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 ؟

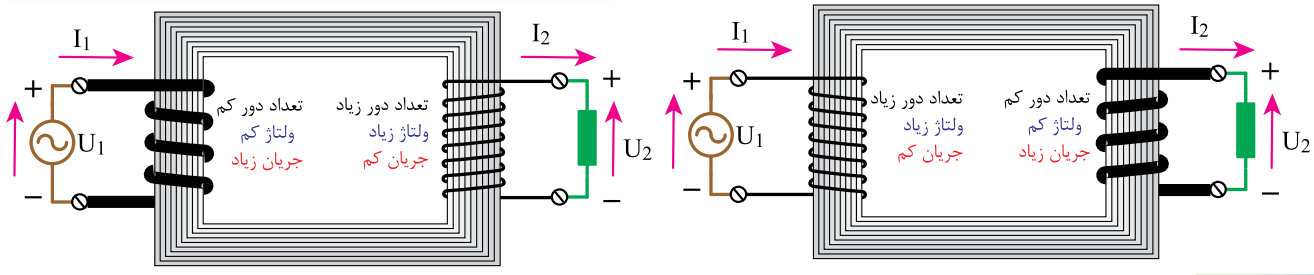
خود را بیازمایید

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)

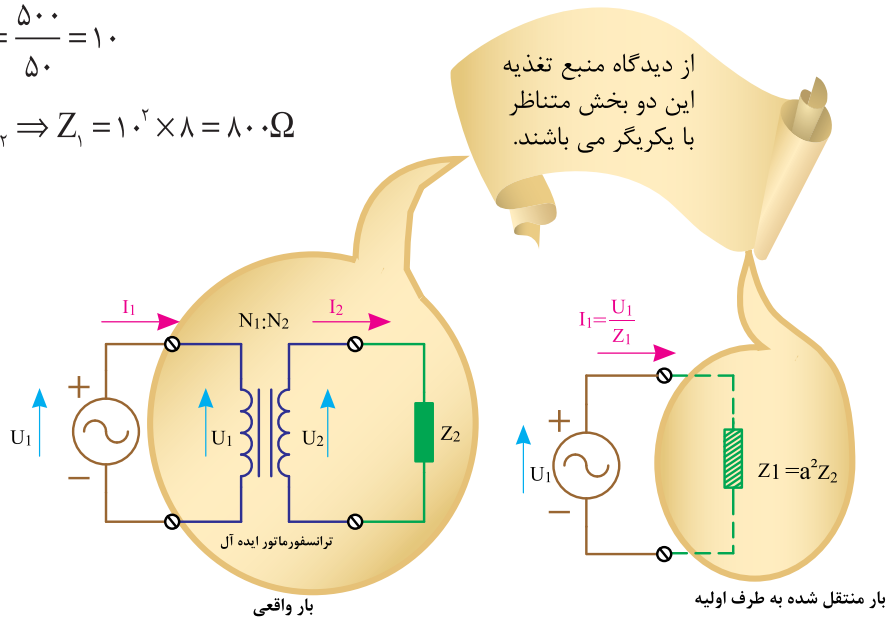
مثال بار ۸Ω به سیم پیچ ثانویه یک ترانسفورماتور ایده آل متصل است اگر سیم پیچ اولیه این ترانسفورماتور ۵۰۰ دور و سیم پیچ ثانویه آن ۵۰ دور باشد از دیدگاه اولیه ترانسفورماتور این بار الکتریکی چند اهم دیده می شود؟

$$N_1 = ۵۰۰$$

$$N_2 = ۵۰$$

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

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



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

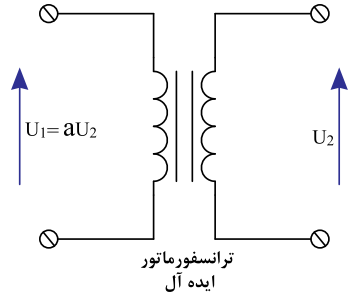
۱

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

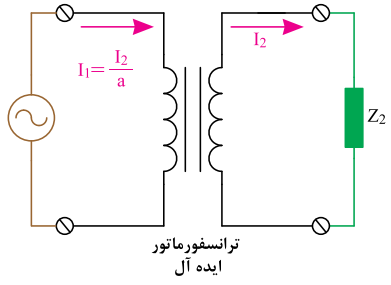
از ترانسفورماتور ایده آل بطور خلاصه نتایج زیر حاصل می شود:

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



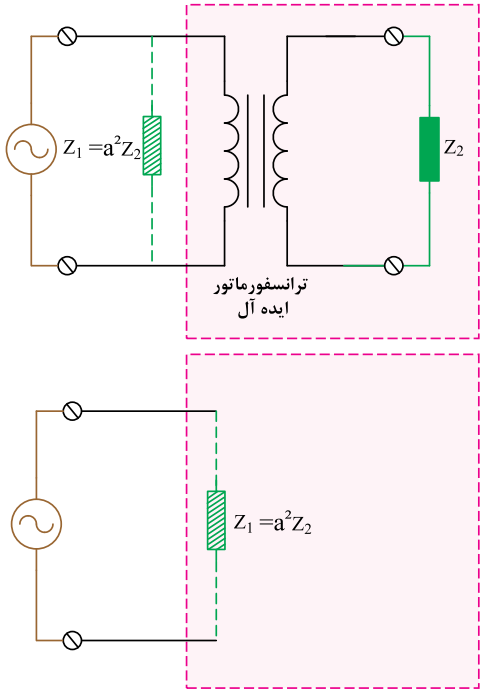
شکل ۱۳- انتقال ولتاژ ثانویه به سمت اولیه ترانسفورماتور ایده آل

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؟

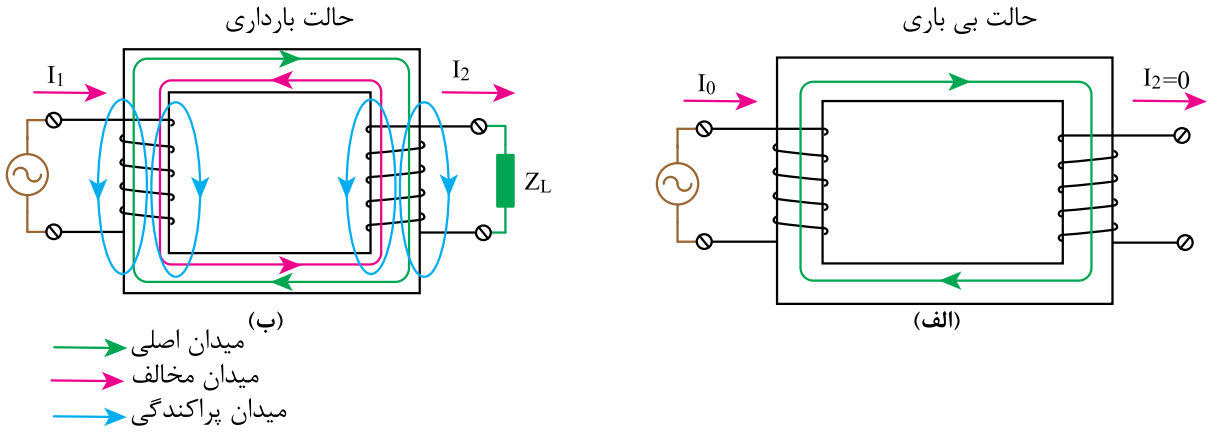
۵- ترانسفورماتور واقعی

در عمـل هیچکدام از ترانسـفورماتورهایی که مورد اسـتفاده قرار می گیرند ایده آل نیسـتند یعنی سـیم پیچ هـای اولیه و ثانویـه دارای مقاومت اهمی R_1 و R_2 می‌باشـند همچنین شار ایجاد شـده بوسیله‌ی جریان های سیم پیچ اولیه و یا ثانویه همگی از مدار مغناطیسی هسـته عبور نمی کنند و بخشی از آن مسیر خود را از طریق هوا می بندند. این شـارهای مغناطیسـی 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

اگـر سـیـم پیـچ اولیه ترانسفورماتور مطابق شـکل (۱۶-الـف) به یک منبع ولتاژ متناوب سینوسـی متصل گردد، در حالی که مدار ثانویه آن باز باشـد ، 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 شـود. در نتیجه از هسـته فوران مغناطیسی φ_0 عبور می‌کند که باعث القای ولتاژ در سـیم پیچ اولیه و ثانویه می‌گردد. این بخش از جریان که به مغناطیس شدن هسته و تولید فوران مغناطیسـی φ_0 می انجامد را با I_M نشـان می دهند.

از آنجاکـه ایـن جریان اثر مغناطیسـی در پی دارد، معادل آن اسـت که از یک سلف فرضی عبور کرده است. درگذشـته آموختید که با عبور جریان از سـلف 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 سـیم پیچ اولیه عبور می‌کند ، بنابراین در ترسـیم برداری کمیتها، جریان I_M نسـبت به ولتاژ القایی سـیم پیچ اولیه پس فاز است. این بخش از جریان ، مولفه مغناطیسـی کنندگـی جریان بی‌باری است.

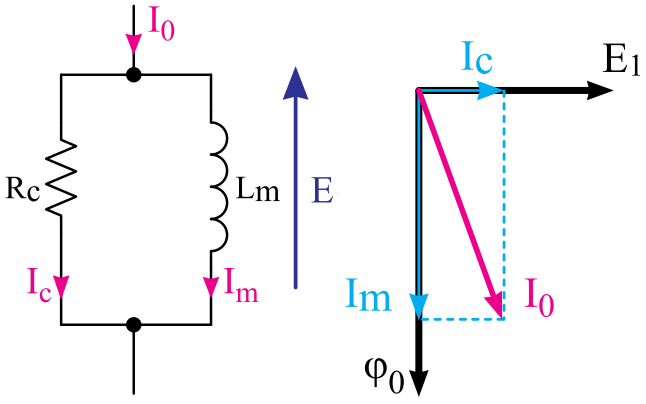
پیامد دوم:

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

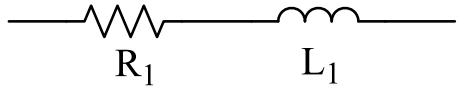
در شکل (۱۷) اندازه بردار I_C بزرگنمایی شده است . در واقعیت این جریان خیلی کوچکتر از I_M می‌باشد. به همین خاطر می توان گفت که جریان تحریک I_0 نسبت به E_1 (ولتاژ القایی سیم پیچ اولیه) حدودا ۹۰° درجه پس فاز می‌باشد. بنا برآنچه گفته شد نقش جریان تحریک در ترانسفورماتور واقعی را می توان معادل با مدار شکل (۱۷) 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.

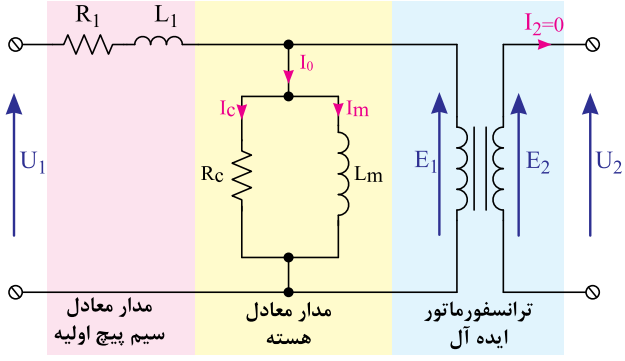


شکل ۱۸- مدار معادل سیم پیچ اولیه

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.

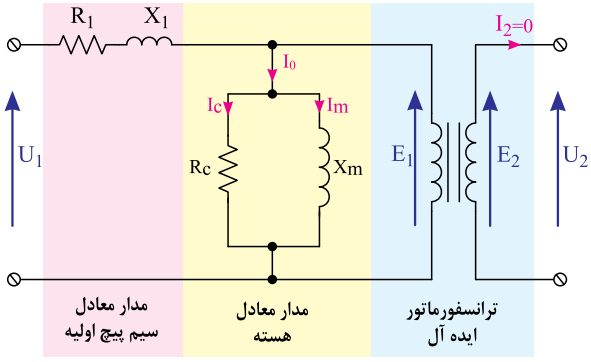
به خاطر داشـته باشـید که در ترانسفورماتورهای ایده آل از مقاومت الکتریکی (اهمی) سیم پیچ ها و شار پراکندگی صرفنظر شـد و به همیـن دلیل ولتاژ القایی سیم پیچ اولیه E_1 با ولتاژ ورودی U_1 برابر گردید.

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.

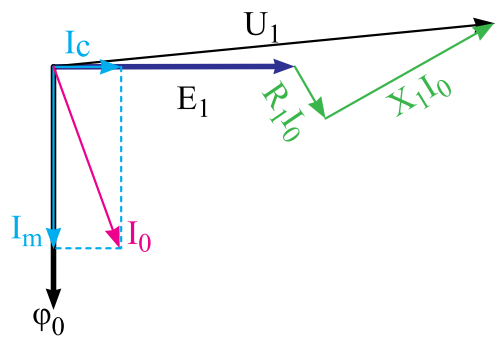


$$X_m=2\pi fL_m$$

$$X_1=2\pi fL_1$$

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

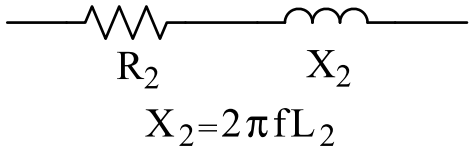
شکل (۱۶- ب)ترانسفورماتوری را که سیم پیچ اولیه آن تحت ولتاژ U_1 به منبع متناوب سینوسی و سیم پیچ ثانویه آن به بار مصرفی امپدانس Z_L متصل شده است نشان می دهد.

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

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

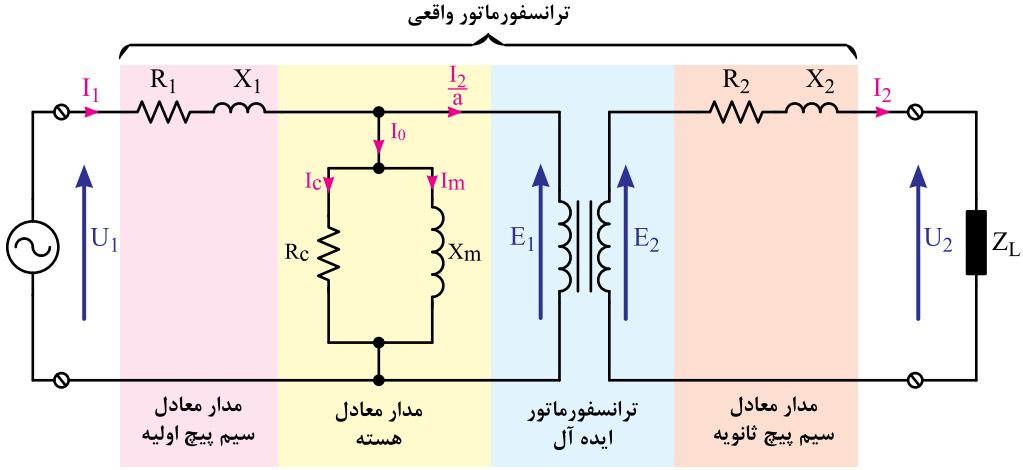
نکتـه قابل توجـه اینکه با افزایش جریان در سـیم پیچ ثانویه، فوران پراکندگی سـیم پیچ نیز افزایش می یابد این موضوع سبب کاهش ولتاژ درترمینال خروجی ترانسفورماتور می شود. به همین خاطرفوران پراکندگی در سیم پیچ ثانویه ترانسـفورماتور معادل X_2I_2 در نظر گرفته می شـود. همچنین بدلیل مقاومت اهمی سیم پیچ ثانویه جریان 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

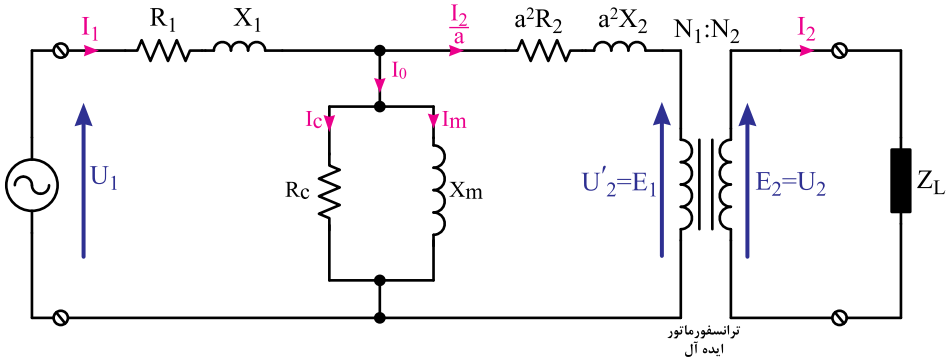
۱

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.

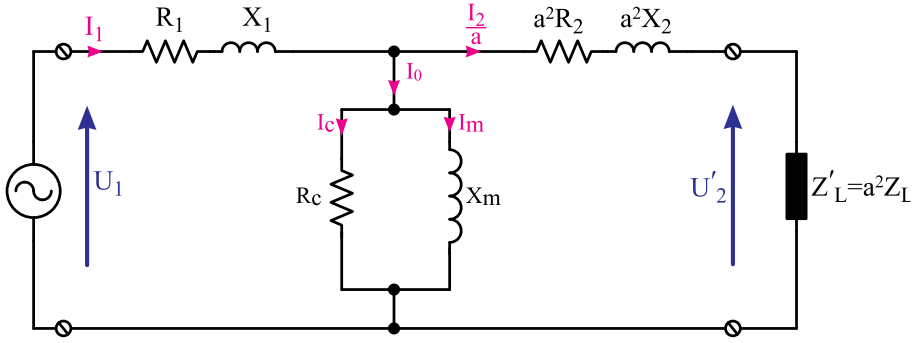


شکل ۲۴- مدار معادل ترانسفورماتور واقعی در حالت بارداری

تقریب اول

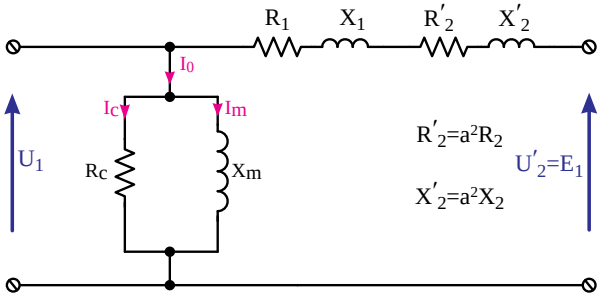
در محاسبات کامل ترانسفورماتورهای قدرت باید از مدار معادل واقعی شکل (۲۵) استفاده شود ولی برای سادگی تحلیل و حل مسائل این کتاب لازم است با مدار معادلهای تقریبی ترانسفورماتورهای قدرت نیز آشنا شوید.

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

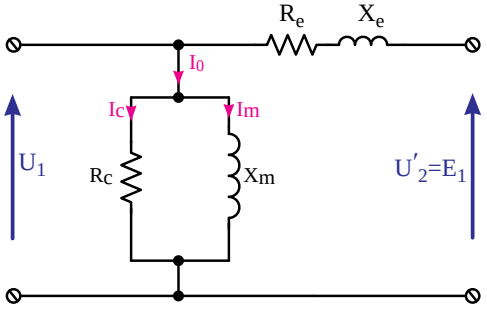
بنابراین می توان با جابه جایی شـاخه موازی (مدار معادل هسته) مطابق شکل (۲۶) به طرف ورودی ، مدار معادل را بطور محسوسی ساده کرد.



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 روابـط $R_e=R_1+R'_2$ 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.

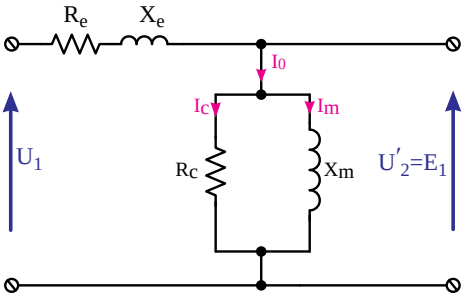


شکل ۲۷- مدار معادل واقعی ترانسفورماتور با احتساب تقریب اول

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 اولیـه وثانویه سـری را با توجه به روابـط $R_e=R_1+R'_2$ و $X_e=X_1+X'_2$ ساده نموده و مدار معادل تقریبی شکل (۲۸) را بدست آورد.

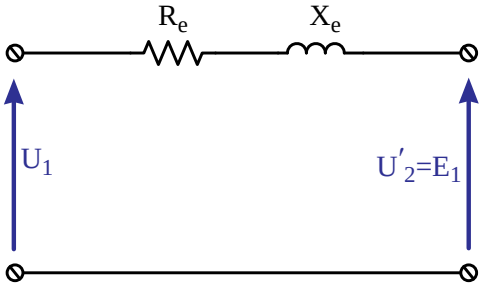
در این تقریب، اثر جریان تحریک در ایجاد افت ولتاژ سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور در نظر گرفته می شود.



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