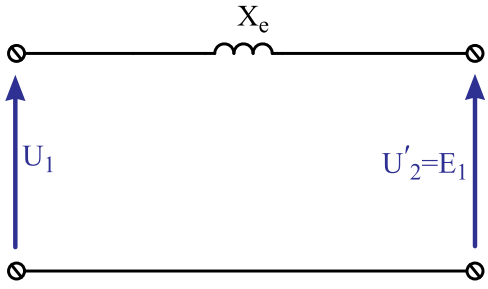
$R_e << X_e$ می‌باشد. این موضوع بدلیل سطح مقطع بالای سیم پیچهای ترانسفورماتور است. در این حالت می توان از مقدار مقاومت اهمی "R_e" در مقابل راکتانس "X_e" صرفنظر کرد. لذا مدار معادل ترانسفورماتورهای قدرت در ترانسفورماتورهای پر قدرت به شکل (۳۰) در می آید.



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.

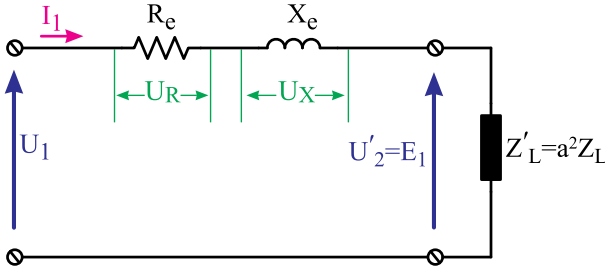
تحقیق کنید

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:

$$\overline{U_1} = \overline{U_R} + \overline{U_X} + \overline{U'_2} \qquad (1-26)$$

رابطه (۱-۲۶) نشـان می دهد با جمع برداری سه بردار U_x ،U_R و U'_2، بردار U_1 بدست می آید.

$$\overline{U_1} = \overline{R_e I_1} + \overline{X_e I_1} + \overline{U'_2} \qquad (1-27)$$

$$U_R = R_e I_1 \qquad (1-28)$$

$$U_x = X_e I_1 \qquad (1-29)$$

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:

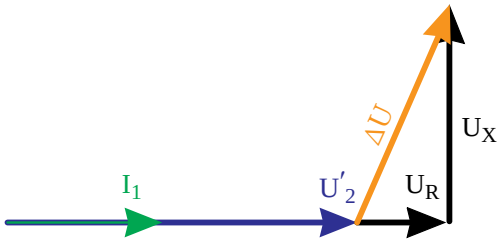
برای ترسـیم این بردارها ابتدا بـردار ولتاژ E_1 را که حالا معادل ولتاژ ترمینال خروجی از دیدگاه اولیه (U'_2) نیز هسـت به عنوان مبنا در جهت صفر مثلثاتی ترسیم می‌کنیـم آنگاه با توجه به مقدار و نوع بار مصرفی بردار جریان I_1 را با زاویه مناسـب نسبت به بردار ولتاژ E_1 یا U'_2 می کشیم. در بار اهمی خالص این ولتاژ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

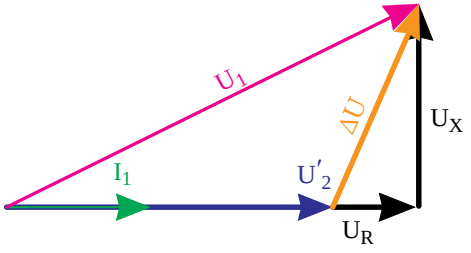
شکل۳۳- ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری ترانسفورماتور با بار اهمی خالص (مرحله ۲)

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)



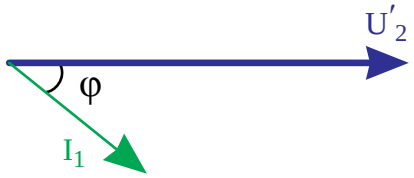
شکل ۳۴- ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری ترانسفورماتور با بار اهمی خالص (مرحله ۳)

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 ابتـدا 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 مناسـب 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.

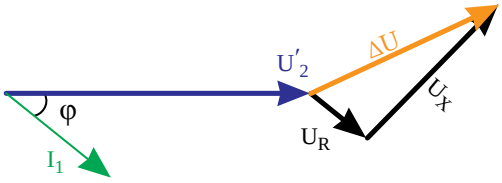


شکل۳۶- ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری ترانسفورماتور با بار اهمی - سلفی (مرحله ۱)

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.

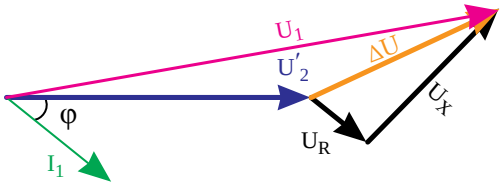
شکل۳۷- ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری ترانسفورماتور با بار اهمی - سلفی (مرحله ۲)

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)



شکل۳۸- 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.

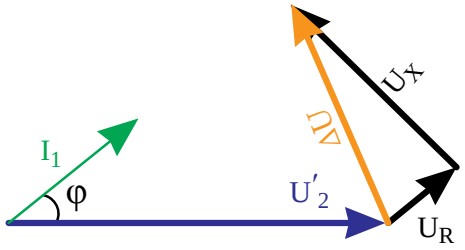
شکل ۴۰- ترسیم دیاگرام برداری حالت بارداری ترانسفورماتور با بار اهمی - خازنی (مرحله ۱)

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)

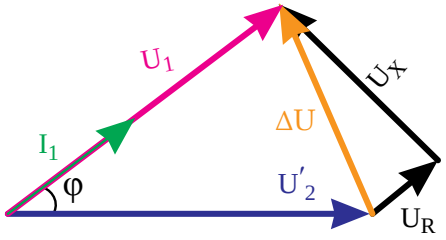
سپس بردار U_X را نیز که معادل افت ولتاژ پراکندگی است و همواره ۹۰° جلوتر از جریان I_1 می‌باشد در ادامه

بردار U_R رسم می‌کنیم. شکل (۴۲)



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

حـالا ابتدای بردار U'_2 را به انتهای بردار U_X مطابق شـکل (۴۳) وصل می‌کنیم. این بـردار، بردار U_1 ولتاژ ورودی است.



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

دیاگـرام برداری هریـک از بارهـای اهمی خالص، اهمی– سـلفی و اهمی–خازنی همگی در شکل (۴۴) نشـان 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.

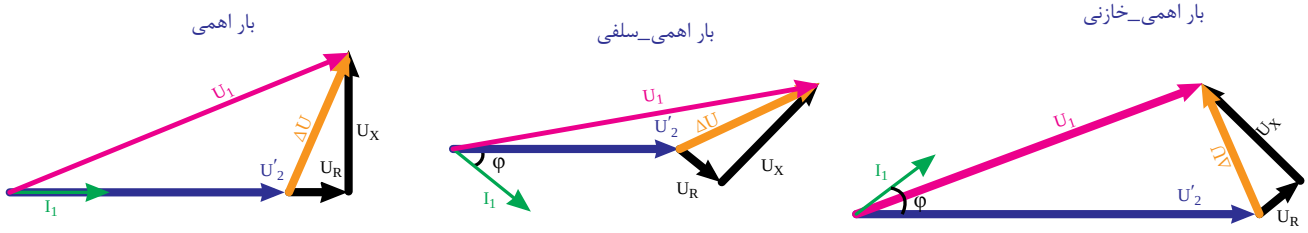
از دیاگـرام هـای شـکل (۴۴) نتایـج زیـر حاصل می شود:

نکته ۱

در بـار اهمی-خازنی بردار U'_2 از U_1 بزرگتر شـده امـا در بار اهمی خالـص اندازه بـردار U'_2 کمی از U_1کوچکتـر و در بـار اهمی- سـلفی این اختلاف بیشـتر شده اسـت. با احتسـاب نوع بار به نظر می رسد در بار سـلفی خالص U'_2 به کوچکترین اندازه خود نسـبت به U_1 و در بـار خازنی خالص U'_2 به بزرگترین مقدار خود نسبت به U_1 برسد. به عنوان تمرین این حالتها را ترسیم کنید.

به همین خاطـر 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.

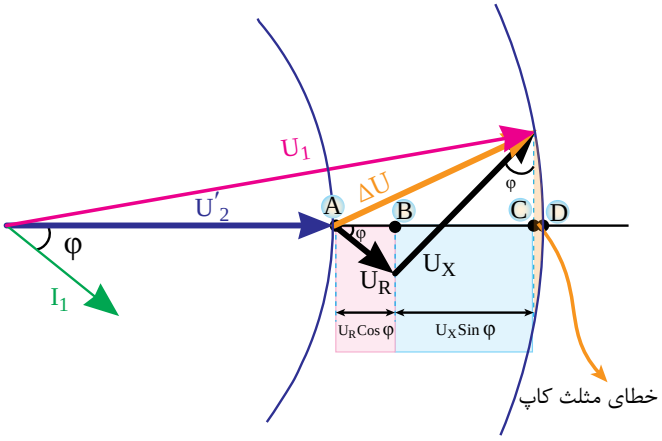


شکل ۴۴ - دیاگرام برداری حالت بارداری در بارهای اهمی خالص، اهمی- سلفی و اهمی- خازنی

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'_2 و دیگری به همان مرکز ولی به شعاع U_1 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[1] ، 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.

$$E_1 = U'_2 = U_1 - \Delta U \qquad (۱-۳۴)$$

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؟

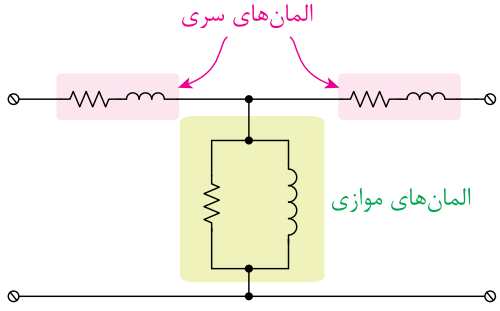
۳) بیشترین افت ولتاژ در کدام نوع بار اتفاق می‌افتد؟

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.



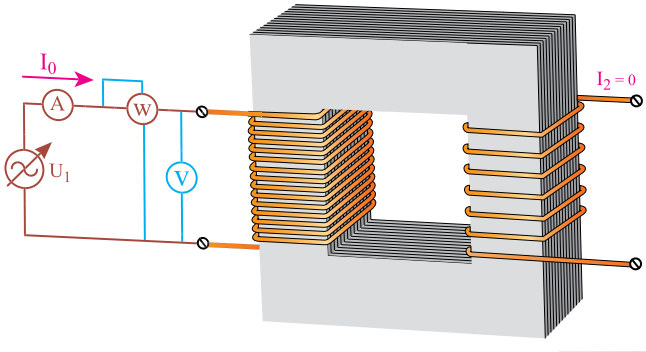
شکل ۴۶- نمایش المانهای سری و موازی بر روی مدار معادل واقعی ترانسفورماتور

۷-۱- آزمایش حالت بی‌باری

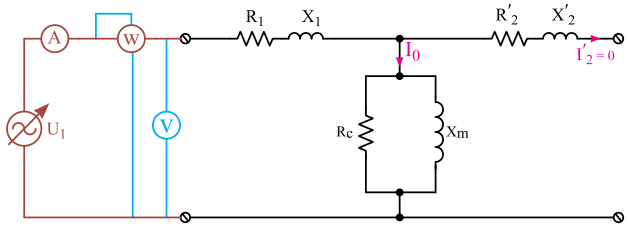
هدف از انجام این آزمایـش تعیین مقادیر المانهای مربـوط به شـاخه موازی مدار معـادل یعنی (R_c , X_m) می‌باشـد. ابتدا مداری مطابق آنچه در شکل (۴۷-الف) نشان داده شـده است را فراهم کرده و ترانسفورماتور را در حالتی که سـیم پیچ ثانویه آن باز اسـت به ولتاژ نامی شـبکه متصل کرده و مدار را مـورد آزمایش قرار می‌دهیم.

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 $P_0 \approx P_{Fe}$

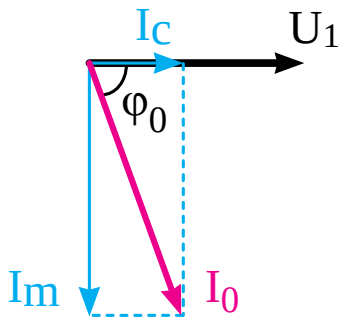


(الف)



(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

۱

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 مقاومتهـای 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.

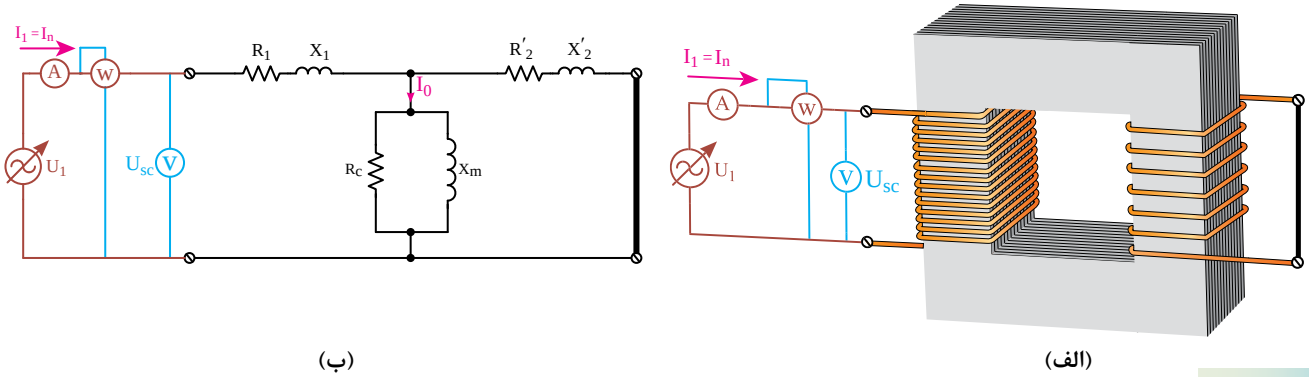
$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} \quad (۱-۴۷)$$

$$R_e = R_1 + R'_2 \quad (۱-۴۸)$$

$$X_e = X_1 + X'_2 \quad (۱-۴۹)$$

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 (۱-۵۴) 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.

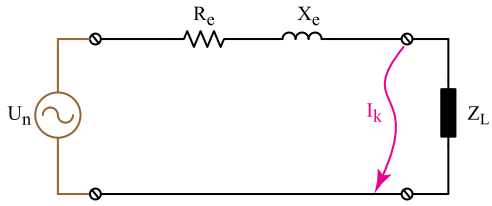
۲) ترانسفورماتوری که ولتاژ اتصال کوتاه آن کم است، در زیر بار دارای افت ولتاژ ..... می‌باشد.

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:

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

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

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.

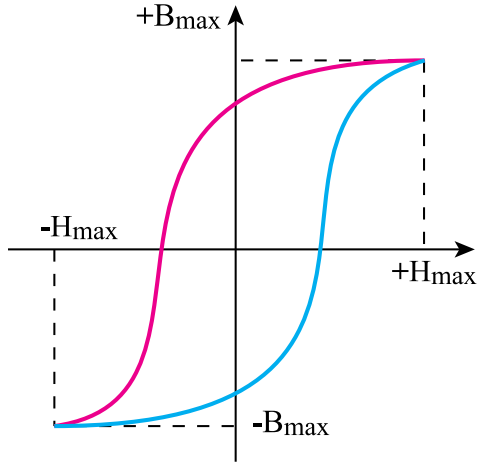
سیم پیچ می‌باشد.

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

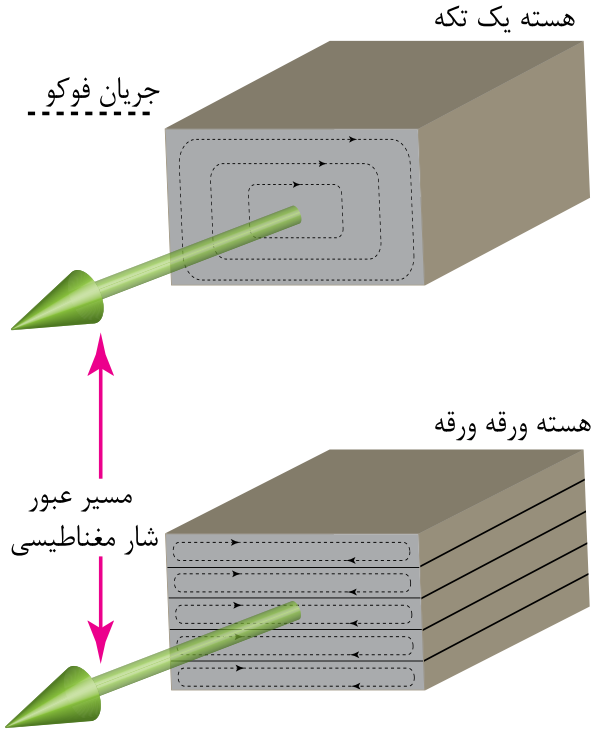
با عبور شار مغناطیسی در هسته ی ترانسفورماتور نیز

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

ولتاژ القا می شـــود. 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 بـــه همین خاطر آن را **جریـــان گردابی**[1] می‌گویند. در شـــکل(۵۲) برش مقطعی از یک هسته و مسیر جریان گردابی نشان داده شده است.

بـــا عبور جریـــان الکتریکی از هســـته ، بدلیل وجود مقاومـــت الکتریکـــی آن ، هســـته ترانســـفورماتور گرم می شـــود. این گرما همان توان تلف شـــده 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 هســـته و نازک کردن لایه ها و عایق کردن آن ها از یکدیگر می توان مســـیر جریانهای گردشی را طولانی تر نمود و در نتیجه مقاومت الکتریکی هسته را افزایش داد.

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

از طرفی چون ولتاژ شـــبکه ثابت اســـت و هسته نیز جزو ساختمان ترانســـفورماتور محسوب می شود پس این تلفات نیز در ترانسفورماتور بدون تغییر بوده و ثابت می‌باشد.

بـــه مجموع تلفـــات هیســـترزیس و فوکـــو ، تلفات هســـته ترانســـفورماتور 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 هســـته ترانسفورماتور از ترکیبات آهنی است، به تلفات هســـته ، **تلفات آهنی** نیز گفته می شـــود. بدلیل ثابت بودن تلفات آهنی ترانسفورماتور به **مجموع تلفات آهنی** ترانســـفورماتور **تلفات ثابت** ترانسفورماتور می‌گویند.

خود را بیازمایید

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

۲) هرچه مقاومت .....هســـته بیشـــتر باشد تلفات فوکو کمتر است.

۳) تلفـــات فوکو در ترانســـفورماتور بـــه چه عواملی بستگی دارد؟

۱۰-۲- تلفات اهمی سیم پیچ (مسی)

سیم پیچ های ترانسفورماتور معمولا از تعداد زیادی دور

۱) Eddy Current