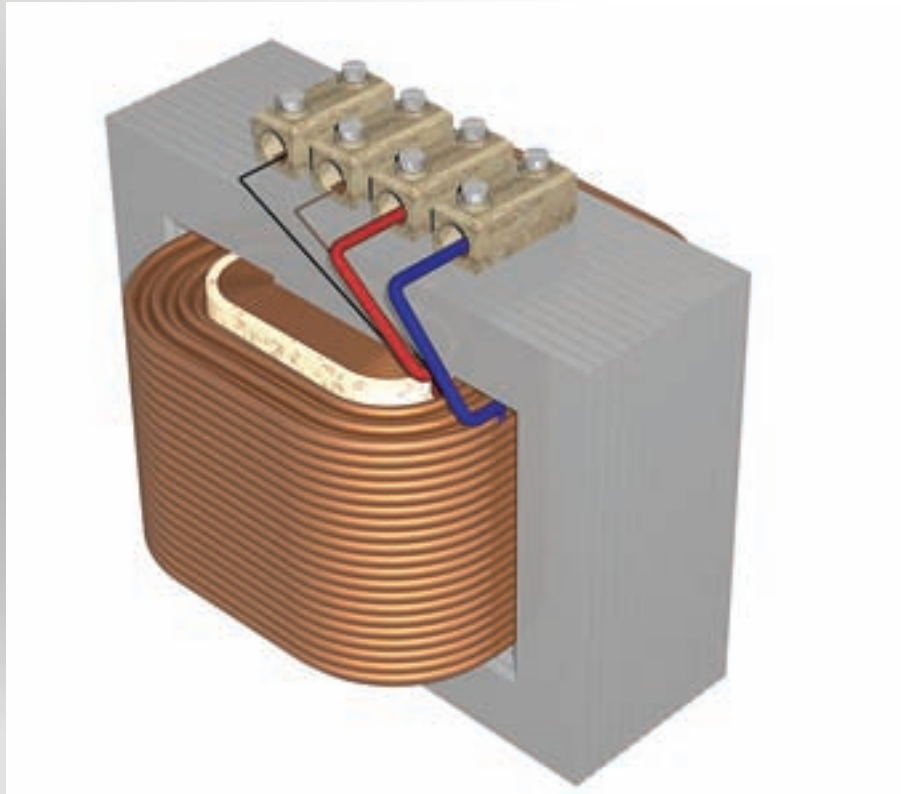
۱

ترانسفورماتورهای تک فاز



۱- مقدمه
۲- ساختمان ترانسفورماتور
۲-۱- هسته
۲-۲- سیم پیچ
۳- تئوری و طرز کار ترانسفورماتور
۴- ترانسفورماتور ایده آل
۴-۱- کلیات
۴-۲- روابط اساسی ترانسفورماتور
۴-۳- تبدیل امپدانس_انتقال امپدانس
۴-۴- نتیجه گیری
۵- ترانسفورماتور واقعی
۵-۱- مدار معادل ترانسفورماتور واقعی در حالت بی باری
۵-۲ مدار معادل ترانسفورماتور واقعی در حالت بارداری
۶- دیاگرام برداری حالت بارداری
۷- تعیین مقادیر پارامترهای مدار معادل با کمک آزمایشهای تجربی
۷-۱- آزمایش حالت بی باری
۷-۲- آزمایش اتصال کوتاه
۸- ولتاژ اتصال کوتاه در ترانسفورماتور
۹- جریان اتصال کوتاه واقعی در ترانسفورماتور
۱۰ - تلفات در ترانسفورماتور
۱۰ -۱- تلفات هسته (آهنی)
۱۰ -۲- تلفات اهمی سیم پیچ (مسی)
۱۱ - راندمان یا بازده ترانسفورماتور
۱۲ - انواع ترانسفورماتورهای تکفاز خاص
۱۲-۱- ترانسفورماتور ایزوله
۱۲-۲- ترانسفورماتور جریان
۱۲-۲-ترانسفورماتور ولتاژ
۱۲-۴- ترانسفورماتور جوشکاری
۱۲-۵- اتوترانسفورمر

۱- مقدمه

بـا عبور جریـان از یک سـیم پیـچ، در اطراف آن میدان مغناطیسـی ایجاد می شـود و در داخل میدان مغناطیسی تعداد زیادی خطوط قوای مغناطیسی وجود دارد. فوران یا شـار مغناطیسـی همـان خطوط قوای مغناطیسـی است که از داخل سـیم پیچ عبور می‌کند. حالا اگر جریان عبوری از سـیم پیچ مسـتقیم " DC " باشد، شار تولید شده نیز مقدار ثابت خواهد داشت. ولی اگر جریان عبوری از سـیم پیچ متناوب "AC"باشـد، میدان مغناطیسـی ایجاد شده شار متغیری متناسب با جریان در داخل سیم پیچ ایجاد می‌کند.

همچنین هرگاه دو سیم پیچ در نزدیک یکدیگر قرار گیرند بطوری که خطوط قوای مغناطیسی متغیر تولید شـده در یکی از سیم پیچها بتواند حلقه های سیم پیچ دیگری را قطع کند، در آن سـیم پیچ ولتاژ القا می‌کند و در صورتـی که مسـیر عبور جریان از این سـیم پیچ نیز مهیا باشـد، با عبور جریان از آن هم متقابلا میدان مغناطیسـی تولید می شود و شار مغناطیسی آن بطور مشـابه روی سـیم پیچ اول اثر می گذارد، این پدیده را القای متقابل (M) می‌گویند. مقدار القای متقابل علاوه بر اندوکتانس سـیم پیچهـا (L) به ضریب کوپلاژ (K)، نیز وابسته است.

هر چه تعداد خطوط قوای مغناطیسی بیشتر یکدیگر را قطع کنند ضریب کوپلاژ نیز بیشتر می شود بنابراین ضریـب کوپلاژ به چگونگی قرار گیری سـیم پیچ ها و فاصلـه آن ها از یکدیگر بسـتگی دارد. کوپلاژ کامل در سـیم پیچ زمانی اتفاق می افتـد که تمام خطوط قوای یک سیم پیچ همه‌ی حلقه های سیم پیچ دیگر را قطع کنند. اگر هیچ یک از خطوط شار دو سیم پیچ از داخل هـم عبور نکنند، در این صـورت القای متقابل بین آنها وجود نخواهد داشـت و کوپلاژ صفر اسـت. برای درک بهتر مطالب فوق به شکل(۱) توجه کنید.

ضریب القای متقابل بین دو سیم پیچ را با M نشان می دهند. این ضریب به اندوکتانس دو سلف تزویج شده و ضریب کوپلاژ بین آنها وابسته است.

$$M = K\sqrt{L_1 L_2} \qquad (۱-۱)$$

در رابطه (۱-۱)

M ضریب القای متقابل بر حسب هانری (H)

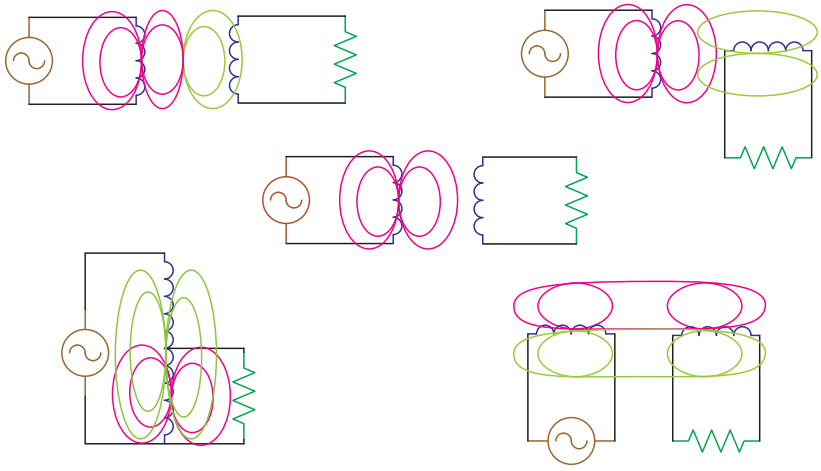
L_1 و L_2 اندوکتانس سـیم پیچ اول ودوم بر حسـب هانری (H)

K ضریب کوپلاژ که عددی بین صفر تا یک است

خود را بیازمایید

۱) القای متقابل چیست؟

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



شکل ۱- وابستگی القای متقابل به چگونگی استقرار سیم پیچها

۱

۲- ساختمان ترانسفورماتور

ترانسفورماتور وسیله ای است که از پیچیدن حداقل دو سیم پیچ بر روی یک هسته مغناطیسی مشترک ساخته می شود. شکل (۲) ساختمان یک ترانسفورماتور ساده را نشان می دهد. همانطور 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 یا شبکه برق متصل می شود را سیم پیچ اولیه و سیم پیچی که به بار الکتریکی یا مصرف کننده الکتریکی متصل و به آن انرژی الکتریکی داده می شود را سیم پیچ ثانویه می گویند.

بعلاوه سیم پیچ متصل به ولتاژ بیشتر را سیم پیچ فشار قوی (H.V) و سیم پیچ متصل به مدار 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 ترانسفورماتور را ترانسفورماتور کاهنده ولتاژ می‌نامند و بالعکس در صورتی که سیم پیچ فشار قوی یک ترانسفورماتور در سمت ثانویه و سیم پیچ فشار ضعیف آن در سمت اولیه باشد آن ترانسفورماتور را ترانسفورماتور افزاینده می‌گویند.

از ترانسفورماتور کاهنده و افزاینده بترتیب برای کاهش و افزایش ولتاژ و برای تامین ولتاژ مناسب جهت تغذیه مصرف کننده‌های الکتریکی استفاده می شود.

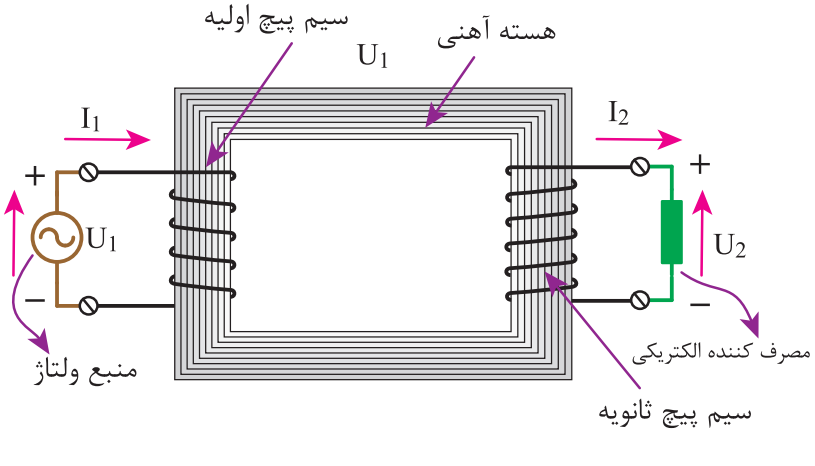
ساختمان هر ترانسفورماتور از دو جزء مهم تشکیل شده است که عبارتند از:

- هسته مغناطیسی
- سیم پیچ

خود را بیازمایید

۱) منظور از سیم پیچ اولیه وثانویه چیست؟

۲) ترانسفورماتور افزاینده را تعریف کنید.



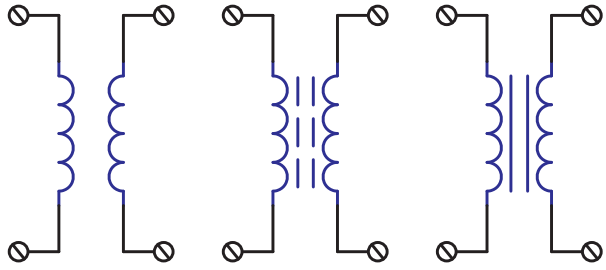
شکل ۲- نمای ظاهری و ساختمان داخلی یک ترانسفورماتور

۲-۱- هسته

هسته ترانسفورماتور مسیر عبور شار مغناطیسی بین سیم پیچ ها را برقرار می‌کند و انتقال انرژی الکتریکی از این طریق صورت می‌گیرد.

در عمل هسته مغناطیسی ترانسفورماتورها می تواند از جنس هوا ، فریت و یا آهن به کار گرفته شود.

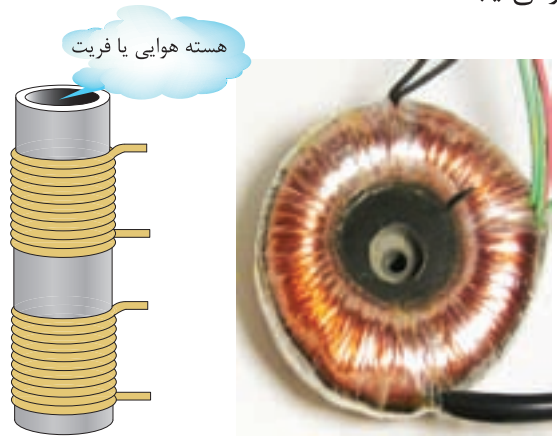
علامت اختصاری هریک از این ترانسفورماتورها در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- علائم اختصاری ترانسفورماتور با هسته های مختلف

هسته های هوایی و فریت[۱] در ترانسفورماتورهای با فرکانس بالا[۲] و در صنعت الکترونیک کاربرد فراوان دارند.

سیم پیچ های این نوع ترانسفورماتور مطابق شکل (۴) با حداقل کوپلینگ روی هسته پیچیده می شوند، زیرا زیاد بودن فرکانس کارشان به تنهایی می تواند ولتاژ القایی بزرگی ایجاد کند.



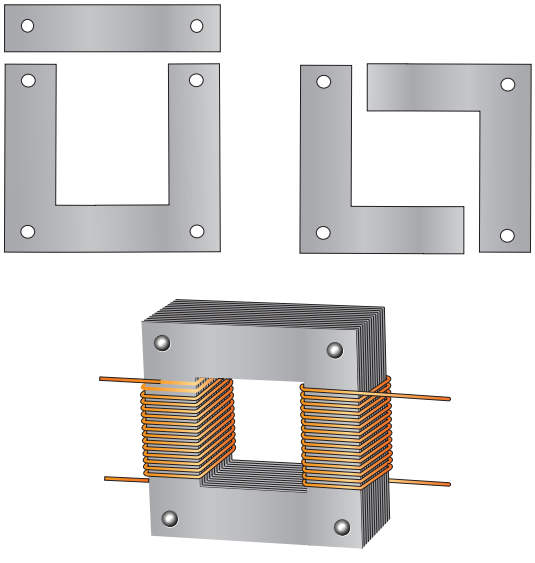
شکل ۴- نمایی از یک ترانسفورماتور با هسته هوایی یا فریت

در ترانسفورماتورهای قدرت و تقویت کننده‌های صوتی(AF)[۳] از هسته های آهنی استفاده می شود.

آنچه در این کتاب مورد توجه می‌باشد، بررسی ترانسفورماتورهای قدرت است. ترانسفورماتورهای قدرت ترانسفورماتورهایی را گویند که در صنعت انتقال و توزیع برق مورد استفاده قرار می‌گیرد.از آنجاکه هسته این نوع ترانسفورماتورها آهنی است بنابراین در ادامه فقط درباره هسته های آهنی توضیح داده خواهد شد.

از نظر ساختمانی ترانسفورماتورهای تکفاز حداقل از دو سیم پیچ تشکیل شده اند که با توجه به قرار گرفتن سیم پیچ ها روی هسته ترانسفورماتور می توان آنها را به دو دسته تقسیم نمود.

الف) اگر هر سیم پیچ روی یک پایه هسته پیچیده شود به آن هسته ی ستونی می‌گویند . شکل (۵) ورقه های این نوع هسته و نمای کامل ترانسفورماتور با این نوع هسته را نمایش می دهد. شکل ورقه های این هسته بصورت دو ورقه L یا ورقه U و I می‌باشد.



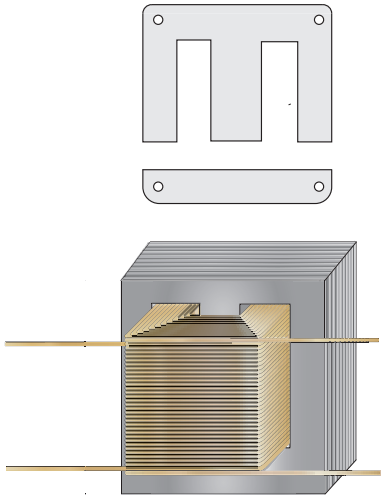
شکل ۵- نمایی از یک ترانسفورماتور ستونی و شکل ورقه های آن

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

۲) فرکانس های بالای ۲۰KHz

۳) Audio Amplifier

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



شکل ۶- نمای یک ترانسفورماتور با هسته زرهی و شکل ورقه های آن

با توجه به شکل(۵) و 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 ترانسفور ماتور ، سیم پیچهای اولیه و ثانویه را در بر می‌گیرد. بنابراین از آنجا که در ترانسفورماتورهای زرهی برای پیچیدن سیم پیچ از یک قرقره استفاده می شود در نتیجه کوپلینگ سیم پیچ ها بیشتر می‌گردد و لذا کاربرد آن در ساخت ترانسفورماتورهای قدرت تکفاز بیشتر است. در ترانسفورماتور، شار مغناطیسی از طریق هسته عبور می‌کند پس برای ایجاد حداکثر کوپلینگ باید مقاومت مغناطیسی آن بسیار کم باشد به همین دلیل جنس هسته ی مغناطیسی معمولا از فولادهای آلیاژی سیلیس دار انتخاب می شود. بعلاوه برای جلوگیری از تلفات در هسته آن را به شکل ورقه ورقه می سازند.

بطوری که هر ورق با لاک عایقی نازک پوشیده شده و دارای ضخامتی معمولا بین ۰/۳۵ تا ۰/۵ میلی متر است.

خود را بیازمایید

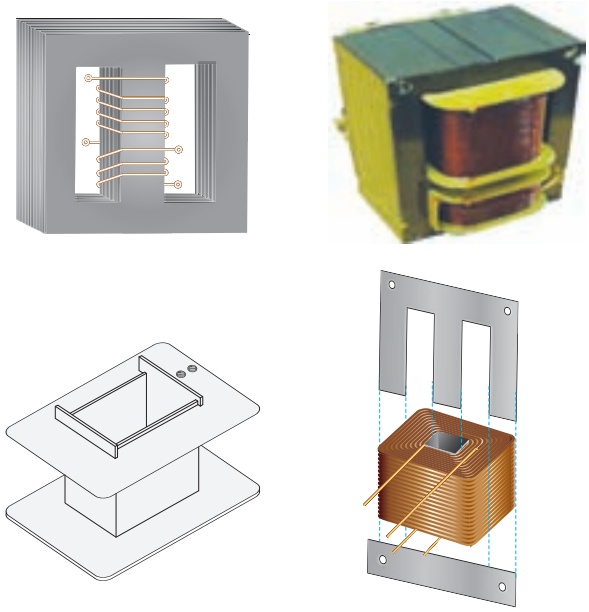
۱) وظیفه هسته در ترانسفورماتور را شرح دهید.

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

۲-۲- سیم پیچ

وظیفه سیم پیچ ایجاد میدان مغناطیسی و تولید نیروی محرکه مغناطیسی F می‌باشد. نیروی محرکه مغناطیسی از حاصلضرب جریان و تعداد دور سیم پیچ بدست می آید. $F = NI$

در عمل مطابق شکل (۷) برای پیچیدن سیم پیچ های ترانسفورماتور (بسته به نوع زرهی و یا ستونی) ابتدا سیمها را بر روی قرقره ای از جنس عایق می پیچند و سپس آن را درون هسته جای می دهند.

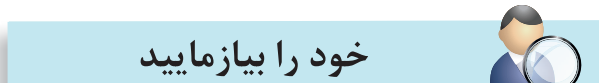


شکل ۷- شکلهای متفاوتی از اجزای داخلی ترانسفورماتور

سطح مقطع و قطر سیم در توانایی عبور جریان از سیم پیچ موثر است و ولتاژ کار سیم پیچ نیز بستگی به تعداد دور سیم پیچ دارد بدین ترتیب هر سیم پیچ قادر است در ولتاژ و جریان مشخصی کار کند که به آن ولتاژ و جریان نامی ترانسفورماتور می‌گویند. در صورت افزایش هریک از کمیتهای فوق از مقدار نامی ممکن است ترانسفورماتور آسیب ببیند.

از طرفی جریان عبوری از سیم پیچ بدلیل وجود مقاومت در آن باعث ایجاد حرارت می شود. در ولتاژ یکسان هر چقدر قدرت ترانسفورماتور بالاتر باشد جریان آن بیشتر بوده و تلفات حرارتی آن بیشتر است.

در طراحی ها باید شرایط به گونه ای در نظر گرفته شود که حرارت ایجاد شده از سطح سیم به خارج سیم پیچ دفع شود تا باعث بالا رفتن دمای سیم پیچ و از بین رفتن عایق آن نگردد.



خود را بیازمایید

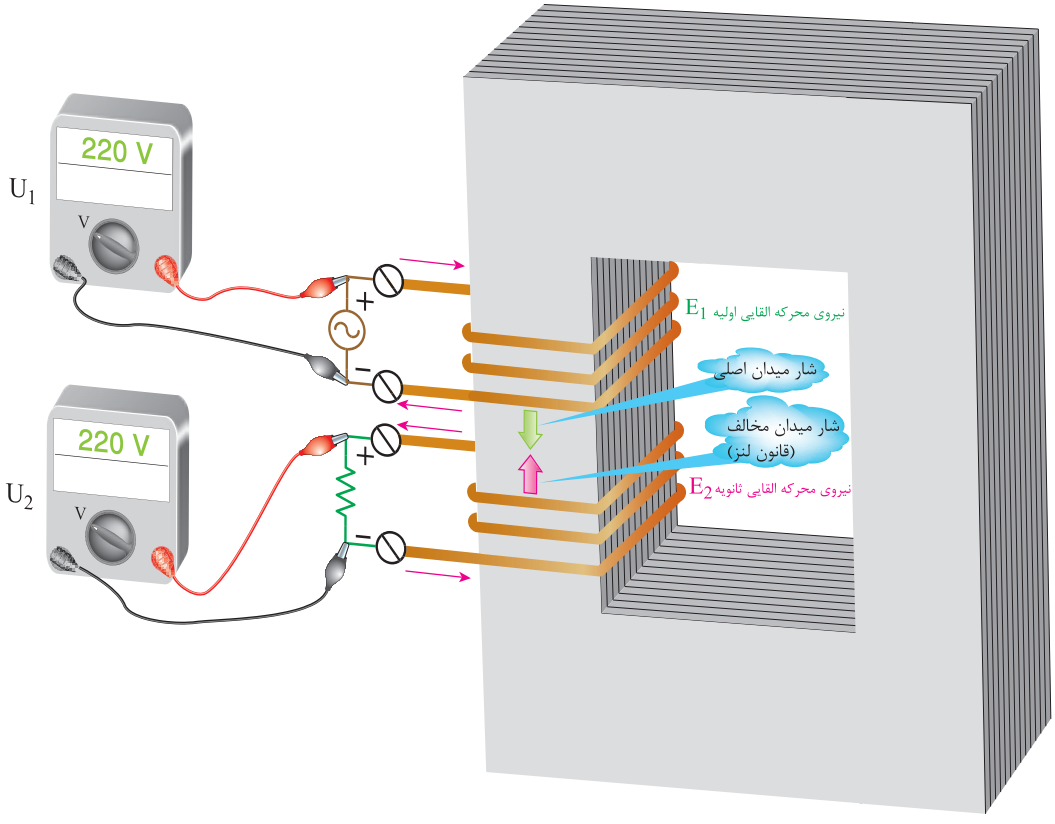
۱) قطر هر سیم پیچ ترانسفورماتور چه تاثیری بر جریان و ولتاژ نامی آن دارد؟

۲) تعداد دور هر سیم پیچ ترانسفورماتور چه تاثیری بر جریان و ولتاژ نامی آن دارد؟

۳) برای کاهش دمای سیم پیچ ها ی ترانسفورماتور چه راه هایی پیشنهاد می کنید.

۳- تئوری و طرز کار ترانسفورماتور

هنگامیکه یکی از سیم پیچ های ترانسفورماتور به منبع ولتاژ متناوب متصل گردد، از آن جریان عبور می‌کند. عبور جریان از سیم پیچ باعث تولید نیروی محرکه مغناطیسی در سیم پیچ می شود و در نتیجه



شکل۸- مسیر عبور جریان در سیم پیچها و عبور شار مغناطیسی از هسته

۱

از داخل هسته شار مغناطیسی عبور می‌کند. مقدار شار ایجاد شده به تعداد دور سیم پیچ و ولتاژ اولیه آن بستگی دارد.

سپس با عبور این شار از سیم پیچ دیگری که به مصرف کننده متصل است نیروی محرکه الکتریکی در آن القا می شود، زیرا مقدار آن بطور متناوب تغییر می‌کند.[۱]

مقدار ولتاژ 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 ولتاژ های مختلفی دست یافت. از طرفی بدلیل بسته بودن مدار، جریانی متناسب با بار از سیم پیچ دوم عبور می‌کند 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 فارادی می‌باشد زیرا تغییرات جریان عبوری در سیم پیچ باعث تغییرات فوران (شار) عبوری از سیم پیچ شده و در نتیجه ولتاژی در هر دو سیم پیچ القا می‌کند.

با توجه به قانون ولتاژ فارادی داریم:

$$E = -N\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \qquad (۱-۲)$$

در رابطه (۱-۲)

$\Delta\varphi$ تغییرات فوران مغناطیسی

Δt تغییرات زمان

N تعداد دور سیم پیچ

E نیروی محرکه الکتریکی القایی

چون جریان متناوب سینوسی است تغییرات فوران هم متناسب با تغییرات جریان می‌باشد پس فوران مغناطیسی نیز بطور سینوسی تغییر خواهد کرد.

یعنی:

$$\varphi_{(t)} = \varphi_m \sin\omega t \qquad (۱-۳)$$

بیشتر بدانید

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

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

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

$$E = ۴/۴۴NB_mAf \qquad (۱-۴)$$

در رابطه(۱-۴)

E ولتاژ موثر القایی بر حسب (V)

N تعداد دور سیم پیچ

B_m حداکثر چگالی میدان مغناطیسی بر حسب T

A سطح مقطع هسته بر حسب $m^۲$

f فرکانس برق بر حسب HZ

مثال ترانسفورماتوری دارای یک هسته با سطح مقطع $۱۰cm^۲$ می‌باشد. اگر تعداد حلقه های یکی از سیم پیچهای آن ۱۰۰۰ دور و حداکثر چگالی میدان مغناطیسی در هسته ۱/۱۲۶ T باشد. چه ولتاژی در دو سر این سیم پیچ در فرکانس ۵۰ هرتز القا می شود؟

$$E = ۴/۴۴NB_mAf =$$

$$= ۴/۴۴\times۱۰۰۰\times۱/۱۲۶\times۱۰\times۱۰^{-۴}\times۵۰ \approx ۲۵۰V$$

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

در صورت استفاده از سیم پیچ فوق بعنوان سیم پیچ اولیه امکان استفاده از آن در ولتاژی بالاتر از V ۲۵۰ وجود ندارد.

از آنجا که هرسه کمیت چگالی میدان مغناطیسی هسته"B_m"، سطح مقطع هسته"A" و فرکانس شبکه"f " در ترانسفورماتور ثابت هستند و تعداد دور سیم پیچ اولیه و ثانویه در ترانسفورماتورها می تواند متفاوت اختیار شود ، پس رابطه (۴-۱) را می توان به صورت روابط(۵-۱)و (۶-۱) نوشت.

$$E_۱ = ۴/۴۴ N_۱ B_m A f \quad (۱-۵)$$

$$E_۲ = ۴/۴۴ N_۲ B_m A f \quad (۱-۶)$$

بنابراین نتیجه می شود که در سیم پیچ اولیه و ثانویه هر ترانسفورماتور متناسب با تعداد دور سیم پیچ، ولتاژ در آن القا می شود. این ولتاژ را نیروی محرکه القایی یا ولتاژ القایی در سیم پیچ های ترانسفورماتور می گویند.

با توجه به رابطه(۵-۱) و (۶-۱) بعنوان یک رابطه کلی در ترانسفورماتور می توان رابطه (۷-۱) را نتیجه گرفت.

$$\frac{E_۱}{E_۲} = \frac{N_۱}{N_۲} \quad (۱-۷)$$

رابطه (۷-۱) بدین معنی است که با افزایش تعداد دور یک سیم پیچ ، ولتاژ القا شده در آن به همان نسبت بالا می رود و بالعکس. تعریف نسبت $\frac{N_۱}{N_۲}$ را نسبت تبدیل ترانسفورماتور می‌گویند 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. بنابراین داریم:

$$a = \frac{N_۱}{N_۲} \quad (۱-۸)$$

$$K = \frac{N_۲}{N_۱} \quad (۱-۹)$$

معمولا در مشخصات فنی یک ترانسفورماتور بندرت تعداد دور سیم پیچ های اولیه و ثانویه آورده می شود و غالبا ولتاژهای اولیه و ثانویه ترانسفورماتور بعنوان اطلاعات کلیدی 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. با چگونگی محاسبه عملی ترانسفورماتور در کتاب سیم پیچی آشنا خواهید شد.

مثال اگر سیم پیچ اولیه ترانسفورماتوری دارای ۲۰۰ دور و سیم پیچ ثانویه ۵۰ دور باشد نسبت تبدیل و عکس نسبت تبدیل ترانسفورماتور چقدر است؟

$$a = \frac{N_۱}{N_۲} = \frac{۲۰۰}{۵۰} = ۴$$

$$K = \frac{N_۲}{N_۱} = \frac{۵۰}{۲۰۰} = ۰/۲۵$$

خود را بیازمایید

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

۲) نسبت تبدیل ترانسفورماتور چیست؟

۳) ترانسفورماتوری دارای هسته با سطح مقطع ۴۰ cm^2 و چگالی شار ۱/۲۵ تسلا می باشد، تعداد دور سیم پیچ این ترانسفورماتور با ولتاژ القایی ۱۱۰ ولت در شبکه ۵۰ هرتز چقدر است؟

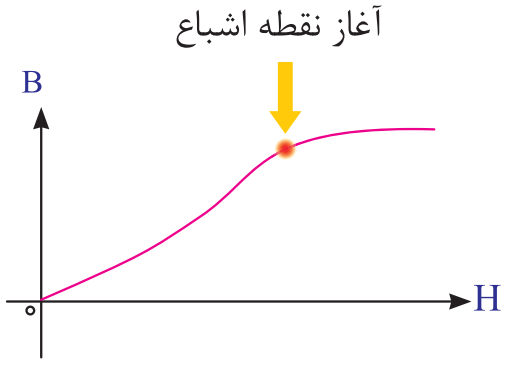
۴- ترانسفورماتور ایده آل

۴-۱- 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 صرفا بخاطر تشریح رفتار واقعی ترانسفورماتور مورد توجه می‌باشد.

بطور کلی ترانسفورماتوری را ایده آل می‌گویند که واجد شرایط زیر باشد:

- مقاومت الکتریکی سیم پیچ ها برابر صفر باشد(یعنی هیچگونه افت الکتریکی وجود نداشته باشد)
- کوپلینگ مغناطیسی صد در صد باشد.(یعنی مقاومت مغناطیسی هسته صفر باشد بعبارت دیگر تمامی شار مغناطیسی تولید شده در سیم پیچ اولیه بوسیله سیم پیچ ثانویه در بر گرفته شود یعنی همه‌ی شار از داخل هسته عبور کند و شار پراکندگی یا خارج شده از هسته وجود نداشته باشد)
- با افزایش شدت میدان مغناطیسی ، چگالی میدان مغناطیسی نیز زیاد شود. اما در واقعیت اینطور نیست یعنی با افزایش نا محدود H (شدت میدان مغناطیسی) مطابق منحنی شکل (۹) به اشباع مغناطیسی هسته منجر خواهد شد.



شکل ۹- منحنی مغناطیسی در هسته های آهنی و نمایش نقطه اشباع

ترانسفورماتوری که شرایط فوق را دارا باشد تلفات حرارتی و پراکندگی در آن وجود ندارد و در اینصورت راندمان یا بازده آن صد در صد خواهد بود. یعنی مقدار انرژی داده شده به آن برابر با انرژی گرفته شده از آن است پس نتیجه آنکه :

در ترانسفورماتور ایده آل توان ورودی با توان خروجی برابر است

خود را بیازمایید

۱) در چه شرایطی یک ترانسفورماتور را ایده آل می گوییم؟

۲) وقتی یک ترانسفورماتور ایده آل باشد، توان ورودی وخروجی آن ..... است.

۴-۲- 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 ولتاژ القایی سیم پیچ اولیه یعنی E_1 برابر است همچنین ولتاژ القا شده در سیم ثانویه یعنی E_2 هم دقیقا 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 می‌باشد. بنابراین:

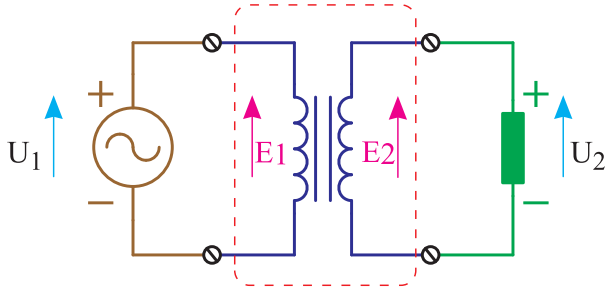
$$U_1 = E_1 \qquad (۱-۱۰)$$

$$U_2 = E_2 \qquad (۱-۱۱)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad (۱-۱۲)$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad (۱-۱۳)$$

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



ترانسفورماتور ایده آل

شکل۱۰- 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 می‌باشد اگر سیم پیچ اولیه به منبع ولتاژ متناوبی با ولتاژ موثر ۱۲۰ ولت متصل شود ولتاژ خروجی چقدر خواهد بود؟

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

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

پس این ترانسفورماتور یک ترانسفورماتور افزاینده ولتاژ می‌باشد.

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

$$S_1 = S_2 \qquad (۱-۱۴)$$

$$U_1 \times I_1 = U_2 \times I_2 \qquad (۱-۱۵)$$

رابطه(۱-۱۵) را می توان به صورت رابطه(۱-۱۶) نیز نوشت:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \qquad (۱-۱۶)$$

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

با توجه به رابطه(۱-۱۳) ، (۱-۱۶) رابطه(۱-۱۷) را می توان نوشت:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \qquad (۱-۱۷)$$

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

۱

در ترانسفورماتور ایده آل با توجه به رابطه(۱-۱۷)، جریان عبوری از سیم پیچی که تعداد دور بیشتری دارد کمتر است و همینطور جریان عبوری از سیم پیچی که تعداد دورکمتری دارد ، بیشتر می‌باشد.

جریان سیم پیچ سمت فشار ضعیف (LV) نیز مطابق رابطه(۱-۱۶) همواره بیشتر از جریان سیم پیچ سمت فشار قوی (HV) می‌باشد . 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 می‌باشد در نتیجه با دیدن سیم پیچ های یک ترانسفورماتور می توان به این موضوع پی برد که کدام سیم پیچ مربوط به فشار ضعیف و کدام سیم پیچ به فشار قوی ارتباط دارد. 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؟

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

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

از آنجا که نیروی محرکه مغناطیسی F از حاصلضرب تعداد دور یک سیم پیچ در جریان عبوری از آن بدست می آید، در رابطه با ترانسفورماتور ایده آل نتیجه دیگری نیز حاصل می شود.

$$F_1=N_1I_1 \qquad (۱-۱۸)$$

$$F_2=N_2I_2 \qquad (۱-۱۹)$$

$$F_1=F_2 \qquad (۱-۲۰)$$

در ترانسفورماتور ایده آل نیروی محرکه مغناطیسی سیم پیچ های اولیه و ثانویه با هم برابر است.

تحقیق کنید

نکته فوق پیامد کدام شرط ترانسفورماتور ایده آل است ؟

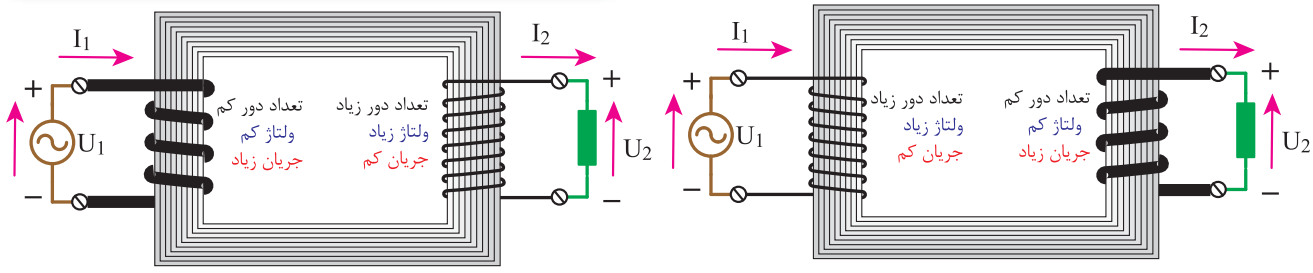
خود را بیازمایید

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 دورآن بیشتر است جریان آن ..... است. .(کمتر / بیشتر)

۴) یک ترانسفورماتور دارای ولتاژ اولیه ۴۰۰ V و ثانویه ی ۱۰۰ ولت است، اگر سیم پیچ ثانویه ی این ترانسفورماتور دارای ۸۰ دور سیم باشد، سیم پیچ اولیه آن چند دور است؟



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

۴-۳- تبدیل امپدانس_انتقال امپدانس

به شکل (۱۲) توجه کنید! اگر مطابق شکل (۱۲) به ثانویه یک ترانسفورماتور، باری متصل شود. از سیم پیچ ثانویه آن جریان عبور می‌کند. این موضوع سبب ایجاد نیروی محرکه مغناطیسی در سیم پیچ ثانویه می شود. سپس میدان سیم پیچ ثانویه طبق قانون لنز در جهت کاهش شار میدان اصلی تلاش می‌کند. تلاشی که می خواهد ولتاژ القایی سمت اولیه را کاهش دهد ولی چون ولتاژ ورودی با ولتاژ القایی برابر است برای آنکه شار اصلی ثابت نگه داشته شود، باید از سیم پیچ اولیه جریان عبور کند. این جریان متناسب با مجذور نسبت تبدیل ترانسفورماتور و امپدانس بار در سیم پیچ ثانویه می‌باشد. گویا منبع تغذیه به امپدانس خاصی متصل شده است . این امپدانس همان امپدانس انتقالی به طرف اولیه یا امپدانس تبدیل می‌باشد. ازآنجاکه :

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} \qquad (۱-۲۱)$$

$$Z_2 = \frac{U_2}{I_2} \qquad (۱-۲۲)$$

بیشتر بدانید

بنا براین خواهیم داشت :

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

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

$$Z_1 = a^2 Z_2 \qquad (۱-۲۳)$$

در رابطه (۱-۲۳)

a نسبت تبدیل

Z_2 امپدانس بار در سمت ثانویه (Ω)

Z_1 امپدانس انتقالی بار به سمت اولیه (Ω)

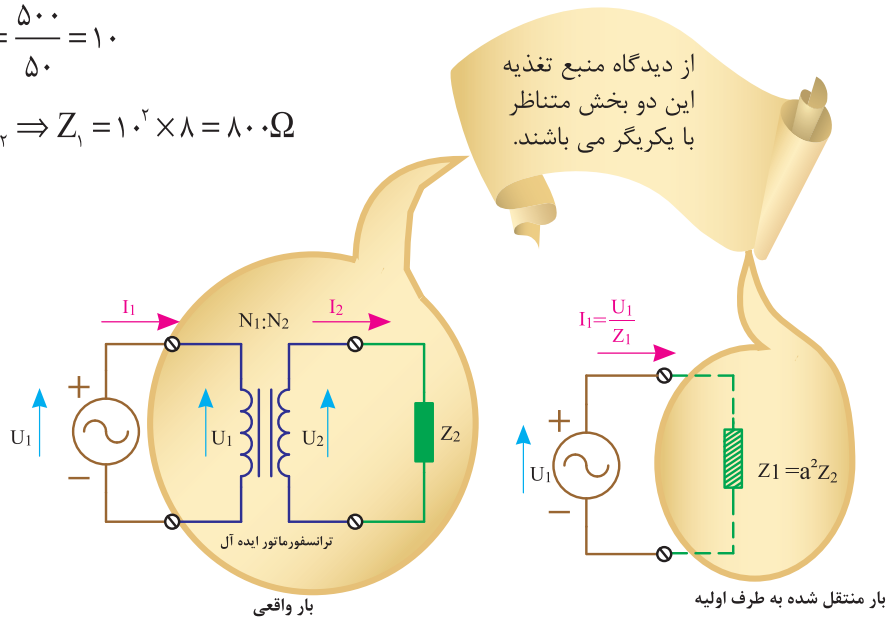
مثال بار ۸Ω به سیم پیچ ثانویه یک ترانسفورماتور ایده آل متصل است اگر سیم پیچ اولیه این ترانسفورماتور ۵۰۰ دور و سیم پیچ ثانویه آن ۵۰ دور باشد از دیدگاه اولیه ترانسفورماتور این بار الکتریکی چند اهم دیده می شود؟

$$N_1 = ۵۰۰$$

$$N_2 = ۵۰$$

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

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



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

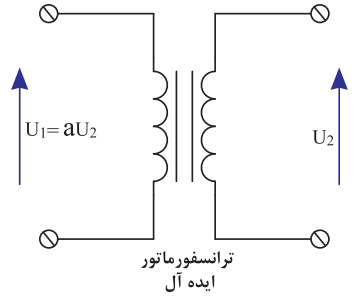
۱

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

۴-۴- نتیجه گیری از روابط اساسی ترانسفورماتور ایده‌آل

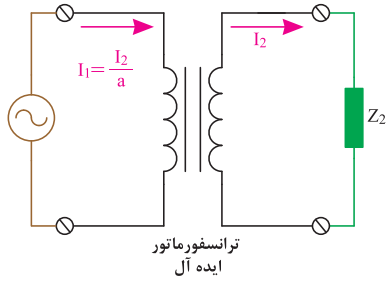
از ترانسفورماتور ایده آل بطور خلاصه نتایج زیر حاصل می شود:

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



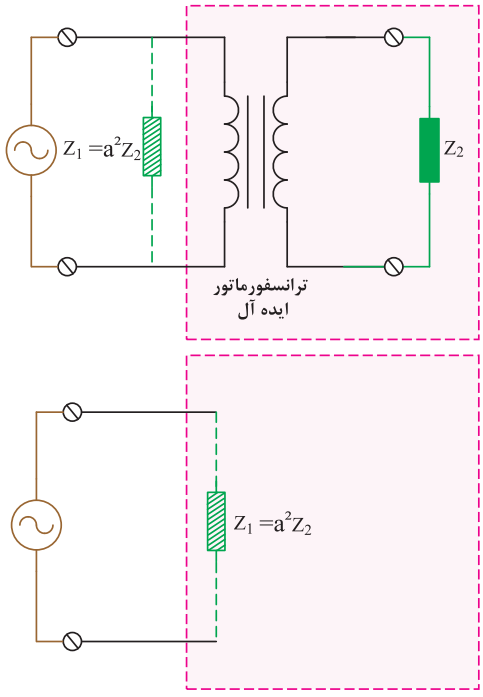
شکل ۱۳- انتقال ولتاژ ثانویه به سمت اولیه ترانسفورماتور ایده آل

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



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

مقاومتهای 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 در دو طرف اولیه و ثانویه بدون تغییر می‌باشد.

خود را بیازمایید

۱) مقاومت ۰/۰۴ Ω در ثانویه یک ترانسفورماتور به اولیه منتقل و ۱ Ω دیده می شود. ضریب تبدیل ترانسفورماتور چقدر است؟

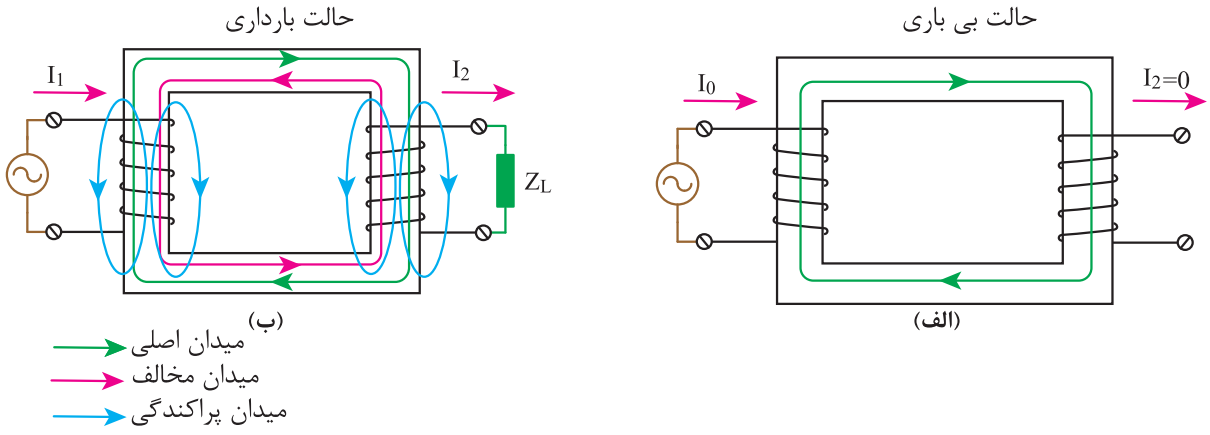
۵- ترانسفورماتور واقعی

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 می‌باشند همچنین شار ایجاد شده بوسیله‌ی 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 بی‌باری و بارداری بطور کامل نشان داده شده است.

۵-۱-مدار معادل ترانسفورماتور واقعی در حالت بی‌باری

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 نمی‌کند به عبارتی $I_2=0$ است.



شکل۱۶- ترانسفورماتور واقعی در حالت بارداری و بی‌باری

ولی بدلیل بسته بودن مدار سیم پیچ اولیه از آن جریانی عبور می‌کند که به آن **جریان بی‌باری** ترانسفورماتور گفته می شود و آن را با I_0 نمایش می دهند.گاهی اوقات به جریان بی‌باری **جریان تحریک** ترانسفورماتور نیز می گویند. عبور جریان بی‌باری از سیم پیچ اولیه دو پیامد دارد:

پیامد اول:

این جریان باعث مغناطیس شدن هسته ترانسفورماتور می شود. در نتیجه از هسته فوران مغناطیسی φ_0 عبور می‌کند که باعث القای ولتاژ در سیم پیچ اولیه و ثانویه می‌گردد. این بخش از جریان که به مغناطیس شدن هسته و تولید فوران مغناطیسی φ_0 می انجامد را با I_M نشان می دهند.

از آنجاکه این جریان اثر مغناطیسی در پی دارد، معادل آن است که از یک سلف فرضی عبور کرده است. درگذشته آموختید که با عبور جریان از سلف نیز اثر مغناطیسی پدید می آید. از آنجاکه با عبور جریان از این سلف ولتاژ در سیم پیچهای ترانسفورماتور القا می شود و از طرفی این جریان از سیم پیچ اولیه عبور می‌کند ، بنابراین در ترسیم برداری کمیتها، جریان I_M نسبت به ولتاژ القایی سیم پیچ اولیه پس فاز است. این بخش از جریان ، مولفه مغناطیسی کنندگی جریان بی‌باری است.

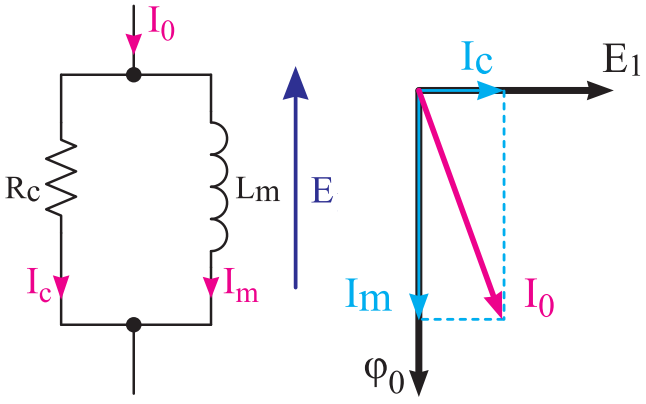
پیامد دوم:

دوم آنکه با مشاهده گرم شدن هسته ترانسفورماتور پس از اتصال سیم پیچ اولیه آن به شبکه برق می توان نتیجه گرفت که بخش دیگری از جریان بی‌باری بصورت گرما در هسته ترانسفورماتور تلف می شود این تلفات حرارتی در هسته را می توان با عبور جریان از یک مقاومت الکتریکی فرضی مدلسازی نمود، چرا که با عبور جریان الکتریکی از مقاومت اهمی نیز گرما پدید می آید. این بخش از جریان ، مولفه تولید حرارت جریان بی‌باری است که باعث گرم شدن هسته ترانسفورماتور می شود و آن را با I_C نمایش می دهند.

جریان I_C با ولتاژ القایی سیم پیچ اولیه هم فاز است.

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

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



شکل ۱۷- مدار معادل هسته

در شکل (۱۷) اندازه بردار I_C بزرگنمایی شده است . در واقعیت این جریان خیلی کوچکتر از I_M می‌باشد. به همین خاطر می توان گفت که جریان تحریک I_0 نسبت به E_1 (ولتاژ القایی سیم پیچ اولیه) حدودا ۹۰° درجه پس فاز می‌باشد. بنا برآنچه گفته شد نقش جریان تحریک در ترانسفورماتور واقعی را می توان معادل با مدار شکل (۱۷) در نظر گرفت. در شکل (۱۷) L_m نماینگر خود القایی است که با عبور جریان I_M میدان اصلی در هسته ترانسفورماتور تولید می‌کند و R_C هم معرف همان مقاومتی است که در هسته تولید گرما می‌کند و نشان دهنده تلفات در هسته می‌باشد.

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

از طرف دیگر همه خطوط فلوی مغناطیسی ایجاد شده بوسیله جریان تحریک از هسته عبور نمی‌کند بلکه 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 می‌نامند. لازم بذکر است که آن قسمت از شار که مسیر خود را از داخل هسته می بندد شار **میدان اصلی** نام دارد. با عبورشار میدان اصلی از داخل سیم پیچها ولتاژ درآن القا می شود. هرچه شار پراکندگی بیشتر باشد میدان اصلی ضعیفتر خواهد شد و بالعکس.

به همین خاطر برای نمایش مدل مداری شار پراکندگی، آن را معادل با یک خود القا یا یک المان سلفی دیگر در نظر می گیرند و چون مربوط به سیم پیچ اولیه است آن را با L_1 نمایش می دهند.

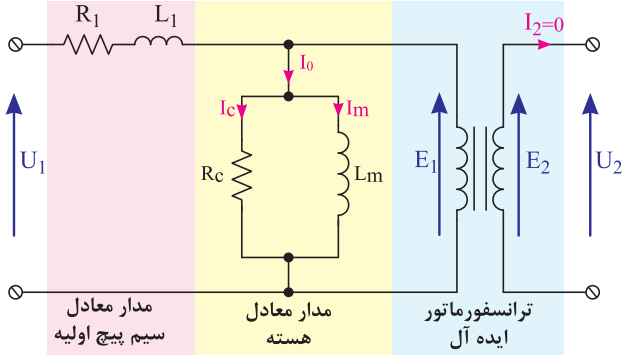
چون شـار پراکندگـی و مقاومت اهمی سـیم پیچ اولیه هر دو باعث کاهش ولتاژ القایی در سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور می شوند پس می توان هر دو المان R_1 و L_1 را ، در ورودی ترانسفورماتور بصورت سری با یکدیگر در نظـر گرفت. در نتیجـه R_1 باعث افت ولتاژ اهمی و L_1 باعـث افت ولتاژ سـلفی و برآیند برداری آنها باعث کاهش ولتاژ القایی در سـیم پیچ اولیه ترانسـفورماتور می شود.

شکل ۱۸- مدار معادل سیم پیچ اولیه

بنابراین بـا عبور جریان تحریک I_0 ، از سـیم پیچ اولیـه ، افت ولتاژ اهمی و افت ولتـاژ پراکندگی در آن بوجود می آید. در نتیجه ولتاژ القا شـده در سیم پیچ از ولتاژ ورودی کوچکتر می شود.

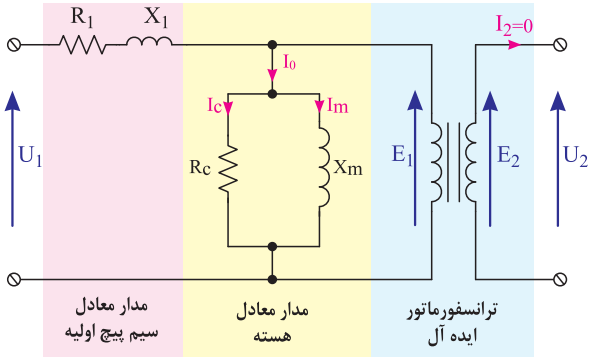
به خاطر داشـته باشـید که در ترانسفورماتورهای ایده آل از مقاومت الکتریکی (اهمی) سیم پیچ ها و شار پراکندگی صرفنظر شـد و به همیـن دلیل ولتاژ القایی سیم پیچ اولیه E_1 با ولتاژ ورودی U_1 برابر گردید.

با جمع بنـدی آنچه درباره ی اثرات جریان بی‌باری گفته شد مدار معادل شـکل (۱۹) برای حالت بی‌باری ترانسفورماتور در نظر گرفته می شود.



شکل۱۹- مدار معادل واقعی ترانسفورماتور در حالت بی‌باری

نکته مهم دیگر آنکه در ترانسـفورماتور های قدرت چون فرکانس ثابت است برای مدل کردن سلفها بجای قرار دادن ضریب خود القایـی غالبا راکتانس آنها مورد توجـه قرار می‌گیـرد یعنی بجای L_1 معـادل راکتانس پراکندگی X_1 و بجای L_m معادل راکتانس میدان اصلی X_Mمطابـق شـکل (۲۰) در مدار معادل قـرار داده می شوند.

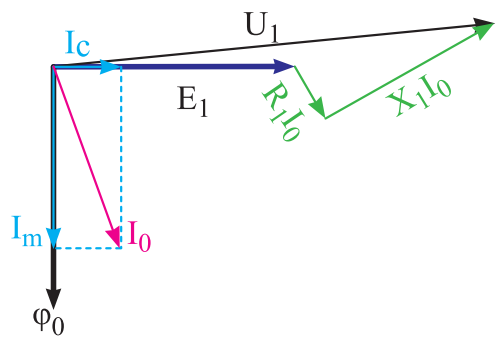


$$X_m=2\pi fL_m$$

$$X_1=2\pi fL_1$$

شکل۲۰- مدار معادل واقعی ترانسفورماتور در حالت بی‌باری

در ترانسـفورماتور واقعی و در حالت بی‌باری بدلیل افت ولتاژ اهمی سـیم پیچ اولیه و شـار پراکندگی آن ، ولتاژ القایی E_1 از ولتاژ U_1 کوچکتر می‌باشد.



شکل ۲۱- وضعیت بردارهای ولتاژ و جریان در حالت بی‌باری

در نمودار شکل (۲۱) افت ولتاژ اهمی سیم پیچ 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_1I_0 ترسیم کرده و درست در امتداد آن بردار افت ولتاژ بر اثر شار پراکندگی را رسم می نمائیم. این بردار 90° از جریان تحریک I_0 جلوتر و اندازه آن معادل X_1I_0 می‌باشد.

با توجه به نمودار شکل (۲۱) ، همواره رابطه(۱-۲۴) بین ولتاژ القایی اولیه و ولتاژ ورودی ترانسفورماتور واقعی بی بار برقرار است.

$$\overline{U_1} = \overline{E_1} + \overline{R_1 I_0} + \overline{X_1 I_0} \qquad (۱-۲۴)$$

در ترانسفورماتورها ظرفیت افزایش چگالی میدان مغناطیسی به مقدار جریان تحریک وابسته است. از اینرو انتخاب جریان تحریک را انتخاب نقطه کار ترانسفورماتور می‌نامند. بعلاوه باید توجه داشت که نقطه کار ترانسفورماتورهای قدرت ، همواره قبل از نقطه اشباع اختیار می شود. از آنجا که با تغییر ولتاژ ورودی مدار معادل شکل(۲۰)، جریان تحریک تغییر می‌کند. بنابراین با افزایش ولتاژ ورودی ترانسفورماتور بیش از مقدار نامی نقطه کار جابجا گردیده و ترانسفورماتور به ناحیه اشباع مغناطیسی وارد می شود. همچنین با زیاد شدن جریان تحریک از یک مقدار مشخص تلفات حرارتی در هسته و سیم پیچها زیاد می شود که این امر باعث سوختن ترانسفورماتور می‌گردد. به همین دلیل ترمینال ورودی هر ترانسفورماتور را باید از اضافه شدن بیش از حد ولتاژ محافظت نمود.

خود را بیازمایید

۱) منظور از جریان تحریک ترانسفورماتور چیست؟

۲) شار پراکندگی در یک ترانسفورماتور چگونه بوجود می آید و به چه چیز بستگی دارد؟

۳) چرا راکتانس معادل پراکندگی و مقاومت سیم پیچ را در ورودی ترانسفورماتور بصورت سری در نظر می‌گیرند

۵-۲- مدار معادل ترانسفورماتور واقعی در حالت بارداری

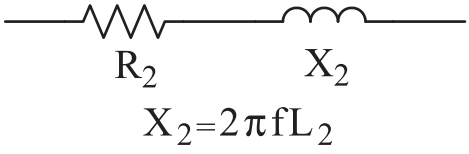
شکل (۱۶- ب)ترانسفورماتوری را که سیم پیچ اولیه آن تحت ولتاژ U_1 به منبع متناوب سینوسی و سیم پیچ ثانویه آن به بار مصرفی امپدانس Z_L متصل شده است نشان می دهد.

در حالت بی‌باری فقط فوران مغناطیسی φ_0 که معادل همان شار میدان اصلی است در هسته گردش می‌کند و در سیم پیچ ثانویه نیروی محرکه E_2 القا می شود. حال که مدار در سمت ثانویه بسته شده است، در مدار ثانویه جریان I_2 جاری می شود. سپس آمپر دوری برابر N_2I_2 که معادل نیروی محرکه مغناطیسی سمت ثانویه است، در آن ایجاد می‌شود. نیروی محرکه مغناطیسی نیز شار مغناطیسی تولید می‌کند. بخشی از این شار مغناطیسی مسیر خود را از داخل هسته می بندد که آن را با φ_2 نشان می دهند و طبق قانون لنز سعی در

خنثی کردن میدان اصلی شـار φ_0 دارد. و جزئی از آن فقط از سـیم پیچ ثانویه عبور می‌کند و مسـیر خود را از هوا می بندد که همان شـار پراکندگی یا فراری سیم پیچ ثانویه است. کاهش شار مغناطیسی φ_0 یعنی سعی در کاهش ولتاژ القایی سـیم پیـچ اولیه ولی از آنجا که سـیم پیچ اولیه به منبع ولتاژ متصل است، برای مقابله با این پدیده و ثابت نگاه داشـتن φ_0 جریان بیشتری از منبـع ولتاژ دریافت می‌کند. مقـدار این جریان بقدری اسـت که نیروی محرکه القایی در سیم پیچ اولیه تغییر نکند بنابراین مقدار جریان I_0 از حالت بی‌باری به جریان I_1 در حالـت بارداری افزایش می یابد و متناسـب با آن فوران مغناطیسی φ_1 در هسته جاری می شود. بعبارتی جمـع برداری فوران φ_1 و φ_2 همـواره ثابت و برابر مقدار φ_0 می‌باشد. یعنی

$$\bar{\varphi}_1 + \bar{\varphi}_2 = \bar{\varphi}_0 \qquad (۱ـ۲۵)$$

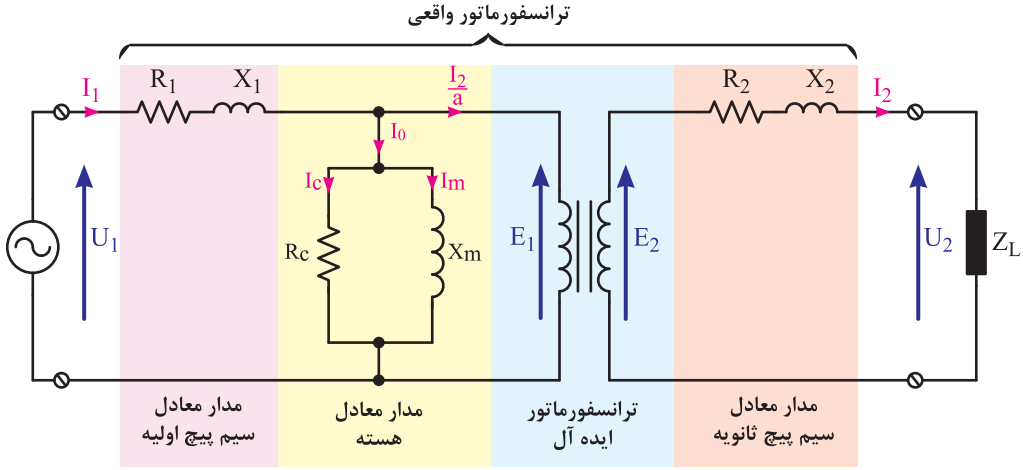
نکتـه قابل توجـه اینکه با افزایش جریان در سـیم پیچ ثانویه، فوران پراکندگی سـیم پیچ نیز افزایش می یابد این موضوع سبب کاهش ولتاژ درترمینال خروجی ترانسفورماتور می شود. به همین خاطرفوران پراکندگی در سیم پیچ ثانویه ترانسـفورماتور معادل X_2I_2 در نظر گرفته می شـود. همچنین بدلیل مقاومت اهمی سیم پیچ ثانویه جریان عبـوری از آن باعث افت ولتاژ اهمی در سـیم پیچ می شود که معادل R_2I_2 می‌باشد. مشابه آنچه برای سـیم پیچ اولیه گفته شـد در ترانسفورماتور واقعی در حالت بارداری ثانویه ترانسفورماتور نیز با یک مقاومت اهمی R_2 سـری شده با راکتانس پراکندگی X_2 مطابق شکل (۲۲) ، مدل سازی می شود.



شکل۲۲- مدار معادل سیم پیچ ثانویه

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

در مدار معادل شـکل (۲۳) قسـمتی که مربوط به ترانسـفورماتور ایده آل اسـت، تمام خصوصیات آن را داشـته و در نتیجه روابط ترانسـفورماتور ایده آل برای آن صادق است.



شکل ۲۳- مدار معادل ترانسفورماتور واقعی در حالت بارداری

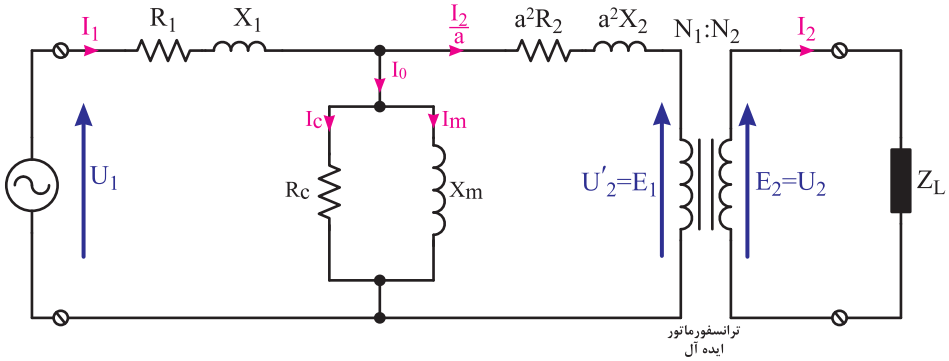
۱

اجزای مدار معادل ترانسفورماتور واقعی به تفکیک عبارتند از:

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

همانطور که قبلا توضیح داده شد می توان امپدانس را در طرفین ترانسفورماتور ایده آل با توجه به رابطه (۲۳-۱) انتقال داد. برای ساده تر کردن مدار معادل شکل (۲۳) ، سیم پیچ ثانویه به سمت اولیه منتقل شده تا شکل (۲۴) بدست 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 تاثیری در تحلیل مدار آن ندارد لذا می توان آن بخش را از مدار معادل حذف کرد و به خاطر سپرد.

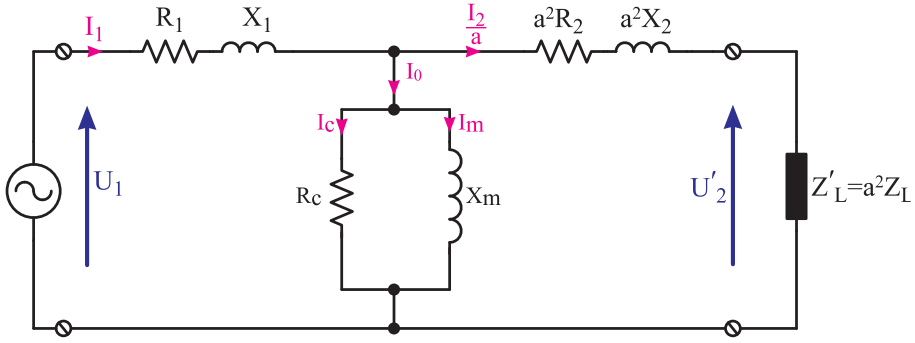


شکل ۲۴- مدار معادل ترانسفورماتور واقعی در حالت بارداری

تقریب اول

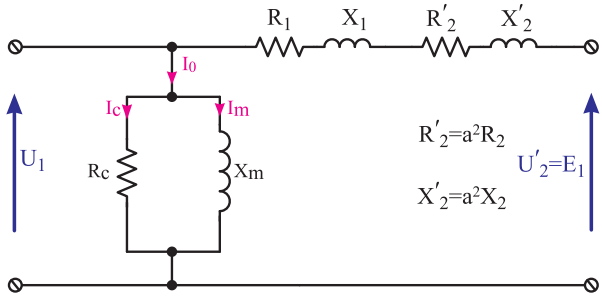
در محاسبات کامل ترانسفورماتورهای قدرت باید از مدار معادل واقعی شکل (۲۵) استفاده شود ولی برای سادگی تحلیل و حل مسائل این کتاب لازم است با مدار معادلهای تقریبی ترانسفورماتورهای قدرت نیز آشنا شوید.

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



شکل ۲۵- صورت دیگری از مدار معادل واقعی ترانسفورماتور

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



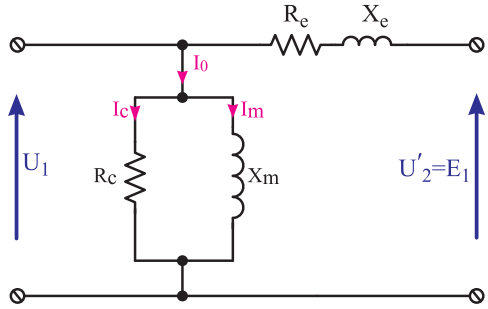
شکل ۲۶- جابه جای شاخه موازی (مدار معادل هسته) به طرف ورودی

در اینصـورت بـا سـری شـدن مقاومتهـای اهمی و راکتانـس پراکندگی طرف اولیـه وثانویه و با توجه به روابط $R_e=R_1+R'_2$ و $X_e=X_1+X'_2$ مدار معادل تقریبی شـکل(۲۷)بدسـت می آید.

در ایـن تقریب از تاثیر جریان تحریک در ایجاد افت ولتاژ در امپدانس سیم پیچ اولیه صرفنظر شده است.

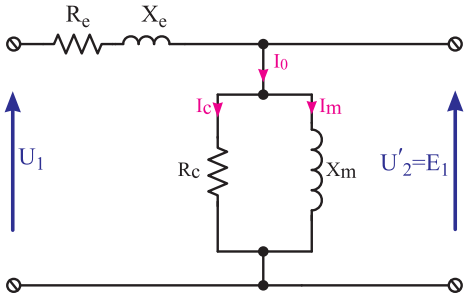
تقریب دوم

با اسـتدلالی مشـابه آنچه در تقریب اول گفته شـد می توان شاخه موازی را به طرف خروجی جابه جا کرد. سـپس مقاومتهای اهمی و راکتانـس پراکندگی طرف اولیه وثانویه سـری را با توجه بـه روابط $R_e=R_1+R'_2$ و $X_e=X_1+X'_2$ ساده نموده و مدار معادل تقریبی شکل (۲۸) را بدست آورد.



شکل ۲۷- مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با احتساب تقریب اول

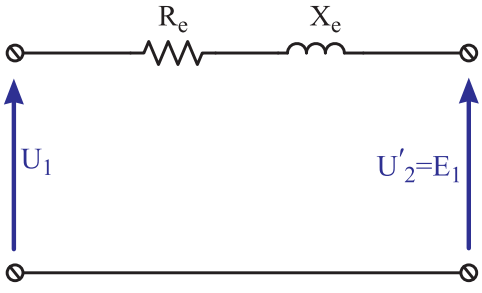
در این تقریب، اثر جریان تحریک در ایجاد افت ولتاژ سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور در نظر گرفته می شود.



شکل ۲۸- مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با احتساب تقریب دوم

تقریب سوم

هنگامیکه ترانسـفورماتور زیر بار باشد و بیش از نصف جریان نامی از آن بارگیری شـود می تـوان از اثر جریان تحریک ترانسفورماتور(جریان بی‌باری I_0) در مقابل جریان اولیه صرفنظر کرد. پس مدار معادل به شکل (۲۹) تبدیل می شود.

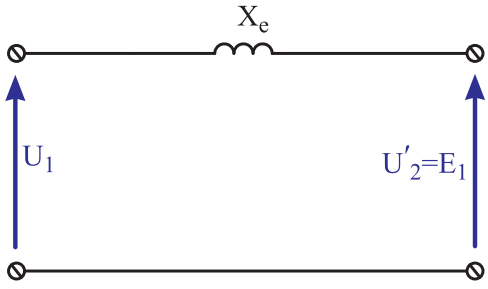


شکل ۲۹- مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با احتساب تقریب سوم

تقریب چهارم

در ترانسـفورماتور هـای قدرتی که تـوان آنها از ۱ MVA بیشتر باشـد مقدار راکتانس معادل سیم پیچ ها خیلی بزرگتـر از مقاومت اهمـی آنـها است. به عبارتی

$R_e << X_e$ می‌باشد. این موضوع بدلیل سطح مقطع بالای سیم پیچهای ترانسفورماتور است. در این حالت می توان از مقدار مقاومت اهمی "R_e" در مقابل راکتانس "X_e" صرفنظر کرد. لذا مدار معادل ترانسفورماتورهای قدرت در ترانسفورماتورهای پر قدرت به شکل (۳۰) در می آید.



شکل ۳۰ – مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با احتساب تقریب چهارم

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 پرقدرت را رسم نموده کمیتهای آن را معرفی کنید.

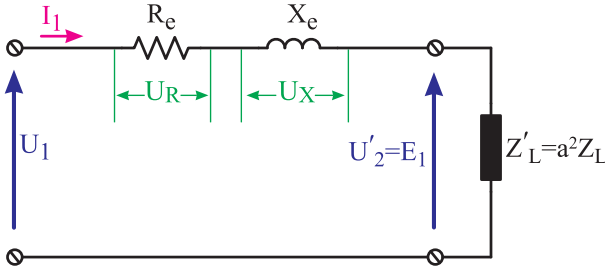
تحقیق کنید

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

۶- دیاگرام 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 می‌باشند. در تقریب سوم قید شد که در صورت زیر بار رفتن ترانسفورماتور بیش از نصف جریان نامی ، می توان از اثر جریان تحریک ترانسفورماتور(جریان بی‌باری I_0) در مقابل جریان اولیه صرفنظر کرد. از آنجا که در تحلیل بارداری ترانسفورماتورهای قدرت و دیاگرام برداری حالت بارداری آن مورد نظر می‌باشد به همین خاطر از تقریب نوع سوم استفاده می شود.

مدار معادل ترانسفورماتور در تقریب نوع سوم مجددا 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 می‌باشد:

$$\overline{U_1} = \overline{U_R} + \overline{U_X} + \overline{U'_2} \qquad (۱-۲۶)$$

رابطه (۱-۲۶) نشـان می دهد با جمع برداری سه بردار U_x ،U_R و U_2، بردار U_1 بدست می آید.

$$\overline{U_1} = \overline{R_e I_1} + \overline{X_e I_1} + \overline{U'_2} \qquad (۱-۲۷)$$

$$U_R = R_e I_1 \qquad (۱-۲۸)$$

$$U_x = X_e I_1 \qquad (۱-۲۹)$$

کـه در رابطـه (۱-۲۸) و (۱-۲۹) U_R را افت ولتاژ اهمی معادل سـیم پیچ هـا ، U_X افت ولتاژ پراکندگی می‌باشد.

بنابراین:

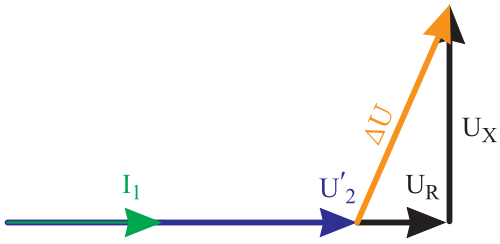
برای ترسـیم این بردارها ابتدا بـردار ولتاژ E_1 را که حالا معادل ولتاژ ترمینال خروجی از دیدگاه اولیه (U_2) نیز هسـت به عنوان مبنا در جهت صفر مثلثاتی ترسیم می‌کنیـم آنگاه با توجه به مقدار و نوع بار مصرفی بردار جریان I_1 را با زاویه مناسـب نسبت به بردار ولتاژ E_1 یا U_2 می کشیم. در بار اهمی خالص این ولتاژ و جریان با یکدیگر مطابق شکل (۳۲) هم فاز می‌باشد.

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

در ادامه بردار U_R را که معادل افت ولتاژ اهمی است و همفاز با جریان می‌باشد همسنگ با بردار I_1 و از انتهای بردار E_1 یا U_2 مطابق شکل (۳۳) ترسیم می‌کنیم.

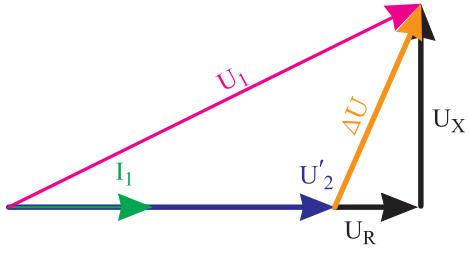
شکل۳۳- ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری ترانسفورماتور با بار اهمی خالص (مرحله ۲)

سپس بردار U_X را نیز که معادل افت ولتاژ پراکندگی است و همواره ۹۰° جلوتر از جریان I_1 می‌باشد در ادامه بردار U_R رسم می‌کنیم. شکل (۳۴)



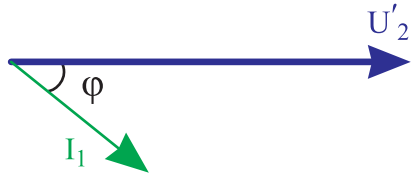
شکل ۳۴- ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری ترانسفورماتور با بار اهمی خالص (مرحله ۳)

حـالا ابتدای بردار E_1 یا U'_2 را به انتهای بردار U_X مطابق شـکل (۳۵) وصل می‌کنیـم. این بردار، بردار U_1 ولتاژ ورودی اسـت.



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

مجددا مراحل فوق را برای ترسـیم دیاگرام برداری حالت بارداری برای بار اهمی ــ سلفی ترسیم می‌کنیم ابتدا بردار ولتاژ ترمینال خروجی از دیدگاه اولیه (U_2) به عنوان مبنا در جهت صفر مثلثاتی ترسـیم می‌کنیم آنگاه با توجه به مقدار و نوع بار مصرفی بردار جریان I_1 را با زاویه مناسب نسبت به بردار ولتاژ U_2 می کشیم. در بار اهمی ــ سلفی مطابق شکل (۳۶)جریان به اندازه زاویه φ از ولتاژ عقبتر است.

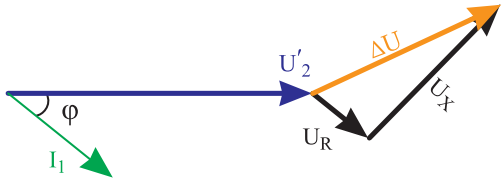


شکل ۳۶- ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری ترانسفورماتور با بار اهمی - سلفی (مرحله ۱)

در ادامه بردار U_R را که معادل افت ولتاژ اهمی است و همفاز با جریان می‌باشد همسنگ با بردار I_1 و از انتهای بردار U_2 مطابق شکل (۳۷) ترسیم می‌کنیم.

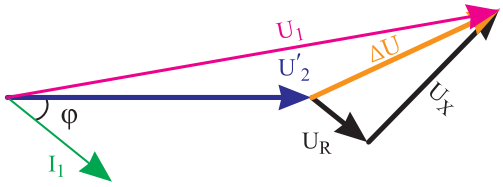
شکل ۳۷- ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری ترانسفورماتور با بار اهمی - سلفی (مرحله ۲)

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



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

حالا ابتدای بردار U_2 را به انتهای بردار U_X مطابق شکل (۳۹) وصل می‌کنیم. این بردار، بردار U_1 ولتاژ ورودی است.



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

مراحل فوق را برای ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری برای بار اهمی – خازنی نیز تکرار می‌کنیم. ابتدا بردار ولتاژ ترمینال خروجی از دیدگاه اولیه (U_2) به عنوان مبنا در جهت صفر مثلثاتی ترسیم می‌کنیم آنگاه با توجه به مقدار و نوع بار مصرفی بردار جریان I_1 را با زاویه مناسب نسبت به بردار ولتاژ U_2 می کشیم. در بار اهمی – خازنی مطابق شکل (۴۰) جریان به اندازه زاویه φ از ولتاژ جلوتر است.

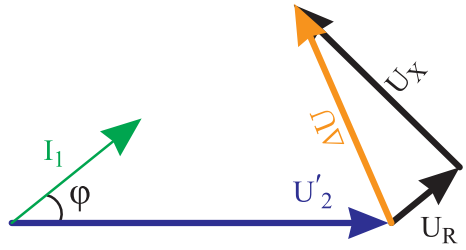
شکل ۴۰- ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری ترانسفورماتور با بار اهمی - خازنی (مرحله ۱)

در ادامه بردار U_R را که معادل افت ولتاژ اهمی است و همفاز با جریان می‌باشد همسنگ با بردار I_1 و از انتهای بردار U_2 مطابق شکل (۴۱) ترسیم می‌کنیم.

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

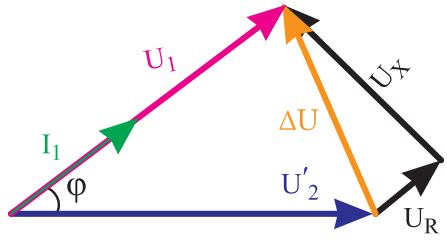
سپس بردار U_X را نیز که معادل افت ولتاژ پراکندگی است و همواره ۹۰° جلوتر از جریان I_1 می‌باشد در ادامه

بردار U_R رسم می‌کنیم. شکل (۴۲)



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

حالا ابتدای بردار U_2 را به انتهای بردار U_X مطابق شکل (۴۳) وصل می‌کنیم. این بردار، بردار U_1 ولتاژ ورودی است.



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

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.

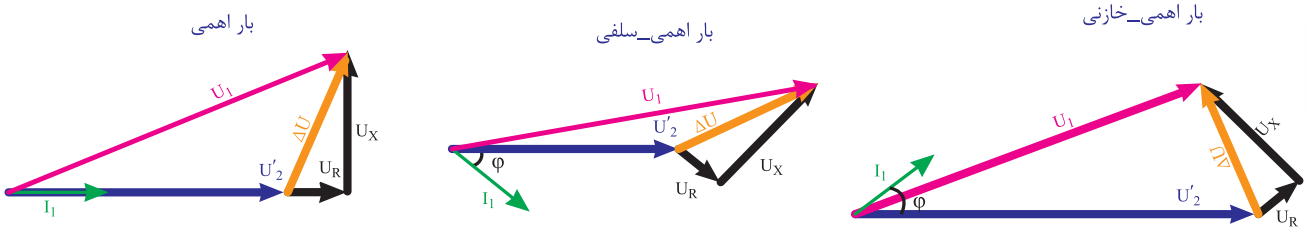
از دیاگرام های شکل (۴۴) نتایج زیر حاصل می شود:

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_1کوچکتر 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 وابستگی شدیدی به نوع بار متصل شده به آن دارد.

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

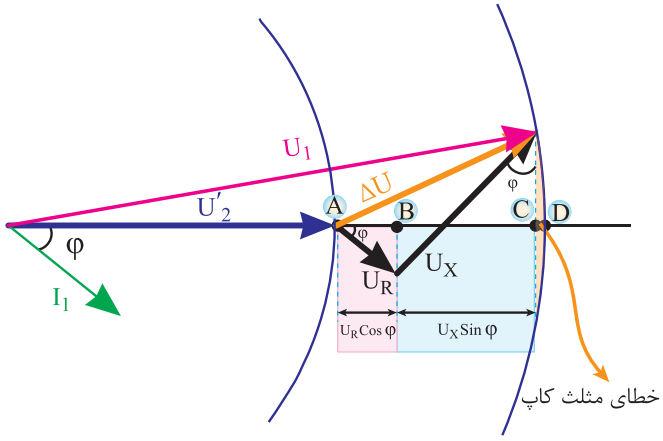


شکل ۴۴ - دیاگرام برداری حالت بارداری در بارهای اهمی خالص، اهمی- سلفی و اهمی- خازنی

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 می‌باشد .اندازه این بردار در بارهای با امپدانس یکسان ، مساوی می‌باشد 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 مبدا بردارها و به شعاع $U_{۲}$ و دیگری به همان مرکز ولی به شعاع $U_{۱}$ زده می شود. اختلاف شعاع دوایر را با تقریب خوبی می توان معادل افت ولتاژ کلی ترانسفورماتور در زیر بار دانست.

در شکل (۴۵) باترسیم 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

در شکل (۴۵) داریم:

$$\Delta U = U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} \qquad (۱-۳۰)$$

$$U_{AB} = U_R \cos\varphi \qquad (۱-۳۱)$$

$$U_{BC} = U_X \sin\varphi \qquad (۱-۳۲)$$

U_{CD} = خطای مثلث کاپ

$$\Delta U \approx U_R \cos\varphi + U_X \sin\varphi \qquad (۱-۳۳)$$

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

$$E_{۱} = U'_{۲} = U_{۱} - \Delta U \qquad (۱-۳۴)$$

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

۱) کاپ نام فرد مبتکر این روش است.

U_R - افت ولتاژ مقاومت اهمی سیم‌پیچ ها از دیدگاه اولیه

U_X - افت ولتاژ پراکندگی میدان از دیدگاه اولیه

φ - زاویه اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان بار

توجه ۱

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

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

الف) بار اهمی خالص

در بار اهمی خالص ضریب قدرت یک است.

$$\Delta U = U_R \cos\varphi + U_X \sin\varphi$$
$$\Delta U = ۱۰\times ۱ + ۳۰\times ۰ = ۱۰V$$
$$E_۱ = U'_۲ = U_۱ - \Delta U = ۲۵۰ - ۱۰ = ۲۴۰V$$

ب) بار اهمی –سلفی با ضریب قدرت ۰/۶

$$\Delta U = U_R \cos\varphi + U_X \sin\varphi$$
$$\Delta U = (۱۰\times ۰/۶) + (۳۰\times ۰/۸) = ۳۰V$$
$$E_۱ = U'_۲ = U_۱ - \Delta U = ۲۵۰ - ۳۰ = ۲۲۰V$$

ج) بار اهمی- خازنی با ضریب قدرت ۰/۶

چون بار خازنی است پس $\varphi_۲$ منفی است و مقدار $\sin\varphi_۲$ نیز منفی می شود

$$\Delta U = U_R \cos\varphi + U_X \sin\varphi$$
$$\Delta U = (۱۰\times ۰/۶) + (۳۰\times (-۰/۸)) = -۱۸V$$
$$E_۱ = U'_۲ = U_۱ - \Delta U = ۲۵۰ - (-۱۸) = ۲۶۸V$$

توجه ۲

مطابق شکل (۳۱) در وضعیت اتصال کوتاه تنها امپدانس داخلی ترانسفورماتور باعث محدود کردن جریان اتصال کوتاه می شود و ضریب قدرت در این حالت به امپدانس داخلی بستگی دارد.

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 می‌کند؟

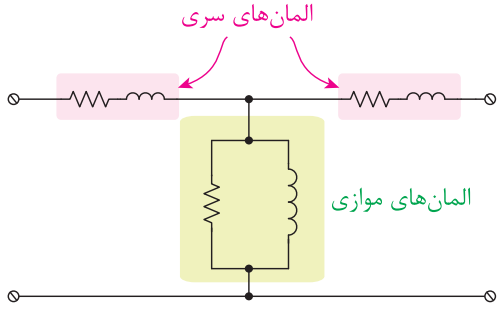
۳) بیشترین افت ولتاژ در کدام نوع بار اتفاق می‌افتد؟

۴) ترانسفورماتوری با افت ولتاژ اهمی ۲۵ ولت وافت ولتاژ القایی ۴۰ ولت باری را با ضریب قدرت ۰/۸ پس فاز تحت ولتاژ ۲۴۰ ولت تغذیه می‌کند. ولتاژ بی باری خروجی ترانسفورماتور را بدست آورید.

۷- تعیین مقادیر پارامترهای مدار معادل با کمک آزمایشهای تجربی

اندازه عناصر مدار معادل ترانسفورماتور را می توان بـا آزمایش بی‌باری و اتصال کوتاه تعیین نمود بعلاوه به کمک این آزمایشـها می توان تلفات ترانسـفورماتور را نیز بدست آورد.

همانطـور که در شـکل (۴۶) ملاحظـه می کنید مدار معادل ترانسفورماتور شـامل تعدادی المان سری و موازی می‌باشـد. المانهای موازی را به کمک آزمایش حالـت بی‌باری و المانهای سـری را به کمک آزمایش اتصال کوتاه می توان مشخص نمود.



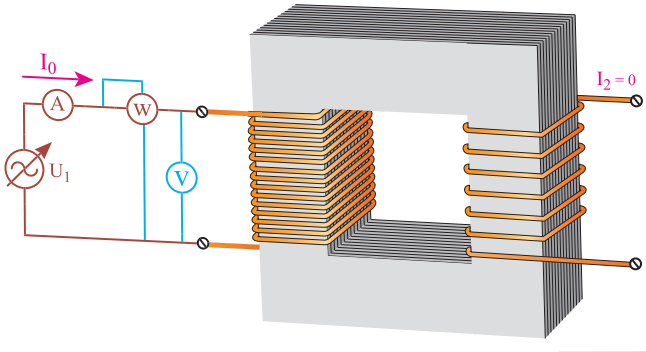
شکل ۴۶- نمایش المانهای سری و موازی بر روی مدار معادل واقعی ترانسفورماتور

۷-۱- آزمایش حالت بی‌باری

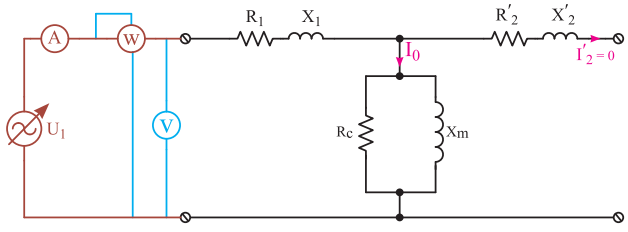
هدف از انجام این آزمایـش تعیین مقادیر المانهای مربـوط به شـاخه موازی مدار معـادل یعنی (R_c , X_m) می‌باشـد. ابتدا مداری مطابق آنچه در شکل (۴۷-الف) نشان داده شـده است را فراهم کرده و ترانسفورماتور را در حالتی که سـیم پیچ ثانویه آن باز اسـت به ولتاژ نامی شـبکه متصل کرده و مدار را مـورد آزمایش قرار می‌دهیم.

بـا توجه به مدار معادل شـکل(۴۷-ب) مدار ثانویه باز اسـت. لذا جریانی در مدار ثانویه جاری نمی‌شـود. بنابراین ولتاژ اعمالی به سـیم پیچ اولیه ترانسفورماتور باعث مغناطیسی شدن هسته ترانسفورماتور می شود و جریان بی‌باری I_0 از آمپر متر عبور می‌کند. از آنجاییکه جریان I_0 در حدود ۲تا۶ درصد جریان نامی اسـت لذا افت ولتاژ ناشی از $R_1 I_0$ و $X_1 I_0$ ناچیز بوده و بطور تقریبی می توان نتیجه گرفت $U_1 = E_1$ می‌باشد.

قـدرت ورودی کـه توسـط واتمتـر نمایش داده می شود مطابق شـکل (۴۷) شامل توان تلف شده در هسـته و تلفات اهمی سـیم پیچ در سمت اولیه است امـا چون جریان بی‌بـاری درصد ناچیـزی از جریان نامی اسـت پس تلفات اهمی سـیم پیـچ اولیه نیز در ایـن حالت درصد نـا چیزی از کل تلفات نشـان داده شـده توسـط واتمتر اسـت. بنابراین توان نشان داده شـده P_0 توسط واتمتر تقریبا همان توان تلف شده در هسته ترانسفورماتور است که به آن تلفات آهنی (P_{Fe}) می‌گویند.یعنـی $P_0 \approx P_{Fe}$

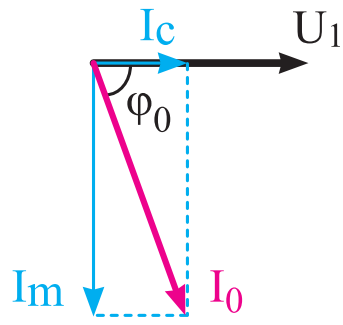


(الف)



(ب)

شکل۴۷- مدار یک ترانسفورماتور واقعی در حال آزمایش بی‌باری



شکل ۴۸- دیاگرام برداری ولتاژ و جریان در حالت بی‌باری

$$\cos\varphi_{\circ} = \frac{P_{\circ}}{U_{1} I_{\circ}} \qquad (۱-۳۵)$$

$$\sin\varphi_{\circ} = \sqrt{1 - \cos\varphi_{\circ}^{2}} \qquad (۱-۳۶)$$

$$I_{C} = I_{\circ} \cos\varphi_{\circ} \qquad (۱-۳۷)$$

$$I_{m} = I_{\circ} \sin\varphi_{\circ} \qquad (۱-۳۸)$$

$$X_{m} = \frac{U_{1}}{I_{m}} \qquad (۱-۳۹)$$

$$R_{C} = \frac{U_{1}}{I_{C}} \qquad (۱-۴۰)$$

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

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

U_{1} ولتاژ ورودی

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

از طرف دیگر با توجه به مدار معادل ، چون جریان شاخه ی المان‌های موازی مستقل از جریان بار است، لذا تغییرات احتمالی بار نمی‌تواند باعث تغییر تلفات آهنی شود، زیرا مقدار این تلفات وابسته به المان مقاومتی شاخه موازی است که بجای تلفات گرمایی ایجاد شده در هسته مدل شده و مقدار این تلفات به ولتاژ و فرکانس برق ورودی وابسته است که با توجه به ثابت بودن ولتاژ و فرکانس در شبکه برق، می توان نتیجه گرفت ، تلفات آهنی ترانسفورماتور جزو تلفات ثابت ترانسفورماتور می‌باشد.

بعلاوه با اندازه‌گیری ولتاژ دو سر مدار در ثانویه ترانسفورماتور می توان با تقریب خوبی نسبت تبدیل ترانسفورماتور را مشخص نمود.

خود را بیازمایید

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

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

۳) چرا در آزمایش بی باری از تلفات سیم پیچ صرف نظر می شود؟

۷-۲- 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 می کنند.

از آنجا که در مدار شکل (۴۹) $Z_{L}=\circ$ می‌باشد، لذا برای جلوگیری از افزایش شدت جریان در سمت اولیه ترانسفورماتور، باید ورودی ترانسفورماتور را به کمک اتو ترانسفورمر متغیر که قابلیت تنظیم ولتاژ داشته باشد تغذیه کرد. در ابتدای این آزمایش باید از صفر بودن ولتاژ ورودی اطمینان حاصل کرد. سپس سمت ثانویه ترانسفورماتور را باید اتصال کوتاه کرد و آنگاه

مقـدار ولتاژ را به آرامی افزایش داد تـا جریان نامی از سـیم پیچ اولیه عبور کند علت انتخاب جریان نامی به این جهت اسـت که مقادیر به دست آمده در نقطه کار ترانسفورماتور واقع باشد.

با توجه به مدار معادل شـکل (۴۹-ب) ، در صورت تغییـرات امپدانـس بـار مصرفـی، جریان عبـوری از المانهای سـری تغییر می‌کند بنابراین تلفات ناشـی از مقاومت اهمی سیم پیچها کاملا به امپدانس بار وابسته می‌باشند.

آنچه واتمتر در این آزمایش نشـان می دهد مجموع تلفات مسـی سـیم پیچ هـا و تلفات در هسـته آهنی است.

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

$$P_{SC} = P_{Cu_1} + P_{Cu_2} + P_{Fe} \quad (۱-۴۱)$$

در انجـام ایـن آزمایش با توجه بـه مدار معادل شـکل (۴۹-ب)توانـی کـه ترانسـفورماتور جذب می‌کنـد و واتمتر نشـان می دهد عبارت اسـت از توان تلف شـده در مقاومتهای R_1 و R'_2 که بصورت حرارت در سـیم پیچ ها تلف می شـود.

$$P_{SC} = R_1 I_n^2 + R'_2 I_n^2 \quad (۱-۴۲)$$

$$P_{SC} = (R_1 + R'_2) I_n^2 \quad (۱-۴۳)$$

$$P_{SC} = R_e I_n^2 \quad (۱-۴۴)$$

$$Re = \frac{P_{SC}}{I_n^2} \quad (۱-۴۵)$$

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

$$Z_e = \frac{U_{sc}}{I_n} \quad (۱-۴۶)$$

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

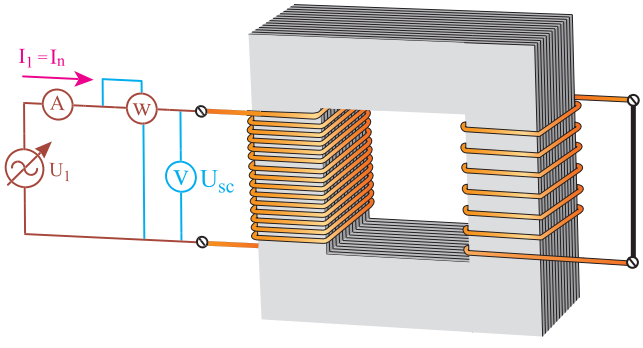
$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} \quad (۱-۴۷)$$

$$R_e = R_1 + R'_2 \quad (۱-۴۸)$$

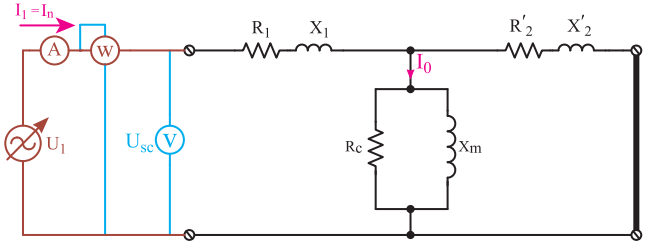
$$X_e = X_1 + X'_2 \quad (۱-۴۹)$$

در آزمایش اتصال کوتـاه ولتاژ ورودی چندین برابر کوچکتـر از ولتاژ نامی اسـت. از طرفـی چون فرکانس شبکه برق ثابت است و تلفات آهنی متناسب با مجذور ولتاژ ورودی می‌باشـد، پس تلفات آهنی نیز به نسـبت حالتی که با ولتاژ نامی تغذیه می شـود خیلی کوچکتر خواهد بـود. بنابراین می توان ثابـت کرد، در آزمایش اتصال کوتـاه، توانی که واتمتر نشـان می دهد تقریبا همان تلفات مسی سیم پیچ ها است.

از آنجاکه تلفات مسی ترانسفورماتور وابسته به



(الف)



(ب)

شکل۴۹- مدار یک ترانسفورماتور واقعی در حال آزمایش اتصال کوتاه

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

$$P_{SC} = P_{Cu_1} + P_{Cu_2} = P_{Cu_n} \quad (۱-۵۰)$$

در صورتی که خواسته شود تلفات مسی در جریانی بغیر از جریان نامی ترانسفورماتور بدست آید می توان از روابط (۱-۵۱) و (۱-۵۲) استفاده کرد.

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

$$P_{Cu} = P_{Cu_n} (\frac{I}{I_n})^2 \quad (۱-۵۱)$$

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

$$P_{Cu} = P_{Cu_n} (\frac{S}{S_n})^2 \quad (۱-۵۲)$$

S توان ظاهری بار

S_N توان ظاهری نامی ترانسفورماتور

P_{CU} تلفات مسی در بار مورد نظر

P_{CUn} تلفات مسی بازای عبور جریان نامی

در رابطه (۱-۵۳) نسبت $\frac{S}{S_n}$ یا $\frac{I}{I_n}$ را ضریب بار می‌گویند و با حرف A نمایش می دهند.

$$A = \frac{I}{I_n} = \frac{S}{S_n} \quad (۱-۵۳)$$

پس می توان رابطه (۱-۵۱) یا (۱-۵۲) را به صورت رابطه (۱-۵۳) نوشت:

$$P_{Cu} = P_{Cu_n} A^2 \quad (۱-۵۴)$$

خود را بیازمایید

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

۲) مهمترین نکته حفاظتی راکه باید هنگام انجام آزمایش اتصال کوتاه رعایت نمود چیست؟

۳) چرا در آزمایش اتصال کوتاه از تلفات هسته صرف نظر می شود؟

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

تحقیق کنید

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

۸- ولتاژ اتصال کوتاه در ترانسفورماتور

بعنوان تعریف ولتاژی که ولتمتر در حالت آزمایش اتصال کوتاه نشان می دهد را ولتاژ اتصال کوتاه ترانسفورماتور می‌گویند و آن را با U_{SC} نمایش می دهند. همچنین نسبت ولتاژ اتصال کوتاه به ولتاژ نامی ترانسفورماتور را ولتاژ اتصال کوتاه نسبی ΔU_k ترانسفورماتور می‌گویند و گاهی آن را به صورت درصد بر روی پلاک نشان می دهند.

$$\%\Delta U_k = \frac{U_{SC}}{U_n} \times ۱۰۰ \quad (۱-۵۵)$$

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

U_n ولتاژ نامی ترانسفورماتور

درصد افت ولتاژ اهمی ترانسفورماتور را می توان از رابطه (۵۶-۱) محاسبه کرد.

$$\%\Delta U_R = \frac{R_e I_n}{U_n} \times ۱۰۰ \qquad (۱-۵۶)$$

بطور مشابه با رابطه (۵۷-۱) درصد افت ولتاژ سلفی ترانسفورماتور را نیز می توان نتیجه گرفت:

$$\%\Delta U_X = \frac{X_e I_n}{U_n} \times ۱۰۰ \qquad (۱-۵۷)$$

و همچنین

$$\%\Delta U_k = \frac{Z_e I_n}{U_n} \times ۱۰۰ \qquad (۱-۵۸)$$

با توجه به روابط اخیر، ولتاژ اتصال کوتاه رابطه مستقیم با راکتانس پراکندگی و مقاومت سیم پیچ ها در ترانسفورماتور دارد. ترانسفورماتورهایی که میدان پراکندگی و مقاومت سیم پیچ های آنها زیاد است دارای ولتاژ اتصال کوتاه بزرگ نیز هستند بالعکس در ترانسفورماتورهای با ولتاژ اتصال کوتاه کوچک می توان نتیجه گرفت میدان پراکندگی کم و مقاومت سیم پیچ ها ناچیز می‌باشد.

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

جدول (۱) محدوده ی درصد افت ولتاژ چند نوع ترانسفورماتور واقعی را نشان می دهد.

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

جدول ۱- درصد ولتاژ اتصال کوتاه در ترانسفورماتورهای مختلف

باید به خاطر داشت که در ترانسفورماتورهای خیلی بزرگ ، مقدار مقاومت اهمی سیم پیچ ها در مقایسه با فوران پراکندگی بسیار کم است و فقط راکتانس معادل پراکندگی تعیین کننده مقدار ولتاژ اتصال کوتاه ترانسفورماتور می‌باشد.

خود را بیازمایید

۱) ولتاژ اتصال کوتاه را تعریف کنید.

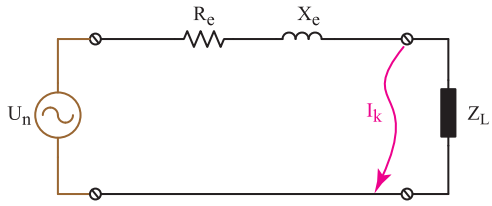
۲) ترانسفورماتوری که ولتاژ اتصال کوتاه آن کم است، در زیر بار دارای افت ولتاژ ..... می‌باشد.

۳) اگر ترانسفورماتوری دارای امپدانس داخلی بزرگ باشد حتما دارای ولتاژاتصال کوتاه ..... است

۹- جریان اتصال کوتاه واقعی در ترانسفورماتور

به یاد دارید که در هنگام بارداری ترانسفورماتورها از تقریب سوم مدار معادل واقعی استفاده می شد. این تقریب در تحلیل اتصال کوتاه واقعی هم درست و به واقعیت نزدیک است. لذا از مدار معادل شکل (۵۰) استفاده می شود. اگر مطابق شکل (۵۰) به سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور در حالی که دو سر سیم پیچ ثانویه

آن مستقیما بهم وصل شده اند ولتاژی معادل ولتاژ نامی یا نزدیک به آن اعمال شود، جریان زیادی از سیم پیچ ها عبور کرده و پس از ایجاد حرارت باعث سوختن ترانسفورماتور می شود. این جریان را جریان اتصال کوتاه ترانسفورماتور می‌گویند و آن را با I_K نمایش می دهند.



شکل ۵۰- مدار معادل ترانسفورماتور در حال اتصال کوتاه واقعی

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

رابطه (۵۸-۱) را در نظر بگیرید. این رابطه را می توان بصورت زیر نیز نوشت:

$$\Delta U_k = \frac{Z_e I_n}{U_n} = \frac{I_n}{(\frac{U_n}{Z_e})} = \frac{I_n}{I_k}$$

$$I_k = \frac{I_n}{\Delta U_k} \qquad (۵۹-۱)$$

جریان I_K را جریان اتصال کوتاه دائم ترانسفورماتور می‌نامند.

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

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

خود را بیازمایید

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 ولتاژاتصال کوتاه ۸٪ ، اتصالی کرده و جریان ۱۲۰ آمپر ازسیم پیچ اولیه عبور کرده است، جریان نامی اولیه را محاسبه کنید.

۱۰- تلفات در ترانسفورماتور

ترانسفورماتور وسیله ای 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 می دهد. اما همانطور که تا به اینجا خواندید همه انرژی جذب شده از شبکه برق تحویل بار نمی‌شود، بلکه بخشی از آن در هسته و سیم پیچ به گرما تبدیل و از بدنه ترانسفورماتور خارج می شود. به همین خاطر به این بخش از انرژی که تحویل بار نمی‌گردد ، اصطلاحا انرژی تلف شده در ترانسفورماتور می‌گویند.

بنابراین تلفات ترانسفورماتور مربوط به هسته و

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

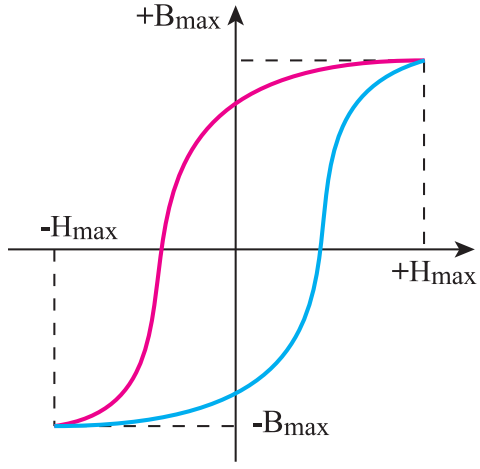
سیم پیچ می‌باشد.

۱۰-۱- تلفات هسته (آهنی)

تلفات هسته ترانسفورماتور ، به آن مقدار از انرژی الکتریکی می‌گویند که در هسته ترانسفورماتور به گرما تبدیل می شود. و چون جنس هسته عموما آهن است به آن تلفات آهنی نیز می‌گویند. تلفات در هسته خود شامل تلفات هیسترزیس و فوکو می‌باشد.

۱۰-۱-۱- تلفات هیسترزیس

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 هیسترزیس در یک ماده مغناطیسی

حلقه نشان داده شده در شکل (۵۱) را حلقه هیسترزیس می‌گویند. این حلقه بیانگر آن است که در هر سیکل برای تغییر جهت میدان مغناطیسی در مولکولهای هسته لازم است انرژی بیشتری متناسب با مساحت حلقه از شبکه دریافت گردد. بنابراین هر چه حلقه باریکتر باشد مساحت آن کمتر و در نتیجه انرژی تلف شده به صورت گرما در آن کمتر خواهد بود و بالعکس.

بدین ترتیب به مقدار انرژی صرف شده در هسته که صرف جابجا کردن جهت میدان مغناطیسی در مولکولهای هسته در هرسیکل می‌گردد تلفات هیسترزیس می گویند.

یکی از عوامل مهم در مقدار تلفات هیسترزیس جنس هسته می‌باشد به همین خاطر برای کاهش تلفات هیسترزیس باید از هسته هایی استفاده شود که مولکولهای مغناطیسی آن منطبق بر جهت میدان مغناطیسی تولید شده بتواند براحتی تغییر وضعیت دهند یا به عبارتی پسماند نداشته باشند.[1]

همچنین هرچه فرکانس شبکه بیشتر باشد عمل تغییر جهت میدان مغناطیسی سریعتر صورت می‌گیرد و در این صورت ملکولهای مغناطیسی کمتری فرصت تغییر جهت می یابند. بنابراین عامل مهم دیگر در افزایش تلفات هیسترزیس افزایش فرکانس به حساب می آید اما از آنجاکه فرکانس شبکه ثابت و جنس هسته جزو ساختمان ترانسفورماتور است پس مقدار این تلفات ثابت می‌باشد.

خود را بیازمایید

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

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

۳) تلفات هیسترزیس ثابت است یا متغیر ؟چرا؟

۱۰-۱-۲- تلفات فوکو

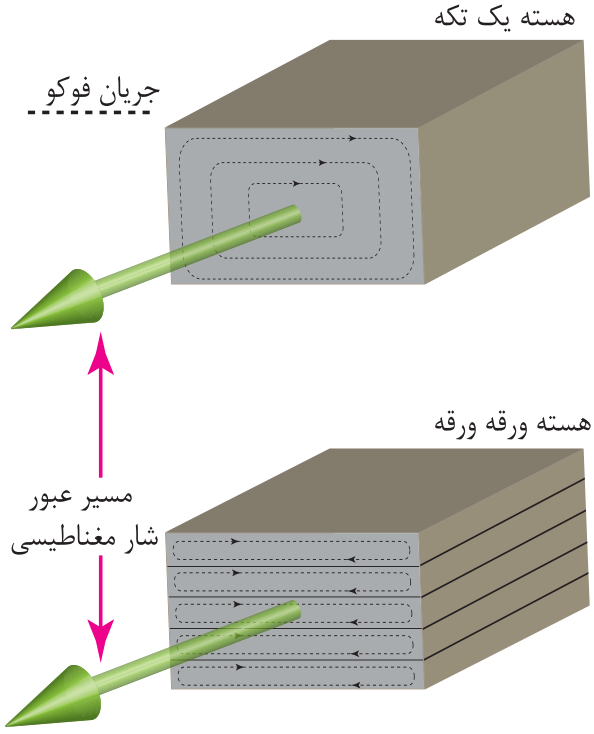
با عبور شار مغناطیسی در هسته ی ترانسفورماتور نیز

۱) فولاد سیلیسم دار نورد سرد شده دارای خاصیت خوب مغناطیسی می‌باشد.

ولتاژ القا می شـود. و چون جنس هسته ترانسفورماتور آهنی و مسیر آن کاملا بسته است ، لذا جریان الکتریکی در آن جاری می شود. مسیر حرکت این جریان عمود بر مسیر عبور شار و مانند گرداب در مقطع هسته می‌باشد بـه همین خاطر آن را **جریـان گردابی**[1] می‌گویند. در شـکل(۵۲) برش مقطعی از یک هسته و مسیر جریان گردابی نشان داده شده است.

بـا عبور جریـان الکتریکی از هسـته ، بدلیل وجود مقاومـت الکتریکـی آن ، هسـته ترانسـفورماتور گرم می شـود. این گرما همان توان تلف شـده بر اثر جریان گردابی است زیرا به مصرف بار الکتریکی نرسیده است.

تلفاتی را که بر اثر عبور جریانهای گردابی در هسته ایجاد می شود، تلفات فوکو می‌نامند.



شکل۵۲- نمای عبور جریان فوکو از مقطع هسته ترانسفورماتور

همانطور که در شکل (۵۲) مشاهده می‌شود با ورقه ورقه کردن هسـته و نازک کردن لایه ها و عایق کردن آن ها از یکدیگر می توان مسـیر جریانهای گردشی را طولانی تر نمود و در نتیجه مقاومت الکتریکی هسته را افزایش داد.

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

از طرفی چون ولتاژ شـبکه ثابت اسـت و هسته نیز جزو ساختمان ترانسـفورماتور محسوب می شود پس این تلفات نیز در ترانسفورماتور بدون تغییر بوده و ثابت می‌باشد.

بـه مجموع تلفـات هیسـترزیس و فوکـو ، تلفات هسـته ترانسـفورماتور اطلاق می شود و از آنجا که هر ترانسفورماتور در یک ولتاژ نامی و فرکانس نامی به کار گرفته می شود. بنابراین تلفات هسته ثابت خواهد بود. از طرفی چون جنس هسـته ترانسفورماتور از ترکیبات آهنی است، به تلفات هسـته ، **تلفات آهنی** نیز گفته می شـود. بدلیل ثابت بودن تلفات آهنی ترانسفورماتور به **مجموع تلفات آهنی** ترانسـفورماتور **تلفات ثابت** ترانسفورماتور می‌گویند.

خود را بیازمایید

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

۲) هرچه مقاومت .....هسـته بیشـتر باشد تلفات فوکو کمتر است.

۳) تلفـات فوکو در ترانسـفورماتور بـه چه عواملی بستگی دارد؟

۱۰-۲- تلفات اهمی سیم پیچ (مسی)

سیم پیچ های ترانسفورماتور معمولا از تعداد زیادی دور

۱) Eddy Current

سیم تشکیل می شوند هرچه تعداد دور این سیمها بیشتر باشد، طول موثر آن بیشتر و بنابراین مقاومت الکتریکی آن بیشتر خواهد بود بعلاوه سطح مقطع این سیمها نیز تاثیر عکس در مقدار مقاومت الکتریکی آن دارد.

وقتی ترانسفورماتور زیر بار قرار می‌گیرد ، در سیم پیچ های آن جریان جاری شـده و توانی متناسب با (RI^2) در هر یک از سـیم پیـچ های اولیه و ثانویه بـه گرما تبدیل می‌شود.

بـه مقدار انرژی الکتریکی که در سـیم پیچ اولیه و ثانویه ترانسفورماتور و بر اثر مقاومت اهمی سیم پیچها به گرما تبدیل می شـود ، تلفات اهمی سـیم پیچهای ترانسـفورماتور می‌گویند. و از آنجا که غالبا جنس سیم پیچها مسی است ، به این تلفات ، تلفات مسی نیز گفته می شود.

تلفات مسـی وابستگی شـدیدی به جریان بار دارد و از آنجا که جریان عبوری از ترانسـفورماتور در اختیار مصرف کننده است لذا می تواند تغییر کند پس تلفات مسـی جزو تلفات متغیر ترانسفورماتور به حساب می آید.

بـرای کاهش تلفات مسـی در ترانسـفورماتورها ، بارگذاری مناسـب بـر روی آن ها توصیه می شـود تا بدین ترتیب با عبور جریان مناسب تلفات مسی را بتوان کنترل نمـود . افزایش بار مخصوصا تجاوز آن از مقدار نامی باعث افزایش شدید تلفات مسی در ترانسفورماتور خواهد شد.

خود را بیازمایید

۱) هر چه تعداد دور سیم پیچ ترانسفورماتور بیشتر باشـد مقاومـت الکتریکـی آن.....و تلفات مسی آن..... است.(بیشتر-کمتر)

۲) اگر جریان بار یک ترانسـفورماتور سه برابر شود تلفات مسی آن ..... برابر می شود.

۳) مناسب ترین روش برای کاهش تلفات مسی در ترانسفورماتور چیست؟

۱۱- راندمان یا بازده ترانسفورماتور

بازده ترانسـفورماتور نیز مانند هر ماشین دیگری با رابطه(۱-۶۰) بر حسب درصد بیان می شود.

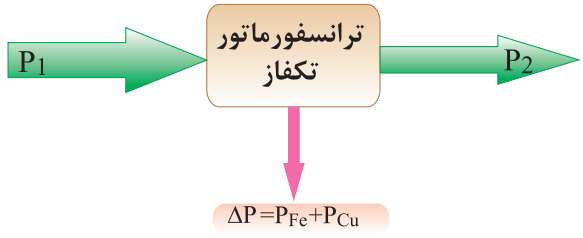
$$\%\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \qquad (1-60)$$

$\%\eta$ بازده یا راندمان بر حسب درصد

P_2 توان مصرفی (حقیقی) خروجی

P_1 توان مصرفی (حقیقی) ورودی

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



شکل ۵۳- دیاگرام توازن توان در یک ترانسفورماتور

بـا توجه به دیاگرام توازن تـوان در صورتیکه مقدار توان حقیقی P_1 مسـتقیما در دسترس نبود، بطور غیر مسـتقیم برای محاسبه مقدار راندمان می توان مطابق روابط زیر عمل کرد.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \qquad (1-61)$$

$$P_1 = P_2 + \Delta P \qquad (1-62)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \qquad (1-63)$$

$$\Delta P = P_{Fe} + P_{Cu} \qquad (1-64)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} \qquad (1-65)$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi \qquad (1-66)$$

و راحت‌تر آنکه رابطه فوق به شـکل رابطه(۶۷-۱) نوشته شود:

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos\varphi}{U_2 I_2 \cos\varphi + P_{Fe} + P_{Cu}} \qquad (۱-۶۷)$$

در رابطه(۶۷-۱)

U_2 ولتاژ نامی مصرف کننده بر حسب V

I_2 جریان نامی ثانویه بر حسب A

$\cos\varphi$ ضریب قدرت بار

P_{Fe} تلفـات آهنی ترانسـفورماتور یـا همان تلفات ثابت

P_{CU} تلفات مسـی ترانسـفورماتور یـا همان تلفات متغیر

البته چون تلفات مسـی با تغییر جریـان بار تغییر می‌کند، ابتدا باید تلفات مسـی به ازای آن مقدار عبور جریان با کمـک روابـط (۵۱-۱) ، (۵۲-۱) و (۵۳-۱) محاسبه شود.

بـه یاد داشـته باشـید کـه تـوان ظاهـری نامی ترانسـفورماتورها ، تلفـات مسـی بازای عبـور جریان نامی کـه از آزمایش اتصال کوتاه اسـتخراج گردیده و تلفات آهنی بدسـت آمده از آزمایش بی‌باری همگی از مشـخصات اصلی ترانسـفورماتور به حساب می آید که روی پلاک آنها غالبا نوشته شده است. بنابراین با توجه بـه رابطه (۵۳-۱) ، (۶۷-۱)و (۶۸-۱) می توان راندمان را از رابطه (۶۹-۱) نیز محاسبه کرد.

$$S = P_2 \cos\varphi \qquad (۱-۶۸)$$

$$\eta = \frac{AS_n \cos\varphi}{AS_n \cos\varphi + P_{Fe} + A^2 P_{Cu_n}} \qquad (۱-۶۹)$$

در رابطه(۶۹-۱):

S_n قدرت ظاهری نامی بر حسب VA

A ضریب بار

$\cos\varphi$ ضریب قدرت بار مصرفی

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

P_{CUn} تلفـات بـار داری (مسـی) خروجی آزمایش اتصال کوتاه بر حسب W

همانطور که در رابطه(۶۹-۱) دیده می شود راندمان تابعـی از ضریب بار و ضریب قدرت اسـت. زیرا مقادیر تـوان ظاهری نامی، تلفات آهنی و تلفات مسـی در بار کامل به سـاختمان ترانسـفورماتور بستگی داشته و در ترانسفورماتور قابل تغییر نیستند.

ثابت می شود راندمان ترانسفورماتور زمانی ماکزیمم است که مقدار ضریب بار مطابق رابطه (۷۰-۱) باشد.

$$A = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{Cu_n}}} \qquad (۱-۷۰)$$

اصولا در ساخت ترانسـفورماتورهایی که قرار است بـه طور دائـم زیر بار کار کنند ، سـیم پیـچ آن ها را طوری طراحی می کنند که در جریان بار کامل یا نامی تلفات آهنی و مسـی آن ها باهم برابر شوند تا راندمان ترانسـفورماتور در موقـع کار و در بـار کامل ماکزیمم باشد.

ولی همواره در بار نامی تلفات مسـی از تلفات آهنی بیشـتر می شـود و همین موضوع سـبب می‌گردد که راندمـان در بار کامل از انـدازه راندمان ماکزیمم قدری پایین تر بیاید.

بنابراین می توان نتیجه گرفت هرگاه مقدار ضریب بـار از رابطه(۷۰-۱) تبعیت کـرد و یا با بارگذاری روی ترانسفورماتور مجموع تلفات مسی و تلفات آهنی برابر

شد ،راندمان ترانسفورماتور حد اکثر خواهد شد.

یعنی اگر

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

تحقیق کنید

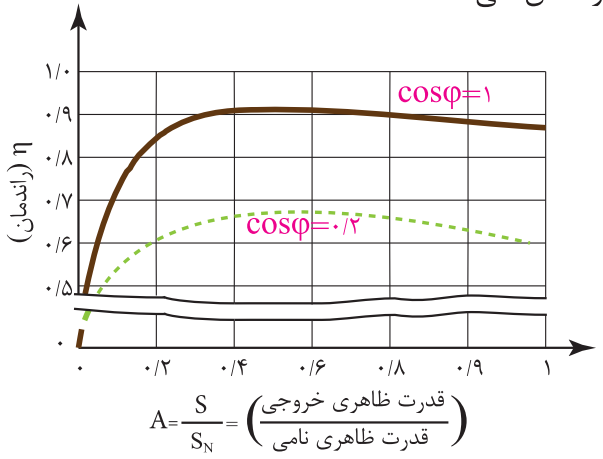
درستی عبارت زیر را ثابت کنید.

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

بنابراین اگر در انتخاب ترانسفورماتور دقت لازم به عمل آید می توان از حداکثر توان آن بهره گرفت. هرچند بارگیری ترانسفورماتور وابستگی کامل به میزان مصرف داشته و چون مصرف کننده انرژی ممکن است بطور مداوم بار خروجی ترانسفورماتور را تغییر دهد پس راندمان ترانسفورماتور هم کاملا متغیر می‌باشد و وابسته به بار تغییر خواهد کرد.

با توجه به رابطه (۶۹-۱) ،راندمان ترانسفورماتور به ضریب قدرت نیز وابسته است و از آنجا که دامنه تغییرات ضریب قدرت از صفر تا یک می‌باشد، لذا بطور جدی می تواند باعث کاهش یا افزایش راندمان ترانسفورماتور می شود. مقدار ضریب قدرت نیز به نوع بار مصرفی متصل شده به ترانسفورماتور وابسته است.

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



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

خود را بیازمایید

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

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

۳) در بار نامی یک ترانسفورماتور تلفات..... از تلفات ..... بیشتر است.(آهنی-مسی)

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

۵) یک ترانسفورماتور ۴۰KVA باتلفات مسی نامی ۱۲۰۰ وات وتلفات آهنی نامی ۸۰۰ وات، بارنامی باضریب قدرت ۰/۷ پس فاز را تغذیه می‌کند. راندمان ترانسفورماتور چقدر است؟

۶) حداکثر راندمانی را که ترانسفورماتور مسئله (۵) می تواند با همان ضریب قدرت تامین نماید را بدست آورید.

۱۲- انواع ترانسفورماتورهای تکفاز خاص

۱۲-۱- ترانسفورماتور ایزوله

در مصرف کننده‌های تکفاز اختلاف پتانسیل یا ولتاژ بین دو سیم فاز و نول وجود دارد که غالبا از طریق ترانسفورماتور توزیع سه فاز با اتصال خروجی ستاره یا زیگزاگ[1] تامین می شوند.

ماهیت سیم فاز برای ما روشن است یعنی سیمی که دارای پتانسیل نسبت به زمین می‌باشد.

ولی ماهیت سیم نول چیست؟

واقعیت این است که نقطه مرکزی اتصال ستاره یا

زیگزاگ را جهت ثبات ولتاژ خروجی به پتانسیل زمین متصل می کنند. همچنین برای تامین مسیر برگشت جریان مصرف کننده‌های تکفاز این سیم را به همراه سیمهای فاز به مصرف کننده‌های برق می‌رسانند که به آن سیم نول گفته می شود. یعنی سیم نول انشعاب گرفته از سیم زمین می‌باشد.

تحقیق کنید

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

آیا بنظر شما ساخت چنین ترانسفورماتوری منطقی است؟

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

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

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

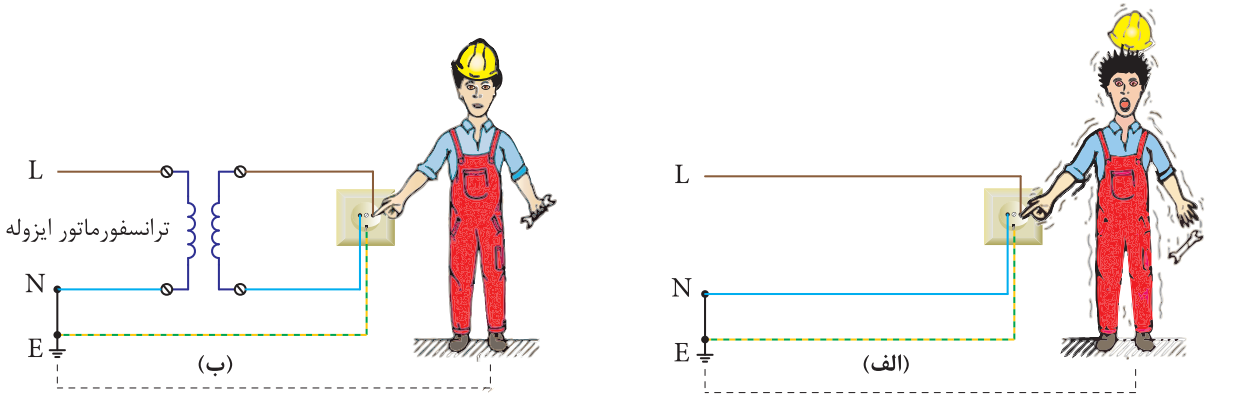
خود را بیازمایید

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

۲) اتصال شخص به ثانویه ترانسفورماتور ایزوله درچه صورتی باعث برق گرفتگی می شود؟

۱۲-۲- ترانسفورماتور جریان

جریان های 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 جریان های زیاد



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

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

امکان اندازه‌گیری جریان بصورت مستقیم وجود ندارد.

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

از همین اثر برای اندازه‌گیری غیر مستقیم جریان در شبکه های با ولتاژ و جریان زیاد استفاده می شود.

بدین ترتیب با قرار دادن یک هسته مغناطیسی پیرامون سیم حامل جریان، میدان های متغیر حاصل از آن در هسته ، تولید شار مغناطیسی کرده و اگر روی همین هسته سیم پیچ دیگری با سطح مقطع کم و تعداد دور زیاد داشته باشیم می تواند در سمت ثانویه ولتاژ 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 را ترانسفورماتور جریان یا CT [1] می‌گویند.

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

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

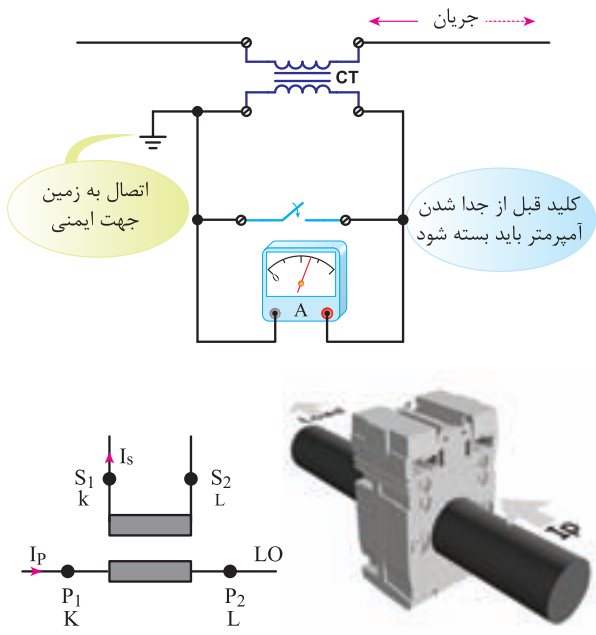
وسایل اندازه‌گیری کننده جریان همگی دارای امپدانس خیلی کم می‌باشند زیرا نباید تاثیری در مقدار جریان عبوری از مدار داشته باشند. بنابراین ثانویه ترانسفورماتورهای جریان همگی اتصال کوتاه است.

در شکل(۵۶) ، تمام جریان اولیه (شبکه) به مدار ثانویه منتقل شده است با این تفاوت که حالا مقدار آن خیلی کمتر است.

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

شکل ۵۶ – نمای ظاهری چند ترانسفورماتور جریان CT

[1] Current Transformer



شکل ۵۷- چگونگی اتصال ترانسفورماتور جریان CT در مدار

از طرفی امپدانس داخلی آمپرمتر بسیار ناچیز است پس می توان گفت مدار ثانویه CT در حالت معمول اتصال کوتاه می‌باشد به همین خاطر ترانسفورماتور جریان را برای حالت کار اتصال کوتاه در سمت ثانویه محاسبه می کنند. یعنی همواره باید شار مخالف حاصل ازنیروی 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:

- همه‌ی شار مربوط به میدان اولیه در هسته به صورت تلفات آهنی ظاهر می شود و باعث افزایش گرما در هسته می‌گردد.
- از آنجا که CT یک ترانسفورماتور افزاینده 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 گردیده و برای اپراتور نیز خطر شوک الکتریکی در پی دارد.

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

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

شکل ۵۸- نمای ظاهری یک آمپرمتر انبری

هسته این ترانسفورماتور بطور دو تکه و به شکل انبر ساخته می شود چنانکه با باز کردن دهانه انبر کابل حامل جریان در داخل هسته قرار می‌گیرد و سپس دهانه انبر بسته می شود و آمپرمتری که مدار آن از داخل متصل شده و روی انبر نصب گردیده است جریان عبوری از کابل را نشان می دهد.

۱۲-۳- ترانسفورماتور ولتاژ

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

شکل ۵۹- نمای ظاهری ترانسفورماتور ولتاژ PT

۱

PT یک نوع ترانسفورماتور کاهنده ولتاژ است و در واقع 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 بعلاوه چون اختلاف ولتاژ بین سیم پیچ اولیه و ثانویه آن غالبا زیاد است،[1] نوع عایق بندی در آن اهمیت ویژه ای دارد حتی برای اتصال ثانویه PT ها به دستگاه‌های اندازه‌گیری یا حفاظتی از سیم هایی با پوشش عایقی ضخیم باید استفاده شود.

ثانویه این ترانسفورماتورها معمولا با ولتاژهای۱۰۰v، ۱۲۰v یا ۲۲۰v ساخته می شود. اولیه و ثانویه PT ها بر خلاف 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؟

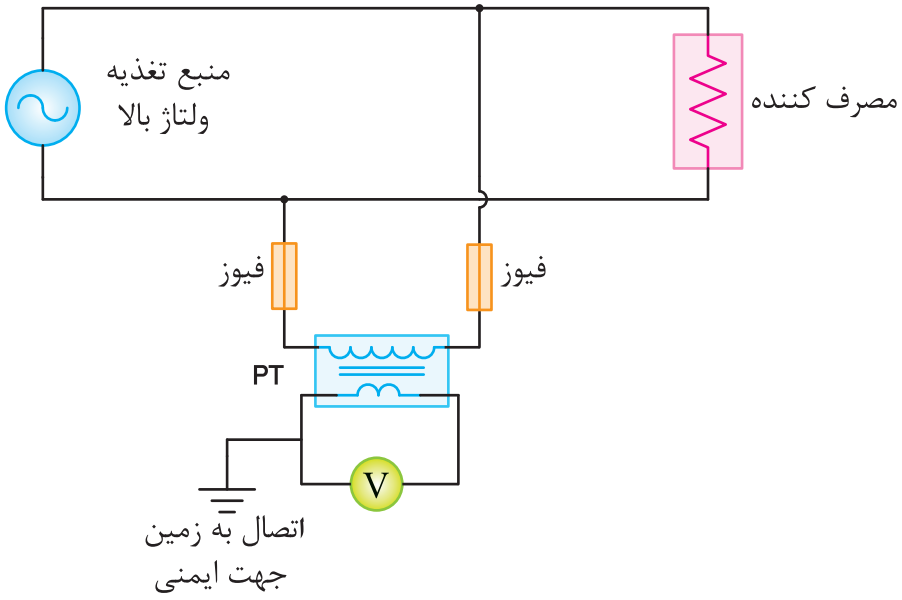
۲) ساختمان ترانسفورماتور جریان را شرح داده طریقه نصب آن را در مدار ترسیم نمایید.

۳) آیا میتوان آمپرمتر 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 جریان۱ / ۱۰۰۰ آمپر، جریان ۷۵۰ آمپر عبور می کند. چه جریانی از مدار آمپرمتر عبور می‌کند

۶)ولتاژ اندازه‌گیری شده در ثانویه یک PT ۲KV/۱۰۰V ۶۵ ولت اندازه گیری شده است، ولتاژ شبکه چقدر می باشد؟



شکل ۶۰-چگونگی اتصال ترانسفورماتور ولتاژ PT در مدار

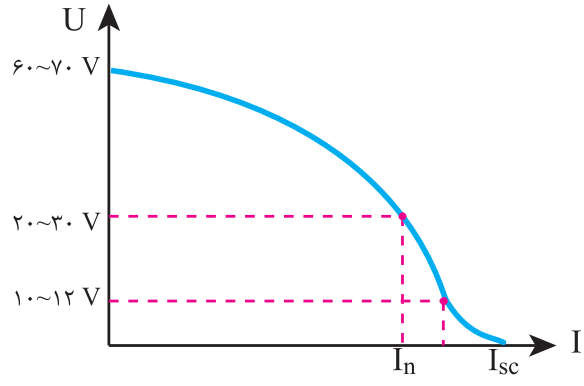
۱) ولتاژهای شبکه: ۶ KV، ۲۰ KV، ۳۳ KV، ۶۳ KV، ۱۳۲ KV، ۲۳۰KV و ۴۰۰ KV

۱۲-۴- 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

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



شکل ۶۲- مشخصه جریان و ولتاژ خروجی ترانسفورماتور جوشکاری

بنابراین این نوع ترانسفورماتور باید طوری طراحی شود که اتصال کوتاه های پی در پی باعث آسیب دیدن آن نشود لذا در این ترانسفورماتورها باید امپدانس داخلی در حد قابل توجهی بالا باشد. پس باید ولتاژ اتصال کوتاه نسبی اینگونه ترانسفورماتور ها بسیار زیاد و نزدیک به صددرصد باشد. برای بالا بردن امپدانس داخلی ترانسفورماتورها یا باید از سیم هایی با مقاومت زیاد جهت سیم پیچی استفاده کرد که اینکار با وجود جریان بالای جوشکاری باعث افزایش تلفات حرارتی در ترانسفورماتور شده و امکان پذیر نیست و راه دیگرایجاد پراکندگی بیشتر میدان است که برای ترانسفورماتور جوشکاری از این راه استفاده می شود. افزایش پراکندگی با در نظر گرفتن یک کوپلینگ ضعیف بین سیم پیچ اولیه و ثانویه محقق می‌گردد.

خود را بیازمایید

۱) 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؟

۱۲-۵- اتوترانسفورمر

۱۲-۵-۱- کلیات

همه ترانسفورماتورهایی که تا به حال بحث شد دارای دو سیم پیچ جدا از هم بودند. نوع دیگری از ترانسفورماتور وجود دارد که فقط شامل یک سیم پیچ است. این نوع ترانسفورماتور را اتوترانسفورمر می‌گویند. شکل های (۶۳-الف و ب) مدار ساده‌ای از یک اتوترانسفورمر کاهنده و افزاینده ی ولتاژ را نمایش می دهند.

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 ، بطور مستقیم از منبع تغذیه به بار منتقل می شود. 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 افزاینده ی ولتاژ می شود و بالعکس اگر سیم پیچ بخش مشترک (BC) به بار خروجی متصل شود اتوترانسفورمر نقش کاهندگی ولتاژ خروجی را خواهد داشت.

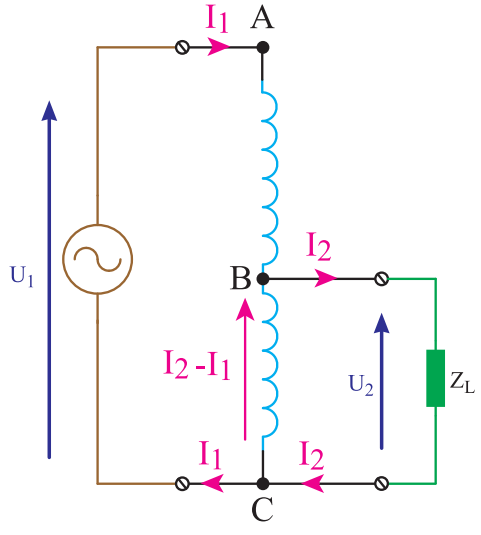
آن بخش از سیم پیچ که مطابق شکل (۶۳) بین نقاط A وB قرار گرفته است، **سیم پیچ سری** نام گذاری می‌گردد. توان الکتریکی منتقل شده از این بخش سیم پیچ به بار مصرفی را **توان تیپ** یا توان انتقالی از طریق هسته می‌نامند. مقدار توان این بخش با توجه به مدار شکل(۶۳-الف) ، مطابق رابطه (۷۱-۱) می‌باشد.

$$S_B = (U_1 - U_2) \times I_1 \qquad (۷۱-۱)$$

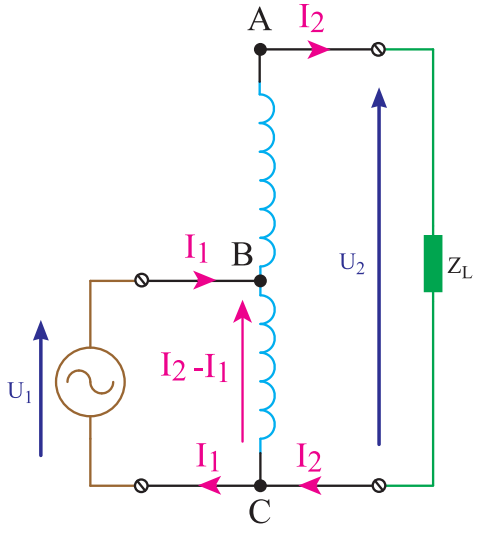
همچنین توان تیپ اتوترانسفورمر شکل(۶۳-ب) از رابطه(۷۲-۱) محاسبه می شود.

$$S_B = (U_2 - U_1) \times I_2 \qquad (۷۲-۱)$$

توان تیپ را با S_B نمایش می دهند.



الف) کاهنده



ب) افزاینده

شکل ۶۳- مدار یک اتوترانسفورمر کاهنده و افزاینده ولتاژ

تحقیق کنید

صحت رابطه‌ی ذیل را تحقیق کنید.

U_H ولتاژ طرف فشار قوی

U_L ولتاژ طرف فشار ضعیف

S توان ظاهری اتوترانسفورمر

S_B توان تیپ

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

۱۲-۵-۲-مقایسه بین ترانسفورماتور معمولی و اتوترانسفورمر

در اتوترانسفورمر جریان عبوری از سیم پیچ نیروی محرکه الکتریکی تولید کرده و در سراسر سیم پیچ ولتاژ القا می نماید. مصرف کننده انرژی (بار مصرفی) نیز سهم ولتاژ خود را طبق روابط اساسی ترانسفورماتور از منبع دریافت میکند.

نکته ۱

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

نکته ۲

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

نکته ۳

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

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

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{K} = a \qquad (۱-۷۳)$$

بیشتر بدانید

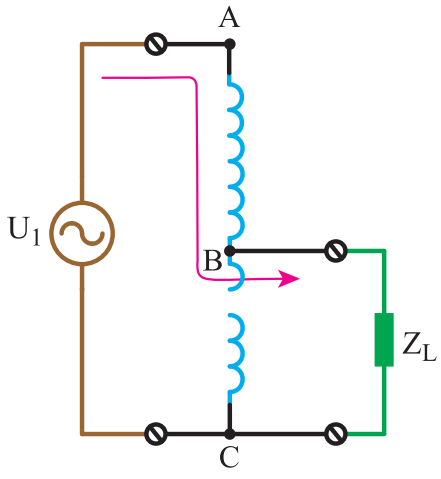
بیشتر بدانید: آیا می توانید نشان دهید چرا هر چه نسبت $\frac{\text{تعداد دور سیم‌پیچ بخش مشترک}}{\text{تعداد دور کل سیم پیچ}}$ به واحد نزدیکتر باشد صرفه جویی مصرف سیم در اتوترانسفورمر بیشتر است؟ این نسبت را ضریب صرفه ای بودن اتوترانسفورمر می‌گویند.

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

۱

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

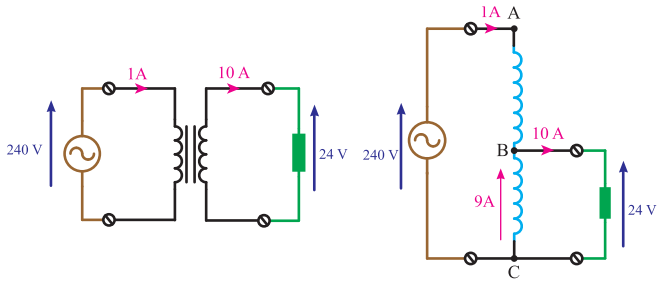
بعنوان مثال به مدار شکل (۶۴) دقت کنید. اگر قطعی یا پارگی در سیم پیچ مشترک رخ دهد ولتاژ زیاد منبع تغذیه روی بار ظاهر می شود که بسیار خطرناک خواهد بود.



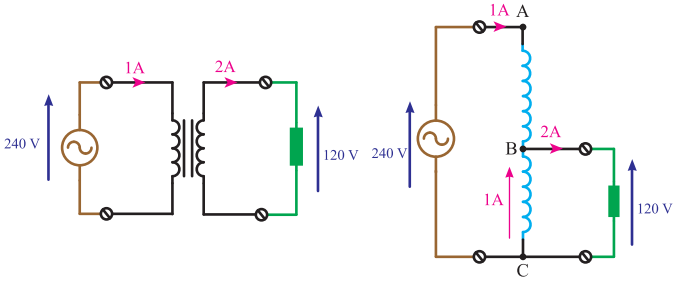
شکل ۶۴ – پارگی سیم پیچ بخش مشترک

همچنین بدلیل ارتباط الکتریکی دو طرف اتوترانسفورمر ، از این ترانسفورماتور بعنوان ترانسفورماتور ایزوله نمی توان استفاده نمود.

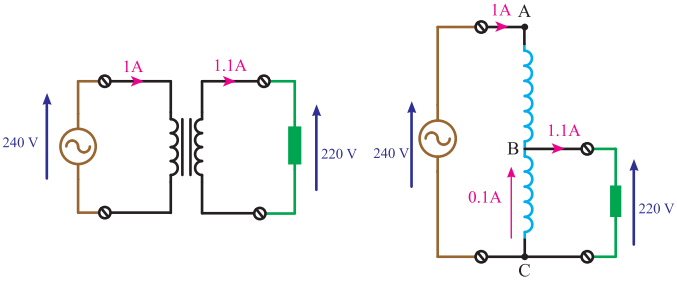
در شکل(۶۵) مقایسه صرفه ای بودن اتوترانسفورمر نسبت به ترانسفورماتور معمولی ، با تصویر مداری آنها آمده است.



الف) مقدار صرفه‌جویی در هادی مصرفی ۱۰ درصد



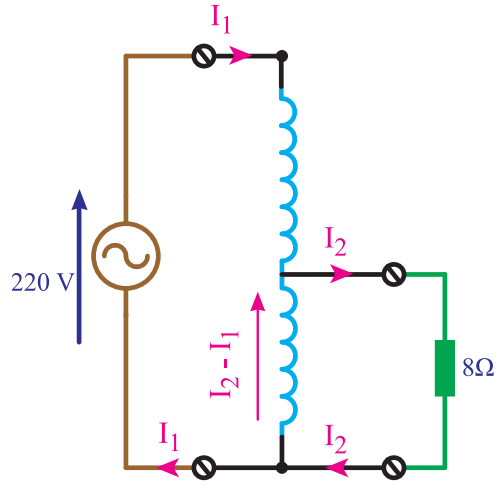
ب)مقدار صرفه‌جویی در هادی مصرفی ۵۰ درصد



ج) مقدار صرفه‌جویی در هادی مصرفی ۹۰ درصد

شکل ۶۵- مقایسه اقتصادی بودن ترانسفورمر نسبت بهترانسفورماتور معمولی

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



الف)تعداد حلقه های سیم پیچ مشترک

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

$$\frac{220}{160}=\frac{300}{N_2}\Rightarrow N_2=\frac{160\times300}{220}\approx 218$$

ب)جریان بار

$$I_2=\frac{U_2}{R_2}=\frac{160}{8}=20A$$

ج)جریان بخش سیم پیچ مشترک

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{I_2}{I_1}\Rightarrow\frac{220}{160}=\frac{20}{I_1}\Rightarrow I_1=\frac{160\times20}{220}\approx 14/5A$$

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

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

$$S_B=(U_1-U_2)\times I_1=(220-160)\times 14/5=$$
$$=870VA$$

۱۲-۵-۳- موارد کاربرد

یکی از مهمترین کاربردهای اتو ترانسفورمر استفاده از آن برای راه اندازی موتورهای سه فازه القایی است که در فصل ۳ به تفصیل تشریح خواهد شد . همچنین در شبکه های انتقال برق و برای جبران افت ولتاژ خطوط انتقال از اتو ترانسفورماتور استفاده می شود.

در آزمایشگاه های برق نیز برای ایجاد یک منبع AC با ولتاژ خروجی متغیر از اتوترانسفورمر متغیر استفاده می شود. نام تجاری این نوع اتوترانسفورمرها واریاک می‌باشد.

رفتار این نوع اتوترانسفورمر بسیار شبیه پتانسیومتر در مدار است. یعنی می توان 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 اتوترانسفورمر و پتانسیومتر وجود دارد که آنها را ازهم متمایز می سازد که موارد زیر از آن جمله می‌باشند:

- در پتانسیومتر قدرت الکتریکی تنها از راه هدایت الکتریکی به بار انتقال می یابد در صورتی که در اتوترانسفورمر علاوه بر انتقال قدرت از طریق هدایت الکتریکی بخش دیگر از طریق کوپلینگ مغناطیسی و نیروی محرکه الکتریکی تولیدی در سیم پیچ منتقل می شود.
- در اتوترانسفورمر قدرت گرفته شده از شبکه باعث تولید نیروی محرکه الکتریکی و ولتاژ القایی در سیم پیچ می شود در صورتیکه در پتانسیومتر این انرژی به گرما تبدیل می‌گردد.

- با اتوترانسفورمر می توان ولتاژی بالاتر از ولتاژ منبع تولید کرد در صورتیکه پتانسیومتر حداکثر می تواند ولتاژ اعمال شده به ورودی را به خروجی تحویل دهد.
- در پتانسیومتر جریان ورودی همواره بیش از جریان خروجی است در حالی که در اتو ترانسفورمر کاهنده مقدار جریان سمت خروجی از ورودی بیشتر است.
- پتانسیومتر هم در جریان مستقیم و هم در جریان متناوب عمل می‌کند ولی اتو ترانسفورمر فقط در جریان متناوب قابل استفاده است.

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

شکل۶۶- نمای ظاهری و شماتیک اتوترانسفورمر متغیر (واریاک)

پرسشهای پایان فصل(۱)

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

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

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

۴) ویژگی های یک ترانسفورماتور ایده آل 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 می شود؟

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

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 ترانسفور ماتور 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 ، $U_2=U_1$ گردد؟(کدام نوع بار؟)

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

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

۱۶) تفاوتهای عمده اتو ترانسفورماتور و پتانسیومتر را بنویسید.

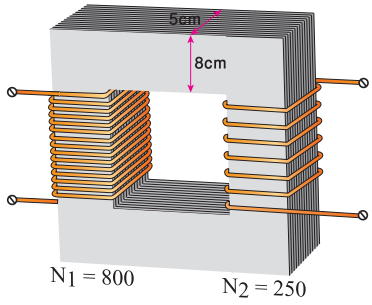
۱۷) دو عیب مهم اتوترانسفورماتور را نسبت به ترانسفورماتور معمولی،بنویسید.

۱۸) کاربرد های اتوترانسفورماتور را بیان کنید.

مسائل پایان فصل(۱)

۱) نیـروی محرکه مغناطیسـی بوبینی با ۵۰۰ دور سـیم پیچ که از آن جریـان ۲ آمپر عبور می‌کند چقدر است؟

۲) ترانسـفورماتوری طبق شکل زیر در شبکه HZ ۵۰ دارای هسـته ای با چگالی شار T ۱/۲۵ می‌باشد. ولتاژ القایی در سیم پیچ اولیه وثانویه را بدست آورید.

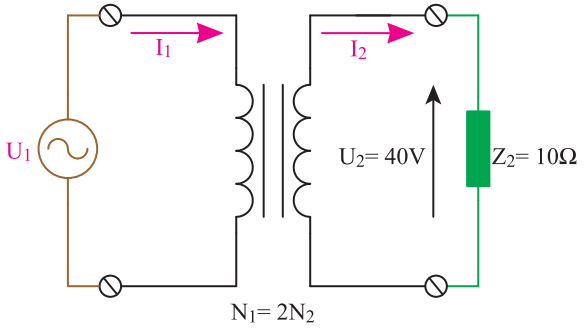


۳) یک ترانسـفورماتور با ضریب تبدیل a= ۸ دارای ۲۰۰۰ دور سیم پیچ در اولیه می‌باشد. تعداد دور ثانویه چقدر است؟

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

۵) نسـبت تبدیـل و عکـس نسـبت تبدیـل یک ترانسفورماتور ی که دارای ۱۰۰۰ دور سیم پیچ اولیه و ۲۰۰ دور سیم پیچ ثانویه می‌باشد را محاسبه کنید.

۶) ترانسـفورماتور ایده آل مطابق شکل زیر موجود است:



الف)ولتاژ U_1

ب)جریان I_1

ج)امپدانس انتقالی به اولیه

۷) نتایج بدست آمده از آزمایش بی‌باری و اتصال کوتاه مطابق ذیل می‌باشـد:

در آزمایش بی‌باری مقادیر وات متر= ۸۰w

ولت متر= ۴۰ V

آمپرمتر = ۲۰A

و در آزمایش اتصال کوتاه مقادیر وات متر= ۸۰ W

ولت متر=۴۰۰ V

آمپرمتر= ۲ A مطلوب است:

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

ب) مـدار معـادل و مقادیـر المان‌هـای مـوازی ترانسفورماتور

ج) مدار معادل و مقادیر المانهای سـری به شرطی که $R_1 = R_2$ ، $X_1 = 3X_2$

د) مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با ذکر مقادیر

ه) مـدار معادل ترانسـفورماتور با احتسـاب تقریب اول،دوم و سوم

۸) در یـک ترانسـفورماتور واقعـی۱۰۰۰V/۱۰۰V ، مقاومـت معادل تلفات هسـتهΩ۲K و راکتانس میدان اصلی Ω ۱۰۰۰ می‌باشـد.جریان بی‌باری و تلفات هسته را با احتساب تقریب اول بدست آورید.

۹)یک ترانسـفورماتور در بار نامـی دارای افت ولتاژ اهمـی ۲۵ ولت و افت ولتاژ القایی ۴۰ولت و ولتاژ نامی ۲۰۰ولت می‌باشـد. ولتاژ دو سر بار را از دیدگاه اول در حالات خواسته شده بدست آورید:

الف)بار اهمی خالص

ب) بار پیش فاز با ضریب قدرت ۰/۸

پ) بار سلفی خالص

۱۰) جریـــان اتصال کوتاه دائم یک ترانســـفورماتور بـــا جریان نامی ۵ آمپر و ولتاژ اتصال کوتاه نســـبی ۲۵ درصد را بدست آورید.

۱۱) تلفات مســـی یک ترانســـفورماتور با توان نامی ۱۰ KVA برابر با ۸۰۰ وات است. تلفات مسی آن را در ۰/۷۵ بار نامی بدست آورید.

۱۲) یک ترانسفورماتور۵KVA در آزمایش بی‌باری ۲۵۰ وات و و در آزمایش اتصال کوتاه ۴۰۰ وات ،توان از شـــبکه دریافت می‌کندراندمان 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 ۸ KVA در آزمایش بی‌باری ۳۰۰ وات و در آزمایـــش اتصال کوتاه ۵۰۰ وات توان از شبکه دریافت می‌کند. بدست آورید:

الف)ضریـــب بار و ضریب قدرتـــی که در آن راندمان ماکزیمم می شود

ب) راندمان ماکزیمم

۱۴) ورودی یک اتوترانســـفورمر به ولتـــاژ ۴۰۰ ولت و خروجی آن با ولتاژ ۷۵۰ ولت به باری با امپدانس۷۵ Ω وصل اســـت 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) اتوترانســـفورماتوری کـــه ۴۰۰ دور ســـیم‌پیچ مشترک آن به شـــبکه ۴۰۰ ولتی متصل است ، جریان ۵ آمپر را به بـــار الکتریکی تحت ولتاژ۸۰ ولت می‌دهد. جریان سیم پیچ مشترک و توان تیپ راحساب کنید.