

هدف‌های رفتاری :

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

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

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

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

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



مقدمه

مقدار نیروی محرکه القایی ناشی از القای متقابل به ضریب القای متقابل M بستگی دارد هرچه خطوط میدان مغناطیسی بیشتری بین دو سیم پیچ برقرار شود ضریب القای متقابل M بزرگتر می شود. ضریب القای متقابل به چگونگی قرارگیری سیم پیچ ها و فاصله آنها از یکدیگر بستگی دارد. القای متقابل کامل در سیم پیچ زمانی اتفاق می افتد که تمام خطوط قوای مغناطیسی یک سیم پیچ به سیم پیچ دوم برسد. اگر هیچ یک از خطوط قوای مغناطیسی دو سیم پیچ 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.

با عبور جریان الکتریکی از یک سیم پیچ درون آن میدان مغناطیسی ایجاد می شود. مجموع خطوط قوای میدان مغناطیسی سیم پیچ فوران یا شار مغناطیسی نامیده می شود. اگر جریان الکتریکی DC از سیم پیچ بگذرد، شار سیم پیچ مقداری ثابت خواهد داشت.

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

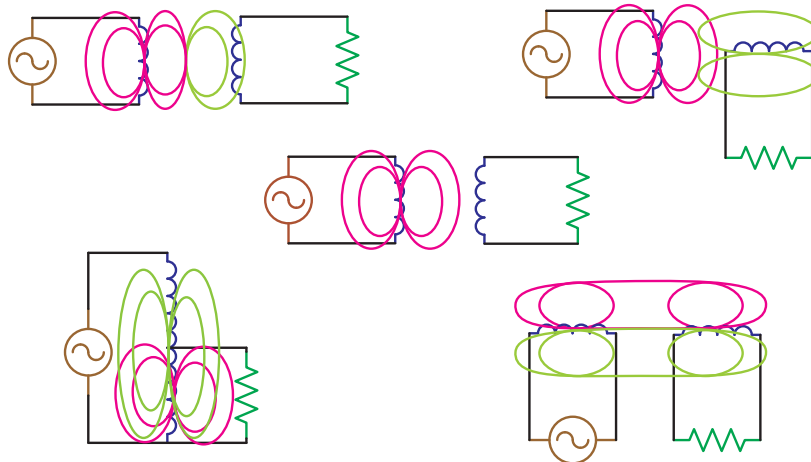
همچنین هرگاه دو سیم پیچ در نزدیک یکدیگر قرار گیرند به طوری که خطوط قوای مغناطیسی متغیر تولید شده در یکی از سیم پیچ ها بتواند حلقه های سیم پیچ دوم را قطع کند، در آن سیم پیچ نیروی محرکه القا می کند و در صورتی که مسیر عبور جریان از سیم پیچ دوم نیز مهیا باشد، میدان مغناطیسی تولید می کند و شار مغناطیسی آن نیز روی سیم پیچ اول نیروی محرکه القا می کند این پدیده را القای متقابل (M) می گویند.

خود را بیازمایید



۱) القای متقابل چیست؟

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



شکل ۱- وابستگی القای متقابل به چگونگی استقرار سیم پیچ ها

۱-۱- ساختمان ترانسفورماتور

که در شکل نشان داده شده است هر سیم پیچ بر روی یک بازوی هسته مغناطیسی پیچیده شده است. سیم پیچی که به منبع ولتاژ متناوب متصل می شود را

ترانسفورماتور وسیله ای است که از پیچیدن دو سیم پیچ یا بیشتر بر روی یک هسته مغناطیسی ساخته می شود. شکل (۲) ساختمان یک ترانسفورماتور ساده را نشان می دهد. همانطور

مصرف کننده‌های الکتریکی استفاده می‌شود.
ساختمان ترانسفورماتور از دو قسمت تشکیل شده است

که عبارت‌اند از:

- هسته مغناطیسی
- سیم پیچ

خود را بیازمایید



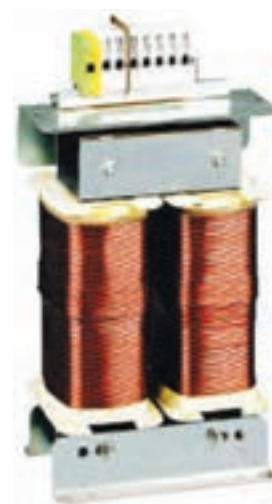
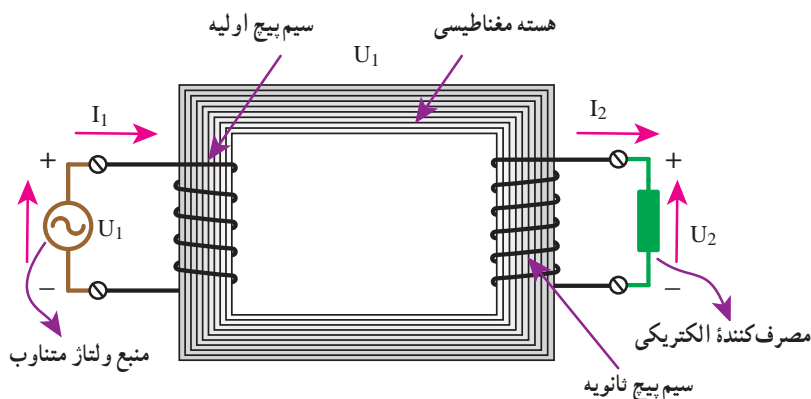
- ۱- منظور از سیم پیچ اولیه و ثانویه چیست؟
- ۲- ترانسفورماتور افزایشده را تعریف کنید.
- ۳- منظور از سیم پیچ فشارقوی و ضعیف چیست؟

سیم پیچ اولیه و سیم پیچی که به مصرف کننده الکتریکی متصل می‌شود را سیم پیچ ثانویه گویند.

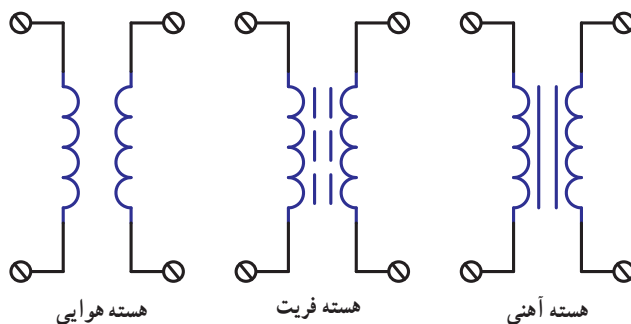
به علاوه سیم پیچ با ولتاژ بیشتر را سیم پیچ فشار قوی (H.V) و سیم پیچ با ولتاژ کمتر را سیم پیچ فشار ضعیف (L.V) می‌نامند.

طبق تعریف اگر سیم پیچ فشار قوی یک ترانسفورماتور در سمت اولیه و سیم پیچ فشار ضعیف آن در سمت ثانویه باشد آن را ترانسفورماتور کاهشده و ولتاژ می‌نامند و در صورتی که سیم پیچ فشار قوی یک ترانسفورماتور در سمت ثانویه و سیم پیچ فشار ضعیف آن در سمت اولیه باشد آن را ترانسفورماتور افزایشده می‌گویند.

از ترانسفورماتور کاهشده و افزایشده به ترتیب برای کاهش و افزایش ولتاژ و برای تأمین ولتاژ مناسب جهت تغذیه



شکل ۲- نمای ظاهری و ساختمان داخلی یک ترانسفورماتور



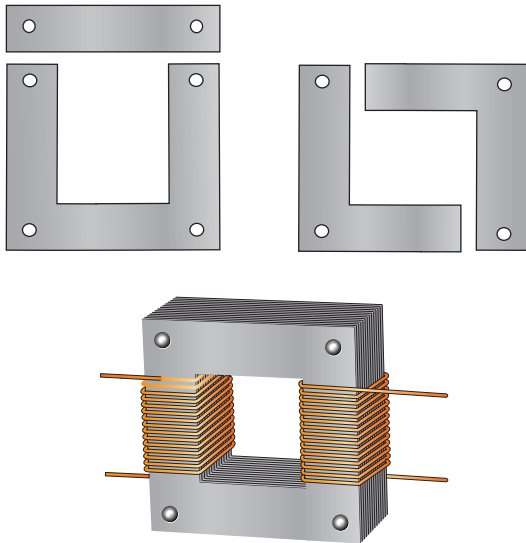
شکل ۳- علائم اختصاری ترانسفورماتور با هسته‌های مختلف

۱-۱-۱- هسته: هسته ترانسفورماتور مسیر عبور شار مغناطیسی بین سیم پیچ‌ها را برقرار می‌کند تا القای متقابل بین آنها برقرار شود.

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

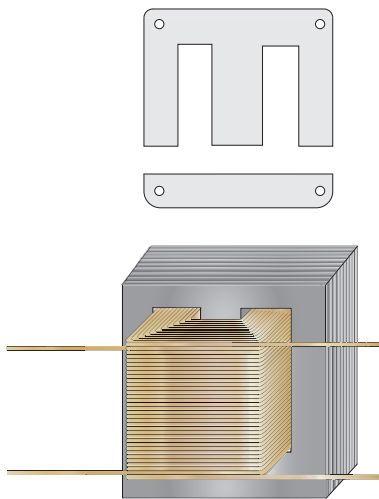
علامت اختصاری هر یک از این ترانسفورماتورها در شکل (۳) نشان داده شده است.

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



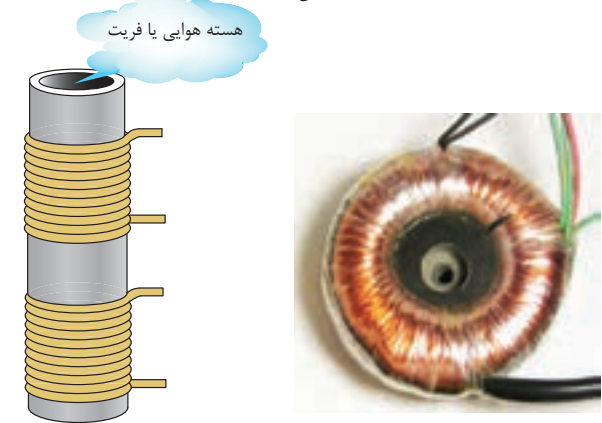
شکل ۵- نمای از یک ترانسفورماتور ستونی و شکل ورقه‌های آن

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



شکل ۶- نمای از یک ترانسفورماتور با هسته زرهی و شکل ورقه‌های آن

هسته‌های هوایی و فریت^۱ در ترانسفورماتورهای با فرکانس بالا^۲ و در صنایع مخابراتی کاربرد فراوان دارند. سیم پیچ‌های این نوع ترانسفورماتور مطابق شکل (۴) با حداقل ضریب القای متقابل روی هسته پیچیده می‌شوند.



شکل ۴- نمای از یک ترانسفورماتور با هسته هوایی یا فریت

از هسته مغناطیسی با جنس فولاد الکتریکی در ترانسفورماتورهای قدرت و تقویت کننده‌های صوتی (AF)^۳ استفاده می‌شود.

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 قرار گرفتن سیم پیچ‌ها روی هسته ترانسفورماتور به دو دسته تقسیم می‌شوند.

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

۱- فریت نوعی آلیاژ فرو مغناطیسی بودری می‌باشد، که فشرده شده است.

۲- فرکانس‌های بالای ۲۰ KHz

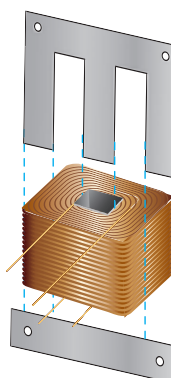
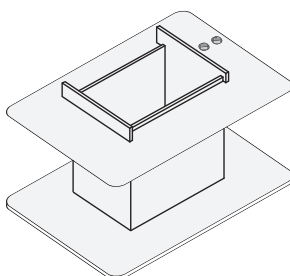
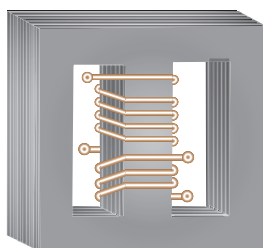
خود را بیازمایید



- ۱- وظیفه هسته مغناطیسی در ترانسفورماتور را شرح دهید.
- ۲- جنس هسته های مغناطیسی در ترانسفورماتورهای توزیع و قدرت از چیست؟

۲-۱-۱- سیم پیچ : سیم پیچ های ترانسفورماتور مطابق شکل (۷) بر روی قرقره پیچیده می شوند سپس هسته را درون قرقره جا می زنند.

با توجه به شکل (۵)، در ترانسفورماتورهای ستونی، سیم پیچ ها بخش قابل ملاحظه ای از محیط هسته را اشغال می کنند و روی دو قرقره پیچیده می شوند. در صورتی که در ترانسفورماتورهای زرهی، هسته ترانسفورماتور، سیم پیچ های اولیه و ثانویه را در برمی گیرد. بنابراین از آنجا که در ترانسفورماتورهای زرهی برای پیچیدن سیم پیچ از یک قرقره استفاده می شود در نتیجه ضریب القای متقابل سیم پیچ ها بزرگتر می شود. در ترانسفورماتور، شار مغناطیسی از طریق هسته عبور می کند پس برای ایجاد حداکثر ضریب القای متقابل باید مقاومت مغناطیسی آن بسیار کم باشد به همین دلیل جنس هسته مغناطیسی از فولاد الکتریکی انتخاب می شود برای کاهش تلفات فوکو در هسته آن را ورقه ورقه می کنند و هر ورق را با لاک عایقی نازک می پوشانند که معمولاً دارای ضخامتی بین ۰/۳۵ تا ۰/۵ میلی متر می باشند.



شکل ۷- شکل های متفاوتی از اجزای داخلی ترانسفورماتور

با عبور جریان از سیم پیچ به دلیل 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 می کنند تا حرارت

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

جریان از سیم پیچ باعث تولید شار مغناطیسی درون سیم پیچ می شود این شار از داخل هسته عبور می کند. مقدار شار ایجاد شده به تعداد دور و جریان سیم پیچ بستگی دارد.

با عبور این شار از سیم پیچ دوم که به مصرف کننده متصل است نیروی محرکه الکتریکی در آن القا می کند، زیرا مقدار آن به طور متناوب تغییر می کند.^۱

مقدار نیروی محرکه القا شده به تعداد دورهای سیم پیچ ثانویه و تغییرات شار نسبت به زمان بستگی دارد بنابراین می توان با انتخاب تعداد دور سیم پیچ به ولتاژهای مختلفی دست یافت. از طرفی به دلیل بسته بودن مدار، جریانی متناسب با بار از سیم پیچ دوم عبور می کند بدین ترتیب انرژی الکتریکی از طریق یک ارتباط مغناطیسی از سیم پیچ اول به سیم پیچ دوم منتقل می شود.

در واقع پدیده فوق بیانگر همان قانون القای فاراده می باشد زیرا تغییرات جریان عبوری در سیم پیچ باعث تغییرات فوران (شار) سیم پیچ شده و در نتیجه ولتاژی در هر دو سیم پیچ القا می کند.

ایجاد شده در سیم پیچ به خارج آن منتقل شود تا مانع از بین رفتن عایق آن جلوگیری شود.

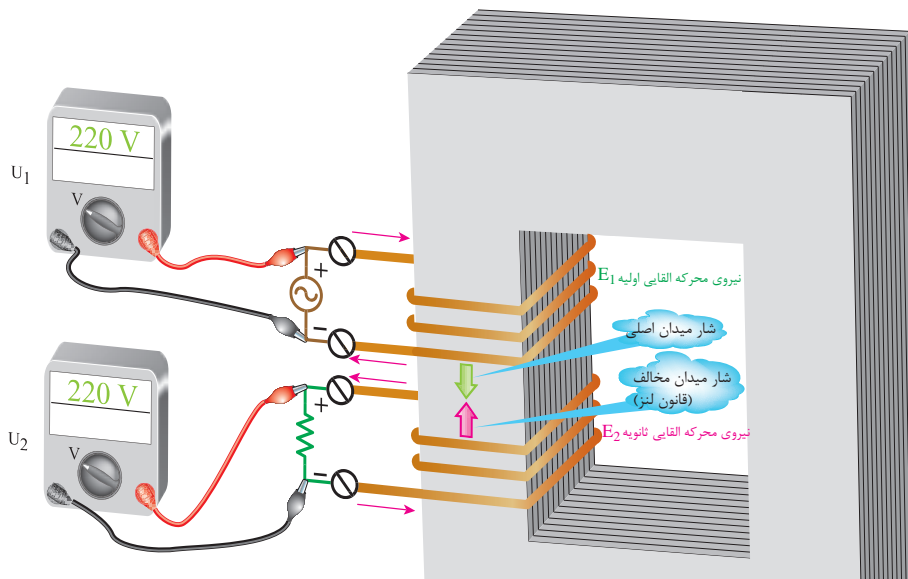
خود را بیازمایید



- ۱- قطر سیم پیچ ترانسفورماتور چه تأثیری بر جریان و ولتاژ نامی آن دارد؟
- ۲- تعداد دور سیم پیچ ترانسفورماتور چه تأثیری بر جریان و ولتاژ نامی آن دارد؟
- ۳- برای کاهش دمای سیم پیچ های ترانسفورماتور چه راه هایی پیشنهاد می کنید.

۱-۲- تئوری و طرز کار ترانسفورماتور

هنگامی که یکی از سیم پیچ های ترانسفورماتور به منبع ولتاژ متناوب متصل گردد، از آن جریان عبور می کند. عبور



شکل ۸- مسیر عبور جریان در سیم پیچ ها و عبور شار مغناطیسی از هسته

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

با توجه به قانون ولتاژ فاراده داریم :

$$E = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (1-2)$$

در رابطه (۱-۲)

$\Delta\phi$ تغییرات فوران مغناطیسی

Δt تغییرات زمان

N تعداد دور سیم پیچ

E نیروی محرکه الکتریکی القایی

چون جریان متناوب سینوسی است فوران هم متناوب

سینوسی می باشد.

یعنی :

$$\phi_{(t)} = \phi_m \sin \omega t \quad (1-3)$$

بیشتر بدانید



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

$$E_m = N \phi_m \omega \Rightarrow E = \frac{N \phi_m \omega}{\sqrt{2}}$$

$$E = \frac{N B_m A (\sqrt{2} \pi f)}{\sqrt{2}} \Rightarrow E = 4 / 44 N B_m A f$$

$$E = 4 / 44 N B_m A f \quad (1-4)$$

در رابطه (۱-۴)

E مقدار نیروی محرکه القایی مؤثر بر حسب V

N تعداد دور سیم پیچ

B_m حداکثر چگالی میدان مغناطیسی بر حسب T

A سطح مقطع هسته بر حسب m^2

f فرکانس برق بر حسب Hz

مثال ترانسفورماتوری دارای یک هسته با سطح مقطع

10 cm^2 می باشد. اگر تعداد حلقه های یکی از سیم پیچ های آن 1000

دور و حداکثر چگالی میدان مغناطیسی در هسته $1/126 T$ باشد.

نیروی محرکه القایی سیم پیچ در فرکانس 50 هرتر چند ولت است؟

$$E = 4 / 44 N B_m A f$$

$$= 4 / 44 \times 1000 \times 1 / 126 \times 10 \times 10^{-4} \times 50 \approx 250 V$$

در صورت استفاده از سیم پیچ فوق به عنوان اولیه امکان

استفاده از آن در ولتاژی بالاتر از $250 V$ وجود ندارد.

از آنجا که هر سه کمیت چگالی میدان مغناطیسی

هسته « B_m »، سطح مقطع هسته « A » و فرکانس شبکه « f » در

ترانسفورماتور ثابت هستند و تعداد دور سیم پیچ اولیه و ثانویه

در ترانسفورماتورها می تواند متفاوت اختیار شود، پس رابطه

(۱-۴) را می توان به صورت روابط (۱-۵) و (۱-۶) نوشت.

$$E_1 = 4 / 44 N_1 B_m A f \quad (1-5)$$

$$E_2 = 4 / 44 N_2 B_m A f \quad (1-6)$$

بنابراین در سیم پیچ اولیه و ثانویه هر ترانسفورماتور

متناسب با تعداد دور سیم پیچ، نیروی محرکه در آن القا می شود.

با توجه به رابطه (۱-۵) و (۱-۶) رابطه (۱-۷) به دست

می آید و آن را رابطه کلی ترانسفورماتور گویند.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-7)$$

نسبت $\frac{N_1}{N_2}$ را نسبت تبدیل ترانسفورماتور می گویند و

آن را با a نمایش می دهند. گاهی از عکس این نسبت در روابط

استفاده می شود که آن را با K نمایش می دهند و آن را ضریب

تبدیل گویند. بنابراین داریم :

$$a = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-8)$$

$$K = \frac{N_2}{N_1} \quad (1-9)$$

معمولاً در مشخصات فنی یک ترانسفورماتور به ندرت

تعداد دور سیم پیچ های اولیه و ثانویه آورده می شود و غالباً

ولتاژهای اولیه و ثانویه ترانسفورماتور روی پلاک آن درج

می شود. سازندگان ترانسفورماتور هم بر اساس ولتاژ مورد نیاز

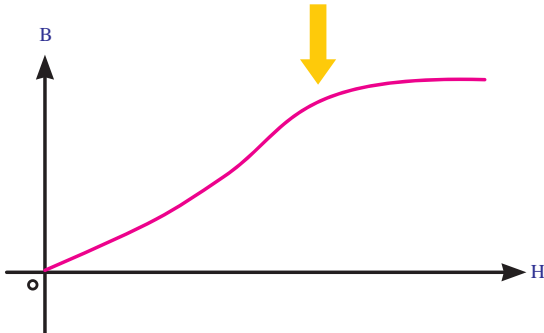
مصرف کننده و ولتاژ منبع، تعداد دور متناسب هر سیم پیچ را

محاسبه می کنند که با چگونگی محاسبه آن در کتاب سیم پیچی

آشنا خواهید شد.

شار پراکنده‌گی 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 این طور نیست یعنی با افزایش شدت میدان مغناطیسی H مطابق منحنی شکل (۹) هسته اشباع خواهد شد.



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

مثال اگر سیم پیچ اولیه ترانسفورماتوری دارای 200 دور و سیم پیچ ثانویه 50 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



- ۱- شار مغناطیسی ایجاد شده در یک ترانسفورماتور به چه عواملی بستگی دارد؟
- ۲- نسبت تبدیل ترانسفورماتور چیست؟
- ۳- ترانسفورماتوری دارای هسته با سطح مقطع 40 cm^2 و چگالی شار $1/25$ تسلا می باشد، تعداد دور سیم پیچ این ترانسفورماتور با ولتاژ القایی 110 ولت در شبکه 50 هرتز چقدر است؟

۱-۳- ترانسفورماتور ایده آل

۱-۳-۱- کلیات: با اینکه در طبیعت هیچ چیز ایده آلی

وجود ندارد ولی گاهی اوقات برای تشریح یک موضوع علمی لازم است در ابتدا ایده آل آن، مورد بررسی قرار گیرد. بررسی ترانسفورماتور ایده آل نیز صرفاً به خاطر تشریح رفتار واقعی ترانسفورماتور مورد توجه می باشد.

به طور کلی ترانسفورماتوری را ایده آل می گویند که

دارای شرایط زیر باشد:

● مقاومت الکتریکی سیم پیچ ها صفر باشد (یعنی هیچگونه

افت ولتاژ الکتریکی وجود نداشته باشد).

تمامی شار مغناطیسی تولید شده در سیم پیچ اولیه به

سیم پیچ ثانویه برسد یعنی همه شار از داخل هسته عبور کند و

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

$$\frac{120}{U_2} = \frac{500}{1500} \Rightarrow U_2 = \frac{1500 \times 120}{500} = 360V$$

پس این ترانسفورماتور یک ترانسفورماتور افزایشده ولتاژ می باشد.

وقتی سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور به مصرف کننده متصل می شود جریانی متناسب با بار مصرف کننده از آن عبور می کند. همانطور که گفته شد در ترانسفورماتور ایده آل توان ورودی و خروجی با هم برابر است یعنی :

$$S_1 = S_2 \quad (1-14)$$

$$U_1 \times I_1 = U_2 \times I_2 \quad (1-15)$$

رابطه (1-15) را می توان به صورت رابطه (1-16) نیز نوشت :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1-16)$$

در ترانسفورماتور ایده آل نسبت ولتاژ سیم پیچ ها با عکس نسبت جریان عبوری از آنها برابر است.

با توجه به رابطه (1-13)، (1-16)، رابطه (1-17) را می توان نوشت :

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1-17)$$

در ترانسفورماتور ایده آل نسبت تعداد حلقه های سیم پیچ با عکس نسبت جریان عبوری از آنها برابر است.

در ترانسفورماتور ایده آل با توجه به رابطه (1-17)، جریان عبوری از سیم پیچی که تعداد دور بیشتری دارد کمتر است و همین طور جریان عبوری از سیم پیچی که تعداد دور کمتری دارد، بیشتر می باشد.

۲-۳-۱- روابط اساسی ترانسفورماتور : با توجه به مدار شکل (۱۰) مشاهده می شود که در ترانسفورماتورهای ایده آل ولتاژ اعمال شده به ترمینال سیم پیچ اولیه یعنی U_1 (یا همان ولتاژ ورودی) با نیروی محرکه القایی سیم پیچ اولیه یعنی E_1 برابر است همچنین نیروی محرکه القا شده در سیم پیچ 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 سیم پیچ ها و همچنین عدم پراکندگی میدان در سیم پیچ اولیه و ثانویه می باشد. بنابراین :

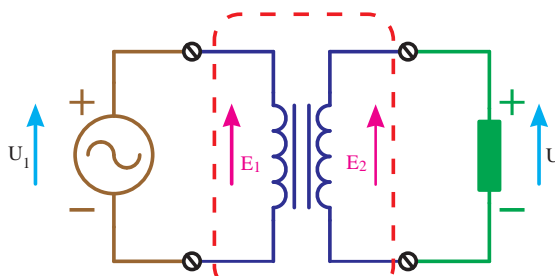
$$U_1 = E_1 \quad (1-10)$$

$$U_2 = E_2 \quad (1-11)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-12)$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-13)$$

در ترانسفورماتور ایده آل نسبت ولتاژ سیم پیچ ها با نسبت تعداد حلقه های آنها برابر است.



ترانسفورماتور ایده آل

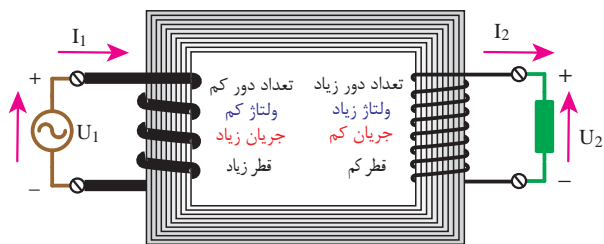
شکل ۱۰- اتصال ترانسفورماتور ایده آل به منبع ولتاژ و مصرف کننده

مثال در یک ترانسفورماتور ایده آل سیم پیچ اولیه ۵۰۰ دور و سیم پیچ ثانویه ۱۵۰۰ دور می باشد. اگر سیم پیچ اولیه به منبع ولتاژ متناوبی با ولتاژ مؤثر ۱۲۰ ولت متصل شود ولتاژ خروجی چقدر خواهد بود؟

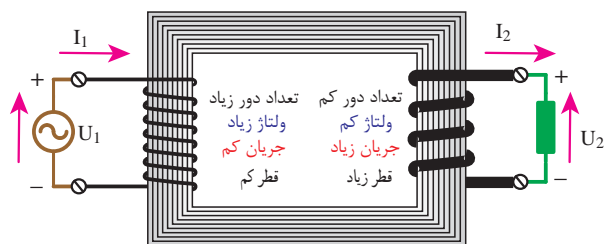
خود را بیازمایید



- ۱- قطر سیم پیچ فشار ضعیف از سیم پیچ فشار قوی می باشد. (کمتر / بیشتر)
- ۲- تعداد دور سیم پیچ فشار قوی از سیم پیچ فشار ضعیف می باشد. (کمتر / بیشتر)
- ۳- در ترانسفورماتور سیم پیچی که تعداد دور آن بیشتر است جریان آن است. (کمتر / بیشتر)
- ۴- یک ترانسفورماتور دارای ولتاژ اولیه ۷۰۰ V و ثانویه ۱۰۰ ولت است، اگر سیم پیچ ثانویه این ترانسفورماتور دارای ۸۰ دور سیم باشد، سیم پیچ اولیه آن چند دور است؟



(ب) ترانسفورماتور افزایشده



(الف) ترانسفورماتور کاهشده

شکل ۱۱- تأثیر تعداد دور سیم پیچ در تشخیص سیم پیچ فشار ضعیف یا فشار قوی

می باشد و آن را امپدانس انتقالی گویند. بین امپدانس Z_1 و Z_2 رابطه (۱-۲۰) برقرار است.

$$Z_1 = a^2 Z_2 \quad (1-20)$$

بیشتر بدانید



بنابراین خواهیم داشت :

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

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

جریان سیم پیچ سمت فشار ضعیف (LV) نیز مطابق رابطه (۱-۱۶) همواره بیشتر از جریان سیم پیچ سمت فشار قوی (HV) می باشد. به همین دلیل سطح مقطع سیم های سیم پیچ فشار ضعیف نسبت به سیم پیچ فشار قوی بیشتر و تعداد دور آن کمتر از سیم پیچ های فشار قوی می باشد در نتیجه با دیدن سیم پیچ های یک ترانسفورماتور می توان سیم پیچ فشار ضعیف را از سیم پیچ فشار قوی تشخیص داد. این نکته در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

مثال در یک ترانسفورماتور ایده آل سیم پیچ اولیه ۱۰۰۰ دور و سیم پیچ ثانویه ۱۰۰ دور سیم دارد اگر از سیم پیچ ثانویه ۵ آمپر عبور کند از سیم پیچ اولیه چند آمپر می گذرد؟

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

$$\frac{1000}{100} = \frac{5}{I_1} \Rightarrow I_1 = \frac{5 \times 100}{1000} = 0.5 \text{ A}$$

۳-۳-۱- تبدیل امپدانس - انتقال امپدانس :

یک ترانسفورمر ایده آل 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 می نماید با توجه به قانون اهم می توان نوشت :

$$Z_2 = \frac{U_2}{I_2} \quad (1-18)$$

از طرفی ولتاژ جریان سیم پیچ اولیه U_1 و I_1 نیز تداعی یک

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} \quad (1-19)$$

امپدانس را می کنند و می توان نوشت :

امپدانس Z_1 در واقع اثر امپدانس Z_2 در طرف اولیه

سیم پیچ ثانویه آن 5° دور باشد از دیدگاه اولیه ترانسفورماتور این بار الکتریکی چند اهم دیده می شود؟

$$N_1 = 500$$

$$N_2 = 50$$

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{500}{50} = 10$$

$$Z_1 = a^2 Z_2 \Rightarrow Z_1 = 10^2 \times 8 = 800 \Omega$$

در رابطه $(1-20)$

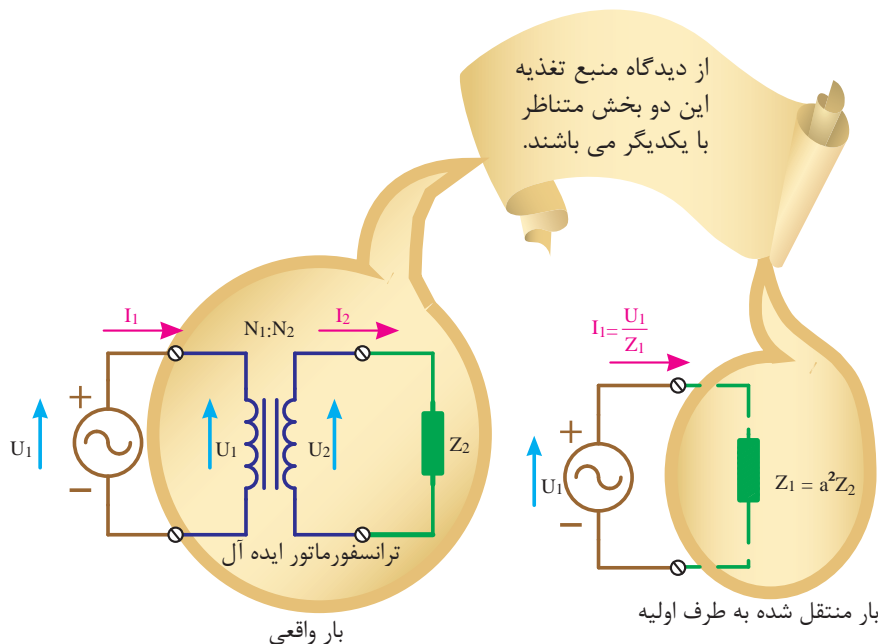
a نسبت تبدیل

Z_2 امپدانس بار در سمت ثانویه (Ω)

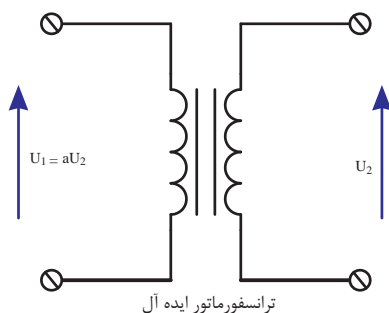
Z_1 امپدانس انتقالی بار به سمت اولیه (Ω)

مثال بار 8Ω به سیم پیچ ثانویه یک ترانسفورماتور ایده آل

متصل است اگر سیم پیچ اولیه این ترانسفورماتور 5° دور و



شکل ۱۲ - نمایش امپدانس بار در ثانویه و انتقال آن به اولیه ترانسفورماتور



شکل ۱۳ - انتقال ولتاژ ثانویه به سمت اولیه ترانسفورماتور ایده آل

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 8 اهمی در چنین ترانسفورماتوری از سمت اولیه 800Ω دیده می شود.

۴-۳-۱ - نتیجه گیری از روابط اساسی ترانسفورماتور

ایده آل: از ترانسفورماتور ایده آل به طور خلاصه نتایج زیر حاصل می شود:

جریان طرف ثانویه با عکس نسبت تبدیل $(\frac{1}{a})$ به طرف اولیه منتقل می شود.

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

خود را بیازمایید



۱) مقاومت $4\% \Omega$ در ثانویه یک ترانسفورماتور به اولیه منتقل و $1\ \Omega$ دیده می شود. ضریب تبدیل ترانسفورماتور چقدر است؟

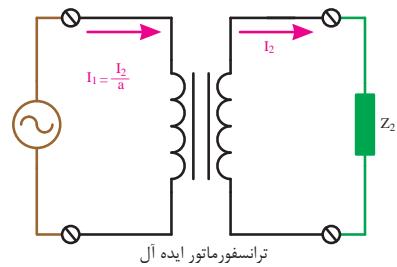
۴-۱-۱ ترانسفورماتور واقعی

در عمل هیچکدام از ترانسفورماتورهایی که مورد استفاده قرار می گیرند ایده آل نیستند یعنی سیم پیچ های اولیه و ثانویه دارای مقاومت اهمی R_1 و R_2 می باشند. همچنین شار ایجاد شده به وسیله جریان های سیم پیچ اولیه و یا ثانویه همگی از مدار مغناطیسی هسته عبور نمی کنند و بخشی از آن مسیر خود را از طریق هوا می بندند. این شارهای مغناطیسی را شار پراکندگی می گویند.

با توجه به شکل (۱۶) وضعیت ترانسفورماتور واقعی در حالت بی باری و بار داری به طور کامل نشان داده شده است.

۴-۱-۱-۱ مدار معادل ترانسفورماتور واقعی

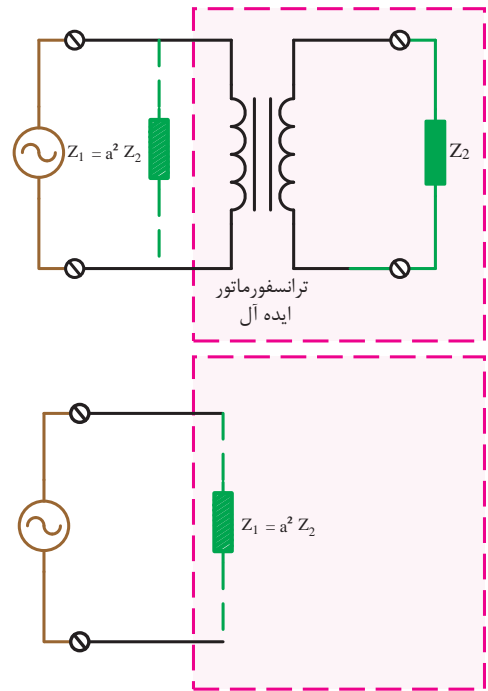
در حالت بی باری: اگر سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور مطابق شکل (۱۶-الف) به یک منبع ولتاژ متناوب سینوسی متصل گردد، در حالی که مدار ثانویه آن باز باشد، از سیم پیچ ثانویه این ترانسفورماتور جریانی عبور نمی کند به عبارتی $I_2 = 0$ است.



ترانسفورماتور ایده آل

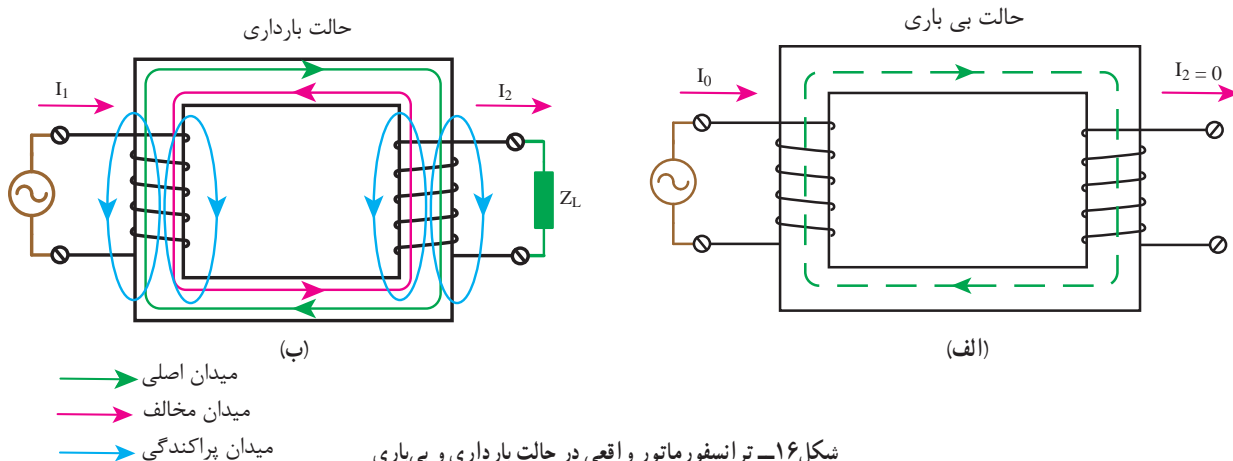
شکل ۱۴- انتقال جریان از طرف ثانویه به سمت اولیه ترانسفورماتور ایده آل

مقاومت های ظاهری با نسبت مجذور ضریب تبدیل (a^2) از طرف ثانویه به طرف اولیه منتقل می شوند.



شکل ۱۵- انتقال امپدانس (مقاومت ظاهری) از طرف ثانویه به سمت اولیه ترانسفورماتور ایده آل

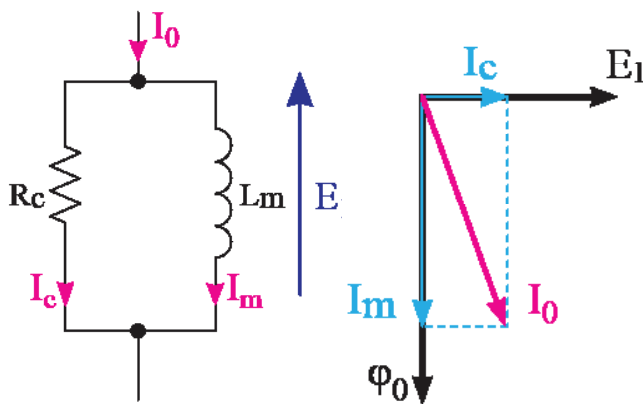
توان ظاهری ترانسفورماتور ایده آل در دو طرف اولیه و ثانویه بدون تغییر می باشد.



شکل ۱۶- ترانسفورماتور واقعی در حالت بارداری و بی باری

می آید. این بخش از جریان، مؤلفه تولید حرارت جریان بی باری 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 سیم پیچ اولیه هم فاز است.

با توجه به دو پیامد حاصل از جریان بی باری، 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، المان های الکتریکی فرضی (سلف و مقاومت) را به صورت موازی در نظر می گیرند. در شکل (۱۷) بردارهای جریان در حالت بی باری نمایش داده شده است.



شکل ۱۷- مدار معادل هسته

از طرفی به دلیل بسته بودن مدار سیم پیچ اولیه از آن جریانی عبور می کند که به آن جریان بی باری ترانسفورماتور گفته می شود و آن را با I_0 نمایش می دهند. گاهی اوقات به جریان بی باری جریان تحریک ترانسفورماتور نیز می گویند. عبور جریان بی باری از سیم پیچ اولیه دو پیامد دارد:

پیامد اول:

جریان بی باری باعث مغناطیس شدن هسته ترانسفورماتور می شود. در نتیجه از هسته فوران مغناطیسی Φ عبور می کند که باعث القای نیروی محرکه E_1 و E_2 در سیم پیچ های اولیه و ثانویه می شود. قسمتی از جریان بی باری که به مغناطیس شدن هسته و تولید فوران مغناطیسی Φ می انجامد را با I_m نشان می دهند و آن را جریان مغناطیس کننده می نامند.

از آنجا که این جریان اثر مغناطیسی دربی دارد، آن را معادل جریان یک سلف فرض می کنند. بنابراین در ترسیم برداری کمیت ها، جریان I_m نسبت به نیروی محرکه القایی E_1 سیم پیچ اولیه 90° پس فاز است.

پیامد دوم:

گرم شدن هسته ترانسفورماتور نشان می دهد که بخش دیگری از جریان بی باری 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

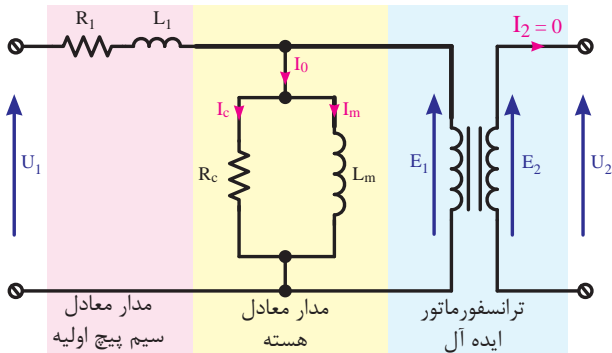


شکل ۱۸- مدار معادل سیم پیچ اولیه

بنابراین عبور جریان از سیم پیچ اولیه، افت ولتاژ اهمی و افت ولتاژ پراکندگی در آن به وجود می آید. در نتیجه نیروی محرکه القا شده در سیم پیچ از نیروی محرکه ورودی کوچک تر می شود.

به خاطر داشته باشید که در ترانسفورماتورهای ایده آل از مقاومت الکتریکی (اهمی) سیم پیچ ها و شار پراکندگی صرف نظر شد و به همین دلیل ولتاژ القایی سیم پیچ اولیه E_1 با ولتاژ ورودی U_1 برابر گردید.

با جمع بندی آنچه درباره اثرات جریان بی باری گفته شد مدار معادل شکل (۱۹) برای حالت بی باری ترانسفورماتور در نظر گرفته می شود.



شکل ۱۹- مدار معادل واقعی ترانسفورماتور در حالت بی باری

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

در شکل (۱۷) اندازه بردار I_C بزرگنمایی شده است. در واقعیت این جریان خیلی کوچک تر از I_m می باشد. به همین خاطر می توان گفت که جریان تحریک I_C نسبت به E_1 (نیروی محرکه القایی سیم پیچ اولیه) حدوداً 90° درجه پس فاز می باشد. بنابراین آنچه 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 می کند و R_C هم معرف همان مقاومتی است که تلفات حرارتی در هسته را مدل می کند و نشان دهنده تلفات در هسته می باشد.

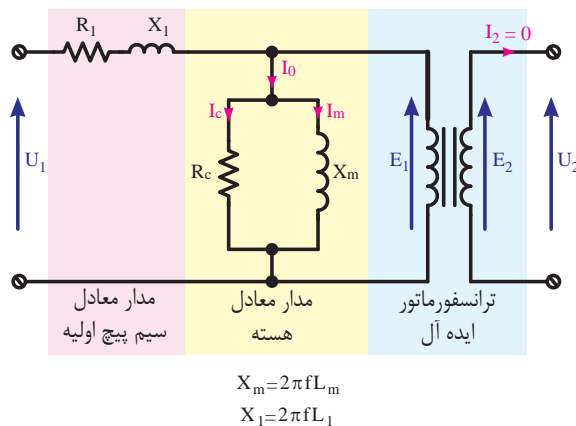
همچنین چون در ترانسفورماتورهای واقعی هر سیم پیچ از تعداد دور مشخصی، سیم با سطح مقطع معینی تشکیل شده است، بنابراین دارای مقاومت اهمی معینی است. این مقاومت را با R_1 نمایش می دهند. لذا عبور جریان از سیم پیچ اولیه، افت ولتاژ اهمی در آن ایجاد می کند.

از طرف دیگر همه شار مغناطیسی ایجاد شده به وسیله جریان مغناطیس کننده I_m از هسته عبور نمی کند بلکه در صورت اشباع هسته، بخشی از آن مسیر خود را از طریق هوا می بندد، بنابراین آن بخشی از شار مغناطیسی که فقط از یک سیم پیچ می گذرد و مسیر خود را از هوا می بندد شار پراکندگی، نشتی یا فراری می نامند. لازم به ذکر است که آن قسمت از شار که مسیر خود را از داخل هسته می بندد شار میدان اصلی نام دارد. با عبور شار میدان اصلی از داخل سیم پیچ ها نیروی محرکه در آنها القا می شود.

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

چون شار پراکندگی و مقاومت اهمی سیم پیچ اولیه هر دو باعث افت ولتاژ در سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور می شوند هر دو المان R_1 و L_1 را، در ورودی ترانسفورماتور به صورت 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 سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور را نشان می دهد.

در ترانسفورماتورها چگالی میدان مغناطیسی به مقدار جریان تحریک وابسته است. از این رو جریان تحریک بیانگر نقطه کار ترانسفورماتور می‌باشد. 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 زیاد شدن جریان تحریک از یک مقدار مشخص تلفات حرارتی در هسته زیاد می‌شود و باعث آسیب رسیدن به سیم‌پیچی‌ها می‌شود لذا از افزایش ولتاژ در ورودی از ترانسفورماتور باید محافظت کرد.



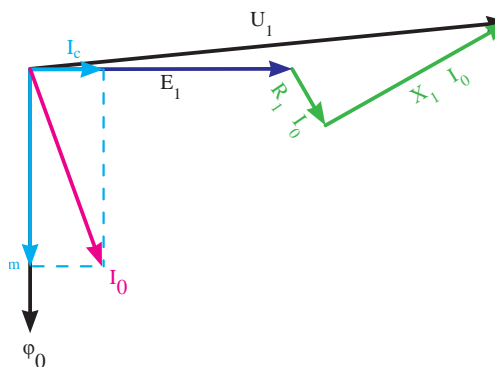
شکل ۲۰- مدار معادل واقعی ترانسفورماتور در حالت بی‌باری

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

خود را بیازمایید



- ۱- منظور از جریان تحریک ترانسفورماتور چیست؟
- ۲- شار پراکندگی در یک ترانسفورماتور چگونه به وجود می‌آید و به چه عواملی بستگی دارد؟
- ۳- چرا راکتانس معادل پراکندگی و مقاومت سیم‌پیچ را در ورودی ترانسفورماتور به صورت سری در نظر می‌گیرند؟



شکل ۲۱- وضعیت بردارهای ولتاژ و جریان در حالت بی‌باری

۲-۴-۱- مدار معادل ترانسفورماتور واقعی در

حالت بار داری: شکل (۱۶-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

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 (۲۱-۱) بین نیروی محرکه القایی اولیه و ولتاژ ورودی ترانسفورماتور واقعی بی بار برقرار است.

$$\overline{U_1} = \overline{E_1} + \overline{R_1 I_0} + \overline{X_1 I_0} \quad (1-21)$$

فوران پراکندگی در سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور معادل $X_2 I_2$ در نظر گرفته می شود. همچنین به دلیل مقاومت اهمی سیم پیچ ثانویه جریان عبوری از آن باعث افت ولتاژ اهمی در سیم پیچ می شود که معادل $R_2 I_2$ می باشد. مشابه آنچه برای سیم پیچ اولیه گفته شد در ترانسفورماتور واقعی در حالت بارداری، ثانویه ترانسفورماتور با یک مقاومت اهمی R_2 سری شده با راکتانس پراکندگی X_2 مطابق شکل (۲۲)، مدل سازی می شود.



$$X_2 = 2\pi f L_2$$

شکل ۲۲- مدار معادل سیم پیچ ثانویه

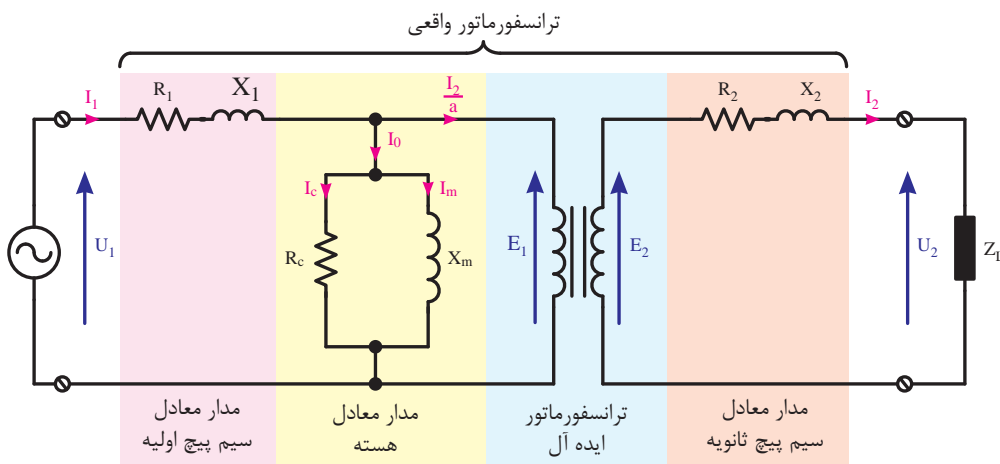
شکل (۲۳)، مدار معادل سیم پیچ اولیه، هسته و سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور را در حالت واقعی نمایش می دهد.

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

مغناطیسی سمت ثانویه است، در آن ایجاد می شود. نیروی محرکه مغناطیسی نیز شار مغناطیسی تولید می کند. بخشی از این شار مغناطیسی مسیر خود را از داخل هسته می بندد که آن را با Φ_1 نشان می دهند و طبق قانون لنز سعی در خنثی کردن میدان اصلی شار Φ_1 دارد. و جزئی از آن فقط از سیم پیچ ثانویه عبور می کند و مسیر خود را از هوا می بندد که همان شار پراکندگی یا فراری سیم پیچ ثانویه است. کاهش شار مغناطیسی Φ_1 باعث کاهش نیروی محرکه القایی سیم پیچ اولیه و ثانویه می شود ولی از آنجا که سیم پیچ اولیه به منبع ولتاژ U_1 متصل است، برای مقابله با این پدیده و ثابت نگاه داشتن Φ_1 جریان بیشتری از منبع ولتاژ دریافت می کند. مقدار این جریان به قدری است که نیروی محرکه القایی در سیم پیچ اولیه تغییر نکند بنابراین مقدار جریان I_1 از حالت بی باری به جریان I_1 در حالت بارداری افزایش می یابد و متناسب با آن فوران مغناطیسی Φ_1 در هسته جاری می شود. به عبارتی جمع برداری فوران Φ_1 ، Φ_2 همواره ثابت و برابر مقدار Φ_1 می باشد. یعنی

$$\bar{\Phi}_1 + \bar{\Phi}_2 = \bar{\Phi}_1 \quad (1-22)$$

نکته قابل توجه اینکه با افزایش جریان در سیم پیچ ثانویه، فوران پراکندگی سیم پیچ نیز افزایش می یابد این موضوع سبب کاهش ولتاژ خروجی U_2 ترانسفورماتور می شود. به همین خاطر



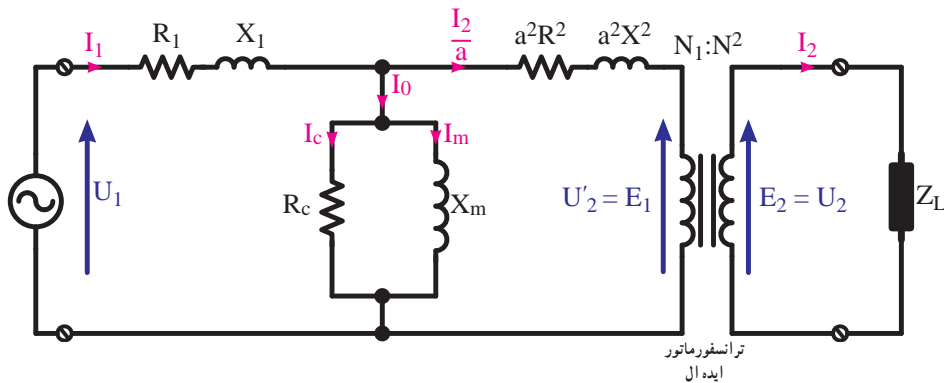
شکل ۲۳- مدار معادل ترانسفورماتور واقعی در حالت بارداری

داد. برای ساده تر کردن مدار معادل شکل (۲۳)، سیم پیچ ثانویه به سمت اولیه منتقل شده تا شکل (۲۴) به دست آید. مدار معادل ترانسفورماتور واقعی را می توان با حذف ترانسفورماتور ایده آل 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 می توان آن بخش را از مدار معادل حذف کرد و به خاطر سپرد.

اجزای مدار معادل ترانسفورماتور واقعی به تفکیک عبارتند از:

- مدار معادل سیم پیچ اولیه
- مدار معادل هسته
- مدار معادل سیم پیچ ثانویه

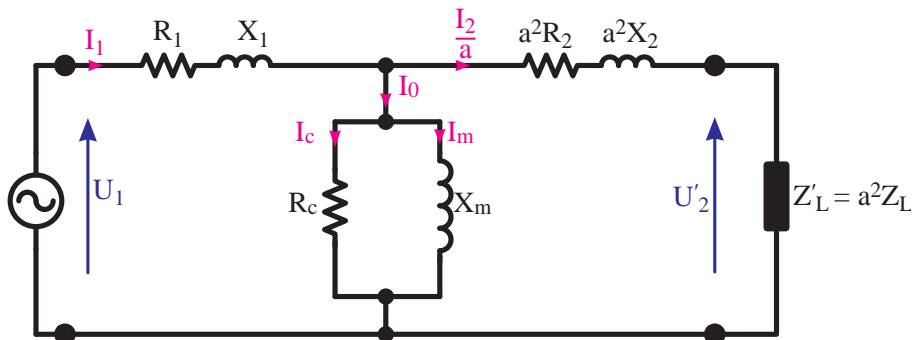
همان طور که قبلاً توضیح داده شد می توان امپدانس را در طرفین ترانسفورماتور ایده آل با توجه به رابطه (۲۰-۱) انتقال



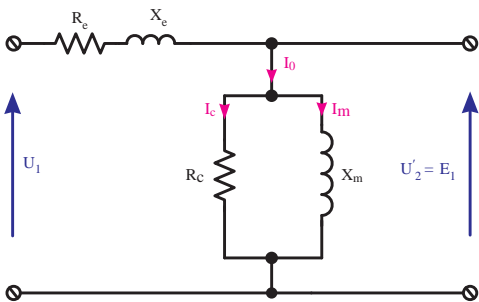
شکل ۲۴- مدار معادل ترانسفورماتور واقعی در حالت بارداری

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

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 معادل های تقریبی ترانسفورماتورهای قدرت نیز آشنا شوید.

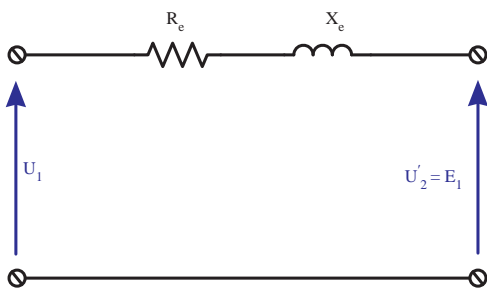


شکل ۲۵- مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با انتقال بار به اولیه



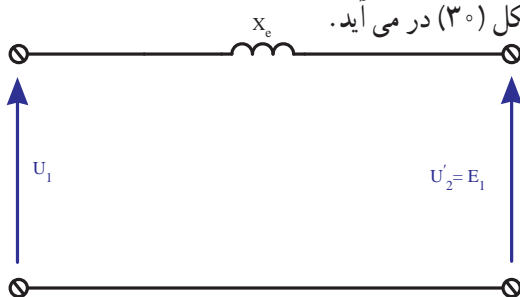
شکل ۲۸- مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با احتساب تقریب دوم

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 بی باری I_0) در مقابل جریان اولیه صرف نظر کرد. پس مدار معادل به شکل (۲۹) تبدیل می شود.



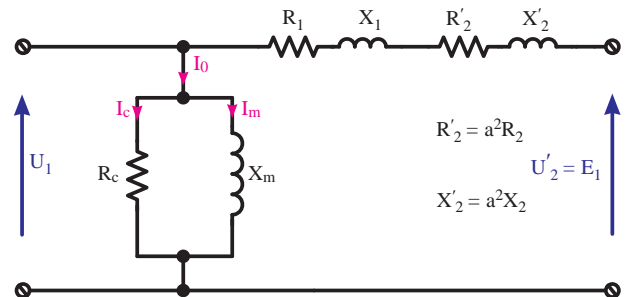
شکل ۲۹- مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با احتساب تقریب سوم

تقریب چهارم: در ترانسفورماتورهای قدرتی که توان آنها از ۱ MVA بیشتر باشد مقدار راکتانس معادل سیم پیچ ها خیلی بزرگتر از مقاومت اهمی آنها است. به عبارتی $R_e \ll X_e$ می باشد. این موضوع به دلیل مقطع بالای سیم پیچ های ترانسفورماتور است. در این حالت می توان از مقدار مقاومت اهمی (R_e) در مقابل راکتانس (X_e) صرف نظر کرد. لذا مدار معادل ترانسفورماتورهای قدرتی در ترانسفورماتورهای بزرگتر به شکل (۳۰) در می آید.



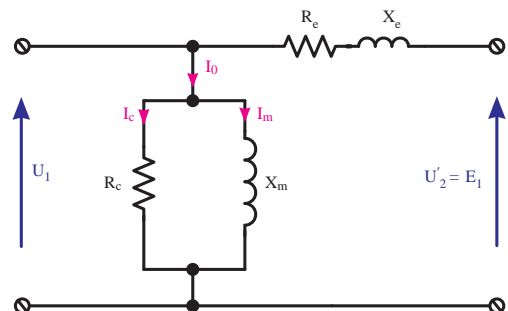
شکل ۳۰- مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با احتساب تقریب چهارم

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

در این صورت با سری شدن مقاومت های اهمی و راکتانس پراکندگی طرف اولیه و ثانویه 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 سیم پیچ اولیه صرف نظر شده است.



شکل ۲۷- مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با احتساب تقریب اول

تقریب دوم: با استدلالی مشابه آنچه در تقریب اول گفته شد می توان شاخه موازی را به طرف خروجی جابه جا کرد. سپس مقاومت های اهمی و راکتانس پراکندگی طرف اولیه و ثانویه 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 به دست آورد.

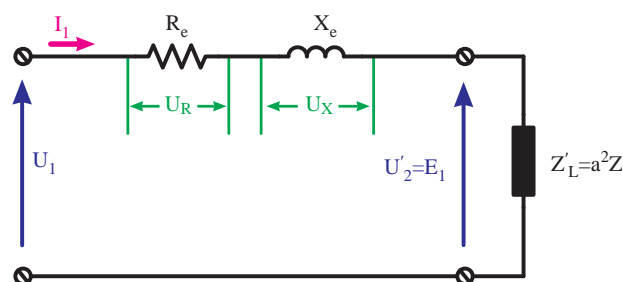
در این تقریب، اثر جریان تحریک در ایجاد افت ولتاژ سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور در نظر گرفته می شود.



خود را بیازمایید

- ۱- شارهای مغناطیسی ایجاد شده ترانسفورماتور در حالت بارداری را نام برده و هر یک را توضیح دهید.
- ۲- اجزای مدار معادل ترانسفورماتور واقعی را نام ببرید.
- ۳- چرا در تقریب سوم می توان از اثر جریان تحریک صرف نظر کرد؟
- ۴- مدار معادل ترانسفورماتورهای پر قدرت را رسم نموده کمیت های آن را معرفی کنید.

همین خاطر از تقریب نوع سوم استفاده می شود.
مدار معادل ترانسفورماتور در تقریب نوع سوم مجدداً در شکل (۳۱) آورده شده است.



شکل ۳۱- مدار معادل واقعی ترانسفورماتور در زیر بار

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

می باشد:

$$\overline{U_1} = \overline{U_R} + \overline{U_X} + \overline{U'_2} \quad (1-23)$$

رابطه (۱-۲۳) نشان می دهد با جمع برداری سه بردار

$\overline{U_R}$ ، $\overline{U'_2}$ و $\overline{U_X}$ به دست می آید.

$$\overline{U_1} = \overline{R_e I_1} + \overline{X_e I_1} + \overline{U'_2} \quad (1-24)$$

$$U_R = R_e I_1 \quad (1-25)$$

$$U_X = X_e I_1 \quad (1-26)$$

در رابطه (۱-۲۵) و (۱-۲۶) افت ولتاژ ناشی از

مقاومت اهمی سیم پیچ ها و U_X افت ولتاژ ناشی از پراکندگی

سیم پیچ ها می باشد.

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 می شود آنگاه با توجه به

مقدار و نوع بار مصرفی بردار جریان I_1 با زاویه مناسب نسبت به

برداری ولتاژ E_1 یا U'_2 کشیده می شود. در بار اهمی خالص ولتاژ

و جریان با یکدیگر مطابق شکل (۳۲) هم فاز می باشند.



شکل ۳۲- ترسیم دیگرام برداری حالت بارداری ترانسفورماتور با بار اهمی خالص (مرحله ۱)

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 تقریب های دیگری از این دست بیابید)

۱-۵- دیگرام برداری حالت بارداری

در تحلیل بارداری ترانسفورماتور و رفتار آن با انواع

بارهای مختلف می توان 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 می باشند. در

تقریب سوم قید شد که در صورت زیر بار رفتن ترانسفورماتور

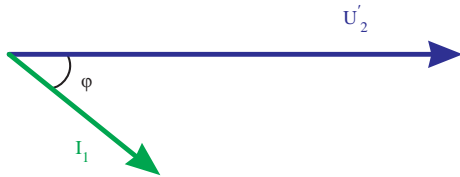
بیش از نصف جریان نامی، می توان از اثر جریان تحریک

ترانسفورماتور (جریان بی باری I_0) در مقابل جریان اولیه

صرف نظر کرد. از آنجا که در تحلیل بارداری ترانسفورماتورهای

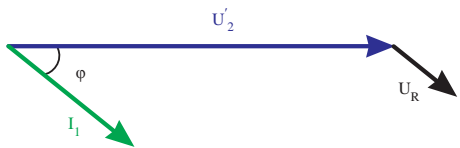
قدرت و دیگرام برداری حالت بارداری آن مورد نظر می باشد به

براداری برای بار اهمی - سلفی تکرار می‌شود. ابتدا بردار ولتاژ ترمینال خروجی از دیدگاه اولیه (U'_p) 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'_p کشیده می‌شود. در بار اهمی - سلفی مطابق شکل (۳۶) جریان به اندازه زاویه ϕ از ولتاژ عقب‌تر است.



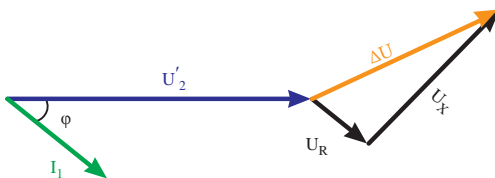
شکل ۳۶- ترسیم دیاگرام برداری حالت براداری ترانسفورماتور با بار اهمی - سلفی (مرحله ۱)

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'_p مطابق شکل (۳۷) ترسیم می‌شود.



شکل ۳۷- ترسیم دیاگرام برداری حالت براداری ترانسفورماتور با بار اهمی - سلفی (مرحله ۲)

سپس بردار U_X نیز که معادل افت ولتاژ پراکنندگی است و همواره 90° جلوتر از جریان I_1 می‌باشد در ادامه بردار U_R ترسیم می‌شود. شکل (۳۸) می‌شود.



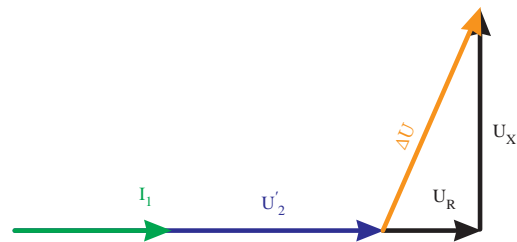
شکل ۳۸- ترسیم دیاگرام برداری حالت براداری ترانسفورماتور با بار اهمی - سلفی (مرحله ۳)

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'_p مطابق شکل (۳۳) ترسیم می‌شود.



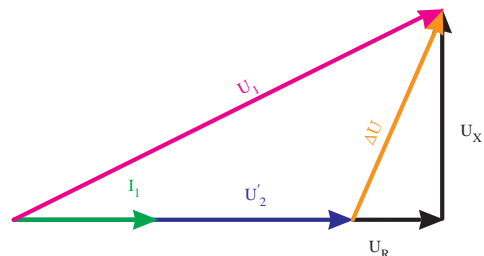
شکل ۳۳- ترسیم دیاگرام برداری حالت براداری ترانسفورماتور با بار اهمی خالص (مرحله ۲)

سپس بردار U_X نیز که معادل افت ولتاژ پراکنندگی است و همواره 90° جلوتر از جریان I_1 می‌باشد در ادامه بردار U_R رسم می‌شود. شکل (۳۴)، برآیند بردارهای U_X و U_R بیانگر افت ولتاژ کلی ΔU می‌باشد.



شکل ۳۴- ترسیم دیاگرام برداری حالت براداری ترانسفورماتور با بار اهمی خالص (مرحله ۳)

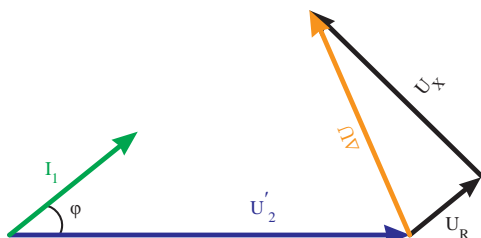
حالا ابتدای بردار E_1 یا U'_p به انتهای بردار U_X مطابق شکل (۳۵) وصل می‌شود تا برآیند U_R ، U'_p و U_X به دست آید. این بردار، بردار U_1 ولتاژ ورودی است.



شکل ۳۵- ترسیم دیاگرام برداری حالت براداری ترانسفورماتور با بار اهمی خالص (مرحله ۴)

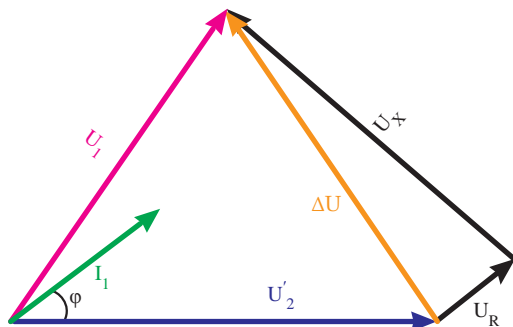
مجدداً مراحل فوق برای ترسیم دیاگرام برداری حالت

سپس بردار U_X نیز که معادل افت ولتاژ پراکنندگی است و همواره 90° جلوتر از جریان I_1 می باشد در ادامه بردار U_R ترسیم می شود (شکل ۴۲).



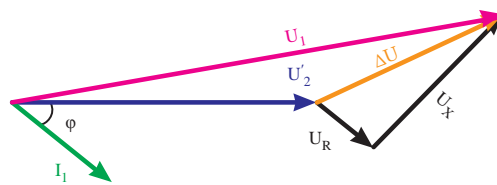
شکل ۴۲- ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری ترانسفورماتور با بار اهمی - خازنی (مرحله ۳)

حالا ابتدای بردار U'_2 به انتهای بردار U_X مطابق شکل (۴۳) وصل می شود. این بردار، بردار U_1 ولتاژ ورودی است. دیاگرام برداری هریک از بارهای اهمی خالص، اهمی - سلفی و اهمی - خازنی همگی در شکل (۴۴) نشان داده شده است. در همه دیاگرام ها 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 می شود:



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

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



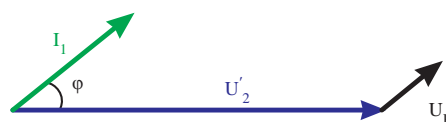
شکل ۳۹- ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری ترانسفورماتور با بار اهمی - سلفی (مرحله ۴)

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



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

در ادامه بردار U_R که معادل افت ولتاژ اهمی است و هم فاز با جریان می باشد همسنگ با بردار I_1 و از انتهای بردار U'_2 مطابق شکل (۴۱) ترسیم می شود.



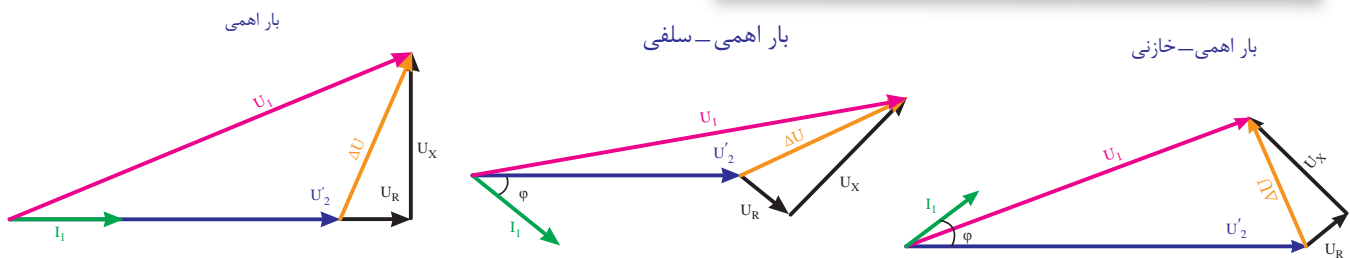
شکل ۴۱- ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری ترانسفورماتور با بار اهمی - خازنی (مرحله ۲)

نکته ۱



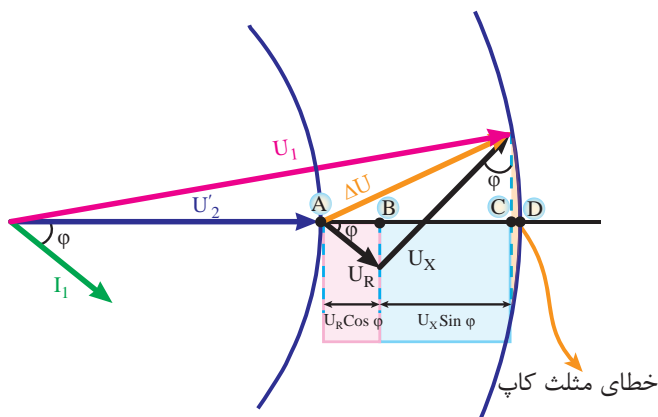
در بار اهمی - خازنی بردار U'_2 از U_1 بزرگتر شده اما در بار اهمی خالص اندازه بردار U'_2 کمی از U_1 کوچکتر و در بار اهمی - سلفی این اختلاف بیشتر شده است. با احتساب نوع بار به نظر می رسد در بار سلفی خالص U'_2 به کوچکترین اندازه خود نسبت به U_1 و در بار خازنی خالص U'_2 به بزرگترین مقدار خود نسبت به U_1 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 می باشد.

ولتاژ خروجی ترانسفورماتور به نوع و مقدار امپدانس بار وابسته می باشد.



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

در شکل (۴۵) با ترسیم بزرگتر این مثلث چگونگی محاسبه افت ولتاژ نشان داده شده است. این مثلث به مثلث کاپ^۱، مشهور است.



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

نکته ۲



در هر سه نمودار شکل (۴۴) دو بردار U_R و U_X یک مثلث قائم الزاویه تشکیل داده اند که وتر این مثلث معادل بردار افت ولتاژ کل ترانسفورماتور می باشد. اندازه این بردار در بارهای با امپدانس یکسان، مساوی می باشد ولی چون وتر این مثلث با تغییر نوع بار تغییر جهت می دهد محاسبه مقدار افت ولتاژ در بارهای مختلف کمی پیچیده تر می شود. به این جهت برای محاسبه افت ولتاژ کلی در ترانسفورماتور دو دایره یکی به مرکز مبدأ بردارها و به شعاع U'_2 و دیگری به همان مرکز ولی به شعاع U_1 ترسیم می شود. اختلاف شعاع دوایر را با تقریب خوبی می توان معادل افت ولتاژ کلی ترانسفورماتور در زیر بار دانست.

۱- کاپ نام فرد مبتکر این روش است.



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

$$\Delta U = 10 \times 1 + 30 \times 0 = 10 \text{ V}$$

$$E_1 = U'_1 = U_1 - \Delta U = 250 - 10 = 240 \text{ V}$$

(ب) بار اهمی - سلفی با ضریب قدرت ۰/۶

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

$$\Delta U = (10 \times 0/6) + (30 \times 0/8) = 30 \text{ V}$$

$$E_1 = U'_1 = U_1 - \Delta U = 250 - 30 = 220 \text{ V}$$

(ج) بار اهمی - خازنی با ضریب قدرت ۰/۶

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

نیز منفی می شود.

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

$$\Delta U = (10 \times 0/6) + (30 \times (-0/8)) = -18 \text{ V}$$

$$E_1 = U'_1 = U_1 - \Delta U = 250 - (-18) = 268 \text{ V}$$

خود را بیازمایید



۱- مدار معادل ترانسفورماتور واقعی زیر بار را با تقریب

سوم رسم نموده و رابطه ولتاژهای آن را بنویسید.

۲- با افزایش بار ترانسفورماتور واقعی فوران پراکندگی و

افت ولتاژ آن چگونه تغییر می کند؟

۳- بیشترین افت ولتاژ در کدام نوع بار اتفاق می افتد؟

۴- 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 می کند. ولتاژی باری

خروجی ترانسفورماتور را به دست آورید.

۶-۱- تعیین مقادیر پارامترهای مدار معادل به کمک

آزمایش های تجربی

مقدار عناصر مدار معادل ترانسفورماتور را می توان با

آزمایش بی باری و اتصال کوتاه تعیین نمود به علاوه به کمک این

آزمایش ها می توان تلفات ترانسفورماتور را نیز بدست آورد.

همان طور که در شکل (۴۶) ملاحظه می کنید مدار معادل

در شکل (۴۵) داریم :

$$\overline{\Delta U} = \vec{U}_R + \vec{U}_X \quad (1-27)$$

$$U_{AB} = U_R \cos \varphi \quad (1-28)$$

$$U_{BC} = U_X \sin \varphi \quad (1-29)$$

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

U_{CD} = خطای مثلث کاپ

$$\Delta U \approx U_R \cos \varphi + U_X \sin \varphi \quad (1-30)$$

بنابراین با تقریب رابطه (۱-۳۴) برقرار است.

$$E_1 = U'_1 = U_1 - \Delta U \quad (1-31)$$

ΔU - افت ولتاژ کلی ترانسفورماتور در زیر بار از دیدگاه

اولیه

U_R - افت ولتاژ ناشی از مقاومت اهمی سیم پیچ ها از

دیدگاه اولیه

U_X - افت ولتاژ ناشی از پراکندگی شار از دیدگاه اولیه

φ - زاویه اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان بار

توجه ۱



در بارهای اهمی - سلفی افت ولتاژ باعث کاهش

ولتاژ خروجی می شود اما در بار اهمی - خازنی چون

(جریان از ولتاژ جلو تر است) پس φ منفی بوده و

مقدار $\sin \varphi$ منفی می گردد و از آنجا که مقدار U_X در

ترانسفورماتور ها خیلی بیشتر از U_R می باشد 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

سیم پیچ ها ۱۰ ولت و افت ولتاژ بر اثر پراکندگی میدان ۳۰ ولت

می باشد. اگر این ترانسفورماتور به ولتاژ ۲۵۰ ولت وصل شود

مطلوب است ولتاژ دو سر بار در هر یک از حالت های زیر

(الف) بار اهمی خالص

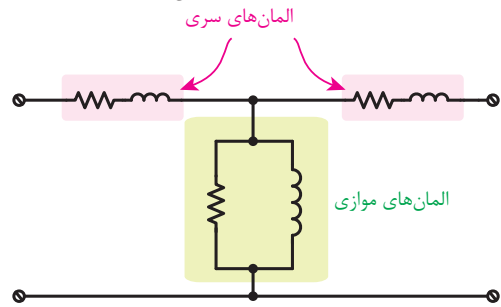
در بار اهمی خالص ضریب قدرت یک است.

را که دستگاه‌های اندازه‌گیری نشان می‌دهند یادداشت می‌نماییم. با توجه به مدار معادل شکل (۴۷-ب) 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 اندازه‌گیری شده توسط وات‌متر P_0 تقریباً همان توان تلف شده در هسته ترانسفورماتور است که به آن تلفات هسته (P_{Core}) می‌گویند. یعنی

$$P_0 \approx P_{Core}$$

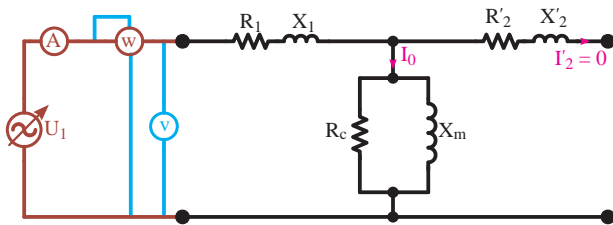
ترانسفورماتور شامل تعدادی المان سری و موازی می‌باشد. المان‌های موازی را به کمک آزمایش حالت بی‌باری و المان‌های سری را به کمک آزمایش اتصال کوتاه می‌توان مشخص نمود.



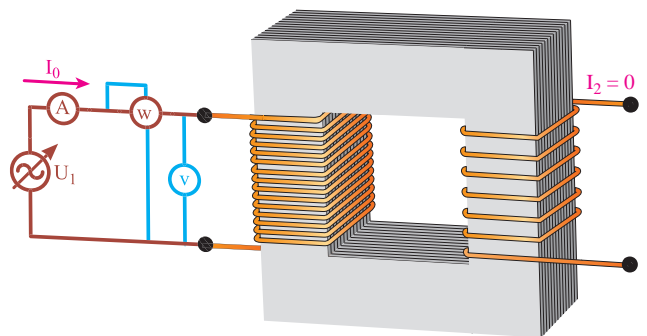
شکل ۴۶- نمایش المان‌های سری و موازی بر روی مدار معادل واقعی ترانسفورماتور

۱-۶-۱- 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 (۴۷-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

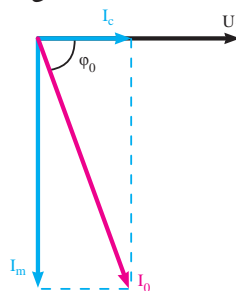


(ب)



(الف)

شکل ۴۷- مدار یک ترانسفورماتور واقعی در حال آزمایش بی‌باری



شکل ۴۸- دیاگرام برداری و ولتاژ و جریان در حالت بی‌باری



۲-۶-۱- 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 (۴۹-الف) دو سر سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور را اتصال کوتاه می‌کنند.

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 سیم پیچ 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 می‌دهد مجموع تلفات مسی سیم پیچ‌ها و تلفات هسته است. P_{SC} توانی که وات‌متر در آزمایش اتصال کوتاه نشان می‌دهد برابر است با:

$$P_{SC} = P_{Cu_1} + P_{Cu_2} + P_{core} \quad (1-38)$$

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 می‌شود خیلی کوچکتر خواهد بود. بنابراین می‌توان ثابت کرد، در آزمایش اتصال کوتاه، توانی که وات‌متر نشان می‌دهد تقریباً همان تلفات مسی سیم پیچ‌ها است.

در نتیجه با توجه به مدار معادل شکل (۴۹-ب) توانی که وات‌متر نشان می‌دهد عبارت است از توان تلف شده در مقاومت‌های R_1 و R'_2 که به صورت حرارت در سیم پیچ‌ها تلف می‌شود.

$$P_{SC} = R_1 I_n^2 + R'_2 I_n^2 \quad (1-39)$$

$$P_{SC} = (R_1 + R'_2) I_n^2 \quad (1-40)$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 I_0} \quad (1-32)$$

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0} \quad (1-33)$$

$$I_C = I_0 \cos \varphi_0 \quad (1-34)$$

$$I_m = I_0 \sin \varphi_0 \quad (1-35)$$

$$X_m = \frac{U_1}{I_m} \quad (1-36)$$

$$R_C = \frac{U_1}{I_C} \quad (1-37)$$

$\cos \varphi_0$ ضریب قدرت در حالت بی‌باری

P_0 توانی که وات‌متر در آزمایش بی‌باری نشان می‌دهد

U_1 ولتاژ ورودی

I_0 جریان بی‌باری (جریانی که آمپر متر نشان می‌دهد)

با توجه به مدار معادل، جریان تحریک I_0 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 به جای 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



- ۱- در آزمایش بی‌باری: ولتاژ اتصال به اولیه..... و جریان خروجی..... است. و از شبکه جریان..... دریافت می‌شود.
- ۲- چرا تلفات هسته در ترانسفورماتور را تلفات ثابت می‌نامند؟
- ۳- چرا در آزمایش بی‌باری از تلفات سیم پیچ صرف نظر می‌شود؟

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

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} \quad (1-44)$$

$$R_e = R_1 + R_2' \quad (1-45)$$

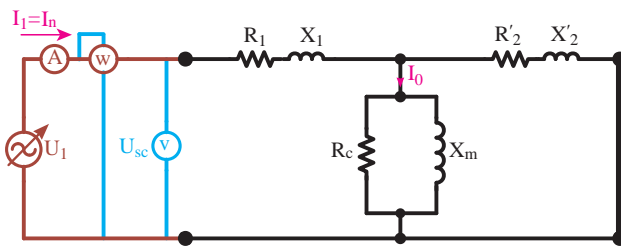
$$X_e = X_1 + X_2' \quad (1-46)$$

$$P_{SC} = R_e I_n^2 \quad (1-41)$$

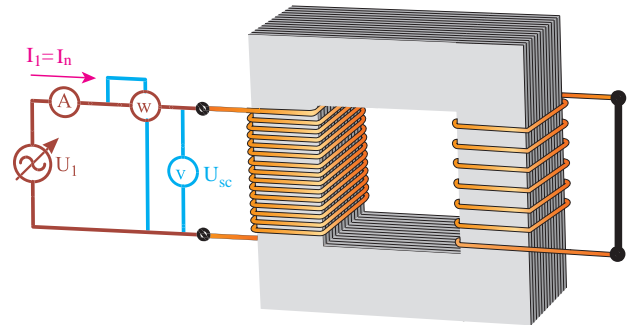
$$R_e = \frac{P_{SC}}{I_n^2} \quad (1-42)$$

U_{SC} ولتاژی است که ولت متر نشان می دهد و چون $U_{SC} = Z_e I_n$ بنابراین:

$$Z_e = \frac{U_{SC}}{I_n} \quad (1-43)$$



(ب)



(الف)

شکل ۴۹- مدار یک ترانسفورماتور واقعی در حال آزمایش اتصال کوتاه

$$P_{Cu} = P_{Cu_n} \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 \quad (1-49)$$

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 (۱-۵۰) نسبت $\frac{S}{S_n}$ یا $\frac{I}{I_n}$ را ضریب بار

می گویند و با حرف A نمایش می دهند.

$$A = \frac{I}{I_n} = \frac{S}{S_n} \quad (1-50)$$

پس می توان رابطه (۱-۴۸) یا (۱-۴۹) را به صورت

رابطه (۱-۵۴) نوشت:

$$P_{Cu} = P_{Cu_n} A^2 \quad (1-51)$$

از آنجا که تلفات مسی ترانسفورماتور وابسته به جریان بار می باشد و با تغییرات جریان بار تلفات مسی تغییر می کند از این رو تلفات مسی ترانسفورماتور را تلفات متغیر نیز می نامند. تلفات مسی بدست آمده از آزمایش اتصال کوتاه به ازای عبور جریان نامی است که آن را با P_{Cu_n} نمایش می دهند. بنابراین:

$$P_{SC} = P_{Cu_1} + P_{Cu_2} = P_{Cu_n} \quad (1-47)$$

در صورتی که تلفات مسی در جریانی غیر از جریان نامی

ترانسفورماتور به دست آید می توان از روابط (۱-۵۱) و (۱-۵۲) استفاده کرد.

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

$$P_{Cu} = P_{Cu_n} \left(\frac{I}{I_n}\right)^2 \quad (1-48)$$

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



خود را بیازمایید

- ۱- کدامیک از کمیت‌های الکتریکی مدار معادل ترانسفورماتور را می‌توان از آزمایش اتصال کوتاه مشخص نمود؟
- ۲- مهم‌ترین نکته حفاظتی را که باید هنگام انجام آزمایش اتصال کوتاه رعایت نمود چیست؟
- ۳- چرا در آزمایش اتصال کوتاه از تلفات هسته صرف نظر می‌شود؟
- ۴- 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؟

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) محدوده درصد افت ولتاژ چند نوع ترانسفورماتور واقعی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- درصد ولتاژ اتصال کوتاه در ترانسفورماتورهای مختلف

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



خود را بیازمایید

- ۱- ولتاژ اتصال کوتاه را تعریف کنید.
- ۲- ترانسفورماتوری که ولتاژ اتصال کوتاه آن کم است، در زیر بار دارای افت ولتاژ..... می‌باشد.
- ۳- اگر ترانسفورماتوری دارای امپدانس داخلی بزرگ باشد حتما دارای ولتاژ اتصال کوتاه..... است.



تحقیق کنید

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

۱-۷ 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 به صورت درصد بر روی پلاک نشان می‌دهند.

$$\% \Delta U_k = \frac{U_{sc}}{U_n} \times 100 \quad (1-52)$$

۱-۸ 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 سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور در حالی که دو سر سیم پیچ ثانویه آن مستقیماً

خود را بیازمایید



- ۱- جریان اتصال کوتاه ترانسفورماتور چیست؟
- ۲- در اجرای آزمایش اتصال کوتاه ترانسفورماتور اولین نکته حفاظتی که باید رعایت شود چیست؟
- ۳- اتصال کوتاه ثانویه ترانسفورماتوری که ولتاژ اتصال کوتاه..... دارد، خطرناک تر است.
- ۴- خروجی یک ترانسفورماتور با ولتاژ اتصال کوتاه ۸٪، اتصال کرده و جریان ۱۲۰ آمپر از سیم پیچ اولیه عبور کرده است، جریان نامی اولیه را محاسبه کنید.

۹-۱- تلفات در ترانسفورماتور

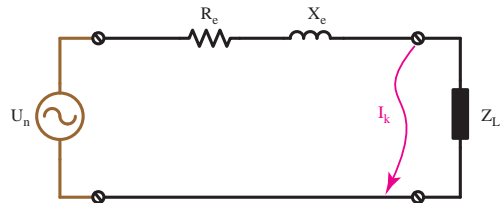
ترانسفورماتور وسیله‌ای است که انرژی ورودی را با ماهیت الکتریکی از شبکه برق دریافت کرده و در خروجی نیز آن را با همان ماهیت الکتریکی به بار تحویل می‌دهد. اما همه انرژی جذب شده از شبکه برق تحویل بار نمی‌شود، بلکه بخشی از آن در هسته و سیم پیچ به گرما تبدیل می‌شود. به مقدار انرژی الکتریکی که در واحد زمان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

بنابراین تلفات ترانسفورماتور مربوط به هسته و سیم پیچ می‌باشد.

۹-۱-۱- 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 هیستریزس و فوکو می‌باشد.

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



شکل ۵۰- مدار معادل ترانسفورماتور در حال اتصال کوتاه واقعی

در شرایط کار ترانسفورماتور باید مراقب بود که هیچ‌گاه 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 این صورت ممکن است اتصال کوتاه واقعی رخ دهد.

جریان اتصال کوتاه از رابطه (۱-۵۳) به دست می‌آید.

$$I_k = \frac{I_n}{\Delta U_k} \quad (1-53)$$

جریان I_K را جریان اتصال کوتاه داریم 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

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

جنس هسته جزء ثابت ساختمان ترانسفورماتور هستند پس مقدار این تلفات ثابت می‌باشد.

خود را بیازمایید

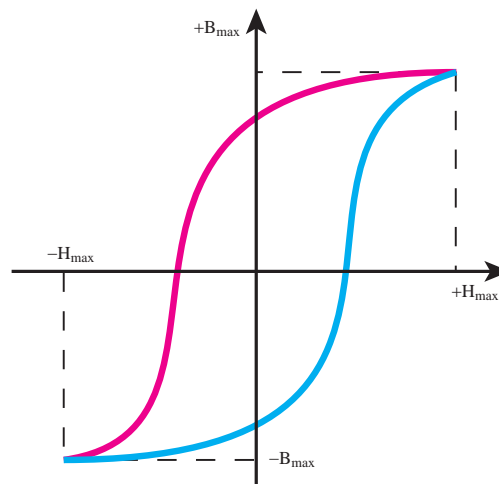


- ۱- تلفات ایجاد شده در ترانسفورماتور مربوط به کدام اجزای آن می‌باشد؟
- ۲- چه عواملی باعث افزایش تلفات هیستریزیس در ترانسفورماتور می‌شود؟
- ۳- تلفات هیستریزیس ثابت است یا متغیر؟ چرا؟

تلفات فوکو: با عبور شار مغناطیسی از هسته، در هسته 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.

تلفات هیستریزیس: اگر نیروی محرکه مغناطیسی در مدار مغناطیسی به طور متناوب تغییر جهت دهد در این صورت منحنی B-H یعنی چگالی میدان مغناطیسی بر حسب شدت میدان مغناطیسی مطابق شکل (۵۱) خواهد شد.



شکل ۵۱- منحنی هیستریزیس در یک ماده مغناطیسی

حلقه نشان داده شده در شکل (۵۱) را حلقه هیستریزیس 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 هیستریزیس گویند.

مقدار تلفات هیستریزیس به فرکانس و جنس هسته بستگی دارد. برای کاهش تلفات هیستریزیس 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 هیستریزیس می‌شود اما از آنجا که فرکانس شبکه

۱- فولاد سیلسیم نورد سرد شده دارای خاصیت خوب مغناطیسی می‌باشد.

خود را بیازمایید



- ۱- جهت جریان‌های گردابی در هسته نسبت به جهت عبور شار مغناطیسی است. (عمود - موازی)
- ۲- هرچه مقاومت هسته بیشتر باشد تلفات فوکو کمتر است.
- ۳- تلفات فوکو در ترانسفورماتور به چه عواملی بستگی دارد؟

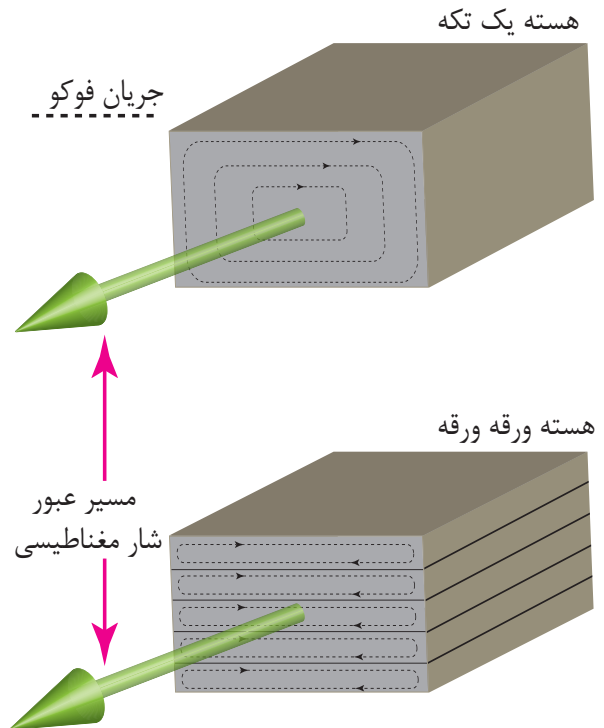
۲-۹-۱- تلفات اهمی سیم پیچ (مسی): سیم پیچ‌های ترانسفورماتور معمولاً از تعداد زیادی دور سیم تشکیل می‌شوند هرچه تعداد دور سیم پیچ بیشتر باشد، طول سیم آن بیشتر و بنابراین مقاومت الکتریکی سیم پیچ بیشتر خواهد شد به علاوه سطح مقطع سیم نیز تأثیر عکس در مقدار مقاومت الکتریکی آن دارد.

وقتی ترانسفورماتور زیر بار قرار می‌گیرد، در سیم پیچ‌های آن جریان جاری می‌شود و تلفاتی متناسب با (RI^2) در هر یک از سیم پیچ‌های اولیه و ثانویه به گرما تبدیل می‌شود.

به مقدار انرژی الکتریکی که در واحد زمان در سیم پیچ اولیه و ثانویه ترانسفورماتور و بر اثر مقاومت اهمی سیم پیچ‌ها به گرما تبدیل می‌شود، تلفات اهمی سیم پیچ‌های ترانسفورماتور می‌گویند. و از آنجا که غالباً جنس سیم پیچ‌ها مسی است، به این تلفات، تلفات مسی نیز گفته می‌شود.

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

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



شکل ۵۲- نمای عبور جریان فوکو از مقطع هسته ترانسفورماتور

همان طور که در شکل (۵۲) مشاهده می‌شود با ورقه ورقه کردن 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 هیستریزس و فوکو، تلفات هسته ترانسفورماتور گویند و از آنجا که هر ترانسفورماتور در یک ولتاژ نامی و فرکانس نامی به کار گرفته می‌شود. 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 در نظر می‌گیرند.

$$P_{in} = P_{out} + \Delta P \quad (1-56)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Delta P} \quad (1-57)$$

$$\Delta P = P_{core} + P_{Cu} \quad (1-58)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{core} + P_{Cu}} \quad (1-59)$$

$$P_{out} = U_V I_V \cos \varphi \quad (1-60)$$

و راحت تر آنکه رابطه فوق به شکل رابطه (۱-۶۱) نوشته شود :

$$\eta = \frac{U_V I_V \cos \varphi}{U_V I_V \cos \varphi + P_{core} + P_{Cu}} \quad (1-61)$$

در رابطه (۱-۶۱)

U_V ولتاژ نامی مصرف کننده بر حسب V

I_V 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 می کند،

ابتدا باید تلفات مسی به ازای آن مقدار عبور جریان با کمک

روابط (۱-۴۸)، (۱-۴۹) و (۱-۵۰) محاسبه شود.

توان ظاهری نامی و تلفات مسی در بار نامی و تلفات هسته

از مشخصات اصلی ترانسفورماتور به حساب می آید که روی

پلاک آنها نوشته شده است. بنابراین با توجه به رابطه (۱-۵۰)،

(۱-۶۱) و (۱-۶۲) می توان راندمان را از رابطه (۱-۶۹) نیز

محاسبه کرد.

$$P_{out} = S \cos \varphi \quad (1-62)$$

$$\eta = \frac{AS_n \cos \varphi}{AS_n \cos \varphi + P_{core} + A^2 P_{Cu_n}} \quad (1-63)$$

در رابطه (۱-۶۳) :

S_n قدرت ظاهری نامی بر حسب VA

A ضریب بار

خود را بیازمایید



- ۱- هر چه تعداد دور سیم پیچ ترانسفورماتور بیشتر باشد مقاومت الکتریکی آن..... و تلفات مسی آن..... است. (بیشتر - کمتر)
- ۲- اگر جریان بار یک ترانسفورماتور سه برابر شود تلفات مسی آن..... برابر می شود.
- ۳- مناسب ترین روش برای کاهش تلفات مسی در ترانسفورماتور چیست؟

۱-۱۰- راندمان یا بازده ترانسفورماتور

بازده ترانسفورماتور با رابطه (۱-۵۴) بر حسب درصد

$$\eta \% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (1-54)$$

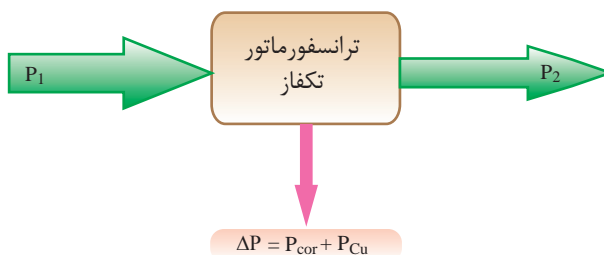
η بازده یا راندمان بر حسب درصد

P_{out} توان مصرفی (حقیقی) خروجی

P_{in} توان مصرفی (حقیقی) ورودی

دیگرام توازن توان در ترانسفورماتور مطابق شکل (۵۳)

می باشد.



شکل ۵۳- دیگرام توازن توان در یک ترانسفورماتور

با توجه به دیگرام توازن توان در صورتی که مقدار توان

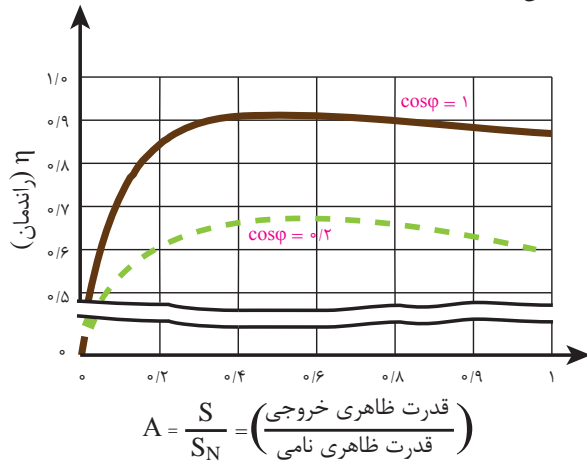
حقیقی P_{in} مستقیماً در دسترس نبود، به طور غیر مستقیم برای

محاسبه مقدار راندمان می توان مطابق روابط زیر عمل نمود.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1-55)$$

با توجه به رابطه (۱-۶۳)، راندمان ترانسفورماتور به ضریب قدرت نیز وابسته است و از آنجا که دامنه تغییرات ضریب قدرت از صفر تا یک می‌باشد، لذا به‌طور جدی می‌تواند 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 می‌دهد.



شکل ۵۴- منحنی تغییرات راندمان بر حسب تغییرات بار و ضریب قدرت

$\cos\phi$ 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 (۱-۶۳) دیده می‌شود 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 می‌شود راندمان ترانسفورماتور زمانی ماکزیمم است که مقدار ضریب بار مطابق رابطه (۱-۶۴) باشد.

$$A = \sqrt{\frac{P_{core}}{P_{Cun}}} \quad (1-64)$$

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 مصرف‌کننده 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.

تحقیق کنید



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

آیا به نظر شما ساخت چنین ترانسفورماتوری منطقی است؟

حال اگر بدن یک شخص مطابق شکل (۵۵ - 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 این کار در خروجی ترانسفورماتور سیم نول وجود ندارد بلکه ولتاژ بین دو سر سیم پیچ موجود است و با اتصال یک سر سیم پیچ به زمین جریان برقرار نمی‌گردد. در این مدار تنها با اتصالی دوسر سیم پیچ ثانویه جریان در آن برقرار می‌شود. به همین خاطر مطابق استاندارد، پریزهای برق نصب شده در حمام و مکان‌های 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



- ۱- نسبت تعداد دور اولیه به ثانویه ترانسفورماتور ایزوله چقدر است؟
- ۲- اتصال شخص به ثانویه ترانسفورماتور ایزوله در چه صورتی باعث برق گرفتگی می‌شود؟

خود را بیازمایید



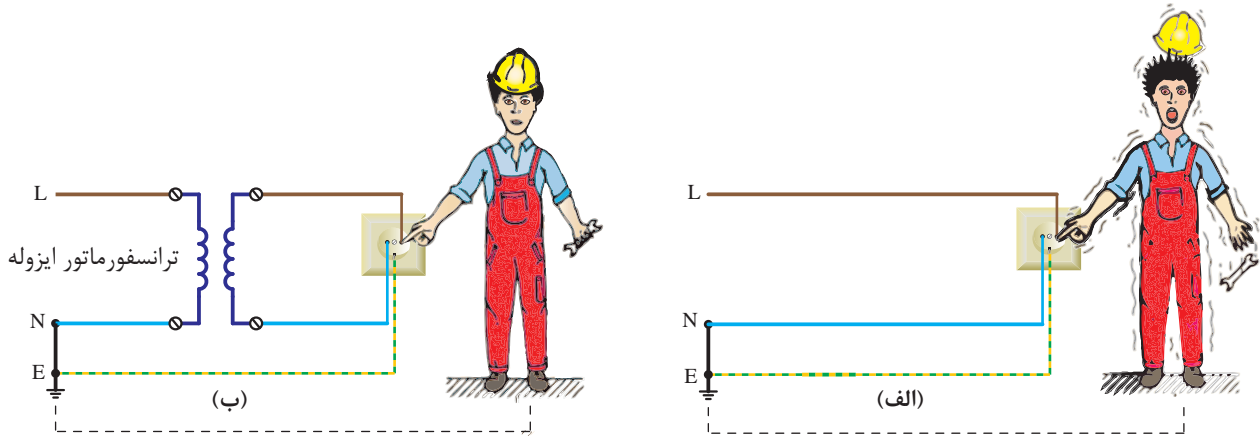
- ۱- از ثانویه یک ترانسفورماتور 100 A جریان عبور می‌کند، اگر جریان نامی این ترانسفورماتور 120 A باشد ضریب بار چقدر است؟
- ۲- یک ترانسفورماتور 150 KVA باری را با توان 80 KVA تغذیه می‌کند ضریب بار چقدر است؟
- ۳- در بار نامی یک ترانسفورماتور تلفات..... از تلفات (هسته - مسی) بیشتر است.....
- ۴- ترانسفورماتوری که در راندمان ماکزیمم کار می‌کند ضریب بار آن حتماً..... از واحد است. (بیشتر - کمتر)
- ۵- یک ترانسفورماتور 40 KVA با تلفات مسی نامی 1200 وات و تلفات هسته 800 وات ، بار نامی با ضریب قدرت 70% پس فاز را تغذیه می‌کند. راندمان ترانسفورماتور چقدر است؟
- ۶- حداکثر راندمانی را که ترانسفورماتور مسئله (۵) می‌تواند با همان ضریب قدرت تأمین نماید را به دست آورید.

۱-۱- انواع ترانسفورماتورهای تکفاز خاص

۱-۱-۱- ترانسفورماتور ایزوله: در مصرف کننده‌های

تکفاز اختلاف پتانسیل یا ولتاژ بین دو سیم فاز و نول وجود دارد که غالباً از طریق ترانسفورماتور توزیع سه فاز با اتصال خروجی ستاره یا زیگزاگ^۱ تأمین می‌شوند. در توزیع انرژی الکتریکی سیم نول را زمین می‌کنند تا خطاهای ناشی از اتصال به زمین فاز برای دستگاه‌های حفاظتی قابل تشخیص باشد.

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



شکل ۵۵ - نقش ترانسفورماتور ایزوله در زمان اتصال بدن شخص با قسمت برقدار

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 می‌کنند مثلاً ترانسفورماتور جریان $\frac{100A}{5A}$ می‌تواند جریان عبوری $100A$ مدار را به $5A$ در دستگاه اندازه‌گیری تبدیل کند و دیگر جریان‌های عبوری تا $100A$ را به صورت خطی در دستگاه اندازه‌گیری با همین نسبت کوچک نماید. ضریب تبدیل ترانسفورماتورهای جریان، شاخصی مؤثر در انتخاب آن محسوب می‌شود و همواره روی پلاک مشخصات CT درج می‌گردد. البته لازم به ذکر است جریان ثانویه این گونه ترانسفورماتورها را معمولاً برای $1A$ یا $5A$ طراحی می‌نمایند.

به طور کلی می‌توان گفت ترانسفورماتور جریان ترانسفورماتوری است که اولیه آن سیم حامل جریان و ثانویه آن به یک وسیله اندازه‌گیری مثلاً آمپر متر متصل می‌باشد. در شکل (۵۶) نمای ظاهری چند نمونه CT آورده شده است.

چگونگی قرار گرفتن CT و آمپر متر در شبکه برق در شکل (۵۷) نشان داده شده است. چون CT قرار است نمونه جریان را به وسیله اندازه‌گیری انتقال دهد، لذا به طور سری در مسیر جریان قرار می‌گیرد.

۲-۱۱-۱- 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 به صورت مستقیم وجود ندارد.

از طرفی می‌دانیم که اطراف سیم حامل جریان، میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود و در صورت عبور جریان متناوب، این میدان نیز متناوباً تغییر خواهد کرد به طوری که اندازه این میدان متناسب با مقدار جریان عبوری از سیم می‌باشد.

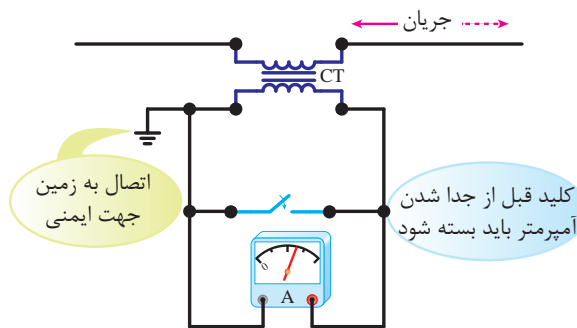
از همین اثر برای اندازه‌گیری غیر مستقیم جریان در شبکه‌های با ولتاژ و جریان زیاد استفاده می‌شود.

بدین ترتیب با قرار دادن یک هسته مغناطیسی پیرامون سیم حامل جریان، میدان‌های متغیر حاصل از آن در هسته، تولید شار مغناطیسی کرده و اگر روی همین هسته سیم پیچ 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 سیم پیچ ثانویه متناسب با جریان سیم حامل جریان شبکه خواهد بود. این ترانسفورماتور



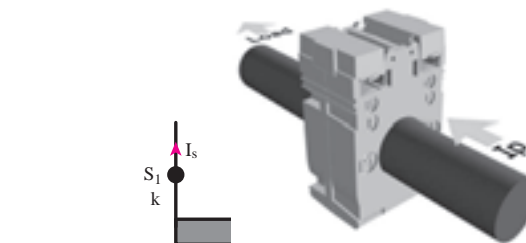
شکل ۵۶ - نمای ظاهری چند ترانسفورماتور جریان CT

- همه شار مربوط به میدان اولیه در هسته به صورت تلفات هسته ظاهر می شود و باعث افزایش گرما در هسته می شود.
- از آنجا که CT یک ترانسفورماتور افزایشده است، تعداد دور ثانویه نسبت به اولیه بیشتر است) ولتاژ در سیم پیچ ثانویه به قدری بالا می رود که باعث از بین رفتن عایق بندی ترانسفورماتور می شود 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 دستگاه های اندازه گیری از ثانویه CT مطابق شکل (۵۷) باید ابتدا مدار ثانویه توسط یک کلید اتصال کوتاه و سپس دستگاه اندازه گیری را جدا نمود. به علاوه جهت حفظ ایمنی یک طرف ثانویه CT ها باید به شبکه زمین متصل شود. گاهی اوقات برای اندازه گیری جریان در یک کابل بدون آنکه آن را قطع کنند از آمپر مترهای انبری مطابق شکل (۵۸) استفاده می شود.



شکل ۵۷ - چگونگی اتصال ترانسفورماتور جریان CT در مدار

از طرفی امیدانس داخلی آمپر متر بسیار ناچیز است پس می توان گفت مدار ثانویه CT در حالت کار اتصال کوتاه می باشد به همین خاطر ترانسفورماتور جریان را برای حالت کار اتصال کوتاه در سمت ثانویه محاسبه می کنند. یعنی همواره باید شار مخالف حاصل از نیروی محرکه مغناطیسی تولید شده در سیم پیچ 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 می افتد:



شکل ۵۸ - نمای ظاهری یک آمپر متر انبری

پوشش عایقی ضخیم باید استفاده شود.

ثانویه این ترانسفورماتورها معمولاً با ولتاژهای ۱۰۰V، ۱۲۰V یا ۲۲۰V ساخته می‌شود. 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



- ۱- ترانسفورماتور جریان در صنعت برق چه کاربردی دارد؟
- ۲- ساختمان ترانسفورماتور جریان را شرح داده طریقه نصب آن را در مدار ترسیم نمایید.
- ۳- آیا می‌توان آمپر متر متصل به ثانویه ترانسفورماتور جریان را هنگام کار باز نمود؟ چرا؟
- ۴- تفاوت PT (ترانسفورماتور ولتاژ اندازه‌گیری) با ترانسفورماتورهای دیگر چیست؟
- ۵- از اولیه یک ترانسفورماتور جریان ۱ / ۱۰۰۰ آمپر، جریان ۷۵۰ آمپر عبور می‌کند. چه جریانی از مدار آمپر متر عبور می‌کند.
- ۶- ولتاژ اندازه‌گیری شده در ثانویه یک PT، ۱۰۰V / ۲KV، ۶۵ ولت اندازه‌گیری شده است، ولتاژ شبکه چقدر می‌باشد؟

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

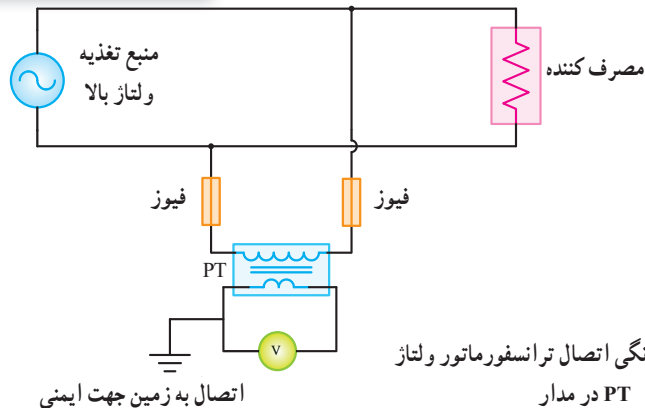
۳-۱۱-۱- ترانسفورماتور ولتاژ: به منظور جداسازی مدارهای حفاظتی و اندازه‌گیری از قسمت فشار قوی و تبدیل مقادیر ولتاژ شبکه به مقدار مورد نیاز دستگاه‌های اندازه‌گیری و حفاظتی لازم است از ترانسفورماتورهای موسوم به ترانسفورماتورهای ولتاژ یا PT استفاده شود. شکل (۵۹) دو نمونه PT را نشان می‌دهد.

PT یک نوع ترانسفورماتور کاهنده ولتاژ است و در واقع



شکل ۵۹- 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 سیم پیچ اولیه و ثانویه آن غالباً زیاد است، نوع عایق‌بندی در آن اهمیت ویژه‌ای دارد حتی برای اتصال ثانویه PT ها به دستگاه‌های اندازه‌گیری یا حفاظتی از سیم‌هایی با



شکل ۶۰- چگونگی اتصال ترانسفورماتور ولتاژ در مدار

۱- ولتاژهای شبکه: ۶KV، ۲۰KV، ۲۳KV، ۳۳KV، ۱۳۲KV، ۲۳۰KV و ۴۰۰KV

باشد. پس باید ولتاژ اتصال کوتاه نسبی این گونه ترانسفورماتورها بسیار زیاد و نزدیک به صد درصد 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 دیگر ایجاد پراکندگی بیشتر میدان است که برای ترانسفورماتور جوشکاری از این راه استفاده می‌شود. افزایش پراکندگی با در نظر گرفتن یک کوپلینگ ضعیف بین سیم‌پیچ اولیه و ثانویه محقق می‌گردد.

۴-۱۱-۱- ترانسفورماتور جوشکاری: ترانسفورماتورهای جوشکاری بر حسب نوع و ساختمانشان متنوع هستند. در اینجا ترانسفورماتورهای جوشکاری از نوع قوس الکتریکی مد نظر می‌باشد.



شکل ۶۱- نمای ظاهری دستگاه جوش و عملیات جوشکاری

خود را بیازمایید



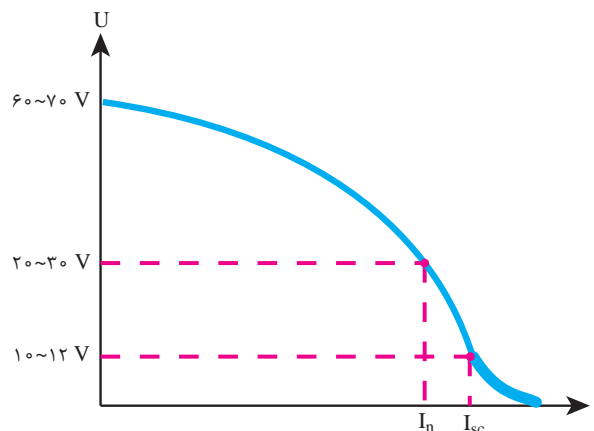
– چرا برای بالا بردن امپدانس داخلی ترانسفورماتور، از سیم‌های با مقاومت الکتریکی بالا استفاده نمی‌شود؟

تحقیق کنید



– چه راه‌هایی برای ایجاد کوپلینگ ضعیف در ترانسفورماتورهای جوش وجود دارد؟
– آیا راه‌های دیگری برای تأمین جریان جوشکاری می‌شناسید؟

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 ۶۲- مشخصه جریان و ولتاژ خروجی ترانسفورماتور جوشکاری

۵-۱۱-۱- 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 (۶۳- الف و ب) مدار ساده‌ای از یک اتوترانسفورمر کاهنده و افزایشنده ولتاژ را نمایش می‌دهند.

که اتصال کوتاه‌های پی در پی باعث آسیب دیدن آن نشود لذا در این ترانسفورماتورها باید امپدانس داخلی در حد قابل توجهی بالا

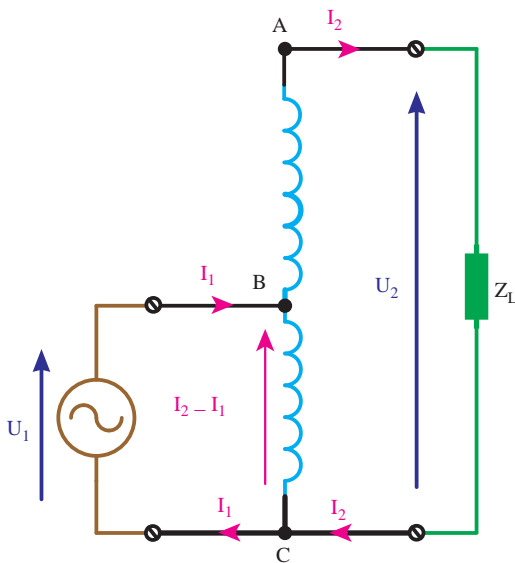
آن بخش از سیم پیچ که مطابق شکل (۶۳) بین نقاط A و B قرار گرفته است، سیم پیچ سری نام گذاری می‌گردد. توان الکتریکی منتقل شده از این بخش سیم پیچ به بار مصرفی را توان تیپ یا توان انتقالی از طریق هسته می‌نامند. مقدار توان این بخش با توجه به مدار شکل (۶۳-الف)، مطابق رابطه (۱-۷۱) می‌باشد.

$$S_B = (U_1 - U_2) \times I_1 \quad (1-65)$$

همچنین توان تیپ اتوترانسفورمر شکل (۶۳-ب) از رابطه (۱-۷۲) محاسبه می‌شود.

$$S_B = (U_2 - U_1) \times I_2 \quad (1-66)$$

توان تیپ را با S_B نمایش می‌دهند.

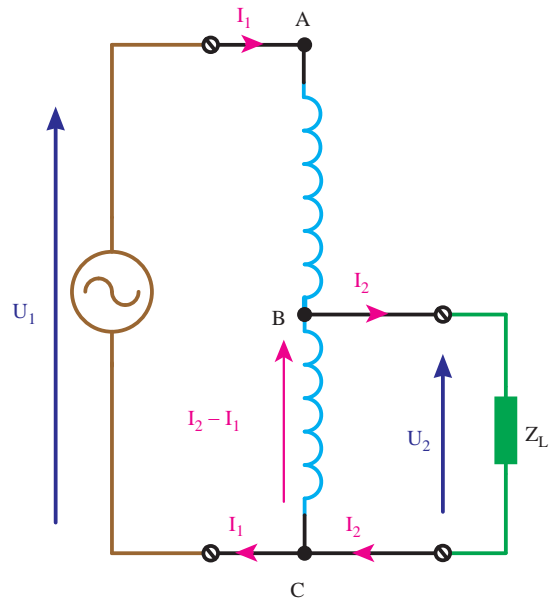


ب) افزایشده

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

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

اگر سیم پیچ بخش مشترک (BC) به منبع ولتاژ ورودی متصل شود اتوترانسفورمر باعث افزایش ولتاژ خروجی خواهد شد یعنی اتوترانسفورمر افزایشده ولتاژ می‌شود و بالعکس اگر سیم پیچ بخش مشترک (BC) به بار خروجی متصل شود اتوترانسفورمر نقش کاهشده ولتاژ خروجی را خواهد داشت.



الف) کاهشده

شکل ۶۳- مدار یک اتوترانسفورمر کاهشده و افزایشده ولتاژ

۶-۱۱-۱- مقایسه بین ترانسفورماتور معمولی و

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

تحقیق کنید



صحت رابطه ذیل را تحقیق کنید.

ولتاژ طرف فشار قوی U_H

ولتاژ طرف فشار ضعیف U_L

توان ظاهری اتوترانسفورمر S

توان تیپ S_B

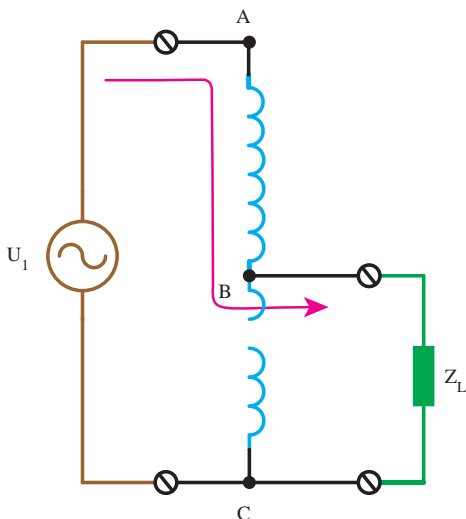
$$S_B = \frac{U_H - U_L}{U_H} S$$

بیشتر بدانید



آیا می‌توانید نشان دهید چرا هر چه نسبت تعداد دور سیم‌پیچ بخش مشترک به واحد 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 اتوترانسفورمر بین مدار سیم‌پیچ اولیه و ثانویه علاوه بر کوپلینگ مغناطیسی اتصال الکتریکی نیز وجود دارد این موضوع سبب می‌شود 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 می‌شود که بسیار خطرناک خواهد بود.



شکل ۶۴ - پارگی سیم‌پیچ بخش مشترک

نکته ۱



چون بخشی از توان اتوترانسفورمر از طریق هسته و بخش دیگر از طریق هدایت الکتریکی به خروجی منتقل می‌شود، 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 می‌یابد.

نکته ۳



به دلیل 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 می‌توان 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.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{K} = a \quad (1-67)$$

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

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

رفتار این نوع اتو ترانسفورمر 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 مصرف کننده مهیا می‌کند. اما تفاوت های اساسی بین اتو ترانسفورمر و پتانسیومتر وجود دارد که آنها را از هم متمایز می‌سازد که موارد زیر از آن جمله می‌باشند:

- در پتانسیومتر قدرت الکتریکی تنها از راه هدایت الکتریکی به بار انتقال می‌یابد در صورتی که در اتو ترانسفورمر علاوه بر انتقال قدرت از طریق هدایت الکتریکی بخش دیگر از طریق کوپلینگ مغناطیسی و نیروی محرکه الکتریکی تولیدی در سیم پیچ منتقل می‌شود.

- با اتو ترانسفورمر افزایشده می‌توان ولتاژی بالاتر از ولتاژ منبع تولید کرد در صورتی که پتانسیومتر حداکثر می‌تواند ولتاژ اعمال شده به ورودی را به خروجی تحویل دهد.

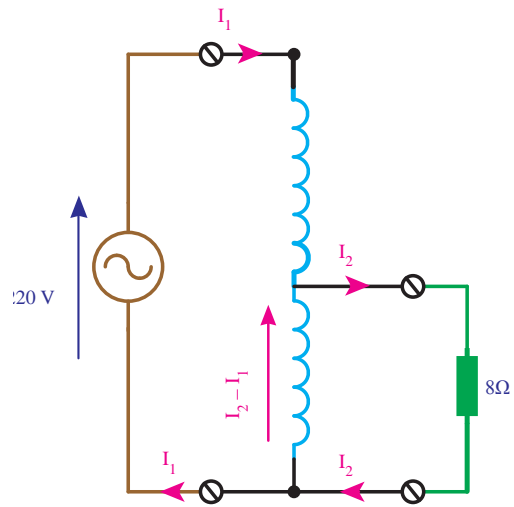
- در پتانسیومتر جریان ورودی همواره بیش از جریان خروجی است در حالی که در اتو ترانسفورمر کاهشده مقدار جریان سمت خروجی از ورودی بیشتر است.

- 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 اتو ترانسفورمر متغیر (واریاک) را که دارای یک هسته مشترک چنبره ای می‌باشد نشان می‌دهد. با لغزش جاروبک زغالی روی محیط هسته و اتصال آن با سیم پیچ توسط یک دسته متحرک ولتاژ خروجی اتو ترانسفورمر تغییر می‌کند.

همچنین به دلیل ارتباط الکتریکی دو طرف اتو ترانسفورمر، از این ترانسفورماتور به عنوان ترانسفورماتور ایزوله نمی‌توان استفاده نمود.

مثال یک اتو ترانسفورماتور مطابق شکل ۶۵ زیر با ولتاژ ورودی 220V ، ولتاژ 160V را برای یک مقاومت 8Ω در سمت دیگر مهیا می‌کند. اگر تعداد دور کل حلقه‌ها 300 دور باشد. مطلوب است:



شکل ۶۵

الف) تعداد حلقه‌های سیم پیچ مشترک

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

$$\frac{220}{160} = \frac{300}{N_2} \Rightarrow N_2 = \frac{160 \times 300}{220} \approx 218$$

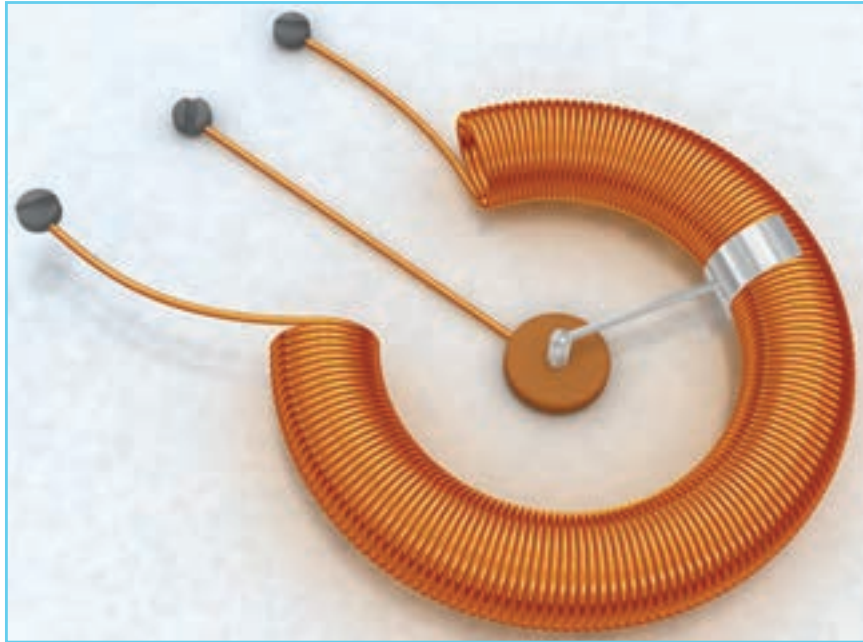
ب) جریان بار $I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{160}{8} = 20\text{A}$

ج) جریان بخش سیم پیچ مشترک

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow \frac{220}{160} = \frac{20}{I_1} \Rightarrow I_1 = \frac{160 \times 20}{220} \approx 14.5\text{A}$$

د) توان الکتریکی منتقل شده توسط هسته (توان تیپ) $I_2 - I_1 = 20 - 14.5 = 5.5\text{A}$

$S_B = (U_1 - U_2) \times I_1 = (220 - 160) \times 14.5 = 870\text{VA}$



شکل ۶۶- نمای ظاهری و شماتیک اتوترانسفورمر متغیر (اریاک)

پرسش‌های پایان فصل (۱)

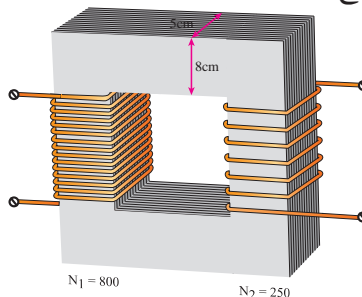
- ۱) اجزای اصلی یک ترانسفورماتور را نام برده و وظیفه هر یک را بنویسید.
- ۲) ورودی یک ترانسفورماتور به منبع ولتاژ مستقیم متصل شده است، خروجی آن چند ولت است؟ چرا؟
- ۳) عوامل مؤثر در مقدار ولتاژ القایی ثانویه ترانسفورماتور را بیان کنید.
- ۴) ویژگی‌های یک ترانسفورماتور ایده‌آل را نام ببرید.
- ۵) محل نقطه 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 – 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 – سلفی را از دیدگاه اولیه رسم کنید.
- ۱۳) آیا امکان دارد در ترانسفورماتور زیر بار، $U'_p = U_p$ گردد؟ (کدام نوع بار؟)
- ۱۴) تلفات هیستریزس 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 بویینی با ۵۰۰ دور سیم پیچ که از آن جریان ۲ آمپر عبور می کند چقدر است؟
 (۲) ترانسفورماتوری طبق شکل زیر در شبکه ۵۰ HZ دارای هسته ای با چگالی شار ۱/۲۵ T می باشد. ولتاژ القایی در سیم پیچ اولیه و ثانویه را به دست آورید.

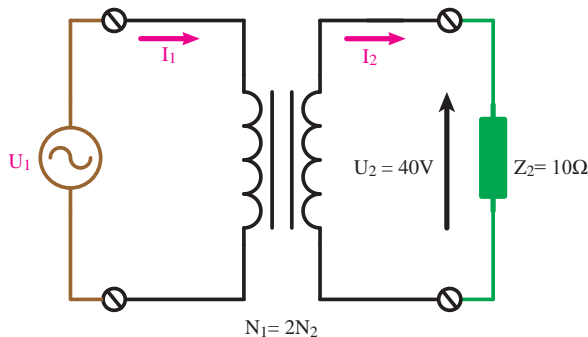


(۳) یک ترانسفورماتور با ضریب تبدیل $a = 8$ دارای ۲۰۰۰ دور سیم پیچ در اولیه می باشد. تعداد دور ثانویه چقدر است؟

(۴) مقاومت بار ۴٪ اهم در ترانسفورماتور با ضریب تبدیل $a = 10$ در سمت اولیه چقدر دیده می شود؟

(۵) نسبت تبدیل و عکس نسبت تبدیل یک ترانسفورماتوری که دارای ۱۰۰۰ دور سیم پیچ اولیه و ۲۰۰ دور سیم پیچ ثانویه می باشد را محاسبه کنید.

(۶) ترانسفورماتور ایده آل مطابق شکل زیر موجود است:



- الف) ولتاژ U_1
- ب) جریان I_1
- ج) امپدانس انتقالی به اولیه
- د) نتایج به دست آمده از آزمایش بی باری و اتصال کوتاه مطابق ذیل می باشد:
- در آزمایش اتصال کوتاه مقادیر وات متر $W = 80$
- ولت متر $V = 40$
- آمپر متر $A = 20$
- و در آزمایش بی باری مقادیر وات متر $W = 80$
- ولت متر $V = 400$
- آمپر متر $A = 2$ مطلوب است:

الف) مقادیر تلفات آهنی - تلفات مسی نامی - جریان بی باری - جریان نامی - درصد ولتاژ اتصال کوتاه - جریان اتصال کوتاه دائم

ب) مدار معادل و مقادیر المان های موازی ترانسفورماتور

ج) مدار معادل و مقادیر المان های سری به شرطی که $X_1 = 3X_2, R_1 = R_2$

د) مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با ذکر مقادیر

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

۸) در یک ترانسفورماتور واقعی $1000V/100V$ ، مقاومت معادل تلفات هسته $2K\Omega$ و راکتانس میدان اصلی 1000Ω می باشد. جریان بی باری و تلفات هسته را با احتساب تقریب اول به دست آورید.

۹) یک ترانسفورماتور در بار نامی دارای افت ولتاژ اهمی ۲۵ ولت و افت ولتاژ القایی ۴۰ ولت و ولتاژ نامی ۲۰۰ ولت می باشد. ولتاژ دوسر بار را از دیدگاه اول در حالات خواسته شده به دست 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 ترانسفورماتور ۵ KVA در آزمایش بی‌باری ۲۵۰ وات 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 ترانسفورماتور ۸KVA در آزمایش بی‌باری ۳۰۰ وات و در آزمایش اتصال کوتاه ۵۰۰ وات توان از شبکه دریافت می‌کند. به دست 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 75Ω وصل است به شرطی که تعداد حلقه های سیم پیچی کل آن ۱۵۰۰ دور باشد. مطلوب است:

الف) تعداد حلقه های سیم پیچ مشترک

ب) جریان بار

ج) جریان عبوری از سیم پیچ مشترک

د) توان تیپ

(۱۵) اتوترانسفورمری که ۴۰۰ دور سیم پیچ مشترک آن به شبکه ۴۰۰ ولتی متصل است، جریان ۵ آمپر را به بار الکتریکی تحت ولتاژ ۸۰۰ ولت می‌دهد. جریان سیم پیچ مشترک و توان تیپ را حساب کنید.

