_0} E_r \Rightarrow$$

$$B_s = K_2 E_r \qquad (۳\text{ــ}۱۸)$$

چگالی میدان مغناطیس رتور نیز متناسب با جریان رتور می‌باشد بنابراین :

$$B_r \propto I_r \Rightarrow B_r = K_2 I_r \qquad (۳\text{ــ}۱۹)$$

از جایگزینی روابط (۳ــ۱۸) و (۳ــ۱۹) در رابطه (۳ــ۱۷) خواهیم داشت :

$$T = K_1 B_s B_r \cos\varphi_r \Rightarrow T = \underbrace{K_1 K_2 K_3}_{K} E_r I_r \cos\varphi_r$$

$$T = K E_r I_r \cos\varphi_r$$

$$T = K S E_2 \times \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX_2)^2}} \times \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX_2)^2}}$$

$$T = K E_2^2 \times \frac{S R_2}{R_2^2 + (SX_2)^2} \qquad (۳\text{ــ}۲۰)$$

۱) رابطه تناسب گشتاور با اندازهٔ میدان های استاتور و رتور و اختلاف فاز بین آنها را می‌توان با ضرب یک مقدار ثابت نظیر K_1 به تساوی تبدیل نمود.

نتیجه ۱ :

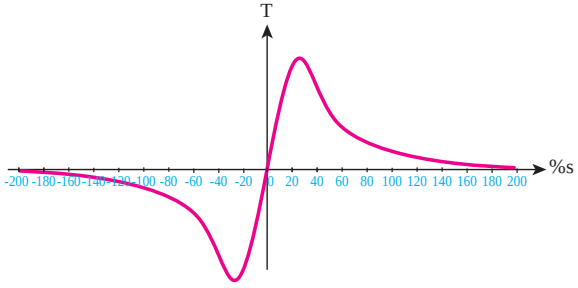
رابطه (۲۰ــ۳) نشان می‌دهد که گشتاور ماشین القایی با مجذور نیروی محرکه القایی رتور در حالت سکون (E_{r}^{2}) نسبت مستقیم دارد. از طرفی نیروی محرکه القایی رتور وابسته به ولتاژ ورودی ماشین (ولتاژ استاتور) می‌باشد. بنابراین گشتاور ماشین القایی با مجذور ولتاژ استاتور نسبت مستقیم دارد.

سوال می‌توانید بگویید ۲۰ درصد افزایش ولتاژ ورودی باعث چه میزان افزایش در گشتاور ماشین القایی می‌شود؟

نتیجه ۲ :

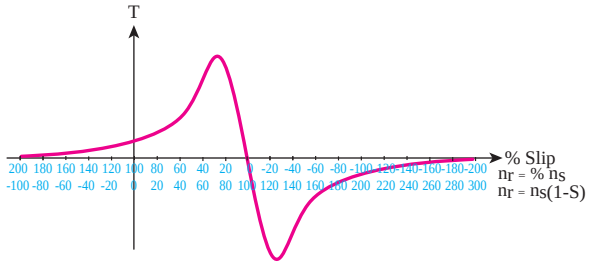
از آنجا که کمیت‌های R_r و X_r همواره مقداری ثابت دارند، با توجه به رابطه (۲۰ــ۳) اگر ماشین القایی در یک ولتاژ مشخص استفاده شود، تنها عامل تغییر دهنده گشتاور ماشین القایی، لغزش می‌باشد. لذا با ترسیم تابع تغییرات گشتاور بر اساس تغییرات لغزش در روی صفحه مختصات، منحنی شکل (۳۱) به‌دست می‌آید که به عنوان منحنی تغییرات تابع گشتاور نسبت به لغزش $T = f(S)$ شناخته می‌شود.

توجه : از دانش‌آموزان انتظار می‌رود شکل کیفی منحنی‌های زیر را به خاطر بسپارند.



شکل ۳۱ــ نمودار تغییرات گشتاور ماشین القایی بر حسب لغزش

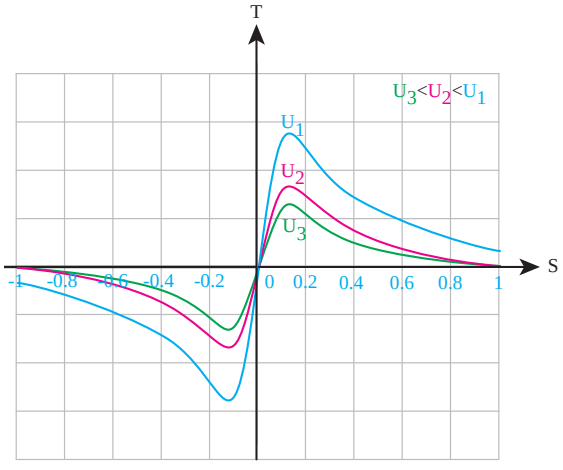
البته از آنجا که در تحلیل ماشین القایی تصور تغییرات سرعت راحت‌تر است، لذا در اغلب اوقات بجای مشخصه گشتاور بر حسب لغزش شکل (۳۱) از مشخصه گشتاور بر حسب دور شکل (۳۲) استفاده می‌شود.



شکل ۳۲ــ منحنی تغییرات گشتاور ماشین القایی بر حسب لغزش و سرعت رتور

نتیجه ۳ :

منحنی شکل (۳۱ و ۳۲) در ولتاژ مشخصی ترسیم شده است. یعنی ولتاژ استاتور ماشین القایی ثابت لحاظ گردیده است. اما با توجه به رابطه (۲۰ــ۳)، گشتاور ماشین القایی با مجذور ولتاژ استاتور نیز نسبت مستقیم دارد بنابراین با تغییر ولتاژ استاتور، منحنی (گشتاورــ دور) $T = f(n_r)$ یا (گشتاورــ لغزش) $T = f(S)$ با نسبت مجذوری جابه‌جا خواهند شد.



شکل۳۳ــ اثر تغییرات ولتاژ بر منحنی گشتاورــ لغزش ماشین القایی

با توجه به وابستگی گشتاور به مجذور ولتاژ ورودی می‌توان رابطهٔ تناسبی (۲۱ــ۳) را نوشت.

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{U_1^2}{U_2^2} \qquad (۲۱ــ۳)$$

در رابطه(۲۱ــ۳)

T_1 گشتاور ماشین القایی در ولتاژ U_1

T_2 گشتاور ماشین القایی در ولتاژ U_2

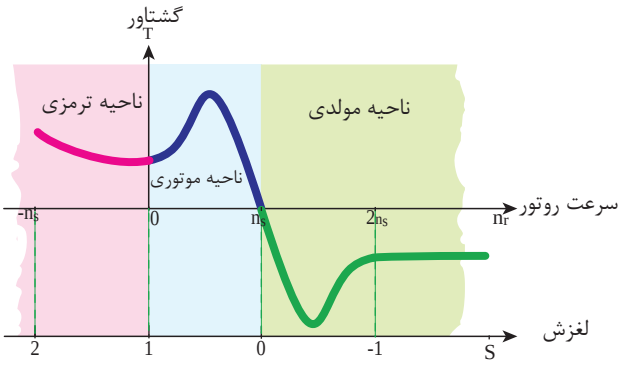
U_1 ولتاژ استاتور ماشین القایی در حالت اول

U_2 ولتاژ استاتور ماشین القایی در حالت دوم

آیا حالا می‌توانید به سؤال مربوط به نتیجه ۱ به راحتی پاسخ دهید؟

۱۲ــ۳ــ ناحیه بندی ماشین القایی بر اساس مشخصه گشتاور ــ دور

مطابق آنچه در توصیف رفتار ماشین‌های القایی با توجه به مقادیر مختلف لغزش «بند ۱۰» بیان شد می‌توان نواحی عملکرد ماشین القایی را بر روی منحنی (گشتاور ــ دور) و (گشتاور ــ لغزش) ماشین القایی مشخص نمود. این تقسیم‌بندی در شکل (۳۴) نشان داده شده است.



شکل ۳۴ــ نواحی مختلف ماشین القایی

خود را بیازمایید

۱ــ عوامل تعیین‌کننده گشتاور در ماشین‌های القایی کدامند؟

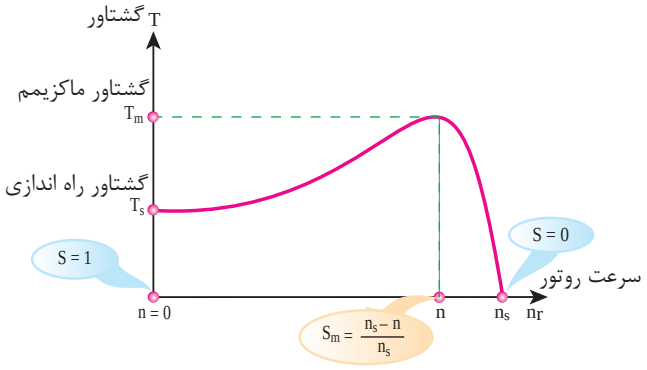
۲ــ تنها عامل تغییردهنده گشتاور ماشین القایی که با ولتاژ ثابت کار می‌کند چیست؟

۳ــ در یک ماشین القایی، ولتاژ شبکه ۵ درصد کاهش می‌یابد. گشتاور ماشین چقدر تغییر می‌کند؟

۴ــ منحنی مشخصه گشتاور ــ لغزش یک ماشین القایی را در فاصله ($-1 \leq S \leq 0$) ترسیم نمایید.

۱۳ــ۳ــ مشخصه گشتاور ــ دور موتور القایی

با توجه به شکل (۳۵)، ناحیه عملکرد موتوری ماشین القایی در سرعت $0 < n_r \leq n_s$ و یا $0 \leq S < 1$ می‌باشد. لذا در تحلیل رفتار موتوری فقط همین ناحیه را ترسیم نموده و مورد بررسی قرار می‌دهند. شکل (۳۵) مشخصه گشتاور ــ دور موتور القایی را نشان می‌دهد.



شکل ۳۵ــ منحنی گشتاور ــ دور موتور القایی

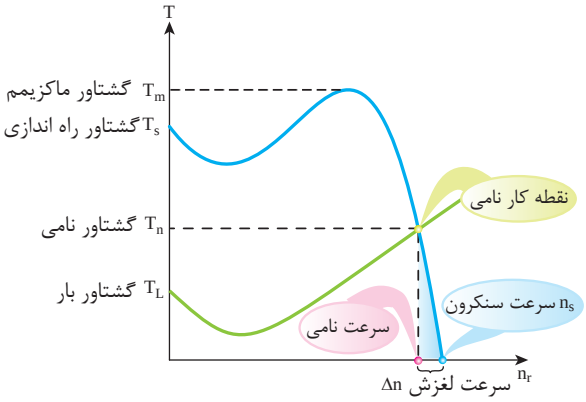
از مشخصه شکل (۳۵) نکات زیر به‌دست می‌آید.

نکته ۱ : در لحظه راه‌اندازی ($n_r = ۰$ و یا $S = ۱$) گشتاور برابر مقدار «T_s» است که به عنوان گشتاور راه‌اندازی شناخته می‌شود.

نکته ۲ : با کمک روابط ریاضی ثابت می‌شود بیشترین مقدار گشتاور «T_m» در لغزشی معادل با نسبت مقاومت اهمی مدار رتور به راکتانس القایی حالت سکون آن ($\frac{R_۲}{X_۲}$) اتفاق می‌افتد که آن را لغزش بحرانی می‌نامند.

نکته ۳ : از آنجا که در فاصله نقطه T_s تا T_m روی مشخصه گشتاور ــ دور موتور، افزایش گشتاور و سرعت با هم رخ می‌دهند، بنابراین در این فاصله امکان تثبیت سرعت وجود ندارد. یا به عبارتی موتور در حال افزایش سرعت است.

نکته ۴ : هر موتور القایی مقدار مشخصی گشتاور راه‌اندازی «T_s» دارد که به طراحی آن وابسته است. برای چرخاندن هر بار مکانیکی باید به این مقدار گشتاور دقت ویژه داشت. زیرا گشتاور راه‌اندازی موتور القایی باید بیش از گشتاور راه‌اندازی بار مکانیکی باشد تا موتور بتواند آن را به حرکت درآورد.



شکل ۳۶ــ تقابل نمودار گشتاور ــ دور بار مکانیکی و گشتاور ــ دور موتور القایی و تشکیل نقطه کار

در شکل (۳۶) مشخصه گشتاور ــ دور موتور القایی و یک نوع بار مکانیکی[۱] ترسیم شده است[۲].

نکته ۵ : در فاصله T_s تا T_m همراه با افزایش سرعت موتور مقدار گشتاور نیز مرتباً زیاد می‌شود. ولی با عبور از نقطه T_m (گشتاور ماکزیمم) این وضعیت تغییر نموده و گشتاور شروع به کاهش می‌نماید. بنابراین با رسیدن گشتاور موتور (گشتاور محرک) به‌مقدار گشتاور بار (گشتاور مقاوم) یعنی نقطهٔ تلاقی مشخصه گشتاور ــ دور موتور القایی با مشخصه گشتاور ــ دور بار مکانیکی (نیروی مقاوم) مطابق شکل (۳۶) سرعت موتور تثبیت می‌گردد. این نقطه را نقطه کار موتور می‌گویند. درواقع برابری گشتاور موتور و بار مکانیکی سبب تثبیت سرعت موتور در نقطهٔ کار می‌شود.

۱ــ مشخصه گشتاور ــ دور پمپ

۲ــ چگونگی مشخصه‌های گشتاور ــ دور بارهای مقاوم وابسته به عملکرد مکانیکی آن می‌باشد و توصیف آن از حوصله کتاب خارج است.

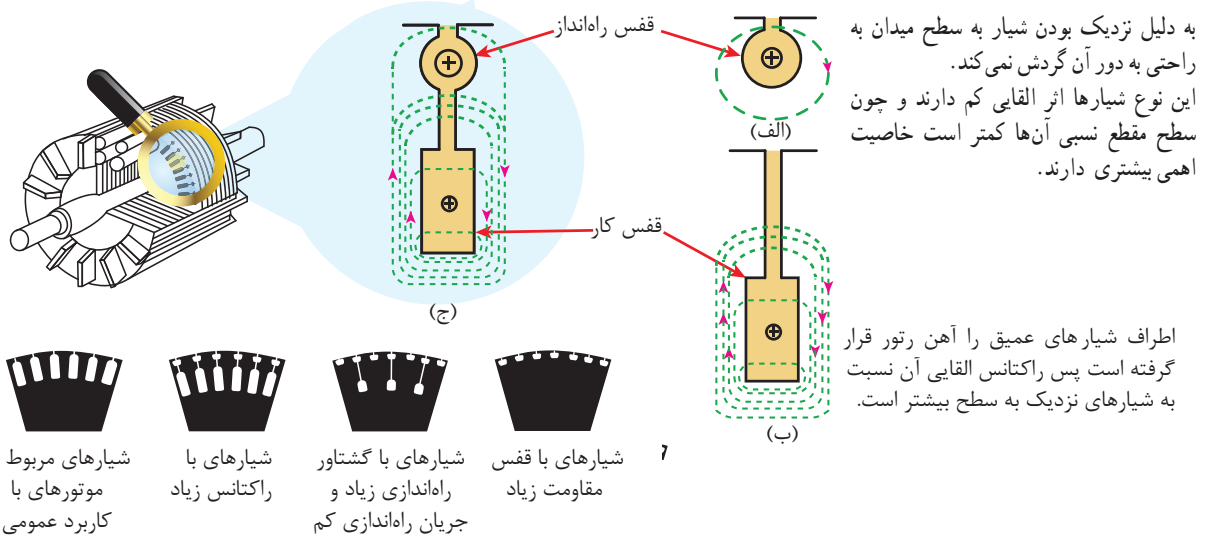
نکته ۶ : گشتاور مورد نظر سازنده موتور القایی در نقطهٔ کار را گشتاور نامی موتور می‌نامند و آن را با «T_n» نمایش می‌دهند. مسلماً این گشتاور در یک لغزش و سرعت مشخص اتفاق می‌افتد. که بر روی پلاک موتور نیز یادداشت می‌شود.

نکته ۷ : برای تحلیل رفتار موتور القایی و به حرکت در آوردن بار مکانیکی مقادیر T_n ، T_m و T_s از اهمیت بالایی برخوردار است که سازندگان موتورهای القایی، مقدار T_n و نسبت‌های $\frac{T_s}{T_n}$ و $\frac{T_m}{T_n}$ را در برگه مشخصات فنی[1] در اختیار بهره بردار قرار می‌دهند.

نکته ۸ : در موتورهای القایی رتور قفسی به‌جای سیم‌پیچ از هادی‌های مفتولی شکل در هسته رتور استفاده می‌شود. شکل شیار رتورهای قفسی که مفتول‌ها در آن‌جا دارند، تأثیر بسزایی در نحوه عملکرد موتور و مشخصه گشتاور ــ دور آن دارد.

میدان هادی‌هایی که در شیارهای عمیق جای دارند توسط آهن رتور احاطه می‌شوند. در نتیجه مطابق شکل (۳۷ــ ب) موجب می‌شود که میدان اطراف آن پراکندگی کمتری داشته باشد لذا در مغناطیس نمودن هسته نقش بیشتری دارد که معادل خاصیت راکتانس سلفی بیشتر در رتور است. چنین موتورهایی در نقطه کار دارای لغزش کمتری هستند و خاصیت کار بهتری دارند.

از آنجا که سطح مقطع نسبی مفتول‌های نزدیک‌تر به سطح رتور کوچکتر از مفتول‌های عمیق است در نتیجه مقاومت



شکل ۳۷ ــ انواع قفس رتور ماشین‌های القایی از لحاظ شکل و چگونگی استقرار

۱ــ Data Sheet

اهمی بیشتری نسبت به مفتول‌های درون شیار عمیق دارند. گشتاور موتورهایی که رتور آنها چنین خصوصیتی دارد در زمان راه‌اندازی بیشتر است ولی در نقطه کار با لغزش زیاد کار می کنند شکل (۳۷ــ الف).

یکی از انواع موتورهای رتور قفسی که رتور آن دارای هر دو نوع شیار می‌باشد در شکل (۳۷ــ ج) نشان داده شده است.

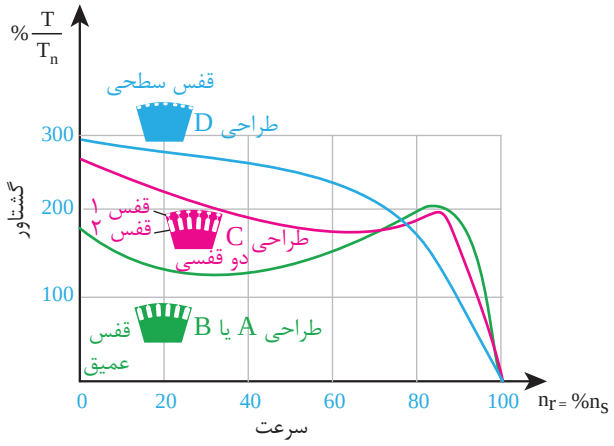
این نوع رتورها را رتور دو قفسی می‌نامند. موتورهای دو قفسی به‌دلیل داشتن هر دو خاصیت دارای گشتاور راه‌اندازی بالا و همچنین لغزش کم در نقطه کار می‌باشند.

به‌طور کلی استاندارد NEMA[1] مشخصه کارکرد انواع موتورهای رتور قفسی را به چهار دسته(A,B,C,D) تقسیم نموده که در جدول (۴) آمده است.

*** مقادیر بیشتر مربوط به موتورهایی با توان کمتر است.**

جدول۴ــ مشخصات انواع رتورهای قفسی طبقه‌بندی شده بر اساس استاندارد NEMA

نوع طراحی	گشتاور راه‌اندازی (درصد نسبت به جریان نامی)	گشتاور ماکزیمم (درصد نسبت به جریان نامی)	جریان راه‌اندازی (درصد نسبت به جریان نامی)	لغزش	کاربرد عمومی
طراحیA ــ گشتاور راه‌اندازی معمولی جریان راه‌اندازی زیاد	۷۰~۲۷۵*	۱۷۵~۳۰۰	مشخص نشده	۰/۵~۵٪	فن، دمنده‌های هوا، پمپ‌های سانتروفیوژ، کمپرسورها و هرجایی که گشتاور راه‌اندازی مورد نیاز باریه نسبت کم باشد.
طراحیBــ گشتاور راه‌اندازی معمولی جریان راه‌اندازی معمولی	۷۰~۲۷۵*	۱۷۵~۳۰۰	۶۰۰~ ۸۰۰	۰/۵~۵٪	فن، دمنده‌های هوا، پمپ‌های سانتروفیوژ، کمپرسورها و هرجایی که گشتاور راه‌اندازی مورد نیاز باریه نسبت کم باشد.
طراحیCــ گشتاور راه‌اندازی زیاد جریان راه‌اندازی معمولی	۲۰۰~۲۸۵*	۱۹۰~۲۲۵	۶۰۰~ ۸۰۰	۱~۵٪	تسمه نقاله‌ها سنگ شکن‌ها، ماشین‌های همزن و هرجایی که راه‌اندازی زیر بار مورد نیاز باشد.
طراحیD گشتاور راه‌اندازی زیاد لغزش زیاد	۲۷۵*	۲۷۵	۶۰۰~ ۸۰۰	>= ۵٪	ماشین پانچ، بالابرها، پمپ های چاه نفت و هرجایی که مقدار بار مکانیکی همراه یا بدون چرخ طیار زیاد باشد.



شکل ۳۸ ــ منحنی مشخصه گشتاور ـ دور انواع موتورهای قفسی براساس استاندارد NEMA

۱ــ National Electrical Manufacturer Association

خود را بیازمایید

۱ــ منحنی گشتاور ــ دور موتور القایی را ترسیم نموده و بر روی آن نقطه گشتاور ماکزیمم را مشخص کنید. این گشتاور در چه لغزشی اتفاق افتاده و مقدار لغزش چگونه محاسبه می‌شود؟

۲ــ نقطه کار در منحنی گشتاورــ دور، نشان دهنده چیست؟

۳ــ چه عاملی سبب تثبیت سرعت موتور در زیر بار می گردد؟

۴ــ در رتورهای قفسی هر چقدر عمق شیارها بیشتر باشد، مقاومت القایی رتور.....(بیشتر/ کمتر) است چرا؟

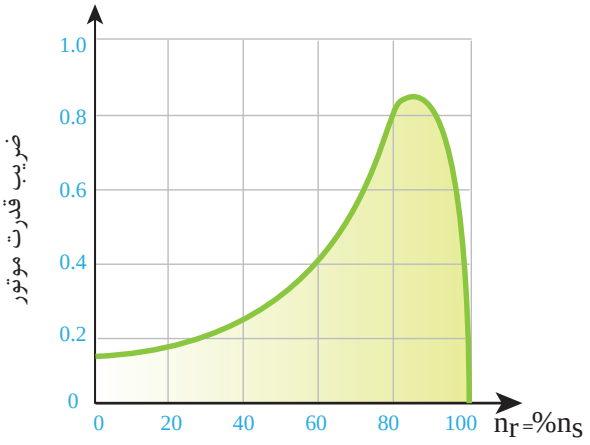
۵ــ ساختمان رتور دو قفسی را توضیح دهید.

۱۴ــ۳ــ مشخصه ضریب قدرت ــ سرعت موتور القایی

یکی از مهمترین پارامترهای شبکه‌های برق، ضریب قدرت مصرف کننده می‌باشد. در واقع ضریب قدرت[۱] (PF)یا Cos φ ناشی از اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان است.

از آنجا که تغییر سرعت رتور باعث تغییر امپدانس مدار رتور می‌شود و همچنین به‌دلیل القای متقابل مدار رتور و تأثیر آن بر میدان استاتور، امپدانس کلی موتور نیز تغییر می‌کند. بنابراین تغییر سرعت رتور بر ضریب قدرت موتور نیز اثر گذار است. در شکل (۳۹) منحنی تغییرات ضریب قدرت بر حسب دور موتور القایی نمایش داده شده است.

البته لازم به ذکر است که ضریب قدرت در لحظه راه‌اندازی هر موتور به دلیل اهمیت ویژه‌ای که دارد در برگه مشخصات سازنده ارائه می‌شود.



شکل۳۹ ــ منحنی تغییرات ضریب قدرت یک نوع موتور القایی برحسب سرعت رتور

با توجه به شکل (۳۹) ملاحظه می‌شود که در زمان راه‌اندازی ضریب قدرت موتور بسیار کم است ولی با افزایش سرعت، مقدار آن افزایش یافته و پس از عبور از لغزش بحرانی مقدار آن رو به کاهش می گذارد و در سرعت سنکرون صفر می‌شود.

بنابراین در انتخاب موتور القایی برای چرخش بار مکانیکی مشخص نباید توان موتور را خیلی بالاتر از آن اختیار نمود، زیرا باعث هرزگردی (بی‌باری) وکاهش ضریب قدرت و در نتیجه دریافت توان راکتیو بیشتر موتور از شبکه برق می‌شود و اتلاف انرژی را در پی خواهد داشت و مقرون به صرفه نیست.

در استانداردهای مختلف، میزان متفاوتی برای بیشتر بودن توان موتور الکتریکی از توان مکانیکی بار مشخص شده است.

۱ــ Power Factor

در جدول (۵) توان موتور پمپ به نسبت بار مکانیکی آن بر اساس استاندارد[۱] API۶۱۰ ارائه شده است.

جدول۵ــ انتخاب توان موتور بر حسب توان مورد نیاز پمپ بر اساس استاندارد API

انتخاب توان نامی موتور(٪)	توان مکانیکی	
	hp	kw
۱۲۵	<۳۰	<۲۲
۱۱۵	۳۰ــ۷۵	۲۲ــ۵۵
۱۱۰	>۷۵	>۵۵

انتخاب موتور القایی که توان آن خیلی بیشتر از توان مکانیکی بار است، باعث مصرف بیهوده انرژی می‌گردد

۱۵ــ۳ــ تأثیر فاصله هوایی میان رتور و استاتور بر مقدار ضریب قدرت موتور

در موتورهای القایی با ثابت بودن ولتاژ و فرکانس، شار مغناطیسی عبوری از فاصله هوایی نیز ثابت خواهد ماند. اما اگر دو موتور با مشخصات کاملاً یکسان و با فاصله هوایی متفاوت بین استاتور و رتور هر دو به یک شبکه برق یعنی به ولتاژ و فرکانس یکسان متصل شوند، موتوری که دارای فاصله هوایی بیشتر است، برای عبور شار یکسان از فاصله هوایی خود به جریان مغناطیس کنندهٔ بیشتری احتیاج دارد. جریان مغناطیس کنندهٔ بیشتر به معنای دریافت توان راکتیو بیشتر از شبکه برق می‌باشد که باعث کاهش ضریب قدرت موتور می‌گردد.

موتورهای القایی که رتور و استاتور آن فاصله هوایی بیشتری دارند، انرژی الکتریکی بیشتری مصرف می‌کنند.

خود را بیازمایید

۱ــ با افزایش فاصله هوایی رتور و استاتور موتور القایی هر یک از کمیت‌های زیر چه تغییری می‌کند؟

الف) جریان مغناطیس کننده

ب) ضریب قدرت

ج) انرژی دریافتی از شبکه

۲ــ در موتورهای القایی، جریان راه‌اندازی حدوداً چند برابر جریان نامی می‌باشد؟

۳ــ در هر یک از حالات زیر عملکرد موتور القایی بر روی بار مکانیکی چگونه خواهد بود؟

الف) بار مکانیکی بیشتر از توان موتور باشد.

ب) بار مکانیکی بسیار کمتر از توان موتور باشد.

۴ــ منظور از جریان رتور قفل شده در موتور القایی چیست؟

۵ــ در یک موتور القایی جریان راه‌اندازی ۲۴ آمپر و جریان نامی ۴/۸ آمپر است. جریان رتور قفل شده چقدر است؟

۶ــ کاربرد منحنی زمان تحمل سیم‌پیچ استاتور را شرح دهید.

۱ــ American Petroleum Institute

۱۶ــ۳ــ روش‌های راه‌اندازی موتورهای القایی

با توجه به تنوع بار (پمپ‌ها، کمپرسورها، بالابرها، نوارهای نقاله، همزن‌ها و...) موتورهای القایی و میزان بار آنها در شروع راه‌اندازی و همچنین نوع و یا شکل قفس رتور، جریان راه‌اندازی در این نوع موتورها نسبتاً زیاد و حدود ۵ تا ۸ برابر جریان نامی آنها است. بنابراین بررسی روش‌های راه‌اندازی از اهمیت ویژه برخوردار می‌باشد.

در زمان راه‌اندازی موتور، دو موضوع باید ملاحظه شود :

الف) نسبت گشتاور راه‌اندازی به گشتاور نامی ($\frac{T_s}{T_n}$)

این نسبت نشان می‌دهد که موتور القایی برای رسیدن به نقطه کار به چه مدت زمانی احتیاج دارد، هر چه مقدار این نسبت بیشتر باشد موتور شتاب بیشتری گرفته و زودتر به نقطه کار می‌رسد.

ب) نسبت جریان راه‌اندازی به جریان نامی ($\frac{I_s}{I_n}$)

مقدار این نسبت هر چه بیشتر باشد یعنی جریان راه‌اندازی بیشتر است. در طی زمان راه‌اندازی به دلیل ازدیاد جریان،شبکه برق، کابل و منبع تغذیه تحت فشار قرار می‌گیرند و لذا دچار افت ولتاژ می‌شوند.

بنابراین هرچه نسبت $\frac{I_s}{I_n}$ کمتر باشد، شرایط راه‌اندازی بهتر است.

با در نظر گرفتن این دو موضوع می‌توان راه‌اندازی موتور القایی را به‌طور کلی با دو روش انجام داد :

- روش راه‌اندازی استاتوری (قابل کاربرد در کلیه موتورهای القایی)
- روش راه‌اندازی رتوری (قابل کاربرد در موتورهای القایی رتور سیم‌پیچی)

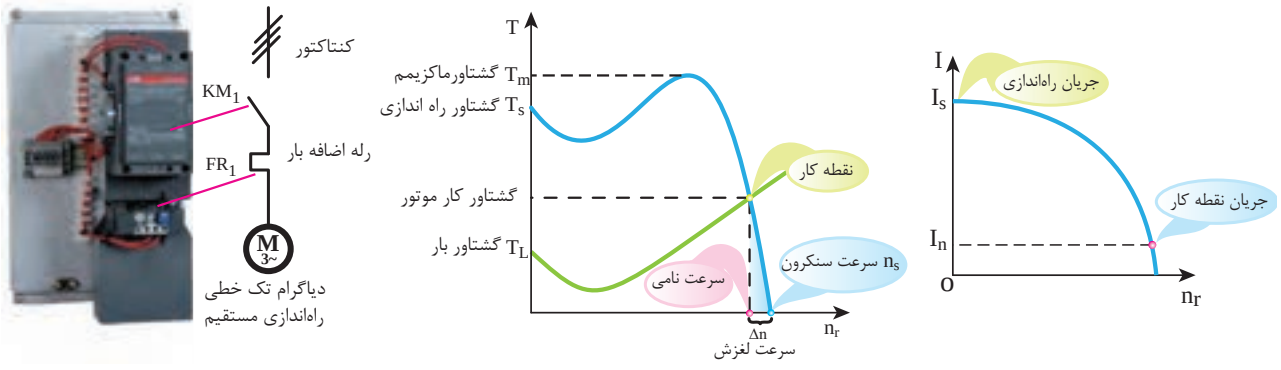
انواع روش‌های راه‌اندازی استاتوری عبارت‌نداز :

- راه‌اندازی مستقیم (Direct On Line(DOL
- راه‌اندازی ستاره ــ مثلث (Star Delta(0YD
- راه‌اندازی با اتو ترانسفورماتور
- راه‌اندازی نرم (با تجهیزات الکترونیک قدرت) Soft Starter

۱ــ۱۶ــ۳ــ راه‌اندازی مستقیم DOL :

در این روش تنها (از یک کلید قطع و وصل (کنتاکتور) مطابق شکل (۴۰) استفاده می‌شود. این روش ساده‌ترین راه برای راه‌اندازی موتور القایی و در عین حال به دلیل مقرون به صرفه بودن رایج‌ترین روش می‌باشد.

با اتصال مستقیم موتور به شبکه هیچ تغییری در منحنی مشخص گشتاورــ دور شکل(۴۰) ایجاد نمی‌شود. بنابراین از معایب این روش، جریان بالای راه‌اندازی پس از وصل کلید است. هر چند وقتی از این روش استفاده می‌شود، کابل، شبکه برق (ترانسفورماتور یا ژنراتور و دیگر تجهیزات متصل به شبکه)



شکل ۴۰ ــ مدار قدرت و نمودار های مربوط به راه‌اندازی مستقیم DOL

باید تحمل عبور جریان بالای راه‌اندازی[1] (۵ تا ۸ برابر جریان نامی) و افت ولتاژ حاصل از این جریان را تا چند ثانیه داشته باشند.

به‌علاوه در این روش گشتاور راه‌اندازی موتور بسیار زیاد است که در صورت اختلاف خیلی زیاد با گشتاور بار در زمان راه‌اندازی، نیروی بیشتری به اتصالات مکانیکی موتور و تجهیزات متصل به آن وارد می‌شود که با گذشت زمان باعث کاهش عمر مکانیکی تجهیزات می‌گردد.

جریان راه‌اندازی موتور القایی در روش اتصال مستقیم (DOL) زیاد است. ساده‌ترین راه برای کاهش جریان راه‌اندازی، کم کردن ولتاژ ورودی در زمان راه‌اندازی می‌باشد. در بخش‌های قبل تأثیر تغییر ولتاژ برگشتاور موتور القایی بحث گردید. با توجه به شکل (۳۳) باید توجه داشت که کاهش ولتاژ استاتور در زمان راه‌اندازی، علاوه بر کاهش جریان راه‌اندازی موتور، باعث کاهش گشتاور راه‌اندازی نیز می‌شود. بنابراین نمی‌توان بدون مطالعه بار متصل به موتور ولتاژ ورودی موتور را کاهش داد.

برای کاهش ولتاژ استاتور شیوه‌های مختلفی وجود دارد که هریک دارای مزایا و معایب خاص خود می باشند که در ذیل معرفی شده است.

- قرار دادن مقاومت پر قدرت در مسیر جریان موتور (این روش به دلیل کاهش راندمان موتور و اتلاف انرژی منسوخ شده است).
- روش ستاره ــ مثلث
- استفاده از اتوترانسفورماتور
- استفاده از راه‌انداز نرم

۲ــ۱۶ــ۳ــ راه‌اندازی ستاره ــ مثلث : مهمترین مشکل راه‌اندازی مستقیم (DOL)، عبور جریان زیاد در زمان راه‌اندازی است.

لازم به توضیح است که فقط موتورهایی را می‌توان با روش ستاره مثلث راه‌اندازی نمود که بدون بار باشند و سیم‌پیچ هر فاز آنها تحمل اتصال به ولتاژ خط (U_L) را داشته باشد. یعنی در شبکه فشار ضعیف برق ایران بتواند ۳۸۰ V ولتاژ خط را تحمل نماید زیرا در اتصال مثلث سیم‌پیچ‌های هر فاز به ولتاژ خط متصل می‌شوند.

راه‌اندازی هر موتور القایی به صورت ستاره ــ مثلث امکان پذیر نیست.

در راه‌اندازی به صورت ستاره ــ مثلث ابتدا برای کاهش جریان راه‌اندازی، موتور را با اتصال ستاره به برق متصل می کنند سپس بعد از عبور جریان اولیه راه‌اندازی که در اتصال ستاره $\frac{1}{3}$ جریان راه‌اندازی با اتصال مثلث است، اتصال سیم‌پیچ‌ها را به مثلث تبدیل می‌نمایند. زمان راه‌اندازی در این روش گاهی به ۱۵ ثانیه می‌رسد. در صورتی که عمل تغییر اتصال به موقع انجام نشود، ممکن است موتور در زیر بار بماند زیرا توان حالت مثلث ۳ برابر توان در حالت ستاره است و موتور برای غلبه بر نیروی مقاوم بار به توان حالت مثلث احتیاج دارد. به همین خاطر برای تغییر اتصال این روش راه‌اندازی در مدار فرمان از تایمر استفاده می‌شود.

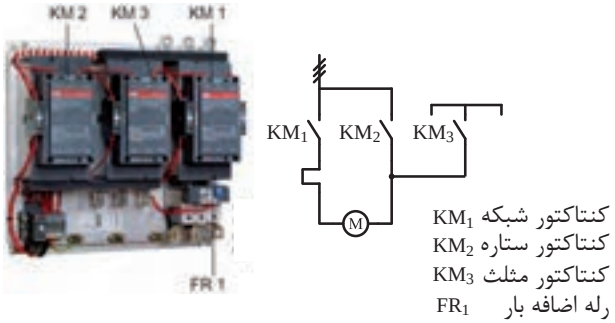
با این روش راه‌اندازی، جریان و گشتاور راه‌اندازی به حدود ۳۰٪ جریان راه‌اندازی حالت مستقیم (DOL) می‌رسد. شکل(۴۱) مدار قدرت و نمودارهای مربوط به راه‌اندازی ستاره ــ مثلث را نشان می‌دهد.

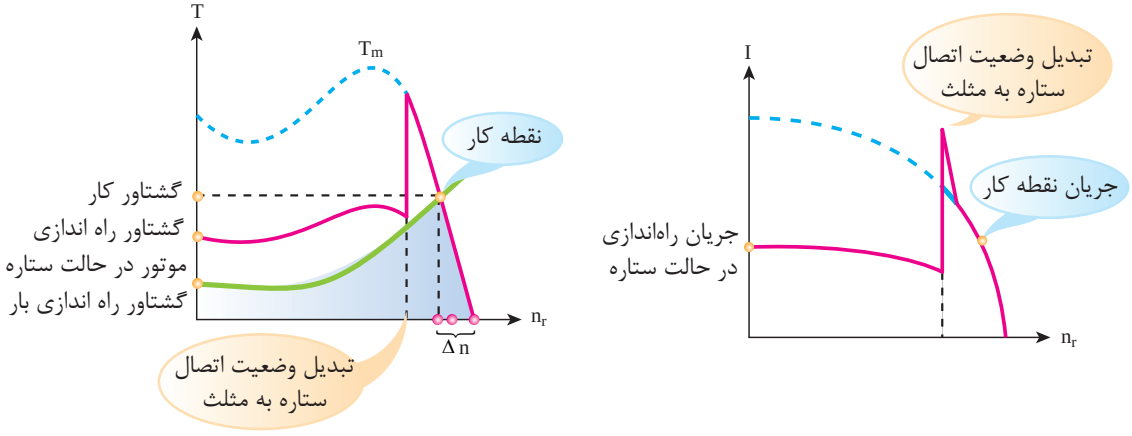
از معایب (راه‌اندازی ستاره ــ مثلث) می‌توان به موارد زیر اشاره کرد :

- استفاده از سه کلید قطع و وصل (کنتاکتور) به‌جای یک کلید در راه‌اندازی مستقیم DOL
- بالارفتن هزینه کابل و کابل‌کشی (زیرا باید سر و ته کلاف‌های سه فاز موتور به تابلو منتقل شوند).
- کاهش گشتاور راه‌اندازی که باید پیش از انتخاب این روش از بالاتر بودن آن نسبت به گشتاور راه‌اندازی بار اطمینان حاصل کرد.
- مدار کنترل پیچیده‌تر نسبت به راه‌اندازی مستقیم DOL

۱ــ نسبت جریان راه‌اندازی به جریان نامی موتورهای کوچک‌تر، بیشتر از موتورهای با قدرت بالا می‌باشد.

توجه : به‌دلیل ایجاد تلفات هارمونیکی[1] در اتصال مثلث توصیه می‌شود موتورهای با توان بالا را با اتصال مثلث به برق متصل نکنند.





شکل ۴۱ ــ مدار قدرت و نمودارهای مربوط به راه‌اندازی ستاره ــ مثلث

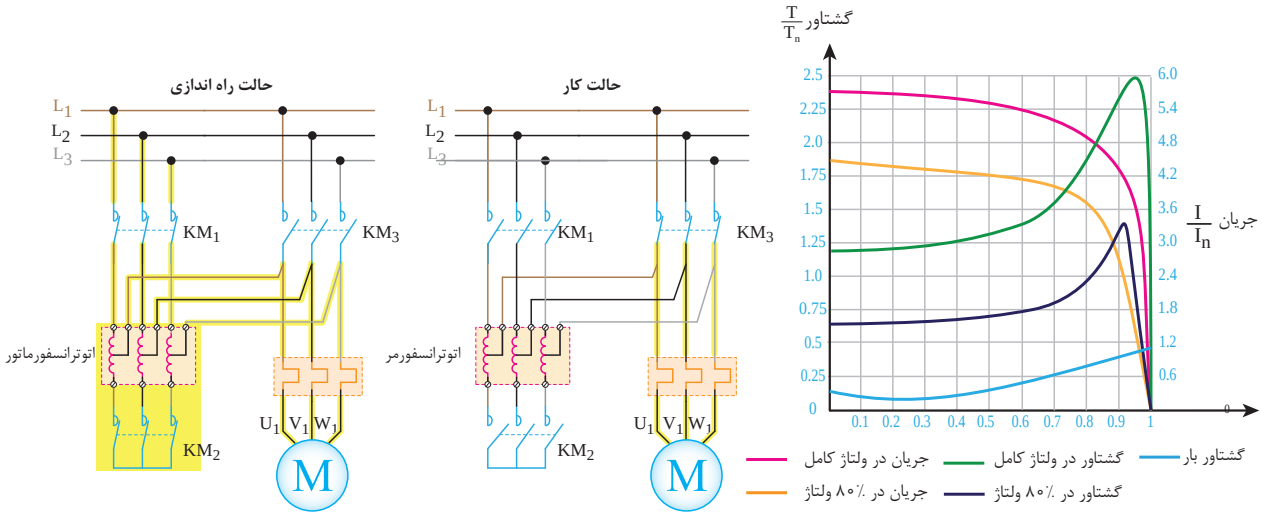
۳ــ۱۶ــ۳ــ راه‌اندازی با اتو ترانسفورماتور :

در شکل (۴۲) راه‌اندازی موتور سه فاز القایی به کمک اتو ترانسفورماتور سه فاز نشان داده شده است. در این روش برای کم کردن جریان راه‌اندازی از کاهش ولتاژ به کمک اتو ترانسفورماتور استفاده می‌شود. اتو ترانسفورماتورهای راه‌انداز موتور القایی مطابق شکل (۴۲) دارای دو سر خروجی هستند که در این نمونه ولتاژ برای راه‌اندازی در ۸۰٪ ولتاژ نامی تأمین شده است.

در شروع راه‌اندازی، سر وسط اتو ترانسفورماتور، ولتاژی متناسب با راه‌اندازی موتور را در اختیار موتور قرار می‌دهد. لذا جریان راه‌اندازی کنترل شده و در ادامه با عبور از مرحله راه‌اندازی، مدار کنترل عمل تغییر اتصال را انجام می‌دهد و ولتاژ شبکه به طور کامل به موتور می رسد.

این روش به سه کلید قطع و وصل (کنتاکتور) و یک اتو ترانسفورماتور متناسب با توان راه‌اندازی موتور احتیاج دارد. در راه‌اندازی موتورهای توان زیاد که امکان راه‌اندازی آنها به‌صورت ستاره ــ مثلث وجود ندارد، از این روش می‌توان استفاده نمود.

۱ــ تلفات هارمونیکی از گردش یک جریان در داخل حلقه اتصال مثلث ایجاد می‌شود. این تلفات در اتصال ستاره وجود ندارد.



شکل ۴۲ ــ مدار قدرت راه‌اندازی موتور القایی توسط اتو ترانسفورماتور و اثر کاهش جریان راه‌اندازی با استفاده از اتوترانسفورماتور در منحنی گشتاور ــ دور
الف) حالت راه‌اندازی ب) حالت کار

۴ــ۱۶ــ۳ــ راه‌اندازی با تجهیزات الکترونیک

قدرت ــ را ه‌اندازی نرم : یکی دیگر از روش‌های مفید راه‌اندازی، استفاده از تجهیزات الکترونیک قدرت موسوم به راه‌اندازی نرم[۱] می‌باشد که در حال حاضر بسیار پر کاربرد است. این تجهیز ساختار متفاوتی نسبت به دیگر روش‌های راه‌اندازی دارد.

یک نمونه راه‌انداز نرم در شکل (۴۳) نشان داده شده است.

در راه‌انداز نرم از تجهیزات الکترونیک قدرت نظیر تریستور و مدارهای کنترل استفاده شده است. وظیفه المان‌های الکترونیک قدرت و مدارات کنترلی، تنظیم ولتاژ مناسب جهت راه‌اندازی موتور می‌باشد، به‌طوری که در زمان راه‌اندازی جریان راه‌اندازی کاهش یابد.

در این روش ابتدا موتور با ولتاژ کم راه‌اندازی می‌شود سپس به‌طور هم‌زمان جریان موتور نیز توسط المان‌های الکترونیک قدرت کنترل می‌شود و افزایش ولتاژ به گونه‌ای است که جریان راه‌اندازی به آرامی به جریان نامی برسد.

افزایش ولتاژ ورودی موتور به صورت تدریجی تا ولتاژ نامی ادامه می‌یابد. در نتیجه گشتاور خروجی موتور نیز به‌تدریج اضافه می‌شود. بدین ترتیب از ایجاد ضربه (شوک)های مکانیکی در زمان راه‌اندازی جلوگیری می‌گردد. یعنی در زمان راه‌اندازی مقدار گشتاور به اندازه‌ای است که تنها بر نیروی اصطکاک و ایستایی موتور غلبه می‌کند. به همین خاطر به این روش راه‌اندازی، راه‌اندازی نرم می‌گویند.

در این روش جریان راه‌اندازی، حدوداً بین ۲ تا ۵ برابر جریان نامی می‌باشد.

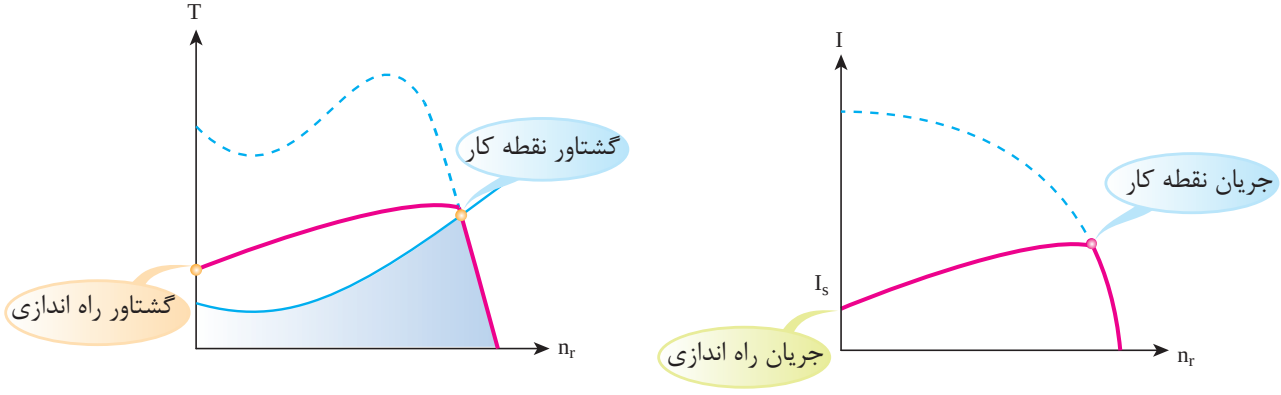
یکی از مزایای این روش امکان تنظیم دقیق گشتاور موردنیاز در هرلحظه است که هزینه‌های تعمیر و نگهداری تجهیزات مکانیکی را کاهش می‌دهد.

کلیه دستگاه‌های راه‌انداز نرم (Soft Starter) دارای سیستم توقف نرم (Stop_Soft) نیز می‌باشند.

از آنجا که اینرسی یا لختی یک جسم متحرک پس از فرمان خاموشی موتور می‌تواند باعث ادامه حرکت شود لذا ممکن است باعث ایجاد آسیب در تجهیزات مکانیکی متصل شده گردد. به همین خاطر کارشناسان مکانیک ترجیح می‌دهند که فرمان ایستادن موتور نیز به‌صورت نرم صورت گیرد تا در زمان ایستادن نیز تنش‌های مکانیکی به حداقل ممکن برسد.

۱) Soft Starter

استفاده از راه‌انداز نرم باعث افزایش طول عمر موتور می‌شود. شاید تنها عیب آن گران‌تر بودن آن نسبت به دیگر روش‌های راه‌اندازی است. البته با افزایش تولید و فراگیر شدن تجهیزات الکترونیک قدرت به نظر می‌رسد در آینده نزدیک قیمت آن به‌طور قابل توجهی کاهش یابد.



شکل ۴۳ ــ مدار راه‌اندازی نرم موتورهای القایی(بالا) ــ نمودارجریان راه‌اندازی نرم (سمت راست) و گشتاورــ دور موتور القایی با راه‌انداز نرم (سمت چپ)

۵ــ۱۶ــ۳ــ روش راه‌اندازی رتوری : با توجه به آنکه تنها در موتور رتور سیم‌پیچی امکان دسترسی به مدار رتور وجود دارد، این روش راه‌اندازی فقط در این موتورها قابل استفاده است.

برای کاهش جریان راه‌اندازی موتور در این روش، با استفاده از یک مقاومت اهمی متغیر سه فاز و اتصال آن از طریق رینگ‌ها به مدار رتور مقاومت اهمی مدار رتور را افزایش می‌دهند. درواقع افزایش مقاومت اهمی مدار رتور باعث افزایش امپدانس مدار رتور و به دنبال آن کاهش جریان و افزایش ضریب قدرت مدار رتور می‌شود. از طرفی با کاهش جریان مدار رتور میدان مغناطیسی حاصل از آن ضعیف تر می‌گردد. یکی از مزیت‌های این روش راه‌اندازی، افزایش گشتاور راه‌اندازی همراه با کاهش جریان راه‌اندازی است. اندازه گشتاور راه‌اندازی به مقدار مقاومت اضافه شده به مدار رتور (R_x) وابسته است.

بیشتر بدانیم

برای یافتن گشتاور ماکزیمم کافیست در رابطه گشتاور (۲۰ــ۳) :

$$T = KE_2^2 \frac{SR_2}{R_2^2 + (SX_2)^2}$$

رابطهٔ $S_m = \frac{R_2}{X_2}$ جایگزین شود، در این‌صورت خواهیم داشت :

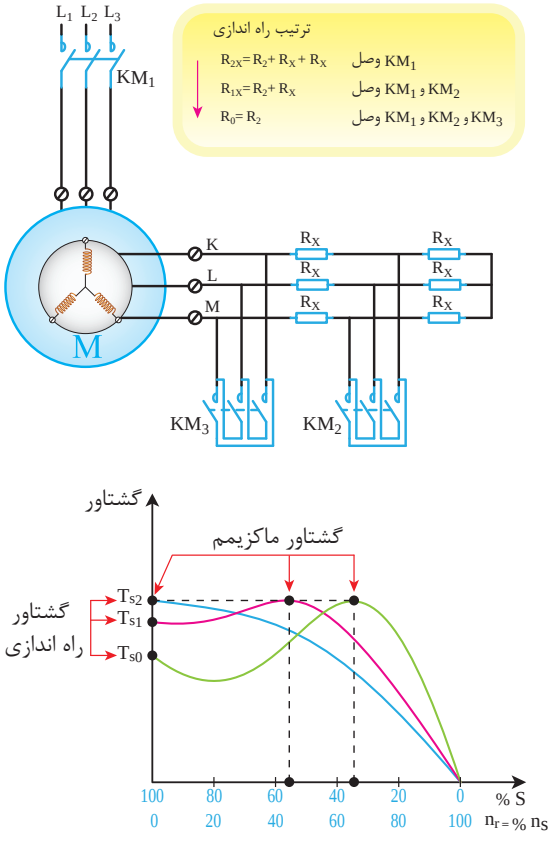
$$T_m = KE_2^2 \frac{\frac{R_2}{X_2} \times R_2}{R_2^2 + (\frac{R_2}{X_2} \times X_2)^2} \Rightarrow$$

$$T_m = KE_2^2 \frac{R_2^2}{2R_2^2 X_2}$$

$$T_m = KE_2^2 \frac{1}{2X_2} \qquad (۳ــ۲۲)$$

گشتاور ماکزیمم موتور القایی از رابطه (۲۲ــ۳) به‌دست می‌آید.

در رابطه (۲۲ــ۳) پیداست که گشتاور ماکزیمم موتور القایی به مقاومت اهمی مدار رتور وابسته نیست ولی با توجه به رابطه $S_m = \frac{R_2}{X_2}$ مقدار مقاومت اهمی مدار رتور می‌تواند مقدار لغزش مربوط به گشتاور ماکزیمم را تغییر دهد. از رابطه $S_m = \frac{R_2}{X_2}$ می‌توان نتیجه گرفت که افزایش مقاومت مدار رتور باعث جابه‌جاشدن مختصات گشتاور ماکزیمم، در نمودار گشتاورــ لغزش می‌شود و آن را به مختصات لحظه راه‌اندازی می‌تواند نزدیک‌تر کند این موضوع در شکل (۴۴) نشان داده شده است.

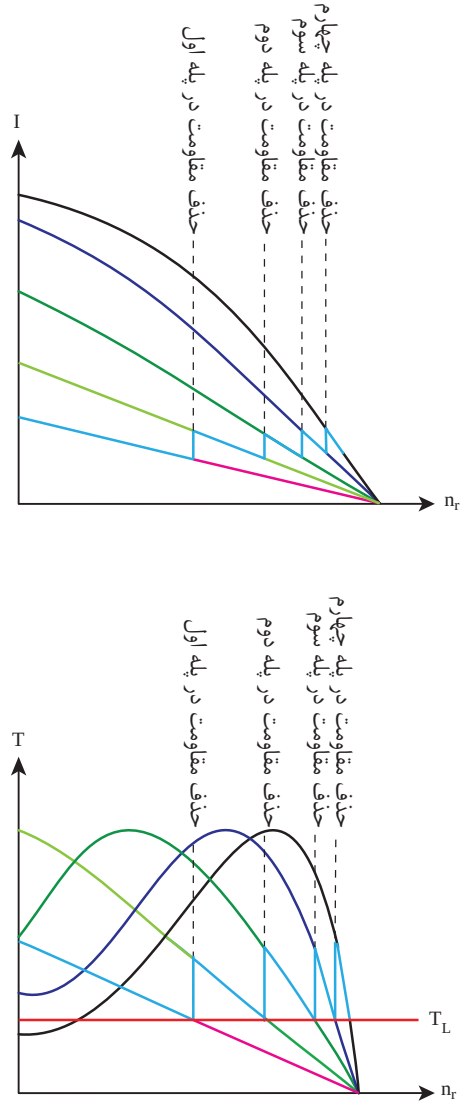


شکل ۴۴ ــ مدار راه‌اندازی موتور القایی به روش تغییر مقاومت رتور (شکل بالا) و اثر تغییر مقاومت مدار رتور برمنحنی گشتاور ــ دور (شکل پایین)

البته باید توجه داشت که بخشی از انرژی الکتریکی در مقاومت اضافه شده به مدار رتور به حرارت تبدیل و تلف می‌شود.

شکل(۴۵)، منحنی گشتاور لغزش و جریان ــ سرعت موتور القایی رتور سیم‌پیچی به‌صورت راه‌انداز چهار مرحله‌ای را نشان می‌دهد.

مهمترین کاربرد موتور القایی رتور سیم‌پیچی در مواردی است که بار مکانیکی به گشتاور راه‌اندازی زیاد و قطع و وصل پی‌درپی موتور احتیاج داشته باشد. البته قیمت این موتورها و



شکل ۴۵ ــ راه‌انداز چهار پله‌ای موتور القایی رتور سیم پیچی و نمایش چگونگی مهار جریان راه‌اندازی

هزینه تعمیر و نگهداری آن در مقایسه با موتور القایی رتور قفسی زیاد است همچنین به دلیل اتصال جاروبک و احتمال ایجاد جرقه نمی‌توان از آن در مکان‌هایی نظیر پالایشگاه استفاده نمود.

خود را بیازمایید

۱ــ روش‌های راه‌اندازی موتورهای القایی را نام ببرید.

۲ــ برداشت شما از نسبت گشتاور راه‌اندازی به گشتاور نامی چیست؟

۳ــ معایب استفاده از روش راه‌اندازی مستقیم چیست؟

۴ــ در روشهای راه‌اندازی استاتوری ساده ترین راه کاهش جریان راه‌اندازی چیست ؟

۵ــ روش راه‌اندازی ستاره ــ مثلث برای کدام یک از موتورهای القایی قابل اجرا می‌باشد؟

۶ــ اگر در روش راه‌اندازی ستاره ــ مثلث فاصله زمانی بین اتصال ستاره و مثلث بیش از حد باشد چه اتفاقی می افتد؟ چرا؟

۷ــ کاربرد روش راه‌اندازی با اتوترانسفور ماتور در کجاست؟

۸ــ روش راه‌اندازی نرم چه مزیت‌هایی نسبت به دیگر روش‌های استاتوری دارد؟

۹ــ روش راه‌اندازی رتوری فقط در موتورهای القایی ..... قابل اجرا می‌باشد.

۱۰ــ افزایش مقاومت رتور چه اثری بر گشتاور ماکزیمم و لغزش نظیر گشتاور ماکزیمم دارد؟

۱۱ــ مهمترین کاربرد موتور القایی با رتور سیم‌پیچی شده در چه نوع بارهایی می‌باشد؟

۱۷ــ۳ــ تغییر سرعت موتورهای القایی

گاهی در صنایع لازم است، سرعت موتور قابل کنترل باشد. در گذشته یکی از ضعف‌های موتور القایی را دشواری تنظیم سرعت آن و تنها برتری موتورهای DC را کنترل‌پذیری آسان سرعت آن می‌دانستند. در حال حاضر با رشد صنعت الکترونیک و توسعه تجهیزات الکترونیک قدرت، کنترل سرعت موتورهای القایی به سهولت امکان پذیر شده است.

به‌طور کلی برای تغییر سرعت موتورهای القایی روش‌های زیر به‌کار گرفته می‌شود.

تغییر سرعت میدان دوار(n_s) با :

- روش کنترل هم‌زمان فرکانس و ولتاژ
- تغییر قطب‌های سیم‌بندی

تغییر مقدار لغزش (S) با :

- تغییر ولتاژ
- تغییر مقاومت مدار رتور(مخصوص موتورهای رتور سیم‌پیچی)

۱ــ۱۷ــ۳ــ کنترل هم‌زمان فرکانس و ولتاژ : با توجه به رابطه (۲ــ۳) می‌توان با تغییر فرکانس، سرعت میدان دوار را تغییر داد. اما لازمهٔ استفاده از این روش داشتن یک مبدل فرکانس است. شکل (۴۶) نمای ظاهری یک نمونه از مبدل‌های فرکانسی را نشان می‌دهد . مبدل فرکانسی را VSD [۱] یا VFD نیز می‌گویند.

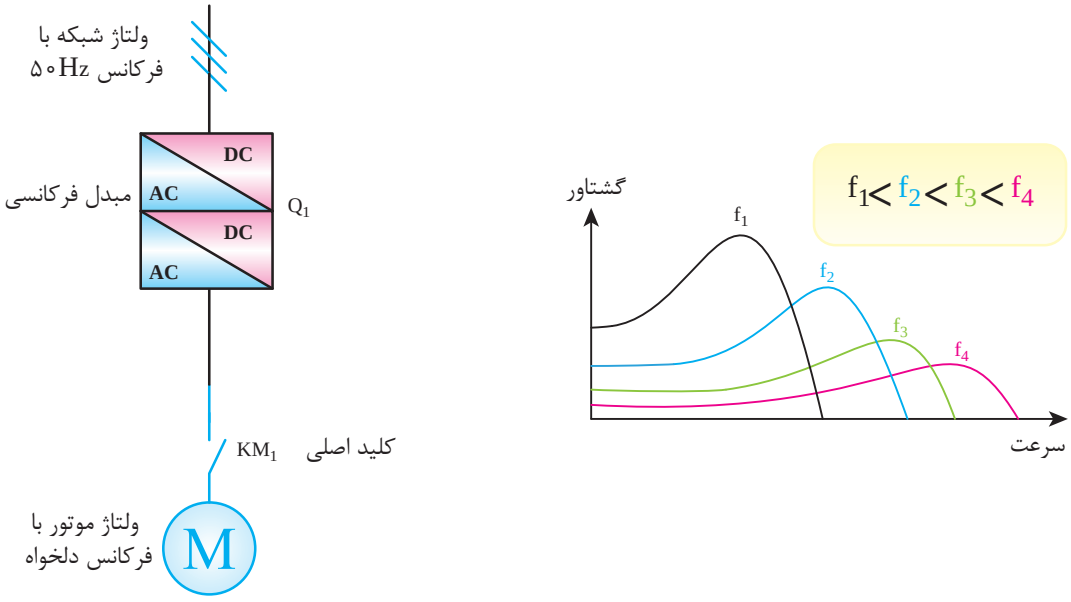
شکل ۴۶ــ نمای ظاهری یک نمونه از مبدل فرکانسی کنترل‌کننده سرعت موتور القایی

۱ــ (Variable Speed Drive Or Variable Frequency Drive)

هر مبدل فرکانسی دارای دو بخش می‌باشد. ابتدا ولتاژ AC (۵۰ یا ۶۰ هرتز) در این دستگاه به ولتاژ DC تبدیل می‌شود سپس ولتاژ DC را به ولتاژ AC، با فرکانس قابل کنترل معمولاً بین ۰~۲۵۰Hz تبدیل می‌کند.

نکتهٔ قابل توجه اینکه، تغییر فرکانس علاوه بر تغییر سرعت سنکرون بر روی نیروی محرکه القاء شده رتور و همچنین سایر کمیت‌های مغناطیسی موتور و گشتاور نیز اثر می گذارد.

مشخصه گشتاور ــ دور موتور القایی در فرکانس‌های مختلف در شکل (۴۷) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۴۷) ملاحظه می‌شود که با افزایش فرکانس، گشتاور موتور مرتب کاهش یافته و با کاهش فرکانس گشتاور موتور افزایش می‌یابد. این موضوع بسیار با اهمیت است. زیرا با افزایش بیش از حد فرکانس ممکن است گشتاور موتور از گشتاور بار کمتر شود و موتور زیر بار بماند. از طرفی با کاهش فرکانس موتور، هسته ماشین به ناحیهٔ اشباع مغناطیسی وارد می‌شود، لذا برای جلوگیری از سوختن سیم‌پیچ ماشین در هر دو حالت باید به‌طور همزمان ولتاژ و فرکانس تغییر نماید، به‌طوری که نسبت $\frac{E}{F}$ ثابت بماند.



شکل ۴۷ــ شمای تک خطی اتصال مبدل فرکانسی به موتور القایی (شکل سمت چپ) اثر تغییر فرکانس بر گشتاور و سرعت (شکل سمت راست)

در فصل اول بیان گردید که ولتاژ القایی در یک سیم‌پیچ از رابطه (۲۳ــ۳) به‌دست می‌آید.

$$E = ۴/۴۴NBAf \qquad (۳_۲۳)$$

به عبارتی

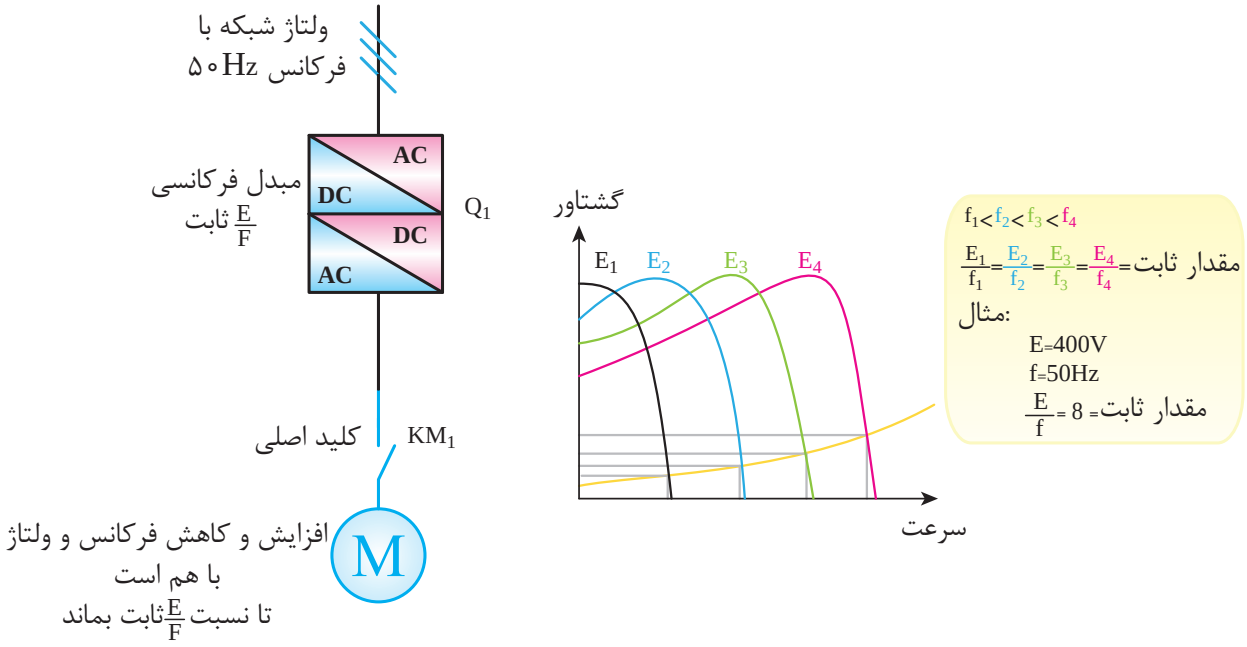
$$E = ۴/۴۴N\varphi f \qquad (۳_۲۴)$$

در صورتی که فرکانس به تنهایی افزایش یا کاهش یابد، برای برقراری رابطه (۲۴ــ۳) باید شار فاصله هوایی کاهش یا افزایش یابد. و از آنجا که تقابل دو میدان باعث ایجاد گشتاور در موتور القایی می‌شود لذا تغییرات شار مغناطیسی به تغییر گشتاور مفید موتور می‌انجامد.

رابطه (۲۴ــ۳) را می‌توان به‌صورت رابطه (۲۵ــ۳) نوشت، بنابراین برای تثبیت مقدار شار مغناطیسی مطابق رابطه (۲۵ــ۳) لازم است مقدار ولتاژ و فرکانس با یک نسبت تغییر کنند.

$$\frac{E}{f} = ۴/۴۴N\varphi \qquad (۳_۲۵)$$

در شکل (۴۸) شمای تک خطی راه‌اندازی و کنترل دور موتور القایی به وسیله یک مبدل ولتاژ ــ فرکانس نشان داده شده است.



شکل ۴۸ــ شمای تک خطی اتصال مبدل فرکانسی / ولتاژ به موتور القایی (شکل سمت چپ) اثر تغییر فرکانس و ولتاژهمزمان بر منحنی گشتاور ـ دور (شکل سمت راست)

خود را بیازمایید

۱ــ روش‌های کنترل سرعت موتورهای القایی را نام ببرید.

۲ــ عملکرد مبدل فرکانس در کنترل سرعت موتور القایی چگونه است؟

۳ــ افزایش بیش از حد فرکانس شبکه چه اثری بر گشتاور موتور القایی دارد؟چرا؟

۴ــ رابطه‌ای براساس محاسبه شار مغناطیسی بنویسید که نشان دهد برای ثابت ماندن آن بایستی ولتاژ و فرکانس همزمان تغییر کنند.

۲ــ۱۷ــ۳ــ تغییر قطب‌های سیم‌بندی : یکی دیگر از راه‌های تغییر سرعت میدان دوار با توجه به رابطه(۲ــ۳) تغییر تعداد قطب‌های سیم‌بندی موتور القایی است. ولی تعداد قطب‌های موتور القایی :

اولاً به نوع سیم‌پیچی استاتور موتور وابسته است.

ثانیاً از لحاظ فیزیکی تعداد قطب‌ها مضرب زوج می‌باشند. (۲,۴,۶,...)

بنابراین تغییر تعداد قطب‌ها باعث تغییر پیوسته سرعت نمی‌شود بلکه سرعت به‌طور ناپیوسته و پله‌ای تغییر می‌کند. تغییر تعداد قطب‌های موتور القایی به روش‌های زیر امکان پذیر است.

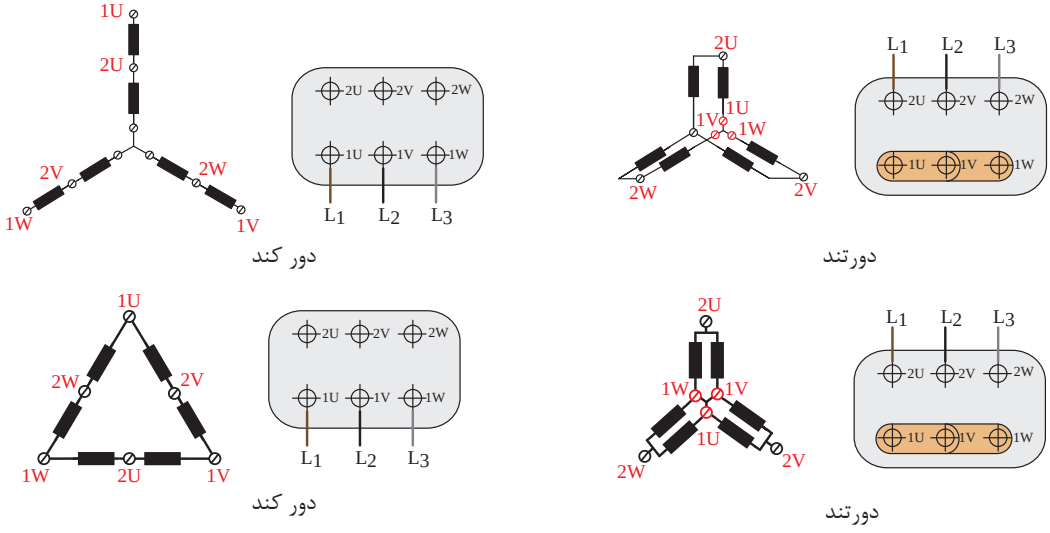
الف) استفاده از سیم‌پیچی دالاندر

ب) قراردادن دو سیم‌بندی مجزا در داخل استاتور

۳ــ۱۷ــ۳ــ موتور دالاندر : در موتورهای القایی روشی برای سیم‌پیچی وجود دارد که به اتصال دالاندر معروف است. در اتصال دالاندر می‌توان تعداد قطب‌ها را با تغییر اتصال کلاف‌های موتور نصف و یا دو برابر نمود. بنابراین سرعت موتورهای دالاندر به نسبت ۱ به ۲ می‌باشد.

انتخاب نوع اتصالات داخلی موتور دالاندر باعث تغییر توان و گشتاور موتور در سرعت تند و یا کند می‌شود. به همین‌خاطر توان و گشتاور موتورهای دالاندر در اتصالات مختلف در برگهٔ مشخصات فنی موتور توسط سازنده ارائه می‌گردد.

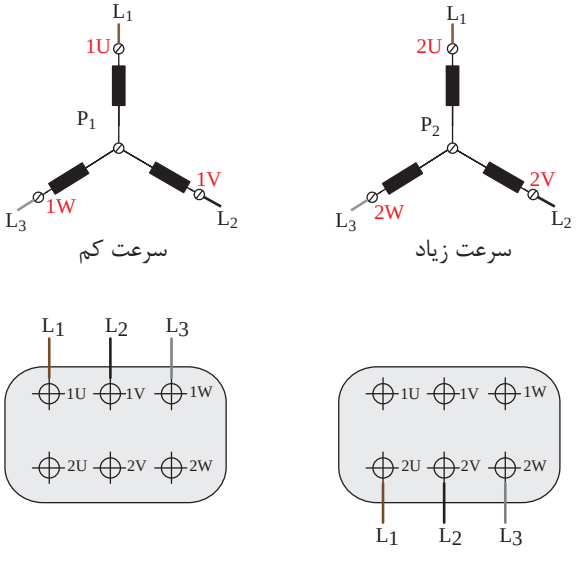
شکل (۴۹) چگونگی اتصال دو نوع از متداول‌ترین موتورهای دالاندر را به شبکه برق سه فاز نشان می‌دهد.



شکل ۴۹ ــ جعبه ترمینال و نحوه اتصال دو نوع موتور دالاندر

۴ــ۱۷ــ۳ــ قراردادن دو سیم‌بندی مجزا در داخل استاتور : اگر در استاتور موتور القایی دو گروه سیم‌پیچ کاملاً مستقل از هم قرار گیرند به‌طوری‌که هیچ ارتباط الکتریکی بین آنها وجود نداشته باشد، در این صورت آن را موتور القایی با سیم‌پیچ جداگانه یا مستقل می‌نامند.

در این موتور هر یک از سیم‌پیچ‌ها می‌توانند با تعداد قطب مشخصی طراحی و در استاتور موتور قرار داده شوند. که البته در یک زمان فقط یکی از آنها باید در مدار باشد. مثلاً با داشتن موتوری که دارای دو سیم‌پیچ ۴ و ۶ قطبی در فرکانس ۵۰HZ است می‌توان به هر دو سرعت ۱۵۰۰RPM و ۱۰۰۰RPM دسترسی داشت.

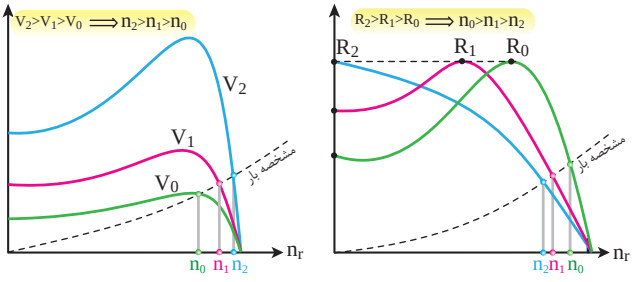


شکل ۵۰ ــ جعبه ترمینال و نحوه اتصال یک نوع موتور با سیم‌پیچ جداگانه

از این نمونه موتور در قدرت‌های کمتر از ۲۰KW در صنعت استفاده می‌شود. البته مدل تک فاز این نوع موتور در کولرهای آبی استفاده می‌شود.

۵ــ۱۷ــ۳ــ تغییر مقدار لغزش : در صورتی که در نظر باشد با تغییر مقدار لغزش، بدون تغییر سرعت میدان دوار، سرعت چرخشی بار مکانیکی تغییر کند، باید مطابق شکل (۵۱ــ الف) از تغییر ولتاژ و یا شکل (۵۱ــ ب) از تغییر مقاومت مدار رتور استفاده شود.

در هر دو نمودار شکل(۵۱) ملاحظه می‌شود، تغییر مقادیر ولتاژ و یا مقاومت رتور باعث تغییر دور و جابه‌جایی نقطه کار می‌گردد یعنی نسبت به حالت اول سرعت لغزش تغییر می‌کند.



شکل ۵۱ــ اثر تغییر ولتاژ(سمت چپ) وتغییر مقاومت رتور(سمت راست) بر سرعت موتور القایی

تغییر سرعت به کمک تغییر ولتاژ : با توجه به رابطه (۲۰ــ۳) گشتاور موتور القایی با مجذور ولتاژ متناسب است. یعنی می‌توان با تغییر ولتاژ موتور القایی مطابق شکل (۵۱ــ الف) نقطه کار را جابه‌جا نمود و در نتیجه سرعت گردش رتور را تغییر داد. البته باید توجه داشت که :

اولاً : نمی‌توان ولتاژ را بیش از حد ولتاژ نامی افزایش داد. زیرا باعث اشباع مغناطیسی هسته موتور می‌شود و در ضمن ممکن است، عایق سیم‌پیچ‌ها تحمل این ولتاژ را نداشته باشند.

ثانیاً : کاهش ولتاژ علاوه بر کم کردن سرعت باعث کم شدن گشتاور و توان موتور نیز می‌شود در این حالت امکان کم‌شدن گشتاور و موتور از گشتاور بار و زیر بار ماندن آن وجود دارد.

تغییر سرعت به کمک تغییر مقاومت مدار رتور :

پیش از این گفته شد که افزایش در مقاومت مدار رتور باعث کاهش جریان راه‌اندازی می‌شود. ضمن اینکه منحنی گشتاور موتور به‌صورت شکل (۵۱ــ ب) تغییر می‌کند.

با توجه به شکل (۵۱ ــ ب) تغییر مقاومت مدار رتور، باعث جابه‌جایی نقطه کار موتور می‌شود. از معایب این روش کنترل سرعت، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود :

- افزایش مقاومت مدار رتور برای کاهش سرعت باعث افزایش تلفات و کاهش راندمان در موتور می‌شود.

خود را بیازمایید

۱ــ در موتور های القایی هر چقدر تعداد قطب بیشتر شود سرعت موتور ..... می شود.

۲ــ موتوری دالاندر دارای ۶ قطب در یکی از سرعت‌های (کند یا تند) مفروض است، اگر فرکانس شبکه ۵۰HZ باشد، به نظر شما سرعت میدان دوار آن در دور کند و تند چقدر است؟

۳ــ مهمترین عیب موتور چند سرعته با سیم پیچ مجزا را بنویسید.

۴ــ آیا می‌توان بدون تغییر سرعت میدان دوار، سرعت موتور القایی را تغییر داد؟ با استفاده از کدام روش؟

۵ ــ آیا می‌توان برای کاهش سرعت موتور القایی از طریق کنترل ولتاژ، مقدار ولتاژ ورودی را تا هر سطح دلخواه کاهش داد؟ چرا؟

۶ــ کنترل سرعت موتور القایی از روش تغییر مقاومت رتور با چه عیب‌هایی همراه است؟

۱۸ــ۳ــ ترمز موتورهای القایی

رتور موتور الکتریکی در حال گردش به‌دلیل سرعتی که دارد، دارای انرژی جنبشی (اینرسی حرکتی) است و پس از خاموش شدن تمایل به ادامه چرخش دارد. مقدار این انرژی به وزن و ابعاد رتور بستگی دارد. بنابراین پس از فرمان خاموشی موتور، تا مدتی رتور به چرخش خود ادامه می‌دهد.

در بعضی از بارهای مکانیکی (مانند پمپ و فن) اصراری برای توقف سریع رتور وجود ندارد. چرا که بار متصل به آن نیاز به ایست فوری ندارد. اما در بارهایی نظیر بالابرها، ماشین‌های نساجی و ... زمان و محل ایستادن ماشین اهمیت دارد. در نتیجه لازم است به محض خاموش شدن موتور، رتور کاملاً متوقف شود. عمل توقف سریع رتور را در موتورهای الکتریکی، ترمز گویند.

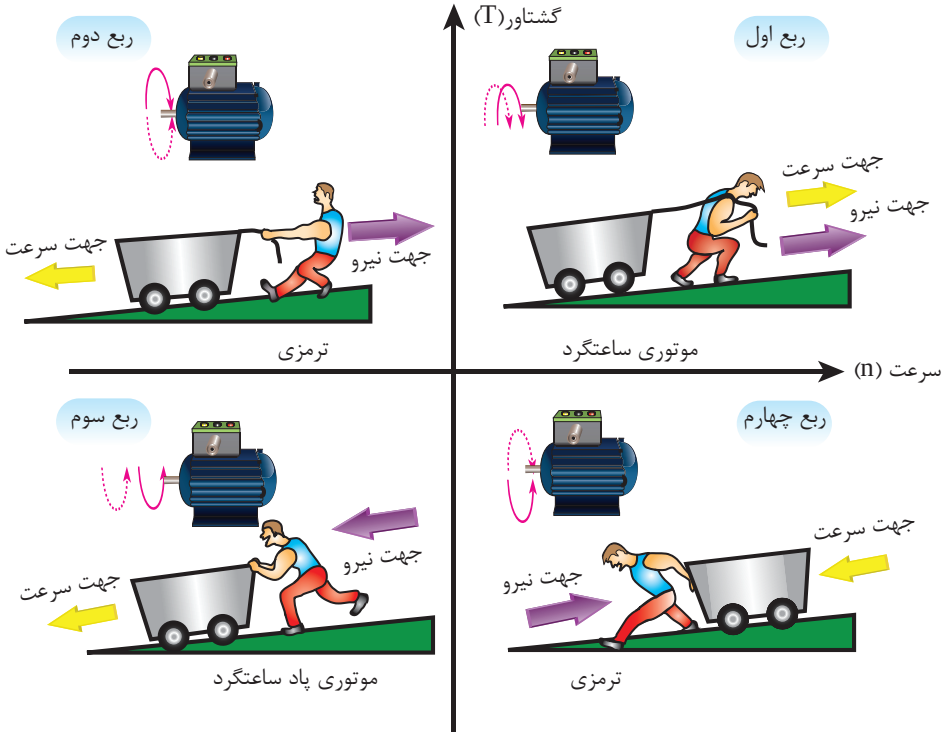
در شکل (۵۲) چهار ناحیه عملکردی موتور بر اساس محورهای گشتاور و دور مشخص شده است. با توجه به علامت سرعت و گشتاور در ناحیهٔ دوم و چهارم شکل (۵۲)، که خلاف یکدیگر می باشند حالت ترمزی رخ می‌دهد.

برای توقف رتور، باید انرژی جنبشی محور دوار سریعاً مستهلک شود. برای رسیدن به این هدف لازم است انرژی جنبشی موتور به انرژی حرارتی تبدیل شود و یا آنکه با تبدیل انرژی جنبشی به انرژی الکتریکی بتوان آن را به شبکه برق برگرداند.

اکثر روش‌های ترمزی، انرژی جنبشی رتور را به حرارت تبدیل می‌کنند اما در روش برگرداندن انرژی به شبکه برق، حرارت داخلی موتور افزایش نمی‌یابد و در نتیجه عمر کاری موتور طولانی‌تر می‌شود.

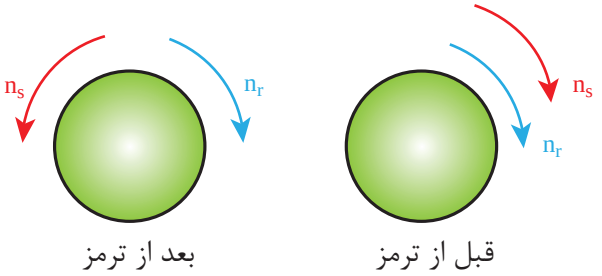
به‌طور کلی برای ترمز موتورهای القایی روش‌های زیر وجود دارد :

- ترمز جریان مخالف
- ترمز با جریان مستقیم
- ترمز ژنراتوری
- ترمزالکترومکانیکی



شکل ۵۲ ــ چهار ناحیه عملکردی موتور الکتریکی با توجه به جهت سرعت رتور و گشتاور

۱ــ۱۸ــ۳ــ ترمز جریان مخالف : می‌توان با تغییر جای دو فاز جهت چرخش میدان دوار در استاتور را تغییر داد. حالا فرض کنید، موتوری با سرعت n_r در یک جهت در حال چرخش است. اگر به محض خاموش کردن موتور جای دوفاز ورودی آن عوض شود، میدان دوار سریعاً تغییر جهت می‌دهد ولی رتور به دلیل انرژی ذخیره شده در آن می خواهد همچنان در جهت قبلی به چرخش ادامه دهد. اما تقابل میدان رتور با میدان دوار استاتور منجر به توقف آنی حرکت رتور می‌شود.



شکل ۵۳ ــ جهت سرعت میدان دوار و سرعت رتور در حالت موتوری و ترمزی

با توجه به تعریف لغزش، مطابق شکل(۵۳) و به دلیل آنکه n_s و n_r خلاف جهت یکدیگر هستند.[۱]، می‌توان نوشت :

$$S=\frac{n_s-(-n_r)}{n_s}>1$$

به یاد دارید که در ماشین‌های القایی هرگاه لغزش بزرگتر از واحد (S>۱) شود، ماشین در ناحیه عملکرد ترمزی قرار می‌گیرد. البته در استفاده از این روش ترمزی نکات زیر باید مد نظر قرار گیرند :

۲ــ۱۸ــ۳ــ ترمز با جریان مستقیم : در این روش ابتدا سیم‌پیچ‌های استاتور موتور، از شبکه برق جدا می‌شوند و بلافاصله به یک منبع ولتاژ مستقیم (DC) وصل می‌گردند. این روش را ترمز با جریان مستقیم موتور القایی می‌گویند.

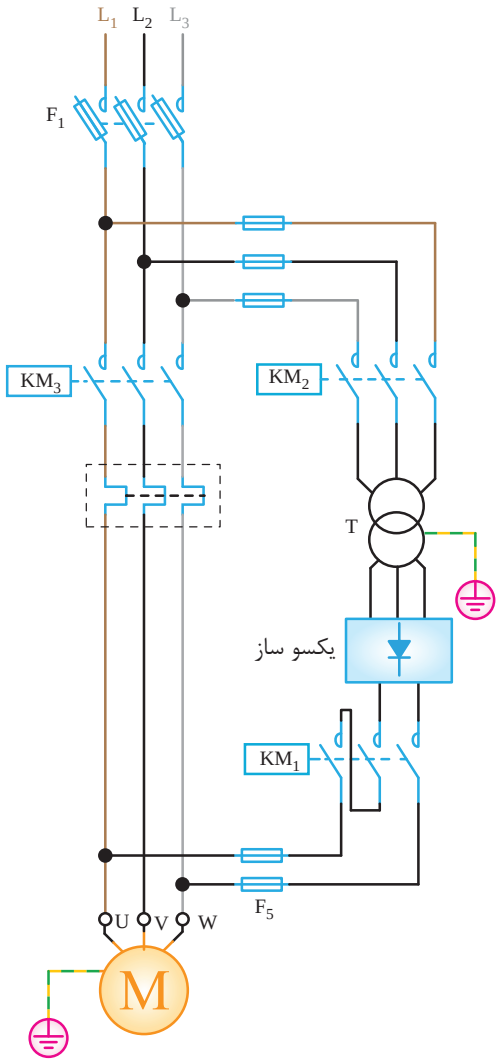
نکته ۱ : به دلیل اینکه لغزش در این روش بزرگ‌تر از واحد است لذا جریان ترمزی از جریان راه‌اندازی بیشتر می‌شود. پس در انتخاب موتور و تجهیزات قطع و وصل کنندهٔ آن باید توجه ویژه داشت.

نکته ۲ : تمهیدات لازم برای معکوس نشدن جهت گردش رتور پس از انجام ترمز باید پیش‌بینی شود.

نکته ۳ : انتخاب این روش برای ترمز موتورهای کوچک به دلیل اینرسی بسیار کمی که دارند توصیه نمی‌شود زیرا پس از ترمز، جهت چرخش در آن سریعاً عکس گردیده و پس از گردش در جهت مخالف متوقف می‌شود.

۱ــ اهمیتی ندارد n_s را مثبت و n_r را منفی درنظر گرفت و یا بالعکس، مهم این است که این دو در خلاف جهت یکدیگر می باشند زیرا حالت ترمزی به این مفهوم است :

$$S=\frac{-n_s-n_r}{-n_s}>1$$



شکل ۵۴ ــ ترمز با جریان مستقیم موتور القایی

شکل (۵۴) مدار قدرت ترمز با جریان مستقیم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل(۵۴) ملاحظه می‌گردد کلید KM۲ اتصال مدار یکسوساز را بر عهده دارد . در این روش پس از قطع ولتاژ AC ورودی توسط کلید KM۳ کلید KM۱ وصل گردیده و برق یکسو شده را به کلاف‌های موتور می‌رساند. با اتصال ولتاژ مستقیم به کلاف‌های موتور میدان ساکن در استاتور تولید می‌شود که در نتیجهٔ القای این میدان ساکن رتور سریعاً متوقف می‌گردد.

نکات قابل توجه در این روش عبارتند از :

نکته ۱ : ولتاژ منبع DC به مراتب باید کمتر از ولتاژ شبکه باشد. معمولاً برای تأمین این ولتاژ مطابق شکل (۵۴) از یک ترانسفورماتور کاهنده به همراه یکسوساز استفاده می‌شود.

نکته ۲ : برای انجام ترمز آرام، جریان DC اعمال شده به سیم پیچ باید تقریباً ۱/۳ برابر جریان نامی موتور باشد بدین لحاظ نسبت به ترمز جریان مخالف برتری دارد. (جریان ترمزی آن کمتر است)

نکته ۳ : جریان DC اعمال شده به سیم‌پیچ‌ها با توقف موتور باید قطع شود. چون در این روش تغییر جهت چرخش رخ نمی‌دهد، می‌توان از آن در موتورهای کوچک القایی نیز استفاده کرد.

نکته ۴ : برای افزایش گشتاور ترمزی در موتورهای القایی رتور سیم‌پیچی، علاوه بر اتصال جریان DC، می‌توان از اضافه کردن مقاومت الکتریکی به مدار سیم‌پیچی رتور نیز استفاده نمود.

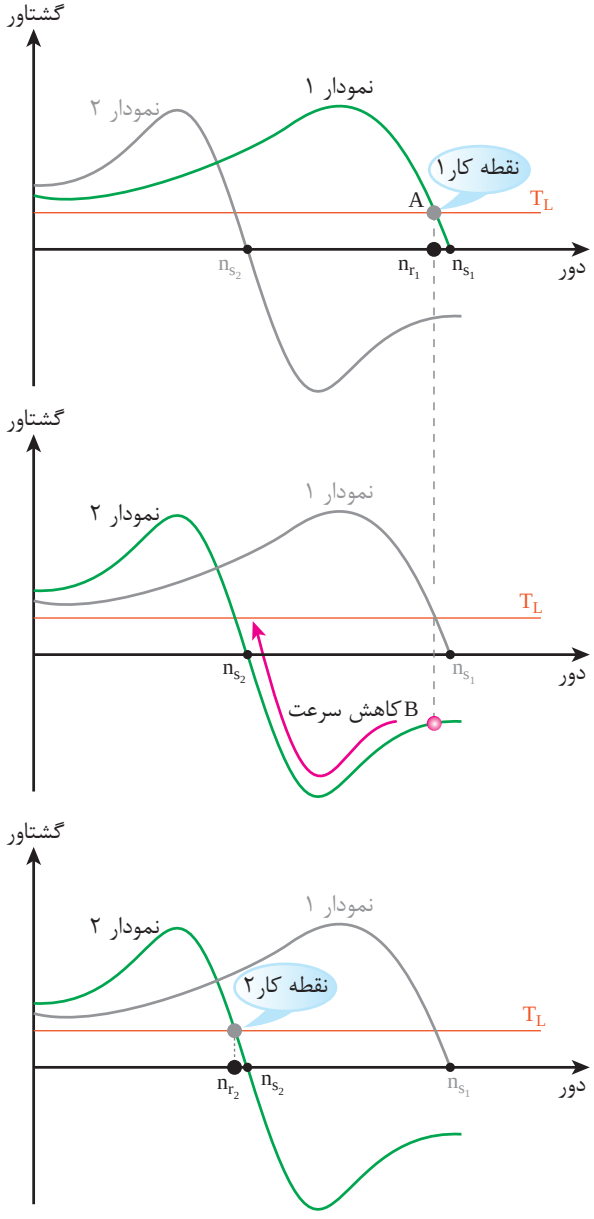
۳ــ۱۸ــ۳ــ ترمز ژنراتوری : شکل (۵۵) نمودار گشتاورــ دور موتورالقایی دالاندر را نشان می‌دهد. در موتورهای دالاندر، سرعت میدان دوار در حالت دور کند نصف حالت دور تند می‌باشد. لذا نمودار (۱) مربوط به دور تند و نمودار(۲) مربوط به دور کند موتور دالاندر است. فرض کنید موتور با سرعت n_{r_1} در حال چرخش است برای انجام عمل ترمز می‌توان اتصال موتور را از دور تند به دور کند تغییر داد. این موضوع سبب می‌شود که سرعت میدان دوار بلافاصله از n_{s_1} به n_{s_2} کاهش یابد. به این ترتیب در مشخصه گشتاور ــ دور، وضعیت موتور از نقطهٔ A، روی نمودار (۱) به نقطهٔ B، روی نمودار (۲) شکل (۵۸) جا به‌جا می‌شود. ولی به دلیل اینرسی بار و رتور، سرعت رتور هنوز به این حد کاهش نیافته است. در این حالت تا زمان رسیدن سرعت رتور به نقطهٔ کار جدید، مقدار گشتاور موتور مسیر نشان داده شده در نمودار (۲) را طی می‌نماید تا سرعت آن در نقطهٔ کار جدید تثبیت شود.

فاصله بین نقطهٔ B تا نقطهٔ کار (۲) ناحیه ژنراتوری ماشین در دور کند می‌باشد ولی چون تداوم نیروی مکانیکی مانند مولدها روی محور ماشین وجود ندارد، سرعت محور سریعاً رو به کاهش می‌گذارد. تا سرعت آن روی نقطهٔ کار (۲) تثبیت شود.

بنابراین با این روش ترمزی توقف کامل حاصل نمی‌شود بلکه کاهش سریع سرعت تا زمان وارد شدن ماشین به ناحیه موتوری و رسیدن موتور به نقطه کار جدید ادامه می یابد که روی نمودار (۲) شکل (۵۵) نشان داده شده است. آیا چنین کاهش سرعتی را در هنگام اتومبیل سواری و استفاده راننده از دنده معکوس در سرعت بالا دیده‌اید؟

این روش ترمزی برای موتور بالابرها و جرثقیل‌ها کاربرد دارد.

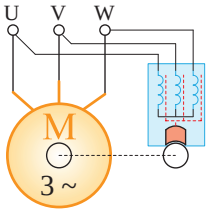
باید توجه داشت که در کنار این روش ترمزی لازم است از سایر روش‌های ترمزی نیز استفاده شود.



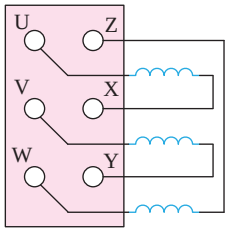
شکل ۵۵ ــ تشریح عملکرد ترمز مولدی در موتور دالاندر

۴ــ۱۸ــ۳ــ ترمز الکترومکانیکی : در این شیوه به کمک اصطکاک میان قسمت ثابت با یک دیسک عمل ترمز انجام می‌شود. رتور الکتروموتورهایی که از این روش ترمز استفاده می‌کنند به همراه دیسک به‌صورت یکپارچه ساخته می‌شوند.

الف)ترمز با تغذیه از خود



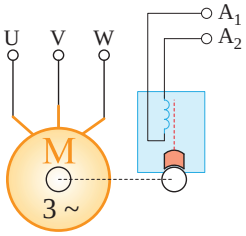
نماد ترمز موتوری که در نبود جریان فعال می‌شود.



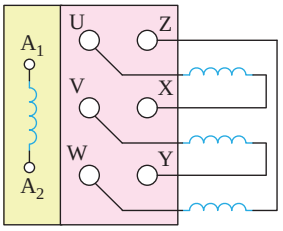
شمای اتصالات در روی پلاک ترمینال‌ها

قابل اجرا فقط در موتورهایی که ترمز آنها در نبود جریان عمل می‌کند.

ب)ترمز با تغذیه مستقل (۱ یا ۳ سیم‌پیچ)



نماد ترمز موتوری که در نبود جریان فعال می‌شود.



شمای اتصالات در روی پلاک ترمینال‌ها

در هردو روش ترمز الکترومکانیکی قابل اجرا است.

شکل ۵۶ ــ انواع موتورهای القایی با ترمز الکترومکانیکی

این روش ترمزی به دو صورت انجام می‌شود :

الف) ترمز الکترومکانیکی که در زمان نبود جریان برق عمل می‌کند.

در شکل(۵۷) مشاهده می‌شود که در هنگام قطع برق موتور، فنر به صفحه مغناطیسی یا همان دیسک فشار آورده و آن را محکم به محور می چسباند ولی به محض برقدار شدن موتور، بوبین الکترومغناطیسی، دیسک را از روی محور جدا می نماید.

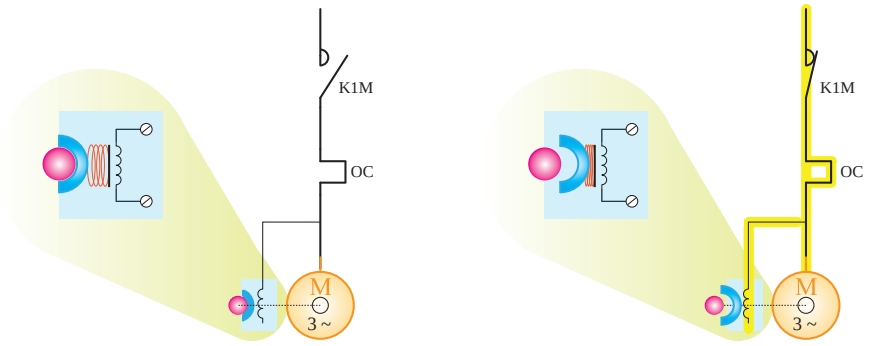
ب) ترمز الکترومکانیکی که با عبور جریان عمل می‌کند.

شکل(۵۸) نمونه‌ای از یک موتور الکتریکی با این نوع ترمز را نشان می‌دهد.

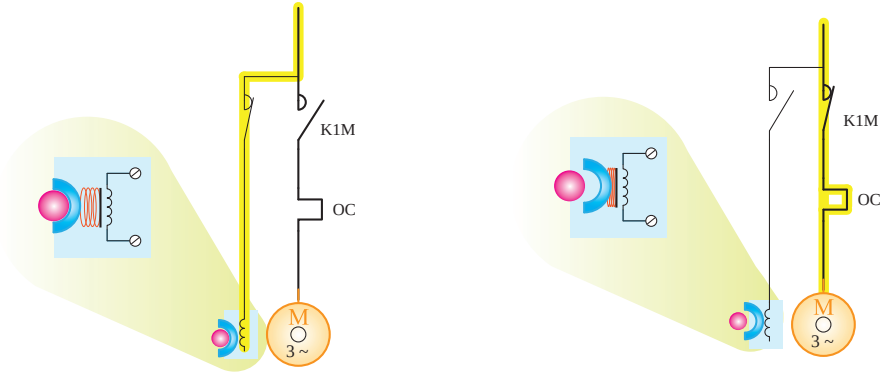
در این روش برای برقدار نمودن بوبین الکترومغناطیسی باید از مدار فرمان استفاده شود. زیرا قفل شدن محور موتور با اعمال جریان الکتریکی به بوبین الکترومغناطیسی مربوط به دیسک صورت می گیرد.

نکته ۱ : برخی سازندگان موتور، ولتاژ تغذیه ترمز را متفاوت با ولتاژ اصلی موتور در نظر می گیرند که باید مورد توجه بهره بردار قرار گیرد.

نکته ۲ : ترمز الکترومکانیکی گزینهٔ خوبی جهت ترمز مکمل بارهای ثقلی نظیر آسانسورها و جرثقیل محسوب می‌شود.



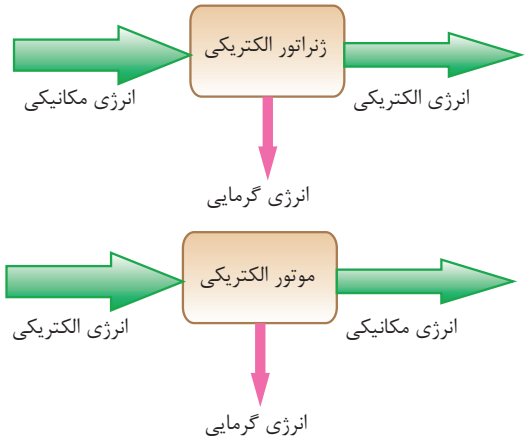
شکل ۵۷ ــ با خاموش شدن موتور، دیسک به محور می چسبد



شکل ۵۸ ــ با فرمان ترمز الکترومکانیکی موتور خاموش و دیسک به محور می چسبد

۱۹ــ۳ــ رفتار ژنراتوری ماشین القایی

ماشین الکتریکی به عنوان موتور، انرژی الکتریکی را از طریق میدان مغناطیسی به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. همچنین به ماشینی که انرژی مکانیکی را با کمک میدان مغناطیسی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند ژنراتور می‌گویند. بنابراین عملکرد ژنراتور دقیقا عکس حالت موتور الکتریکی تعریف می‌شود. تعاریف ژنراتور و موتور به‌صورت طرح واره در شکل(۵۹) نشان داده شده است.



شکل ۵۹ ــ نمایش ژنراتور و موتور الکتریکی از نقطه نظر انرژی

خود را بیازمایید

۱ــ انواع روش‌های ترمز در موتورهای القایی را نام ببرید.

۲ــ به نظر شما چرا در روش ترمز جریان مخالف، جریان ترمزی بیشتر از جریان راه‌اندازی است؟

۳ــ چگونگی عملکرد ترمز دینامیکی را توضیح دهید.

۴ــ دو مزیت روش ترمز دینامیکی نسبت به ترمز جریان مخالف چیست؟

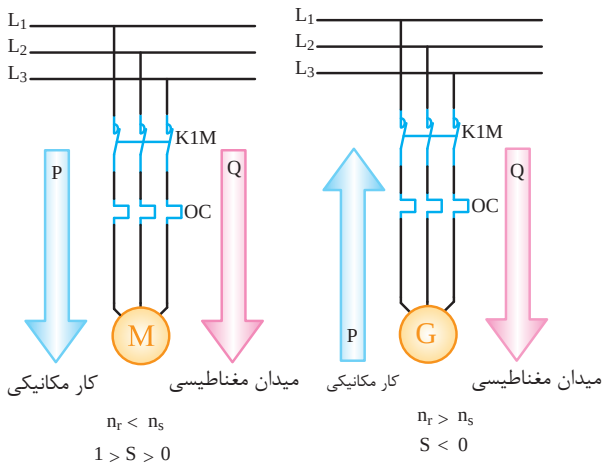
۵ــ توضیح دهید، هنگامی که یک موتور دالاندر از سرعت تند به کند تغییر حالت می‌دهد، چه اتفاقی می‌افتد؟

۶ــ کاربرد مهم روش ترمز ژنراتوری در کجاست؟ چرا؟

ماشین القایی، می‌تواند هم به صورت ژنراتور و یا به عنوان موتور استفاده شود. ماشین القایی در حالت موتوری از شبکه برق توان اکتیو (P) و توان راکتیو (Q) جذب می‌کند. که توان اکتیو (P) را به مصرف خروجی جهت غلبه بر بار مکانیکی می‌رساند و البته بخشی از آن نیز تلف می‌شود. توان راکتیو را موتور القایی برای ایجاد میدان دوار مغناطیسی نیاز دارد.

شکل (۶۰) این واقعیت را نمایش می‌دهد. البته سمت انتقال توان اکتیو و راکتیو (P,Q) در موتورها از شبکه برق به طرف موتور می‌باشد.

اما در حالتی که ماشین القایی به عنوان ژنراتور استفاده شود، قدرت مکانیکی(ورودی) به محور ماشین القایی مطابق شکل (۶۰) به صورت توان اکتیو(P) به شبکه برق تحویل می‌شود البته به شرطی که توان راکتیو(Q) مورد نیاز ماشین تأمین شود.



شکل ۶۰ــ موتور و ژنراتور القایی متصل به شبکه برق

برای تأمین توان راکتیو(Q) دو راه وجود دارد :

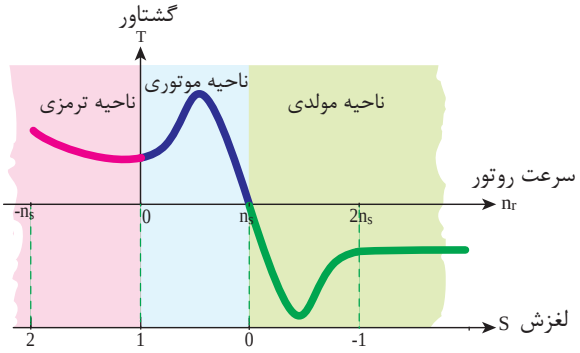
الف) اتصال ژنراتور القایی به شبکه برق

ب) استفاده از خازن

۱ــ۱۹ــ۳ــ اتصال ژنراتور القایی به شبکه برق :

در این حالت ژنراتور القایی، توان راکتیو (Q) را از شبکه برق سه‌فاز دریافت نموده و در نتیجه توان اکتیو (P) را به شبکه برق تحویل می‌دهد. البته نباید فراموش کرد که باید سرعت رتور از سرعت میدان دوار بیشتر باشد ($n_r > n_s$) در این صورت لغزش منفی است ($S < 0$) تا ماشین القایی در ناحیه ژنراتوری قرار گیرد.

با اتصال ژنراتور القایی به شبکه برق، سرعت میدان دوار همواره ثابت و از رابطه (۲ــ۳) تبعیت می‌کند و چون سرعت رتور به سرعت محرک مکانیکی وابسته می‌باشد، تأثیری بر فرکانس ندارد. اما از آنجا که ژنراتور با فرکانس ثابت شبکه کار می‌کند، توان اکتیو تحویلی به شبکه فقط به سرعت رتوربستگی دارد.



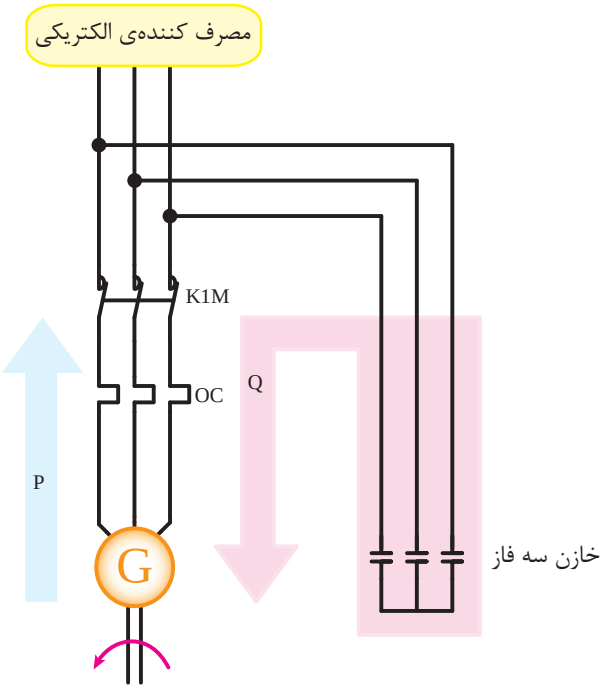
شکل ۶۱ ــ یادآوری نواحی مختلف ماشین القایی

نکته : هر چه سرعت رتور ژنراتور سریع‌تر باشد توان اکتیو تولید شده بیشتر است و بالعکس با کاهش سرعت، توان اکتیو کمتری به شبکه تحویل می‌شود.

بنابراین ژنراتور القایی، ژنراتوری است که می‌تواند با دور متغیر کار کند بدون آنکه تأثیری روی فرکانس شبکه ایجاد نماید کاربرد این نوع ژنراتورها در نیروگاه‌های بادی است. زیرا سرعت باد را نمی‌توان کنترل نمود.

۲ــ۱۹ــ۳ــ استفاده از خازن (مولد القایی در حالت منفرد) :

هرگاه از ژنراتور القایی به‌صورت منفرد استفاده شود، باید توان راکتیو موردنیاز آن را مطابق شکل (۶۲) توسط خازن تأمین نمود.



شکل ۶۲ــ مولد القایی در حالت منفرد

با توجه به وابستگی فرکانس به سرعت چرخش رتور و منفرد بودن ژنراتور، فرکانس برق تولید شده در این حالت کاملاً به سرعت رتور وابسته است. لازم به ذکر است که شرط ایجاد ولتاژ، وجود پسماند مغناطیسی در رتور این‌گونه ژنراتورها می‌باشد.

کاربرد این ژنراتورها در مواردی است که بار مصرفی فقط از نوع اکتیو باشد.(مانند ژنراتورهای جوشکاری)

تحقیق کنید : چرا باید مصرف‌کننده‌های ژنراتور القایی در حالت منفرد از نوع اکتیو باشد؟

خود را بیازمایید

۱ــ نقش توان‌های اکتیو و راکتیو دریافتی از شبکه توسط موتورهای القایی را توضیح دهید.

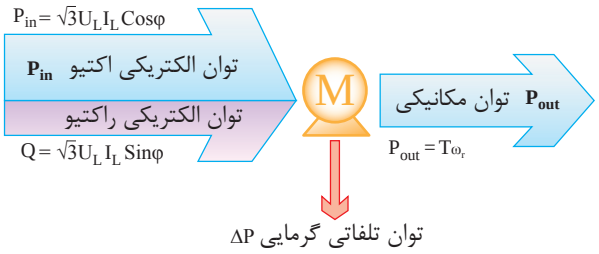
۲ــ اگر بخواهیم یک ماشین القایی به‌صورت مولد کار کند چه نوع توانی را از شبکه دریافت وچه نوعی از توان را به شبکه تحویل می دهد؟

۳ــ یک ماشین القایی سه فاز به شبکه برق متصل است و در ناحیه ژنراتوری کار می‌کند : الف) سرعت رتور را با سرعت میدان دوار مقایسه کنید ب) اگر سرعت رتور در حال تغییر باشد چه اثری بر فرکانس شبکه دارد؟

۲۰ــ۳ــ تلفات و راندمان

از آنجا که ماشین‌های القایی بیشتر به عنوان موتور استفاده می‌شوند در این بخش تلفات و راندمان موتور القایی مورد بحث قرار می‌گیرد. موتور القایی توان الکتریکی از شبکه دریافت می‌نماید و توان مکانیکی را به خروجی تحویل می‌دهد.

نمودار دریافت توان الکتریکی و تحویل توان مکانیکی در شکل (۶۳) نشان داده شده است.



شکل ۶۳ــ دیاگرام توان در موتورهای القایی سه فاز

ملاحظه می‌شود، بخشی از توان دریافتی از شبکه برق مطابق شکل (۶۳)، توان راکتیو است؛ این بخش از توان برای تولید میدان دوار، وارد ماشین می‌شود و چون مجدداً به شبکه

برمی‌گردد، در محاسبات تلفات و راندمان ماشین به حساب نمی‌آید.

بخش دیگری از توان ورودی به موتور القایی، توان اکتیو است. این توان در موتورهای سه فاز از رابطه (۳ـ۲۶) محاسبه می‌شود.

$$P_{in} = \sqrt{3} U_L I_L COS\varphi \qquad (۳ـ۲۶)$$

در رابطه (۳ـ۲۶)

U_L ولتاژ خط بر حسب V

I_L جریان خط بر حسب V

$Cos\varphi$ ضریب قدرت موتور

حداکثر توانی را که موتور می‌تواند به بار تحویل دهد توان نامی موتور تعریف می‌کنند و بر روی پلاک موتور درج می‌شود، همچنین در برگه مشخصات فنی موتور نیز ارائه می‌گردد.

توان نامی موتور القایی سه فاز از رابطه (۳ـ۲۷) قابل محاسبه است.

$$P_n = T_n \omega_r \qquad (۳ـ۲۷)$$

$$P_n = T_n \times \frac{2\pi n_r}{60} \qquad (۳ـ۲۸)$$

در رابطه (۳ـ۲۸)،

T_n گشتاور نامی یا مفید بر حسب N_m

n_r سرعت نامی رتور بر حسب RPM

P_n توان نامی رتور بر حسب W

اگر بار مکانیکی روی محور با توان نامی موتور برابر باشد در این صورت خواهیم داشت :

$$P_{out} = P_n$$

راندمان موتور القایی را مانند دیگر ماشین‌ها براساس نسبت توان خروجی به توان ورودی مطابق با رابطه (۳ـ۲۹) می‌توان محاسبه نمود.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \qquad (۳ـ۲۹)$$

راندمان را می‌توان به‌صورت درصد یا نسبت به واحد هم محاسبه کرد.

$$\%\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times ۱۰۰ \qquad (۳ـ۳۰)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{\sqrt{3} U_L I_L Cos\varphi} \qquad (۳ـ۳۱)$$

مطابق دیاگرام شکل (۶۳) می‌توان راندمان را به‌صورت رابطه (۳ـ۳۳) نیز نوشت :

$$P_{in} = P_{out} + \Delta P \qquad (۳ـ۳۲)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Delta P} \qquad (۳ـ۳۳)$$

$$\Delta P = \Delta P_s + \Delta P_r \qquad (۳ـ۳۴)$$

ΔP_s تلفات استاتور موتور القایی بر حسب (W)

ΔP_r تلفات رتور موتور القایی بر حسب (W)

ΔP در رابطه (۳ـ۳۴)، مجموعه تلفات موتور القایی است که شامل تلفات استاتور و رتور می‌باشد.

تلفات استاتور ΔP_s شامل تلفات اهمی در سیم‌پیچ‌های استاتور (P_{cus}) و تلفات هسته (P_{Core}) می‌باشد. تلفات هسته موتور القایی جزو تلفات ثابت موتور بوده که به دلیل حضور جریان‌های گردابی و تلفات هیسترزیس در هسته ایجاد می‌شوند.

$$\Delta P_s = P_{Cus} + P_{Core} \qquad (۳ـ۳۵)$$

ΔP_r شامل تلفات اهمی سیم‌پیچ رتور در موتورهای القایی رتور سیم‌پیچی و یا تلفات اهمی حاصل از مفتول‌های به کار رفته در موتورهای رتور قفسی می‌باشد . لذا تلفات اهمی در رتور را تلفات مسی رتور[۱] می‌نامند. و آن را با P_{Cur} نمایش می‌دهند.

۱ـ تلفات ایجاد کننده گرما

بخش دیگری از تلفات در رتور، تلفات مکانیکی است که به علت وجود اصطکاک هوا و یاتاقان‌ها ایجاد می‌شود و چون سرعت موتور القایی ثابت است، تلفات مکانیکی نیز ثابت می‌باشد این تلفات را با P_{mis} نشان می‌دهند.

از آنجا که فرکانس رتور در حال چرخش کم است لذا از تلفات آهنی رتور می‌توان چشم پوشی کرد زیرا تلفات آهنی با مجذور فرکانس نسبت مستقیم دارد.

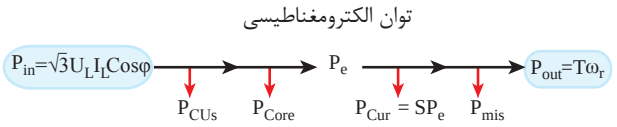
بنابراین تلفات رتور مطابق رابطه(۳ـ۳۶) به دست می‌آید.

$$\Delta P = P_{Cur} + P_{mis} \qquad (۳ـ۳۶)$$

با جایگزینی مقدار ΔP_r و ΔP_s می‌توان تلفات کل ماشین را از رابطهٔ (۳ـ۳۷) به‌دست آورد.

$$\Delta P = P_{Cus} + P_{Core} + P_{jr} + P_{mis} \qquad (۳ـ۳۷)$$

نمودار توازن توان در موتورهای القایی در شکل (۶۴) نمایش داده شده است.



شکل ۶۴ــ نمودار توازن توان در موتورهای القایی

توان الکترومغناطیسی (P_e) توانی است که از طریق میدان دوار استاتور در فاصله هوایی به رتور منتقل می‌شود.

توان الکترومغناطیسی (P_e) را می‌توان به‌طور مستقیم از رابطه (۳ـ۳۸) نیز محاسبه نمود.

$$P_e = T_e \omega_s \qquad (۳ـ۳۸)$$

$$P_e = T_e \times \frac{۲\pi n_s}{۶۰} \qquad (۳ـ۳۹)$$

در رابطه (۳ـ۳۹) :

T_e گشتاور الکترو مغناطیسی بر حسب N_m

n_s سرعت سنکرون موتور القایی بر حسب RPM

P_e توان الکترو مغناطیسی بر حسب W

همچنین با توجه به دیاگرام توان شکل (۶۴) داریم :

$$P_e = P_۱ - (P_{Cus} + P_{Fe}) \qquad (۳ـ۴۰)$$

$$P_e = P_{out} + P_{Cur} + P_{mis} \qquad (۳ـ۴۱)$$

تلفات ژولی رتور را می‌توان از حاصلضرب لغزش در توان الکترومغناطیسی به دست آورد.

$$P_{Cur} = SP_e \qquad (۳ـ۴۲)$$

در رابطه (۳ـ۴۲)،

S لغزش موتور

P_e توان الکترو مغناطیس بر حسب W

P_{Cur} تلفات مسی رتور بر حسب W

رابطه (۳ـ۴۲) نشان می‌دهدکه با افزایش لغزش، تلفات مسی در مدار رتور افزایش یافته و در نتیجه توان خروجی کاهش می‌یابد.

هم‌چنان‌که در بخش تغییر سرعت موتورهای رتور سیم‌پیچی عنوان شد، افزایش مقاومت مدار رتور به منظور کاهش سرعت و یا افزایش گشتاور راه‌اندازی باعث افزایش لغزش می‌گردد.

بنابراین طبق رابطه (۳ـ۴۲) افزایش لغزش، افزایش تلفات مسی در مدار رتور را در پی دارد و به دنبال آن راندمان موتور کاهش می یابد.

با توجه به اینکه تلفات مسی در استاتور و تلفات مسی رتور به جریان سیم‌پیچ استاتور و رتور وابسته هستند و این جریان نیز با تغییرات بار، تغییر می‌کند. لذا به مجموع تلفات مسی‌استاتور و تلفات مسی رتور **تلفات متغیر** موتور القایی می‌گویند.

$$\text{تلفات متغیر} = P_{Cus} + P_{Cur} \qquad (۳ـ۴۳)$$

تلفات مکانیکی رتور و تلفات هسته در استاتور تلفات ثابت

هستند و به مجموع آنها **تلفات ثابت** موتور القایی می‌گویند.

بنابراین داریم :

$$\text{تلفات ثابت} = P_{Core} + P_{mis} \qquad (۳_۴۴)$$

پس تلفات کل موتور القایی برابر مجموع تلفات ثابت و تلفات متغیر است.

$$\Delta P = \text{تلفات ثابت} + \text{تلفات متغیر}$$

$$\Delta P = P_{Cus} + P_{Cur} + P_{Core} + P_{mis} \qquad (۳_۴۵)$$

روابط فوق در حل بسیاری از مسائل مربوط به محاسبه راندمان سودمند است.

خود را بیازمایید

۱ــ چرا در محاسبات توان تلفاتی و راندمان ماشین القایی از توان راکتیو استفاده نمی شود؟

۲ــ منظور از توان نامی موتور القایی چیست؟ رابطه آن را نوشته و کمیت‌های آن را معرفی کنید.

۳ــ چرا در موتورهای القایی رتور سیم‌پیچی شده با افزایش مقاومت رتور، راندمان کاهش می یابد؟

۴ــ منظور از تلفات ثابت ومتغیر در ماشین القایی چیست؟

۵ــ تلفات استاتور موتور القایی را تشریح کنید.

۶ــ تلفات رتور موتور القایی را تشریح کنید.

۷ــ به کمک نمودار توازن توان موتورهای القایی، توان الکترومغناطیسی را محاسبه کنید.

۳ــ۲۱ــ مقایسه موتورهای رتور قفسی و رتور سیم‌پیچی

از مزایای موتور القایی رتور قفسی به‌جای رتور سیم‌پیچی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود :

- موتور رتور قفسی در یک توان مشخص، مقاومت اهمی کمتری در رتور داشته و لذا تلفات مسی رتور در آن کمتر است.
- موتور رتور سیم‌پیچی نیاز به حلقه‌های لغزان، جاروبک و سیم‌پیچی رتور دارد در نتیجه گرانتر از یک موتور رتور قفسی است.
- موتور رتور قفسی به دلیل نداشتن جاروبک و حلقه‌های لغزان، هزینه تعمیر و نگهداری کمتری دارد.

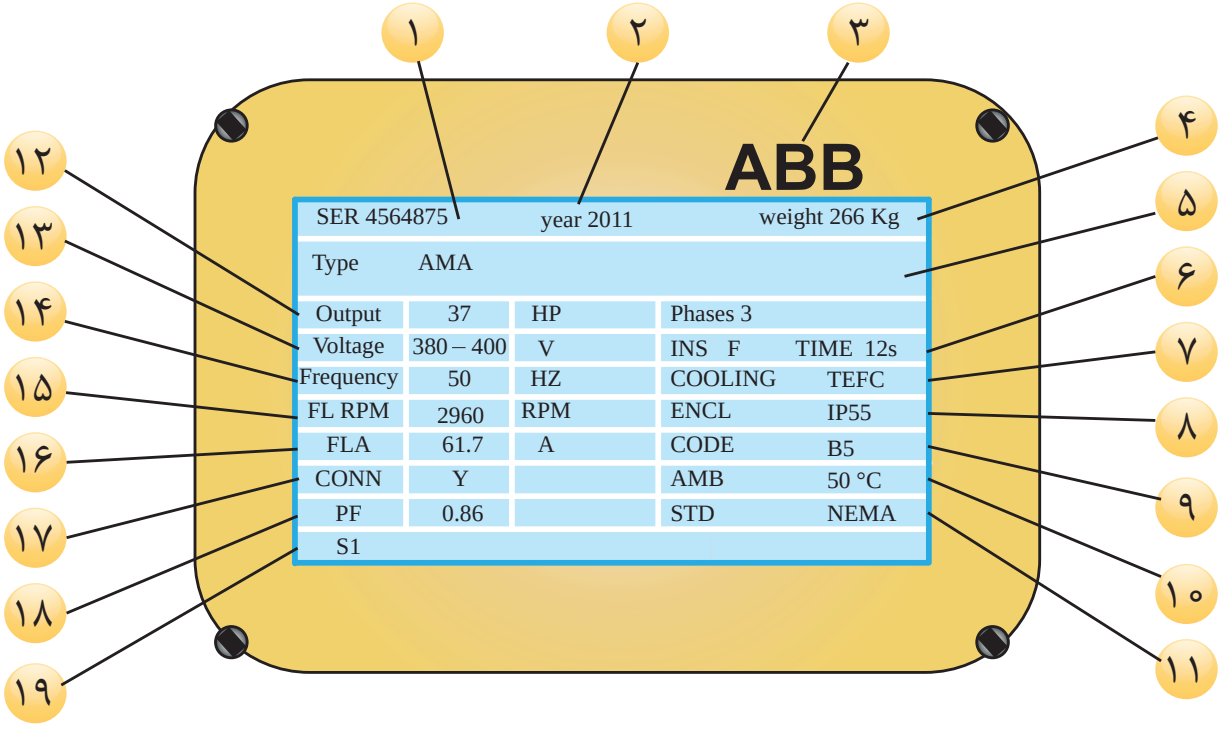
از معایب موتور رتور قفسی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد :

- گشتاور راه‌اندازی کمتر نسبت به موتور رتور سیم‌پیچی
- ضریب قدرت کم در هنگام راه‌اندازی

با این حال چون موتورهای رتور قفسی ساختمان ساده‌ای دارند، تعمیر و نگهداری آنها ساده است و در هر مکانی قابل استفاده هستند و از نظر قیمت نیز در قدرت یکسان، ارزان‌تر از موتور رتور سیم‌پیچی می‌باشند بدین لحاظ امروزه جایگاه ویژه‌ای برای کاربرد در اکثر صنایع پیدا کرده‌اند.

۲۲ــ۳ــ پلاک خوانی موتورهای القایی و استفاده از برگ مشخصات فنی

در شکل (۶۵) یک نمونه پلاک موتور القایی با توضیحات مربوطه نشان داده شده است . لازم به توضیح است که برگهٔ مشخصات فنی همان موتور نیز در ادامه آمده است.



شکل ۶۵ــ نمونه پلاک موتور

مشخصه	توضیحات
۱ـ Serial number	شماره سریال کارخانه ۴۵۶۴۸۷۵
۲ـ Manufacturing year	سال تولید ۲۰۱۱ به میلادی
۳ـ Manufacturer	سازنده [ABB]
۴ـ Machine weight [Kg]	وزن ماشین به کیلوگرم (۲۶۶ کیلوگرم)
۵ـ Type designation	نوع موتور با توجه به کد کارخانه
۶ـ Insulation class	کلاس عایقی F با ۱۲ ثانیه تحمل در حالت قفل شدگی رتور
۷ـ Type of cooling [IC code]	روش خنک سازی TEFC (تقسیم بندی با توجه به استاندارد NEMA)
۸ـ Degree of protection [IP class]	درجه حفاظتی IP۵۵ (تقسیم بندی با توجه به استاندارد ۵ـ۶۰۰۳۴)
۹ـ Mounting arrangement [IM code]	چگونگی نصب B۵ (تقسیم بندی با توجه به استاندارد NEMA)
۱۰ـ Ambient Temprature	دمای محیط ۵۰ درجه سانتی‌گراد
۱۱ـ Standard	استاندارد ساخت NEMA
۱۲ـ Output [Kw] or [Hp]	توان خروجی به کیلو وات یا اسب بخار ۳۷ کیلو وات
۱۳ـ Stator voltage [V] & Number Of Phase	ولتاژ استاتور به ولت و تعداد فاز ۳۸۰/۴۰۰ ولت سه فاز
۱۴ـ Frequency [Hz]	فرکانس منبع ۵۰ هرتز
۱۵ـ [Rotating speed [rpm	سرعت رتور ۲۹۶۰ دور در دقیقه
۱۶ـ Stator current [A]	جریان استاتور به ۶۱/۷ آمپر
۱۷ـ Type of connection	ستاره
۱۸ـ Power factor [cosfi]	ضریب قدرت موتور ۰/۸۶
۱۹ـ Duty	روش استفاده دائمی (تقسیم بندی با توجه به استاندارد ۱ـ۶۰۰۳۴) [S۱]

توان خروجی	Output	: 37 kW	
فرکانس	Frequency	: 50 Hz	
تعداد قطب	Poles	: 2	
سرعت نامی	Rated speed	: 2960 rpm	
لغزش	Slip	: 1.33 %	
ولتاژ نامی	Rated voltage	: 400V	
جریان نامی	Rated current	: 67.1 A	
جریان راه اندازی	L. R. Amperes	: 470 A	
نسبت جریان راه اندازی به جریان نامی	II/In	: 7.0	
جریان بی باری	No load current	: 25.0 A	
گشتاور نامی	Rated torque	: 12.2 kgfm	
گشتاور راه اندازی	Locked rotor torque	: 260 %	
گشتاور ماکزیمم	Breakdown torque	: 280 %	
کلاس عایقی	Insulation class	: F	
زمان تحمل روتور قفل شدن	Locked rotor time	: 12 s (hot)	
ضریب افزایش دما	Service factor	: 1.00	
ضریب قدرت نامی	Rated Power factor	: 0.86	
ضریب قدرت در حالت روتور قفل شده	Locked rotor Power factor	: 0.17	
روش استفاده	Duty cycle	: S1	
دمای محیط	Ambient temperature	: 50°C	
روش خنک سازی	Cooling method	: TEFC	
درجه حفاظت در برابر آب و اتساء خارجی	Enclosure	: IP55	
چگونگی نصب	Mounting	: B5	
جهت چرخش	Rotation	: Counter clockwise	خلاف عقربه ساعت
وزن تقریبی	Aprox. weight*	: 266 kg	

پرسش‌های پایان فصل(۳)

۱ــ نحوه تولید میدان دوار در ماشین‌های القایی را توضیح دهید.

۲ــ چگونه می‌توان جهت میدان را در ماشین القایی تغییر داد؟

۳ــ در یک ماشین القایی با رتور سیم‌پیچی شده؛ استاتور دارای ۲۴ شیار و ۶ قطب و بااتصال مثلث می‌باشد. در موردتعداد شیار، تعداد قطب و نحوه اتصال سیم‌پیچی رتور توضیح دهید.

۴ــ چرا جریان رتور موتور القایی بعد از راه‌اندازی کاهش می یابد؟

۵ــ اجزای تشکیل دهنده رتور قفسی را نام برده و وظیفه هر یک را بیان کنید.

۶ــ استاتور موتور القایی دارای ۸ قطب می‌باشد، در یک سیکل کامل جریان عبوری از آن، رتور چند دور می‌زند؟

۷ــ رفتار ماشین القایی را در لغزش ۰ و ۱ با یکدیگر مقایسه کنید.

۸ــ مشخصه گشتاور ــ دور ماشین القایی را ترسیم نموده و نواحی موتوری، مولدی و ترمزی را در آن نشان دهید.

۹ــ یک رتور قفسی، شیارهای نزدیک به سطح با سطح مقطع کوچک دارد، مقاومت القایی و اهمی آن چگونه است؟

۱۰ــ چرا در رتور قفسی هر چه عمق شیار بیشتر باشد راکتانس القایی رتور بیشتر است؟

۱۱ــ در روش راه‌اندازی مستقیم چه نکاتی را باید در نظر داشت؟

۱۲ــ روش راه‌اندازی نرم را توضیح دهید.

۱۳ــ در لحظه راه‌اندازی موتور القایی رتور سیم‌پیچی شده هر چقدر مقاومت اهمی رتور بیشتر باشد، جریان راه‌اندازی ..... وگشتاور راه‌اندازی ..... خواهد بود.

۱۴ــ مزایا و معایب موتورهای القایی رتور سیم‌پیچی را نسبت به موتورهای رتور قفسی بیان کنید.

۱۵ــ مشخصه گشتاورــ دور موتور القایی جهت کنترل سرعت به روش همزمان ولتاژ و فرکانس را در ۳ مرحله ترسیم نمایید.

۱۶ــ تفاوت موتور دالاندر و موتور چند سرعته با سیم‌پیچ مجزا را بیان کنید.

۱۷ــ آیا می‌توان در موتورها از روش ترمز مولدی، به تنهایی استفاده نمود؟چرا؟

۱۸ــ چرا ماشین القایی که به‌صورت ژنراتور کار می‌کند به توان راکتیو احتیاج دارد؟

۱۹ــ چرا در ماشین‌های القایی تلفات هسته و تلفات مکانیکی را در تمام مراحل کاری ثابت فرض می‌کنند؟

۲۰ــ مشخصات فنی موتور HXR ۴۰۰LD۴۱ را از کاتالوگ صفحه بعد استخراج نمایید.

Output kW	Motor type	Speed r/min	Efficiency Full load 100%	Efficiency 3/4 load 75%	Power factor Full load 100%	Power factor 3/4 load 75%	Current I_N A	Current $\frac{I_s}{I_N}$	Current I_0 A	Torque T_N Nm	Torque $\frac{T_s}{T_N}$	Torque $\frac{T_{max}}{T_N}$	Motor weight kg
		6000 V 50 Hz					1500 r/min = 4 poles						
160	HXR 355LA4 1	1487	94.6	94.3	0.82	0.77	20	5.6	8	1028	0.9	2.2	1720
180	HXR 355LA4 2	1486	94.7	94.5	0.81	0.77	23	5.4	9	1157	0.8	2.0	1730
200	HXR 355LA4 3	1486	94.9	94.8	0.83	0.79	25	5.3	10	1285	0.8	2.1	1730
224	HXR 355LC4 1	1486	95.0	94.9	0.82	0.79	28	5.3	11	1440	0.8	2.1	1730
250	HXR 355LC4 2	1486	95.3	95.3	0.83	0.80	30	5.5	11	1606	0.8	2.1	1830
280	HXR 355LC4 3	1487	95.4	95.3	0.84	0.81	34	6.5	13	1798	1.1	2.3	1780
315	HXR 355LE4	1488	95.6	95.6	0.85	0.81	37	6.5	14	2021	1.1	2.3	1970
355	HXR 400LC4	1486	96.0	96.0	0.86	0.84	41	5.2	13	2281	0.7	2.0	2530
400	HXR 400LD4 1	1487	96.2	96.2	0.86	0.83	47	5.5	15	2568	0.8	2.1	2660
450	HXR 400LD4 2	1490	96.5	96.5	0.87	0.85	52	6.2	16	2884	0.9	2.2	2720
500	HXR 400LE4	1490	96.6	96.6	0.88	0.86	57	6.1	17	3204	0.9	2.1	2850
560	HXR 400LG4	1491	96.8	96.8	0.87	0.85	64	6.3	19	3587	0.9	2.2	3100
630	HXR 450LE4	1492	96.9	96.8	0.87	0.84	72	6.6	24	4031	0.8	2.4	3810
710	HXR 450LG4	1492	97.0	97.0	0.88	0.86	80	6.4	24	4545	0.8	2.3	4130
800	HXR 450LJ4	1492	97.2	97.2	0.88	0.87	90	6.3	25	5121	0.8	2.2	4450
900	HXR 500LF4	1491	97.1	97.1	0.89	0.87	100	6.1	28	5763	0.8	2.2	5430
1000	HXR 500LG4	1492	97.2	97.2	0.89	0.87	112	6.2	32	6401	0.8	2.2	5690
1120	HXR 500LJ4	1493	97.3	97.3	0.88	0.86	125	6.6	37	7165	0.8	2.3	6080
1250	HXR 500LP4	1493	97.5	97.5	0.88	0.86	140	6.5	42	7994	0.8	2.3	7030

۳

مسائل پایانی فصل (۳)

۱ــ یک ماشین القایی شش قطب، ۶۰HZ با سرعت ۸۸۰RPM می‌چرخد. به‌دست آورید :

الف) سرعت میدان دوار

ب) سرعت لغزش

ج) مقدار لغزش

۲ــ کمیت‌های رتور یک موتور القایی ۵۰HZ در لحظه راه‌اندازی به ترتیب :

$X_r=2\Omega$ ، $R_r=0/5\ \Omega$ ، $E_r=50v$ می‌باشد.

مطلوب است محاسبه هر یک از کمیت‌های فوق در لغزش ۱۵ درصد

۳ــ یک موتور القایی ۴ قطب ۵۰ هرتز در لحظه راه‌اندازی دارای مقاومت اهمی ۰/۴Ω و راکتانس ۱/۲Ω می‌باشد. چنانچه ولتاژ القایی هر فاز رتور ۴۵ ولت باشد، جریان و ضریب قدرت رتور را در حالات زیر به‌دست آورید :

الف) در راه‌اندازی

ب) در سرعت ۱۳۵۰ RPM

۴ــ اگر در یک ماشین القایی مقادیر ولتاژ، مقاومت القایی و مقاومت اهمی به ترتیب ، ۴۰V، ۱/۵ Ω ، ۰/۶ Ω باشد به‌دست آورید :

الف) در چه لغزشی جریان رتور ۲/۵ آمپر خواهد شد؟

ب) در چه لغزشی اختلاف فاز رتور ۴۵ درجه خواهد شد؟

ج) اگر سرعت میدان دوار ۱۰۰۰ RPM باشد در چه سرعتی گشتاور ماکزیمم اتفاق می‌افتد؟

۵ــ توان الکترومغناطیسی یک موتور القایی ۶۴۰۰ وات و تلفات استاتور ۳۶۰ وات و راندمان ۸۹ درصد می‌باشد. توان‌های ورودی وخروجی موتور را به‌دست آورید.

۶ــ توان دریافتی یک موتور القایی از شبکه ۴۰۰ ولت در بار نامی برابر با ۶۸۵۰W و توان الکترومغناطیسی آن ۶۳۴۰ وات است . اگر تلفات آهنی موتور ۲۳۰ W و ضریب قدرت موتور ۰/۸۷ باشد. به‌دست آورید :

الف) تلفات مسی استاتور

ب) جریان دریافتی موتور از شبکه

۷ــ یک موتور القایی ۴۰۰ ولت، در بار نامی ۳۵۰ آمپر از شبکه دریافت می‌کند. چنانچه مجموع تلفات ۲۰ کیلو وات و ضریب قدرت آن ۰/۸۳ باشد، به‌دست آورید :

الف) توان دریافتی از شبکه

ب) توان خروجی

ج) راندمان موتور

۸ــ یک موتور القایی ۶ قطب در شبکه ۴۰۰V، ۵۰HZ بار مکانیکی نامی با توان ۳۵۰۰W را می چرخاند. اگر تلفات ژولی رتور ۱۸۹W وتلفات مکانیکی آن ۸۱W باشد به‌دست آورید :

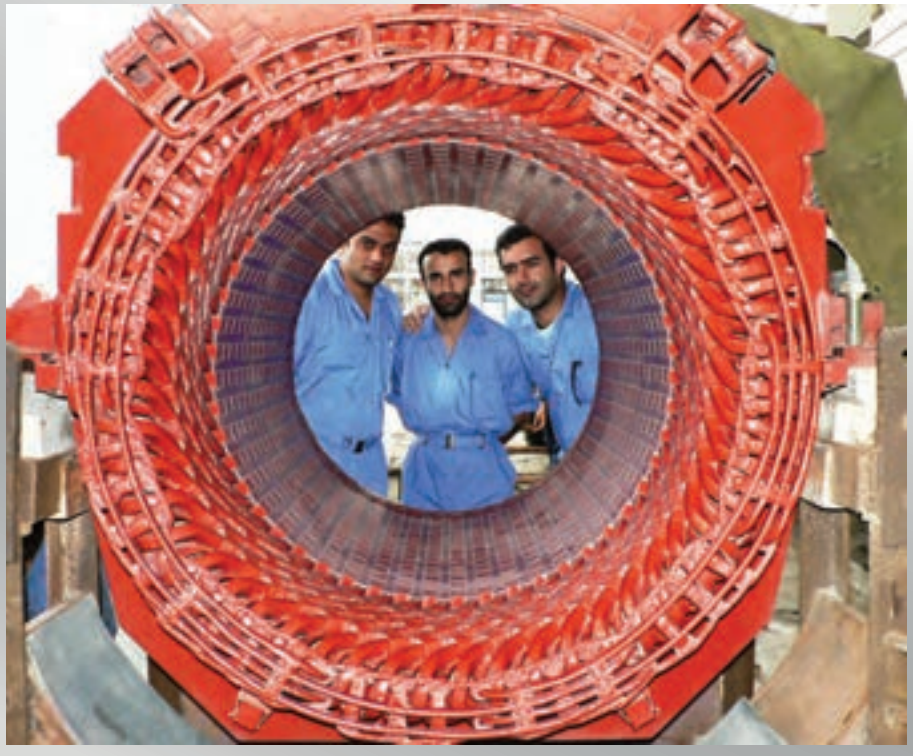
الف) توان الکترومغناطیسی

ب) گشتاور الکترومغناطیسی

ج) لغزش موتور در نقطه کار و سرعت رتور

د) گشتاور خروجی

۴
ماشین‌های سنکرون



۴

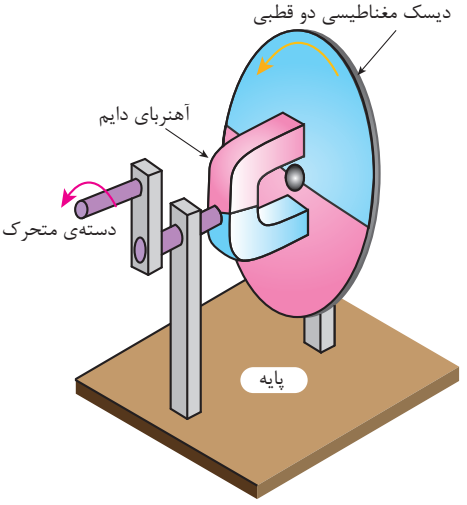
هدف‌های رفتاری :

ـ انواع ماشین‌های سنکرون را نام ببرد.
ـ ساختمان ظاهری و داخلی ماشین سنکرون را از روی شکل توضیح دهد.
ـ اساس کار موتورهای سنکرون را توضیح دهد.
ـ لغزش در موتورهای سنکرون را توضیح دهد.
ـ حالت‌های کاری موتور سنکرون را تعریف کند.
ـ حالت‌های کاری موتور سنکرون را با تغییر بار و جریان تحریک شرح دهد.
ـ منحنی مشخصه V را رسم کند.
ـ منحنی مشخصه V را تشریح کند.
ـ کاربرد موتورهای سنکرون را بیان کند.
ـ ساختمان داخلی مولدهای سنکرون را توضیح دهد.
ـ اساس کار مولدهای سنکرون را توضیح دهد.
ـ نحوه تنظیم ولتاژ را در مولدهای سنکرون توضیح دهد.
ـ انواع تلفات در مولدهای سنکرون را تعریف کند.
ـ دیاگرام توازن قدرت در مولدهای سنکرون را رسم کند.
ـ روابط توان، تلفات و بازده را توضیح دهد.
ـ مثال مربوط به توان و بازده را تشریح کند.
ـ تمرین مربوط به توان و بازده را تشریح کند.
ـ انواع مولدهای سنکرون را نام ببرد.
ـ زمینه‌های کاربردی مولدهای سنکرون را بیان کند.
ـ انواع نیروگاه‌ها را نام ببرد.
ـ تمرین‌های پایان فصل را حل کند.

مقدمه

ماشین سنکرون[1] ماشینی است که سرعت رتور با سرعت میدان دوار آن برابر است. ماشین سنکرون به عنوان ژنراتور سنکرون به منظور تولید انرژی الکتریکی و یا موتور سنکرون قابل استفاده می‌باشد. در ادامه با ویژگیها و ساختمان این ماشین سنکرون آشنا می شوید.

شکل (۱) برابری سرعت گردش رتور و سرعت میدان دوار را در ماشین‌های سنکرون به سادگی نمایش داده است. شما می‌توانید با تهیه وسایل نشان داده شده، این آزمایش را به انجام برسانید. مطابق شکل(۱) با چرخاندن دسته متحرک، آهنربای دائم متصل به آن می چرخد و با توجه به جذب قطب‌های غیر هم نام دیسک مغناطیسی، در نتیجه دیسک مغناطیسی نیز با سرعت دسته متحرک به چرخش در می‌آید.



شکل ۱ــ یک وسیلهٔ ساده برای فهم بهتر عملکرد ماشین سنکرون

این همان برابری سرعت میدان دوار n_s و سرعت گردش رتور n_r می‌باشد. علت استفاده از واژه سنکرون، نیز همان برابری سرعت گردش رتور و سرعت میدان دوار در تمام حالات کاری این ماشین می‌باشد یعنی :

$$n_s = n_r$$

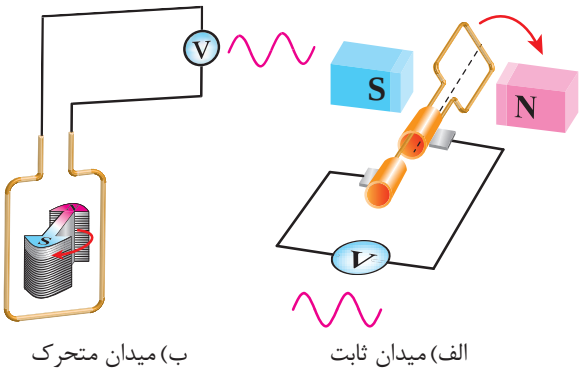
در ماشین‌های سنکرون سرعت رتور برابر سرعت میدان دوار است.

پس سرعت لغزش در این ماشین طبق رابطهٔ زیر همواره صفرخواهد بود.

$$\Delta n = n_s - n_r \qquad (۴ــ۱)$$

۱ــ۴ــ اصول کار ژنراتورهای سنکرون

اگر یک حلقه هادی در داخل میدان مغناطیسی مطابق شکل (۲ــ الف) حرکت کند حلقه خطوط شار مغناطیسی را قطع می‌کند در این صورت در حلقهٔ هادی طبق قانون فارادی نیروی محرکه القا می‌شود[2].



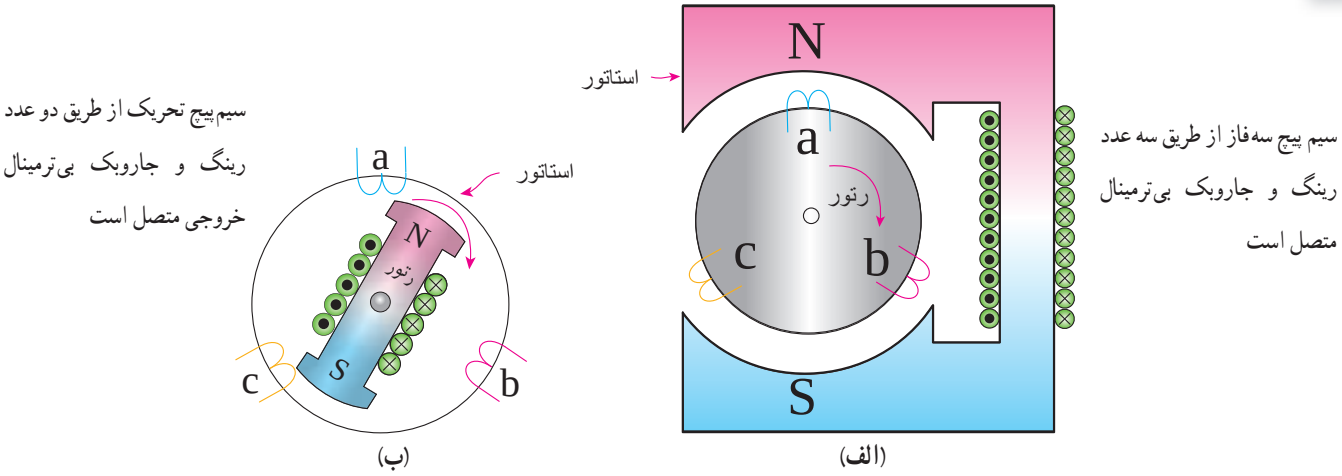
شکل۲ــ نحوهٔ القای ولتاژ در یک حلقه هادی

۱ــ سنکرون = هم‌زمانی

۲ــ به کتاب ماشین‌های الکتریکی DC رجوع کنید.

۴

حالا اگر مطابق شکل (۲ــ ب)، حلقه هادی را ساکن نگه داشته و میدان مغناطیسی درون آن به گردش در آورده شود، این بار خطوط شار مغناطیسی حلقه را قطع کرده و در آن نیروی محرکه القا خواهد شد.



مهم : در تمام ژنراتورها اتصال سیم‌پیچ‌های سه فاز به صورت ستاره می‌باشد.

شکل ۳ــ روش‌های تولید انرژی الکتریکی در ژنراتورهای سنکرون سه فاز

میدان مغناطیسی شکل (۲ــ الف) میدان مغناطیسی ساکن نامیده می‌شود. میدان مغناطیسی شکل (۲ــ ب) را میدان مغناطیسی دوار می‌نامند. چرا که میدان مغناطیسی در داخل ماشین حول یک محور گردش می‌کند.

ژنراتور سنکرون سه فاز به دو روش انرژی الکتریکی تولید می‌کند :

به کمک میدان مغناطیسی ساکن : در این حالت میدان مغناطیسی ساکن به‌وسیلهٔ سیم پیچ تحریک درون استاتور به‌وجود می آید و سه سیم پیچ مشابه با اختلاف فاز مکانی ۱۲۰° روی رتور قرار داده می‌شود و در داخل میدان مغناطیسی ساکن استاتور چرخانده می‌شود (مطابق شکل (۳ــ الف)) .

به کمک میدان مغناطیسی دوار : در این حالت میدان مغناطیسی به‌وسیلهٔ سیم‌پیچ تحریک برروی رتور به‌وجود می‌آید و با چرخش رتور میدان مغناطیسی دوار فراهم می‌شود و سیم‌پیچ مشابه درون استاتور با اختلاف فاز مکانی ۱۲۰° قرار داده می‌شود (مطابق شکل (۳ــ ب)).

در ماشین‌های سنکرون سیم‌پیچ تولیدکنندهٔ میدان مغناطیسی را سیم‌پیچ تحریک و جریان عبوری از آن را جریان تحریک می‌گویند.

البته القاگر بودن رتور (چرخش میدان مغناطیسی توسط رتور) و دریافت انرژی الکتریکی از سیم پیچ‌های استاتور مزیت بیشتری نسبت به حالت عکس آن دارد زیرا :

الف) جریان تحریک خیلی کمتر از جریان آرمیچر می‌باشد و در نتیجه ارتباط آن از طریق حلقه های لغزان و جاروبک آسانتر و بی درد سرتر است.

ب) عایق‌بندی سیم‌پیچ‌های رتور به علت داشتن ولتاژ پایین (زیر ۱۰۰۰ ولت) بسیار آسان و ساده است.

ج) دریافت ولتاژ و جریان بالای سه فاز، از ترمینال‌های ثابت استاتور به سادگی امکان پذیر است.

د) از آنجا که قدرت ژنراتورهای نیروگاهی غالباً زیاد

است، حجم سیم بندی القاشونده و در نتیجه وزن آن به مراتب بیشتر ازسیم پیچ تحریک بوده و لذا پیاده سازی آن بر روی رتور (که دائماً متحرک می‌باشد)، مشکل عدم توازن وزن مکانیکی را در پی خواهد داشت.

هر چند دلایل فوق استفاده از چرخش میدان مغناطیسی توسط رتور را در تمامی موارد توجیه می‌کند، اما گاهی در ژنراتورهای با قدرت کم از میدان مغناطیسی ساکن در استاتور و تولید ولتاژ سه فاز توسط سیم پیچ‌های رتور استفاده می‌شود.

در ادامه، ژنراتورهای سنکرونی بررسی خواهند شد که اصول عملکردشان همان چرخش میدان مغناطیسی است.

خود را بیازمایید

۱ــ لغزش ماشین سنکرون هنگام کار چقدر است ؟چرا؟

۲ــ القاگر بودن رتور در ماشین‌های سنکرون چه مزیت‌هایی دارد؟

۳ــ معمولاً ولتاژ تحریک ژنراتورهای سنکرون کمتر از .....ولت است.

۲ــ۴ــ ساختمان ژنراتورهای سنکرون

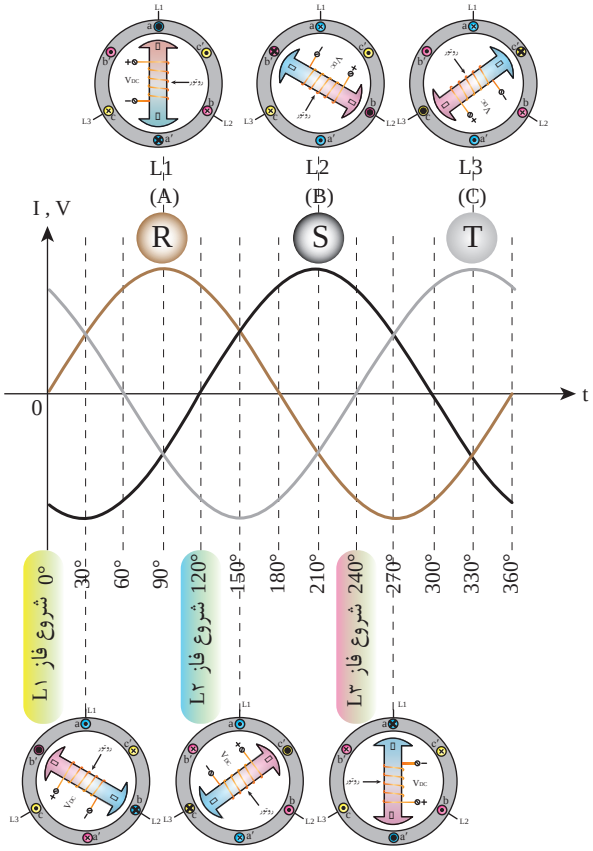
ژنراتورهای سنکرون از دو قسمت اصلی استاتور و رتور تشکیل شده‌اند.

۱ــ۲ــ۴ــ استاتور : استاتور ژنراتور سنکرون شبیه استاتور ماشین‌های القایی است و به صورت سه فاز سیم پیچی می‌شود که سیم پیچ‌های هر فاز نسبت به یکدیگر ۱۲۰° الکتریکی اختلاف فاز مکانی دارند.

با توجه به شکل (۴)، اگر رتور این ژنراتور دو قطبی یک دور کامل بزند، بر روی سیم پیچ هر فاز، نیروی محرکه‌ای به شکل سینوسی القا خواهد شد.

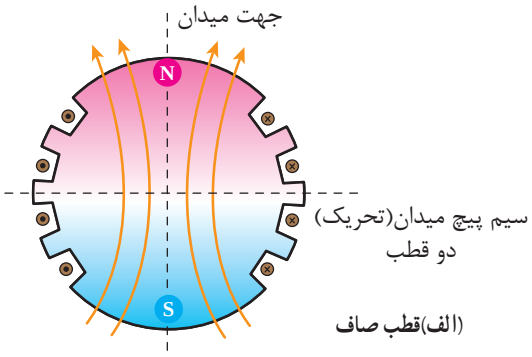
بر اساس چرخش رتور و اختلاف فاز مکانی در سیم‌پیچ‌های a، b و c در نیروی محرکه القایی، اختلاف فاز زمانی متناظر ایجاد خواهد شد.

باید توجه داشت که هر چقدر سرعت چرخش رتور افزایش یابد زمان تناوب شکل موج سینوسی کاهش می‌یابد و به عبارت دیگر موجب افزایش فرکانس شکل موج می‌شود.

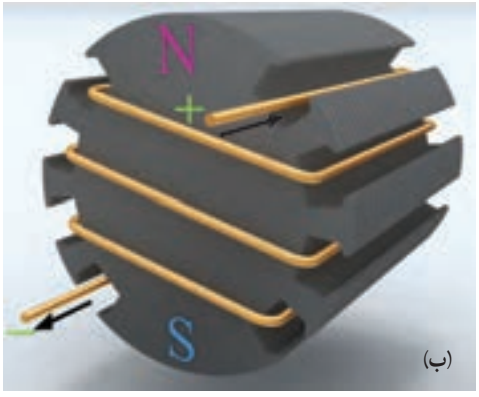


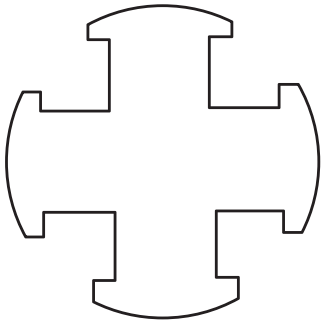
شکل ۴ــ تولید ولتاژ سه فاز با گردش میدان دو قطبی

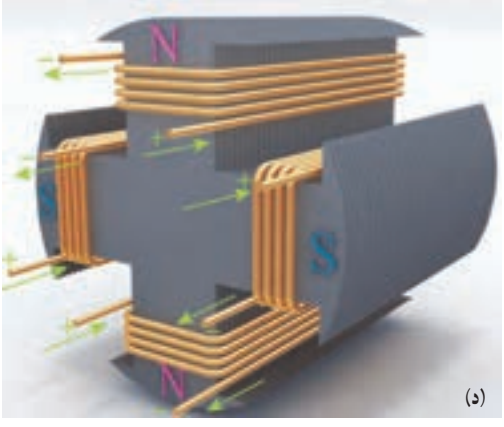
۲ــ۲ــ۴ــ رتور : در رتور ژنراتور سنکرون با جاری شدن جریان در سیم پیچ تحریک میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود تا با چرخش رتور میدان دوار تولید شود. شکل (۵) طرح وارهٔ ایجاد میدان مغناطیسی دوقطبی و چهار قطبی را با سیم‌پیچ‌های رتور ماشین سنکرون نشان می‌دهد. در رتور ماشین سنکرون برای داشتن هسته مغناطیسی، ورقه‌های آهنی سیلیس‌دار را روی هم قرار می‌دهند تا هستهٔ مناسبی برای عبور میدان مغناطیسی ایجاد شود. سپس با قرار دادن سیم پیچ‌ها در این هسته و اتصال آنها به منبع جریان مستقیم، رتور ماشین الکترومغناطیس می‌شود. اتصال سیم‌پیچ‌های میدان (تحریک) به منبع جریان مستقیم از طریق دو عدد رینگ و جاروبک صورت می‌گیرد.



(الف)قطب صاف





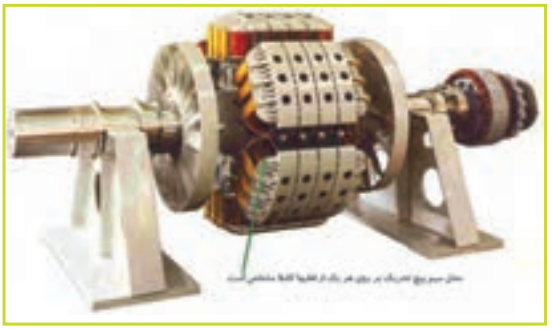


۲ــ۳ــ۴ــ رتور با قطب برجسته : رتور ژنراتورهای با تعداد قطب زیاد و سرعت کم معمولاً از نوع قطب برجسته هستند. طول این رتورها به نسبت قطر آن کمتر است و متناسب با سرعت‌های کم ساخته می‌شوند.

ساختمان رتور قطب برجسته و چگونگی قرارگیری سیم‌پیچ‌های تحریک بر روی آن در شکل (۷) نشان داده شده است.

رتور ژنراتور نیروگاه های آبی[1] و دیزل ژنراتورها[2] این‌گونه ساخته می‌شوند.

در شکل(۸) رتور ژنراتور نیروگاه های آبی در حال نصب نشان داده شده است.



شکل ۷ــ رتور قطب برجسته (آشکار)

شکل ۸ــ رتور ژنراتور نیروگاه آبی سد شهید عباسپور در حال قرارگیری در استاتور

خود را بیازمایید

۱ــ استاتور ژنراتور سنکرون دارای سه دسته سیم پیچ با ..... ۱۲۰ درجه است.

۲ــ رتور ژنراتور سنکرون دارای سیم‌پیچی است که به جریان..... (مستقیم/ متناوب) متصل می‌شود.

۳ــ رتور با قطب صاف در ..... استفاده می‌شود.

۴ــ رتور ژنراتور سنکرون از نوع برجسته دارای طول نسبی ..... و قطر.....(زیاد/کم) می‌باشد.

۴ــ۴ــ کمیت‌های ژنراتور سنکرون

۱ــ۴ــ۴ــ فرکانس ژنراتور سنکرون : فرکانس ولتاژ ژنراتور سنکرون به عوامل زیر بستگی دارد :

ــ تعداد قطب‌های سیم پیچی

ــ سرعت رتور

در فصل ۳ با رابطه سرعت سنکرون ماشین‌های القایی آشنا شدید. در اینجا رابطه برحسب فرکانس نوشته شده است.

$$n_s = \frac{۱۲۰ \times f}{p} \Rightarrow \quad (۴ــ۲)$$

$$f = \frac{n_s \times p}{۱۲۰} \quad (۴ــ۳)$$

در رابطه (۴ــ۲) :

n_s سرعت گردش رتور ژنراتور سنکرون بر حسب دور در دقیقه (RPM)

P تعداد قطب‌ها

f فرکانس بر حسب (Hz)

۱ــ هیدرو ژنراتور Hydro Generator

۲ــ دیزل ژنراتورها در قدرت های کوچک و اضطراری ساخته و استفاده می‌شوند و وسیله گرداننده رتور آنها موتور دیزل است .

۴

فرض کنید رتور یک ژنراتور دو قطبی با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه بچرخد در نتیجه فرکانس ولتاژ تولید شده ۵۰ هرتز خواهد شد. یعنی :

$$f = \frac{n_s \times p}{۱۲۰} \Rightarrow$$

$$f = \frac{۳۰۰۰ \times ۲}{۱۲۰} = ۵۰ Hz$$

رابطه (۳ـ۴) همان رابطه سرعت سنکرون در ماشین‌های القایی است که در اینجا بر حسب فرکانس بیان شده است.

سوال می خواهیم فرکانس ولتاژ ژنراتوری ۵۰ هرتز باشد؛ الف) اگر رتور این ماشین چهار قطبی باشد، محور ژنراتور را باچه سرعتی بچرخانیم؟

$$n_s = \frac{۱۲۰ \times f}{p} \Rightarrow n_s = \frac{۱۲۰ \times ۵۰}{۴} = ۱۵۰۰ RPM$$

ب) اگر سرعت رتور (محور ژنراتور) ۷۵۰ RPM باشد، از ژنراتور چند قطبی باید استفاده کرد؟

$$p = \frac{۱۲۰ \times f}{n_s} \Rightarrow n_s = \frac{۱۲۰ \times ۵۰}{۷۵۰} = ۸$$

از ژنراتور ۸ قطبی باید استفاده شود.

۵ـ۴ـ ولتاژ ژنراتور سنکرون

ولتاژ تولید شده در سیم پیچ‌های استاتور ژنراتور سنکرون با توجه به قانون القای فارادی از رابطه (۴ـ۴) بدست می‌آید.

$$E = -N\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \qquad (۴ـ۴)$$

نیروی محرکه القا شده در هرفاز ژنراتور سنکرون از رابطهٔ (۵ـ۴) محاسبه می‌شود[۱].

$$E = ۴/۴۴ N\varphi f \qquad (۵ـ۴)$$

بنابراین ولتاژ تولید شده ژنراتور به عوامل زیر بستگی دارد :

N تعداد دور هر فاز سیم پیچ استاتور

φ شار مغناطیسی هر قطب بر حسب وبر (Wb)

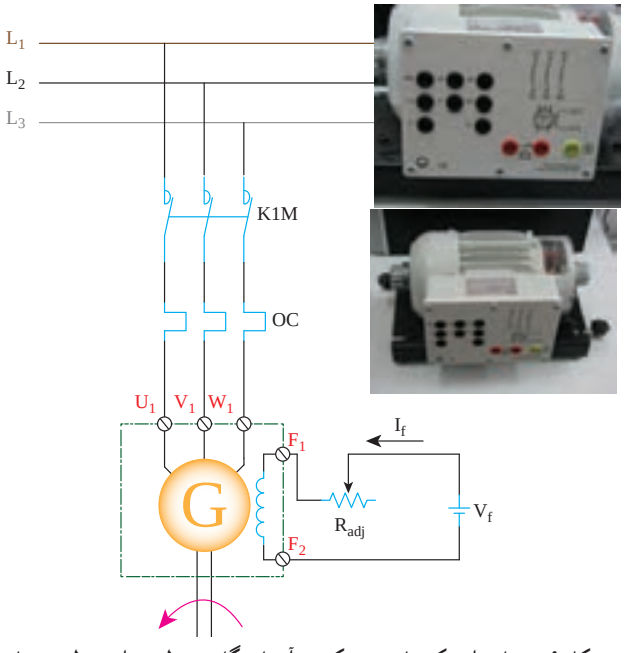
f فرکانس شبکه بر حسب هرتز (Hz)

در عمل ولتاژ ژنراتور را با تنظیم فوران قطب‌ها یا تغییر جریان تحریک تثبیت می‌کنند و فرکانس ژنراتور را با تنظیم سرعت رتور تثبیت می‌نمایند.

در عمل برای تنظیم ولتاژ خروجی ژنراتور، شار مغناطیسی قطب‌ها را تغییر می‌دهند.

نکته ۱

با تغییرات جریان تحریک رتور می توان ولتاژ خروجی ژنراتور را تغییر داد.



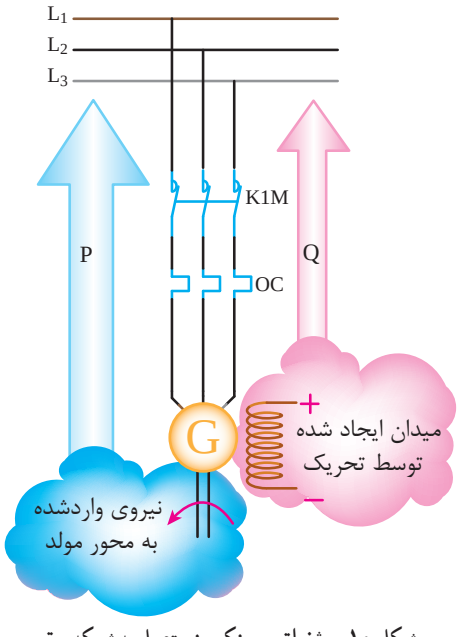
شکل ۹ــ نمایی از یک ماشین سنکرون آزمایشگاهی و طرح واره تنظیم جریان تحریک

۱ــ اثبات این رابطه در فصل یک آمده است.

برای تنظیم ولتاژ ژنراتور، مطابق شکل (۹) در مدار سیم پیچ تحریک می توان از یک رئوستا[1] استفاده نمود. این رئوستا قادر است با تغییر مقاومت مدار تحریک، جریان تحریک را کم و یا زیاد کند و در نتیجه با تنظیم جریان تحریک، فوران (شار) مغناطیسی و در نهایت ولتاژ خروجی ژنراتور قابل تنظیم خواهد بود.

نکته۲

سیم‌پیچ موتورهای الکتریکی، سلف چراغ‌های فلورسنت، میدان مغناطیسی خطوط انتقال برق و به‌طور کلی در هر کجا که اثر میدان مغناطیسی جریان متناوب وجود دارد، توان در شبکه جاری می‌کند. همان‌گونه که به‌کارگیری اثر میدان مغناطیسی نشانگر جاری شدن توان راکتیو است، تولید میدان مغناطیسی توسط سیم‌پیچ‌های تحریک در ژنراتورهای سنکرون نیز نشانگر جاری شدن توان راکتیو می‌باشد. بنابراین با تغییر جریان تحریک توان راکتیو ژنراتور سنکرون، تغییر می‌کند.



شکل ۱۰ــ ژنراتور سنکرون متصل به شبکه برق

ژنراتور سنکرون برخلاف ژنراتور آسنکرون مطابق شکل(۱۰)، علاوه بر تولید توان اکتیو، می‌تواند توان راکتیو نیز تولید نموده و به شبکه برق تحویل دهد. به سبب داشتن همین توانایی، در تولید نیروی برق اکثر نیروگاه‌های سراسر دنیا از این ژنراتور استفاده می‌شود.

نکته ۳

با افزایش توان راکتیو(Q) بار، ولتاژ ژنراتور رو به کاهش می‌گذارد که باید جهت تثبیت ولتاژ، جریان تحریک ژنراتور را افزایش داد. در واقع با زیاد شدن جریان تحریک شار مغناطیسی افزایش یافته و بدین ترتیب توان راکتیو بیشتری تولید و به شبکه برق تحویل داده می‌شود.

افزایش توان راکتیو باعث افت ولتاژ ژنراتور سنکرون می‌گردد.

نکته ۴

وقتی بار متصل به ژنراتور، توان اکتیو(P) مصرف می‌کند، سرعت ژنراتور رو به کاهش می‌گذارد و فرکانس کم می‌شود. برای جلوگیری از کاهش فرکانس باید جهت تثبیت سرعت چرخش، ژنراتور را با توان بیشتری چرخاند، به‌طوری که توان اکتیو مورد نیاز مصرف کننده تولید شود. این موضوع مانند گاز دادن بیشتر به اتومبیل در یک مسیر سربالایی است برای آنکه بتوان سرعت آن را نسبت به مسیر مسطح، ثابت نگه داشت.

مصرف توان اکتیو باعث کاهش فرکانس ژنراتور سنکرون می‌گردد.

۱ــ در ژنراتورهای واقعی تنظیم ولتاژ به‌صورت خودکار توسط AVR(**A**utomatic **V**oltage **R**egulator) انجام می‌شود.

خود را بیازمایید

۱ــ عوامل تعیین کننده فرکانس ژنراتور سنکرون را نام ببرید.

۲ــ در ژنراتور سنکرون ۱۴ قطبی با فرکانس تولیدی ۵۰ HZ، سرعت چرخش رتور چند دور بر دقیقه است ؟

۳ــ سرعت چرخش یک ژنراتور سنکرون چهار قطبی برابر با ۱۸۰۰ RPM است. فرکانس برق تولیدی آن را به‌دست آورید.

۴ــ عوامل تعیین کننده ولتاژ ژنراتور سنکرون را نام ببرید.

۵ــ برای افزایش ولتاژ ژنراتور سنکرون بایستی مقاومت (رئوستا) مدار تحریک را ..... (افزایش/کاهش) داد.

۶ــ۴ــ موازی کردن ژنراتورهای سنکرون

در نیروگاه‌ها به‌جای یک ژنراتور بزرگ از چند ژنراتور کوچک‌تر به‌صورت موازی با یکدیگر استفاده می‌شود، علت این کار :

- بالا بردن ضریب اطمینان تأمین شبکه برق
- تغییر دائم قدرت درخواستی از شبکه[1]

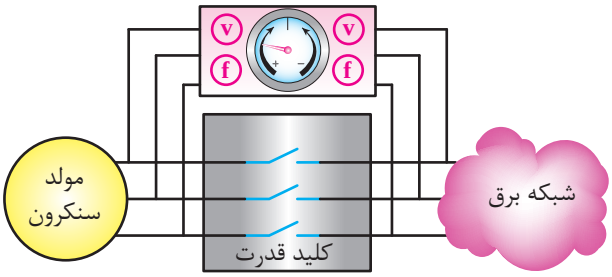
شرایط موازی کردن ژنراتور ها

- برابری ولتاژ خروجی ژنراتورها
- برابری فرکانس ژنراتورها
- رعایت توالی فاز در ژنراتورها

برای انجام عملیات موازی کردن دو ژنراتور سنکرون با هم و یا یک ژنراتور سنکرون با شبکه برق سراسری از مداری مطابق شکل(۱۱) استفاده می‌شود. مدار موازی سازی شامل دو دستگاه ولت‌متر، دو فرکانس متر و یک دستگاه سنکرونسکوپ می‌باشد.

یکی از ولت‌متر و فرکانس مترها ولتاژ و فرکانس طرف ژنراتور و دیگری ولتاژ و فرکانس طرف شبکه برق را اندازه‌گیری می‌کند. نشانگر سنکرونسکوپ زاویه فاز بین ولتاژهای شبکه و ژنراتور را جهت کنترل توالی فازها نشان می‌دهد. وجود این سه دستگاه در تابلوی فرمان نیروگاه برای عمل موازی سازی لازم است.

برای برابر شدن ولتاژ ژنراتورها جریان تحریک آنها را تغییر می‌دهند و برای تساوی شدن فرکانس آنها سرعت ژنراتورها را تنظیم می‌کنند.



شکل ۱۱ــ مدار موازی سازی ژنراتور سنکرون

سرعت چرخش عقربه سنکرونسکوپ به اختلاف فاز بین ژنراتور و شبکه برق بستگی دارد.

هنگامی که عقربه دستگاه سنکرونسکوپ در وسط و روی عدد صفر ایستاد بهترین زمان وصل کلید قدرت بوده و موازی کردن ژنراتور بلامانع است.

شکل ۱۲ــ تابلوی فرمان سه ژنراتورکه با شبکه برق سراسری موازی شده‌اند

۷ــ۴ــ تلفات و راندمان در ژنراتورهای سنکرون

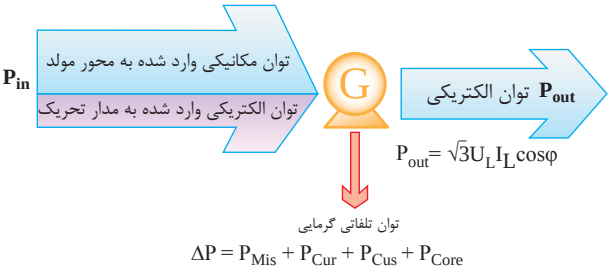
به دلیل تفاوت ساختمان ژنراتورهای سنکرون نسبت به دیگر ماشین‌ها (ژنراتورها) لازم است در محاسبه راندمان بیشتر

۱ــ اگر یک ژنراتور با توان بالا استفاده شود ممکن است به دلیل کاهش مصرف در ساعاتی از شبانه روز مجبور باشد با کسری از بار کار کند واین سبب کاهش بازده ژنراتور در طول زمان عملکرد آن می‌شود.

دقت شود. چرا که توان ورودی ژنراتور سنکرون از دو بخش تأمین می‌شود :

- بخش اول؛ توان الکتریکی (DC) مربوط به مدار تحریک (P_{dc})
- بخش دوم؛ توان مکانیکی (P_{mec}) ورودی

برای آشنایی بیشتر به دیاگرام شکل (۱۳) توجه نمایید :



شکل ۱۳ــ دیاگرام توازن توان ژنراتور سنکرون

توان ورودی : $P_{in} = P_{mec} + P_{dc}$ (۴ــ۶)

توان خروجی : $P_{out} = \sqrt{3}U_L I_L \cos\varphi$ (۴ــ۷)

در رابطه (۴ــ۷)

U_L ولتاژ خط برحسب ولت

I_L جریان خط بر حسب آمپر

$\cos\varphi$ ضریب قدرت شبکه می‌باشد.

با توجه به دیاگرام توان شکل (۱۳)

$\Delta P = P_{in} - P_{out}$ (۴ــ۸)

$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \Rightarrow \eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Delta P}$ (۴ــ۹)

ΔP یا مجموع تلفات ژنراتور سنکرون، از رابطه زیر محاسبه می‌شود :

$\Delta P = P_{mis} + P_{Cur} + P_{Cus} + P_{Core}$ (۴ــ۱۰)

در رابطه (۴ــ۱۰)

P_{mis} تلفات مکانیکی رتور بر حسب وات

P_{Cur} تلفات مسی رتور بر حسب وات

P_{Cus} تلفات مسی استاتور بر حسب وات

P_{Core} تلفات هسته ماشین بر حسب وات

$P_{Cur} = R_f I_f^2$ (۴ــ۱۱)

$P_{Cus} = 3R_S I_{ph}^2$ (۴ــ۱۲)

در رابطه (۴ــ۱۱و۴ــ۱۲)

R_f مقاومت تحریک بر حسب اهم

I_f جریان تحریک بر حسب آمپر

R_s مقاومت هر فاز سیم پیچ استاتور

I_{ph} جریان عبوری از هر فاز سیم پیچ استاتور

مثال یک ژنراتور سنکرون ۴۰۰ ولت با اتصال ستاره، باری با جریان ۸۰ آمپر و ضریب قدرت ۰/۷ را تأمین می‌کند . اگر از تلفات مسی رتور صرف نظر کنیم و تلفات هسته ۴۰۰ وات و تلفات مکانیکی ۶۰۰ وات و مقاومت هر فاز استاتور ۰/۰۴ اهم باشد راندمان ژنراتور را محاسبه کنید.

$P_{cur} = 0$

$P_{cus} = 3R_a I_a^2$

$P_{cus} = 3 \times 0/04 \times 80^2 = 768w$

$\Delta P = P_{mis} + P_{Cur} + P_{Cus} + P_{Core}$

$\Delta P = 400 + 600 + 768 = 1768w$

$P_{out} = \sqrt{3}U_L I_L \cos\varphi = \times \times \times =$

$\sqrt{3} \times 400 \times 80 \times 0/7 = 38755w$

$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Delta P} = \frac{38755}{38755 + 1768} = 0/95$

خود را بیازمایید

۱ــ مزایای استفاده از چند ژنراتور سنکرون به جای یک ژنراتور بسیار بزرگ را بنویسید.

۲ــ برای کنترل توالی و مقدار لحظه‌ای ولتاژ فازها از..... استفاده می‌شود.

۳ــ رابطه محاسبه تلفات کل ژنراتور سنکرون رانوشته و هر یک از کمیت‌های آن را معرفی کنید.

۸ــ۴ــ انواع نیروگاه‌های برق

نیروگاه به محلی گفته می‌شود که در آن انرژی‌های دیگری نظیر انرژی بخار آب یا هوای فشرده یا باد توسط توربین ابتدا به انرژی مکانیکی موردنیاز ژنراتور تبدیل می‌شود و سپس ژنراتور انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نماید. نیروگاه‌ها انواع مختلفی دارند که در این بخش به اختصار توضیح داده می‌شود.

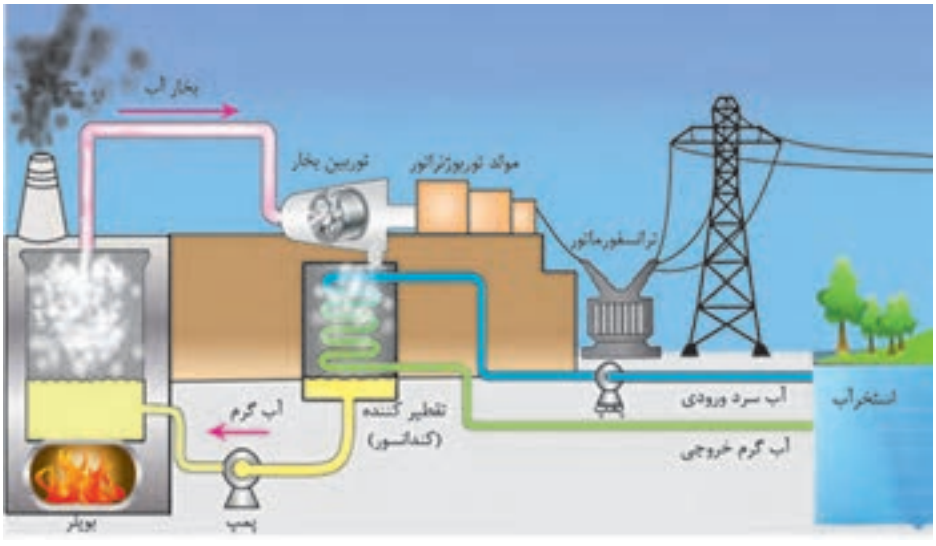
شکل ۱۴ــ نمایی از اتاق کنترل نیروگاه

۱ــ۸ــ۴ــ نیروگاه حرارتی : به نیروگاهی اصطلاحاً حرارتی گفته می‌شود که انرژی نهفته در سوخت‌های جامد، مایع، گاز و یا فعل و انفعالات شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل کند.

انواع نیروگاه‌های حرارتی شامل بخاری، گازی، سیکل ترکیبی و هسته‌ای می‌باشد.

۲ــ۸ــ۴ــ نیروگاه بخاری : در این نیروگاه با سوزاندن سوخت‌های فسیلی (گاز متان، زغال سنگ یا مازوت[1]) آب به بخار تبدیل می‌شود و انرژی بخار تولید شده برای چرخاندن توربین ژنراتور استفاده می‌شود(شکل ۱۵).

۳ــ۸ــ۴ــ نیروگاه گازی : در نیروگاه‌های گازی توسط کمپرسور، هوا را فشرده می‌سازند تا حجم آن کم شود و سپس با پاشیدن گاز متان بر این هوا عمل احتراق صورت می‌گیرد لذا سیالی با فشار زیاد و حجم زیاد به دست می‌آید که دارای انرژی



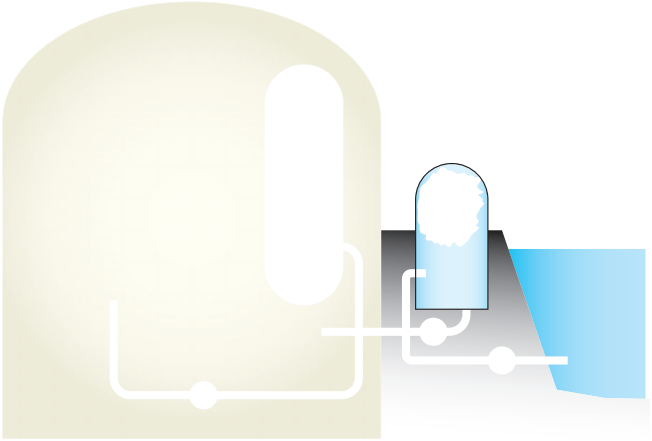
شکل۱۵ــ طرح وارهٔ تولید برق در نیروگاه بخار

۱ــ پایین‌ترین مشتق نفت خام

مناسبی جهت گرداندن توربین متصل به ژنراتور می‌باشد. به دلیل سرعت بالای توربین‌های گازی و بخاری اغلب ژنراتورهای نیروگاه‌های گازی و بخاری از نوع سنکرون با قطب صاف می‌باشند.

۴ــ۸ــ۴ــ نیروگاه هسته‌ای : در نیروگاه‌های هسته‌ای با شکست اتم‌های سنگینی همچون اورانیوم و فعل و انفعالات شیمیایی مربوطه گرمای بسیار زیاد ایجاد می‌شود که از آن برای تولید بخار آب استفاده می‌نمایند. سپس بخار ایجاد شده را از توربین بخار عبور می‌دهند تا ژنراتور را بگرداند.

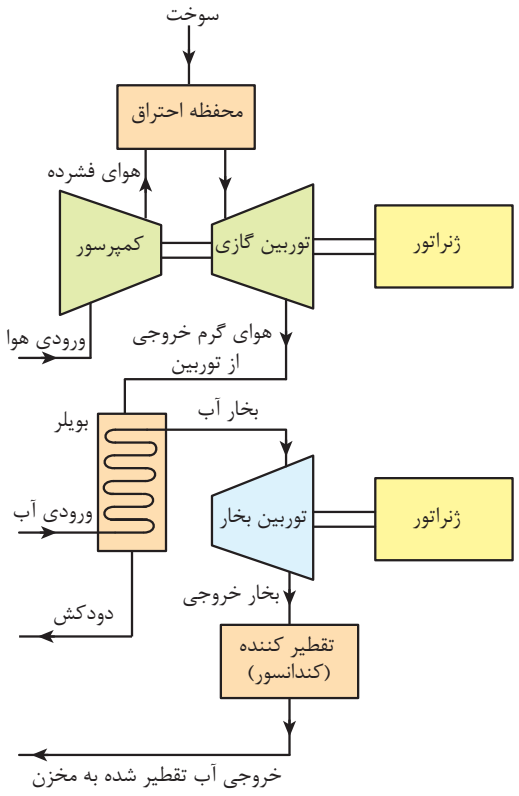
نیروگاه‌های هسته‌ای بسیار تمیز و کارآمد هستند با این وجود در صورت رعایت نکردن نکات ایمنی و بهره برداری غلط می‌توانند برای محیط زیست خطرساز باشند. این نیروگاه‌ها به دلیل استفاده از مواد رادیواکتیو در صورت نشت به محیط اطراف، فاجعه آفرین هستند.



۵ــ۸ــ۴ــ نیروگاه سیکل ترکیبی : به دلیل راندمان بسیار کم نیروگاه‌های گازی و بخاری معمولاً این دو نیروگاه را در نزدیک هم می‌سازند. به این ترتیب که انرژی (گرمای) باقیمانده در گازهای خروجی از توربین گازی را جهت گرم کردن اولیه آب به سمت دیگ بخار هدایت می کنند. در نتیجه گرمای خارج شده از اگزوز نیروگاه گازی هدر نمی رود و تلفات انرژی کاهش یافته و راندمان نیروگاه افزایش می‌یابد. به همین دلیل به این نیروگاه سیکل ترکیبی می‌گویند.

نیروگاه دماوند به عنوان بزرگ‌ترین نیروگاه سیکل ترکیبی خاورمیانه با مجموع ظرفیت ۲۸۶۸ مگاوات می‌باشد. این نیروگاه با ۵۰ درصد بازدهی، بیشترین بازدهی را در میان سایر نیروگاه‌های حرارتی دارد.

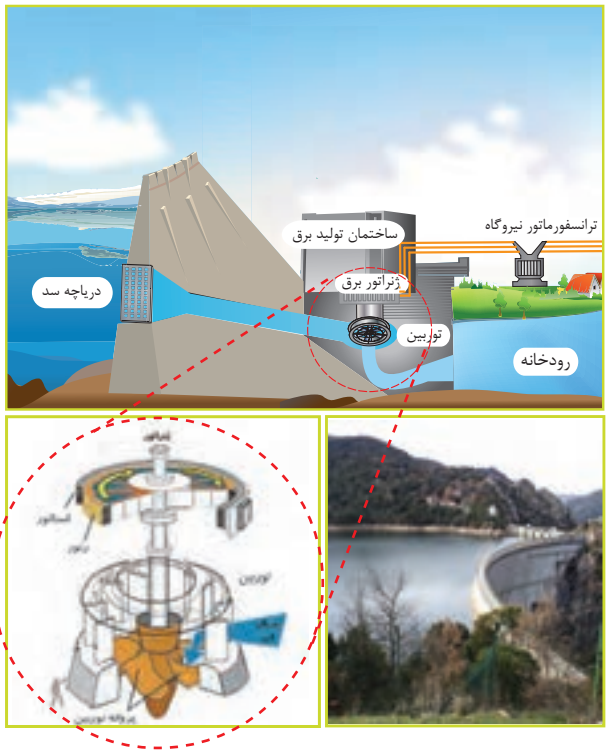
طرح وارهٔ عملکرد نیروگاه سیکل ترکیبی در شکل(۱۸) نشان داده شده است.



شکل ۱۸ــ طرح واره عملکرد نیروگاه سیکل ترکیبی

۶ــ۸ــ۴ــ نیروگاه آبی : استفاده از انرژی پتانسیل آب در پشت سد می‌تواند منبع مناسبی برای به حرکت در آوردن توربین‌های یک ژنراتور باشد. به همین دلیل در کنار هر یک از سدها آب راه مناسبی جهت خروج آب تعبیه می‌کنند که آب پشت سد را با فشار و نیروی مناسب به پره‌های توربین ژنراتور وارد می‌کند و آن را به گردش در می‌آورد.

به دلیل سرعت کم توربین‌های آبی، ژنراتور این نوع نیروگاه‌ها از نوع سنکرون با قطب برجسته می‌باشد.



شکل ۱۹ــ طرح وارهٔ تولید برق در نیروگاه های آبی

۷ــ۸ــ۴ــ نیروگاه بادی : این نوع نیروگاه با توجه به شرایط اقلیمی یک منطقه بادخیز احداث می‌شود. در این روش توربین‌هایی که دارای سه پره با طول بلند می‌باشند روی یک پایهٔ نسبتاً بلند سوار شده اند و انرژی جنبشی وزش باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. البته با توجه به سرعت متغیر باد در این نیروگاه‌ها از ژنراتور آسنکرون استفاده می‌شود.[۱]

شکل ۲۰ــ توربین نیروگاه بادی

۸ــ۸ــ۴ــ جمع‌بندی : در تمام کشورها معمولاً برق پایه (یا همان مصرف متوسط) از طریق نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، هسته‌ای، آبی و بخاری تأمین می‌شود و تولید برق بیشتر را در ساعات اوج مصرف با اضافه شدن نیروگاه‌های گازی و آبی جبران می‌نمایند. ضمن اینکه دیگر نیروگاه‌ها در صورت نیاز، همواره انرژی خود را به شبکه برق سراسری تحویل می‌دهند.

تحقیق کنید

چرا شبکه برق را به‌صورت سراسری استفاده می‌کنند؟

با در نظر گرفتن هزینه های ناشی از اثرات مخرب زیست‌محیطی و به پایان رسیدن ذخایر نفت و گاز در جهان، دانشمندان به‌دنبال راهی مناسب جهت حذف نیروگاه‌های حرارتی هستند و به دنبال آن مطالعه و ساخت نیروگاه‌هایی موسوم به انرژی نو همچون خورشیدی، زمین گرمایی، جزر و مد دریا و... را آغاز کرده‌اند. هرچند در حال حاضر هزینه ساخت نیروگاه‌های انرژی نو در مقایسه با نیروگاه‌های حرارتی بسیار بیشتر است و در برخی نقاط غیر ممکن می‌باشد ولی هنوز آنها را نا امید نکرده است.

در ایران نیز نیروگاه‌هایی احداث شده‌اند که در شکل (۲۱) نمونه‌هایی از آن دیده می‌شود.

خود را بیازمایید

۱ــ انواع نیروگاه‌های حرارتی را نام ببرید.

۲ــ نحوه به حرکت درآوردن توربین در نیروگاه گازی چگونه است؟

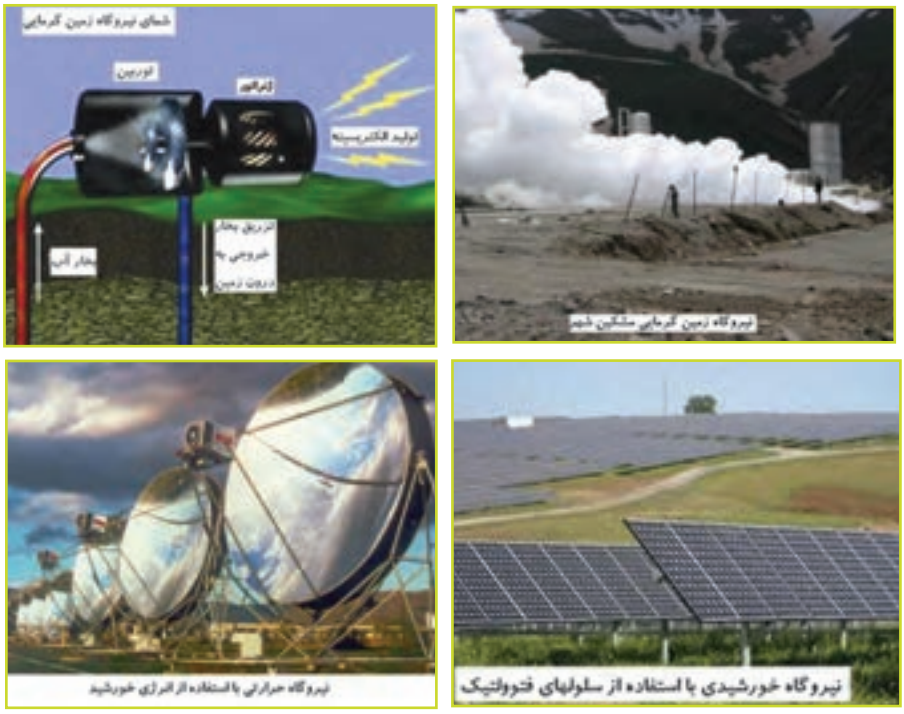
۳ــ راندمان نیروگاه‌های ..... و ..... بسیار کم بوده و ازکنار هم قراردادن این دو نیروگاه، نیروگاه ..... می‌سازند.

۴ــ ژنراتور سنکرون مورد استفاده در نیروگاه آبی از نوع رتور.....(برجسته/صاف) می‌باشد.

۵ــ نشت گازهای رادیواکتیو به بیرون از خطرات نیروگاه ..... می‌باشد.

۶ــ چند نوع نیروگاه انرژی نو را نام ببرید.

۱ــ برای توضیحات بیشتر به فصل ۳ مبحث ژنراتور آسنکرون مراجعه شود.



شکل ۲۱ــ نمایی از نیروگاه‌های موسوم به انرژی نو

۹ــ۴ــ ساختمان موتور سنکرون

ساختمان موتورهای سنکرون سه فاز مشابه ژنراتورهای سنکرون است. البته تفاوت‌های جزئی بین آنها وجود دارد. به عنوان نمونه رتور موتورهای سنکرون غالباً از نوع قطب برجسته است. در صورتی که در ژنراتورها چنین نیست. همچنین در ساختمان رتور موتورهای سنکرون از میله‌های قفس سنجابی به شکلی که در فصل ۳ گفته شد استفاده می‌شودکه در ادامه علت به‌کارگیری این میله‌ها بیان خواهد شد.

۱۰ــ۴ــ اصول کار موتور سنکرون

اگر سیم پیچ‌های سه فاز استاتور موتور سنکرون را به شبکه سه فاز متصل کنیم، مطابق آنچه که در موتورهای القایی گفته شد، میدان دواری با سرعت n_s طبق رابطه (۱۳ــ۴) در داخل موتور ایجاد می‌گردد.

$$n_s = \frac{۱۲۰ \times f}{P} \qquad (۱۳ــ۴)$$

اگر سیم پیچی رتور این موتورکه مانند رتور ژنراتورهای سنکرون است و تعداد قطب‌های آن با تعداد قطب‌های استاتور برابر می‌باشد را به منبع ولتاژ DC متصل کنیم، بر اثر عبور جریان تحریک از آن، رتور ماشین تبدیل به آهنربای دائم با تعداد قطب‌هایی متناسب با میدان گردان می‌شود. اما از آنجا که سرعت میدان دوار (مثلاً با فرکانس ۵۰ HZ) خیلی زیاد است، قطب‌های ساکن رتور، قطب‌های دوار را لحظه ای در مقابل و خیلی سریع در مخالف خود می‌بینند، بنابراین گشتاور یا نیروی راه‌اندازی به آن وارد نمی‌شود و رتور حرکت نمی‌کند. اما اگر رتور را با سرعتی نزدیک به سرعت سنکرون به حرکت در آوریم در این حالت دو قطب غیر همنام رتور و میدان دوار با یکدیگر قفل شده و با سرعت ثابت (میدان دوار) و در جهت چرخش میدان شروع به گردش می کنند.

چون گشتاور راه‌اندازی موتور سنکرون صفر است پس موتور سنکرون نیاز به راه‌انداز دارد.

۱۱ــ۴ــ روش‌های راه‌اندازی موتور سنکرون

۱ــ۱۱ــ۴ــ راه‌اندازی داخلی : برای راه‌اندازی موتورهای سنکرون به این شیوه از رتورهایی که بر روی آنها میله‌های قفس سنجابی تعبیه گردیده، استفاده می‌شود. بدین ترتیب که موتور در لحظهٔ راه‌اندازی مانند موتور القایی راه می‌افتد و بعد از آنکه سرعت رتور به ۷۵٪ سرعت میدان دوار رسید جریان تحریک سیم پیچ رتور را برقرار می‌کنند، لذا موتور به‌صورت سنکرون به کار خود ادامه خواهد داد. به این روش راه‌اندازی روش القایی نیز می‌گویند.

از دیگر ویژگی‌های میله‌های قفس سنجابی در رتور موتورهای سنکرون خنثی کردن ضربات ناشی از بار به موتور در شرایط اضافه بار می‌باشد.

۲ــ۱۱ــ۴ــ راه‌اندازی خارجی : در این روش به کمک یک محرک خارجی موتور سنکرون را راه‌اندازی می‌نمایند، سپس محرک خارجی را خاموش و از سیستم خارج می کنند.

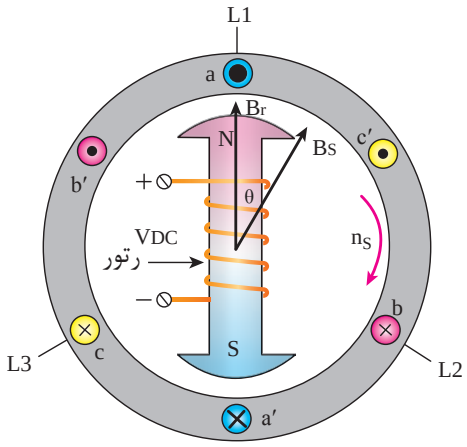
خود را بیازمایید

۱ــ چرا در موتور سنکرون با اتصال ولتاژ شبکه به استاتور و ایجاد جریان تحریک، رتور نمی‌چرخد؟

۲ــ در راه‌اندازی داخلی، موتور سنکرون به‌صورت .....راه اندازی می‌شود.

۱۲ــ۴ــ رفتار موتور سنکرون در زیر بار

هنگامی که رتور موتور سنکرون سه فاز در زیر بار است و با سرعت سنکرون می‌چرخد دو میدان حاصل از استاتور و رتور طبق آنچه که در شکل (۲۲) نشان داده شده است، در یک راستا قرار نمی‌گیرند. در واقع زاویه میدان رتور از میدان استاتور عقب می‌افتد. این عقب افتادن مانند کشیده شدن یک اتومبیل توسط یک خودروی دیگر است . یعنی اگر اتومبیل جلویی با هر سرعتی حرکت کند خودروی کشیده شده با حفظ فاصله از خودروی کشنده از همان سرعت تبعیت می‌کند.



شکل ۲۲ــ عقب افتادن میدان رتور از استاتور در زیر بار

زاویه بین میدان رتور و میدان استاتور را **زاویه گشتاور** می‌گویند. این زاویه با زیاد شدن بار افزایش می‌یابد بدون آنکه سرعت سنکرون تغییر کند. بنابراین برای کاهش زاویه گشتاور، جریان تحریک باید افزایش یابد بیشترین گشتاور موتور سنکرون زمانی ایجاد می‌شود که هر قطب رتور بین دو قطب میدان دوار قرار گیرد زیرا میدان قطب عقبی آن را به شدت رانده و میدان قطب جلویی آن را به شدت جذب می‌کند. در موتور سنکرون دوقطبی اگر با افزایش بار، زاویه گشتاور به ۹۰ درجه برسد و یا از آن تجاوز کند ممکن است دو حالت پیش بیاید :

الف) اگر اضافه بار خیلی کم و یا موقتی اعمال گردد، لغزش در موتور ایجاد می‌شود و در صورتی که در ساختمان رتور از میله های قفس سنجابی استفاده شده باشد، موتور به حالت آسنکرون در می آید و با کم شدن بار مجدداً موتور به وضعیت سنکرون برمی‌گردد.

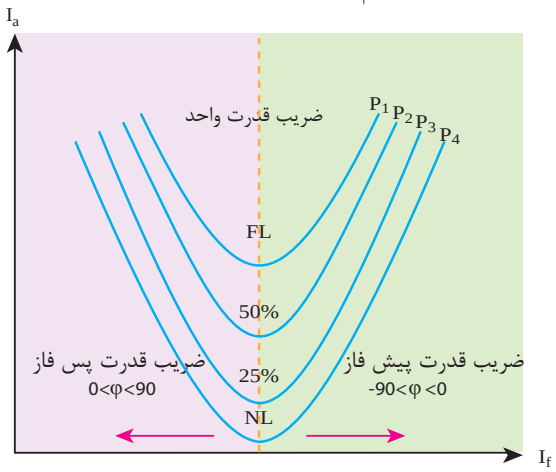
ب) اگر اضافه بار خیلی زیاد باشد ویا موقتی نباشد در صورت نداشتن میله‌های قفس سنجابی، موتور سریعاً از حالت سنکرون خارج شده و می‌ایستد، که این وضعیت برای موتور سنکرون خطرناک بوده و موجب سوختن آن می‌گردد. حتی اگر موتور میله‌های قفس سنجابی داشت، عملکرد طولانی مدت آن در حالت آسنکرون نیز برای موتور ضرر دارد. بنابراین برق موتور سنکرون باید فوراً قطع شود.

به زاویه گشتاور ۹۰ درجه در موتورهای سنکرون زاویه بحرانی می‌گویند.

۱۳ــ۴ــ حالات کاری موتور سنکرون

از آنجایی که جریان تحریک موتور سنکرون در اختیار بهره‌بردار است، لذا می‌توان پس از راه‌اندازی موتور، با تغییرات جریان تحریک، توان راکتیو دریافتی از شبکه را کنترل نمود.

این تغییرات توان راکتیو نسبت به جریان تحریک مانند حرف لاتین V (موسوم به منحنی V) می‌باشد.



P_1 =بار کامل = FL (Full Load)
P_2 =بار کامل ۵۰٪
P_3 =بار کامل ۲۵٪
P_4 =بی باری = NL (No Load)

شکل ۲۳ــ منحنی V در موتورهای سنکرون

مطابق این منحنی سه حالت کاری برای موتور سنکرون وجود دارد :

الف) حالت نرمال : در این حالت جریان تحریک، توان راکتیو مورد نیاز را به میزان مصرف داخلی خود موتور تولید می‌کند و جریان آرمیچر دارای حداقل می‌باشد لذا از دیدگاه شبکه، موتور سنکرون مانند یک عنصر اهمی خالصی عمل می‌نماید که توان راکتیو دریافتی از شبکه آن صفر است و در نتیجه ضریب قدرت موتور در این حالت ($\cos\varphi = 1$) واحد می‌باشد.

ب) حالت زیر تحریک : از آنجا که جریان تحریک در این حالت کمتر از جریان حالت نرمال است بنابراین موتور سنکرون همچون یک عنصر اهمی سلفی در شبکه، توان راکتیو(Q) جذب می‌نماید.

ج) حالت فوق تحریک : با افزایش جریان تحریک بیش از مقدار نرمال، موتور سنکرون، توان راکتیو (Q) تولید شده اضافی را به شبکه برق تحویل می‌دهد و بنابراین موتور سنکرون در شبکه رفتار خازنی نشان می‌دهد.

چون هر منحنی V موتور سنکرون به ازای بار مشخص و ثابتی به‌دست می‌آید لذا موتور در بارهای دیگر دارای یک منحنی متفاوت می‌باشد. به همین دلیل معمولاً سازندگان منحنی V، موتورهای سنکرون را حداقل در بار نامی، نصف بار نامی و بی‌باری ارائه می‌کنند.

ضریب قدرت موتورهای سنکرون قابل کنترل بوده و به جریان تحریک آنها بستگی دارد.

خود را بیازمایید

۱ــ زاویه عقب افتادن میدان رتور از میدان استاتور در موتور سنکرون را زاویه ..... می‌گویند.

۲ــ عکس العمل موتور سنکرون بدون میله قفس سنجابی در مقابل اضافه بارهای زیاد چگونه است؟

۳ــ در حالت کاری نرمال موتور سنکرون، ضریب قدرت ..... و رفتار موتور در شبکه برق همانند عنصر..... (اهمی ــ سلفی ــ خازنی) می‌باشد.

۴ــ اگر در موتور سنکرون جریان تحریک بیش از مقدار نرمال باشد، رفتار موتور در شبکه چگونه است؟

۵ــ برای افزایش ضریب قدرت شبکه برق باید موتور سنکرون را در حالت ..... استفاده کرد.

۶ــ منحنی V موتورهای سنکرون را رسم نموده و نواحی مختلف کاری در آن را تعیین کنید.

۱۴ــ۴ــ کاربرد موتور سنکرون

با توجه به جدول (۱) و مقایسه ویژگی‌های دو موتور القایی (آسنکرون) و سنکرون از موتور سنکرون می توان جهت اصلاح ضریب قدرت شبکه استفاده نمود. به همین علت به موتور سنکرون، خازن سنکرون هم می‌گویند. که شرح عملکرد آن در بخش قبلی آمده است.

از دیگر کاربردهای این موتور استفاده از آن در بارهایی می‌باشد که نیاز به سرعت ثابت دارند.

موتورهای سنکرون به دلیل پیچیدگی ساختمان در مقایسه با موتورهای القایی بسیار گران‌تر هستند ولی استفاده از موتورهای سنکرون در توان‌های خیلی زیاد به صرفه‌تر است.

موتورهای القایی (آسنکرون)	موتور سنکرون
دارای گشتاور راه‌اندازی می باشد.	گشتاور راه‌اندازی ندارد (به یک سیستم راه اندازی نیاز دارد).
سرعت آن با افزایش بار افت می کند و هرگز در سرعت سنکرون نمی چرخد.	در تمام بارهای ممکن با سرعت سنکرون می چرخد.
به تحریک DC نیاز ندارد.	به تحریک DC نیاز دارد.
ضریب قدرت این موتور همواره پس فاز است.	می تواند در ضریب قدرت‌های متفاوت پس فاز یا پیش فاز و یا واحد کار کند.
برای گردش بارهای مکانیکی به کار گرفته می شود.	هم برای گردش بارهای مکانیکی و هم به عنوان اصلاح‌گر ضریب قدرت در شبکه می‌تواند استفاده شود.

جدول ۱ــ مقایسه موتورهای سنکرون و آسنکرون

پرسش‌های پایان فصل(۴)

۱ــ انواع روش‌های تولید برق، توسط ژنراتور سنکرون را بیان نمایید.

۲ــ چرا با آنکه رتور ژنراتور سنکرون مانند آهنربای دائم عمل می‌کند، هسته آن را ورقه ورقه می‌سازند؟

۳ــ شکل فیزیکی یک رتور دو قطبی با قطب صاف و رتور با قطب برجسته را ترسیم کنید.

۴ــ چگونه می‌توان ولتاژ خروجی ژنراتور سنکرون را کنترل نمود؟

۵ــ چگونه می‌توان فرکانس خروجی ژنراتور سنکرون را کنترل نمود؟

۶ــ شرایط موازی کردن ژنراتورهای سنکرون را بنویسید.

۷ــ معمولاً از نیروگاه‌های آبی و گازی در چه مواقعی استفاده می‌شود؟

۸ــ ساختمان ژنراتور و موتور سنکرون چه شباهت‌ها و تفاوت‌هایی با یکدیگر دارند؟

۹ــ استفاده از روش راه‌اندازی القایی موتور سنکرون نسبت به روش خارجی چه مزایایی دارد؟

۱۰ــ چرا به موتور سنکرون، خازن سنکرون می‌گویند؟

۱۱ــ چهار مورد از تفاوت‌های موتور سنکرون و موتور آسنکرون را بیان کنید.

مسائل پایان فصل(۴)

۱ــ استاتور یک ژنراتور سنکرون که با اتصال ستاره به بار خروجی متصل است، دارای جریان خط ۱۷۳A بوده و مقاومت هر فاز آن ۰/۰۲۵Ω می‌باشد. چنانچه مقاومت مدار تحریک ۵۰Ω و ولتاژ تحریک رتور ۱۲۵V باشد، تلفات مسی رتور و استاتور را به‌دست آورید.

۲ــ یک ژنراتور سنکرون، توان اکتیو ۳۵۴/۶۵ KW را با ولتاژ خط ۲ KV و جریان ۱۲۵A به بار مصرفی می‌رساند چنانچه راندمان ماشین ۹۳/۰ باشد، به‌دست آورید :

الف) ضریب قدرت ژنراتور

ب)توان دریافتی ژنراتور

ج) تلفات کل ژنراتور

د) اگر توان ورودی ۱۳۴۴W،DC باشد، توان مکانیکی ورودی چقدر است؟

۵
موتورهای تک‌فاز

۵

هدف‌های رفتاری :

ــ نحوه تولید میدان مغناطیسی در یک استاتور با یک و دو سیم‌پیچ را بررسی نماید.
ــ لزوم استفاده از سیم‌پیچ کمکی در موتورهای تک‌فاز را توضیح دهد.
ــ ساختمان داخلی موتورهای القایی تک‌فاز را از روی شکل شرح دهد.
ــ طرز کار موتورهای القایی تک‌فاز را توضیح دهد.
ــ انواع موتورهای القایی تک‌فاز را نام ببرد.
ــ شکل واقعی موتور فاز شکسته را از میان موتورهای تک‌فاز دیگر تمیز دهد.
ــ ساختمان موتور فاز شکسته را توضیح دهد.
ــ شکل مداری موتور یک‌فاز فاز شکسته را رسم کند.
ــ طرز کار موتور یک‌فاز فاز شکسته را توضیح دهد.
ــ منحنی مشخصه گشتاور ــ سرعت موتور فاز شکسته را رسم کند.
ــ منحنی مشخصه گشتاور ــ سرعت موتور فاز شکسته را تشریح کند.
ــ کاربردهای موتور تک‌فاز فاز شکسته را بیان کند.
ــ شکل واقعی موتور تک‌فاز با خازن راه‌انداز را از میان موتورهای دیگر تمیز دهد.
ــ ساختمان موتور با خازن راه‌انداز را توضیح دهد.
ــ شکل مداری موتور تک‌فاز با خازن راه‌انداز را رسم کند.
ــ طرز کار موتور تک‌فاز با خازن راه‌انداز را توضیح دهد.
ــ منحنی مشخصه گشتاور ــ سرعت موتور تک‌فاز با خازن راه‌انداز را رسم کند.
ــ منحنی مشخصه گشتاور ــ سرعت موتور تک‌فاز با خازن راه‌انداز را تشریح کند.
ــ کاربردهای موتور تک‌فاز با خازن راه‌انداز را بیان کند.
ــ شکل واقعی موتور تک‌فاز خازن دائم کار را از میان موتورهای دیگر تمیز دهد.
ــ ساختمان موتور با خازن دائم کار را توضیح دهد.
ــ شکل مداری موتور با خازن دائم کار را توضیح دهد.
ــ شکل مداری موتور با خازن دائم کار را رسم کند.
ــ منحنی مشخصه گشتاور ــ سرعت موتور با خازن دائم کار را رسم کند.
ــ طرز کار موتور با خازن دائم کار را تشریح کند.
ــ کاربرد موتورهای تک‌فاز با خازن دائم کار را بیان کند.
ــ شکل واقعی موتور تک‌فاز دوخازنی را از میان موتورهای تک‌فاز تمیز دهد.
ــ ساختمان موتورهای تک‌فاز دوخازنی را توضیح دهد.

ـ شکل مداری موتورهای تک‌فاز دوخازنی را توضیح دهد.
ـ شکل مداری موتورهای تک‌فاز دوخازنی را رسم کند.
ـ منحنی مشخصه گشتاور سرعت موتور دوخازنی را رسم کند.
ـ منحنی پیشرفته گشتاور سرعت موتور دوخازنی را تشریح کند.
ـ کاربرد انواع موتورهای تک‌فاز دوخازنی را بیان کند.
ـ چگونگی تغییر جهت چرخش در موتورهای القایی تک‌فاز را توضیح دهد.
ـ کاربردهای تغییر جهت چرخش در موتورهای القایی تک‌فاز را نام ببرد.
ـ شکل واقعی موتور قطب چاک‌دار را از دیگر موتورهای تک‌فاز تمیز دهد.
ـ ساختمان موتور قطب چاک‌دار را از روی شکل توضیح دهد.
ـ طرز کار موتور قطب چاک‌دار را توضیح دهد.
ـ منحنی مشخصه موتور قطب چاک‌دار را رسم کند.
ـ منحنی مشخصه موتور قطب چاک‌دار را تشریح کند.
ـ کاربردهای موتور قطب چاک‌دار را نام ببرد.
ـ شکل واقعی موتور انیورسال را از دیگر موتورهای تک‌فاز تمیز دهد.
ـ ساختمان داخلی موتورهای انیورسال را از روی شکل توضیح دهد.
ـ طرز کار موتور انیورسال را توضیح دهد.
ـ منحنی مشخصه موتور انیورسال را رسم کند.
ـ منحنی مشخصه موتور انیورسال را تشریح کند.
ـ کاربردهای موتورهای انیورسال را بیان کند.
ـ نحوه راه‌اندازی موتورهای سه‌فاز در شبکه تک‌فاز را با رسم شکل مداری آن توضیح دهد.
ـ ساختمان داخلی مولد القایی تک‌فاز را از روی شکل توضیح دهد.
ـ طرز کار مولد القایی تک‌فاز را بیان کند.
ـ کاربردهای مولد القایی تک‌فاز را بیان کند.

۵

مقدمه

غالباً در ساختمان‌های مسکونی، کارگاه‌های کوچک، مغازه‌ها و فروشگاه‌ها از شبکه برق تک‌فاز استفاده می‌شود. بنابراین برای استفاده از وسایلی همچون کولر، یخچال، ماشین لباسشویی، پمپ‌های آب خانگی و دیگر وسایل مورد نیاز در زندگی امروزی به موتور تک‌فاز الکتریکی احتیاج می‌باشد.

آنچنان که در فصل ۳ بیان شد، منبع تغذیه AC تک‌فاز میدان ضربانی ایجاد می‌کند. به همین خاطر در ابتدا تصور می‌شد که یکی از ضعف‌های برق AC عدم کارآیی آن در تولید موتورهای الکتریکی تک‌فاز است[۱].

با همت مهندس فرانسوی موریس لبلانس[۲] و ارائه تئوری دو میدانی میدان‌های ضربانی، طراحی و تولید انواع موتورهای تک‌فاز شروع شد و این ضعف به‌طور کلی از پرونده برق AC پاک گردید.

شکل ۱ــ کاربردهای موتورهای تک‌فاز در لوازم خانگی

به‌طور کلی انواع موتورهای الکتریکی که در شبکه های برق تک‌فاز جریان متناوب استفاده می‌شوند جزء ماشین‌های مخصوص به‌حساب می‌آیند.

از آنجا که موتورهای الکتریکی تک‌فاز بسیار متنوع هستند، لذا هر یک بنا بر ویژگی های خود در جایی کاربرد دارند. این موتورها در قدرت‌های کم معمولاً تا ۴ کیلو وات ساخته می‌شوند.

علاوه بر دسترسی ساده به برق تک‌فاز در هر مکان، سازندگان لوازم خانگی، دلیل اصلی استفاده از موتورهای الکتریکی تک‌فاز را قیمت ارزان و مشخصه گشتاور ــ دور خاص این موتورها می‌دانند.

به‌طور کلی موتورهای تک‌فاز به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند :

ــ موتور القایی تک‌فاز

ــ موتور یونیورسال

ــ موتور سنکرون تک‌فاز

در این کتاب فقط انواع موتورهای القایی تک‌فاز و موتور یونیورسال تشریح می‌شود و ساختمان انواع موتورهای سنکرون تک‌فاز در دوره‌های بالاتر تحصیلی مورد بررسی قرار خواهد گرفت[۳].

۱ــ حامیان برق DC، یکی دیگر از نقاط ضعف برق AC را کنترل ناپذیر بودن سرعت موتورهای جریان متناوب می‌دانستند که با رشد صنعت الکترونیک قدرت بر این مشکل نیز چیره شدند.

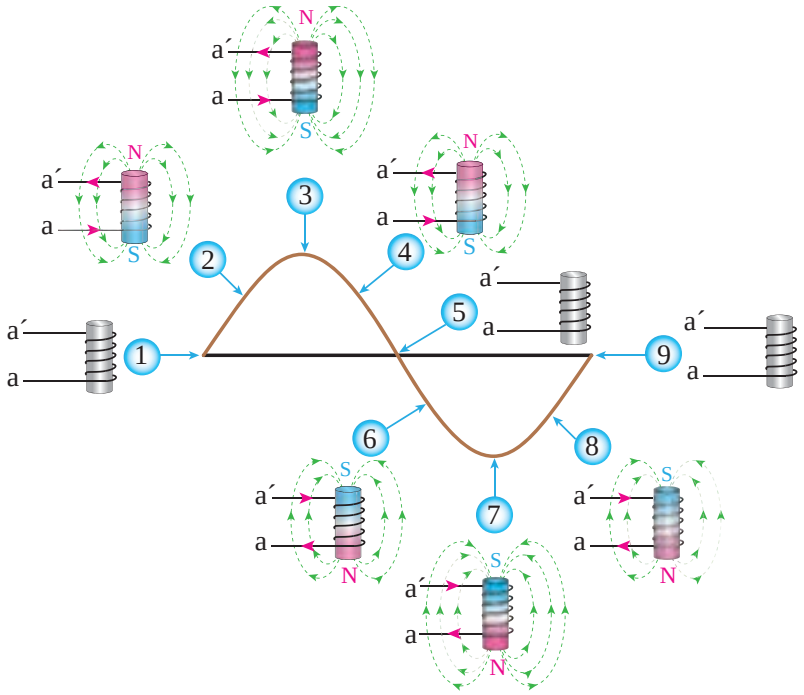
۲ــ Maurice Leblanc (۱۸۵۷ــ۱۹۲۳)

۳ــ دانش آموزان به فصل ۳، بخش اساس کار ماشین‌های القایی و پدیده میدان دوار رجوع نمایند.

۱ــ۵ــ موتورهای القایی تک‌فاز

همان‌گونه که بیان شد عامل ایجاد چرخش در موتورهای القایی سه فاز، ایجاد میدان دوار در داخل استاتور می‌باشد. در صورتی که با عبور جریان AC تک‌فاز از یک سیم‌پیچ میدان ضربانی ایجاد می‌شود.

برای ساختن موتور القایی تک‌فاز، باید بتوان با ابتکاری خاص میدان دوار ایجاد نمود. هر چند طرح‌های ارائه شده در جهت ایجاد میدان دوار دارای نواقصی است اما برای چرخش موتورهای با توان کم کافی می‌باشد.



شکل ۲ــ ولتاژ و جریان تک‌فاز در یک سیم‌پیچ میدان ضربانی ایجاد می‌کند

در واقع چگونگی القای ولتاژ در هادی‌های رتور و چرخش آن در موتورهای سه فاز و تک‌فاز شبیه یکدیگر است از این رو به دلیل سادگی ساختمان موتورهای القایی تک‌فاز، رتور همهٔ آنها را از نوع قفسه سنجابی می‌سازند.

۱ــ۱ــ۵ــ چگونگی ایجاد چرخش در موتورهای القایی تک‌فاز :

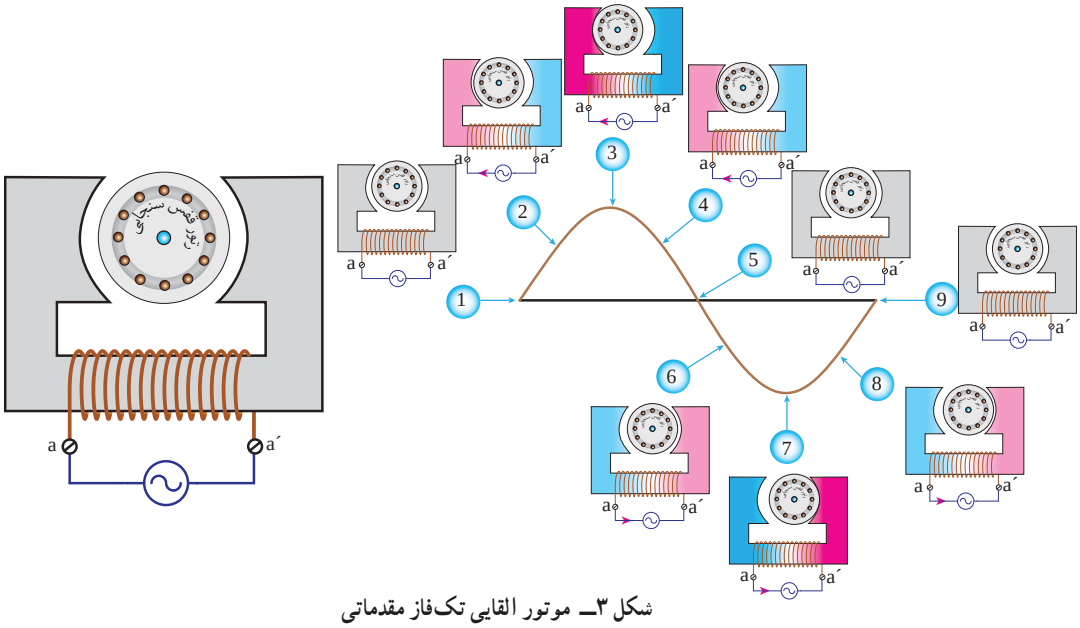
در تشریح عملکرد موتورهای القایی، نحوهٔ ایجاد میدان دوار در استاتور ماشین از اصول اساسی می‌باشد. آزمایش شکل(۳) نشان می‌دهد که در صورت اتصال موتور به شبکه برق تک‌فاز AC، رتور حرکتی نخواهد داشت.

اما اگر با کمک یک وسیله راه‌انداز رتور این موتور در یک جهت، مثلاً راست‌گرد، به چرخش درآید رتور در همان جهت به حرکت دورانی خود ادامه می‌دهد.

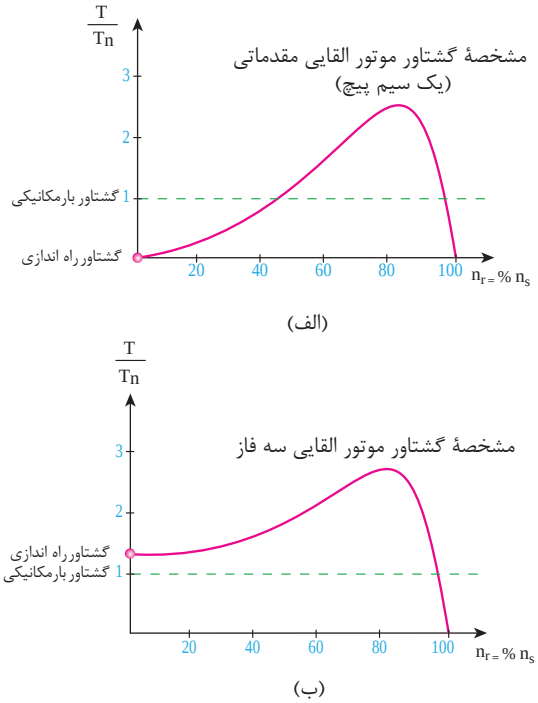
موضوع جالب توجه اینکه اگر ابتدا رتور به سمت چپ چرخانده شود، ادامه چرخش رتور چپگرد خواهد بود.

بنابراین می‌توان گفت میدان ضربانی موتور تک‌فاز شامل دو میدان دوار با اندازه‌ای برابر، یکی راست‌گرد و دیگری چپ‌گرد است. با آزمایش شکل (۳) مشخص می‌شود که با کمک وسیله راه‌انداز یکی از دو میدان بر دیگری غلبه نموده و باعث چرخش رتور در یک جهت می‌شود.

در واقع تئوری دو میدانی اثبات می‌کند که میدان ضربانی



شکل ۳ــ موتور القایی تک‌فاز مقدماتی



شکل ۴ــ مقایسه مشخصه گشتاور ــ دور موتور القایی تک‌فاز مقدماتی و سه فاز

برق تک‌فاز با مجموع دو میدان دوار هم اندازه مختلف الجهت برابر می‌باشد. هر چند تشریح موضوع فوق با روابط ریاضی تبیین می‌گردد اما در این کتاب به مشاهدات فیزیکی آن بسنده می‌شود.

مشخصه گشتاور ــ دور موتور تک‌فاز مقدماتی، مطابق شکل (۴ ــ الف) می‌باشد. با توجه به شکل (۴ ــ الف) می‌توان مشاهده نمود که موتور القایی تک‌فاز مقدماتی گشتاور راه‌اندازی ندارد و به همین دلیل بدون وسیلهٔ راه‌انداز به چرخش در نمی‌آید.

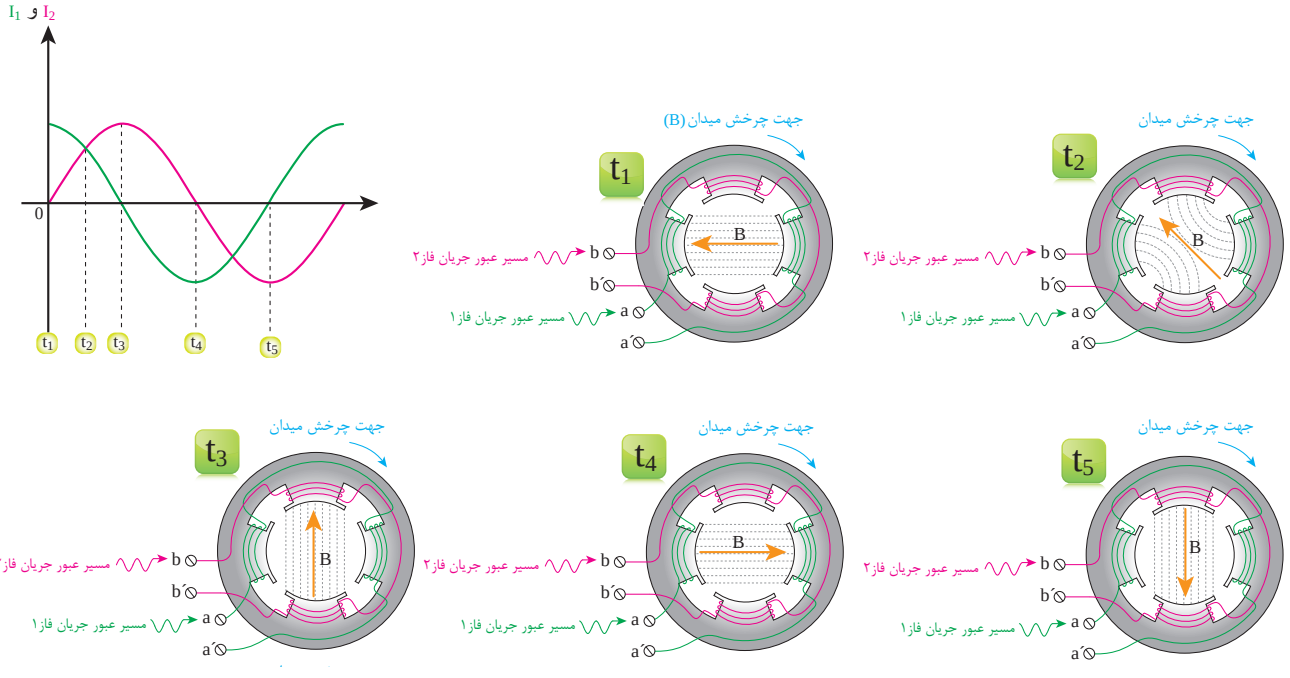
بنابراین باید برای راه‌اندازی موتور القایی تک‌فاز تدبیری اندیشیده شود.

همان‌طور که در تئوری ایجاد میدان دوار موتورهای سه فاز القایی گفته شد، با قرار دادن سه دسته سیم‌پیچ با اختلاف مکانی ۱۲۰ درجه در پوسته استاتور و عبور جریان سه فاز از آنها میدان دوار ایجاد می‌شود.[۱]

همچنین اگر مطابق شکل(۵) در پوسته استاتور دو دسته سیم‌پیچ با اختلاف مکانی ۹۰ درجه نسبت به هم جا سازی شوند به‌طوری که جریان عبوری از آنها دارای اختلاف فاز ۹۰ درجه باشد، می‌توان میدان دوار ایجاد کرد.

۱ــ برای توضیحات بیشتر به فصل سوم مبحث ایجاد میدان دوار مراجعه کنید.

با توجه به الگوی شکل (۶ ــ الف)، برای ایجاد چرخش در موتورهای تک‌فاز القایی می‌توان از دو دسته سیم‌پیچ استفاده کرد به شرطی که بتوان بین جریان سیم‌پیچ‌ها اختلاف فاز ایجادنمود. ایجاد این اختلاف فاز با استفاده از یک المان مناسب انجام می‌شود.



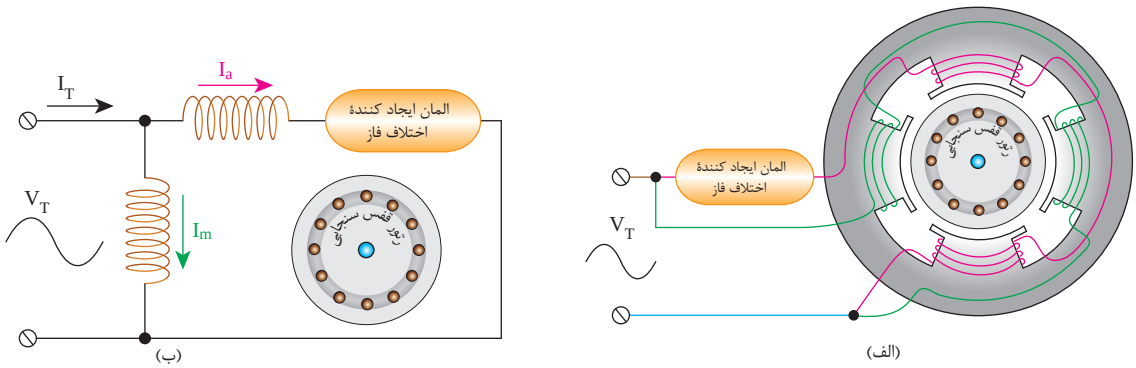
شکل ۵ ــ ایجاد میدان دوار با کمک دو دسته سیم‌پیچ و دو جریان متناوب با اختلاف فاز ۹۰ درجه

یکی از این دو سیم‌پیچ را سیم‌پیچ اصلی (Main) و دیگری را سیم‌پیچ کمکی (Auxiliary) یا راه‌انداز می‌نامند.

سیم‌پیچ‌های موتور تک‌فاز القایی و المان ایجادکننده اختلاف فاز در مدار شکل (۶ ــ ب) نمایش داده شده است.

جریان سیم‌پیچ اصلی را با I_m و جریان سیم‌پیچ راه‌انداز را با I_a نشان می‌دهند.

هر چه اختلاف فاز جریان سیم‌پیچ اصلی (I_m) با سیم‌پیچ راه‌انداز(I_a) بیشتر باشدگشتاور راه‌اندازی بیشتر و میدان دوار ایجاد شده متقارن‌تر است.



شکل ۶ ــ مدار اتصال موتور تک‌فاز چهار قطب به جریان برق تک‌فاز

بیشترین گشتاور راه‌اندازی زمانی است که اختلاف فاز جریان دو سیم‌پیچ ۹۰ درجه باشد. در این حالت میدان دوار ایجاد شده کاملاً متقارن می‌باشد.

موتورهای تک‌فاز القایی بر اساس انتخاب المان ایجاد کننده اختلاف فاز به صورت ذیل دسته‌بندی می‌شوند :

- موتورهای القایی تک‌فاز با فاز شکسته
- موتورهای القایی با خازن راه‌انداز
- موتور القایی با خازن دائم کار
- موتورهای القایی دو خازنی (خازن راه‌انداز و دائم کار)
- موتور القایی قطب چاک‌دار

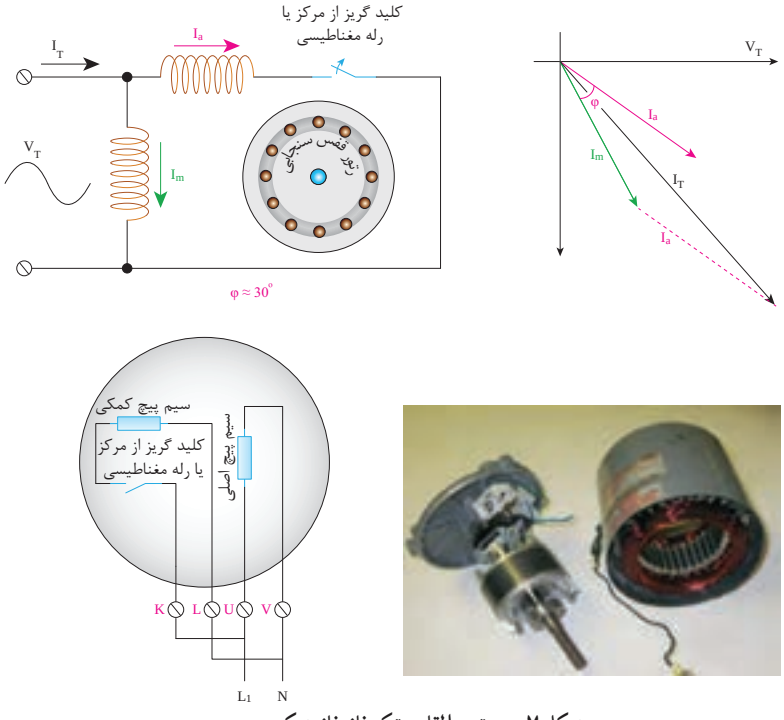
۲ــ۱ــ۵ــ موتورهای القایی تک فاز با فاز شکسته :

در این موتورها برای ایجاد اختلاف فاز بین جریان سیم‌پیچ اصلی و راه‌انداز، نسبت مقاومت اهمی به القایی سیم‌پیچ راه‌انداز را بیشتر از سیم‌پیچ اصلی اختیار می‌کنند. یعنی امپدانس سیم‌پیچ راه‌انداز بیشتر خاصیت اهمی و امپدانس سیم‌پیچ اصلی بیشتر خاصیت سلفی دارد. در نتیجه مطابق دیاگرام برداری شکل(۷) بین جریان دو سیم‌پیچ اختلاف فاز ایجاد می‌شود.

بهترین راه افزایش نسبت مقاومت اهمی به مقاومت القایی، استفاده از سیم نازک‌تر در سیم‌پیچ می‌باشد. ضمن آنکه با قرارگیری سیم‌پیچ در عمق کمتر شیارهای استاتور اثر مقاومت القایی سیم‌پیچ کاهش می‌یابد. در عمل با قرار دادن سیم‌پیچ راه‌انداز بر روی سیم‌پیچ اصلی، سیم‌پیچ راه‌انداز در عمق کمتر و سیم‌پیچ اصلی در عمق بیشتر قرار گرفته و بدین سبب مقاومت القایی آن کمتر از مقاومت القایی سیم‌پیچ اصلی می‌شود.

از آنجا که مقاومت اهمی سیم‌پیچ راه‌انداز زیاد می‌باشد، در صورت ادامه کار موتور، تلفات حرارتی در سیم‌پیچ راه‌انداز باعث افزایش دمای سیم‌پیچ و سوختن آن می‌شود.

به همین خاطر باید پس از راه‌اندازی موتور و زمانی که سرعت آن حدوداً به ۷۵ درصد سرعت نامی رسید، سیم‌پیچ راه‌انداز از مدار خارج گردد.



شکل ۷ــ موتور القایی تک‌فاز فاز شکسته

برای این‌کار در بعضی موتورها مانند موتور کولر از کلید گریز از مرکز و در برخی دیگر مانند یخچال و فریزر از رله مغناطیسی استفاده می‌شود.

کلید گریز از مرکز کلیدی است که با افزایش سرعت موتور از یک حد معین، عمل می‌کند.

رله مغناطیسی نیز با افزایش نسبی جریان سیم‌پیچ کمکی بعد از راه‌اندازی موتور سبب قطع مدار می‌شود. با ساختمان داخلی این کلیدها در کتاب برق صنعتی آشنا می‌شوید.

در موتورهای القایی تک‌فاز، که سیم‌پیچ راه‌انداز آنها از مدار خارج می‌شود، معمولاً $\frac{۱}{۳}$ شیارهای استاتور به سیم‌پیچ راه‌انداز و $\frac{۲}{۳}$ دیگر به سیم‌پیچ اصلی تعلق دارند.

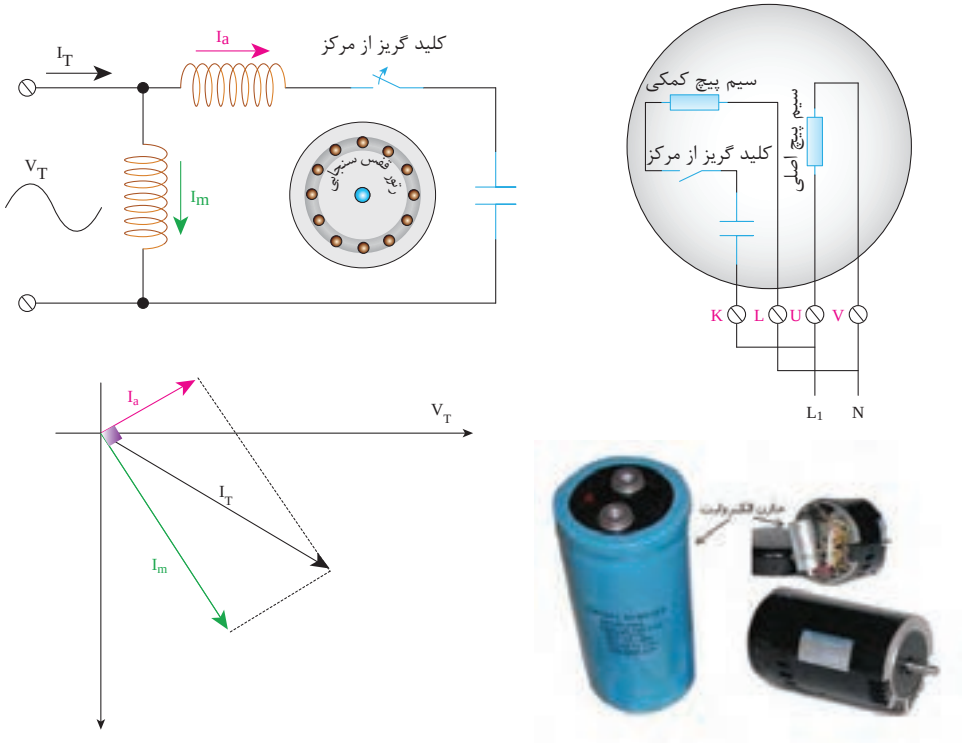
این موتورها در وسایلی همچون پمپ‌های کوچک خانگی، یخچال، فریزر و کولرها کاربرد دارند.

۳ــ۱ــ۵ــ موتورهای القایی با خازن راه‌انداز :

شکل(۸) ایجاد اختلاف فاز جریان سیم‌پیچ اصلی و راه‌انداز را به کمک یک خازن سری شده با سیم‌پیچ راه‌انداز نشان می‌دهد. با محاسبه مقدار مناسب ظرفیت خازن می‌توان اختلاف زاویه بین دو جریان را در زمان راه‌اندازی به ۹۰ درجه رساند. در نتیجه گشتاور راه‌اندازی چنین موتوری بسیار خوب می‌باشد. زیرا بیشترین مقدار گشتاور در موتور القایی تک‌فاز با ایجاد این زاویه به‌دست می‌آید.

بعد از راه‌اندازی موتور، عبورجریان زیاد از خازن باعث سوختن آن می‌شود به همین خاطر باید خازن را توسط کلید گریز از مرکز از مدار خارج کرد.

با توجه به اینکه از خازن راه‌انداز جریان زیادی عبور می‌کند، باید ظرفیت آن نیز زیاد باشد. از طرفی چون این خازن مدت کوتاهی در مدار است بنابراین می‌توان از خازن‌های الکترولیتی استفاده کرد، زیرا با در نظر گرفتن ظرفیت خازن‌های الکترولیتی، حجم آنها کوچک و قیمتشان ارزان است.



شکل ۸ ــ موتور القایی با خازن راه‌انداز

موتورهای القایی با خازن راه‌انداز مشخصه راه‌اندازی خوبی داشته و به‌طور کلی در وسایلی همچون کمپرسورها، دستگاه‌های چند کارهٔ نجاری و ... کاربرد دارند.

۴ــ۱ــ۵ــ موتور القایی با خازن دائم کار : اگر مطابق شکل(۹) خازن سری شده با سیم‌پیچ راه‌انداز طوری محاسبه گردد تا در موقع راه‌اندازی اختلاف فاز اندک ولی در زمان کار، اختلاف فاز تقریباً ۹۰ درجه شود، می‌توان خازن را در مدار نگه داشت. در این صورت مقدار ظرفیت خازن دائم کار نسبت به خازن راه‌انداز کمتر است و در زمان راه‌اندازی جریان کمتری از آن عبور می‌کند. از طرفی چون خازن دائم کار مدت زمان بیشتری باید در مدار بماند بنابراین خازن الکترولیت برای آن مناسب نیست. لذا خازن این موتورها از نوع روغنی انتخاب می‌شود که قیمت آنها گران‌تر از خازن‌های الکترولیت است.

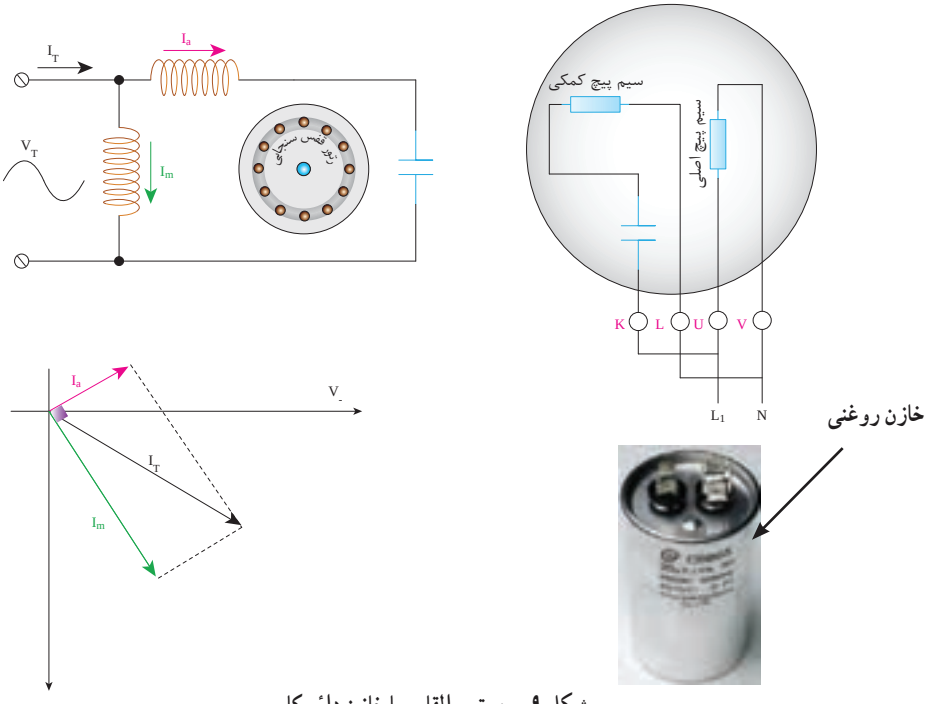
راندمان، ضریب قدرت و گشتاور کار این موتورها در حالت کار بسیار خوب است .

به دلیل اینکه سیم‌پیچ راه‌انداز از مدار خارج نمی‌شود در نتیجه سیم‌پیچ اصلی و راه‌انداز را در این موتورها مانند هم در نظر می‌گیرند و هر کدام نصف شیارهای استاتور را اشغال می‌کنند.

از خصوصیات خوب این موتورها سر و صدای کم در زمان کار می‌باشد ضمن آنکه با تغییر ولتاژ سرعتشان قابل کنترل است. به همین خاطر در وسایلی همچون پنکه، ماشین لباسشویی خانگی و هر جایی که تغییر بار در نقطه کار نداشته باشیم، مناسب است.

۵ــ۱ــ۵ــ موتورهای القایی دو خازنی (خازن راه‌انداز و دائم کار) : اگر در موتور القایی از هر دو خازن دائم کار و راه‌انداز مطابق شکل(۱۰) هم زمان استفاده شود، موتور را دو خازنی می‌گویند.

همان‌طور که در بخش‌های پیشین به آن اشاره شد خازن راه‌انداز از نوع الکترولیتی و با ظرفیت زیاد می‌باشد در حالی که خازن دائم کار از نوع روغنی و دارای ظرفیت کم است.



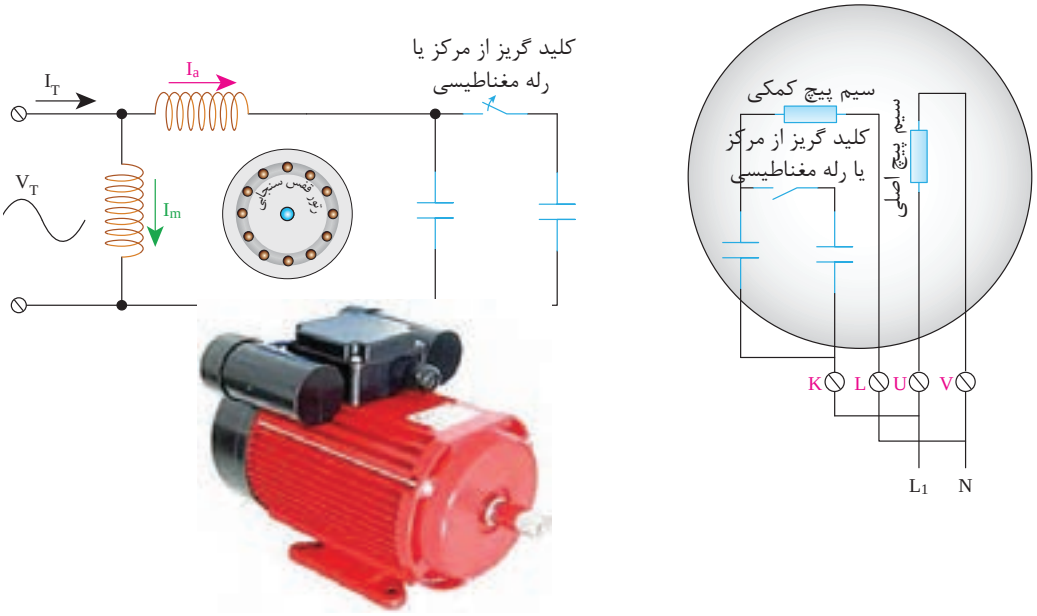
شکل ۹ ــ موتور القایی با خازن دائم کار

در ابتدای راه‌اندازی موتور، هر دو خازن با هم موازی بوده و با سیم‌پیچ راه‌انداز به‌طور سری در مدار قرار می‌گیرند ولی پس از رسیدن دور موتور به ۷۵ درصد دور نامی به‌وسیله کلید گریز از مرکز خازن راه‌انداز از مدار خارج می‌شود و تنها خازن روغنی در مدار باقی می‌ماند. به دلیل وجود این دو خازن، این نوع موتورها هم دارای مشخصه گشتاور راه‌اندازی خوب می‌باشند و هم در زمان کار آرام و بی صدا کار می‌کنند. در این موتورها سیم‌پیچ اصلی و راه‌انداز شبیه یکدیگر در نظر گرفته می‌شود.

این موتورها غالباً جزء موتورهای صنعتی محسوب می‌شوند و در وسایلی مانند ماشین لباسشویی صنعتی، یخچال‌های صنعتی، موتورهای بالابر و ... کاربرد دارند.

۶ــ۱ــ۵ــ موتور القایی قطب چاک‌دار : اگر برروی قطب های برجستهٔ موتور شکل (۳) شیارهایی تعبیه گردد و یک یا چند حلقه هادی اتصال کوتاه شده مطابق شکل (۱۱) در داخل آن قرار داده شود در این صورت به این نوع موتور القایی، موتور قطب چاک‌دار می‌گویند.

حلقه‌های هادی اتصال کوتاه شده در طرفین قطب‌ها نقش سیم‌پیچ راه‌انداز و ایجاد کننده اختلاف فاز بین میدان اصلی و میدان قطب چاک‌دار را ایفا می‌کنند. زیرا میدان القا شده در حلقه‌های اتصال کوتاه ۹۰ درجه نسبت به‌میدان قطب اصلی اختلاف فاز داشته و این اختلاف دو میدان در این نوع موتورها، برای ایجاد گشتاور راه‌اندازی کافی می‌باشد.



شکل ۱۰ــ موتور القایی دو خازنی (خازن راه‌انداز و دائم کار)

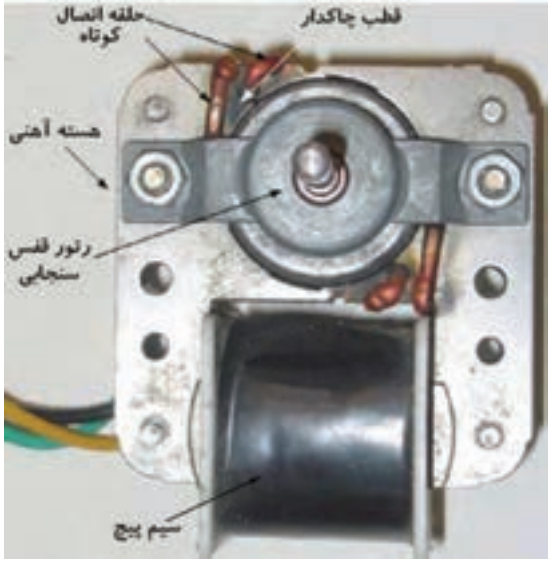
گشتاور راه‌اندازی و ضریب بهرهٔ این موتورها بسیار کم است و معمولاً در توان‌های کمتر از ۱۵۰ وات ساخته می‌شوند. مزیت اصلی این موتورها سادگی ساختمان آنها می‌باشد.

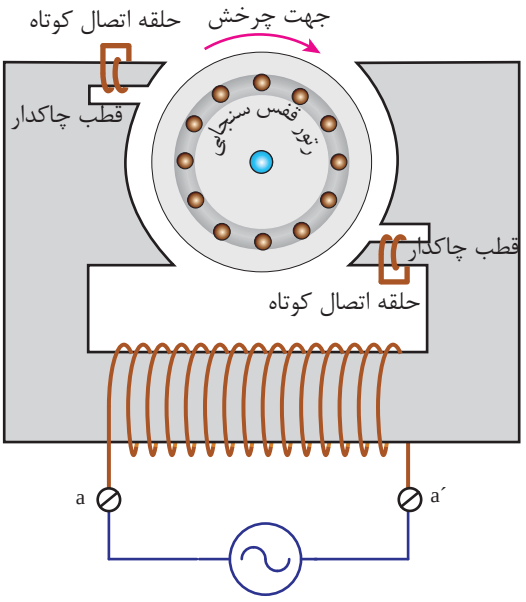
پمپ آب کولر، فن‌های کوچک آشپزخانه و ... وسایلی هستند که از این موتورها در ساخت آن استفاده می‌شود.

۷ــ۱ــ ۵ ــ تغییر جهت گردش در موتورهای القایی تک‌فاز

تغییر جهت گردش در موتورهای القایی تک‌فاز : به‌طور کلی برای تغییر جهت گردش موتورهای القایی تک‌فاز باید جهت جریان را در یکی از سیم‌پیچ‌های اصلی یا راه‌انداز عوض نمود.

در تغییر جهت گردش موتورهای القایی با خازن دائم کار غالباً از مدار شکل (۱۲) استفاده می‌شود. چون مشخصات سیم‌پیچ اصلی و راه‌انداز مانند هم می‌باشند بنابراین می‌توان خازن را طوری در مدار قرار داد که در یک جهت با سیم‌پیچ اصلی و در جهت دیگر با سیم‌پیچ راه‌انداز سری شود.



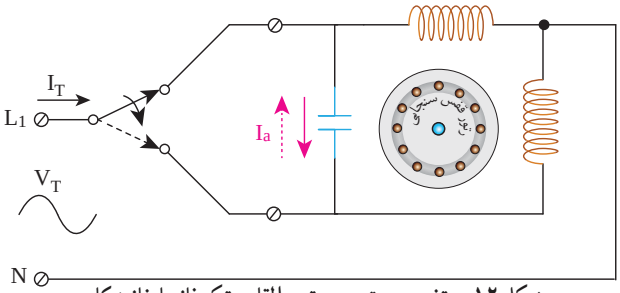


شکل ۱۱ــ موتور القایی قطب چاک‌دار (به جهت چرخش و قطب‌ها توجه شود)

باید توجه داشت که در این مدار با تغییر جهت جریان خازن، جهت چرخش رتور عوض می‌شود.

از آنجا که جریان راه‌اندازی موتورهای القایی تک‌فاز با خازن دائم کار کم است بنابراین برای قطع و وصل پی‌درپی در شبکه برق کمتر ایجاد اشکال می‌کند. همچنین از ویژگی‌های دیگر این موتورسادگی مدار تغییر جهت در آن می‌باشد.

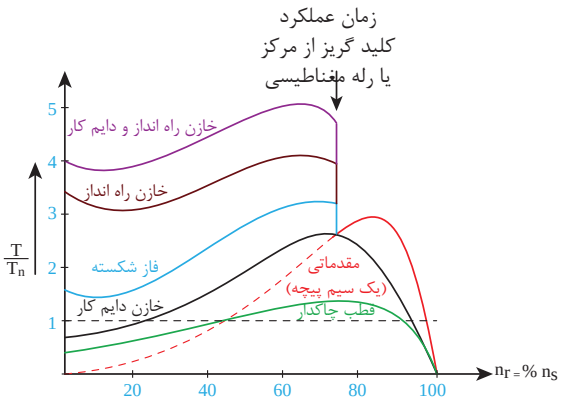
در موتورهای قطب چاک‌دار مطابق شکل (۱۱) جهت چرخش همواره ثابت و از سمت چاک‌دار یک قطب به سمت بدون چاک قطب دیگر می‌باشد.



شکل ۱۲ ــ تغییر جهت در موتور القایی تک‌فاز با خازن کار

۸ــ۱ــ۵ــ مقایسه موتورهای القایی تک‌فاز :

هریک از موتورهای القایی تک‌فاز در جای خاصی کاربرد دارند. در شکل (۱۳) مشخصه‌های گشتاور ــ دور کلیه موتورهای القایی تک‌فاز با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به شکل (۱۳) مشخص است که موتور القایی دو خازنی از بیشترین گشتاور راه‌اندازی برخوردار بوده و کمترین گشتاور مربوط به موتور قطب چاک‌دار است.



شکل۱۳ــ مقایسه مشخصهٔ گشتاور ــ دور موتورهای القایی تک‌فاز

۲ــ۵ــ موتور یونیورسال

در درس ماشین الکتریکی DC ساختمان موتور سری ارائه شده است و رابطهٔ گشتاور آن از رابطه (۱ــ۵) تبعیت می‌کند :

$$T = KI_a^2 \qquad (۱ــ۵)$$

در رابطه (۱ــ۵)

K ضریبی است که به ساختمان داخلی موتور سری بستگی دارد

I_a جریان عبوری از آرمیچر بر حسب آمپر

T گشتاور موتور بر حسب N ــ m

با توجه به رابطه (۱ــ۵)، گشتاور موتور سری رابطه مجذوری با جریان آرمیچر دارد. به‌طور مثال تغییرات گشتاور بر اساس جریان آرمیچر به‌ازای K=۱ به صورت منحنی شکل(۱۴) در خواهد آمد.

بیشتر بدانید

همچنین دیگر خصوصیات تقریبی هر یک از موتورهای القایی به‌طور خلاصه در جدول (۱) آورده شده است.

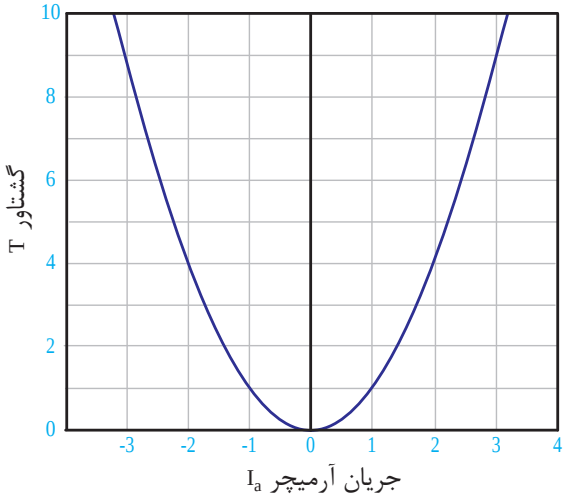
نوع موتور القایی تک‌فاز	گشتاور راه‌اندازی (درصد از گشتاور نامی)	ضریب توان در بار نامی	بازده در بار نامی (به درصد)	محدودهٔ توان (اسب بخار)	مقایسه تقریبی قیمت(به درصد)
فاز شکسته	۲۰۰~۱۵۰	۰/۵ ~ ۰/۶۵	۵۵ ~ ۶۵	۰/۰۵ ~۱	۱۰۰
خازن دایم کار	۱۵۰~۳۰	۰/۷ ~ ۰/۹	۶۰ ~ ۷۰	۰/۱۲۵ ~۶	۱۴۰
خازن راه‌انداز	۲۵۰~۴۰۰	۰/۵ ~۰/۶۵	۵۵ ~ ۶۵	۰/۱۲۵ ~۱۰	۱۲۰
دوخازنی	۲۵۰~۴۵۰	۰/۷ ~ ۰/۹	۶۰ ~ ۷۰	۰/۱۲۵ ~۱۰	۱۸۰
قطب چاک‌دار	۲۰~ ۶۰	۰/۲۵ ~ ۰/۴	۱۵ ~ ۴۰	۰/۰۱ ~۰/۱۶	۵۰

جدول ۱ــ مقایسه ویژگی انواع موتورهای القایی تک‌فاز

با توجه به شکل (۱۴)، با تغییر جهت جریان آرمیچر، مقدار گشتاور یا نیروی وارد شده به محور منفی نمی‌شود بنابراین جهت گشتاور همواره مثبت بوده و عوض نمی‌گردد.

از آنجایی که تغییر جهت جریان تنها بر اساس تغییر پلاریته ولتاژ اعمالی بر موتور امکان پذیر است بنابراین با اتصال منبع تغذیه جریان متناوب به موتور سری، این موتور با رفتار مشابهی که در جریان مستقیم دارد می‌تواند استفاده شود.

البته بدیهی است برای عملکرد بدون آسیب موتور، باید اندازهٔ ولتاژ مؤثر منبع تغذیه متناوب، معادل مقدار ولتاژ منبع تغذیه جریان مستقیم باشد. از آنجا که این موتورها می‌توانند با هر دو نوع جریان متناوب و یا مستقیم کار کنند، موتورهای یونیورسال[۱] نامیده می‌شوند.



شکل۱۴ــ مشخصه الکترومغناطیسی موتور DC

باید توجه داشت با اتصال موتور سری به جریان متناوب، علاوه بر مقاومت اهمی سیم‌پیچ های موتور به دلیل وجود اندوکتانس آن، مقاومت القایی نیز به مدار اضافه می‌شود در نتیجه امپدانس آن افزایش می‌یابد، بنابراین به نسبت اتصال موتور به جریان مستقیم، جریان کمتری از سیم‌پیچ های موتور عبور می‌کند.

با مفهوم عکس العمل آرمیچر در درس ماشین الکتریکی DC آشنا شده‌اید. پدیدهٔ عکس العمل آرمیچر با عبور جریان متناوب از موتور سری هم ایجاد می‌شود که باعث تضعیف میدان اصلی موتور و تغییر مکان صفحهٔ خنثی می‌گردد.

بر خلاف جریان مستقیم، با اتصال موتور یونیورسال به جریان متناوب، در هستهٔ سیم‌پیچ تحریک نیز، تلفات فوکو و هیسترزیس ایجاد خواهد شد و در نتیجه برای مقابله با آن باید جنس هسته از فولاد مغناطیسی مرغوب و به‌صورت ورقه ورقه ساخته شود.

به‌طور کلی برای بهبود عملکرد موتور یونیورسال در جریان متناوب باید ملاحظات ویژه ای در طراحی، ساختمان و سیم‌پیچی آن رعایت شود.

یکی از خصوصیات موتور یونیورسال افزایش سرعت آن در بی باری و کاهش سرعت آن در زیر بار می‌باشد. این همان خاصیت موتور سری است. زیرا بر اثر کاهش جریان آرمیچر I_a، فوران (شار مغناطیسی قطب‌ها) نیز کاهش می‌یابد و در نتیجه برای جبران ولتاژ آرمیچر طبق رابطه (۲ــ۵)، رتور باید با سرعت بیشتری بچرخد.[۲]

$$Ea=K\varphi\omega \qquad (۵ــ۲)$$

در رابطه (۲ ــ ۵) :

Ea ولتاژ آرمیچر بر حسب ولت

K ضریب ثابتی است که به ساختمان موتور بستگی دارد

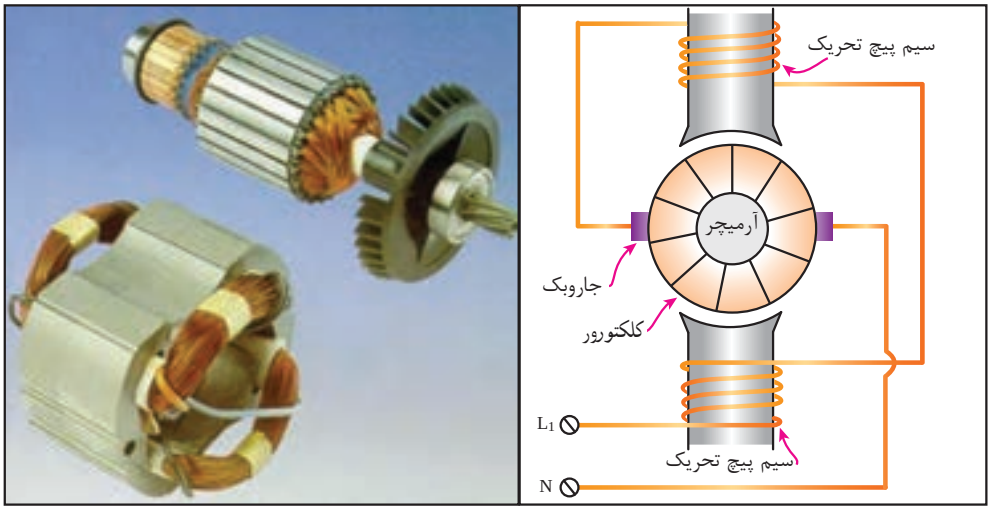
φ شار مغناطیسی زیر هر قطب بر حسب وبر

ω سرعت زاویه رتور بر حسب رادیان بر ثانیه

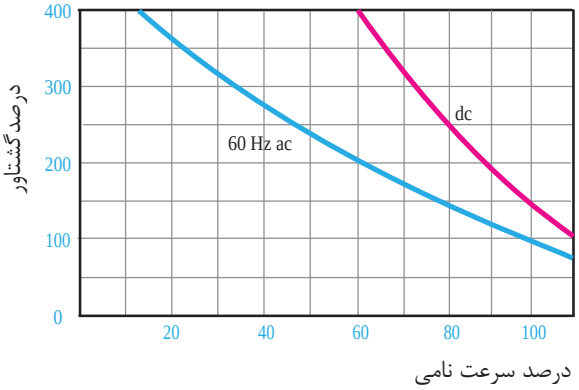
۱ــ همه منظوره ــ فراگیر

۲ــ برای توضیح بیشتر این رابطه به کتاب ماشین DC رجوع کنید.

البته گشتاور موتور یونیورسال به دلیل وجود راکتانس سیم‌پیچ های آرمیچر و قطب‌ها و همچنین عکس العمل آرمیچر از موتور سری کمتر است. این تفاوت در مشخصه گشتاور آنها در شکل(۱۶) نشان داده شده است.



شکل ۱۵ ــ شکل ظاهری موتور یونیورسال



شکل۱۶ ــ مشخصه گشتاور ــ دور موتور یونیورسال

از محاسن این نوع موتور حجم کم و سبکی وزن آن به نسبت قدرت تولیدی آن می‌باشد.

همچنین گشتاور فوق العاده این موتور در زیر بار، سهولت در کنترل سرعت و استفاده از آن در سرعت‌های بالا (حتی تا ۲۰۰۰۰ RPM) از دیگر مزایای این موتور به شمار می‌آید.

این نوع موتور حداکثر تا توان $\frac{۳}{۴}$ اسب بخار ساخته می‌شود و در وسایل و ابزارهای کارگاهی مانند مته، سنگ فرز و برخی لوازم خانگی مانند جارو برقی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳ــ۵ــ استفاده از موتورهای سه فاز در شبکه برق تک‌فاز

در بعضی مواقع[۱] ضرورت دارد که از موتور سه فاز القایی در شبکه برق تک‌فاز استفاده شود. با کمک خازن روغنی و با انتخاب ظرفیت مناسب می‌توان این نوع موتور را در شبکه برق تک‌فاز راه‌اندازی نمود.

این طرح برای اولین بار توسط مهندس چارلز اشتاین متز[۲] ارائه گردید و مدارات شکل(۱۷) به نام ایشان معروف است.

بوبین هر فاز موتور سه فاز القایی۳۸۰V، تحمل ولتاژ ۲۲۰ V را دارد، پس اگر چنین موتوری بخواهد با برق تک‌فاز راه‌اندازی گردد باید به‌طور مثلث به مدار اتصال داده شود تا ولتاژ اعمال شده به هر بوبین آن ۲۲۰ V باشد. همچنین برای اتصال

۱ــ در دسترس نبودن شبکه برق سه فاز

۲ــ مهندس آلمانی تباری که کشف پدیدهٔ هیسترزیس و روش‌های مقابل با آن نیز از جمله فعالیت‌های ایشان می‌باشد.

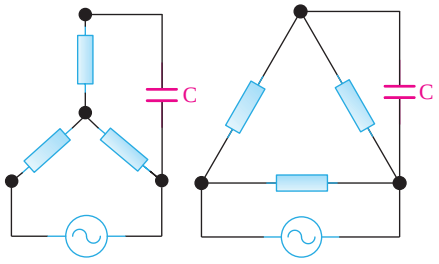
Charls Steinmetz (۱۹۲۳ ــ ۱۸۶۵)

۵

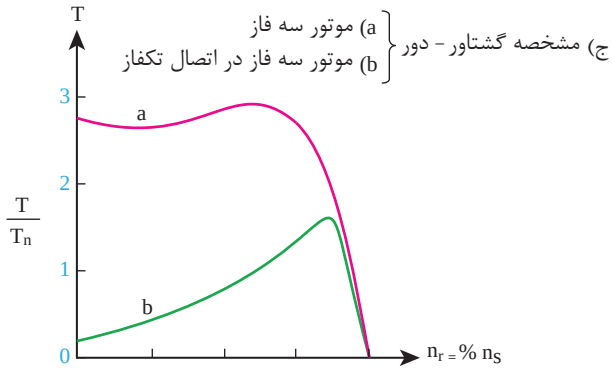
موتور سه فازی با ولتاژ ۲۲۰/۱۲۵ V به برق تک‌فاز باید آن را به‌صورت ستاره به شبکه متصل نمود.

تحقیق کنید

دلیل اتصال ستاره در موتور سه فاز با ولتاژ ۲۲۰/۱۲۵V هنگام استفاده در شبکه برق تک‌فاز چیست؟



الف) اتصال ستاره ب) اتصال مثلث



ج) مشخصه گشتاور - دور
a) موتور سه فاز
b) موتور سه فاز در اتصال تکفاز

شکل۱۷ــ انواع مدار راه‌اندازی موتور سه فاز به‌صورت تک‌فاز با کمک خازن

با توجه به قرارگیری خازن به صورت دائم در این مدار، از خازن روغنی باید استفاده شود. تجربه نشان داده است که درحالت راه‌اندازی تک‌فاز موتور سه فاز، برای ایجاد گشتاور راه‌اندازی تا حدود ۳۰ درصد گشتاور نامی‌موتور و گشتاور کاری تا حدود ۷۵ درصد آن، به‌ازای هر کیلو وات توان مؤثر موتور، باید خازنی با ظرفیت ۶۰ تا ۷۰ میکرو فاراد، به کار برد و البته در صورت تمایل به افزایش گشتاور راه‌اندازی از مقدار ۳۰ درصد، باید مقدار ظرفیت خازن را بیشتر نمود. این کار با اضافه شدن یک خازن الکترولیت به طور موازی با خازن قبلی صورت می‌گیرد که پس از راه‌اندازی موتور توسط کلید گریز از مرکز از مدار خارج می‌شود.

به دلیل وابستگی گشتاور بار به مقدار ظرفیت خازن انتخاب شده و ثابت بودن آن لازم است که گشتاور بار تغییر نداشته باشد لذا توصیه می‌گردد از این روش فقط در بارهای با **گشتاور ثابت** استفاده شود.

مثال برای راه‌اندازی تک‌فاز موتور سه فاز القایی با توان ۳ کیلو وات تقریباً به چه مقدار ظرفیت خازن نیاز می‌باشد؟

$$C(\mu F) = ۷۰(\frac{\mu F}{Kw}) \times P(Kw)$$

$$C = ۷۰(\frac{\mu F}{Kw}) \times ۳(Kw) = ۲۱۰(\mu F)$$

بنابراین موتور فوق برای داشتن گشتاور راه‌اندازی تا حدود ۳۰ درصد گشتاور نامی و گشتاور کاری تا حدود ۷۵ درصد آن به خازنی با ظرفیت (μF) ۲۱۰ نیاز دارد.

پرسش‌های پایان فصل(۵)

۱ــ چرا به موتورهای تک‌فاز AC نیاز داریم؟

۲ــ موتور تک‌فاز مقدماتی (یک سیم‌پیچه) در صورت راه‌اندازی می‌تواند راست‌گرد یا چپگرد بچرخد. (درست/غلط)

۳ــ موتور تک‌فاز یک سیم‌پیچه دارای گشتاور راه‌اندازی..... (صفر/کم/زیاد) است.

۴ــ انواع موتورهای تک‌فاز القایی را نام برده و نحوهٔ عملکرد آن را شرح دهید.

۵ــ چرا ضریب قدرت موتورهای القایی تک‌فاز با فاز شکسته در حالت کار کم است؟

۶ــ تغییر جهت چرخش در موتور های القایی تک‌فاز چگونه است؟ با مدار نشان دهید.

۷ــ در مقایسه موتورهای دو خازنی با موتورهای القایی با خازن راه‌انداز کدام پاسخ درست است؟

الف) تقریباً همان گشتاور راه‌اندازی است ولی ضریب قدرت بهتری دارد.

ب) ضریب قدرت راه‌اندازی و کار بالاتری دارد.

ج) گشتاور راه‌اندازی بالاتر اما ضریب قدرت کمتری دارد.

د) گشتاور راه‌اندازی کمتر اما ضریب قدرت بزرگتری دارد.

۸ــ جهت چرخش موتور قطب چاک‌دار چگونه تعیین می‌شود؟ با ترسیم شکل نشان دهید.

۹ــ در ابزارهای دستی از چه نوع موتور تک‌فازی استفاده می‌شود و چرا؟

۱۰ــ تفاوت‌های عملکردی موتور یونیورسال را در جریان DC و AC توضیح دهید.

۱۱ــ مقدار خازن مورد نیاز جهت راه‌اندازی یک موتور سه فاز ۱/۵ Kw به‌صورت تک‌فاز چقدر باید باشد؟

پیوست I ــ الفبای یونانی

حروف بزرگ یونانی	حروف کوچک یونانی	فارسی	انگلیسی	حروف بزرگ یونانی	حروف کوچک یونانی	فارسی	انگلیسی
A	α	آلفا	alpha	N	^{n}	نو	nu
B	β	بتا	beta	Ξ	Ξ	زی	xi
Γ	Γ	گاما	gamma	O	^{o}	اُمیکرون	omicron
Δ	δ	دلتا	delta	Π	π	پی	pi
E	ε	اپسیلون	epsilon	P	ρ	رو	rho
Z	ζ	زتا	zeta	Σ	σ	سیگما	sigma
H	η	اتا	eta	T	^{t}	تاو	tau
Θ	θ	تتا	theta	Y	υ	آپسیلون	upsilon
I	ι	یوتا	iota	Φ	ϕ	فی	phi
K	κ	کاپا	kappa	X	^{x}	خی	chi
Λ	λ	لامبدا	lambda	Ψ	ψ	سای	psi
M	μ	مو	mu	Ω	ω	امگا	omega

پیوستII ــ واژه نامه

A	
Active power	توان حقیقی
Air gap	فاصله هوایی
Alternating current	جریان متناوب
Angle	زاویه
Apparent power	توان ظاهری
Armature	آرمیچر
Armature current	جریان آرمیچر
Armature voltage	ولتاژ آرمیچر
Armature winding	سیم پیچ آرمیچر
Asynchronous	غیر همزمان
Asynchronous generator	مولد آسنکرون
Asynchronous motor	موتور آسنکرون
Auto transformer	اتوترانسفورمر
B	
Bearing	یاتاقان
Brake	ترمز
Brush	جاروبک
C	
capacitor	خازن
Cast iron	چدن ریخته‌گری
Cast steel	فولاد ریخته‌گری
Circuit	مدار
Clock wise	ساعت گرد
Coil	بوبین
Conductor	هادی
Connection	اتصال
Copper	مس
Copper losses	تلفات مسی
Copper wire	سیم مسی

Core	هسته
Core losses	تلفات هسته
Core type transformer	ترانسفورماتور نوع هسته‌ای (ستونی)
Counter clock wise	پاد ساعتگرد
Current	جریان
Cylinder	استوانه
Cylindrical rotor	رتور قطب صاف (استوانه‌ای)
D	
Delay	تأخیر
Delta connection	اتصال مثلث
Direct current	جریان مستقیم
Direction	مستقیم
Drop	افت
Dynamic braking	ترمز دینامیکی
E	
Eddy current	جریان گردابی
Eddy current losses	تلفات فوکو
Efficiency	راندمان
Electromotive force	نیروی محرکه الکتریکی
Equivalent circuit	مدار معادل
H_ G_ F	
Fan	فن
Field	میدان
Field current	جریان تحریک
Field winding	سیم پیچ تحریک
Flux	شار
Flux density	چگالی شار
Force	نیرو
Frame	قاب ـ بدنه
Frequency	فرکانس
Frequency converter	مبدل فرکانس
friction	اصطکاک
Full load	بار کامل

Generator	مولد
High voltage	ولتاژ فشار قوی
Hydro generator	مولد برق آبی
Hysteresis	هیسترزیس ــ پسماند
Hysteresis loop	حلقه هیسترزیس ــ حلقه پسماند
Hysteresis losses	تلفات هیسترزیس ــ تلفات پسماند
K_ J_ I	
Ideal transformer	ترانسفورماتور ایده آل
Impedance	امپدانس ــ مقاومت ظاهری
Induce voltage	ولتاژ القایی
Inductance	اندوکتانس
Induction generator	مولد القایی
Induction motor	موتور القایی
Industrial load	بار صنعتی
Industry	صنعت
Input	ورودی
Inrush current	جریان هجومی
N_ M_ L	
Lagging	پس فاز
Lagging power factor	ضریب قدرت پس فاز
Laminated core	هسته مورق شده
Leading	پیش فاز
Leading power factor	ضریب قدرت پیش فاز
Leakage	نشتی
Leakage flux	شار پراکندگی
Line current	جریان خط
Line voltage	ولتاژ خط
Load	بار ــ مصرف کننده
Load current	جریان بار
Load torque	گشتاور بار
Locked	قفل شده
Locked rotor	رتور قفل شده
Losses	تلفات

Low voltage	ولتاژ فشار ضعیف
Magnetic circuit	مدار مغناطیسی
Motive Force_ MAGNO	نیروی محرکه مغناطیسی
Maintenance	نگهداری
Maximum torque	گشتاور ماکزیمم
Mechanical losses	تلفات مکانیکی
Moment of inertia	ممان اینرسی
Motor	موتور
Nameplate	پلاک
No load	بی‌باری
No load current	جرین بی‌باری
No load test	آزمایش بی‌باری
No load voltage	ولتاژ بی‌باری
Q_ P _ O	
Open circuit	مدار باز
Open circuit test	آزمایش مدار باز
Open delta	مثلث باز
Operator	بهره بردار
Output	خروجی
Over voltage	اضافه ولتاژ
Phase angle	زاویهٔ فاز
Phase current	جریان فازی
Phase voltage	ولتاژ فازی
Pole	قطب
Power	توان
Power factor	ضریب قدرت
Power factor correction	اصلاح ضریب قدرت
Power losses	تلفات توان
Power plant	نیروگاه
Power triangle	مثلث توان
Primary winding	سیم پیچ اولیه
R	
Rated current	جریان نامی

Rated power	توان نامی
Rated speed	سرعت نامی
Rated voltage	ولتاژ نامی
Rating	نامی
Reactance	راکتانس
Reactive power	توان غیر حقیقی
Regulation	تنظیم
Resistance	مقاومت
Rotating field	میدان دوار
Rotating flux	شار دوار
Rotor	رتور
S	
Salient pole	قطب برجسته (آشکار)
Saturation curve	منحنی اشباع
Secondary winding	سیم پیچ ثانویه
Short circuit	اتصال کوتاه
Short circuit test	آزمایش اتصال کوتاه
Single phase	تک فاز
Single phase induction motor	موتور القایی تک فاز
Single phase motor	موتور تک فاز
Single phase transformer	ترانسفورماتور تک فاز
Slip	لغزش
Slip ring rotor	روتور دارای حلقه لغزان
Speed regulation	تنظیم سرعت
Squirrel cage rotor	رتور قفس سنجابی
Stall	سکون
Star connection	اتصال ستاره
Starter	راه انداز
Starting current	جریان راه انداز
Starting current	جریان راه اندازی
Starting torque	گشتاور راه اندازی
Stator	استاتور
Synchronous	همزمانی

Synchronous generator	مولد سنکرون
Synchronous motor	موتور سنکرون
Synchronous speed	سرعت سنکرون
T	
Tap changer	تغییر دهنده انشعاب
Three phase	سه فاز
Three phase induction motor	موتور القایی سه فاز
Three phase synchronous generator	مولد سنکرون سه فاز
Three phase synchronous motor	موتور سنکرون سه فاز
Three phase transformer	ترانسفورماتور سه فاز
Torque	گشتاور
Transformer	ترانسفورماتور
Turbo generator	مولد توربینی
Z_ Y_ X_ W_ V_ U	
Universal motor	موتور یونیورسال
curves_ v	منحنی‌های v
Voltage drop	افت ولتاژ
Voltage regulation	تنظیم ولتاژ
Wave	موج
Winding	سیم پیچ
Wounded rotor	رتور سیم پیچی شده
ZAG connection _ ZIG	اتصال زیگزاگ

فهرست مراجع کتاب

۱) Electrical machinery theory, performance and application
Author: Prof. P.S. BIMBHRA – edition 2003
۲) Electric machinery – Author A.E. Fitzgerald
Charles Kingsley, JR.
Stephen D. UMANS – edition 2003
۳) Electric machinery fundamentals
Author: Stephan J. Chapman – edition 2007
۴) Power transformers principles and applications
Author: John J. Winders, Jr. – edition 2002
۵) The J & p transformer book
Author: Martine J. HEATHCATE, CENG, FIEE – edition 2005
۶) Electric power transformer engineering
Author: James H. Harlow – edition 2004
۷) Induction machine handbook
Author: Lon BOLDEA and SYED NASAR edition 2004
۸) Electric motors and drives
Author: AUSTINE HUGHES – edition 2006
9) Electrical engineer's handbook
Author: D.F. WARNE – edition 2000
۱۰) AC power generation and storage using high voltage
approach
Author: BJORN BOLUND – edition 2002
۱۱) AC power system handbook
JERRY C. WHITAKER – edition 2007
۱۲) ABB,SIEMENS and SCHNEIDER latest handbooks
۱۳) Naval education and training document for US army corps
and engineer
۱۴) کتاب ماشین الکتریکی جریان متناوب ـ کد ۲۱۳۵