

دانش اگر در ثریا هم باشد مردمانی از سرزمین پارس بر آن دست خواهند یافت.

پیامبر اعظم (ص)

شرح جامع

ماشین‌های الکتریکی ۲

«مهندسی برق»

مولف: محسن رضایی

انتشارات ارشد

پیشگفتار ناشر

خداوند بزرگ را شاکریم که فرصتی عنایت فرمود تا بتوانیم قدمی در جهت گسترش علم و فرهنگ کشور عزیزمان برداریم و مسیری هموار را در اختیار مخاطبان و داوطلبان علاقمند به ادامه تحصیل قرار دهیم. از آنجائی که درحوزه کتاب‌های درسی و کمک درسی کارشناسی ارشد کتاب‌های زیادی به رشته تحریر در آمده است با این حال وجود یک مجموعه جامع، دقیق، کامل و دارای رفرنس(منابع) مستند احساس می‌شود.

همیشه دغدغه داشتیم که ای کاش می‌شد تمامی منابع پراکنده و گاهاً دست نایافتنی کنکور در یک مجموعه به گونه‌ای جذاب و شیوا آماده می‌شد و همچنین سوالات دوره‌های قبل کنکور نیز به گونه‌ای تشریحی پاسخ داده می شدند، که خدشه‌ای بر آنها وارد نشود و خیال داوطلبان عزیز آنقدر آسوده باشد که اطلاعات مندرج در پاسخنامه‌ها را برای بهره‌گیری در آزمون خود بکار گیرند. این کار با یاری خداوند بزرگ و همکاری نخبه‌ترین دانشجویان و اساتید کشور در انتشارات ارشد هماهنگ گردید و در تمامی مقاطع تحصیلی از کاردانی به کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در حوزهٔ آزمون‌های سراسری – آزاد و پیام نور بسته‌های آموزشی که شامل کتاب‌های بانک سوالات و کتاب‌های شرح جامع درس آماده گردید. در تهیه مجموعه‌های فوق‌الذکر از فارغ‌التحصیلان کارشناسی ارشد که حائز رتبه‌های تک رقمی کنکور می‌باشند، استفاده کرده‌ایم، تا شما عزیزان بتوانید در راستای افزایش توان علمی خود در جهت نیل به مقصود خویش نایل آیید. بدون تردید می‌توان گفت که برای اولین بار در نظام آموزشی کشور مجموعه‌ای به این سبک عرضه می‌شود که در کیفیت و کمیت بی‌نظیر بوده و تمامی نیازهای داوطلبان عزیز را پوشش داده است. امید است که استفاده از این مجموعه عزیزان را در جهت موفقیت در آزمون یاری رسانده باشد. در پایان لازم به ذکر است که بی نقصی محض از آن خداوند متعال می‌باشد، بنا براین از تمامی خوانندگان و داوطلبان عزیز خواهشمندیم نظرات سازنده خود را در مورد این کتاب به سایت انتشارات ارشد اعلام نمایند تا ما را در جهت هر چه بهتر آماده کردن این محصولات یاری رسانند.

با تشکر

ناشـــــر

www.arshadbook. ir

تقدیم به:

پدر بزرگوارم

و

مادر عزیزم

پیشگفتار مؤلف

از آنجاییکه همه ما می‌دانیم نشانه رشد و اعتلای صنعتی هر کشوری پیشرفت در صنعت برق آن است لـذا پـیش‌نیـاز ایـن امـر تفهیم درست تئوری این رشته در میان مهندسین برق است که مهندسین با مراجعه به منابع تئـوری جـامع بتواننـد آنهـا را بـه صورت صحیح، عملیاتی و پیاده‌سازی نمایند. لذا دانشجویان این رشته عدم وجود اثری که بتواند نیازهای آنـان را اعـم از تفهـیم درست و جامع و بی‌عیب و نقص برآورده سازد را احساس می‌کردند لذا اینجانب بر آن شدم تا در کمک (هرچند اندک) بـه ایـن قشر که آینده اقتصادی و صنعتی کشورمان را رقم خواهند زد قدمی بردارم که امیدوارم توانسته باشم این خلاء را پرکنم. با توجه به اینکه همه ما جایزالخطا هستیم و این امری اجتناب‌ناپذیر است صمیمانه پذیرای انتقادات و پیشنهادات شما دوستان هستیم. متعاقباً از زحمات و کمک‌های بی‌شائبه خانم‌ها محدثه رضایی و معصومه رضایی جهت ویراسـتاری و مـدیریت محتـرم مؤسـسه انتشاراتی ارشد صمیمانه تشکر می‌نمایم.

لطفاً انتقادات ، پیشنهادات و نقطه نظرات خود را به آدرس زیر ارسال کنید:

Mail: kntumr@mail.com

با تشکر

محسن رضائی

فهرست مطالب

عنوان صفحه

پیشگفتار ناشر ۳
پیشگفتار مؤلف ۴

فصل اول: ترانسفورمرها

۱- مقدمه ۹
۲- ترانسفورمر تکفاز ۹
۳- مدل ترانسفورمر تکفاز ۱۳
۴- ترانسفورماتور ایده ال ۱۳
۵- تعیین قطبهای ترانسفورمر ایده ال ۱۵
۶- ترانسفورمر واقعی ۱۹
۷- اندوکتانس نشتی ۱۹
۸- مدار معادل الکتریکی تقریبی ۲۰
۹- آزمایش No load (بی باری): (آزمایش مدار باز) Open circuit test ۲۴
۱۰- آزمایش اتصال کوتاه، (Short circuit test) ۲۴
۱۱- تنظیم ولتاژ (Voltage Regulation) ۲۶
۱۲- راندمان (بازده) ترانسفورمر و تلفات ترانسفورمر ۲۸
۱۳- راندمان روزانه: (All DAY EFFICIENCY) (راندمان انرژی) ۳۰
۱۴- سیستم واحدی PERUNIT SYSTEM ۳۱
۱۵- مدار معادل T ۳۵
۱۶- کوپلینگ مغناطیسی و ضریب تزویج ۳۷
۱۷- آزمایش پشت به پشت آزمایش سامپنر ۳۹
۱۸- موازی کردن ترانسفورمرها ۴۰
۱۹- شرایط موازی کردن و حالت‌ها و دیاگرام فازورهای آنجا ۴۰
۲۰- ترانسفورمرهای مخصوص ۴۷
۲۱- اتوترانسفورمر ۴۷
۲۲- ترانسفورمرهای سه فاز ۵۳
۲۳- مدار معادل تکفاز سیستم سه فاز ۶۰
۲۴- ترانس سه فاز یکپارچه ۶۱
۲۵- Magnetizing Inrush current ۶۶

۲۶- (Tap changer) Tap changing ۶۸
۲۷- جریان هجومی Transient Inrush Current ۷۰
۲۸- اتصال اسکات (Scatt) ۷۱
خلاصه فصل ۷۷
تست‌های آخر فصل ۷۹
پاسخ تست‌های آخر فصل ۸۴

فصل دوم: ماشین‌های AC (جریان متناوب)

۱- مقدمه ۹۳
۲- میدان دوار ۹۶
۳- سرعت میدان دوار ۹۷
۴- ولتاژ القایی ۹۷
۵- ضریب توزیع و هارمونیک‌ها ۹۹
۶- هارمونیکهای دندانه و شیار ۱۰۳
۷- گشتاور القایی ۱۰۴
۸- تلفات و راندمان ۱۰۴
۹- ماشینهای AC سه فاز ۱۱۱
۱۰-سیم پیچی رتور ۱۱۱
۱۱- سرعت میدان دوار روتور ۱۱۳
۱۲- مدار معادل موتور القایی ۱۱۴
۱۳- تلفات و گشتاور موتور القایی با توجه به مدار معادل ۱۱۵
۱۴- مشخصه گشتاور سرعت و رابط ۱۱۷
۱۵- ناحیه ژنراتوری ۱۲۲
۱۶- ناحیه ترمزی ۱۲۲
۱۷- کلاس‌های موتور القایی ۱۲۳
۱۸- حالت‌های F.1 و راه اندازی ۱۲۴
۱۹- روشهای مختلف راه اندازی موتور القایی ۱۲۵
۲۰- روش‌های کنترل دور موتور القایی ۱۲۶
۲۱- به دست آوردن پارامترهای معادل مدار معادل ۱۲۹
۲۲- هارمونیکهای زمانی و مکانی ۱۳۱
۲۳- پدیده خزندگی ۱۳۴
خلاصه فصل ۱۴۵
تست‌های آخر فصل ۱۴۷
پاسخ تست‌های آخر فصل ۱۵۲
منابع و مآخذ ۱۶۱

فصل اول

ترانسفورمرها

عناوین اصلی

- مقدمه
- ترانسفورمر تکفاز
- مدل ترانسفورمر تکفاز
- ترانسفورماتور ایده ال
- تعیین قطبهای ترانسفورمر ایده ال
- ترانسفورمر واقعی
- اندوکتانس نشتی
- مدار معادل الکتریکی تقریبی
- آزمایش No load (بی باری):
- آزمایش اتصال کوتاه، (Short circuit test)
- تنظیم ولتاژ (Voltage Regulation)
- راندمان (بازده) ترانسفورمر و تلفات ترانسفورمر
- راندمان روزانه (All DAY EFFICIENCY)
- سیستم واحدی PERUNIT SYSTEM
- مدار معادل T
- کوپلینگ مغناطیسی و ضریب تزویج
- آزمایش پشت به پشت آزمایش سامپنر
- موازی کردن ترانسفورمرها
- شرایط موازی کردن و حالت‌ها و دیاگرام فازورهای آنجا
- ترانسفورمرهای مخصوص
- اتوترانسفورمر
- ترانسفورمرهای سه فاز
- مدار معادل تکفاز سیستم سه فاز
- ترانس سه فاز یکپارچه
- Magnetizing Inrush current
- (Tap changer) Tap changing
- جریان هجومی Transient Inrush Current
- اتصال اسکات (Scatt)

فصل اول

ترانسفورمرها

۱- مقدمه

ترانسفورمر دستگاهی است که یک انرژی الکتریکی را با فرکانس و ولتاژ معین به همان انرژی الکتریکی با همان فرکانس ولی یک سطح ولتاژ متفاوت تبدیل می نماید.

ترانسفورمر دستگاهی است که حداقل شامل دو کویل است که از لحاظ ارتباطی، دارای ارتباط مغناطیسی هستند. یعنی بین دو کویل شار مغناطیسی وجود دارد. برای افزایش ارتباط مغناطیسی، از مواد مغناطیسی به عنوان هسته‌های کویلها استفاده می‌شود. زیرا در این حالت یک mmf کوچک، چگالی بالایی را ایجاد می نماید.

بنابراین ترانسفورماتورها دو نوع اند:

۱) هسته فرومغناطیسی

۲) بدون هسته (هسته‌ی هوا)

کاربرد ترانسفورمرها بیشتر در انتقال انرژی الکتریکی است، مثلاً در نیروگاهها مقرون به صرفه است که انرژی الکتریکی با ولتاژ محدود ۲۰ kv -۳۰kv تولید می‌شود، با یک ترانسفورمر سطح ولتاژ را به هنگام انتقال به حدود ۴۰۰kv می‌رسانند تا بدین ترتیب تلفات RI_2 کاهش یابد $N_1I_1 = N_2I_2$. بنابراین تلفات کمتری خواهیم داشت. سپس در مصرف کننده‌ها، پس از انتقال از یک ترانسفورماتور کاهنده استفاده می‌شود.

📖 **نکته:** کویلهای ترانسفورماتورها از لحاظ الکتریکی کاملاً از همدیگر عایق‌اند. بنابراین در بسیاری از جاها، هنگامی که می‌خواهیم از لحاظ الکتریکی قطع باشیم اما دوباره همان سطح ولتاژ را داشته باشیم، از ترانسفورمر استفاده می‌نماییم.

کاربرد دیگر ترانسفورمرها در اندازه‌گیری ولتاژ و جریانهای بالا است. ابتدا ولتاژ را پائین می‌آورند با یک وسیله ساده اندازه می‌گیرند. و سپس آن را در مقدار و ضریبی که کاهش یافته است، ضرب می‌نمایند.

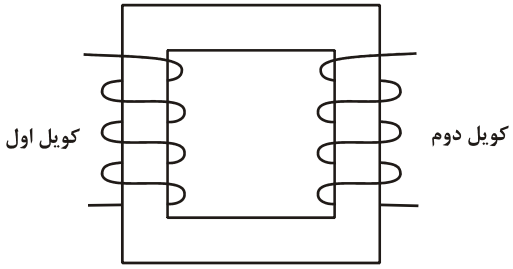
در این درس منظور از ترانسفورمرها، ترانسفورمرهای سیستم‌های قدرت است که دارای هسته‌ی آهنی‌اند.

📖 **نکته:** ترانسفورمر می‌تواند به صورت تکفاز (۱ϕ) و یا سه فاز (۳ϕ) باشد.

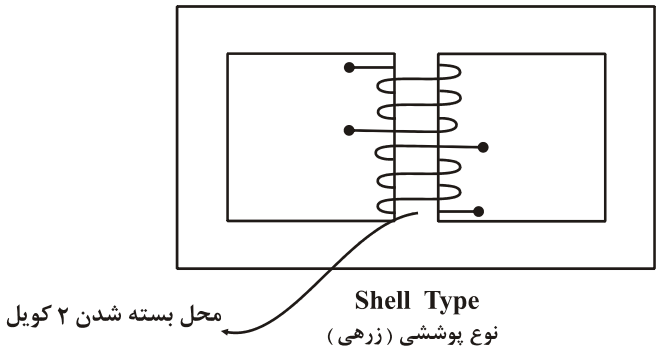
ترانسفورمرها

۲- ترانسفورمر تکفاز

ترانسفورمری است که حداقل دارای ۲ کویل است. هسته‌ی ترانسفورمر تکفاز به دو صورت است.



Core Type
نوع هسته ای



Shell Type
نوع پوششی (زرهی)

در نوع پوششی به دو کویل که از آنها جریان عبور می نماید، نیروی مغناطیسی وارد خواهد شد. بنابراین نیروی وارده به حاصلضرب جریانهای کویلها بستگی دارد و اگر یک جریان ۱۰ برابر شود و کویلها هم اتصال کوتاه شوند، نیرو به سیم پیچیها وارد شده و سیم پیچیها تغییر شکل داده و ترانسفورمر خراب می‌شود.

در ترانسفورمرها ورودی ولتاژ و جریان به صورت سینوسی است، طبق قانون فارادی $e = N\frac{d\phi}{dt}$. شار مغناطیسی نیز سینوسی شده و لذا تلفات فوکو و هیسترزیس خواهیم داشت، برای از بین بردن تلفات فوکو، فولاد یکپارچه نمی سازند، بلکه به صورت ورقه ورقه در می‌آورند و سری با همدیگر که نسبت به هم عایق الکتریکی اند قرار می‌گیرند.

مواد مغناطیسی مورد استفاده در ترانسفورمر

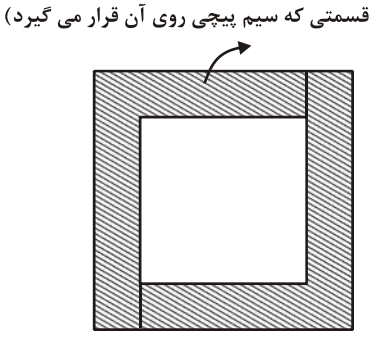
۱) Non oriented: ماده‌ای که در تمام جهت ها شار از آن بگذرد، خواص مغناطیسی یکسانی دارد. (تلفات و شار)

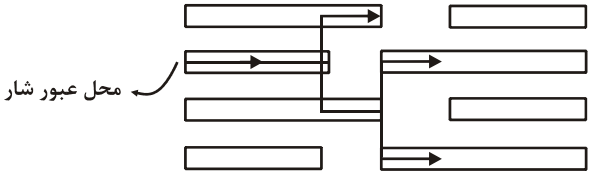
۲) Gralin oriented : ماده‌ای که تحت جهت و زاویه خاص بهترین حالت تلفات و شار گذرنده را دارد.

Non oriented: هنگامی استفاده می‌شود که شار گذرنده‌ی متغیری از لحاظ جهت و زاویه خواهیم داشت. تقریباً راستای شار مغناطیسی در ترانسفورمر تغییر نمی‌نمایند. (تغییر نسبت به زمان وجود دارد ولی تغییر نسبت به مکان تقریباً صفر است)

اکثراً از مواد Grain استفاده می‌شود، مگر در حالتی که مقرون به صرفه نباشد، زیرا مواد Grain برای کاهش هر چه بیشتر جریانهای گردابی در ورقه‌ها نیز، مقداری سیلیکون به مواد هسته اضافه می‌نمایند. تا مقاومت افزایش یابد و جریان کمتری از ورقه‌ها بگذرد.

در نوع Core type معمولاً لایه‌ها را به صورت L شکل یا I شکل می‌چینند. سپس روی این ورقه‌ها، که لایه‌ی اول را تشکیل می‌دهد لایه دوم را به صورت متقارن با لایه‌ی اول، روی لایه دوم قرار می‌دهند. یعنی فاصله‌های هوایی لایه‌ها روی همدیگر قرار نمی‌گیرند. مقطع این لایه‌ها به صورت زیر است:





چیدن لایه‌ها به صورت ورقه ورقه دو فاز

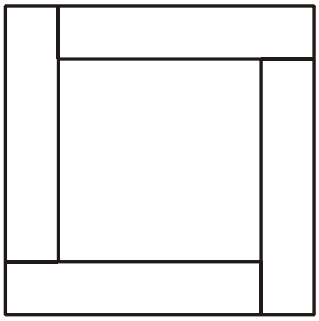
۱- تلفات فوکو کمتر می شود و جریانهای کمتر مجال عبور دارند.

۲- با یک جریان کم شار بیشتری از هسته عبور دارد چون با ورق ورق R_1 کمتر می‌شود چون $R\phi$ برای یک ϕ ثابت با R کمتر نیز می‌شود.

این طور چیدن لایه‌ها مزیتی هم از لحاظ عبور شار دارد که شار به صورت بالا در بین لایه‌ها طی می‌شود می‌دانیم که $R = \frac{L}{\mu.A}$ بین لایه‌ها نیز هوا است و عایق است و همان. μ را داریم، اما چون مقدار A بین لایه‌ها بیشتر است، R کمتر خواهد شد و شار در بین لایه‌ها حرکت خواهد کرد.

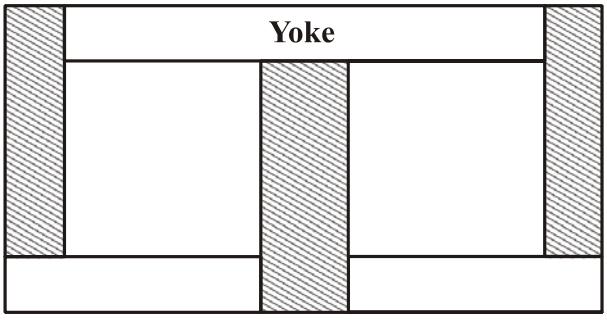
معمولاً در نوع Core type و در ترانسفورمرهای بزرگ از ورقه‌های I شکل استفاده می‌شود و به هنگام چیدن لایه‌ها روی همدیگر، لایه‌ها را به صورت متقارن قرار می‌دهند، یعنی فاصله‌های هوایی بین I شکل روی همدیگر قرار نمی‌گیرند. (طبق توضیح L شکل)

📖 **نکته:** معمولاً ورقه‌ها را به صورت قائم (Iها و Lها)را به هم وصل نمی نمایند، زیرا در این صورت تلفات بیشتر می‌شود.



📖 **نکته:** در هسته‌ی Shell Type (پوششی) فقط از ورقه‌های I شکل استفاده می‌شود معمولا در پیچیدن

سیم پیچ به دور هسته، ابتدا قسمت yoke در هسته‌ها را نمی‌چینند. بعد از پیچیدن سیم پیچ در هسته قسمت yoke را قرار می‌دهند.



📖 **نکته:** نوعی از هسته نیز وجود دارد Wound core که در آن هسته به صورت لایه لایه‌ی جدا از همدیگر نیست. بلکه هسته یکپارچه است ولی یک ورقه بزرگ را به صورت حلزونی به دور خودش می پیچند و به این ترتیب لایه‌های آن به دست می‌آیند.

در پیچیدن سیم پیچی ترانسفورمر معمولاً مثلاً در Core Type سیم پیچیها را به هسته‌های جدا از هم نمی‌پیچند، زیرا در این صورت شار نشتی زیاد می شود بنابراین کویل فشار قوی و فشار ضعیف را به دو قسمت تقسیم می‌نماییم و در هر قسمت هسته، سیم پیچی فشار ضعیف و فشار قوی را روی همدیگر می بندیم تا شارش کاهش یابد.

هنگام بستن کویل فشار قوی و فشار ضعیف، ابتدا کویل فشار ضعیف را می‌بندیم و سپس کویل فشار قوی، زیرا کویل فشار ضعیف کوچکتر است و از طرفی کویل‌ها باید نسبت به هسته عایق الکتریکی باشند بنابراین نیاز به عایق کمتری خواهیم داشت.

در نوع Shell type هر دو کویل فشار قوی و ضعیف روی استوانه‌ی وسطی به روی همدیگر بسته و پیچیده می شوند.

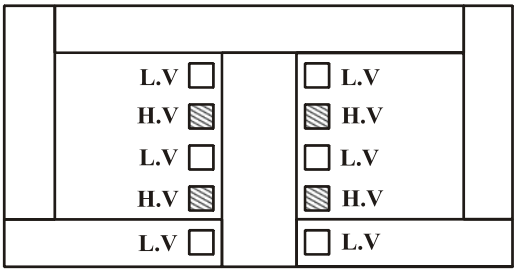
سیم پیچی به دور هسته به دو صورت انجام می شود:

۱) استوانه‌ای متحدالمرکز

۲) ساندویچی (فقط Shell type)

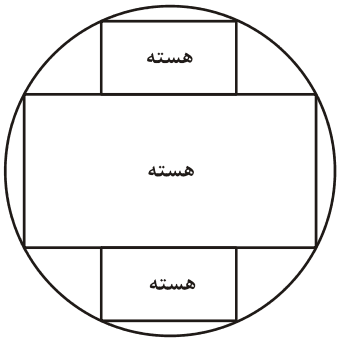
علت کمتر شدن شار نشتی این است که وقتی سیم پیچی تعداد دورش نصف می‌شود mmf نصف می‌شود و شار نشتی نیز کمتر می‌شود.

استوانه‌ای که در بالا توضیح داده شده و شکل نوع ساندویچی به صورت زیر است:



در اینجا نمی‌توانیم یک قسمت LV عایق و یک قسمت برای HV باید کل هسته را HV عایق بگذاریم که از نقطه نظر اقتصادی خوب نیست.

معمولاً هسته سیم پیچی که آماده شد، ترانسفورمر آماده شده را درون محفظه‌ای قرار می دهند که به این محفظه اصطلاحاً تانک گویند. اگر عایق بین ترانس و تانک هوا باشد، ترانسفورمر را ترانس خشک نامند.



بهتر است برای کاهش شار نشتی هسته را اینگونه درست کنیم.

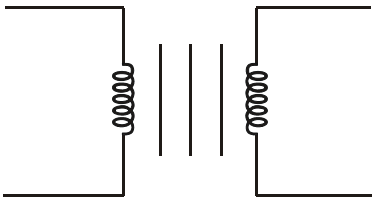
و نیز باید گرما و حرارت تولید شده در هسته و سیم پیچی‌ها را باید به نحوی به بیرون انتقال دهیم، زیرا هر کدام از سیم پیچی‌ها حداکثر درجه حرارت مجازی دارند و درجه حرارت نباید از این مقدار بیشتر شود. بنابراین در ترانسهای قدرت پائین از تانک باعایق هوا استفاده می‌شود. اما در ترانس‌های با قدرت بالا که درجه حرارت بیشتر است یک راه این است که سطح بدنه‌ی تانک را افزایش دهیم و به صورت رادیاتوری بسازیم و نیز درون تانک را از روغن پر می نمایند تا انتقال حرارت سریعتر انجام

شود. اگر قدرت بالاتر باشد، معمولاً روغن را به حرکت در می‌آورند و در قدرتهای بسیار بالاتر چند خنک کننده و fan هم زیر رادیاتورهای تانک قرار می‌دهند.

شاری که تنها از یک Coil عبور کند و Coil دوم را قطع نکند شار نشتی است.

۳- مدل ترانسفورمر تکفاز

ترانس را به صورت زیر مدل می‌نمایند و اگر دارای هسته باشد، دو خط بین دو کویل قرار می‌هند کویلی که دارای تعداد دور بیشتر است را High Noltage و کویل دارای تعداد دور کمتر را Low Voltage می‌نامند.



📖 **تعریف**: سیم پیچی که به منبع وصل شود را سیم پیچی اولیه و کویلی که به بار وصل شود را ثانویه نامند.

📖 **تعریف**: کویل با دور بیشتر را High Voltage یا فشار قوی و با دور کمتر را Low Voltage یا افشا رضعیف نامند.

اگر سیم پیچی اولیه High Voltage باشد، ترانسفورمر را کاهنده نامند و اگر سیم پیچی اولیه‌ی Low Voltage باشد، ترانس را افزاینده نامیم.

۴- ترانسفورماتور ایده ال

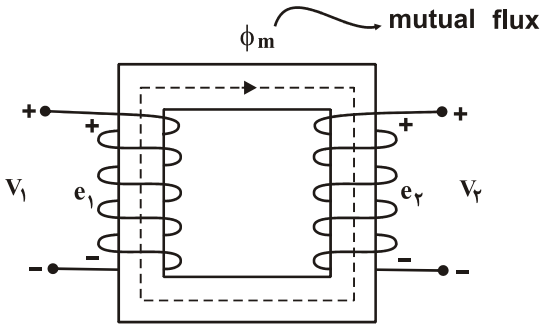
برای این که ترانس ایده‌ال باشد، باید دارای شرایط زیر باشد:

۱) مقاومت کویلها کوچک باشد تا بتوان از آن‌ها صرف نظر کرد.

۲) کل شار تولیدی از داخل هسته عبور کرده و هر دو کویل را قطع نماید، یعنی از شار نشتی بتوان صرف نظر کرد. در حالی که در ترانس واقعی بخشی از شار فقط از یک کویل عبور می‌نماید و با هوا بسته می‌شود.

۳) $M \to \infty$ یعنی رلوکتانس هسته صفر است و یا کمترین mmf هسته magnetized می‌شود، یعنی mmf نزدیک به صفر می‌تواند شار بزرگی را عبور دهد.

۴) تلفات هسته ناچیز و قابل صرفنظر کردن است. (Matual شاری که از دو سیم پیچ عبور می‌کند. k_m ماکزیمم نیست.



اگر ابتدا یک مقدار V_1 متغیر با زمان به کویل اولیه اعمال نماییم، در ابتدا علیرغم این که مقاومت مسی بسیار پائین داریم و نیز $(\mu \to \infty)$جریان بسیار کم عبور می‌نماید (از کویل اول) زیرا $(\mu \to \infty)$ و در نتیجه $R_{core} \to 0$ $L = \frac{N_2}{R_t} \nearrow^{\infty}$ بی‌نهایت

شده و جریان پائینی را عبور می‌دهد $(\mu \to \infty)$. این جریان پائین (mmf کوچک) می‌تواند شار بزرگی را عبور دهد و لذا شاری به اندازه‌ی ϕ_M از هسته و کویل دوم نیز می‌گذرد، خواهیم داشت (در یک لحظه‌ی خاص)

جریان عبوری ما خیلی کم است ٪۵ جریان نامی است.

$$\begin{cases} e_1 = N_1 \dfrac{d\phi_m}{d_t} \\ e_2 = N_2 \dfrac{d\phi_m}{d^+} \end{cases} \Rightarrow R = \circ \Rightarrow v_1 = e_1, v_2 = e_2 \Rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

a: ضریب تبدیل ترانس

📖 **نکته:** فرمول بالا نشان می‌دهد که در ترانس تکفاز هیچ اختلاف فازی بین ولتاژ اولیه و ثانویه وجود ندارد.

📖 **نکته:** وقتی که هیچ باری به طرف ثانویه وصل نیست، این حالت را noload می نامند. در این حالت از طرف ثانویه هیچ جریانی عبور نمی‌نماید، اما در طرف اولیه جریان بسیار پائینی داریم و برای ترانس ایده ال آن قدر کم است که می‌توان از آن صرف نظر کرد، در حالی که در حالت واقعی، جریان اولیه حدوداً ٪۵ جریان نامی است.

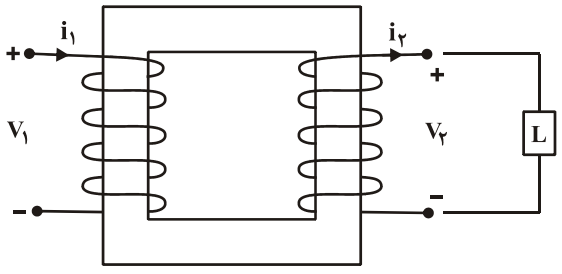
حال فرض کنیم مصرف کننده‌ای را (Load) به طرف ثانویه وصل نمائیم در کویل ثانویه جریانی خواهیم داشت، جهت جریان به گونه‌ای است که mmf ناشی از آن N_2، شاری را به وجود می‌آورد که با عامل به وجود آورنده‌ی آن ϕ_m مخالفت می‌نماید، بنابراین ϕ_m کل کاهش می‌یابد و این به معنای آن است که e_1 کاهش می‌یابد اما e_1 چون ترانس ایده ال است، نمی‌تواند کاهش یابد زیرا مقدار e_1 با N_1 برابر است و در این حالت قانون ولتاژ کیرشهف نقض می شود. برای رفع این مشکل، هنگامی که کاهش می‌یابد، برای این که e_1 کم نشود e_1 از منبع جریان بیشتر i_1 را می‌کشد و کم شدن ϕ_m جبران می شود، بدون این که e_1 کم شود.

به عبارت بهتر، شاری که i_1 تولید می نماید (در خلاف ϕ_m) باید برابر باشد با شاری که i_1 تولید می‌نماید (در جهت ϕ_m) تا ثابت بماند، یعنی:

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = \circ \Rightarrow N_1 i_1 = N_2 i_2$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{a} \Rightarrow \frac{N_1}{N_2} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow V_1 i_1 = V_2 i_2$$ مشخصه ترانس ایده ال

این قوانین در حالت کلی برای ولتاژهای متغیر با زمان صادق است. در حالت خاص که ولتاژ اعمالی ولتاژ متناوب سینوسی باشد، از مقدارهای مؤثر می‌توانیم استفاده نماییم و نیز به صورت فازوری نمایش دهیم.



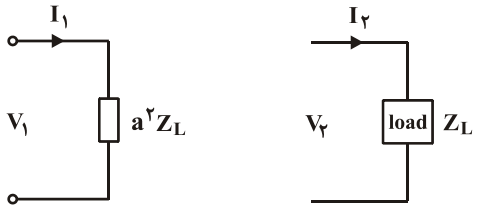
$$\frac{V_{1rms}}{V_{2rms}} = \frac{i_{2rms}}{i_{1rms}} = a$$

برای به دست آوردن امپدانس معادل از دو سر ثانویه که روی اولیه دیده می شود، داریم:

$$Z_L = \frac{V_2}{I_2} = \frac{\frac{V_1}{\alpha}}{I_1 \alpha} = \frac{1}{\alpha^2} \frac{N_1}{I_1}$$

امپدانس انتقال یافته‌ی بار به اولیه که بنابراین به جای ترانسفورمر ایده ال می‌توان از معادل آن استفاده کرد:

$$\Rightarrow \frac{e_1}{I_1} = \frac{V_1}{I_1} = \alpha^2 Z_L = Z'_L$$



لذا در حل معادلات که دارای چند ترانسفورمر باشند، بهترین راه حل آن است که ابتدا امپدانسها را به یک طرف انتقال دهیم و سپس مدار ساده شده را تحلیل نماییم.

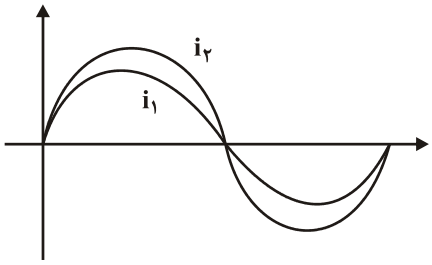
نکته: معمولاً اگر کمیتی را از طرف ثانویه به طرف اولیه انتقال دهیم آن را با پریم نمایش دهیم (i'_2)و اگر کمیتی را از طرف اولیه به ثانویه انتقال دهیم آن را بازگون (i''_1) نمایش می‌دهند.

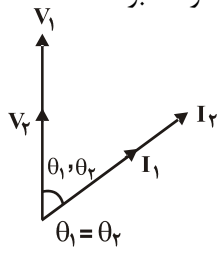
در ترانسفورمر ایده ال داریم:

$$\begin{cases} P_2 = v_2 I_2 \cos\phi_2 \\ P_1 = v_1 I_1 \cos\phi_1 \end{cases}$$

- چون جریان‌ها و ولتاژها با همدیگر همفازند، لذا $\cos\phi_1 = \cos\phi_2$ خواهد بود، یعنی اختلاف فاز بین I_1, N_1 و بین I_2, N_2 باید برابر باشد.

بنابراین $\phi_1 = \phi_2$ و در نتیجه $P_1 = P_2$ خواهد بود. بنابراین علاوه بر این که V.A اولیه و ثانویه با هم برابر است، توان اکتیو ورودی نیز با توان اکتیو خروجی برابر خواهد بود.





$$S_1 = S_2 \Rightarrow \begin{cases} P_1 = P_2 \\ Q_1 = Q_2 \end{cases}$$

نکته: از ترانسفورمر می‌توان به عنوان مبدل امپدانسی استفاده کرد: اگر مقدار امپدانس منبع Z_C باشد و مقدار امپدانس بار Z_L باشد، برای این که بیشترین توان به Z_L برسد، باید $Z_L = Z_S^*$ شود. برای این کار می‌توان بین Z_S, Z_L از یک ترانسفورمر استفاده کرد تا $a^2 Z_L = Z_S^*$ شود.

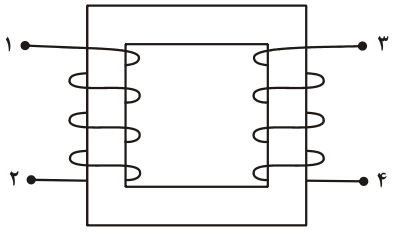
۵- تعیین قطبهای ترانسفورمر ایده ال

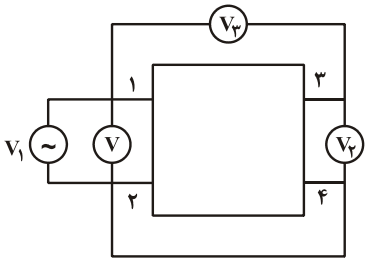
اگر جهت پیچیدن سیم پیچهای اولیه و ثانویه در یک جهت نباشد، آن گاه در یک لحظه‌ی خاص بین V_2, V_1 اختلاف فازی به اندازه ی 180° وجود خواهد داشت و اگر جهت پیچیدن در یک جهت باشد، بین V_2, V_1 اختلاف فاز نخواهد بود.

نقاط هم پلاریته: نقاطی هستند که اگر جریانهایی به آنها وارد شوند شاری که تولید می‌شود در یک راستا هستند.

اگر کویلهای ترانسفورمر را بتوانیم ببینیم، تعیین پلاریته به روش زیر انجام می‌شود:

اگر جریان i_1 از مسیر (۱) وارد شود، شاری که ایجاد می‌نماید هم جهت باشاری است که اگر جریان i_2 از سر (۳) وارد شود، تولید می‌نماید، لذا (۱) و (۳)از لحاظ پلاریته هر دو مثبت‌اند.





اما در حالتی که کویلها در درون تانک باشند و قابل رؤیت نباشند.

اگر $V_۳ = V_۱ + V_۲$ یعنی (۱و۴) و (۳و۲) هم پلاریته‌اند و

اگر $V_۳ = V_۱ - V_۲$ (۱و۳) و (۲و۴) هم پلاریته‌اند.

$V_۴, V_۲$ هم اندازه‌اند، ولی نسبت به ترمینال‌های ۱ و ۳ کمتر یا بیشتر هستند.

📖 **نکته:** معمولاً ترانسفورماتورها دارای پلاک مشخصاتی هستند که به شرح زیر است:

توان اسمی که بیشتر از آن از ترانس نمی‌توان KVA ۱۰ کشید.

تکفاز: ۱ϕ

سه فاز: ۳ϕ

$\frac{۲۲۰۰}{۲۲۰}$V: مقدار ولتاژ اسمی اولیه و ثانویه که بیشتر از ۲۲۰۰ به اولیه نمی‌توان اعمال نمود و بیشتر از ۲۲۰ از ثانویه نمی‌توان کشید (مقدار مؤثر)

مثال

یک ترانسفورمر ایده آل با مشخصات زیر داریم:

$$۱\phi, ۱۰KVA \frac{۲۴۰۰}{۲۴۰}, ۶۰Hz$$

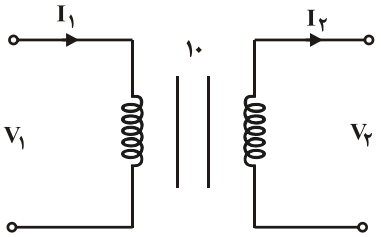
مطلوبست:

الف) امپدانس باری که به ترمینالهای سیم پیچی فشار ضعیف Lv باید وصل شود تا ترانسفورمر در حالت بار کامل کار نماید؟

ب) مقدار این امپدانس وقتی که به طرف Hv انتقال یابد؟

ج) جریان سیم پیچی Hv؟

درحالت بار کامل:



$$\alpha = \frac{۲۴۰۰}{۲۴۰} = ۱۰$$

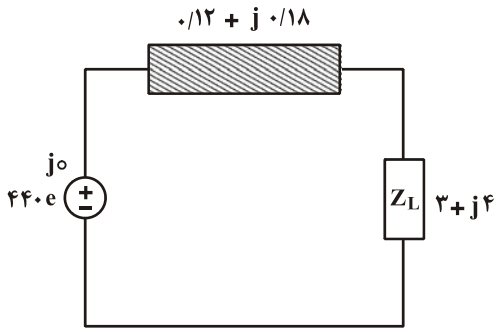
$$\text{جریان اسمی ثانویه} = \frac{۱۰KVA}{۲۴۰} = ۴۱/۶A$$

$$\text{جریان اسمی اولیه} = \frac{۱۰KVA}{۲۴۰۰V} = ۴/۱۶A$$

$$Z_L = \frac{V_۲}{I_۲} = \frac{۲۴۰}{۴۱/۶} = ۵/۷A, Z'_L = (۱۵/۷)(۱۰)^۲ = ۵۷۰A$$

مثال

یک سیستم قدرت تکفاز شامل یک ژنراتور ۶۰^{Hz},۴۴۰″ از طریق خط انتقال با امپدانس $Z=۰/۱۲+j۰/۱۸$ خط و بار $Z_L=۳+j۴\Omega$ تغذیه می‌نماید، مطلوبست:



الف) ولتاژ بار و تلفات خط انتقال را در حالت رو به رو بیابید؟

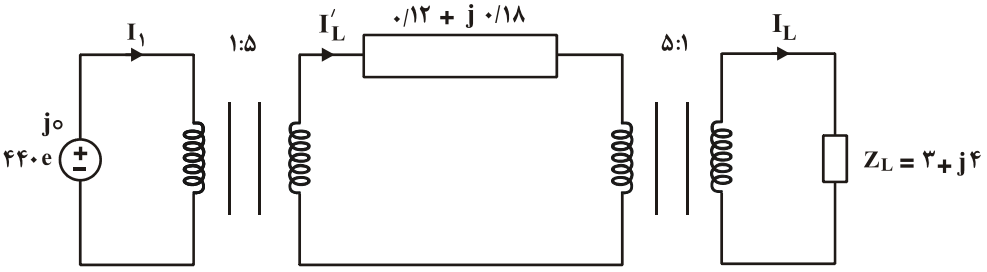
ب)ولتاژ بار و تلفات خط انتقال را در حالتی که ترانسفورمر افزاینده ۱:۵ بین منبع و خط انتقال و یک کاهنده ی ۵:۱ بین بار و خط انتقال باشد بیابید؟

الف)

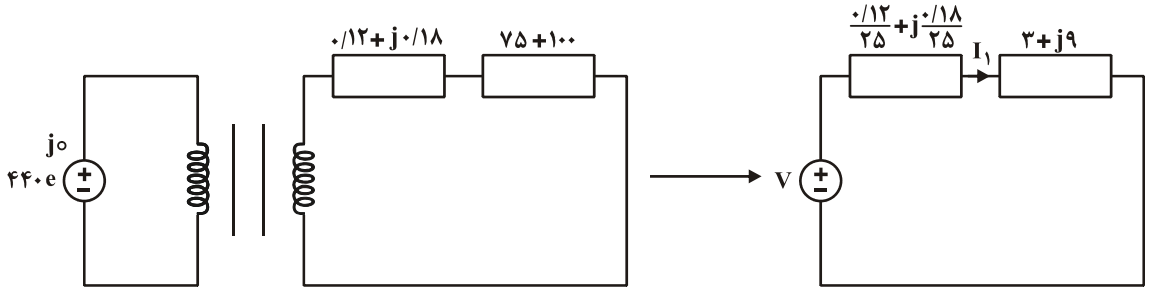
$$V_L=\left(\frac{Z_L}{Z_L+Z_S}\right)V_S=\left(\frac{۳+j۴}{۳/۱۲+j۴/۱۸}\right)۴۴۰e^{j۰}=۴۲۴|\angle-۰/۰۲$$

$$I=\frac{۴۴۰e^{j۰}}{۳/۱۲+j۴/۱۸}=۸۴/۸\angle-۵۳/۳^{\circ}$$ تلفات در خط و $$=RI^{۲}=(۰.۱۲)(۸۴/۸)^{۲}=۸۶۲W$$

ب)



برای حل راحت تر مسئله ابتدا تمام امپدانس‌ها را به یک طرف انتقال می‌دهیم:



$$I_۱=\frac{۴۴۰e^{J۰}}{\left(\frac{۰/۱۲}{۲۵}+۳\right)+j\left(\frac{۰/۱۸}{۲۵}+۴\right)}\Rightarrow I'_L=\left(\frac{۱}{۵}I_۱\right)\Rightarrow I_L=۵I'_L=۵\left(\frac{۱}{۵}\right)I_۱=I_۱$$

$$\text{بار } V_L=\left(۵e^{j+an^{-۱}\left(\frac{۴}{۳}\right)}\right)I_L=۴۳۹/۳\angle-۰.۰۱$$

$$\text{تلفات }=RI'^{۲}_L=R\left(\frac{۱}{۲۵}\right)I_۱^{۲}=۳۷/۰۴Watt$$