

پودمان ۳

سیم پیچی ترانسفورماتور



واحد یادگیری ۳

سیم‌پیچی ترانسفورماتور

آیامی دانید:

- اساس کار ترانسفورماتور چیست؟
- اجزای تشکیل دهنده ترانسفورماتور کدام است؟
- تفاوت ترانسفورماتور ایده‌آل و واقعی چیست؟
- آزمایش بی‌باری و اتصال کوتاه چه خصوصیتی از ترانسفورماتور را بیان می‌کند؟
- محاسبات و سیم‌پیچی ترانسفورماتور چگونه است؟
- اتوترانسفورماتور با ترانسفورماتور معمولی چه تفاوت‌هایی دارد؟

استاندارد عملکرد

پس از اتمام این واحد یادگیری هنرجویان قادر خواهند بود محاسبه و سیم‌پیچی انواع ترانسفورماتورهای کوچک و آزمایش‌های بی‌باری و اتصال کوتاه ترانسفورماتور را انجام دهند. همچنین آنها قادر به محاسبه و سیم‌پیچی اتوترانسفورماتور خواهند بود.

*مقدمه

ترانسفورماتورها مبدل‌هایی هستند، که انرژی الکتریکی را بدون تغییر نوع انرژی، با مقادیر مختلف در اختیار مصرف‌کننده قرار می‌دهند. این خصوصیت به مهندسين برق این امکان را می‌دهد تا وسایل الکتریکی را در انواع مختلف با جریان‌ها و ولتاژهای گوناگون طراحی کنند. بدین طریق در مواقعی که احتمال خطر برق‌گرفتگی وجود داشته باشد وسایلی را با ولتاژ کم طراحی کنند که خطر برق‌گرفتگی نداشته باشد. در مواقعی مانند «جوشکاری» که نیاز به جریان زیاد است، با تغییر در مقدار ولتاژ، می‌توان جریان زیادی برای جوشکاری فراهم کرد.

ترانسفورماتورها در انتقال توزیع انرژی الکتریکی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار هستند. معمولاً در ابتدای خطوط ولتاژ افزایش داده می‌شود که به‌واسطه آن اولاً: امکان انتقال را با ولتاژ بالا ممکن می‌سازند. ثانیاً: به دلیل افزایش ولتاژ جریان عبوری از خطوط انتقال کاهش یافته و در نتیجه تلفات خطوط انتقال بسیار کاهش می‌یابد. در انتهای خطوط که محل توزیع برق است با کاهش ولتاژ به اندازه‌ای که برای مصرف مناسب باشد، در نتیجه میزان جریان افزایش یافته و این امکان را فراهم می‌آورد تا جریان دهی به تعداد زیادی مصرف‌کننده افزایش یابد. ضمناً ترانسفورماتورها در موارد دیگری همچون صنعت خودروسازی، کوره‌های القایی، وسایل روشنایی و روشنایی‌های تزئینی، اندازه‌گیری‌ها و حفاظت‌های الکتریکی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند.

سؤال

حداقل ولتاژ برای ترانسفورماتور جوشکاری چند ولت است؟
در شکل ۱ تصویر یک نمونه ترانسفورماتور سه فاز و تک فاز را مشاهده می‌کنید.



شکل ۱- ترانسفورماتورهای سه فاز و تک فاز

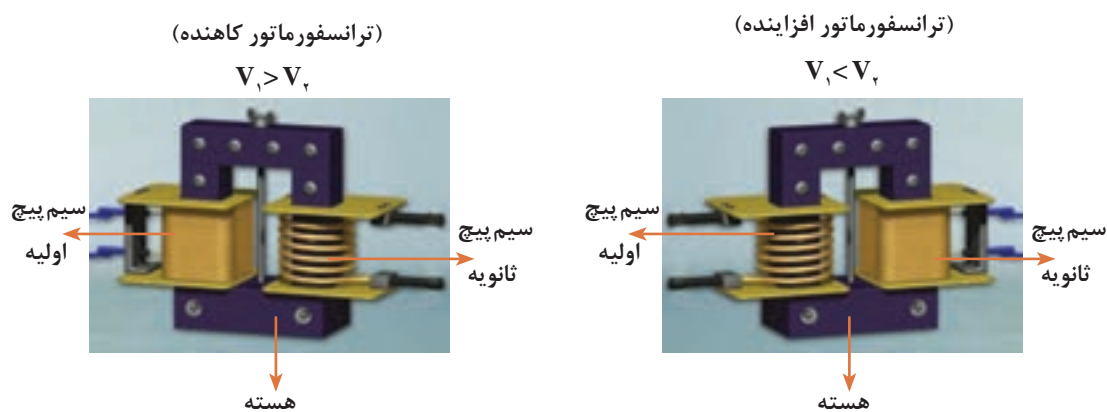
تعریف ترانسفورماتور (دو دقیقه اول فیلم)

فیلم



ساختمان ترانسفورماتورها

ترانسفورماتور از دو قسمت تشکیل شده است. ۱- هسته آهنی ۲- سیم پیچی
سیم پیچی ترانسفورماتورها در ساده ترین حالت به دو دسته تقسیم می شوند. به سیم پیچی که به ولتاژ ورودی متصل می شود اصطلاحاً «سیم پیچی اولیه» و به سیم پیچی که از آن ولتاژ مورد نظر (پس از عمل تبدیل ترانسفورماتور) به دست می آید «سیم پیچی ثانویه» گفته می شود. تمامی کمیت های الکتریکی و فیزیکی اولیه با اندیس (۱ یا P) و کمیت های ثانویه با اندیس (۲ یا S) نشان داده می شود.
با توجه به توضیحات داده شده پس می توان نتیجه گرفت که ترانسفورماتورها به دو صورت تقسیم بندی می شوند. در شکل ۲ تصویر ترانسفورماتورهای تک فاز در دو حالت کاهنده و افزایشنده نشان داده شده است.



شکل ۲- ساختمان یک ترانسفورماتور

در مباحث الکتریکی از تصاویر شکل ۳ برای نشان دادن ترانسفورماتورها استفاده می شود.



شکل ۳- علائم اختصاری ترانسفورماتور با هسته های مختلف

چند نمونه کاربرد ترانسفورماتور افزایشنده و کاهنده در صنعت و برق و لوازم برقی اشاره کنید.

فعالیت



فعالیت



یک ترانسفورماتور کاهنده مثلاً $\frac{220}{12}V$ تهیه کنید. با استفاده از اهم متر مقاومت اهمی سیم پیچ اولیه و ثانویه آن را اندازه گیری کنید. چه تفاوتی می بینید؟ چرا؟

برای آشنایی با طرز کار و چگونگی عملکرد ترانسفورماتورها لازم است تا ابتدا مباحث القای مغناطیسی ارائه شود.

القای مغناطیسی دو سیم‌پیچ

اگر دو سیم‌پیچ در مجاورت هم قرار بگیرد، چنانچه به یکی از آنها (اولیه) ولتاژ متناوب وصل شود، جریان متناوب متغیر در داخل سیم‌پیچ اولیه جاری می‌شود. این جریان، بر اساس قانون اورستد شار مغناطیسی متغیر تولید می‌کند و شار مغناطیسی متغیر، مدار خود را از درون و اطراف سیم‌پیچ اولیه می‌بندد. اگر همه یا قسمتی از این شار از سیم‌پیچ دومی (ثانویه) عبور کند، به علت متغیر بودن شار، بر اساس قانون فاراده، در این سیم‌پیچ نیروی محرکه الکتریکی القا خواهد شد، که با آهنگ تغییر شار و تعداد دور سیم‌پیچ ثانویه متناسب خواهد بود. شار متغیر در سیم‌پیچ اولیه نیز، نیروی محرکه القا می‌کند. این نیروی محرکه بر اساس قانون لنز با عامل به وجود آورنده آن، یعنی تغییرات شار مخالفت می‌کند. علامت منفی در روابط ۳-۱ و ۳-۲ به خاطر قانون لنز است.

$$E_2 = -N_2 \frac{\Delta\phi_2}{\Delta t} \quad (3-1)$$

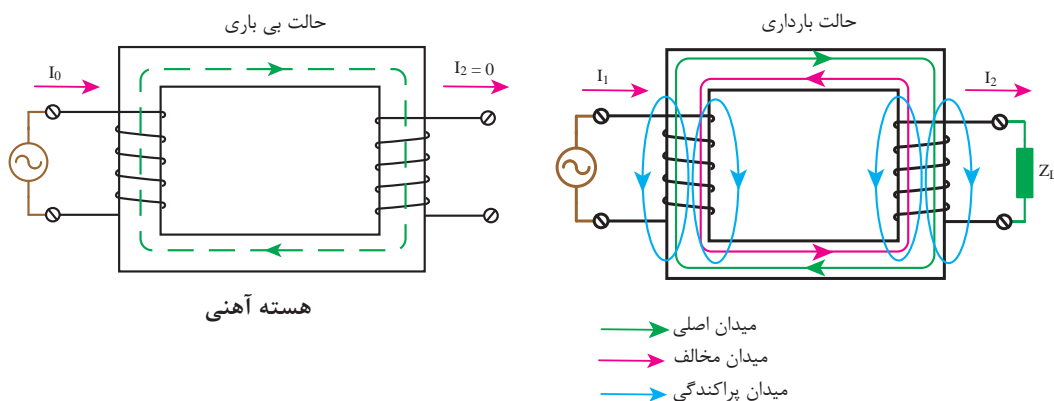
$$E_1 = -N_1 \frac{\Delta\phi_1}{\Delta t} \quad (3-2)$$

E_1 نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچ اولیه، E_2 نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچ ثانویه، N_1 تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ اولیه و N_2 تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ ثانویه است. آهنگ تغییر شار در سیم‌پیچ اولیه و $\frac{\Delta\phi_2}{\Delta t}$ آهنگ تغییر شار در سیم‌پیچ ثانویه می‌باشد.

قسمتی از شار مغناطیسی تولیدشده فقط از سیم‌پیچ اولیه عبور می‌کند و از سیم ثانویه عبور نمی‌کند و در تولید نیروی محرکه E_1 مؤثر است ولی در تولید E_2 بی‌تأثیر است. به این مقدار شار، «شار پراکندگی» می‌گویند.

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (3-3)$$

ϕ_1 مقدار شار تولید در سیم‌پیچ اولیه و ϕ_2 مقدار شار سیم‌پیچ ثانویه است.



شکل ۴- القای مغناطیسی در دو سیم‌پیچ

سؤال

تصور کنید یک وسیله برقی دارید که با ولتاژ ۱۱۰ ولت کار می‌کند با توجه به ولتاژ شبکه برق ۲۲۰ ولت چگونه می‌توان از آن استفاده کرد.

ضریب کوپلینگ

در شکل ۳ از مقدار شار تولیدشده Φ_1 ، در سیم‌پیچ اولیه به اندازه Φ_2 ، از سیم‌پیچ ثانویه عبور می‌کند، طبق تعریف :

نسبت $K = \frac{\Phi_2}{\Phi_1}$ را ضریب کوپلینگ می‌گویند و چون همواره $\Phi_2 \leq \Phi_1$ می‌باشد لذا ضریب کوپلینگ $K \leq 1$ می‌باشد. اگر همه شار تولیدشده در سیم‌پیچ اولیه از سیم‌پیچ ثانویه عبور کند ($\Phi_2 = \Phi_1$ و $K=1$) در این صورت کوپلینگ کامل است. با روی هم قرار گرفتن دو سیم‌پیچ روی یک بازوی هسته تا حدودی کوپلینگ کامل اتفاق می‌افتد.

عملکرد ترانسفورماتور (بخش اول)

فیلم



اساس کار ترانسفورماتورها

اگر سیم‌پیچ اولیه یک ترانسفورماتور، با جریان متناوب سینوسی تغذیه کند، جریان متناوب سینوسی در سیم‌پیچ اولیه برقرار می‌شود. این جریان بر اساس قانون اورستد شار مغناطیسی متغیری در سیم‌پیچ اولیه ایجاد می‌کند. به علت مقاومت مغناطیسی کم هسته، شار مغناطیسی، مدار خود را از طریق هسته می‌بندد. در شکل ۵ این شار با Φ نشان داده شده است. دو سیم‌پیچ اولیه و ثانویه ترانسفورماتور با شار متغیر Φ مواجه می‌شوند. در سیم‌پیچ اولیه نیروی محرکه E_1 و در سیم‌پیچ ثانویه نیروی محرکه E_2 ، بر اساس قانون فارادی القا می‌شود.

$$E_1 = 4/44 \times f \times \Phi \times N_1 = 4/44 \times f \times B \times A \times N_1 \quad (3-4)$$

$$E_2 = 4/44 \times f \times \Phi \times N_2 = 4/44 \times f \times B \times A \times N_2 \quad (3-5)$$

E_1 - نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچ اولیه بر حسب ولت

E_2 - نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچ ثانویه بر حسب ولت

N_1 - تعداد دور سیم‌پیچ اولیه

N_2 - تعداد دور سیم‌پیچ ثانویه

Φ - برآیند شارهای مغناطیسی متغیر هسته بر حسب وبر

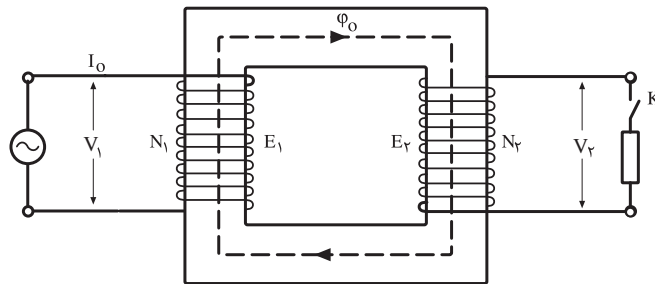
B - چگالی میدان در هسته بر حسب تسلا

f - فرکانس ولتاژ تغذیه بر حسب هرتز



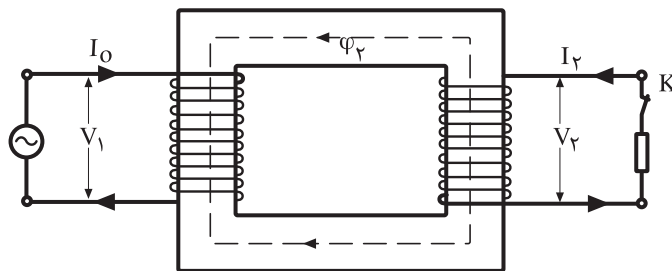
ترانسفورماتوری که تعداد دور اولیه و ثانویه آن برابر باشد ($N_1 = N_2$) چه کاربردی دارد؟

در این حالت با توجه به آنکه هنوز بار ثانویه وارد مدار نشده است، در سیم‌پیچ اولیه جریان الکتریکی جاری می‌شود که به آن جریان بی‌باری گفته می‌شود و با I_0 نشان داده می‌شود. در رابطه اخیر V_1 ولتاژ تغذیه سیم‌پیچ اولیه و E_1 نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچ اولیه و Z_1 امپدانس سیم‌پیچ اولیه می‌باشند.



شکل ۵- جریان بی‌باری ϕ_0 را تولید می‌کند.

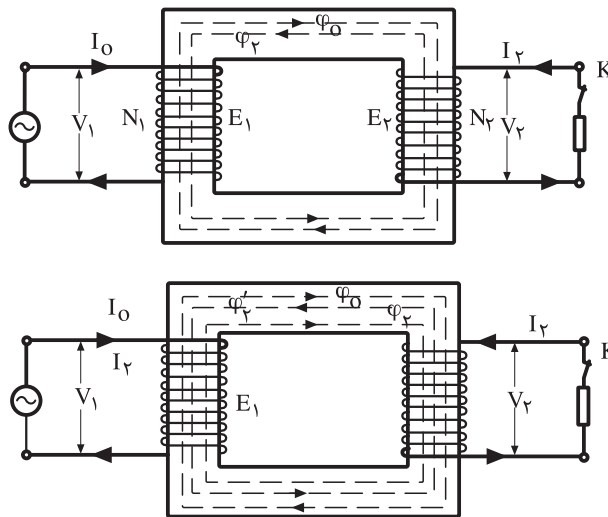
اگر کلید بار را در طرف ثانویه بسته شود نیروی محرکه القایی E_2 در بار جریان الکتریکی I_2 برقرار شده و در دو سر بار اختلاف پتانسیل V_2 ایجاد می‌شود و براساس رابطه $I_2 = \frac{E_2 - V_2}{Z_2}$ اندازه جریان ثانویه معین می‌شود. V_2 ولتاژ دو سر سیم‌پیچ ثانویه و E_2 نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچ ثانویه و Z_2 امپدانس سیم‌پیچ ثانویه می‌باشند. جریان I_2 ، جریان متناوب سینوسی است، به نوبه خود در سیم‌پیچ ثانویه شارمغناطیسی ϕ_2 ایجاد کرده که مدار خود را از طریق هسته بسته و با شارمغناطیسی ϕ_0 براساس قانون لنز مخالفت کرده و موجب کاهش شار در هسته می‌شود.



شکل ۶- جریان بار، شار ϕ_2 را تولید می‌کند.

با کاهش شار مغناطیسی در هسته، مقدار E_1 کاهش یافته و با کاهش E_1 با توجه به رابطه $I_0 = \frac{V_1 - E_1}{Z_1}$ مقدار I_0 به مقدار I_1 افزایش می‌یابد و شارمغناطیسی ϕ_2' تولید می‌کند که ϕ_2 را خنثی کرده و دوباره ϕ_0 را در هسته برقرار می‌کند (شکل ۶).

با بررسی مطالب فوق مشاهده می‌شود تغییرات جریان از I_0 به I_1 متناسب با φ_p می‌باشد از آنجایی که φ_p را I_1 به وجود آورده بود و I_2 با امیدانس بار متناسب است. نتیجه می‌گیریم که افزایش I_0 به I_1 متناسب با بار ترانسفورماتور می‌باشد، که این فرایند را خود تنظیمی ترانسفورماتورها می‌گویند (شکل ۷).



شکل ۷- خود تنظیمی ترانسفورماتور

اجزای ترانسفورماتور از لحظه ۲ تا ۱۳:۵

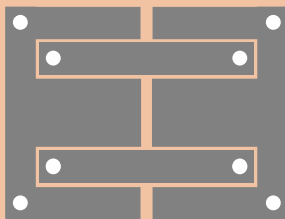
فیلم



فعالیت



چرا هسته ترانسفورماتور با توجه به شکل ۸ به شکل EI ساخته می‌شود؟



شکل ۸- ساخت ورق هسته EI

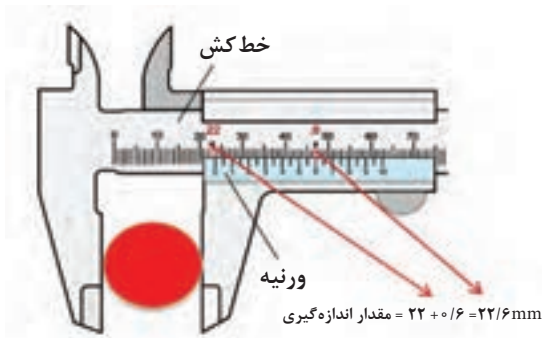
توضیح: برای اینکه بتوان کارهای عملی ساده و متناسب با بحث ترانسفورماتورها را در کارگاه انجام داد، لازم است تا با یکسری وسایل و ابزار مرتبط آن آشنا شد که در ادامه به بررسی و معرفی آنها پرداخته می‌شود.

کولیس



شکل ۹- اجزای تشکیل دهنده کولیس

کولیس وسیله اندازه‌گیری، فاصله بین دو نقطه، با دقت اندازه‌گیری یک دهم میلی‌متر می‌باشد. کولیس از یک خط‌کش مدرج، یک ورنیه، دو فک بیرونی، دو فک درونی و یک تیغه تشکیل می‌شود (شکل ۹).

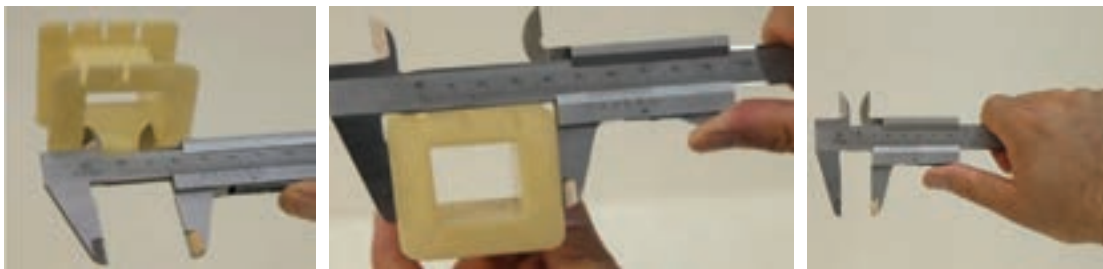


شکل ۱۰- اندازه گیری قطر خارجی با کولیس

روش اندازه گیری با کولیس

قطعه‌ای بین دو فک قرار داده شود (سنجش قطر خارجی). قسمت صحیح را قبل از صفر ورنیه، از خط کش بر حسب میلی متر خوانده می‌شود. قسمت اعشاری را از ورنیه جدا ساخته، در این حالت یکی از اعداد ورنیه، با یکی از اعداد خط کش در امتداد هم قرار می‌گیرند، این عدد قسمت اعشاری اندازه گیری را نشان خواهد داد. بنابراین، دقت اندازه گیری دهم میلی متر خواهد بود.

با کولیس می‌توان اندازه داخلی و خارجی و عمق اجسام را اندازه گیری نمود (شکل ۱۱).



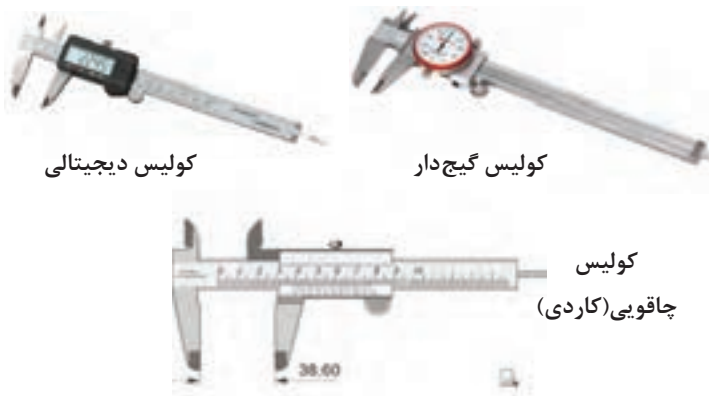
شکل ۱۱- نحوه اندازه گیری با کولیس

سؤال

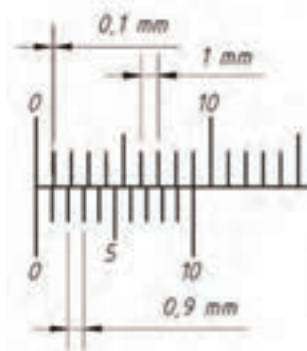
چه تفاوتی در انواع کولیس در شکل ۱۲ دیده می‌شود؟

مقدار نشان داده شده توسط کولیس در شکل ۱۳ چقدر است؟

فعالیت



شکل ۱۲- انواع کولیس‌ها



شکل ۱۳

میکرومتر (ریزسنج)

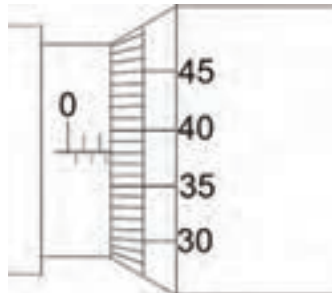
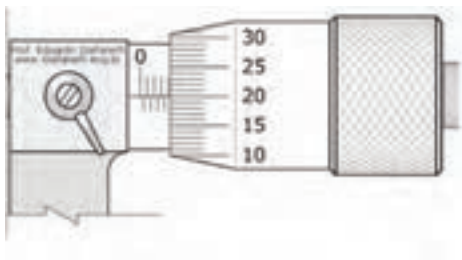
از میکرومتر معمولاً برای اندازه‌گیری قطر سیم‌های با روکش لاکی استفاده می‌شود. دقت اندازه‌گیری آن تا 0.01 میلی‌متر می‌باشد. روش اندازه‌گیری و قرائت مقدار اندازه‌گیری شده در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۴- اندازه‌گیری قطر اجسام با میکرومتر

مقدار نشان داده شده در شکل توسط میکرومتر چقدر است؟

فعالیت



شکل ۱۵- اندازه‌گیری با میکرومتر

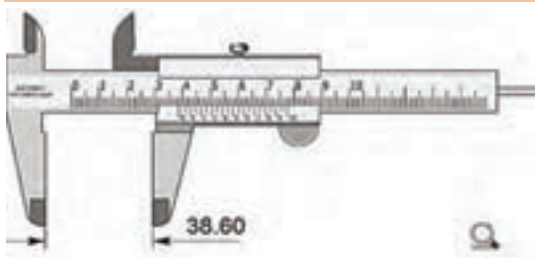
از ضربه زدن به کلیه اجزای میکرومتر خودداری کنید و بعد از هرزگردی مهره را بیشتر نچرخانید.

ایمنی



مقادیری را که دستگاه‌های کولیس در شکل‌های زیر نشان می‌دهند، مشخص کنید.

فعالیت



الف



ب



پ

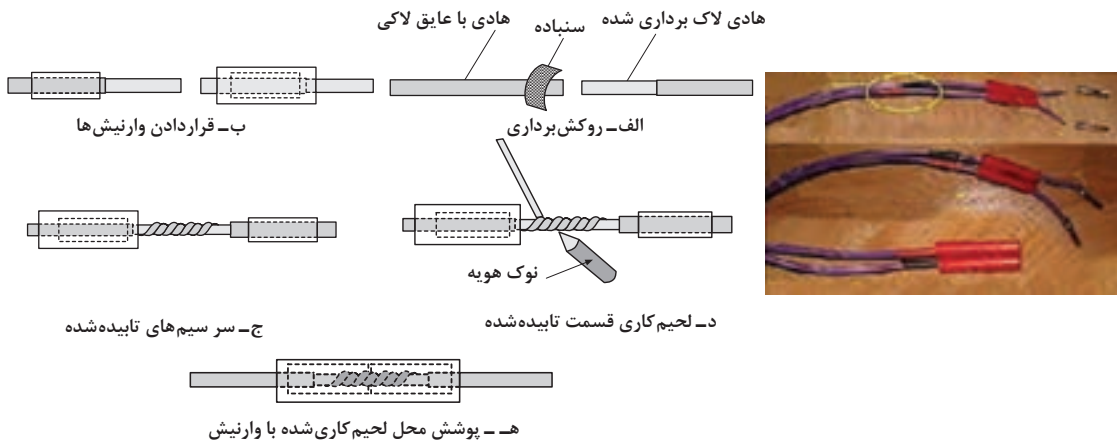


ت

شکل ۱۶- مقادیر مختلف اندازه گیری شده با کولیس

وارنیش

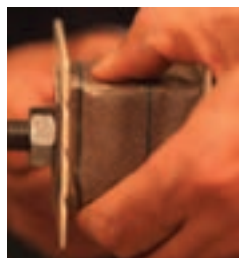
معمولاً برای محکم کردن اتصال سیم‌های لاک‌ی با یکدیگر و یا اتصال سیم‌های لاک‌ی با سیم‌های افشان که از داخل وسیله سیم‌پیچی شده مانند ترانسفورماتورها و الکتروموتورها خارج می‌شود از روش لحیم کاری استفاده می‌شود. برای عایق کاری این نقاط اتصال از عایق‌های حرارتی به نام وارنیش (ماکارونی) استفاده می‌شود. در زمان سیم‌پیچی یک طرف این روکش‌ها باید در داخل قرقره و زیر سیم‌پیچ‌ها قرار گرفته و محکم شود. وارنیش‌ها به صورت لوله‌ای در قطرهای مختلف و با طول‌های یک متر وجود دارند که می‌توان متناسب با ضخامت محل اتصال دو سیم شماره وارنیش را انتخاب کرد.



شکل ۱۷- کاربرد وارنیش

کاغذ پرشمان

کاغذهای عایقی الکتریکی هستند که از آنها در بین طبقات سیم‌پیچی‌ها و روی سیم‌پیچی‌های اولیه و ثانویه برای جدا کردن این سیم‌پیچی‌ها از یکدیگر و همچنین حفاظت از سیم‌پیچی در مقابل ضربات خارجی استفاده می‌شود.



شکل ۱۸- کاغذ پرشمان

برای اتصال سیم‌های ترانسفورماتور به شبکه یا مصرف کننده می‌توان از سر سیم استفاده کرد که در شکل ۱۹ با تصویر چند نمونه از آنها آشنا می‌شویم.



شکل ۱۹- سرسیم

ترانسفورماتور (بخش سوم)

فیلم



فعالیت



مقاومت عایقی بین سیم‌پیچ اولیه و ثانویه یک ترانسفورماتور یک‌فاز را به کمک مگر اندازه‌گیری کنید.

سؤال

اگر سیم‌پیچ اولیه با سیم‌پیچ ثانویه اتصال الکتریکی پیدا کند چه اتفاقی در عملکرد ترانسفورماتور رخ می‌دهد؟

کار عملی ۱



هدف: آشنایی و کار با کولیس، میکرومتر، سیم لاکه، وارنیش، قرقره ترانسفورماتور، ورق‌های هسته ترانسفورماتور



شکل ۲۰- ابعاد قرقره ترانسفورماتور

وسایل و مواد لازم: کولیس، میکرومتر، سیم لاکه،

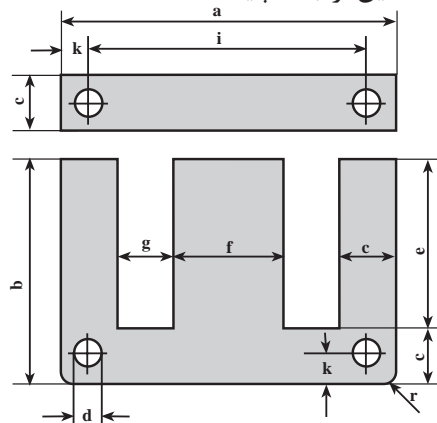
وارنیش، قرقره ترانسفورماتور، انواع ورق‌های EI

۱- دو اندازه مختلف از قرقره‌های آماده ترانسفورماتورها را در اختیار گرفته و مقادیر نشان داده شده در شکل ۲۰ را با کولیس اندازه‌گیری کنید.

۲- دو اندازه مختلف از ورق‌های EI ترانسفورماتورها را در اختیار گرفته و مقادیر نشان داده شده در

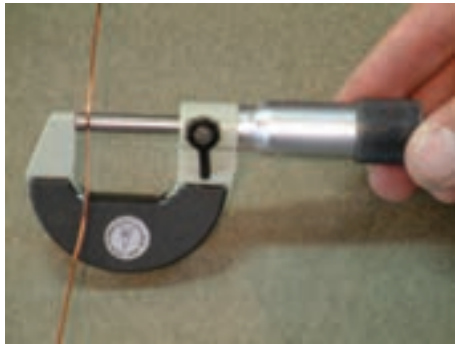
بودمان سوم: سیم پیچی ترانسفورماتور

شکل ۲۱ را با کولیس اندازه گیری کنید. چه ارتباطی بین مقدار وسط هسته (f) با دو ضلع کناری (C) وجود دارد؟ علت این ارتباط چیست؟



شکل ۲۱- ابعاد هسته EI

۳- چند نمونه قرقره سیم لاکه مختلف را در اختیار گرفته و با میکرومتر قطر سیم لاکه آنها را اندازه گیری کنید و جدول ۱ را تکمیل کنید (شکل ۲۲).

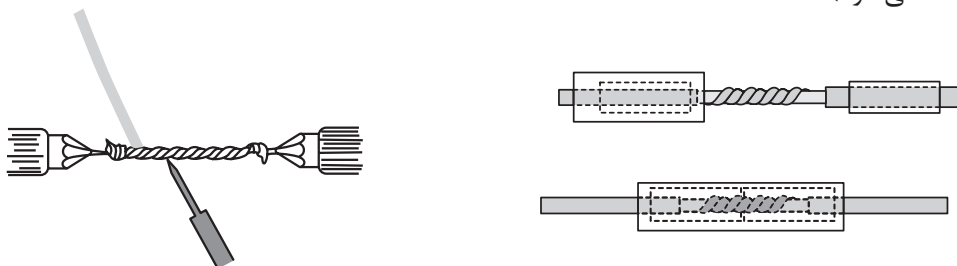


شکل ۲۲- اندازه گیری قطر سیم لاکه

جدول ۱- مقادیر اندازه گیری شده

شماره سیم	قطر سیم اندازه گیری شده	ضخامت لاک سیم	$\frac{\pi d^2}{4}$ اندازه گیری سطح مقطع سیم (A)
۰/۵۰			
۰/۶۰			
۰/۸۰			
۰/۸۵			
۱			

۴- چند رشته سیم لاکه را مطابق شکل ۲۳ به یکدیگر اتصال داده و پس از لحیم کاری مناسب روی اتصال‌ها را با وارنیش پلاستیکی بیوشانید (اندازه روکش برداری و وارنیش‌ها توسط هنرآموز (استادکار) در اختیار شما گذاشته می‌شود).



شکل ۲۳- لحیم کاری

ترانسفورماتور ایده آل

ترانسفورماتوری که تمام شار مغناطیسی تولیدشده در سیم‌پیچ اولیه از سیم‌پیچ ثانویه عبور می‌کند ایده آل نامیده می‌شود. در این ترانسفورماتورها هیچ گونه تلفات وجود ندارد و راندمان آن صددرصد می‌باشد. این نوع ترانسفورماتورها یک تعریف ذهنی است و در عمل امکان دستیابی به چنین ترانسفورماتورهایی امکان‌پذیر نیست.

روابط اساسی ترانسفورماتورهای ایده آل

در ترانسفورماتورهای ایده آل به علت نادیده گرفتن مقاومت اهمی سیم‌پیچ‌ها و تلفات پراکندگی می‌توان نوشت:

$$E_1 = V_1, \quad E_2 = V_2 \quad (3-4), \quad P_1 = P_2 \quad (3-5)$$

با توجه به روابط ۳-۴ و ۳-۵ می‌توان نوشت:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4/44 \times f \times B \times A \times N_1}{4/44 \times f \times B \times A \times N_2} \Rightarrow \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (3-6)$$

$$P_1 = V_1 \times I_1, \quad P_2 = V_2 \times I_2, \quad P_1 = P_2$$

$$V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2 \Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (3-7)$$

در ترانسفورماتورهای ایده آل نسبت دورها با نسبت ولتاژها و عکس نسبت جریان‌ها برابر است و $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = a$ را ضریب تبدیل ترانسفورماتور می‌گویند.

مثال ۱

تعداد دور سیم‌پیچ اولیه یک ترانسفورماتور ایده‌آل ۱۰۰۰ دور و تعداد دور سیم‌پیچ ثانویه آن ۴۰۰ دور می‌باشد این ترانسفورماتور در ثانویه بار ۲۰ اهمی را با ولتاژ ۲۰۰ ولت تغذیه می‌کند. ولتاژ و جریان اولیه و توان ورودی ظاهری آن را به دست آورید.

حل:

$$N_1 = 1000 \text{ دور}, N_2 = 400 \text{ دور}, R = 20 \Omega, V_2 = 200 \text{ V} \rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{V_1}{200} = \frac{1000}{400} \rightarrow V_1 = 500 \text{ V} \quad \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}, I_2 = \frac{V_2}{R} = \frac{200}{20} = 10 \text{ A}, \frac{1000}{400} = \frac{10}{I_1} \rightarrow I_1 = 4 \text{ A}$$

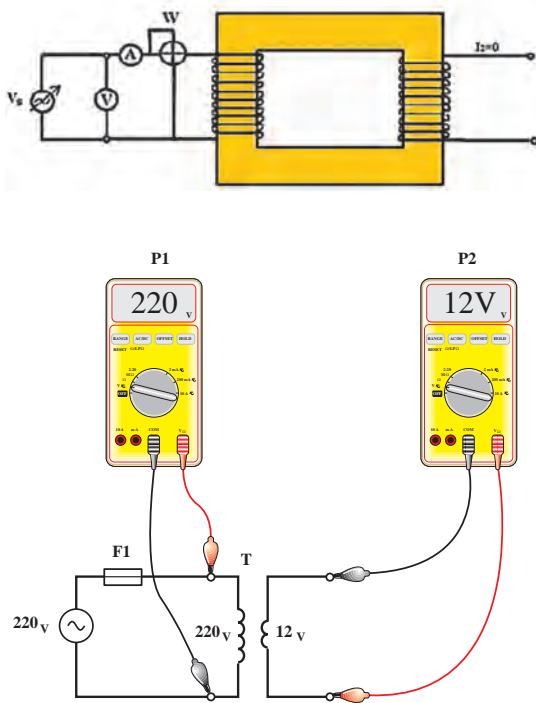
$$S_1 = V_1 \times I_1 = 1000 \times 4 = 4000 \text{ VA}$$

سؤال

تفاوت ترانسفورماتور ایده‌آل و واقعی چیست؟ چرا در عمل ترانسفورماتور ایده‌آل وجود ندارد؟

آزمایش بی‌باری

در آزمایش بی‌باری هدف تعیین تلفات هسته و مشخص نمودن عناصر معادل هسته می‌باشد. در این آزمایش، ثانویه بدون بار بوده و در فرکانس نامی مطابق شکل ۲۴ منبع ولتاژ متغیر را آن قدر تغییر می‌دهیم تا ولت‌متر ولتاژ اسمی ترانسفورماتور را نشان دهد. در این حالت وات‌متر تلفات بی‌باری یا تقریباً تلفات هسته که برابر $P_{Fe} = \frac{V_1^2}{R_c}$ است را نشان خواهد داد. مقداری که آمپر‌متر نشان می‌دهد جریان بی‌باری ترانسفورماتور I_0 می‌باشد (با چگونگی محاسبه عناصر مدار معادل در سال‌های بعد آشنا خواهید شد).



شکل ۲۴ - مدار آزمایش بی‌باری

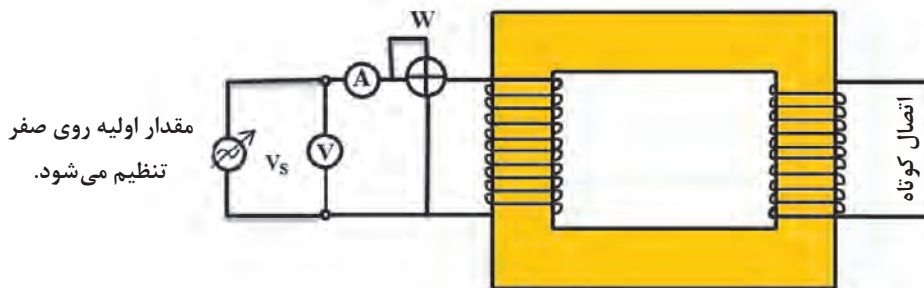
فعالیت

چرا ولتاژ بی‌باری ترانسفورماتور از مقدار محاسبه شده بیشتر است؟



آزمایش اتصال کوتاه

هدف از آزمایش اتصال کوتاه برآورد تقریبی تلفات سیم‌پیچی و عناصر معادل سیم‌پیچی ترانسفورماتور است. این آزمایش به جهت اشباع مغناطیسی هسته، باید با احتیاط صورت گیرد. برای این منظور ابتدا منبع ولتاژ را در مقدار صفر قرار داده، سپس ثانویه را مانند شکل ۲۵ اتصال کوتاه کرده و سپس منبع ولتاژ متغیر را آهسته آهسته افزایش داده تا از آمپرتر، جریان نامی اولیه ترانسفورماتور عبور کند در این حالت مقداری که وات‌متر نشان می‌دهد گویای تلفات مسی $P_{Cu} = I_1^2 \times R_e$ می‌باشد و مقداری که ولت‌متر نشان می‌دهد ولتاژ اتصال کوتاه V_{SC} است.



شکل ۲۵- مدار آزمایش اتصال کوتاه

تلفات ترانسفورماتور

به مجموع تلفات آهنی (P_{Fe}) و تلفات مسی (P_{Cu}) تلفات ترانسفورماتور گفته می‌شود.

$$\Delta P = P_{Fe} + P_{Cu} \quad (3-8)$$

آزمایش بی‌باری و اتصال کوتاه از لحظه ۲۱:۴۵ تا ۲۳:۵۵

فیلم



راندمان ترانسفورماتور

نسبت توان خروجی P_{out} به توان ورودی P_{in} راندمان گفته می‌شود و با η نشان داده می‌شود.

$$\eta\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (3-10) \quad P_{in} = P_{out} + \Delta P \quad (3-9)$$

سیم‌پیچی ترانسفورماتورهای وسایل زیر روی یک بازو یا دو بازوی مختلف هسته پیچیده شده است؟
 الف) ترانسفورماتور هویه تفنگی
 ب) ترانسفورماتور جوشکاری مدل پله‌ای
 ج) ترانسفورماتور جوشکاری مدل هسته متحرک

تحقیق



ولتاژ اتصال کوتاه

اگر سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور اتصال کوتاه شود، و از سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور جریان نامی عبور کند، در این حالت ولتاژی که در اولیه ترانسفورماتور اعمال شده است ولتاژ اتصال کوتاه گفته و آن را با V_{SC} (VShort Circuit) نشان می‌دهند.

ولتاژ اتصال کوتاه نسبی

نسبت ولتاژ اتصال کوتاه به ولتاژ نامی اولیه را «ولتاژ اتصال کوتاه نسبی» می‌گویند و آن را با U_k نشان می‌دهند. معمولاً آن را به درصد بیان می‌کنند و یکی از مشخصات ترانسفورماتور می‌باشد و معمولاً در پلاک ترانسفورماتور آورده می‌شود.

$$U_k \% = \frac{V_{SC}}{V_{1n}} \times 100 \quad (3-11)$$

ولتاژ اتصال کوتاه معیاری برای اندازه‌گیری مقدار امپدانس ترانسفورماتورها است. هرچقدر ولتاژ اتصال کوتاه بیشتر باشد امپدانس ترانسفورماتور زیادتر، تلفات آن بیشتر و راندمان کمتری دارد اما در مقابل اتصال کوتاه مقاوم‌تر است.

برای کاهش ولتاژ اتصال کوتاه، سیم‌های سیم پیچ‌های اولیه و ثانویه را روی هم می‌پیچند.

مقدار ولتاژ اتصال کوتاه یک ترانسفورماتور سیم پیچی شده را اندازه‌گیری کنید و در مورد امپدانس داخلی آن بحث کنید.

فعالیت



جریان اتصال کوتاه

چنانچه ترانسفورماتور با مقادیر نامی، باری را تغذیه کند و دوسر بار اتصال کوتاه شود جریان شدیدی (حدوداً تا ۲۰ برابر جریان نامی) از ترانسفورماتور عبور می‌کند که به آن جریان ضربه‌ای یا جریان هجومی گفته می‌شود این جریان پس از چند سیکل تقریباً به نصف مقدار اولیه کاهش پیدا کرده و مقدار ثابت پیدا می‌کند، به این جریان، جریان اتصال کوتاه گفته و با I_{SC} نمایش داده می‌شود.

$$I_{SC} = \frac{I_n}{u_k} \quad (3-12)$$

I_{SC} - جریان اتصال کوتاه I_n - جریان نامی u_k - ولتاژ اتصال کوتاه نسبی

مثال ۲

ولتاژ نامی یک ترانسفورماتور ۲۲۰ ولت و جریان نامی آن ۱۰ آمپر است. اگر ولتاژ اتصال کوتاه آن ۴۴ ولت باشد، جریان اتصال کوتاه آن چند آمپر است؟

حل

$$V_{1n} = 220 \text{ V}, \quad I_n = 10 \text{ A}, \quad V_{SC} = 44 \text{ V}$$

$$u_k = \frac{V_{SC}}{V_{1n}} = \frac{44}{220} = 0.2$$

$$I_{SC} = \frac{I_n}{u_k} = \frac{10}{0.2} = 50 \text{ A}$$

سؤال

چه ارتباطی بین مقدار جریان اتصال کوتاه یک ترانسفورماتور و ولتاژ اتصال کوتاه آن وجود دارد؟

هنگامی که ترانسفورماتور به ولتاژ اولیه نامی برق شهر متصل است ثانویه را برای مدت طولانی اتصال کوتاه نکنید.

ایمینی



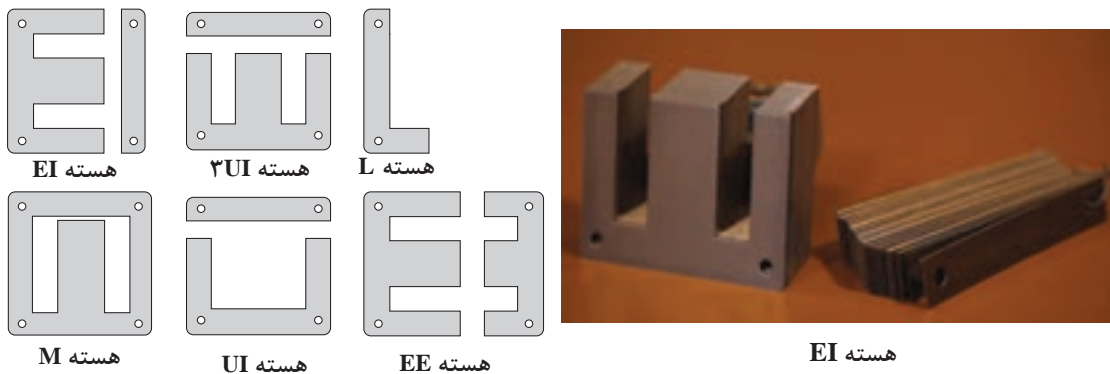
محاسبات عملی ترانسفورماتورهای تک فاز

هسته‌های آهنی مورد استفاده در ترانسفورماتورها باید دو ویژگی بسیار مهم داشته باشند.

۱- داشتن حداقل تلفات هیستریزیس (مربوط به جنس هسته می‌شود).

۲- داشتن حداقل تلفات فوکو (مربوط به شکل هسته می‌شود).

با افزودن ناخالصی سیلیس به آهن می‌توان از هسته مرغوب با حداقل تلفات هیستریزیس بهره‌مند شد. با ورق ورق کردن هسته می‌توان تلفات فوکو را به حداقل رساند در عمل علاوه بر ورق، ورق کردن هسته، ورقه‌های هسته با افزودن روکش ورنی، آنها را نسبت به هم عایق می‌کنند. لعاب روکش ورقه جدار ۰/۰۱ میلی‌متر است که طی دو مرحله روکش و در هر مرحله ۰/۰۵ روی ورق‌ها روکش ورنی می‌دهند. ورقه‌ها در اندازه‌های ۰/۳۵ میلی‌متر و ۰/۵ میلی‌متر ساخته می‌شوند. ورقه‌های هسته به صورت $M, L, UI, EE, ۳UI$ برش داده می‌شوند. در شکل ۲۶ نمونه‌هایی از هسته‌ها مشاهده می‌شود.



شکل ۲۶- انواع هسته‌های ترانسفورماتور

محاسبه سطح مقطع هسته

مبنای تعیین سطح مقطع هسته‌های ترانسفورماتور، توان ظاهری خروجی آنها می‌باشد. چون ترانسفورماتورهای قدرت براساس القای متقابل کار می‌کنند، نقطه کار آنها در ناحیه خطی می‌باشد. می‌توان از ضریب تبدیل $a = \frac{N_1}{N_2}$ با دقت بالا استفاده کرد. هنگام محاسبه سطح مقطع، مقدار سطح مقطع مؤثر باید در نظر گرفته شود.

بودمان سوم: سیم پیچی ترانسفورماتور

برای کاهش اثرات فوکو، هسته ترانسفورماتور را از ورقه‌های آهن سیلیس دار با ضخامت‌های $0/35$ یا $0/50$ میلی‌متر ساخته می‌شود. سطح مقطع ظاهری حجم بیشتری نسبت به سطح مقطع مؤثر دارد. ارتباط سطح مقطع مؤثر و سطح مقطع ظاهری را ضریب تورق ($0/90$ الی $0/95$) مشخص می‌کند. اگر سطح مقطع مؤثر را با S و سطح مقطع ظاهری را با S' نمایش دهیم، می‌توان رابطه $3-13$ را نوشت.

$$S = K\sqrt{P_r} \quad (3-13)$$

سطح مقطع ظاهری هسته‌های ترانسفورماتور از رابطه $3-14$ تعیین می‌شود.

$$S' = \frac{S}{\text{ضریب تورق}} \approx 1/1 \times S \quad (3-14)$$

کاهش یافته K بین $0/8$ تا $1/21$ متغیر است هر چقدر توان ترانسفورماتور بیشتر باشد، مقدار K ضریب به مقدار $0/8$ نزدیک‌تر می‌شود.

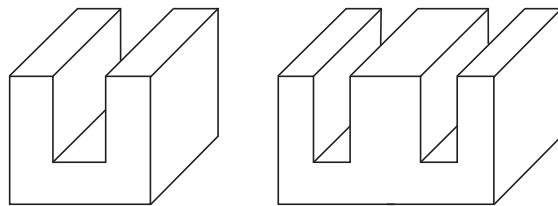
چه تفاوتی بین راندمان ترانسفورماتورهای قدرت و ترانسفورماتورهای کوچک آزمایشگاهی وجود دارد؟

تحقیق



در دو مدل هسته E و U شکل ۲۷ چه ارتباطی بین سطح مقطع هسته وجود دارد؟ در مورد آن بحث کنید.

فعالیت

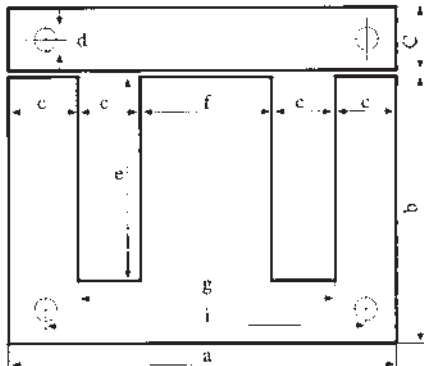


شکل ۲۷- سطح مقطع هسته EI و U

ابعاد ورق‌های هسته EI و UI اندازه و ابعاد برش هسته‌های EI و UI با یکدیگر متفاوت است. در شکل ۲۸ ابعاد و روابط آن در هسته EI نشان داده شده است، ابعاد هسته UI در شکل ۲۹ نشان داده شده است.

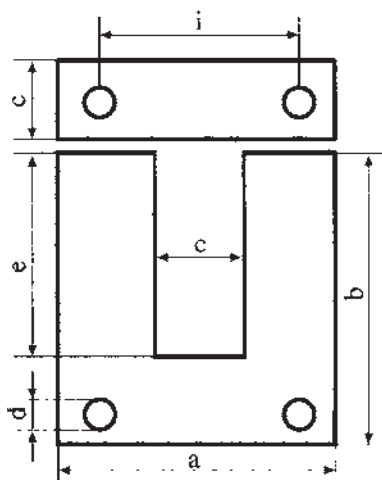
سؤال

اندازه برش f چند برابر C در هسته EI است؟ چرا؟



$$b = \frac{2}{3}a, \quad c = \frac{1}{6}a, \quad e = \frac{1}{2}a, \quad f = \frac{1}{3}a, \quad g = \frac{2}{3}a$$

شکل ۲۸- ابعاد هسته



شکل ۲۹- ابعاد ورق

$$b = \frac{4}{3}a$$

$$c = \frac{1}{3}a$$

$$e = a$$

تعیین نوع ورق با استفاده از جداول

با مشخص شدن سطح مقطع ظاهری هسته و استفاده از روابط ۱۵-۳ و جدول ۲ می توان ابعاد هسته را معین کرد. در تعیین ابعاد هسته، ضخامت هسته کمی بیشتر از عرض هسته در نظر گرفته می شود. جدول ابعاد هسته UI در کتاب همراه هنرجو قابل استفاده است.

$$\text{نوع هسته EI یا UI} \leq 30 \times \sqrt{S} \quad (3-15)$$

جدول ۲- استاندارد ابعاد ورق های EI

اندازه	a	b	c	d	e	f	g	i	ضخامت
EI۳۰	۳۰	۲۰	۵	-	۱۵	۱۰	۲۰	-	۰/۰- ۰/۵
EI۳۸	۳۸/۴	۲۵/۶	-	-	۱۹/۲۱	۱۲/۸	۲۵/۵	-	"
EI۴۲	۴۲	۲۸	۷	۳/۵	۲۱	۱۴	۲۸	۳۵	۰/۲۷- ۶۵
EI۴۸	۴۸	۳۲	۸	۳/۵	۲۴	۱۶	۳۲	۴۰	"
EI۵۴	۵۴	۳۶	۹	۳/۵	۲۷	۱۸	۳۶	۴۵	"
EI۶۰	۶۰	۴۰	۱۰	۳/۵	۳۰	۲۰	۴۰	۵۰	"
EI۶۶	۶۶	۴۴	۱۱	۴/۵	۳۳	۲۲	۴۴	۵۵	"
EI۷۵	۷۵	۵۰	۱۲/۵	۴/۵	۳۷/۵	۲۵	۵۰	۶۲/۵	"
EI۷۸	۷۸	۵۲	۱۳	۴/۵	۳۹	۲۶	۵۲	۶۵	"
EI۸۴	۸۴	۵۶	۱۴	۴/۵	۴۲	۲۸	۵۶	۷۰	"
EI۹۶	۹۶	۶۴	۱۶	۵/۵	۴۸	۳۲	۶۴	۸۰	"
EI۱۰۵	۱۰۵	۷۰	۱۷/۵	۵/۵	۵۲/۵	۳۵	۷۰	۸۷/۵	"
EI۱۰۸	۱۰۸	۷۲	۱۸	۵/۵	۵۴	۳۶	۷۲	۹۰	"
EI۱۲۰	۱۲۰	۸۰	۲۰	۷	۶۰	۴۰	۸۰	۱۰۰	"
EI۱۵۰N	۱۵۰	۱۰۰	۲۵	۸	۷۵	۵۰	۱۰۰	۱۲۵	"

سؤال

اگر سیم پیچ ترانسفورماتور به ولتاژ DC متصل شود، مقدار ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور چقدر خواهد بود؟ چرا؟

مثال ۳

نوع ورق مناسب برای هسته ترانسفورماتور با ولتاژ $U_p = 12V$ و جریان $I_p = 4A$ تعیین کنید.

$$P_p = U_p \times I_p = 12 \times 4 = 48 \text{ W}$$

$$S = 1/2 \sqrt{P_p} = 1/2 \sqrt{48} = 8/31 \text{ cm}^2$$

$$EI \text{ نوع هسته} \leq 30 \times \sqrt{S}$$

$$EI \text{ نوع هسته} \leq 30 \times \sqrt{8/31} = 86/48$$

ورق استاندارد مربوط به مقدار محاسبه شده ورق $EI 84$ می باشد. در این ورق $f = \frac{1}{3} a = 28 \text{ mm}$ می باشد. ضخامت هسته از $\frac{S}{f}$ به دست می آید.

$$\text{ضخامت هسته} = \frac{S}{f} = \frac{8/31}{28 \times 10^{-1}} = 2/967 \text{ cm} = 29/67 \text{ mm}$$

اگر ورق ها را از نوع $35/0$ میلی متری انتخاب کنیم در این حالت تعداد ورق ها برابر است با:

$$\text{تعداد ورق ها} = \frac{\text{ضخامت هسته}}{\text{ضخامت هر ورق}} = \frac{29/67}{0/35} = 84 \text{ عدد}$$

اگر ورق ها از نوع $50/0$ میلی متری انتخاب کنیم در این حالت تعداد ورق ها برابر است با:

$$\text{تعداد ورق ها} = \frac{\text{ضخامت هسته}}{\text{ضخامت هر ورق}} = \frac{29/67}{0/50} = 59 \text{ عدد}$$

محاسبه تعداد دور سیم پیچ اولیه و ثانویه

مبنای محاسبات تعداد دورهای سیم پیچ اولیه و ثانویه رابطه $E = 4/44 \times f \times B_m \times S \times N$ می باشد. عملاً در محاسبات برای سادگی عمل E را یک ولت در نظر می گیرند و تعداد دور را برای یک ولت به دست می آورند که آن را دور بر ولت می گویند و با N_v نشان می دهند. پس از تعیین N_v ، براساس ولتاژهای سیم پیچ های اولیه و ثانویه و در نظر گرفتن افت ولتاژها، تعداد دورهای اولیه و ثانویه را تعیین می کنند.

$$E = 4/44 \times f \times B_m \times S \times N$$

$$E = 1V \rightarrow N_v = \frac{1}{4/44 \times f \times B_m \times S} \quad (3-16)$$

اگر S را برحسب سانتی مترمربع و B_m را برحسب گوس در نظر بگیریم دور بر ولت به صورت رابطه ۳-۱۶ بیان خواهد شد.

$$N_V = \frac{10^8}{4/44 \times f \times B_m \times S} \quad (3-15)$$

اگر $f=50 \text{ Hz}$ و گوس $=12000$ تسلا $B_m = 1/2$ باشد دور بر ولت N_V به صورت زیر بیان می‌شود.

$$N_V = \frac{37/5}{S [\text{Cm}^2]} \quad \text{هسته مرغوب}$$

اگر $f=50 \text{ Hz}$ و گوس $=10000$ تسلا $B_m = 1$ باشد دور بر ولت N_V به صورت زیر بیان می‌شود.

$$N_V = \frac{45}{S [\text{Cm}^2]} \quad \text{هسته معمولی}$$

فعالیت

مقدار دور بر ولت به چه عواملی بستگی دارد؟ اگر فرکانس افزایش یابد دور بر ولت چه تغییری می‌کند؟



برای محاسبه تعداد دور اولیه و ثانویه دو حالت زیر را می‌توان در نظر گرفت.

۱- تعداد دور سیم‌پیچ اولیه را متناسب با نصف درصد افت ولتاژ، کاهش و تعداد دور ثانویه متناسب با نصف درصد افت ولتاژ افزایش می‌دهند.

$$N_1 = N_V \times V_1 \times \left(1 - \frac{\% \Delta V}{2}\right)$$

$$N_2 = N_V \times V_2 \times \left(1 + \frac{\% \Delta V}{2}\right)$$

۲- تعداد دور سیم‌پیچ اولیه را تغییر نداده و تعداد دور ثانویه را متناسب با درصد افت ولتاژ کل افزایش می‌دهند.

$$N_1 = N_V \times V_1$$

$$N_2 = N_V \times V_2 \times (1 + \% \Delta V)$$

میزان افت ولتاژ با توجه به توان ترانسفورماتور تغییر می‌کند. افت ولتاژ در جدول شکل ۳ بر حسب توان خروجی نشان داده شده است.

جدول ۳- افت ولتاژ ترانسفورماتورها بر حسب قدرت آن

قدرت ترانس VA	5	10	25	50	75	100	150	200	300	400	750	1000	1500	2000	3000	3500
درصد افت ولتاژ ΔU	20	17	14	12	10	9	8	7/5	7	6/5	5	4	3	2	5	1

سؤال

چرا با افزایش قدرت ترانسفورماتور مقدار درصد افت کمتر می‌شود؟

مثال ۴

ترانسفورماتوری با مشخصات VA ۲۰۰ با ولتاژ اولیه ۲۲۰ ولت و ولتاژ ثانویه ۱۲ ولت مورد نیاز است. هسته این ترانسفورماتور از نوع مرغوب با چگالی $B_m = 12000 \text{ GS}$ ، ضخامت هر ورق 0.5 mm و فرکانس شبکه ۵۰ هرتز می باشد. تعداد دور سیم پیچ اولیه و ثانویه و تعداد ورق های هسته را با شرایط زیر مشخص کنید.

- ۱- بدون در نظر گرفتن افت ولتاژ، در اولیه
 ۲- با در نظر گرفتن افت ولتاژ اولیه
 حل:

۱- بدون در نظر گرفتن افت ولتاژ در سیم پیچ اولیه

از جدول شکل ۳-۶۵ برای $P = 200 \text{ VA}$ اندازه افت ولتاژ برابر $7/5\%$ تعیین می شود و از رابطه برای هسته مرغوب می توان نوشت:

$$N_V = \frac{37/5}{S [Cm^2]}$$

$$S = 1/2 \sqrt{P_r} = 1/2 \sqrt{200} = 16/97 Cm^2$$

$$N_V = \frac{37/5}{16/97} = 2/21 \text{ دور در هر ولت}$$

$$N_V = \frac{10^8}{4/44 \times f \times B_m \times S}$$

$$N_V = \frac{10^8}{4/44 \times 50 \times 12000 \times 16/97} = 2/21$$

$$N_1 = N_V \times V_1 = 2/21 \times 220 = 486 \text{ دور}$$

$$N_2 = N_V \times V_2 \times (1 + \% \Delta V) = 2/21 \times 12 \times (1 + 0.75) \approx 29$$

۲- با در نظر گرفتن افت ولتاژ در سیم پیچ اولیه

$$N_1 = N_V \times V_1 \times \left(1 - \frac{\% \Delta V}{2}\right) = 2/21 \times 220 \times \left(1 - \frac{0.75}{2}\right) = 468 \text{ دور}$$

$$N_2 = N_V \times V_2 \times \left(1 + \frac{\% \Delta V}{2}\right) = 2/21 \times 12 \times \left(1 + \frac{0.75}{2}\right) = 28 \text{ دور}$$

$$EI \text{ نوع} \leq 30 \sqrt{S} = 30 \sqrt{16/97} = 123/58$$

نوع ورق استاندارد نزدیک به $EI = 123/58$ ، ورق ۱۲۰ EI می باشد. در این حالت، اندازه $f = 40$ میلی متر به دست می آید از رابطه مقابل می توان نوشت:

$$S' = 1/1 \times S = 1/1 \times 1697 mm^2 = 1866/2 mm^2$$

$$\text{ضخامت هسته} = \frac{S'}{f} = \frac{1866/2}{40} = 46/66 mm$$

$$n = \frac{\text{ضخامت هسته}}{\text{ضخامت هر ورق}} = \frac{46/66}{0.5} \approx 94$$

تعیین قطر سیم مربوط به سیم پیچ اولیه و ثانویه

قطر سیم در سیم پیچ‌های ترانسفورماتور باید به گونه‌ای انتخاب شود، که حداقل بتواند اهداف زیر را برآورده کند.

(الف) حداقل تلفات مسی را داشته باشد.

(ب) حداقل وزن را داشته باشد.

(ج) جریان مدار را به راحتی تحمل کند.

با توجه به ویژگی‌های فوق پس می‌توان نتیجه گرفت که قطر سیم متأثر از توان ترانسفورماتور و چگالی جریان می‌باشد.

محاسبه ترانسفورماتور و مقدار افت ولتاژ از لحظه ۵:۱۵ تا ۹:۱۰

فیلم



چگالی جریان

چگالی جریان، بزرگی شدت جریانی است که هر میلی‌متر مربع از یک سیم، آن را تحمل می‌کند. واحد آن آمپر بر میلی‌متر مربع است و آن را با J نشان می‌دهند. در شکل مفهوم چگالی با شکل ۳۰ نشان داده شده است.

$$\text{سطح مقطع سیم} = A = \frac{I}{J} \quad \frac{\text{جریان سیم}}{\text{چگالی جریان}} \text{ mm}^2$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}} = 1.13 \sqrt{A}$$

قطر سیم اولیه $A_1 = \dots \Rightarrow d_1 = 1.13 \sqrt{A_1}$

قطر سیم ثانویه $A_2 = \frac{I_2}{J} \Rightarrow d_2 = 1.13 \sqrt{A_2}$

شکل ۳۰- چگالی جریان و تعیین سطح مقطع سیم پیچ اولیه و ثانویه

چگالی جریان با افزایش توان ترانسفورماتورها کاهش می یابد. در جدول ۴ محدوده چگالی جریان ترانسفورماتورها را متناسب با توان های مختلف مشاهده می کنید. جدول ۴، مقدار چگالی جریان بر حسب محدوده قدرت ترانسفورماتور را نشان می دهد.

جدول ۴- چگالی جریان در ترانسفورماتور

قدرت VA	۰-۵۰	۵۰-۱۰۰	۱۰۰-۲۰۰	۲۰۰-۵۰۰	۵۰۰-۱۰۰۰	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۲۰۰۰-۳۰۰۰	۳۰۰۰-۴۰۰۰
چگالی جریان $\frac{A}{mm^2}$	۴	۳/۵	۳	۲/۵	۲	۱/۷۵	۱/۵	۱

مثال ۵

یک ترانسفورماتور یک فاز با ولتاژ اولیه ۲۲۰ ولت و ولتاژ ثانویه ۶ ولت و جریان ثانویه ۴ آمپر مورد نیاز است. چگالی هسته ۱۲۰۰۰ گوس و فرکانس شبکه برق ۵۰ هرتز است. محاسبات لازم برای ساخت این ترانسفورماتور را، از قبیل انتخاب ورق ها، تعداد دور سیم پیچ اولیه و ثانویه و قطر سیم پیچ اولیه و ثانویه انجام دهید.

حل:

$$V_1 = 220 \text{ V}, \quad V_2 = 6 \text{ V} \rightarrow P_2 = V_2 \times I_2 = 6 \times 4 = 24 \text{ V.A}$$

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{P_2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{24} = 5/9 \text{ Cm} \quad \text{سطح حقیقی آهن}$$

$$N_V = \frac{37/5}{S} = \frac{37/5}{5/9} = 6/36 \quad \text{دور بر ولت}$$

$$N_1 = V_1 \times N_V = 220 \times 6/36 = 1400 \quad \text{دور}$$

$$N_2 = V_2 \times N_V \times (1 + \Delta\%)$$

از جدول شکل ۶۸-۳ افت ولتاژ تقریباً ۱۴٪ می باشد.

$$N_2 = 6 \times 6/36 \times (1 + 0/014) = 37 \quad \text{دور}$$

$$A_1 = \frac{I_1}{J}, \quad I_1 = \frac{P_1}{V_1}, \quad P_1 = \frac{P_2}{\eta}$$

راندمان (η) را به طور متوسط ۹۰٪ در نظر می گیرند.

$$P_1 = \frac{24}{0/9} = 26/6 \text{ VA} \rightarrow I_1 = \frac{26/6}{220} = 0/12 \quad A \rightarrow A_1 = \frac{I_1}{J}$$

از جدول ۴ چگالی جریان برابر $J = 4 \text{ A/mm}^2$ است.

$$A_1 = \frac{I_1}{J} = \frac{0/12}{4} = 0/03 \text{ mm}^2 \rightarrow d_1 = \frac{1}{\sqrt{13}} \sqrt{A_1} = \frac{1}{\sqrt{13}} \sqrt{0/03} = 0/20 \text{ mm}$$

$$A_r = \frac{I_r}{J} = \frac{4}{4} = 1 \text{ mm}^2 \rightarrow d_r = 1/13 \sqrt{A_r} = 1/13 \sqrt{1} = 1/13 \text{ mm}$$

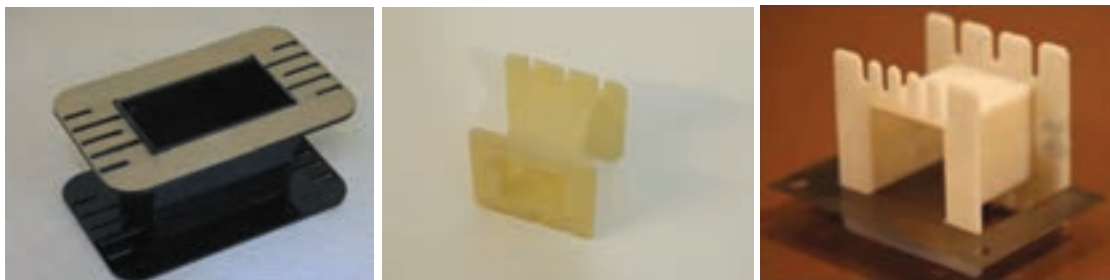
$$\text{نوع EI} \leq 30 \sqrt{S} \leq 30 \sqrt{5/9} = 73$$

نوع EI استاندارد از جدول شکل ۶۶-۳، EI۶۶ می باشد که در آن $f = 22 \text{ mm}$ است و ضخامت هسته برابر است با:

$$\text{عدد EI} = \frac{26/81}{0/5} \approx 54 \rightarrow \text{تعداد ورق} = \frac{S}{f} = \frac{5/9 \times 10^2 \text{ mm}}{22 \text{ mm}} = 26/81 \text{ mm}$$

طراحی قرقه ترانسفورماتور تک فاز

سیم پیچ‌های هر ترانسفورماتور، ابتدا روی یک قرقه پیچیده می‌شود. پس از آماده شدن سیم پیچ‌ها، ورق‌های هسته در درون قرقه‌ها قرار داده می‌شوند. قرقه‌ها متناسب با ابعاد هسته انتخاب می‌شوند. این قرقه‌ها در توان‌های پایین، از مواد ترموپلاست به صورت یک پارچه در قالب‌های استاندارد ساخته می‌شوند، یا از برش و مونتاژ کاغذهای برشمان درست می‌شوند. در توان‌های بالا و دمای کار زیاد قرقه‌ها را از فیبرهای استخوانی می‌سازند. فیبرهای استخوانی از استحکام مکانیکی بالا برخوردارند و دماهای زیادی را تحمل می‌کنند (شکل ۳۱).



شکل ۳۱- قرقه‌های ترموپلاست و فیبر استخوانی

در انتخاب ورق‌های هسته و قرقه ترانسفورماتورها دو عامل تعیین کننده باید در نظر گرفته شود.

۱- سطح کافی برای سیم پیچ اولیه و ثانویه

۲- حداکثر بهره‌برداری از فضای قرقه

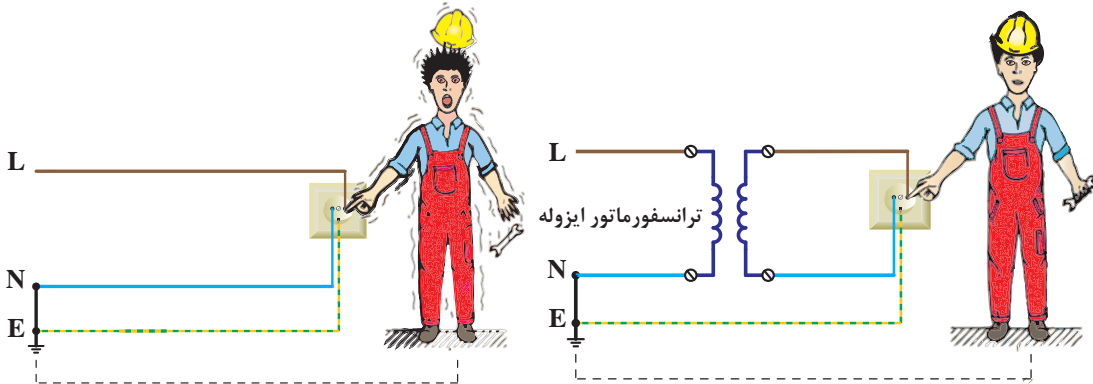
در انتخاب ورق هسته، ورقی را باید انتخاب نمود که سطح پنجره آن، سطح مورد نیاز سیم پیچ اولیه و ثانویه را کفایت کند، با مراجعه به جدول راهنمای هنرجو در تعیین قرقه کفایت سطح پنجره‌های آن اقدام کنید.

ترانسفورماتور با ولتاژ ورودی و خروجی برابر برای ایزوله و جداسازی دو بخش یک مدار الکتریکی کاربرد دارد.

فعالیت



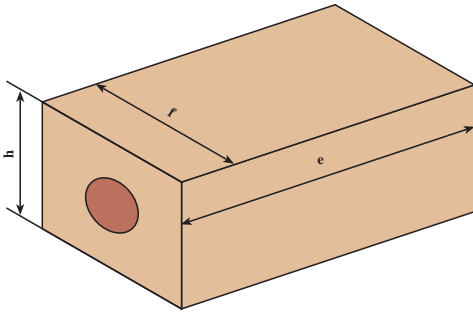
نقش ترانسفورماتور حفاظتی در شکل ۳۲ چیست؟



شکل ۳۲- ترانسفورماتور ایزوله

تهیه مغزی قرقره

یک قطعه چوب به شکل مکعب مستطیل براساس ابعاد نشان داده شده در شکل ۳۳ تهیه کنید. چرا که در زمان سیم پیچی لازم است تا این قطعه چوب در داخل قرار گرفته و سپس روی بوبین پیچ بسته شود.



شکل ۳۳- ابعاد مغزی قرقره

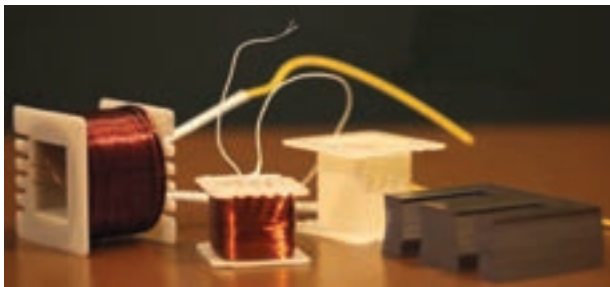
هدف: ساخت ترانسفورماتور تک فاز با یک ورودی و یک خروجی

کار عملی ۲



وسایل و مواد لازم

- قرقره ترانسفورماتور از نوع EI۴۸ یک عدد
- ورق EI۶۶ به ضخامت ۰/۵ mm به تعداد ۶۰ عدد
- سیم لاکه ۰/۲۰ mm و ۰/۸۰ mm
- دستگاه بوبین پیچ
- سیم چین
- دم باریک
- سیم افشان ۱/۵ و ۱



شکل ۳۴- تجهیزات سیم پیچی ترانسفورماتور

- وارنیش نمره ۲،۲/۵، ۱
- هویه و دریل
- لحیم و ژاک (جای فیش) چهار عدد
- کاغذ پرشمان ۰/۲۰ و ۰/۱۵
- چسب نواری
- کاغذ سنباده

۱- با توجه به مشخصات الکتریکی داده شده و بهره گرفتن از ورق هسته مرغوب با چگالی بالا و فرکانس کاری ۵۰ هرتز تعداد دورسیم پیچ ها، قطر سیم های اولیه و ثانویه، ابعاد و نوع ورق EI را با احتساب افت ولتاژ مناسب در سمت اولیه و ثانویه به دست آورده و سپس به کمک مربی خود اقدام به پیچیدن آن نمایید.

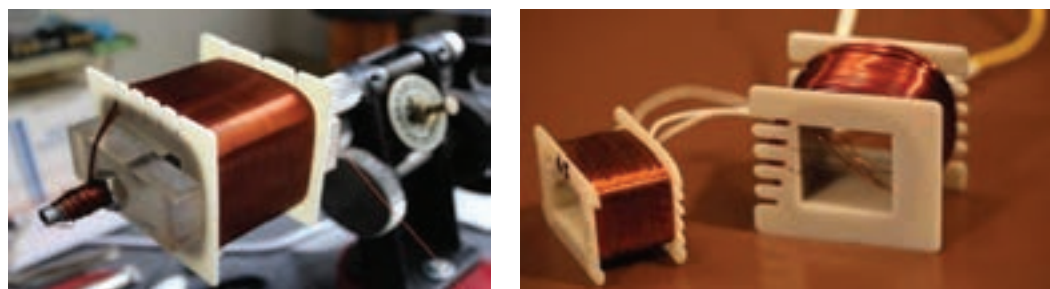
$$V_1 = 220V, \quad V_2 = 12V, \quad I_2 = 3A$$

۲- برای پیچیدن سیم روی قرقره لازم است تا ابتدا مغزی چوبی ساخته شده را به داخل قرقره هدایت کنید و سپس مجموعه را روی بوبین پیچ سوار کرده و اقدام به سیم پیچی کنید.



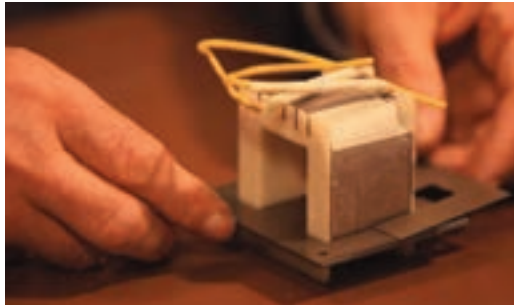
شکل ۳۵- مغزی قرقره

۳- سیم پیچ اولیه را مرتب روی قرقره بپیچید و پس از هدایت سرسیم ها به ژاک (جای فیش) مربوطه روی آن را با کاغذ پرشمان ۰/۱۵ یا ۰/۱ پوشانید و با چسب کاغذی محکم کنید سپس سیم ثانویه را به تعداد دور لازم بپیچید و پس از هدایت سرسیم های ثانویه به ژاک (جای فیش) مربوطه، روی سیم ها را با کاغذ پرشمان ۰/۲۰ پوشانده با چسب محکم کنید.



شکل ۳۶- سیم پیچی ترانسفورماتور

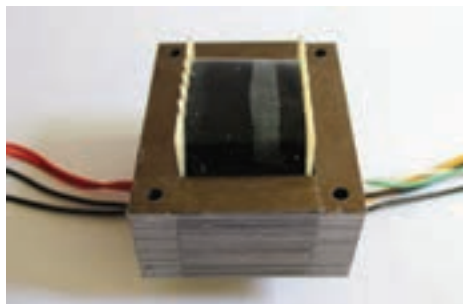
با راهنمایی مربی کارگاه ورق‌های EI را مطابق شکل ۳۷ به صورت یک در میان در داخل قرقره قرار دهید و در خاتمه پیچ ورق‌ها را محکم کنید. در نهایت ترانسفورماتور برای آزمایش بی باری و اتصال کوتاه آماده است (شکل ۳۸).



شکل ۳۷- جا زدن هسته

اگر سیم‌پیچی اولیه و ثانویه نامرتب باشد هنگام جا زدن هسته چه مشکلی پیش می‌آید؟

فعالیت



شکل ۳۸- ترانسفورماتور آماده شده

۵- پس از سیم‌پیچی با نظارت مربی خود اولاً و ثانیاً اولیه و ثانویه را به ازای یک بار مناسب اندازه‌گیری کنید.
۶- آزمایش بی باری و اتصال کوتاه ترانسفورماتور ساخته شده را انجام داده و تعیین مقدار تلفات هسته و سیم‌پیچی راندمان ترانسفورماتور را نیز محاسبه کنید.

هنگام جا زدن هسته ترانسفورماتور مراقب نوک تیز گوشه هسته باشید.

ایمنی



بسیاری از مواقع هنگام سیم‌پیچی اولیه ترانسفورماتور در اثر عجله، یا بی‌دقتی سر سیم اولیه قطع می‌شود. پیدا کردن مجدد سرسیم و اتصال مجدد آن وقت‌گیر است برای جلوگیری از این اتفاق سرسیم اولیه را با سیم افشان اتصال دهید و از شیار قرقره بیرون بیاورید.

تذکر



مراحل عملی سیم‌پیچی ترانسفورماتور از لحظه ۱۱:۴۰ تا ۲۰

فیلم

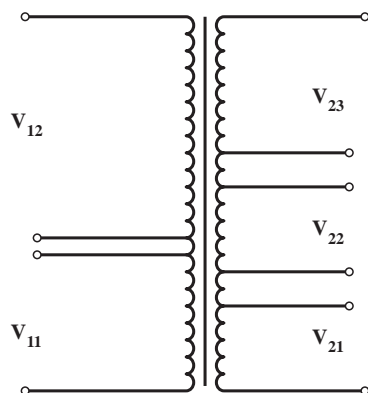


ترانسفورماتورهای با چند ورودی و خروجی

سیم پیچ اولیه ترانسفورماتورها ممکن است در شبکه‌های مختلف به ولتاژهای مختلف متصل شود. مثلاً در ولتاژهای V_{380} ، V_{220} ، V_{110} به کار گرفته می‌شود. همچنین ممکن است ولتاژهای مختلف V_{115} ، V_{137} ، V_{157} ، V_{177} ، V_{197} ، V_{247} ، V_{487} و V_{110} از خروجی ترانسفورماتورها دریافت شود. سیم پیچ‌های ثانویه ممکن است مستقل از هم یا مشترک باشند. (شکل ۳۹ و ۴۰)

فیلم

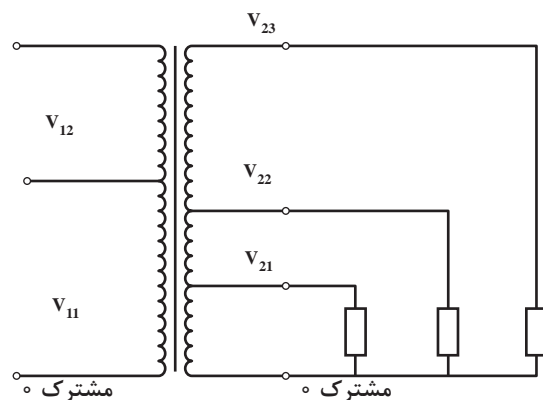
ترانسفورماتورهای چند سر از لحظه ۲۴ تا ۲۶:۴۰



شکل ۳۹- ترانسفورماتور با سیم پیچ‌های مجزا در اولیه و ثانویه

معمولاً از روش سیم پیچ‌های مشترک در ترانسفورماتورهای با ولتاژهای پایین کمتر استفاده می‌شود. همچنین ممکن است در یک ترانسفورماتور از سیم پیچ‌های ثانویه به صورت هم‌زمان و یا غیر هم‌زمان استفاده شود که این مسئله در محاسبات عملی ترانسفورماتور مؤثر است. به کارگیری روش سیم پیچی مستقل باعث افزایش حجم ترانسفورماتور می‌شود و بنابراین صرفه اقتصادی نیست (شکل ۳۹).

می‌توان تعداد دور سیم پیچ اولیه را برای بالاترین ولتاژ در اولیه و تعداد دور سیم پیچ ثانویه را نیز برای بیشترین ولتاژ ثانویه پیچیده و برای ولتاژهای دیگر، در دوره‌های معین سرسیم پیچ‌ها را خارج کرد (شکل ۳۶).

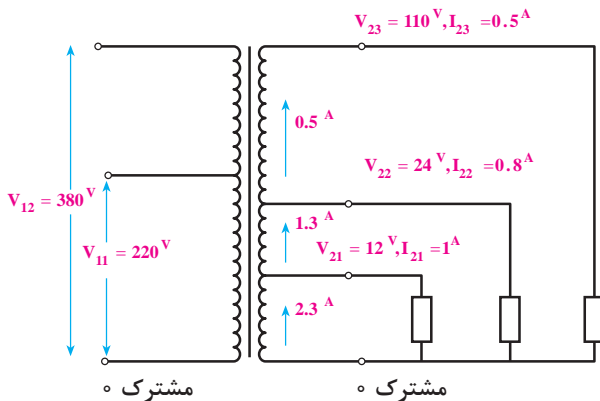


شکل ۴۰- ترانسفورماتور با سیم پیچ‌های مشترک در اولیه و ثانویه

قطر سیم پیچ را نیز می‌توان بر مبنای بیشترین جریانی که از سیم پیچ عبور می‌کند، انتخاب کرد و برای همه سیم پیچ‌های ثانویه یا اولیه یکی باشد اما چون جریان هر قسمت از سیم پیچ‌ها با قسمت‌های دیگر تفاوت دارد، بهتر است برای هر قسمت سیمی با قطر متفاوت پیچیده شود؛ مگر اینکه جریان‌ها بسیار نزدیک به هم باشند.

برای محاسبه قدرت ترانسفورماتورهایی که دارای

چندین ولتاژ در ثانویه هستند، در صورتی که از همه خروجی‌ها به طور هم‌زمان استفاده می‌شود، می‌توان از جمع همه قدرت‌های خروجی، قدرت ثانویه و از روی آن قدرت اولیه را به دست آورد. اما اگر از همه ولتاژهای ثانویه به طور هم‌زمان استفاده نشود، باید با بررسی حالت‌های ممکن بیشترین توان خروجی را انتخاب کرد و محاسبات را بر مبنای آن انجام داد.



شکل ۴۱- ترانسفورماتور چندسر

مثال ۶: شکل ۴۱ را در نظر بگیرید اگر از مصرف کننده ۱۲ ولتی، جریان یک آمپر و از مصرف کننده ۲۴ ولتی، جریان ۰/۸ آمپر و از مصرف کننده ۱۱ ولتی، جریان ۰/۵ آمپر عبور کند و تمام مصرف کننده ها نیز همزمان به ترانسفورماتور وصل شوند، توان کل خروجی برابر است با:

$$P_r = V_{r1} \times I_{r1} + V_{r2} \times I_{r2} + V_{r3} \times I_{r3}$$

$$P_r = 12 \times 1 + 24 \times 0/8 + 11 \times 0/5 = 86/27$$

قدرت سیم ها نیز برای قسمت اول (از صفر تا ۱۲ ولت) بر مبنای جریان $(1 + 0/8 + 0/5) = 2/3$ آمپر و برای قسمت دوم (از ۱۲ تا ۲۴ ولت) برای جریان $(0/8 + 0/5) = 1/3$ آمپر و برای قسمت سوم (از ۲۴ تا ۱۱۰ ولت) بر مبنای جریان ۰/۵ آمپر حساب می شود.

پیچیده شده و پس از بیرون آوردن یک سر خروجی، مجدداً برای دومین ولتاژ یعنی U_{12} سیم با قطر d_{12} و به اندازه $N_{12}(N_{11})$ دور پیچیده شود تا در هنگام وصل شدن به ولتاژ بیشتر، هر دو سیم پیچ (N_{11}) و $N_{12}(N_{11})$ با یکدیگر سری شوند و مجموع حلقه های آنها برابر با N_{12} شود. بدون ترتیب در مرحله قطر سیم نیز کمتر می شود. برای سیم پیچ ثانویه، ابتدا ولتاژها را از کم به زیاد مرتب کرده و برای ولتاژ U_{21} تعداد دور N_{21} و برای ولتاژ U_{22} و U_{23} ... تعداد دورهای N_{22} و N_{23} ... را محاسبه می کنیم و سپس، مانند طرف اولیه عمل می نماییم.

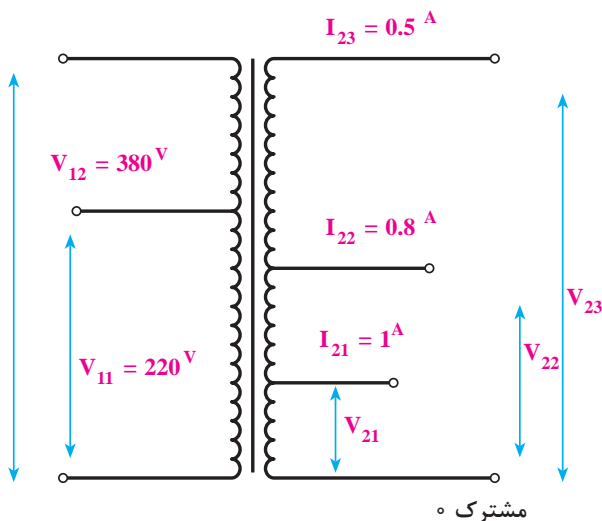
در عمل باید دقت کنیم که سیم پیچ های ثانویه همه در یک جهت پیچیده شوند تا ولتاژ آنها با یکدیگر جمع شوند.

برای توضیح بیشتر به بررسی و حل کامل مثال ذکر شده می پردازیم. سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور مورد نظر باید به ولتاژ ۲۲۰ ولت با ۳۸۰ ولت با فرکانس ۵۰ هرتز اتصال یابد و ثانویه آن نیز دارای سه خروجی ۱۲ ولت با جریان یک آمپر، ۲۴ ولت با جریان ۰/۸ آمپر و ۱۱۰ ولت با جریان ۰/۵ آمپر باشد. فرض می کنیم که از هر سه خروجی به طور

در این مثال، اگر فرض کنیم که از سه خروجی، تنها دو خروجی بتوانند به طور همزمان کار کنند، باید قدرت های خروجی را دو به دو با یکدیگر جمع کنیم و مقدار بزرگ تر را برای قدرت خروجی ترانسفورماتور منظور، در نظر بگیریم. بنابراین برای این ترانسفورماتور قدرت ثانویه $P_r = 74/278$ به دست می آید. قطر سیم نیز با بررسی جریان ها در شرایط مختلف پیدا می شود. به طوری که از قسمت اول سیم پیچ، حداکثر ۱/۸ آمپر و از قسمت دوم آن حداکثر جریان ۱/۳ آمپر و از قسمت سوم نیز جریان ۰/۵ آمپر عبور می کند. با توجه به چگالی جریان، می توان قطر سیم ها را مشخص کرد.

سطح مقطع آهن خالص و دور بر ولت را می توان پس از محاسبه قدرت ترانسفورماتور از طریق روابط قبلی به دست آورد.

تعداد دورهای اولیه و ثانویه به همان روش قبلی محاسبه می شود. لیکن در هنگام به دست آوردن درصد افت ولتاژ باید برای قسمت خروجی، قدرت همان قسمت را در جدول قرار دهیم و افت ولتاژ را پیدا کنیم. در هنگام سیم پیچی، ابتدا سیم با قطر d_{11} برای ولتاژ کمتر (یعنی U_{11}) و به اندازه N_{11} دور



شکل ۴۲- مقادیر ترانسفورماتور چندسر

همزمان استفاده شود.

حل این مثال را در ۹ مرحله توضیح می دهیم.

راه حل

مرحله اول : در این مرحله، معلومات مورد نیاز را مرتب کرده و شکل آن را رسم می کنیم (شکل ۴۲).

$$V_{11} = 220V \quad , \quad V_{12} = 380V$$

$$V_{21} = 12V \quad , \quad I_{21} = 1A$$

$$V_{22} = 24V \quad , \quad I_{22} = 0.8A$$

$$V_{23} = 110V \quad , \quad I_{23} = 0.5A$$

مرحله دوم : قدرت اولیه ترانسفورماتور را با توجه به اینکه خروجی ها به طور همزمان مورد استفاده قرار می گیرند، محاسبه می کنیم.

$$P_r = V_{21} \times I_{21} + V_{22} \times I_{22} + V_{23} \times I_{23}$$

$$P_r = 12 \times 1 + 24 \times 0.8 + 110 \times 0.5 = 86.2VA$$

همان طور که قبلاً گفتیم، ضریب بهره برای یک ترانسفورماتور با قدرت از ۲۰ ولت آمپر تا ۱۲۵ ولت آمپر حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد است. پس می توانیم برای این ترانسفورماتور ضریب بهره ۸۹ درصد انتخاب کنیم.

$$P_1 = \frac{P_r}{\eta}$$

هرگاه $P_{S1} = P_1$ و $P_{S2} = P_1$ در نظر گرفته شود، می توان نوشت :

$$P_{S1} = \frac{P_{S2}}{\eta}$$

$$P_{S2} = \frac{86.2}{0.89} = \frac{96}{0.85} = 97 \text{ ولت آمپر}$$

مرحله سوم : سطح مقطع واقعی هسته را با توجه به قدرت P_{S1} به دست می آوریم.

$$S_{Fe} = 1/2 \sqrt{P_{S1}} = 1/2 \sqrt{97} = 11.8 \text{ cm}^2$$

سطح مقطع ظاهری هسته برابر است با :

$$S'_{F_e} = \frac{S_{F_e}}{K_{F_e}} = \frac{11/8}{0.9} = 13/11 \text{ cm}^2$$

مرحله چهارم : دور بر ولت برای این ترانسفورماتور برابر است با :

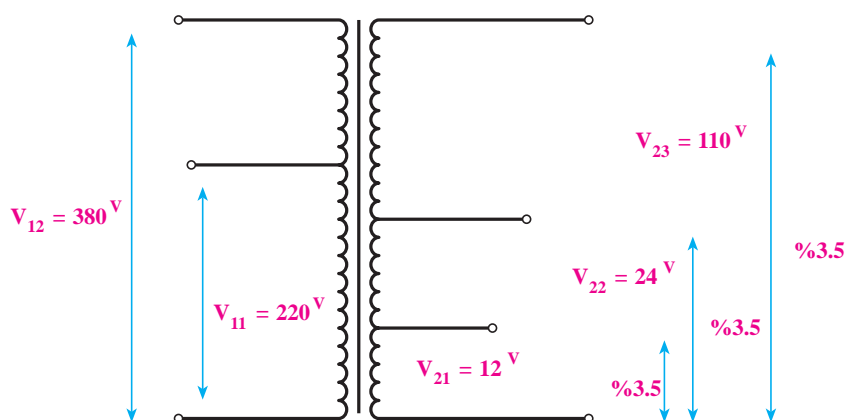
$$N_V = \frac{37/54}{S} = \frac{37/54}{11/8} = 3/18 \frac{\text{دور}}{\text{ولت}}$$

مرحله پنجم : برای تعیین دوره‌های اولیه، باید ابتدا درصد افت ولتاژ را به دست آوریم. در جدول ۲ درصد افت ولتاژ برای قدرت ۷۵ ولت آمپر ۱۰ درصد و برای قدرت ۱۰۰ ولت آمپر ۹ درصد است؛ یعنی با افزایش ۲۵ ولت آمپر به قدرت ترانسفورماتور یک درصد از افت ولتاژ کاسته شده است. قدرت خروجی ترانسفورماتور مورد نظر ۸۶ ولت آمپر است، یعنی، از ۷۵ ولت آمپر ۱۱ = (۸۶ - ۷۵) ولت آمپر بیشتر است. با یک تناسب ساده، می توان مقدار کاهش افت ولتاژ را از ۱ درصد به دست آورد که برابر با $0.44 = \frac{11 \times 1}{25}$ می شود. بنابراین، افت ولتاژ برای این ترانسفورماتور برابر با $9/56 = (10 - 0.44)$ درصد می شود. از این مقدار با توجه به نسبت تقریبی مقاومت سیم پیچ‌های اولیه و ثانویه، حدود ۶ درصد برای اولیه و ۳/۵ درصد برای ثانویه منظور می کنیم. بنابراین، تعداد دور اولیه برای هر ولتاژ جداگانه برابر است با :

$$N_{11} = n \times V_{11} (1 - \% \Delta V_1) = 3/18 \times 220 (1 - 0.06) = 658 \text{ دور}$$

$$N_{12} = n \times V_{12} (1 - \% \Delta V_1) = 3/18 \times 380 (1 - 0.06) = 1135/9 \cong 1136 \text{ دور}$$

سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور دارای دو سیم پیچ سری است که قسمت اول ۶۵۸ دور و قسمت دوم ۴۷۸ = (۱۱۳۶ - ۶۵۸) دور می باشد.



شکل ۴۳- درصد افت ولتاژ در ترانسفورماتور

مرحله ششم: چون از هر سه خروجی ترانسفورماتور به طور هم زمان استفاده می شود، درصد افت ولتاژ برای هر سه ولتاژ از سیم مشترک تا هر یک از خروجی های ۱۲ و ۲۴ و ۱۱۰ ولت، ۳/۵ درصد برآورد می شود که در شکل ۳۹ مشخص شده است بنابراین، تعداد دور ثانیه برای هر ولتاژ جداگانه برابر است با:

$$N_{11} = n \times V_{11} (1 - \% \Delta V_1) = 3/18 \times 12 \times (1 + \frac{3/5}{100}) = 38$$

$$N_{22} = n \times V_{22} (1 - \% \Delta V_2)$$

$$N_{22} = 3/18 \times 24 \times (1 + \frac{3/5}{100}) \cong 77 \text{ دور}$$

$$N_{33} = n \times V_{33} (1 - \% \Delta V_3) = 3/18 \times 110 \times (1 + \frac{3/5}{100}) = 362 \text{ دور}$$

بدین ترتیب، برای ۱۲ ولت باید ۳۸ دور و برای ۲۴ ولت ۳۹ = (۷۷-۳۸) دور و برای ۱۱۰ ولت = (۳۶۲-۷۷) دور ۲۸۵ دور سیم به صورت سری پیچیده شود.

مرحله هفتم: ابتدا قطر سیم را برای سیم های اولیه حساب می کنیم. اگر اولیه را به ۲۲۰ ولت وصل کنیم، جریان آن برابر است با:

$$I_{11} = \frac{P_1}{V_{11}} = \frac{97}{220} = 0/44A$$

و اگر آن را به ۳۸۰ ولت وصل کنیم، جریان آن برابر خواهد شد با:

$$I_{12} = \frac{P_1}{V_{12}} = \frac{97}{380} = 0/25A$$

چگالی جریان برای قدرت ۵۰ تا ۱۰۰ ولت آمپر برابر با $I = 3/5 \frac{A}{mm^2}$ است. لذا قطر سیم قسمت اول برابر می شود با:

$$d_{11} = 1/13 \sqrt{\frac{I_{11}}{J}} = 1/13 \sqrt{\frac{0/44}{3/5}} = 0/40mm$$

$$d_{12} = 1/13 \sqrt{\frac{I_{12}}{J}} = 1/13 \sqrt{\frac{0/25}{3/5}} = 0/30mm$$

بنابراین، با توجه به تعداد دورهای اولیه باید ۶۵۸ دور از سیم ۰/۴۰ و به دنبال آن ۴۷۸ دور سیم ۰/۳۰ پیچیده شود.

مرحله هشتم: چگالی جریان برای ثانویه نیز برابر با $\frac{A}{\text{mm}^2}$ $\frac{3}{5}$ است؛ بنابراین، قطر سیم برای قسمت اول سیم پیچ که هر سه جریان از آن عبور می کند، برابر است با:

$$d_{r1} = 1/13 \sqrt{\frac{I_{r1} + I_{r2} + I_{r3}}{J}}$$

$$d_{r1} = 1/13 \sqrt{\frac{1 + 0/8 + 0/5}{3/5}} = 0/91 \text{ mm}$$

در اینجا نیز با تقریب سیم $0/90$ را انتخاب می کنیم. از قسمت دوم سیم پیچ ثانویه مجموع جریان I_{r2} و I_{r3} عبور می کند. بنابراین قطر آن برابر است با:

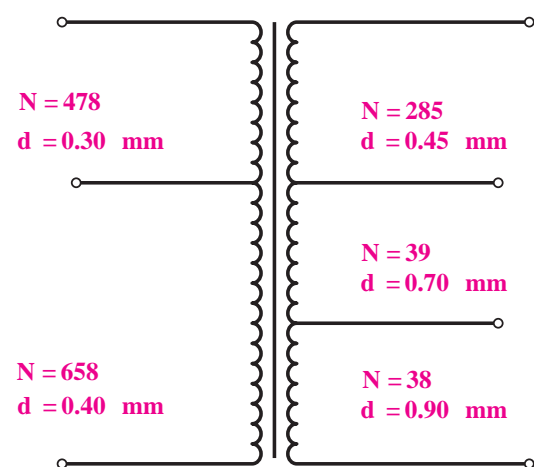
$$d_{r2} = 1/13 \sqrt{\frac{I_{r2} + I_{r3}}{J}}$$

$$d_{r2} = 1/13 \sqrt{\frac{0/8 + 0/5}{3/5}} = 0/68 \text{ mm}$$

برای این قسمت نیز با توجه به جدول اندازه های قطر سیم استاندارد $0/70$ را انتخاب می کنیم. از قسمت سوم سیم پیچ ثانویه، فقط جریان I_{r3} عبور می کند. بنابراین قطر آن برابر است با:

$$d_{r3} = 1/13 \sqrt{\frac{I_{r3}}{J}}$$

$$d_{r3} = 1/13 \sqrt{\frac{0/5}{3/5}} = 0/43 \text{ mm}$$



شکل ۴۴- ترانسفورماتور با چند سر ورودی و

چند سر خروجی

این مقدار از جدول $0/45$ mm به دست می آید.
مرحله نهم: در این مرحله، بهتر است برای کاهش خطا در محاسبه، نتایج به دست آمده را برای پیچیدن ترانسفورماتور بر روی شکل بنویسیم و با توجه به آن، نوع ورق ترانسفورماتور را انتخاب کنیم.
 نتایج محاسبات لازم برای سیم پیچی هر قسمت از ترانسفورماتور مورد نظر، در شکل ۴۴ نشان داده شده است.

پس از مشخص کردن کامل تعداد دور سیم ها و قطر آن، باید سطح پنجره لازم برای آنها را به دست آورد و ورق ترانسفورماتور استاندارد را انتخاب کرد. سطح

مورد نیاز برای هر سیم پیچ به قرار زیر است.

$$d_{11} = 0.4 \xrightarrow{\text{از جدول}} 45 \text{ دور} \Rightarrow F_{11} = \frac{658}{45} = 14.6 \text{ cm}^2$$

$$d_{12} = 0.3 \xrightarrow{\text{از جدول}} 77 \text{ دور} \Rightarrow F_{12} = \frac{478}{77} = 6.2 \text{ cm}^2$$

به همین ترتیب F_{21} و F_{22} و F_{23} به دست می آید و در نتیجه سطح کل مورد نیاز برابر است با

$$F_T = 1.35 \times F$$

$$F = F_{11} + F_{12} + F_{21} + F_{22} + F_{23}$$

$$F = 14.6 + 6.2 + 38 + 24 + 77 = 159.8 \text{ cm}^2$$

$$F_T = 1.35 \times 159.8 = 215.7 \text{ cm}^2$$

با مراجعه به جدول ابعاد هسته ورق (EIV8) که پنجره آن دارای ابعاد $e = 3/9$ و $g = 1/3$ سانتی متر است، به دست می آید.

$$g \times e \geq 4/68$$

$$3/9 \times 1/3 = 0.111 > 4/68 \text{ cm}^2$$

پس از پیدا کردن نوع ورق، باید قرقره را مطابق روش های گذشته طراحی کرد.

مثال ۶:

ترانسفورماتور تک فاز با ولتاژهای اولیه 380 V و 220 V و ولتاژهای ثانویه 12 V و 5 A و 6 A و 1 A که سیم پیچ های آن مستقل از هم بوده و هم زمان مورد استفاده قرار می گیرند، مورد نیاز است. هسته این ترانسفورماتور از ورق های آب دیده با چگالی 10000 گوس و ضخامت ورق ها 0.5 میلی متر ساخته می شود. فرکانس شبکه 50 هرتز است. تمام مراحل طرح این ترانسفورماتور را انجام دهید.

حل:

$$P_{21} = 12 \times 5 = 60 \text{ V.A} \quad , \quad P_{22} = 6 \times 1 = 6 \text{ V.A}$$

$$P_2 = 60 + 6 = 66 \text{ کار هم زمان سیم های ثانویه}$$

$$S = 1.2 \sqrt{66} = 9.75 \text{ cm}^2$$

بودمان سوم: سیم پیچی ترانسفورماتور

$$N_V = \frac{45}{S} = \frac{45}{9/75} = 4/62$$

$$N_{11} = 220 \times 4/62 = 10.16 \text{ دور} \rightarrow N_{12} = N_{11} + (380 - 220) \times 4/62 = 10.16 + 739/2 = 1755 \text{ دور}$$

$$P = 5 \rightarrow \Delta V = 0/2$$

$$P = 10 \rightarrow \Delta V = 0/17$$

چون $P = 6V.A$ در جدول نیست از تناسب افت ولتاژ آن را به دست می آوریم:

$$10 - 5 = 5 \rightarrow 0/2 - 0/17 = 0/03$$

$$6 - 5 = 1 \rightarrow \frac{5}{1} = \frac{0/3}{x} \rightarrow X = \frac{1 \times 0/03}{5} = 0/006 \rightarrow \Delta V = 0/2 - 0/006 = 0/194$$

$$P = 10 \rightarrow \Delta V = 0/12$$

$$P = 25 \rightarrow \Delta V = 0/10$$

$$75 - 50 = 25 \rightarrow \Delta V = 0/12 - 0/10 = 0/02$$

$$66 - 50 = 16 \rightarrow \Delta V = X \rightarrow \frac{25}{16} = \frac{0/02}{X} \rightarrow X = \frac{16 \times 0/02}{25} = 0/0128$$

$$\Delta V = 0/12 - 0/0128 = 0/1072$$

$$N_{r1} = 6 \times 4/62 \times (1 + 0/194) = 33 \text{ دور}$$

$$N_{r2} = 12 \times 4/62 \times (1 + 0/1072) = 62 \text{ دور}$$

$$P_r = 66V.A \rightarrow P_1 = \frac{P_r}{\eta} = \frac{66}{0/9} = 73V.A \rightarrow I_1 = \frac{73}{220} = 0/33A \text{ حداکثر جریان}$$

$$J = 3/5 \frac{A}{mm^2} \rightarrow A_{11} = \frac{0/33}{3/5} = 0/09mm^2 \rightarrow d_{11} = 1/13 \sqrt{0/09} = 0/34mm$$

$$EI84 \text{ فضای موجود در} = \frac{51/1 - 32/6}{2} \times 41 = 3/79$$

بنابراین $EI84$ برای ترانسفورماتور فوق مناسب نمی باشد و فرقه مناسب $EI96a$ می باشد که دارای ابعاد زیر است.

$$a = 62/4mm \quad b = 32/6mm \quad h = 37/5mm \quad L = 50mm$$

$$A_F = \frac{62/4 - 32/6}{2} \times 50 = 745mm^2 = 7/45cm^2 > 6/25 \text{ کفایت سطح را دارد}$$



هدف: ساخت ترانسفورماتور تک فاز دارای چند خروجی با سیم پیچ مشترک

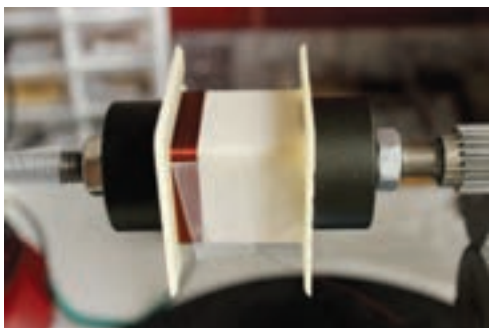
وسایل و مواد لازم

- قرقره ترانسفورماتور از نوع EI۴۸ یک عدد
- ورق EI۶۶ به ضخامت ۰/۵ mm به تعداد ۶۰ عدد
- سیم لاکه ۰/۲۰ mm و ۰/۸۰ mm
- دستگاه بوبین پیچ
- سیم چین
- دم باریک
- سیم افشان ۱/۵ و ۱
- وارنیش نمره ۱،۲،۲/۵
- هویه و دریل
- لحیم و ژاک (جای فیش) چهار عدد
- کاغذ پرشمان ۰/۲۰ و ۰/۱۵
- چسب نواری
- کاغذ سنباده

۱- با توجه به مشخصات الکتریکی داده شده و بهره گرفتن از ورق هسته مرغوب با چگالی بالا و فرکانس کاری ۵۰ هرتز تعداد دور سیم پیچ ها، قطر سیم های اولیه و ثانویه، ابعاد و نوع ورق EI را با احتساب افت ولتاژ مناسب در سمت اولیه و ثانویه به دست آورده و سپس به کمک مربی خود اقدام به پیچیدن آن نمایید.

$$V_{11} = 220V, \quad V_{12} = 110V, \quad V_{21} = 6V, \quad V_{22} = 9V, \quad V_{23} = 12V$$

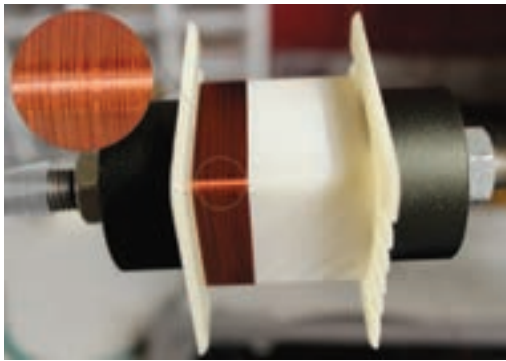
$$I_{21} = 5A, \quad I_{22} = 4A, \quad I_{23} = 3A, \quad f = 50Hz, \quad B = 12000Gs$$



شکل ۴۵- سیم پیچی اولیه

۲- برای پیچیدن سیم روی قرقره لازم است تا ابتدا مغزی چوبی ساخته شده را به داخل قرقره هدایت کنید و سپس مجموعه را روی بوبین پیچ سوار کرده و اقدام به سیم پیچی کنید.

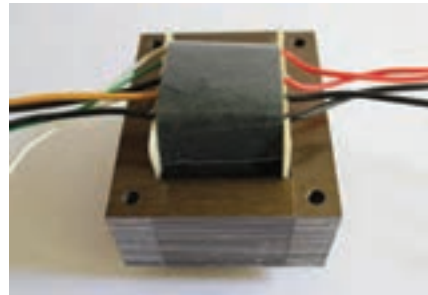
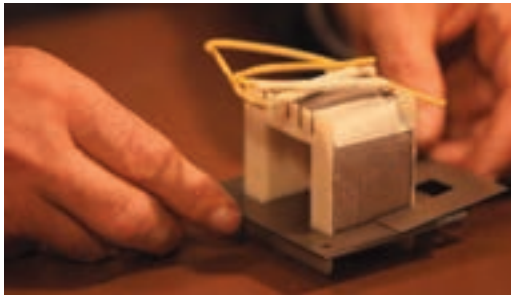
۳- سیم پیچ اولیه را مرتب روی قرقره ببیچید و پس از هدایت سرسیم ها به ژاک مربوطه روی آن را با کاغذ پرشمان ۰/۱۵ یا ۰/۱۵ بیوشانید و با چسب کاغذی محکم کنید سپس سیم ثانویه را با تعداد



شکل ۴۶- سیم پیچی منظم

دور لازم بپیچید و پس از هدایت سرهای سیم ثانویه ژاک مربوطه، روی سیم‌ها را با کاغذ پرشمان $0/20$ پوشانده با چسب محکم کنید.
۴- با راهنمایی مربی کارگاه ورق های EI را مطابق شکل ۴۷ به صورت یک در میان در داخل قرقره قرار دهید و درخاتمه پیچ ورق‌ها را محکم کنید.

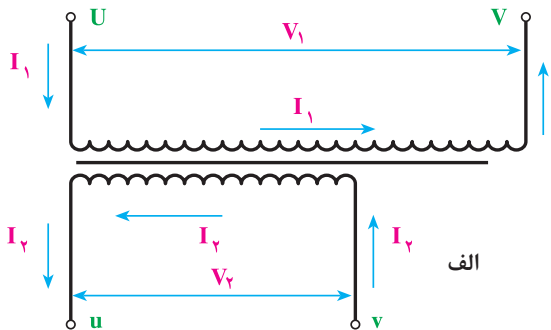
۵- پس از سیم‌پیچی با نظارت مربی خود اولاً: ولتاژ اولیه و ثانویه را به‌ازای یک بار مناسب اندازه‌گیری کنید.



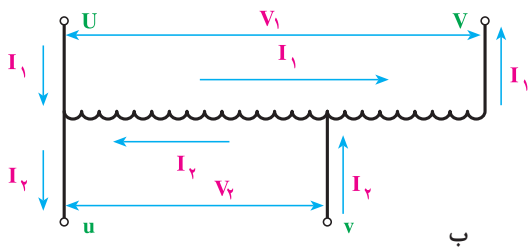
شکل ۴۷- هسته چینی

۶- آزمایش بی باری و اتصال کوتاه ترانسفورماتور ساخته شده را انجام داده و تعیین مقدار تلفات هسته و سیم‌پیچی راندمان ترانسفورماتور را نیز محاسبه کنید.

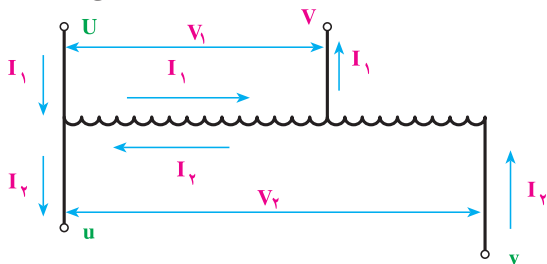
اتوترانسفورماتور



در مواردی که از ترانسفورماتور به‌عنوان وسیله‌ای حفاظتی (ترانسفورماتور جداکننده و ترانسفورماتور ولتاژ کم) استفاده نمی‌شود یا اصولاً الزامی برای جدا بودن سیم پیچ‌های اولیه و ثانویه آن وجود ندارد، مانند ترانسفورماتورهای راه‌اندازی موتورهای آسنکرون می‌توان از اتوترانسفورماتور استفاده کرد. به‌علت صرفه‌جویی در حجم آهن هسته و همچنین مقدار سیم مصرفی، به این ترانسفورماتورها، ترانسفورماتور صرفه‌ای نیز گفته می‌شود.
تفاوت ترانسفورماتورهای معمولی با اتوترانسفورماتور



شکل ۴۸- ترانسفورماتور معمولی



شکل ۴۹- اتو ترانسفورماتور و ترانسفورماتور

در این است که ترانسفورماتورهای معمولی دو سیم پیچ اولیه و ثانویه مجزا از یکدیگر دارند اما در اتوترانسفورماتور سیم پیچ مربوط به ولتاژ کمتر حذف شده است و به جای آن از قسمتی از سیم پیچ مربوط به ولتاژ بیشتر استفاده می شود.

در شکل ۴۸ (الف) یک ترانسفورماتور با دو سیم پیچ جداگانه و در شکل ۴۸ (ب) همان ترانسفورماتور با سیم پیچ های مشترک نشان داده شده است. در این شکل، ولتاژ اولیه از ولتاژ خروجی بیشتر است. در شکل ۴۹ (پ) اتوترانسفورماتوری دیده می شود که ولتاژ ثانویه آن از ولتاژ اولیه اش بیشتر است. در ترانسفورماتورهای صرفه ای، دو سیم پیچ از نظر الکتریکی با یکدیگر در ارتباط هستند و لذا نمی توان

از آنها به عنوان ترانسفورماتور حفاظت حتی در ولتاژهای کم استفاده کرد.

قدرتی که هسته آهن ترانسفورماتورهای صرفه ای بر مبنای آن حساب می شود با قدرت خروجی یا ورودی تفاوت دارد و از آنها کمتر است. محاسباتی که در اینجا بیان می شود تنها برای به دست آوردن قدرتی است که برای محاسبه هسته باید از آن استفاده کرد. به این قدرت در اصطلاح «قدرت تیپ» ترانسفورماتور می گویند و آن را با P_T یا P_{ST} نشان می دهند. قدرت خروجی ترانسفورماتور صرفه ای برابر است با $P_r = V_r \times I_r$ که آن را می توان با قدرت ورودی تقریباً برابر گرفت.

همان طور که در شکل ۴۸ (ب) مشاهده می شود، از قسمت $v-u$ سیم پیچ که به بار وصل می شود و دارای اختلاف پتانسیل V_r است جریان $I_2 - I_1$ و در جهت I_r عبور می کند. در حالی که از قسمت $v - V$ که دارای اختلاف پتانسیل $V_1 - V_r$ است، جریان I_1 عبور می کند.

بنابراین قسمت $v-u$ سیم پیچ که از آن به عنوان ثانویه نیز استفاده می شود، دارای ظاهری $V_r I_r - I_1$ و باقی مانده سیم پیچ یعنی قسمت $u-V$ دارای قدرت ظاهری $(V_1 - V_r) \times I_1$ است. این دو قدرت با یکدیگر برابرند و هسته آهن ترانسفورماتور بر مبنای یکی از آنها محاسبه می شود. بنابراین :

$$P_{ST} = V_r(I_r - I_1) = I_1(V_1 - V_r)$$

$$P_{Sr} = V_r \times I_r$$

$$\frac{P_{ST}}{P_{Sr}} = \frac{V_r(I_r - I_1)}{V_r \times I_r} \Rightarrow P_{ST} = P_{Sr} \frac{(I_r - I_1)}{I_r}$$

با استفاده از رابطه $P_r \cong P_1 = V_1 \times I_1$ نیز می توان نوشت:

$$\frac{P_{ST}}{P_{S2}} = \frac{I_1(V_1 - V_2)}{V_1 \times I_1} \Rightarrow P_{ST} = P_{S2} \frac{(V_1 - V_2)}{V_1}$$

اگر V_1 از V_2 بزرگتر باشد (مانند شکل الف) رابطه بالا را به صورت زیر می توان نوشت.

$$P_{ST} = P_{S2} \frac{(V_1 - V_2)}{V_1} \Rightarrow P_{ST} = P_{S2} \frac{(V_H - V_L)}{V_H}$$

اگر V_1 از V_2 کوچک تر باشد (مانند شکل ب) رابطه بالا به صورت زیر درمی آید.

$$P_{ST} = P_{S2} \frac{V_2 - V_1}{V_2} \Rightarrow P_{ST} = P_{S2} \frac{V_H - V_L}{V_H}$$

یعنی در ترانسفورماتور صرفه ای، نسبت قدرت تیپ به قدرت ورودی برابر نسبت تفاوت اختلاف سطحها به اختلاف سطح بزرگتر است. بنابراین، هرچه تفاوت دو ولتاژ کمتر باشد، قدرت تیپ نیز کاهش می یابد. در نتیجه، برای ساختن ترانسفورماتورهایی که تفاوت ولتاژ اولیه و ثانویه آنها کم است، استفاده از این روش بسیار با صرفه خواهد بود؛ زیرا علاوه بر قیمت ارزان، تلفات الکتریکی آن نیز از ترانسفورماتور با دو سیم پیچ جداگانه کمتر خواهد شد.

با مشخص کردن قدرت تیپ ترانسفورماتور و محاسبه سطح مقطع آهن از روی آن، سایر محاسبات را می توان براساس روش گذشته انجام داد. با این تفاوت که در اینجا برای پیدا کردن چگالی جریان از جدول توان به جای P_1 ، قدرت تیپ P_T ، در نظر گرفته می شود.

مثال ۷: در یک اتو ترانسفورماتور با ولتاژ خروجی 150 ولت قدرت 3 کیلوولت آمپر و ولتاژ ورودی 220 ولت، قدرتی که باید برای محاسبه سطح مقطع آهن (قدرت تیپ) به دست آید برابر است با:

$$P_{S2} = 3 \text{ KVA} = 3000 \text{ VA}$$

$$P_{ST} = P_{S2} \left(\frac{V_1 - V_2}{V_1} \right) \Rightarrow P_{ST} = 3000 \left(\frac{220 - 150}{220} \right) = 954$$

جریان های اولیه و ثانویه آن نیز با فرض $P_{S1} = P_{S2}$ برابر است با:

$$I_1 = \frac{P_{S1}}{V_1} = \frac{3000}{220} = 13.63 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{P_{S2}}{V_2} = \frac{3000}{150} = 20 \text{ A}$$

$$S_{fe} = S = 1/2 \sqrt{954} = 37 \text{ cm}^2$$

بدین ترتیب، این اتو ترانسفورماتور دارای سطح مقطع آهن

است و سطح مقطع سیم قسمت مشترک سیم پیچ اولیه و ثانویه باید بر مبنای جریان $(6/37) = (13/63 - 20)$ آمپر و قسمت بعدی که فقط جریان اولیه از آن عبور می کند بر مبنای $13/63$ آمپر محاسبه می شود. با دقت در این مثال، متوجه می شوید که استفاده از این نوع ترانسفورماتور خصوصاً در حالتی که اختلاف ولتاژ

اولیه و ثانویه کم باشد، تا چه حد مقرون به صرفه است. برای ساختن ترانسفورماتورهای قابل تنظیم نیز از این روش استفاده می شود.

فیلم



نمایش اتو ترانسفورماتور از لحظه "۲۶:۴۵" تا "۲۸:۲۳"

تعیین دور سیم پیچ اولیه و ثانویه

برای محاسبه تعداد دور سیم پیچ های اولیه و ثانویه در اتوترانسفورماتورها مشابه ترانس های معمولی از همان روابط قبلی می توان استفاده کرد.

مثال ۸: اتوترانسفورماتوری به مشخصات $V_1 = 220V$ - $V_2 = 110V$ به جریان خروجی $10A$ آمپر مورد نیاز است این دستگاه در شبکه با فرکانس $50Hz$ هرگز کار می کند و هسته آن از جنس مرغوب با چگالی میدان 12000 گوس ساخته می شود، مراحل طراحی آن را انجام دهید.

حل:

$$V_1 = 220V, \quad V_2 = 110V, \quad B_m = 12000Gs, \quad f = 50Hz$$

$$P_2 = V_2 \times I_2 = 110 \times 10 = 1100 \quad VA$$

$$P_T = \frac{V_H - V_L}{V_H} \times P_2 = \frac{220 - 110}{220} \times 1100 = 550 \quad VA$$

$$S = 1/2 \sqrt{P_T} = 1/2 \sqrt{550} = 28/14 cm^2$$

$$N_V = \frac{37/5}{S} = \frac{37/5}{28/14} = 1/332 \quad \text{دور بر ولت}$$

$$N_1 = V_1 \times N_V = 220 \times 1/332 = 293 \quad \text{دور}$$

جدول افت ولتاژ در اتوترانسفورماتورها

توان تیپ VA	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰
ΔV به درصد	۱۰	۸/۵	۷/۵	۶	۵	۴/۵	۴	۳/۷۵	۳/۵	۳/۲۵	۳	۲	۱

$\Delta V = 3\%$ از جدول

$$N_r = V_r \times N_v \times (1 + \Delta V) = 110 \times 1 / 332 \times (1 + 0.03) = 151 \text{ دور}$$

$$N_s = N_1 - N_r = 293 - 151 = 142 \text{ سیم پیچ سری}$$

محاسبه قطر سیم

$$J = 2 \frac{A}{\text{mm}^2}$$

به علت ناچیز بودن افت ولتاژ در اتوترانسفورماتورها آنها را تقریباً ایده آل فرض می کنند.

$$I_r = 10 \text{ A} \rightarrow \frac{I_1}{I_r} = \frac{V_r}{V_1} \rightarrow I_1 = \frac{V_r}{V_1} \times I_r = \frac{110}{220} \times 10 = 5 \text{ A}$$

$$I_c = I_r - I_1 = 10 - 5 = 5 \text{ A}$$

$$P_1 = P_r = 1100 \text{ V.A}$$

جریان سیم مشترک و سیم پیچ سری با هم برابر هستند؛ بنابراین قطر سیم آنها برابر است.

$$A_s = A_c = \frac{5}{J} = \frac{5}{2} = 2.5 \text{ mm}^2 \rightarrow d_s = d_c = 1/13 \sqrt{2/5} = 1/78 \text{ mm} = 1/80 \text{ mm}$$

تعیین ابعاد قرقره

$$EI = EI_{50} \rightarrow f = 50 \text{ mm} \quad EI < 30\sqrt{S} = 30\sqrt{28/14} = 159 \text{ mm}$$

$$\text{ضخامت هسته} \frac{S}{f} = \frac{2814}{50} = 56/28 \rightarrow \text{ضخامت ظاهری هسته} = 1/1 \times 56/28 = 62/9 \text{ mm}$$

بررسی فضای لازم

از جدول مشخصات سیم های لاکه مشخص است که در سانتی متر مربع 18 دور سیم 1/80 جای می گیرد.

$$A_1 = \frac{151}{18} = 8/39 \text{ cm}^2 \rightarrow A_r = \frac{141}{18} = 7/83 \text{ cm}^2 \rightarrow A_F = 1/35(8/39 + 7/83) = 21/9 \text{ cm}^2$$



نیمه تجویزی

هدف : ساخت اتوترانسفورماتور تک فاز

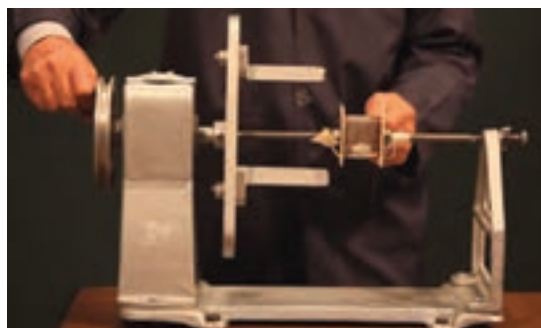
وسایل و مواد لازم

- قرقره ترانسفورماتور از نوع EI۴۸ یک عدد
- ورق EI۶۶ به ضخامت ۰/۵ mm به تعداد ۶۰ عدد
- سیم لاکه ۰/۰۲mm و ۰/۸۰mm
- دستگاه بوبین پیچ
- سیم چین
- دم باریک
- سیم افشان ۱/۵ و ۱
- وارنیش نمره ۲/۵، ۲، ۱
- هویه و دریل
- لحیم و ژاک (جای فیش) چهار عدد
- کاغذ پرشمان ۰/۲۰ و ۰/۱۵
- چسب نواری
- کاغذ سنباده

۱- با توجه به مشخصات الکتریکی داده شده و بهره گرفتن از ورق هسته مرغوب با چگالی بالا و فرکانس کاری ۵۰ هرتز تعداد دورسیم پیچها، قطر سیمهای اولیه و ثانویه، ابعاد و نوع ورق EI را با احتساب افت ولتاژ مناسب در سمت اولیه و ثانویه به دست آورده و سپس به کمک مربی خود اقدام به پیچیدن آن نمایید.

$$V_{11} = 110V \quad , \quad V_{12} = 220V \quad , \quad I_r = 8A$$

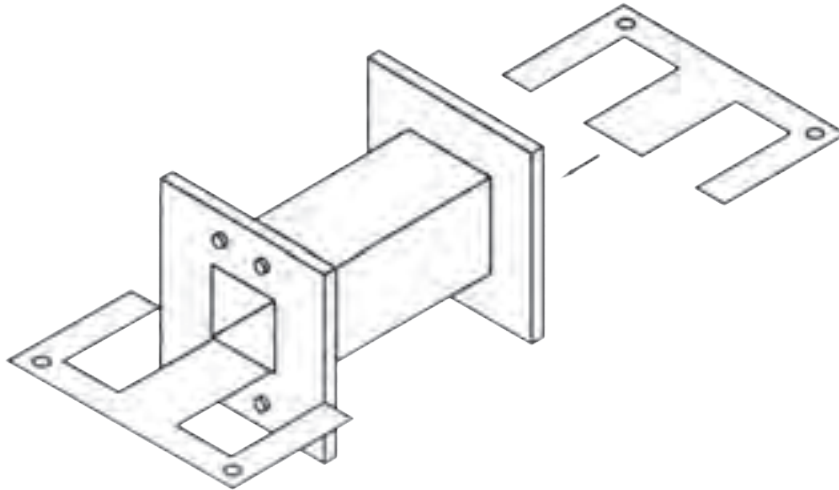
$$V_{21} = 220V \quad , \quad V_{22} = 240V \quad , \quad f = 50Hz \quad , \quad B = 12000Gs$$



۲- برای پیچیدن سیم روی قرقره لازم است تا ابتدا مغزی چوبی ساخته شده را به داخل قرقره هدایت کنید و سپس مجموعه را روی بوبین پیچ سوار کرده و اقدام به سیم پیچی کنید.

شکل ۵۰- سیم پیچی با نوع دیگر بوبین پیچ

۳- سیم پیچ اولیه را مرتب روی قرقره بپیچید و پس از هدایت سرسیم‌ها به ژاک مربوطه روی آن را با کاغذ پرشمان ۰/۱۵ یا ۰/۱ پوشانید و با چسب کاغذی محکم کنید سپس سیم ثانویه را با تعداد دور لازم بپیچید و پس از هدایت سرهای سیم ثانویه ژاک مربوطه، روی سیم‌ها را با کاغذ پرشمان ۰/۲۰ پوشانده با چسب محکم کنید.



شکل ۵۱- جازدن هسته

- ۴- با راهنمایی مربی کارگاه ورق‌های EI را مطابق شکل به صورت یک در میان در داخل قرقره قرار دهید و در خاتمه پیچ ورق‌ها را محکم کنید.
- ۵- پس از سیم پیچی با نظارت مربی خود ولتاژ اولیه و ثانویه را به ازای یک بار مناسب اندازه گیری کنید.
- ۶- آزمایش بی باری و اتصال کوتاه ترانسفورماتور ساخته شده را انجام داده و تعیین مقدار تلفات هسته و سیم پیچی راندمان ترانسفورماتور را نیز محاسبه کنید.

ارزشیابی شایستگی سیم پیچی ترانسفورماتور

شرح کار: محاسبات ترانسفورماتور یک فاز سیم پیچی ترانسفورماتور یک فاز یک ورودی، یک خروجی سیم پیچی ترانسفورماتور یک فاز یک ورودی، چند خروجی سیم پیچی اتوترانسفورماتور			
استاندارد عملکرد: سیم پیچی ترانسفورماتور با رعایت موارد ایمنی در کار و استفاده از ابزار			
شاخص ها: سیم پیچی ترانسفورماتور یک فاز (دو سر و چند سر خروجی) سیم پیچی اتوترانسفورماتور استفاده صحیح از ابزار برای اتصالات و رعایت ایمنی			
شرایط انجام کار و ابزار و تجهیزات:			
شرایط: فضای مناسب - ابزار مناسب - مدت زمان متناسب با حجم کار ابزار و تجهیزات: ابزار سیم پیچی - سیم لاکه - قرقره وهسته - کولیس ومیکرومتر- مولتی متر- میز تست و اندازه گیری			
معیار شایستگی:			
ردیف	مرحله کار	حداقل نمره قبولی از ۳	نمره هنرجو
۱	سیم پیچی ترانسفورماتور یک فاز یک ورودی - یک خروجی	۲	
۲	سیم پیچی ترانسفورماتور یک فاز یک ورودی - چند خروجی	۱	
۳	سیم پیچی اتوترانسفورماتور	۱	
	شایستگی های غیر فنی، ایمنی، بهداشت، توجهات زیست محیطی و نگرش: کسب اطلاعات کارتیمی مسئند سازی ویژگی شخصیتی	۲	
	میانگین نمرات		*

* حداقل میانگین نمرات هنرجو برای قبولی و کسب شایستگی، ۲ می باشد.