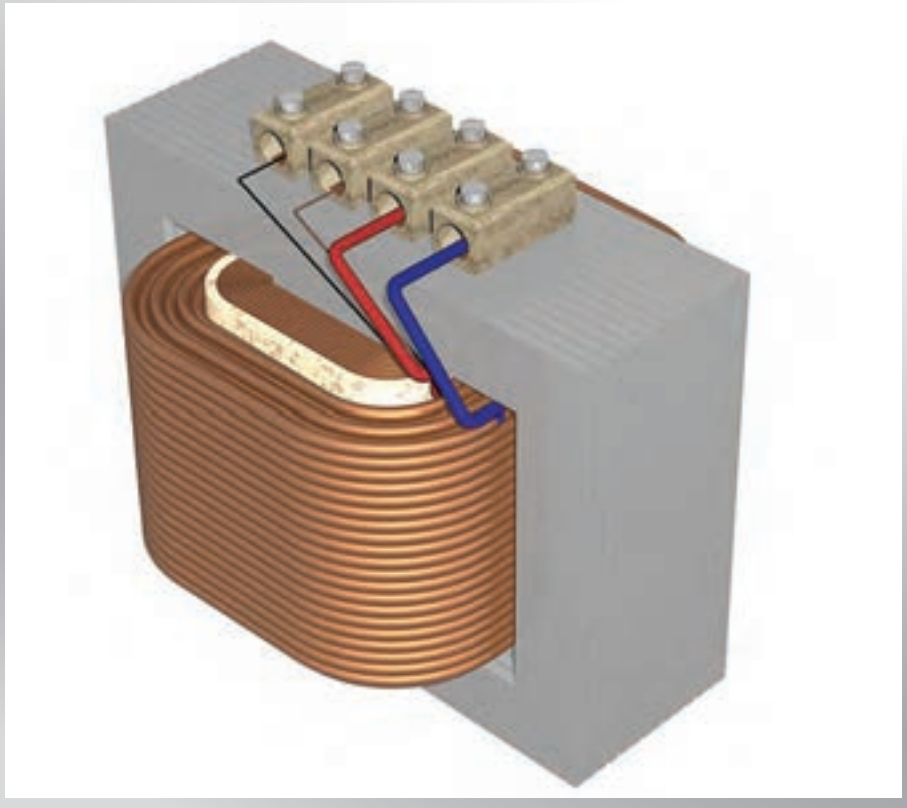
۱

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.

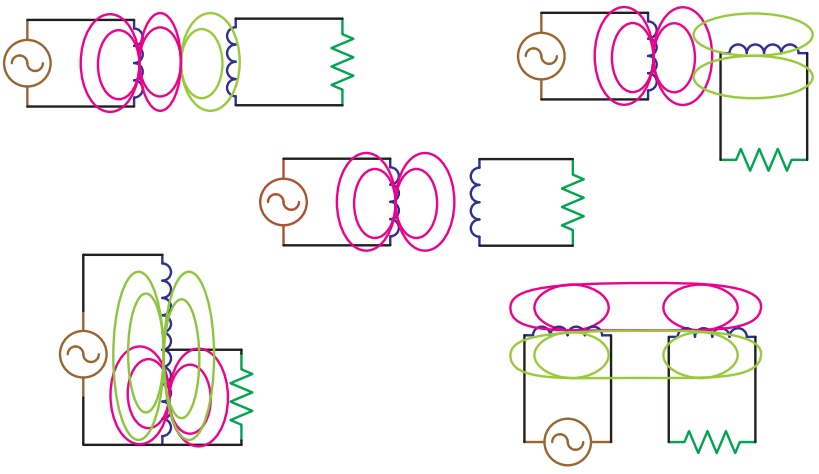
همچنین هرگاه دو سیم‌پیچ در نزدیک یکدیگر قرار گیرند به‌طوری که خطوط قوای مغناطیسی متغیر تولید شده در یکی از سیم‌پیچ‌ها بتواند حلقه‌های سیم‌پیچ دوم را قطع کند، در آن سیم‌پیچ نیروی محرکه القا می‌کند و در صورتی که مسیر عبور جریان از سیم‌پیچ دوم نیز مهیا باشد، میدان مغناطیسی تولید می‌کند و شار مغناطیسی آن 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 :

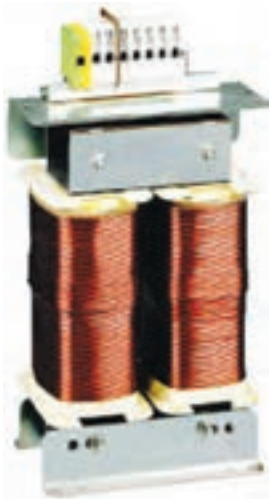
- هسته مغناطیسی
- سیم‌پیچ

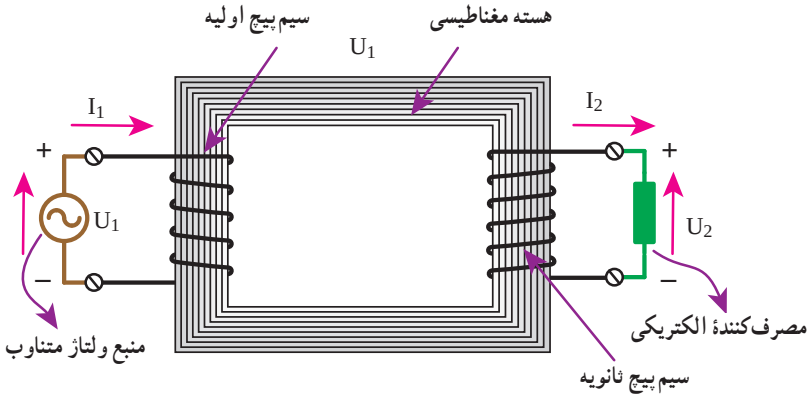
خود را بیازمایید

۱ــ منظور از سیم‌پیچ اولیه وثانویه چیست؟

۲ــ ترانسفورماتور افزاینده را تعریف کنید.

۳ــ منظور از سیم‌پیچ فشارقوی و ضعیف چیست؟



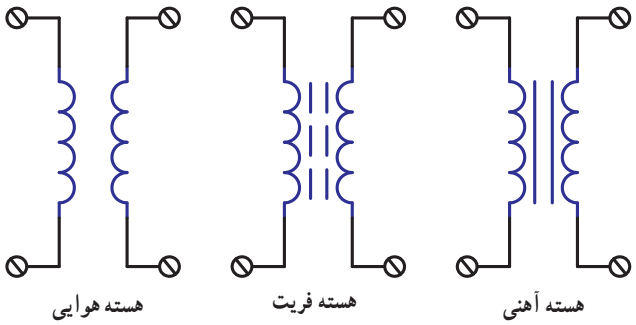


شکل ۲ــ نمای ظاهری و ساختمان داخلی یک ترانسفورماتور

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.

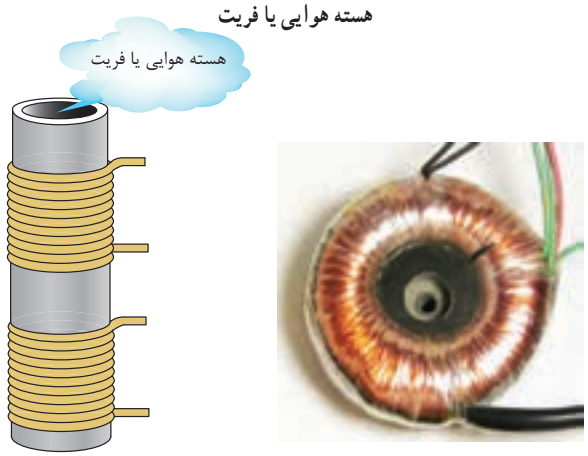
علامت اختصاری هریک از این ترانسفورماتورها در شکل (۳) نشان داده شده است.



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

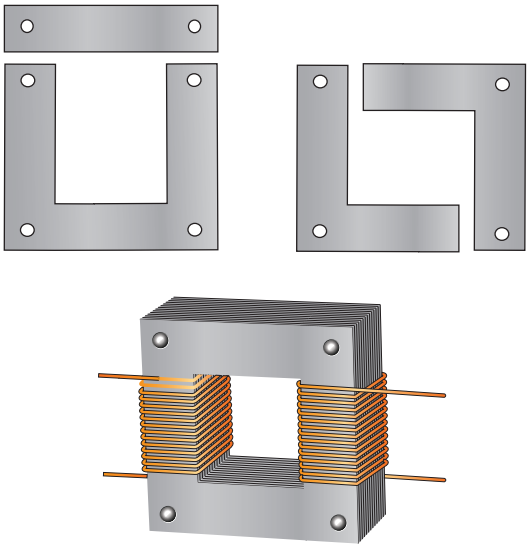
از هسته مغناطیسی با جنس فولاد الکتریکی در ترانسفورماتورهای قدرت و تقویت کننده‌های صوتی(AF)[3] استفاده می شود.

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.

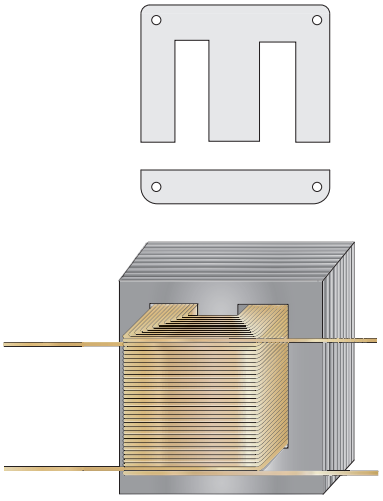
الف) اگر هر سیم‌پیچ روی یک پایه هسته پیچیده شود به آن هستهٔ ستونی می‌گویند. شکل (۵) ورقه‌های این نوع هسته و نمای کامل ترانسفورماتور با این نوع هسته را نمایش می دهد.

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

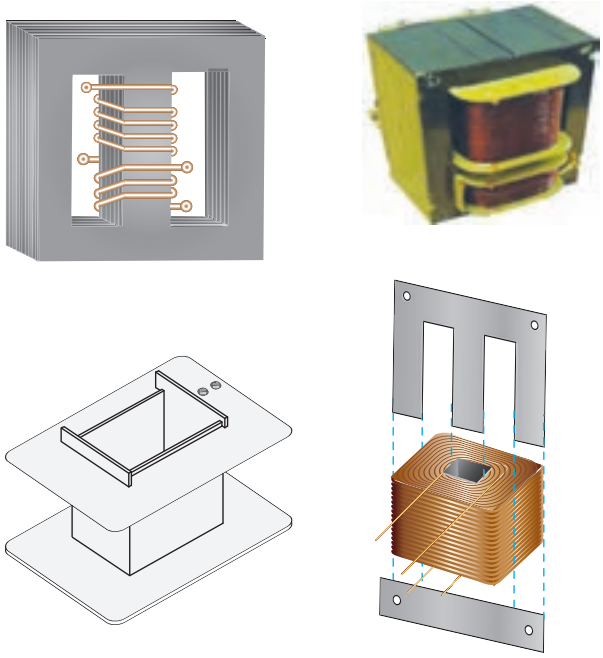
با توجه به شکل(۵)، در ترانسفورماتورهای ستونی، سیم‌پیچ‌ها بخش قابل ملاحظه‌ای از محیط هسته را اشغال می‌کنند و روی دو قرقره پیچیده می‌شوند. در صورتی که در ترانسفورماتورهای زرهی، هسته ترانسفورماتور، سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه را در برمی‌گیرد. بنابراین از آنجا که در ترانسفورماتورهای زرهی برای پیچیدن سیم‌پیچ 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.

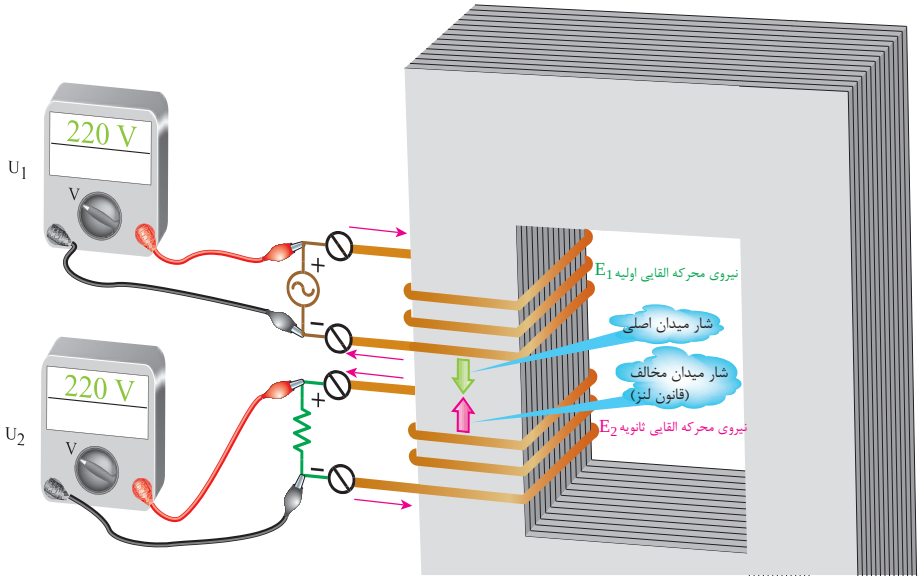
۲ــ۱ــ تئوری و طرز کار ترانسفورماتور

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

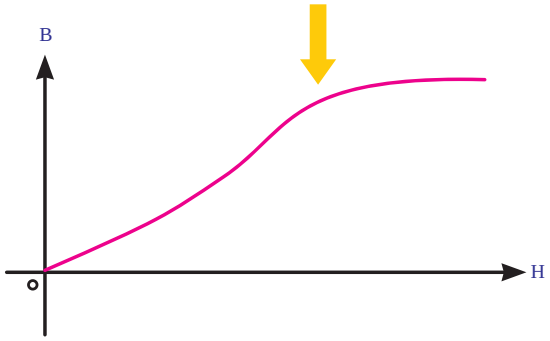
۱ــ۳ــ۱ــ کلیات : با اینکه در طبیعت هیچ چیز ایده‌آلی وجود ندارد ولی گاهی اوقات برای تشریح یک موضوع علمی لازم است در ابتدا ایده‌آل آن، مورد بررسی قرار گیرد. بررسی ترانسفورماتور ایده‌آل نیز صرفاً به‌خاطر تشریح رفتار واقعی ترانسفورماتور مورد توجه می‌باشد.

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 :

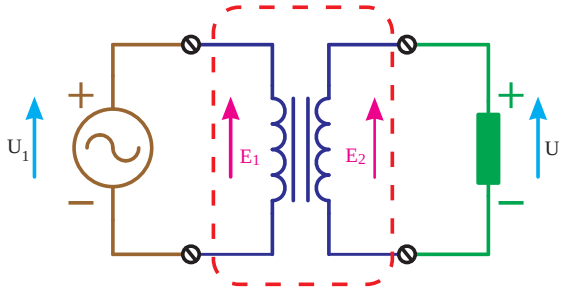
$$U_1 = E_1 \qquad (۱ــ۱۰)$$

$$U_2 = E_2 \qquad (۱ــ۱۱)$$

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

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

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.

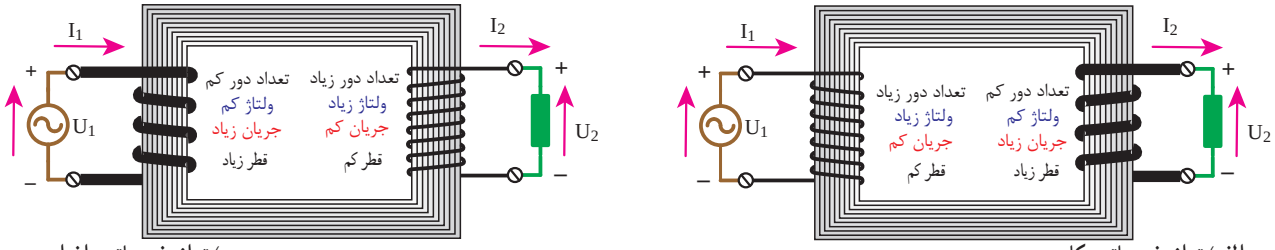
در ترانسفورماتور ایده‌آل با توجه به رابطه (۱ــ۱۷)، جریان عبوری از سیم‌پیچی که تعداد دور بیشتری دارد کمتر است و همین‌طور جریان عبوری از سیم‌پیچی که تعداد دورکمتری دارد، بیشتر می‌باشد.

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)

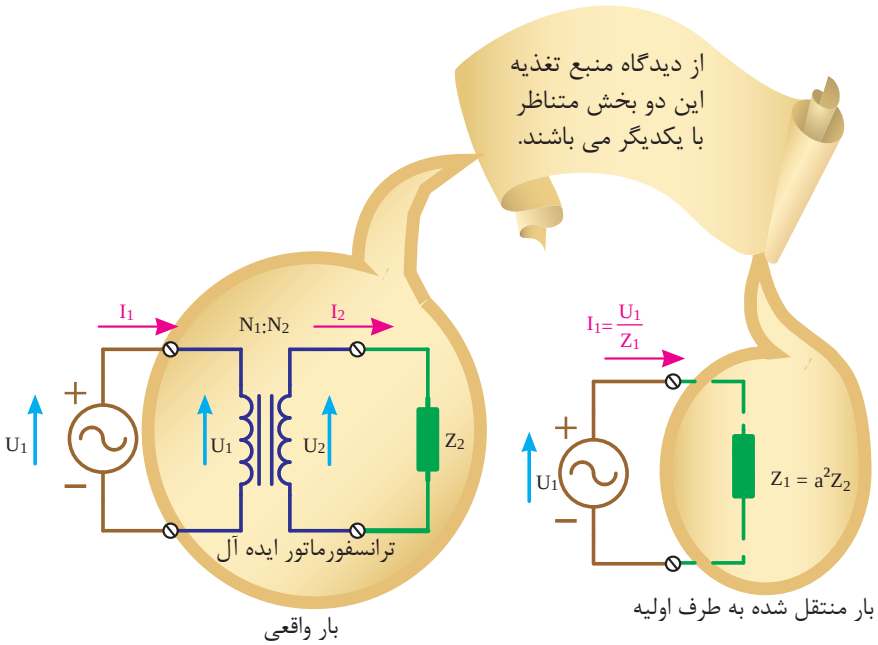
مثال بار ۸Ω به سیم‌پیچ ثانویه یک ترانسفورماتور ایده‌آل متصل است اگر سیم‌پیچ اولیه این ترانسفورماتور ۵۰۰ دور و سیم‌پیچ ثانویه آن ۵۰ دور باشد از دیدگاه اولیه ترانسفورماتور این بار الکتریکی چند اهم دیده می‌شود؟

$N_1 = ۵۰۰$

$N_2 = ۵۰$

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

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



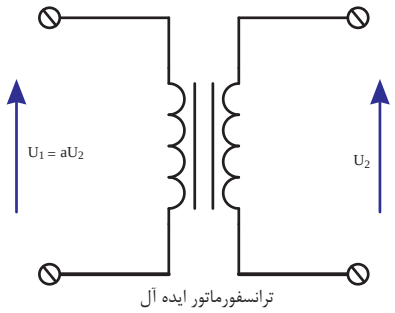
شکل۱۲ ــ نمایش امپدانس بار در ثانویه و انتقال آن به اولیه ترانسفورماتور

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

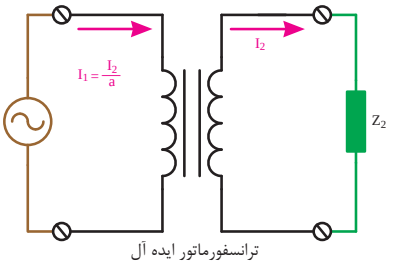
ایده‌آل : از ترانسفورماتور ایده آل به‌طور خلاصه نتایج زیر حاصل می شود :

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



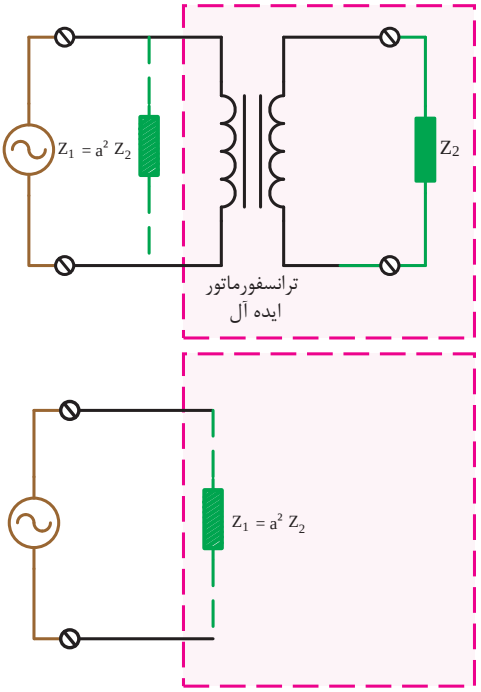
شکل۱۳ــ انتقال ولتاژ ثانویه به سمت اولیه ترانسفورماتور ایده‌آل

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؟

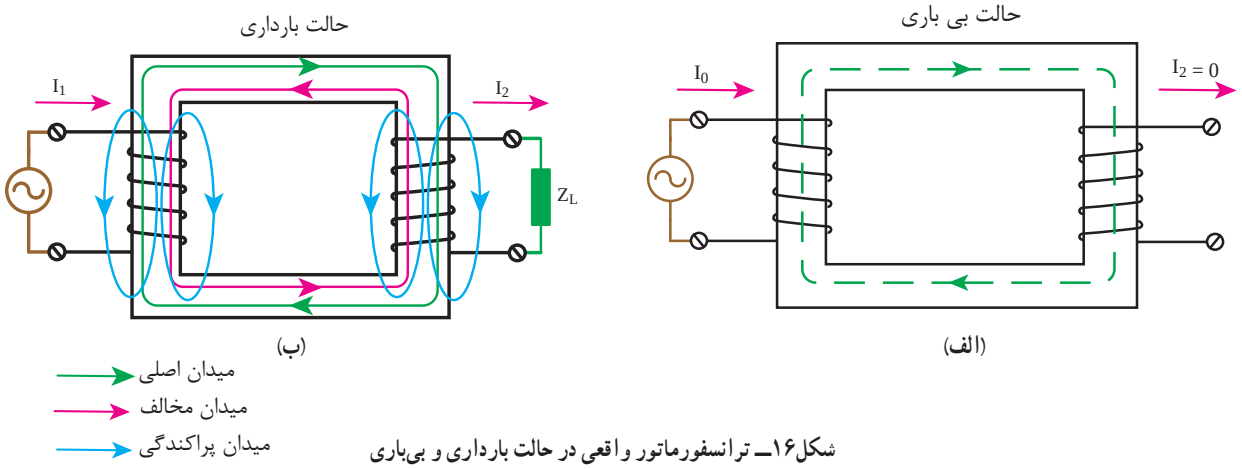
۴ــ۱ــ ترانسفورماتور واقعی

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.

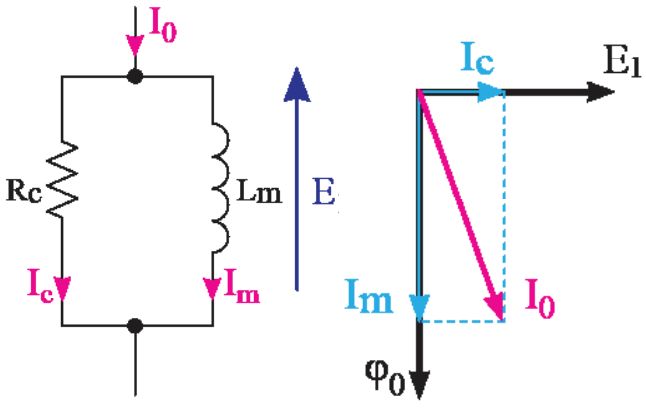
پیامد دوم :

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.

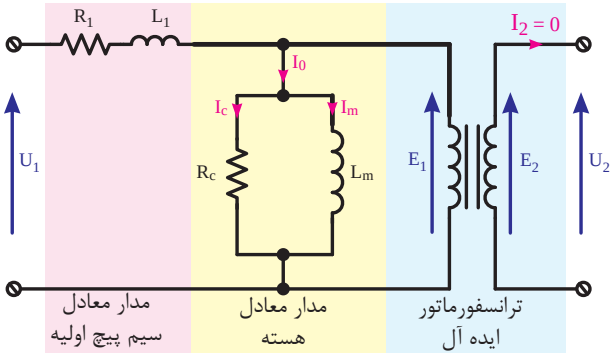
چون شار پراکندگی و مقاومت اهمی سیم‌پیچ اولیه هر دو باعث افت ولتاژ در سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور می شوند هر دو المان R_1 و L_1 را، در ورودی ترانسفورماتور به‌صورت سری با یکدیگر باید در نظر گرفت. در نتیجه R_1 باعث افت ولتاژ اهمی و L_1 باعث افت ولتاژ سلفی و برآیند برداری آنها افت ولتاژ در سیم‌پیچ اولیه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

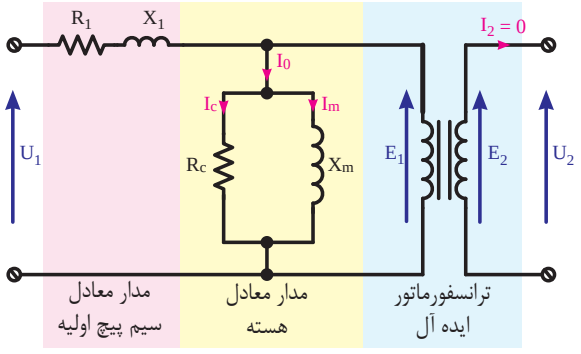
به خاطر داشته باشید که در ترانسفورماتورهای ایده‌آل از مقاومت الکتریکی (اهمی) سیم‌پیچ ها و شار پراکندگی صرف‌نظر شد و به همین دلیل ولتاژ القایی سیم‌پیچ اولیه E_1 با ولتاژ ورودی U_1 برابر گردید.

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.

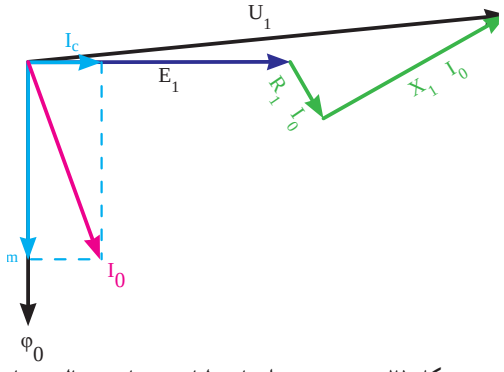


$X_m = 2\pi f L_m$

$X_1 = 2\pi f L_1$

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

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

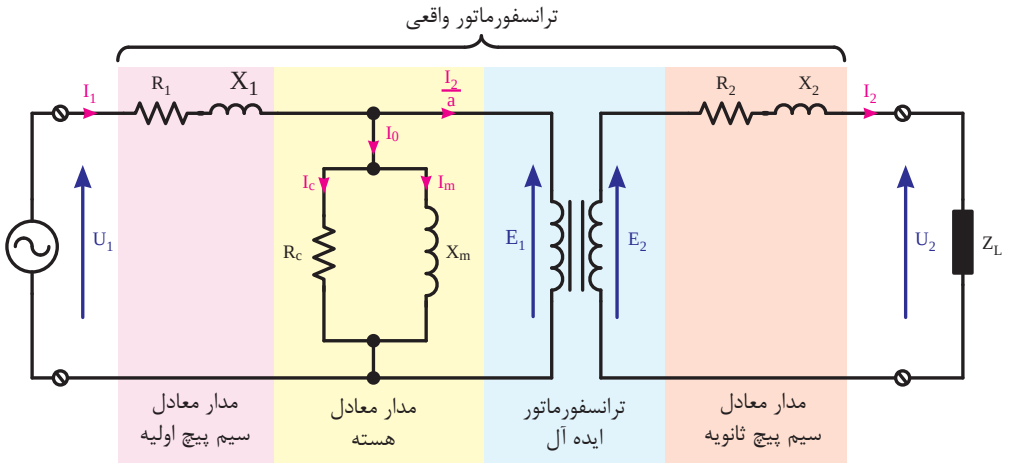
نکته قابل توجه اینکه با افزایش جریان در سیم‌پیچ ثانویه، فوران پراکندگی سیم‌پیچ نیز افزایش می یابد این موضوع سبب کاهش ولتاژ خروجی $U_{۲}$ ترانسفورماتور می‌شود. به همین خاطر فوران پراکندگی در سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور معادل $X_{۲}I_{۲}$ در نظر گرفته می شود. همچنین به‌دلیل مقاومت اهمی سیم‌پیچ ثانویه 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

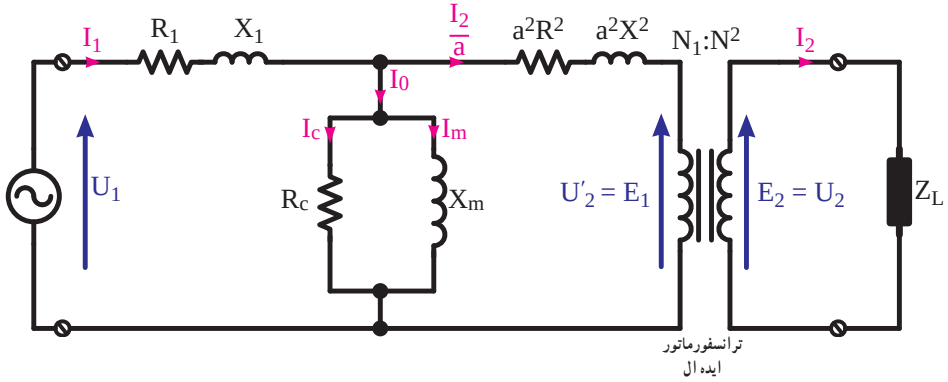
۱

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.

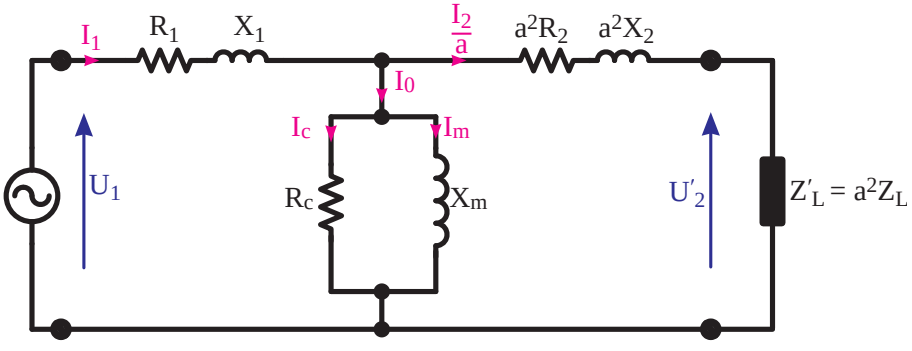
مدار معادل ترانسفورماتور واقعی را می‌توان با حذف ترانسفورماتور ایده‌آل ساده تر نیز نمود چرا که انتقال امپدانس از سمتی به سمت دیگر با توجه به نسبت تبدیل صورت گرفته و هیچ تأثیری در تحلیل مدار آن ندارد لذا می‌توان آن بخش را از مدار معادل حذف کرد و به خاطر سپرد.



شکل ۲۴ــ مدار معادل ترانسفورماتور واقعی در حالت بارداری

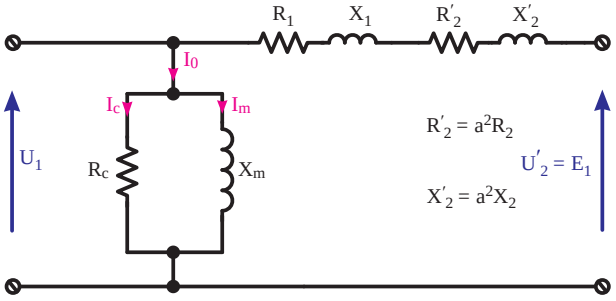
در محاسبات دقیق ترانسفورماتورهای قدرت باید از مدار معادل واقعی شکل (۲۵) استفاده شود ولی برای سادگی تحلیل و حل مسائل این کتاب لازم است با مدار معادل‌های تقریبی ترانسفورماتورهای قدرت نیز آشنا شوید.

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

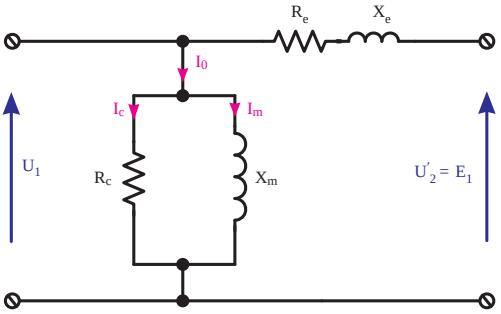
بنابراین می توان با جابه جایی شاخه موازی (مدار معادل هسته) مطابق شکل (۲۶) به طرف ورودی، مدار معادل را بطور محسوسی ساده کرد.



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.

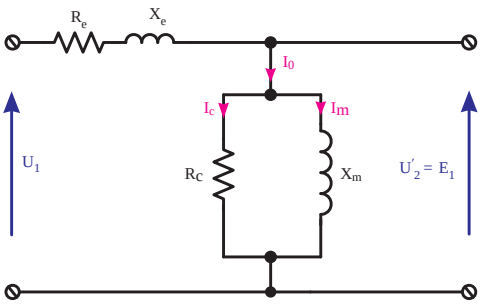
در این تقریب از تأثیر جریان تحریک در ایجاد افت ولتاژ در امپدانس سیم‌پیچ اولیه صرف‌نظر شده است.



شکل ۲۷ــ مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با احتساب تقریب اول

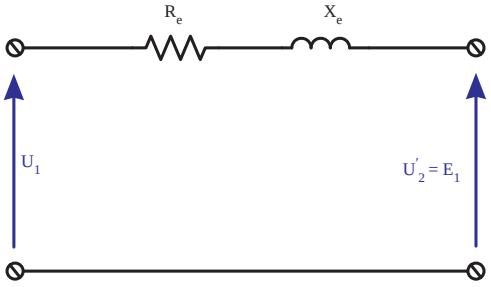
تقریب دوم: با استدلالی مشابه آنچه در تقریب اول گفته شد می‌توان شاخه موازی را به طرف خروجی جابه جا کرد. سپس مقاومت‌های اهمی و راکتانس پراکندگی طرف اولیه وثانویه سری را با توجه به روابط $R_e=R_1+R'_2$ و $X_e=X_1+X'_2$ ساده نموده و مدار معادل تقریبی شکل (۲۸) را به‌دست آورد.

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



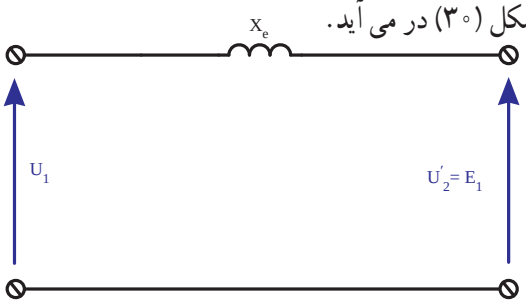
شکل ۲۸ــ مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با احتساب تقریب دوم

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.

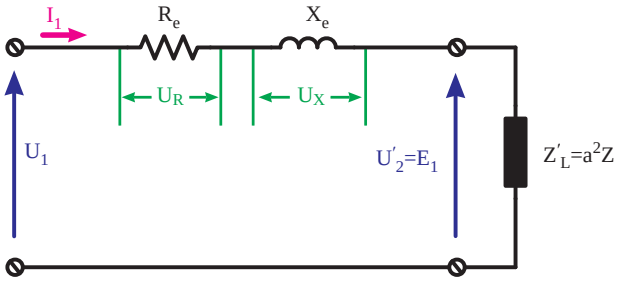
تحقیق کنید

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 :

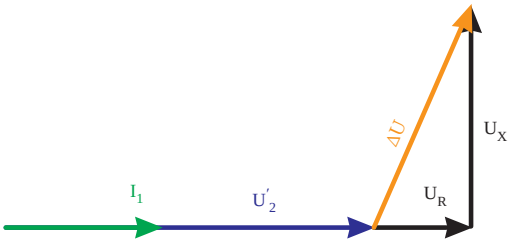
برای ترسیم این بردارها ابتدا بردار ولتاژ E_1 را که حالا معادل ولتاژ ترمینال خروجی از دیدگاه اولیه (U'_2) نیز هست به عنوان مبنا در جهت صفر مثلثاتی ترسیم می‌شود آنگاه با توجه به مقدار و نوع بار مصرفی بردار جریان I_1 با زاویه مناسب نسبت به بردار ولتاژ E_1 یا U'_2 کشیده می‌شود. در بار اهمی خالص ولتاژ و جریان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

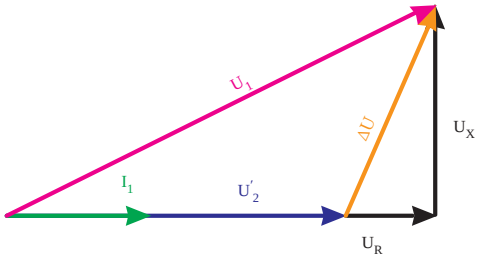
شکل۳۳ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی خالص (مرحله ۲)

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.



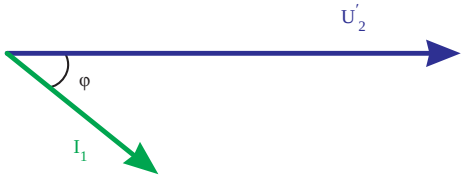
شکل ۳۴ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی خالص (مرحله ۳)

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.



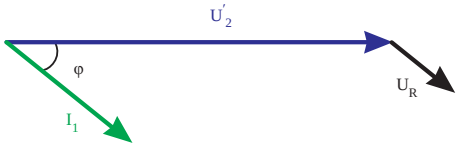
شکل ۳۵ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی خالص (مرحله ۴)

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.



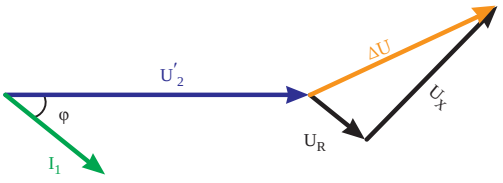
شکل۳۶ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی – سلفی (مرحله ۱)

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.



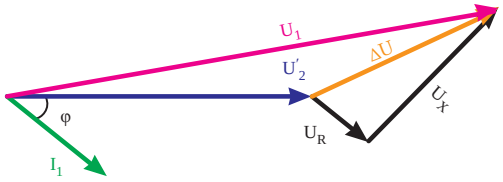
شکل۳۷ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی ــ سلفی (مرحله ۲)

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.

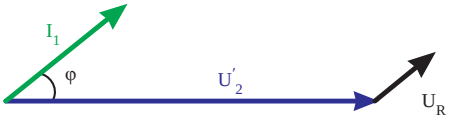


شکل ۳۹ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی ــ سلفی (مرحله ۴)

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.

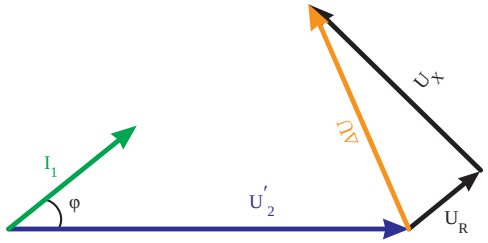
شکل ۴۰ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی ــ خازنی (مرحله ۱)

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).

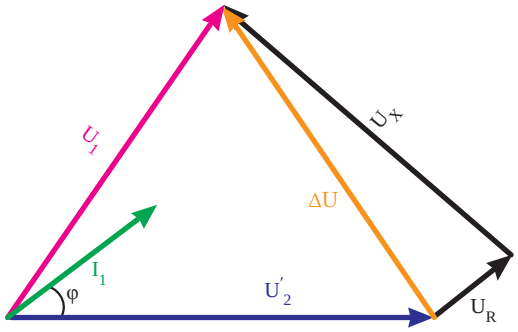


شکل ۴۲ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی ــ خازنی (مرحله ۳)

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 :

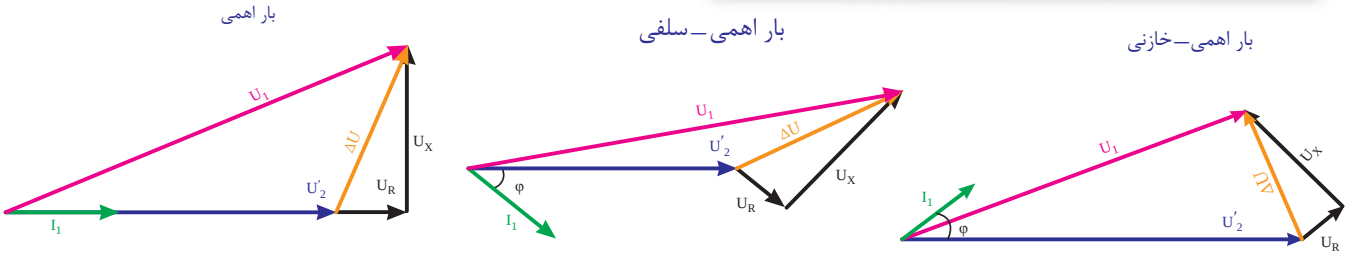


شکل ۴۳ــ ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری
ترانسفورماتور با بار اهمی ــ خازنی (مرحله ۴)

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.

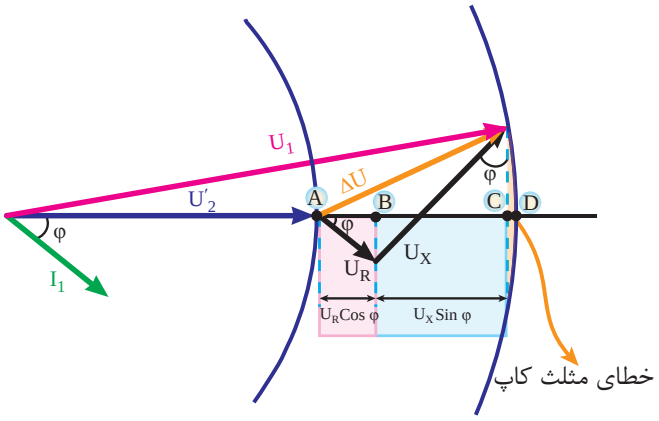


شکل ۴۴ ــ دیاگرام برداری حالت بارداری در بارهای اهمی خالص، اهمی ــ سلفی و اهمی ــ خازنی

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؟

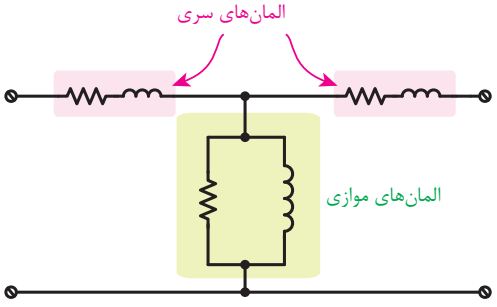
۴ـ ترانسفورماتوری با افت ولتاژ اهمی ۲۵ ولت و افت ولتاژ القایی ۴۰ ولت باری را با ضریب قدرت ۰/۸ پس فاز تحت ولتاژ ۲۴۰ ولت تغذیه می‌کند. ولتاژ بی‌باری خروجی ترانسفورماتور را به‌دست آورید.

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.



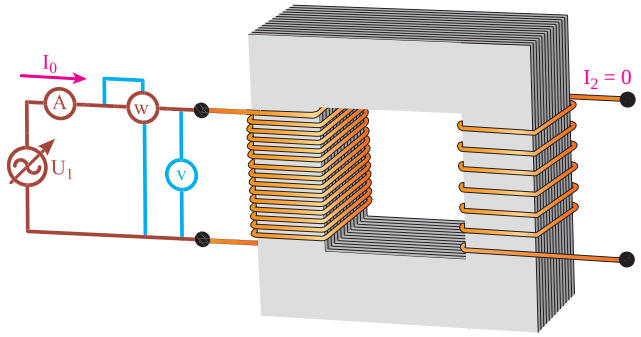
شکل ۴۶ــ نمایش المان‌های سری و موازی بر روی مدار معادل واقعی ترانسفورماتور

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.

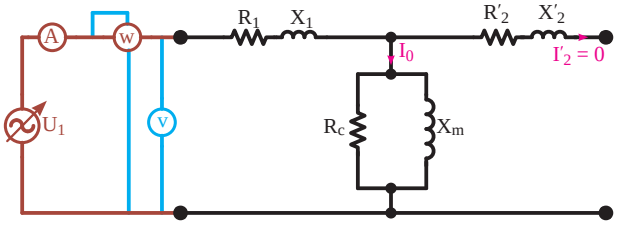
با توجه به مدار معادل شکل(۴۷ــب) مدار ثانویه باز است. لذا جریانی در مدار ثانویه جاری نمی‌شود. بنابراین ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور باعث مغناطیسی شدن هسته ترانسفورماتور می‌شود و جریان بی‌باری I_0 از آمپر متر عبور می‌کند. از آنجایی که جریان I_0 در حدود ۲ تا ۶ درصد جریان نامی است لذا افت 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

$$P_0 \approx P_{Core}$$

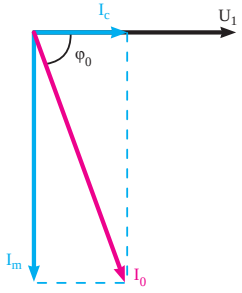


(الف)



(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 :

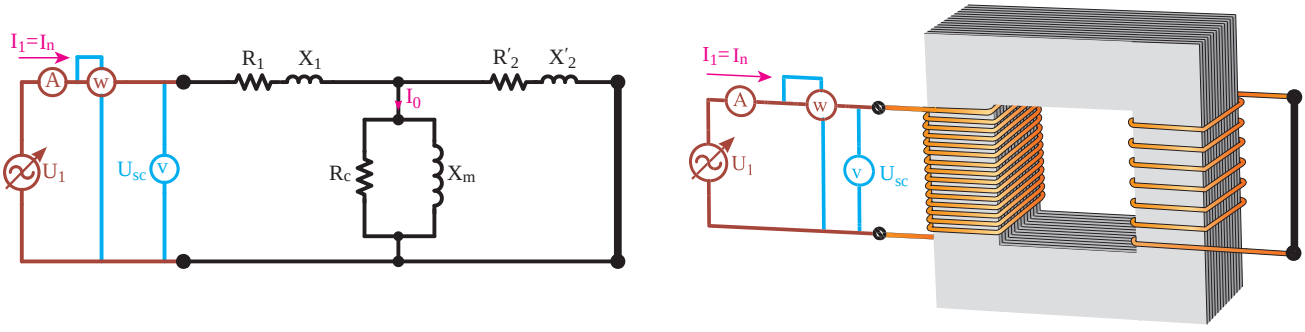
$$Z_e = \frac{U_{SC}}{I_n} \qquad (۱_۴۳)$$

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.

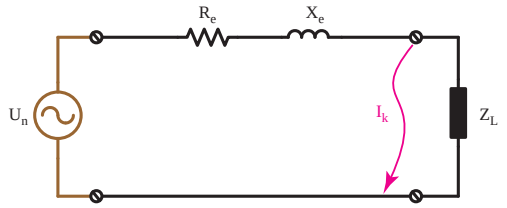
۲ــ ترانسفورماتوری که ولتاژ اتصال کوتاه آن کم است، در زیر بار دارای افت ولتاژ..... می‌باشد.

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.

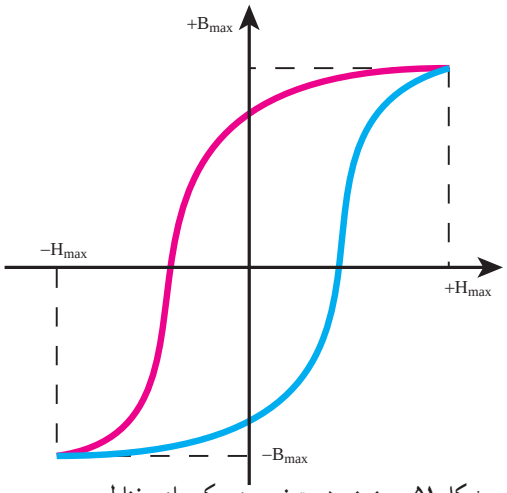
بنابراین تلفات ترانسفورماتور مربوط به هسته و سیم‌پیچ می‌باشد.

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؟

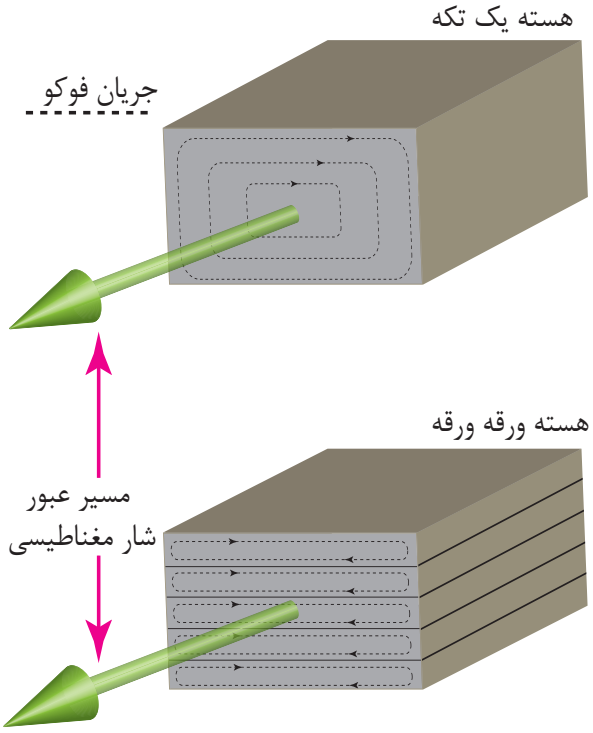
۳ــ تلفات هیسترزیس ثابت است یا متغیر ؟چرا؟

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.

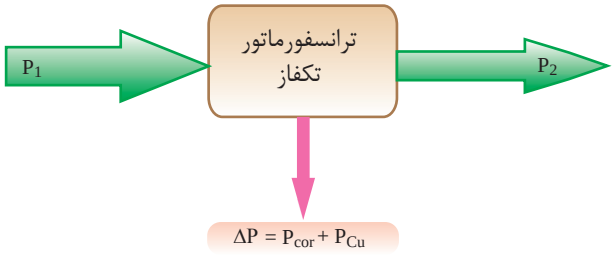
$$\%\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \qquad (۱ــ۵۴)$$

$\eta\%$ 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

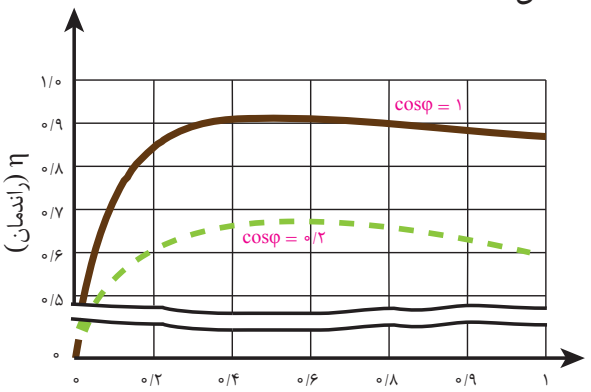
درستی عبارت زیر را ثابت کنید.

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

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.

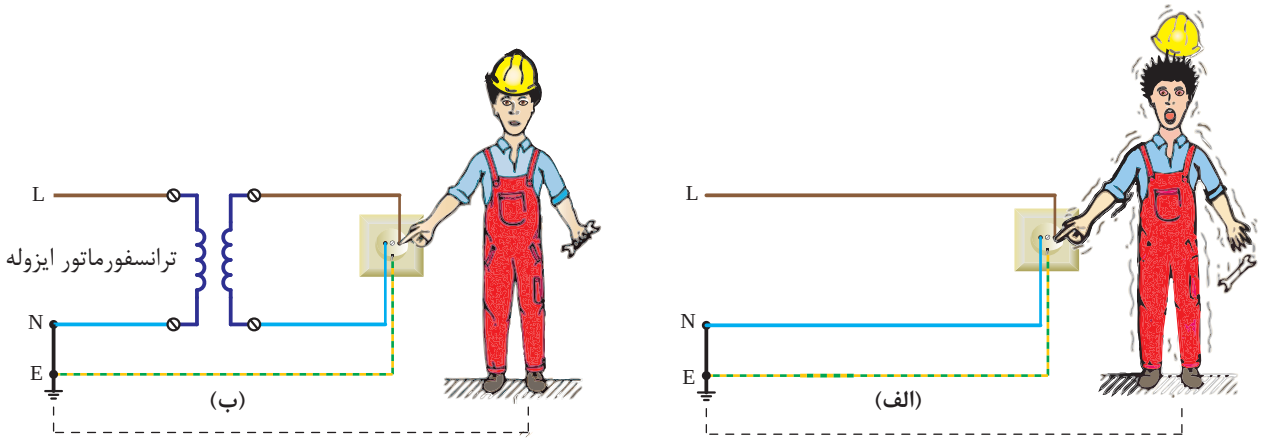
به همین خاطر مطابق استاندارد، پریزهای برق نصب شده در حمام و مکان های مرطوب باید مجهز به این ترانسفورماتور باشند زیرا اتصال ثانویه را از نول یا زمین جدا می‌کند که به آن ترانسفورماتور ایزوله می‌گویند.

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.

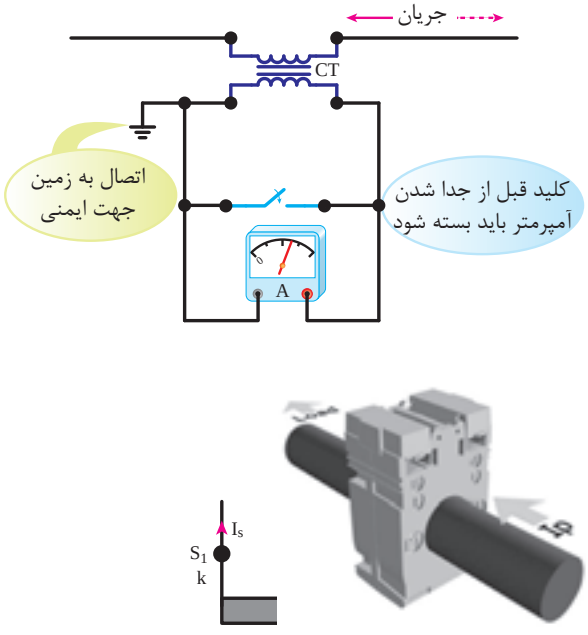
ضریب تبدیل این ترانسفورماتور را به صورت کسری و نسبت جریان اولیه به ثانویه $\frac{I_1}{I_2}$ تعریف می کنند مثلاً ترانسفورماتور جریان $\frac{100A}{5A}$ می تواند جریان عبوری ۱۰۰A مدار را به ۵A در دستگاه اندازه‌گیری تبدیل کند و دیگر جریان‌های عبوری تا ۱۰۰A را به‌صورت خطی در دستگاه اندازه‌گیری با همین نسبت 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؟

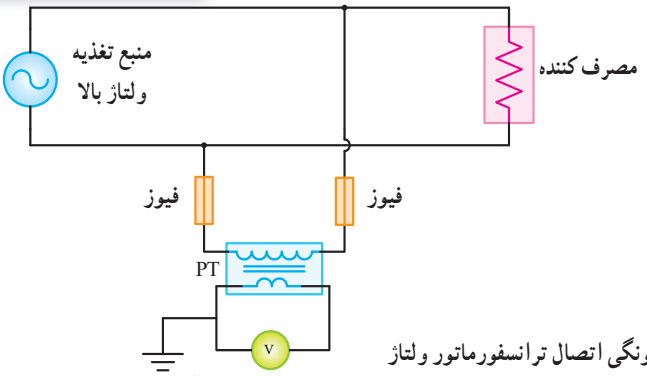
۲ــ ساختمان ترانسفورماتور جریان را شرح داده طریقه نصب آن را در مدار ترسیم نمایید.

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

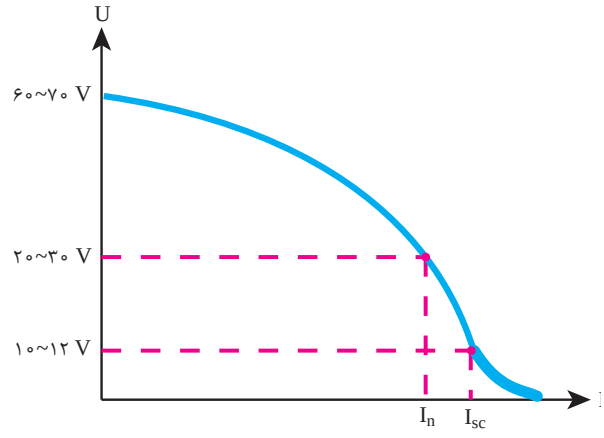
۱ــ ولتاژهای شبکه : ۶ KV، ۲۰KV، ۳۳KV، ۱۳۲KV، ۲۳۰KV و ۴۰۰KV

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.

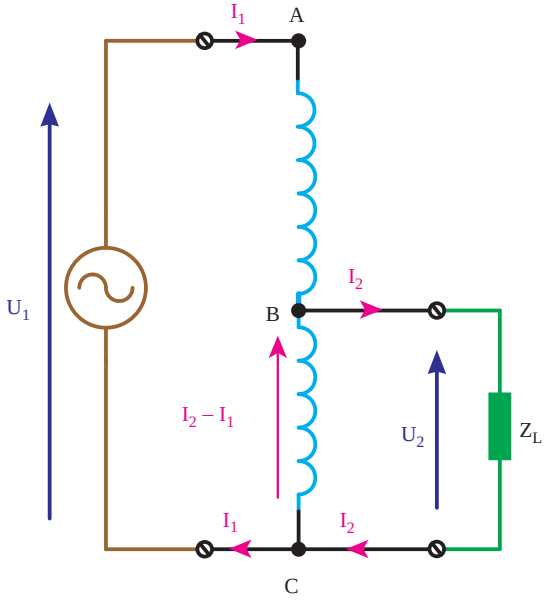
آن بخش از سیم‌پیچ که مطابق شکل (۶۳) بین نقاط A و B قرار گرفته است، **سیم‌پیچ سری** نام گذاری می‌گردد. توان الکتریکی منتقل شده از این بخش سیم‌پیچ به بار مصرفی را **توان تیپ** یا توان انتقالی از طریق هسته می‌نامند. مقدار توان این بخش با توجه به مدار شکل(۶۳ــ الف)، مطابق رابطه (۷۱–۱) می‌باشد.

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

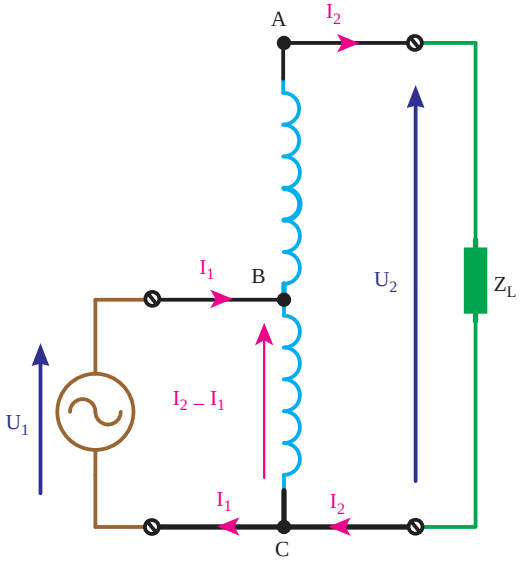
همچنین توان تیپ اتوترانسفورمر شکل(۶۳–ب) از رابطه(۷۲–۱) محاسبه می شود.

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

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.

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

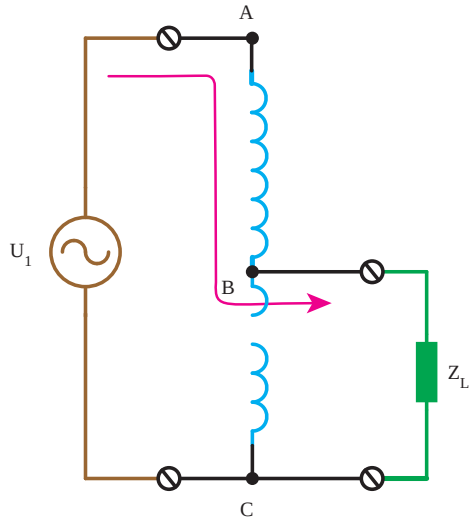
بیشتر بدانید

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.

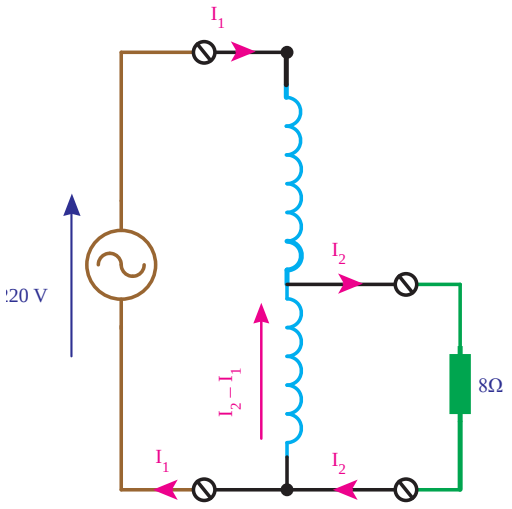
به‌عنوان مثال به مدار شکل (۶۴) دقت کنید. اگر قطعی یا پارگی در سیم‌پیچ مشترک رخ دهد ولتاژ زیاد منبع تغذیه روی بار ظاهر می شود که بسیار خطرناک خواهد بود.



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.

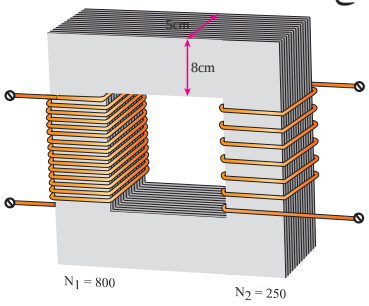
۱۷) دو عیب مهم اتوترانسفورمر را نسبت به ترانسفورماتور معمولی، بنویسید.

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.

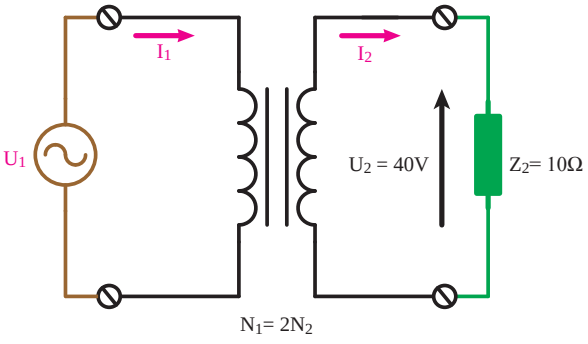


۳) یک ترانسفورماتور با ضریب تبدیل a= ۸ دارای ۲۰۰۰ دور سیم‌پیچ در اولیه می‌باشد. تعداد دور ثانویه چقدر است؟

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.