فصل اول

سیم‌پیچی ترانسفورماتورها

۱ـ۱. مقدمه

ترانسفورماتورها یکی از مفیدترین تجهیزات الکتریکی هستند که تا کنون اختراع شده‌اند به کمک ترانسفورماتورها می‌توان سطوح ولتاژ و جریان را افزایش و یا کاهش داد. به عنوان مثال در سطح انتقال و به منظور کاهش افت ولتاژ و تلفات انتقال، به کمک ترانسفورماتور سطح ولتاژ را افزایش و سطح جریان را کاهش می‌دهند و در سطح توزیع، جهت استفاده‌ی مصرف‌کننده‌ها از انرژی الکتریکی، به کمک ترانسفورماتور دیگری سطح ولتاژ را کاهش و سطح جریان را افزایش می‌دهند.

معمولاً بر اساس افزایش یا کاهش ولتاژ، ترانسفورماتورها به دو دستهٔ افزاینده و کاهنده تقسیم می‌شوند. در ترانسفورماتور کاهنده تعداد دور سیم‌پیچ اولیه از ثانویه بیشتر است و در ترانسفورماتور افزاینده تعداد دور سیم پیچ ثانویه از اولیه بیشتر است. برای ایزوله نمودن مدارات مختلف از یکدیگر و یا ایزوله نمودن بخش‌هایی از یک مدار نسبت به هم نیز می‌توان از ترانسفورماتورها بهره گرفت.

به عنوان مثال جهت جلوگیری از ارتباط مستقیم ژنراتورهای قدرت با خطوط انتقال و حوادث پیش آمده در آنها، معمولاً ژنراتورهای قدرت را از طریق ترانسفورماتور به خطوط انتقال متصل می‌نمایند. زیرا در ترانسفورماتور معمولاً سیم‌بندی‌های اولیه و ثانویه ارتباط الکتریکی با یکدیگر ندارند.

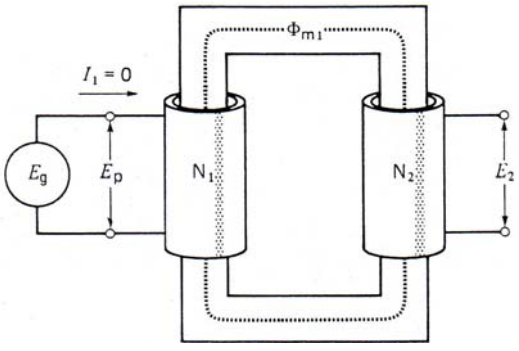
همچنین به کمک ترانسفورماتورها می‌توان مقادیر امپدانس‌های ظاهری (خازن‌ها، سلف‌ها یا مقاومت‌ها) را افزایش یا کاهش داد.

هر ترانسفورماتور تک‌فاز معمولاً از دو سیم‌پیچ تشکیل می‌شود که بر روی هسته‌ای پیچیده می‌شوند . سیم‌پیچی که به شبکه یا منبع وصل می‌شود، سیم‌پیچ اولیه و سیم‌پیچی که به مصرف کننده (بار) وصل می‌شود سیم‌پیچ ثانویه نامیده می‌شود. در ترانسفورماتورهای بزرگ معمولاً این مجموعه در محفظه‌ای پر از روغن قرار می‌گیرد، این روغن وظیفه‌ی خنک کنندگی سیم‌پیچ‌ها را به عهده دارد همچنین این روغن به عنوان یک عایق عمل می‌کند و بر قدرت عایقی سیم‌پیچ‌ها نسبت به هم و نسبت به بدنه نیز می‌افزاید.

۲ـ۱. ترانسفورماتور ایده‌آل

در ترانسفورماتور ایده‌آل از مقاومتهای اهمی و القایی سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه صرف‌نظر می‌شود. همچنین در این ترانسفورماتور فرض بر این است که کوپلینگ مغناطیسی بین سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه کامل است به عبارت دیگر تمام شار تولید شده در سیم پیچ اولیه، سیم پیچ ثانویه رادربرمی‌گیرد و هیچگونه شار پراکندگی نیز وجود ندارد.

در ترانسفورماتور ایده‌آل، هسته بدون مقاومت مغناطیسی در نظر گرفته می‌شود به طوری که با جریان بسیار ناچیزی شار بزرگی در ترانسفورماتور تولید می‌گردد. با توجه به اینکه هیچ‌گونه افت ولتاژی در سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه وجود ندارد، ولتاژ دوسر سیم‌پیچ و ولتاژ ترمینال مربوط به آن برابر خواهند بود.



شکل ۱ـ ۱ ترانسفورماتور ایده‌آل

در ترانسفورماتورها نسبت ولتاژ اولیه به ولتاژ ثانویه که با تعداد دورهای سیم‌پیچی‌ها نسبت مستقیم دارد، **نسبت تبدیل** نامیده شده و با حرف a نشان می‌دهند. همچنین نسبت جریانها نسبت عکس با نسبت دورهای سیم‌پیچی دارد:

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

نکته۱: اگر امپدانسی با مقدار Z_L به ثانویه متصل باشد می‌توان این امپدانس را به اولیه منتقل کرده، و ترانسفورماتور را حذف نمود. در هنگام انتقال، این امپدانس ، مقدار جدیدی پیدا خواهد کرد که از رابطه‌ی مقابل قابل محاسبه است:

$$Z'_L = (\frac{N_1}{N_2})^2 Z_L = a^2 Z_L$$

چنانچه این امپدانس در اولیه باشد و بخواهیم آن را به ثانویه منتقل نماییم مقدار آن به صورت مقابل به دست می‌آید:

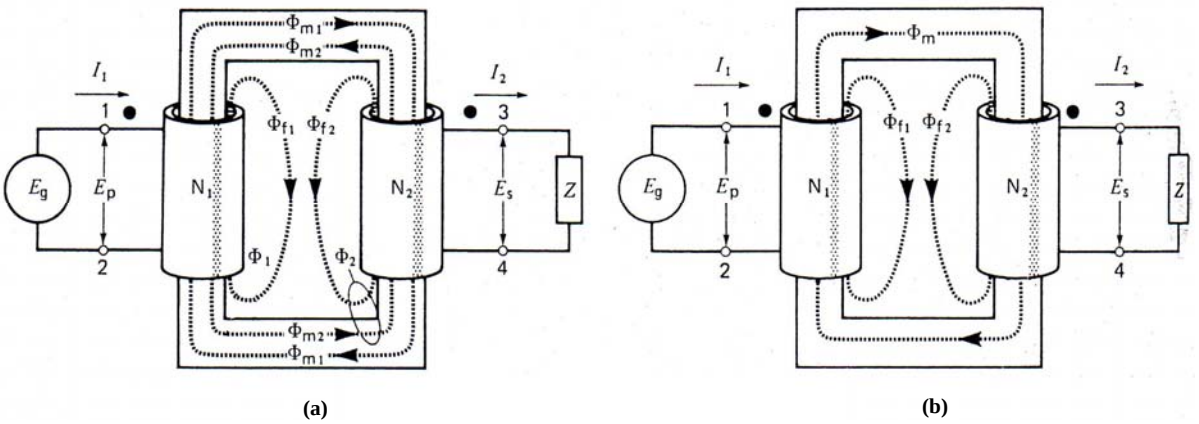
$$Z''_L = (\frac{N_2}{N_1})^2 Z_L = \frac{1}{a^2} Z_L$$

۳ـ۱. ترانسفورماتور واقعی

در یک ترانسفورماتور واقعی مقاومتهای مربوط به سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه (R_2, R_1) در نظر گرفته می‌شوند. همچنین در این ترانسفورماتور کوپلینگ، کامل نیست و تمام شار از هسته عبور نمی‌کند بلکه مقداری به عنوان شار پراکندگی در اولیه و ثانویه وجود خواهد داشت . به دلیل نوسان شار پراکندگی و برخورد آن به سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه، ولتاژهایی در این دو سیم‌پیچ القا خواهد شد که اثر این ولتاژهای پراکندگی، بروز افت در ولتاژهای اصلی ترانسفورماتور می‌باشد.

نکته۲ : اثر شار پراکندگی در یک ترانسفورماتور (همانند اثر مقاومت‌های R_1 و R_2) ایجاد افت ولتاژ می‌باشد. این اثر را در مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با راکتانس‌هایی در اولیه و ثانویه نشان می‌دهند (X_{ℓ_1} و X_{ℓ_2} یا X_{f_1} و X_{f_2}).

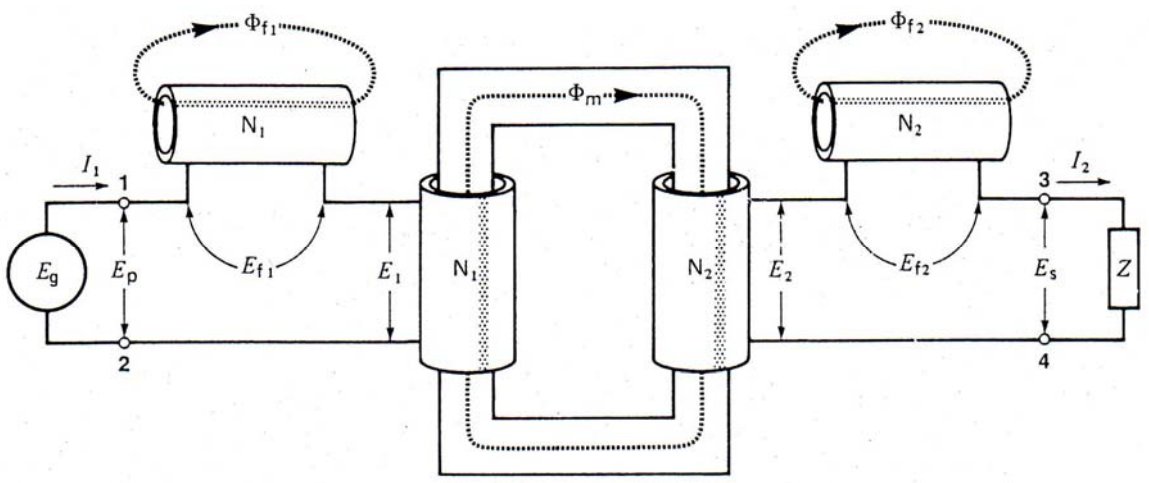
چنانچه ثانویه ترانسفورماتور به بار وصل شود علاوه بر شار سیم‌پیچ اولیه، شار دیگری ناشی از جریان ثانویه تولید می‌شود. شار تولید شده در سیم‌پیچ ثانویه نیز به دو بخش تقسیم می‌شود، بخشی از هوا و بخشی از هسته مسیر خود را می‌بندد. شار وارد شده به هسته بنابر قانون لنز با شار اولیه مخالف است. منتجه این دو شار، شار اصلی هسته را می‌سازند.



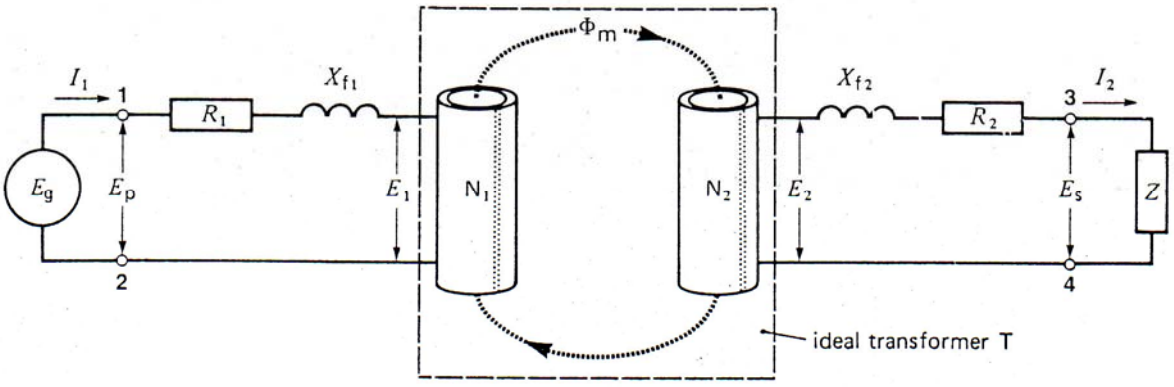
شکل ۲ ـ ۱ (a)تولید شارهای مختلف در سیم‌پیچ اولیه و سیم‌پیچ ثانویه یک ترانسفورماتور واقعی (شار هسته + شار پراکندگی)
(b) منتجه شار هسته مربوط به اولیه و ثانویه در یک ترانسفورماتور واقعی

در ترانسفورماتور ایده‌آل، هسته بدون تلفات در نظر گرفته می‌شود، اما در واقعیت چنین نیست. در هسته‌ی آهنی ترانسفورماتور معمولاً تلفات فوکو وهیسترزیس تولید می‌شود که این تلفات باعث گرم شدن هسته ترانسفورماتور خواهد شد. در مدار معادل واقعی ترانسفورماتور، هسته با مداری متشکل از یک مقاومت R_m و یک راکتانس X_m که به طور موازی به هم وصل می‌شوند، در اولیه مدل می‌شود. توان تلف شده در R_m نشان دهنده‌ی تلفات هسته بوده و X_m راکتانس خالصی است که تنها وظیفه‌ی تولید شار را در ترانسفورماتور برعهده خواهد داشت.

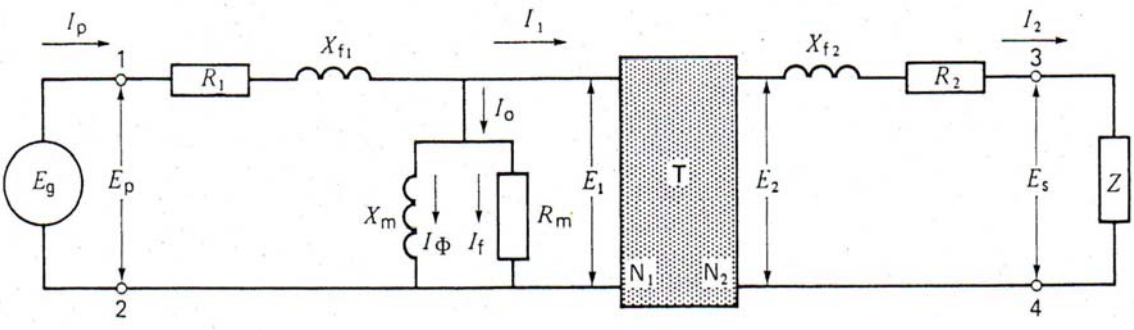
شکل ۳ـ ۱ اثر شار پراکندگی را در یک ترانسفورماتور نشان می‌دهد و در شکل ۴ـ۱ مدار معادل یک ترانسفورماتور واقعی در حالتی که پارامترهای سیم‌بندی اولیه و ثانویه آن مدل شده‌اند نشان داده شده است.



شکل ۳ـ ۱ تولید ولتاژهای القایی در اولیه و ثانویه ناشی از شار پراکندگی که باعث افت ولتاژ در ترانسفورماتور می‌شوند.



شکل ۴ـ ۱ مدار معادل یک ترانسفورماتور واقعی



شکل۵ـ ۱ مدار معادل کامل یک ترانسفورماتور واقعی که در آن بخش ایده‌آل با مستطیل تیره نشان داده شده است.

مثال۱: با ایجاد فاصله‌ی هوایی در هسته یک ترانسفورماتور، کدام یک از کمیت‌های آن افزایش می‌یابد؟

۱) تلفات مسی ۲) تلفات آهنی ۳) افت ولتاژ ۴) شار هسته

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» با افزایش فاصله‌ی هوایی، مقاومت مغناطیسی ترانسفورماتور و به همان نسبت، تلفات آهنی بیشتر می‌شود.

مثال۲: استفاده از هسته‌های فریتی در ترانسفورماتور به خاطر کاهش تلفات ..... است.

۱) فوکو و هستریزیس ۲) هیسترزیس ۳) فوکو ۴) مسی و فوکو

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» هسته‌های فریتی باعث کاهش تلفات فوکو می‌گردند.

مثال۳: کدام یک از موارد زیر در رابطه با کاهش جریان هجومی در ترانسفورماتور، صادق است؟

۱) ورقه‌های هسته را از آهن بدون پسماند می‌سازند.
۲) ورقه‌های هسته دارای قابلیت هدایت الکتریکی کم هستند.
۳) ورقه‌های هسته دارای قابلیت هدایت مغناطیسی زیادی می‌باشند.
۴) همه موارد

☑ **پاسخ:** گزینه «۴»

۴ـ۱. رابطه‌ی ولتاژ القایی در یک ترانسفورماتور

در یک ترانسفورماتور، مقدار مؤثر ولتاژ القایی مانند دیگر تجهیزات جریان متناوب از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$\left.\begin{aligned} E &= N\frac{d\varphi}{dt} \\ \varphi &= \varphi_m \sin\omega t \end{aligned}\right\} \Rightarrow E = N\varphi_m \omega \cos\omega t \Rightarrow \begin{cases} \text{ولتاژ ماکزیمم } E_m = N\varphi_m 2\pi f \\ \text{ولتاژ مؤثر } E_{rms} = \dfrac{E_m}{\sqrt{2}} = 4/44\ Nf\varphi_m \end{cases}$$

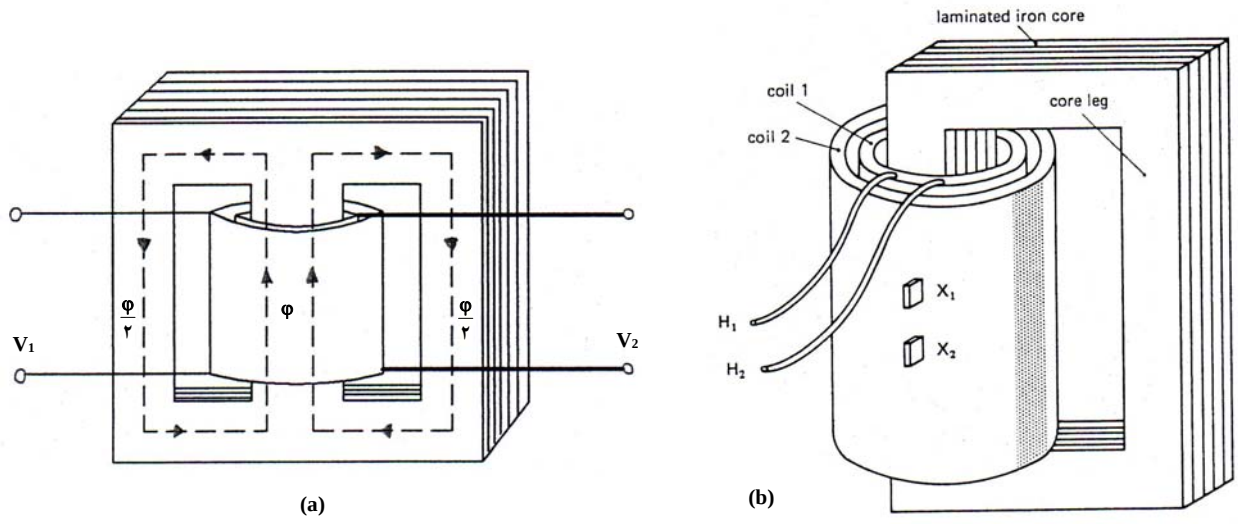
در صورتی که از افت ولتاژ در ترانسفورماتور صرف نظر شود می‌توانیم مقدار شار را با توجه به رابطه‌ی E_{rms} به صورت زیر به دست آوریم:

$$\varphi_m = \frac{E_{rms} \simeq V}{4/44\,Nf}$$

نکته۳ : با توجه به رابطه‌ی $\varphi_m = \dfrac{V}{4/44\,Nf}$ مقدار شار در هسته‌ی یک ترانسفورماتور به بار بستگی نداشته و تنها به ولتاژ و فرکانس بستگی دارد و از آنجا که ولتاژ و فرکانس در یک ترانسفورماتور دارای مقادیر ثابتی می‌باشند، در نتیجه شار هسته نیز تقریباً ثابت است.

نکته۴ : مقدار ولتاژ القایی در سیم‌پیچ ثانویه یک ترانسفورماتور علاوه بر میزان شار و مقدار فرکانس به شکل هسته و به وضعیت قرار گرفتن سیم‌پیچ‌ها نسبت به هم نیز بستگی دارد.

در یک ترانسفورماتور تک‌فاز معمولاً سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه را یا مانند شکل ۱ـ۱ بر دو بازوی هسته می‌پیچند و یا اینکه مانند شکل ۶ ـ ۱ هر دو سیم‌پیچ را بر روی یک ستون می‌پیچند. در این حالت باید ابتدا سیم پیچ فشار ضعیف به دور هسته پیچیده شود و سپس با قرار دادن عایق مناسب بر روی آن، سیم‌پیچ فشار قوی بر روی آن پیچیده شود.



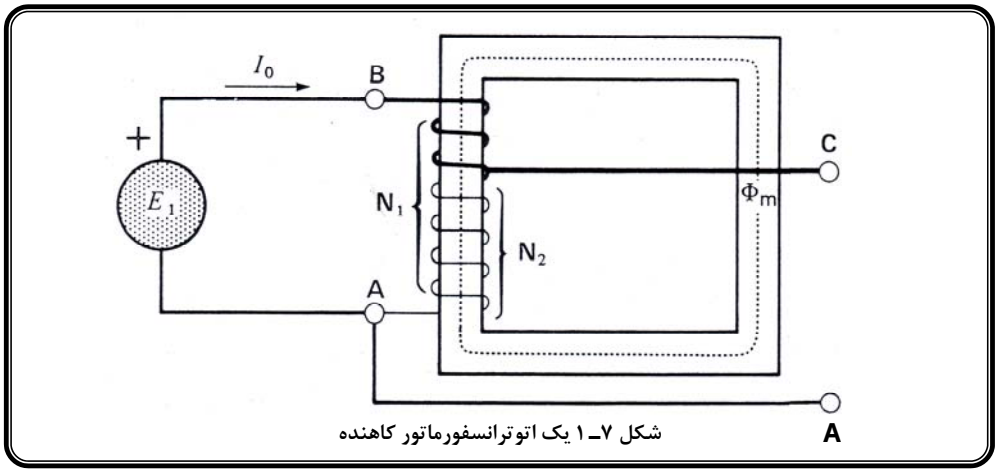
شکل ۶ـ۱ نحوه‌ی قرار گرفتن سیم‌پیچ‌های فشار ضعیف و فشار قوی بر روی هسته

برای کاهش تلفات فوکو معمولاً هسته ترانسفورماتور را به صورت مورق می‌سازند. به این ترتیب که ابتدا سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه را بر روی قرقره‌ای می‌پیچند و سپس ورقه‌های تشکیل دهنده‌ی هسته را یکی پس از دیگری در داخل قرقره جا می‌زنند.

نکته۵ : در صورتی که ماکزیمم ولتاژ بین طبقات سیم‌بندی (ولتاژ بین دو حلقه) بیشتر از ۲۵ ولت باشد باید بین طبقات عایق قرار داد.

۵ـ۱. اتوترانسفورماتور

اتوترانسفورماتور، ترانسفورماتوری است که بین سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه آن علاوه بر ارتباط مغناطیسی، ارتباط الکتریکی نیز وجود دارد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که در اتوترانسفورماتور تنها از یک سیم‌پیچ استفاده می‌شود. همانند ترانسفورماتور معمولی دو سیم‌پیچه اتوترانسفورماتور را نیز می‌توان به دو دسته‌ی افزاینده و کاهنده تقسیم کرد. در شکل ۷ ـ ۱ یک اتوترانسفورماتور کاهنده که در آن سیم‌پیچ ثانویه، انشعابی از سیم‌پیچ اولیه است نشان داده شده است.



شکل ۷ـ ۱ یک اتوترانسفورماتور کاهنده

روابط ولتاژ و جریان حاکم بر اتوترانسفورماتور همانند ترانسفورماتور معمولی است.

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{N_2}{N_1}=\frac{1}{a} \qquad a=\frac{V_1}{V_2}=\frac{N_1}{N_2}$$

*** مزایای استفاده از اتوترانسفورماتورها عبارتند از :**

۱) از آنجا که توان انتقال یافته به وسیله‌ی هسته در اتوترانسفورماتور از ترانسفورماتور معمولی کمتر است، ابعاد هسته کوچکتر شده، وزن هسته نیز کاهش می‌یابد. همچنین به دلیل آن که در اتوترانسفورماتور تنها از یک سیم‌پیچ استفاده می‌شود، وزن مس مصرفی نیز کاهش می‌یابد و این امر خود به کاهش هزینه می‌انجامد.

۲) به دلیل کاهش وزن هسته‌ی آهنی و وزن مس مصرفی، تلفات آهنی و مسی در اتوترانسفورماتور نیز کاهش می‌یابد. با کاهش تلفات، بازده افزایش می‌یابد.

۳) قدرت در اتوترانسفورماتور از ترانسفورماتور معمولی بیشتر است، بالا بودن قدرت به دلیل وجود ارتباط الکتریکی بین اولیه و ثانویه است که باعث می‌شود، قدرتی اضافی از این طریق نیز انتقال یابد.

*** معایب اتوترانسفورماتورها نسبت به ترانسفورماتورهای معمولی دو سیم‌پیچه:**

۱) به دلیل وجود ارتباط الکتریکی بین اولیه و ثانویه، اتفاقاتی که در هر طرف اتوترانسفورماتور رخ می‌دهند، قابل انتقال به طرف دیگر می‌باشند.

۲) اتوترانسفورماتور تا نسبت تبدیل کوچکتر از ۲ مزایای خود را به خوبی نشان می‌دهد زیرا در یک اتوترانسفورماتور کاهنده ، میزان صرفه‌جویی در مصرف مس از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

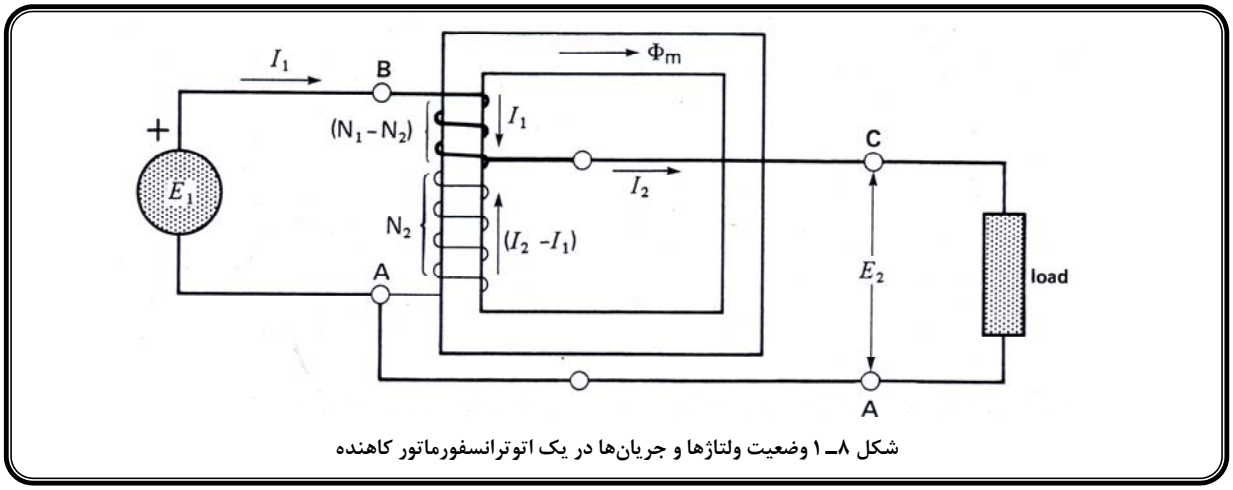
$$\frac{\text{وزن مس مصرفی در اتوترانسفورماتور}}{\text{وزن مس مصرفی در ترانسفورماتور دو سیم‌پیچه}}=1-\frac{N_2}{N_1}$$

هرچه نسبت تبدیل به یک نزدیکتر باشد، میزان صرفه‌جویی در مصرف مس نیز بیشتر خواهد بود.

*** در یک اتوترانسفورماتور، سه نوع توان یا قدرت وجود دارد:**

۱) توان ظاهری خروجی که با توان ظاهری ورودی نیز برابر بوده و با S_D یا P_D نشان داده می‌شود: $S_D = P_D = V_2I_2 = V_1I_1$

در شکل زیر، $S_D = P_D = E_2I_2 = E_1I_1$ می‌باشد.



شکل ۸ـ ۱ وضعیت ولتاژها و جریان‌ها در یک اتوترانسفورماتور کاهنده

۲) توان انتقال یافته به وسیله‌ی هسته‌ی اتوترانسفورماتور که به توان القایی، توان تیپ یا توان ساختمانی معروف است و با S_B و یا P_B نشان داده شده، از روابط زیر به دست می‌آید:

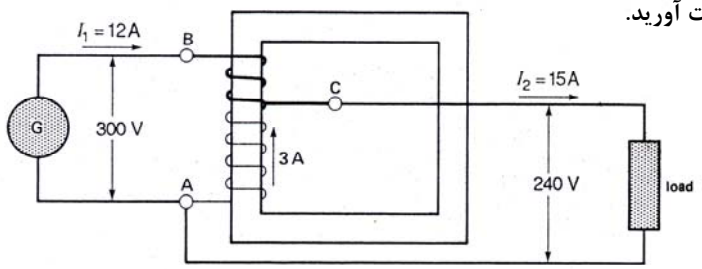
$$P_B = S_B = S_D \frac{V_H - V_L}{V_H} = V_۲(I_۲ - I_۱)$$

در رابطه‌ی فوق V_H، ولتاژ بخش فشار قوی یا ولتاژ بالا و V_L، ولتاژ بخش فشار ضعیف یا ولتاژ پایین اتوترانسفورماتور می‌باشد.

۳) توانی که از طریق ارتباط الکتریکی بین اولیه و ثانویه منتقل می‌شود به توان هدایتی معروف است و با S_C یا P_C نشان داده می‌شود:

$$P_C = S_C = S_D - S_B$$

مثال۴: در شکل زیر یک اتوترانسفورماتور ۳۰۰/۲۴۰ ولت و ۳۶۰۰ VA نشان داده شده است جریان‌های اولیه و ثانویه، توان تیپ و توان هدایتی را در این اتوترانسفورماتور به دست آورید.



☑ **پاسخ :**

$$S_D = ۳۶۰۰ \text{ VA}$$

$$\left.\begin{aligned} I_۱ &= \frac{S_D}{V_۱} = \frac{۳۶۰۰}{۳۰۰} = ۱۲\text{A} \\ I_۲ &= \frac{S_D}{V_۲} = \frac{۳۶۰۰}{۲۴۰} = ۱۵\text{ A} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \text{جریان سیم‌پیچ مشترک} = I_۲ - I_۱ = ۱۵ - ۱۲ = ۳\text{A}$$

$$P_B = S_B = ۳۶۰۰ \times \frac{۳۰۰ - ۲۴۰}{۳۰۰} = ۷۲۰\text{ VA} \quad \text{یا اینکه} \quad P_B = S_B = V_۲(I_۲ - I_۱) = ۲۴۰ \times ۳ = ۷۲۰\text{VA}$$

$$S_C = S_D - S_B = ۳۶۰۰ - ۷۲۰ = ۲۸۸۰\text{VA}$$

همان گونه که ملاحظه می‌شود توانی که از طریق ارتباط الکتریکی بین اولیه و ثانویه انتقال می‌یابد بسیار بزرگتر از توانی است که از طریق هسته منتقل می‌شود.

مثال۵: در کدام یک از ضریب تبدیل‌های داده شده، استفاده از اتوترانسفورماتور را پیشنهاد می‌کنید؟

۱) $۲۲۰/۲۴^{V}$ ۲) $۶۳/۲۰^{KV}$ ۳) $۳۸۰/۱۲^{V}$ ۴) $۲۳۰/۱۳۲^{KV}$

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» چون ضریب تبدیل در این گزینه به یک نزدیک‌تر است. (در اتوترانس‌ها، ضریب تبدیل $(\frac{V_۱}{V_۲})$ باید به عدد یک نزدیک باشد).

مثال۶: در یک اتوترانسفورماتور $۲۲۰/۱۱۰^{V}$، در مقایسه با یک ترانسفورماتور $۲۲۰/۱۱۰^{V}$:

۱) وزن سیم‌پیچ‌ها نصف است. ۲) وزن سیم‌پیچ‌ها ۲ برابر است. ۳) وزن سیم‌پیچ‌ها مساوی است. ۴) وزن ترانسفورماتور کم‌تر است.

☑ **پاسخ:** گزینه «۱»

$$\text{وزن سیم‌پیچ ترانس معمولی} \times \frac{۱}{۲} = \text{وزن سیم‌پیچ ترانس معمولی} \times (۱ - \frac{۱}{a}) = \text{وزن سیم‌پیچ اتوترانس} \qquad a = \frac{V_۱}{V_۲} = \frac{۲۲۰}{۱۱۰} = ۲$$

مثال۷: توان انتقال یافته به وسیله‌ی هسته اتوترانس برابر است با:

۱) $S_B = S_D \frac{V_H - V_L}{V_H}$ ۲) $S_B = S_D \frac{V_L - V_H}{V_L}$ ۳) $S_B = V_۲(I_۲ - I_۱)$ ۴) موارد ۱و۳

☑ **پاسخ:** گزینه «۱»

مثال۸: تعداد دور قسمت سری در اتوترانسفورماتور افزاینده از کدام رابطه بدست می‌آید؟

۱) $N_S = N_۱ - N_۲$ ۲) $N_S = N_۲ - N_۱$ ۳) $N_S = N_۲ + N_۱$ ۴) $N_S = N_۲$

☑ **پاسخ:** گزینه «۲»

مثال۹: برای یک اتوترانسفورماتور با توان تیپ ۵KVA با مینیمم و ماکزیمم تغییرات ولتاژ ۱۰۰ ولت و ۱۸۰ ولت، توان کل چقدر می‌باشد؟

۱) ۱۰KVA ۲) ۱۰/۵KVA ۳) ۱۲/۸۵KVA ۴) ۱۲KVA

☑ **پاسخ:** گزینه «۳»

$$P_B = P_D \times \frac{V_H - V_L}{V_H} \Rightarrow ۵ = P_D \times \frac{۱۸۰ - ۱۱۰}{۱۸۰} \Rightarrow P_D = \frac{۵ \times ۱۸۰}{۱۸۰ - ۱۱۰} = ۱۲/۸۵\text{KVA}$$

۶ـ۱. محاسبه و طراحی عملی ترانسفورماتورها

برای ساخت و پیچیدن یک ترانسفورماتور معمولاً نیاز به اطلاعات زیر می‌باشد که این اطلاعات با انجام محاسباتی، به دست می‌آیند:

۱) سطح مقطع هسته‌ی ترانسفورماتور
۲) تعداد دور سیم‌پیچهای اولیه و ثانویه ترانسفورماتور
۳) قطر سیمهای لاکی برای سیم‌پیچهای اولیه و ثانویه ترانسفورماتور
۴) شماره‌ی استاندارد ورقه‌های تشکیل‌دهنده‌ی هسته‌ی ترانسفورماتور
۵) ابعاد و اندازه‌های قرقره‌ی ترانسفورماتور

کمیت‌های فوق، معمولاً به کمک مشخصات اصلی ترانسفورماتور، محاسبه می‌شوند. مشخصات اصلی و معلوم یک ترانسفورماتور عبارتند از:

۱) ولتاژ منبع یا شبکه‌ی تغذیه کننده‌ی ترانسفورماتور که به ولتاژ اولیه معروف است. (V_1)
۲) ولتاژ مصرف کننده که ولتاژ ثانویه‌ی ترانسفورماتور می‌باشد. (V_2)
۳) قدرت ظاهری خروجی ترانسفورماتور (P_2)

با معلوم بودن قدرت ظاهری خروجی، جریان خروجی یا جریان ثانویه ترانسفورماتور نیز معلوم خواهد بود: $I_2 = \frac{P_2}{V_2}$

۱ـ۶ـ۱. محاسبه سطح مقطع واقعی و ظاهری ترانسفورماتور

از آنجا که قدرت در یک ترانسفورماتور معمولاً از طریق هسته از اولیه به ثانویه منتقل می‌شود، لذا میزان قدرت عبوری از هسته عامل اصلی تعیین سطح مقطع هسته می‌باشد. برای محاسبه‌ی سطح مقطع هسته‌ی ترانسفورماتور می‌توان از رابطه‌ی مقابل استفاده نمود: $S = K\sqrt{P_1}$

در رابطهٔ فوق S سطح مقطع خالص هسته بر حسب cm^2 ، P_1 قدرت ظاهری اولیه‌ی ترانسفورماتور بر حسب VA و K ضریبی است که به جنس هسته و نقطه کار ترانسفورماتور بستگی داشته و مقدار آن بین ۰/۸ تا ۱/۲ می‌باشد. برای ترانسفورماتورهای کوچک و کم قدرت مقدار K برابر با ۰/۹ یا ۱ و برای ترانسفورماتورهای معمولی برابر با ۱/۲ انتخاب می‌شود: $S = ۱/۲\sqrt{P_1}$

در ترانسفورماتورهای واقعی به دلیل وجود تلفات آهنی و مسی قدرت ورودی در اولیه از قدرت خروجی در ثانویه بیشتر است. به عبارت دیگر راندمان در ترانسفورماتورهای واقعی از ۱۰۰٪ کمتر است. به این دلیل بهتر است برای محاسبه‌ی سطح مقطع هسته، از قدرت ورودی به ترانسفورماتور استفاده شود.

چنانچه بازده و قدرت خروجی در یک ترانسفورماتور مشخص باشد، توان ورودی از رابطه‌ی مقابل به دست خواهد آمد: $P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{V_2 I_2}{\eta}$

مقدار بازده از قدرت ۱۲۵VA تا ۳۵۰۰ VA، بین ۰/۹ تا ۰/۹۵ و برای قدرت‌های کمتر از ۱۲۵ VA تا ۲۰ VA بازده بین ۰/۷۵ تا ۰/۸ خواهد بود. می‌توان از روی جدول ۶ـ۱ این فصل که در آن مشخصات ترانسفورماتورهای از ۲۵VA تا ۳۵۰۰ VA بیان شده است، مقدار بازده را به طور تقریبی به دست آورد.

از آنجا که هسته‌ی ترانسفورماتور از ورقه‌های نازک آهنی تشکیل می‌شود(ورق دینامو‌بلش) و بر روی این ورقه‌ها، لایهٔ عایقی از اکسید فسفات یا سیلیکات قرار می‌گیرد، سطح مقطع ظاهری هسته از مقدار واقعی آن کمی بیشتر خواهد شد. به عبارت دیگر برای جا زدن ورقه‌های ترانسفورماتور، باید قرقره‌ای که سیم‌پیچها بر روی آن پیچیده می‌شوند، دارای سطح مقطعی برابر با سطح مقطع ظاهری ترانسفورماتور باشد. سطح مقطع ظاهری هسته از رابطه زیر به دست می‌آید: $S' = \frac{S}{K_{Fe}}$

مقدار K_{Fe} می‌تواند از ۰/۸۵ تا ۰/۹۳ تغییر کند. معمولاً در محاسبات مقدار K_{Fe} ، برابر با ۰/۹ انتخاب می‌شود.

مثال۱۰: سطح مقطع آهن هسته ترانسفورماتور تک فاز با ولتاژ ثانویه ۱۸ ولت، جریان ثانویه ۵ آمپر و راندمان ۹۰% چند سانتی‌متر مربع است؟

۱) ۲۱ ۲) ۱۶ ۳) ۱۴ ۴) ۱۲

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» $P_2 = V_2 I_2 = ۱۸ \times ۵ = ۹۰\,VA \quad P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{۹۰}{۰/۹} = ۱۰۰VA \Rightarrow S = ۱/۲\sqrt{P_1} \Rightarrow S = ۱/۲\sqrt{۱۰۰} = ۱۲cm^2$

مثال۱۱: سطح مقطع ظاهری هسته‌ی ترانسفورماتور به توان ۳۶ ولت آمپر چند سانتی‌مترمربع است؟

۱) ۸ ۲) ۷/۲ ۳) ۶/۴۸ ۴) ۱۲

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» سطح مقطع واقعی ورقه‌های یک ترانسفورماتور از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S = ۱/۲\sqrt{P} = ۱/۲\sqrt{۳۶} = ۱/۲ \times ۶ = ۷/۲cm^2 \Rightarrow S' = \frac{S}{K_{Fe}} = \frac{۷/۲}{۰/۹} = ۸cm^2$$

مثال ۱۲: ورق‌های هسته ترانسفورماتورها از جنس آهن بدون پس ماند با آلیاژ ..... درصدی که دارای قابلیت هدایت الکتریکی ..... است ساخته می‌شوند.

۱) ۳ ـ زیاد ۲) ۳ ـ کم ۳) ۴/۵ ـ زیاد ۴) ۴/۵ ـ کم

☑ **پاسخ:** گزینه «۴»

مثال ۱۳: ترانسفورماتور تکفاز ۲۲۰V/۱۲V با ۳ آمپر در خروجی مورد نیاز است. اگر ضریب بهره آن ۹۰٪ باشد، سطح مقطع واقعی هسته آهنی آن چند سانتی‌متر مربع است؟

۱) ۶ ۲) ۶/۶ ۳) ۷/۲ ۴) ۷/۶

☑ **پاسخ:** گزینه «۴»

$$P_۲ = V_۲I_۲ = ۱۲\times ۳ = ۳۶VA \Rightarrow P_۱ = \frac{P_۲}{\eta} = \frac{۳۶}{۰/۹} = ۴۰VA$$

$$S = ۱/۲\sqrt{P_۱} = ۱/۲\sqrt{۴۰} \simeq ۷/۶cm^۲$$

مثال ۱۴: سطح مقطع خالص هسته آهن یک ترانسفورماتور $\frac{۲۰۰}{۱۰۰}$ ولت برابر $۲۴cm^۲$ می‌باشد جریان ثانویه این ترانسفورماتور چند آمپر است؟

۱) ۲ ۲) ۱ ۳) ۴ ۴) ۸

☑ **پاسخ:** گزینه «۳»

$$S = ۱/۲\sqrt{P_۱} \Rightarrow P_۱ = (\frac{۲۴}{۱/۲})^۲ = ۴۰۰VA = P_۲ \Rightarrow I_۲ = \frac{P_۲}{V_۲} = \frac{۴۰۰}{۱۰۰} = ۴A$$

مثال ۱۵: در ترانسفورماتورهایی که دارای چند خروجی هستند و ممکن است همه ولتاژهای ثانویه به طور هم‌زمان استفاده نشوند توان خروجی آنها را می‌بایست ..... بدست آورد.

۱) با جمع همه توان‌های ثانویه ۲) از ضرب همه توان‌های ثانویه ۳) از بین بزرگترین تفاضل توان‌ها ۴) براساس بیشترین توان خروجی‌ها

☑ **پاسخ:** گزینه «۴»

مثال ۱۶: سطح مقطع واقعی هسته ترانسفورماتور تک‌فاز ۲۲۰ به ۱۳۵ ولت با جریان نامی یک آمپر و راندمان ۸۰٪ چند سانتی‌متر مربع است؟

۱) ۱۱/۷ ۲) ۱۳/۹ ۳) ۱۵/۶ ۴) ۱۷/۳

☑ **پاسخ:** گزینه «۳»

$$P_۲ = V_۲I_۲ = ۱۳۵\times ۱ = ۱۳۵W \Rightarrow P_۱ = \frac{P_۲}{\eta} = \frac{۱۳۵}{۰/۸} = ۱۶۸/۷W \Rightarrow S_{fe} = ۱/۲\sqrt{P_۱} = ۱/۲\sqrt{۱۶۸/۷} \simeq ۱۵/۶cm^۲$$

مثال ۱۷: در محاسبات ترانسفورماتورهای معمولی مقدار ضریب K_{Fe} چند انتخاب می‌شود؟

۱) ۰/۹ ۲) ۰/۸۵ ۳) ۰/۹۳ ۴) ۱/۲

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» در حالت کلی ضریب تورق (K_{fe}) بین ۰/۸۵ تا ۰/۹۵ می‌باشد که در ترانس‌های فرکانس معمولی ۰/۹ انتخاب می‌شود.

۲ـ۶ـ۱. محاسبهٔ تعداد دور سیم‌بندی اولیه و ثانویه ترانسفورماتور

برای محاسبه تعداد دورهای سیم‌بندی در اولیه و ثانویه ، ابتدا باید تعداد دورهای لازم برای تولید یک ولت نیروی محرکه را به دست آورد و پس از آن با توجه به ولتاژ کل سیم‌بندی در اولیه و ثانویه ، تعداد کل دورهای سیم‌بندی در اولیه و ثانویه را محاسبه نمود.

چنانچه در رابطهٔ $V = ۴/۴۴\ Nf\ B_mS$ ، ۱ V را جایگزین V کنیم و f را برابر ۵۰Hz و B_m را برای ورقه‌های معمولی ترانسفورماتور برابر با ۱/۲T در نظر بگیریم ، مقدار دور در هر ولت برابر خواهد بود با:

$$n = \frac{۱}{۴/۴۴\times ۵۰\times ۱/۲\times S\times ۱۰^{-۴}} = \frac{۳۷/۵}{S}$$

در رابطهٔ فوق S بر حسب $cm^۲$ خواهد بود.

چنانچه از افت ولتاژ ایجاد شده توسط مقاومت‌های اهمی و شار پراکندگی در سیم پیچهای اولیه و ثانویه صرف‌نظر شود، می‌توان تعداد کل دورهای سیم پیچهای اولیه و ثانویه را از روابط مقابل به دست آورد: $N_۱ = nV_۱$ ، $N_۲ = nV_۲$

اما همان‌گونه که پیش از این نیز بیان شد به دلیل وجود افت ولتاژ ناشی از مقاومت‌های اهمی و شار پراکندگی، ولتاژ دوسر سیم‌پیچ اولیه از ولتاژ منبع متصل به آن کمتر $(E_۱ < V_۱)$ و ولتاژ دو سر سیم‌پیچ ثانویه از ولتاژ ترمینال‌های خروجی ثانویه بیشتر خواهد بود. $(E_۲ > V_۲)$

افت ولتاژ در ترانسفورماتور تابعی از قدرت ترانسفورماتور می‌باشد و مقدار آن بر حسب درصد در جدول ۱ـ۱ آمده است.

با توجه به درصد افت ولتاژ در ترانسفورماتور، تعداد کل دورهای سیم‌پیچهای اولیه و ثانویه از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$N_۱ = n(V_۱ - V_۱ \times \%\Delta V_۱) = nV_۱(۱ - \%\Delta V_۱)$$

$$N_۲ = n(V_۲ + V_۲ \times \%\Delta V_۲) = nV_۲(۱ + \%\Delta V_۲)$$

قدرت خروجی $P_۲$ بر حسب ولت آمپر	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۷۵۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰
درصد افت ولتاژ $\Delta U\%$	۰ ۲	۱۷	۱۵	۱۲	۱۰	۹	۸	۷/۵	۷	۶/۵	۶	۵	۴	۳	۲	۱/۵

جدول ۱ـ۱ درصد افت ولتاژ ترانسفورماتور بر اساس قدرت خروجی

مثال۱۸: تعداد دور سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور ۱۰ولت با احتساب ۱۰% افت ولتاژ کل در ثانویه ۶۶ دور است. تعداد دور سیم‌پیچ اولیه آن با ولتاژ ۲۲۰ ولت چند دور است؟

۱) ۱۳۲۰ ۲) ۱۶۵۰ ۳) ۱۹۸۰ ۴) ۱۵۴۸

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» تمام افت ولتاژ در ثانویه در نظر گرفته شده است لذا اولیه ایده‌آل فرض می‌شود.

$$N_۲ = nV_۲(۱ + \Delta V_۲\%) \Rightarrow ۶۶ = n \times ۱۰(۱ + ۰/۱) \Rightarrow n = ۶ \quad \Rightarrow \quad N_۱ = nV_۱ = ۶ \times ۲۲۰ = ۱۳۲۰$$

مثال۱۹: برای محاسبه تعداد دور اولیه و ثانویه ترانسفورماتور در کدام حالت می‌توان از روابط روبه‌رو استفاده کرد؟

$$\boxed{\begin{aligned} N_۱ &= n \times V_۱ \\ N_۲ &= n \times V_۲ \end{aligned}}$$

۱) بار اهمی ـ خازنی و حذف راکتانس ثانویه
۲) بار اهمی ـ القایی و حذف مقاومت اهمی اولیه
۳) بار اهمی و حذف راکتانس اولیه
۴) ایده‌آل

☑ **پاسخ:** گزینه «۴»

مثال۲۰: ترانسفورماتور یک فاز با هسته مرغوب $(B = ۱۲۰۰۰ GS)$ $۲۲۰V/۶V$ و جریان ثانویه $I_۲ = ۵/۴A$ مورد نیاز است. اگر ضریب بهره ترانسفورماتور $\eta = ۹۰٪$ باشد، تعداد دور سیم‌پیچ ثانویه با فرض کل افت در ثانویه چند دور است؟

۱) ۳۵ ۲) ۳۲ ۳) ۳۰ ۴) ۲۸

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» در این سؤال هیچ افت ولتاژی داده نشده است.

$$P_۲ = ۶ \times ۵/۴ = ۳۲/۴VA \Rightarrow P_۱ = \frac{۳۲/۴}{۰/۹} = ۳۶VA$$

$$S = ۱/۲\sqrt{۳۶} = ۷/۲cm^۲ \Rightarrow n = \frac{۳۷/۵}{۷/۲} = ۵/۲ \ (\frac{\text{دور}}{\text{ولت}}) \Rightarrow N_۲ = nV_۲ = ۵/۲ \times ۶ = ۳۱/۲۵ \simeq ۳۲$$

مثال۲۱: در ساختن ترانسفورماتورها هر چقدر هسته ترانسفورماتور نامرغوب باشد، تعداد دور ثانویه ..... و تعداد دور اولیه ..... می‌یابد.

۱) افزایش ـ کاهش ۲) افزایش ـ افزایش ۳) کاهش ـ کاهش ۴) کاهش ـ افزایش

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» هرچه هسته نامرغوب‌تر باشد چگالی میدان حداکثر آن کمتر خواهد بود، لذا دور بر ولت ترانس افزایش می‌یابد. تأثیر افزایش دور بر ولت، افزایش تعداد دور هر دو سیم‌بندی اولیه و ثانویه می‌باشد.

مثال۲۲: براثر عبور جریان از هر یک از سیم‌پیچی‌های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور و افت ولتاژهای ایجاد شده در آنها کدام مورد صحیح است؟

۱) $V_۲ < E_۲, V_۱ < E_۱$ ۲) $E_۲ < V_۲, E_۱ < V_۱$ ۳) $V_۲ < E_۲, E_۱ < V_۱$ ۴) $E_۲ < V_۲, V_۱ < E_۱$

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» در ترانس‌های واقعی $E_۱ < V_۱$ و $V_۲ < E_۲$ می‌باشد.

۳ـ۶ـ۱. محاسبهٔ قطر سیم لاکی در اولیه و ثانویه

قطر سیم در اولیه و ثانویه باید به گونه‌ای انتخاب شود که حرارت ایجاد شده بر اثر عبور جریان از آن، صدمه‌ای به سیم‌بندی نزند و افت ولتاژ نیز در آن از حد مجاز، تجاوز ننماید.

قطر سیم در اولیه و ثانویه، با توجه به جریان عبوری و چگالی جریان انتخاب شده، قابل محاسبه است. چگالی جریان مجاز در یک ترانسفورماتور را می‌توان به کمک جدول ۲ـ۱ و با توجه به قدرت خروجی به دست آورد. جریان سیم‌پیچ اولیه از رابطهٔ $I_۱ = \frac{P_۱}{V_۱}$ به دست می‌آید. چنانچه چگالی جریان از رابطهٔ $J = \frac{I}{A}$ و بر

حسب $\frac{A}{mm^2}$ به دست آید، سطح مقطع سیم در اولیه از رابطهٔ $A_1=\frac{I_1}{J}$ قابل محاسبه می‌باشد و قطر سیم نیز از رابطهٔ زیر به دست می‌آید: $A_1=\pi\frac{d_1^2}{4}$

$$d_1=\sqrt{\frac{4}{\pi}A_1}=1/13\sqrt{\frac{I_1}{J}}$$

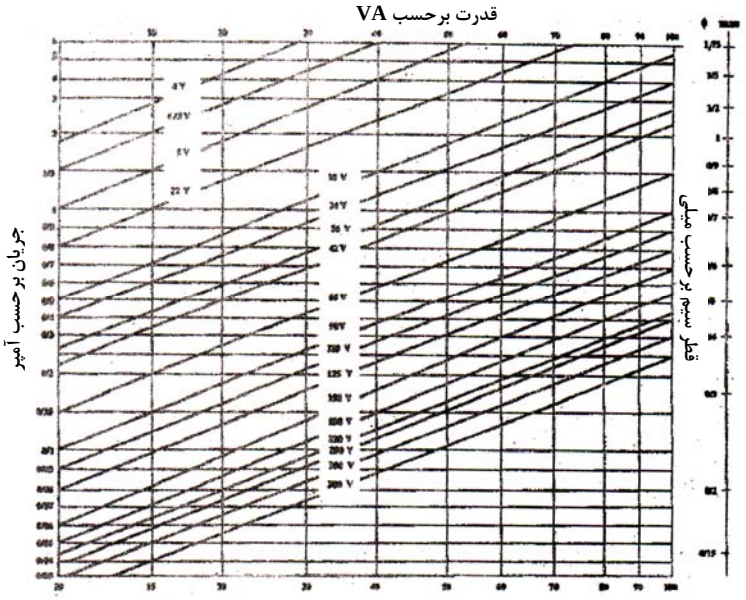
به همین ترتیب نیز می‌توان قطر سیم را در ثانویه به دست آورد: $I_2=\frac{P_2}{V_2}\Rightarrow A_2=\frac{I_2}{J}$; $d_2=\sqrt{\frac{4}{\pi}A_2}\Rightarrow d_2=1/13\sqrt{\frac{I_2}{J}}$

نکته۶: به طور کلی چگالی جریان برای ترانسفورماتورهای معمولی $1\frac{A}{mm^2}$ تا $6\frac{A}{mm^2}$ انتخاب می‌شود.

قدرت خروجی P_2 بر حسب ولت آمپر	صفر تا ۵۰	۵۰ تا ۱۰۰	۱۰۰ تا ۲۰۰	۲۰۰ تا ۵۰۰	۵۰۰ تا ۱۰۰۰	۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰	۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰	۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰
چگالی جریان J بر حسب $\frac{A}{mm^2}$	۴	۳/۵	۳	۲/۵	۲	۱/۷۵	۱/۵	۱

جدول ۲ـ۱ چگالی جریان مجاز بر حسب قدرت خروجی ترانسفورماتور

مثال۲۳: اگر ترانسفورماتوری با مشخصات نوشته شده روی شکل را بخواهیم سیم‌پیچی کنیم جریان وقطر سیم اولیه ازروی منحنی داده شده به ترتیب چند آمپر و چند میلی‌متر است؟

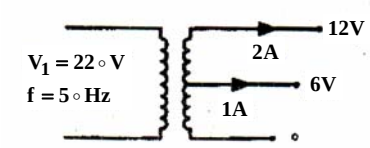


۱) ۰/۲۶,۰/۱۳

۲) ۰/۲۲,۰/۱۳

۳) ۰/۲۶,۰/۰۹۵

۴) ۰/۲۲,۰/۰۹۵



☑ **پاسخ:** گزینه «۱»

$$P_1=P_2+\%20P_2=30+(0/2\times30)=36VA\xrightarrow{\text{منحنی}}d_1=0/26mm\ ,\ I_1=0/13A$$

$$P_2=V_{21}I_{21}+V_{22}I_{22}=(6\times1)+(12\times2)=30VA$$

مثال۲۴: هرگاه ترانسفورماتوری دارای یک سیم پیچ اولیه و ثانویه به صورت جداگانه با قطر سیم ثانویه‌ی ۱/۱۳ میلیمتر، چگالی $3\frac{A}{mm^2}$ و توان خروجی ۳۶ ولت آمپر باشد، ولتاژ ثانویه چند ولت است؟

۱) ۶ ۲) ۹ ۳) ۱۲ ۴) ۱۸

☑ **پاسخ:** گزینه «۳»

$$d_2=1/13\sqrt{\frac{I_2}{j}}\Rightarrow1/13=1/13\sqrt{\frac{I_2}{3}}\Rightarrow I_2=3A\Rightarrow P_2=V_2I_2\Rightarrow V_2=\frac{36}{3}=12V$$

مثال۲۵: قطر سیم در ترانسفورماتور در سمت اولیه از کدام یک از روابط زیر محاسبه می‌شود؟

۱) $d_1=1/13\sqrt{\frac{I_1}{J}}$ ۲) $d_1=1/13\sqrt{\frac{I_2}{J}}$ ۳) $d_1=1/13\sqrt{\frac{A}{J}}$ ۴) $d_1=1/13\sqrt{\frac{I_1}{A}}$

☑ **پاسخ:** گزینه «۱»