((بسم الله الرّحمن الرّحیم))

وزرات علوم ، تحقیقات وفناوری

دانشگاه فنی وحرفه ای

دانشکده فنـــی وحـــرفه ای محمودآباد

ترانسفورماتور

دکتر حسن زارع

تهیه شده برای دانشجویان رشته برق

سال تحصیلی۹۹-۱۳۹۸

فهرست

۱. مقدمه

۲. ترانسهای تکفاز

۳. مدارمعادل خطی ترنسفورماتور دوسیم پیچه

۴. نمایش مدارتزویج شده یک ترانسفورماتور

۵. ترانسفورماتور باتحریک سینوسی

۶. تلفات هسته ترانسفورماتور

۷. عملکردترانسفورماتور

۸. تعیین پارامترهای مدارمعادل واندازه گیری مقاومت سیم پیچها

۹. مدارمعادل تقریبی

۱۰. بازده

۱۱. ضریب تنظیم وتپ چنجر

۱۲. کنترل ولتاژترانسفورماتور

۱۳. تنظیم ولتاژوبهره ترنسفورماتور

۱۴. اتصالات ترانسفوماتورهای تکفاز

۱۵. اتصال سری-سری

۱۶. اتصال سری- موازی یاموازی- سری

۱۷. اتصال موازی

۱۸. حسن استفاده ازدوترانس به جای یک ترانس

۱۹. موازی بستن ترانسها

۲۰. ترانسفورماتورهای تکفازسه سیم پیچه

۲۱. اتوترانسفورماتورتکفاز

۲۲. ترانسفورماتورهای اندازه گیری

۲۳. ترنسهای سه فاز

۲۴. انواع اتصالات ترانس ومعایب ومحاسن آن

۲۵. گروهای اتصال درترانسهای سه فاز

۲۶. بررسی هارمونیکهادرترانسهای سه فاز

۲۷. طریقه خنک کردن ترانسفورماتورها

مقدمه

قسمت اعظم انرژی الکتریکی مورد نیاز انسان در تمام کشورهای جهان ، توسط مراکز تولید مانند نیروگاههای بخاری ، آبی و هسته‌ای تولید می‌شود. این مراکز دارای توربینها و آلترناتورهای سه فاز هستند و ولتاژی که بوسیله ژنراتورها تولید می‌شود، باید تا میزانی که مقرون به صرفه باشد جهت انتقال بالا برده شود. گاهی چندین مرکز تولید بوسیله شبکه‌ای به هم مرتبط می‌شوند تا انرژی الکتریکی مورد نیاز را بطور مداوم و به مقدارکافی در شهرها و نواحی مختلف توزیع کنند.

در محلهای توزیع برای اینکه ولتاژ قابل استفاده برای مصارف عمومی و کارخانجات باشد، باید ولتاژ پایین آورده شود. این افزایش و کاهش ولتاژ توسط ترانسفورماتور انجام می‌شود. بدیهی است توزیع انرژی بین تمام مصرف کننده‌های یک شهر از مرکز توزیع اصلی امکانپذیر نیست و مستلزم هزینه و افت ولتاژ زیادی خواهد بود. لذا هر مرکز اصلی به چندین مرکز یا پست کوچکتر (پستهای داخل شهری) و هر پست نیز به چندین محل توزیع کوچکتر (پست منطقه‌ای) تقسیم می‌شود. هر کدام از این مراکز به نوبه خود از ترانسهای توزیع و تبدیل ولتاژ استفاده می‌کنند.

بطور کلی در خانواده و توزیع انرژی الکتریکی ، ترانسفورماتورها از ارکان و اعضای اصلی هستند و اهمیت آنها کمتر از خطوط انتقال و یا مولدهای نیرو. خوشبختانه به دلیل وجود حداقل وسایل دینامیکی در آنها کمتر با مشکل و آسیب پذیری روبرو هستند. مسلما این به آن معنی نیست که می‌توان از توجه به حفاظتها و سرویس و نگهداری آنها غفلت کرد.

تعریف ترانسفورماتورهای قدرت:

ترانسفور ماتور وسیله ای است که انرژی الکتریکی را در یک سیستم جریان متناوب از یک مدار به مدار دیگر انتقال می دهد و می تواند ولتاژ کم را به ولتاژ زیاد وبالعکس تبدیل نماید .

برخلاف ماشینهای الکتریکی که انرژی الکتریکی و مکانیکی را به یکدیگر تبدیل می کند ، در ترانسفور ماتور انرژی به همان شکل الکتریکی باقیمانده و فرکانس آن نیز تغییر نمیکند و فقط مقادیر ولتاژ و جریان در اولیه

و ثانویه متفاوت خواهد بود. ترانسفورماتورها نه تنها به عنوان اجزاء اصلی سیستم های انتقال و پخش انرژی مطرح هستند بلکه در تغذیه مدارهای الکترونیک و کنترل ، یکسوسازی ، اندازه گیری و کوره های الکتریکی نیز نقش مهمی بر عهده دارند .

– انواع ترانسفورماتور:

انواع ترانسفورماتورها را میتوان برحسب وظایف آنها بصورت ذیل بسته بندی کرد :

۱- ترانسفورماتورهای قدرت در نیروگاهها و پستهای فشار قوی

۲- ترانسهای توزیع در پستهای توزیع زمینی و هوایی ، برای پخش انرژی در سطح شهرها و کارخانه ها

۳- ترانسهای قدرت برای مقاصد خاص مانند کوره های ذوب آلومینیم ، یکسوسازها و واحدهای جوشکاری

۴- اتوترانسها جهت تبدیل ولتاژ با نسبت کم و راه اندازی موتورهای القایی

۵- ترانسهای الکترونیک

۶- ترانسهای ولتاژ و جریان جهت مقاصد اندازه گیری و حفاظت

۷- ترانسهای زمین برای ایجاد نقطه صفر و زمین کردن نقطه صفر

۸- ترانسهای آزمایشگاه فشار قوی و ...

و از نظر ماده عایقی و ماده خنک کننده نیز ترانسفورماتورها را می توان بصورت ذیل بسته بندی کرد :

۱- ترانسفورماتورهای روغنی Oil immersed power Transformer

۲- ترانسفورماتورهای خشک(Dry type transformer)

۳- ترانسفورماتورهای با عایق گازی (sf6 Gas insulated transformer)

سایر ترانسفورماتورها مانند ترانسفورماتورهای کوره ، ترانسفورماتورهای تغییر دهنده فاز و ... بعنوان ترانسفورماتورهای خاص قلمداد می گردند .

– ساختمان ترانسهای قدرت روغنی:

قسمتهای اصلی در ساختمان ترانسفورماتورهای قدرت روغنی عبارتند از:

۱- هسته یک مدار مغناطیسی ۲ - سیم پیچ های اولیه و ثانویه ۳- تانک اصلی روغن

به جز موارد فوق اجزا دیگری نیز به منظور اندازه گیری وحفاظت به شرح زیر وجوددارند :

۱- کنسرواتور یا منبع انبساط روغن ۲ - تب چنجر ۳ – ترمومترها ۴ - نشان دهنده های سطح روغن ۵- رله بوخهلتس

۶- سوپاپ اطمینان یا لوله انفجاری / شیر فشار شکن ۷- رادیاتور یا مبدلهای حرارتی ۸ - پمپ و فن ها

۹- شیرهای نمونه برداری از روغن پایین و بالای تانک ۱۰- شیرهای مربوط به پرکردن و تخلیه روغن ترانس

۱۱- مجرای تنفسی و سیلیکاژل مربوط به تانک اصلی و تب چنجر ۱۲- تابلوی کنترل ۱۳- تابلوی مکانیزم تب چنجر۱۴ - چرخ ها ۱۵- پلاک مشخصات نامی

– هسته:

هسته ترانس یک مدار مغناطیسی خوب با حداقل فاصله هوایی و حداقل مقاومت مغناطیسی است تا فورانهای مغناطیسی براحتی از آن عبور کنند . برای کم کردن تلفات آهنی هسته ترانسفورماتور را نمی توان به طور یکپارچه ساخت بلکه هسته بصورت ورقه ورقه ساخته شده و ضخامت ورقه ها حدود۰.۳ میلیمتر و حتی کمتر است و همچنین از آهن بدون پسماند با آلیاژی از سیلیسیم (حداکثر ۴.۵ درصد) که دارای قابلیت هدایت الکتریکی و قابلیت هدایت مغناطیسی زیاد است ساخته می شون .برای کاهش تلفات فوکو ورقه ها تا حد امکان نازک ساخته می شوند و لی ضخامت آنها نباید بحدی برسد که از نظر مکانیکی ضعیف شده و تاب بردارد .

برای عایق کردن ورقهای ترانسفورماتور ، قبلا از یک کاغذ نازک مخصوص که در یک سمت این ورقه چسبانده می شود، استفاده می کردند اما امروزه بدین منظور در هنگام ساختن و نورد این ورقه ها یک لایه نازک اکسید

فسفات یا سیلیکات به ضخامت ۲ تا ۲۰ میکرون به عنوان عایق در روی آنها می مالند و با آنها روی ورقه ها را می پوشانند. علاوه بر این ، از لاک مخصوص نیز برای عایق کردن یک طرف ورقه ها استفاده می شـود. ورقـه های ترانسفورماتور دارای یک لایه عایق هستند.

- مزایا ی استفاده هسته ترانس از آهن :

۱- فراوانی۲ - پایین بودن قیمت ۳ - عمر زیاد ۴- فرم دهی آسان

-و معایب هسته ترانس آهن: ۱- خاصیت القایی کم ۲ - ضدآب نبودن ۳ - وزن زیاد ۴- تولید نویز بالا

- هسته فریت:

با رشد تکنولوژی و استفاده از دستگاهها با عملکرد بسیار حساس به تغذیه خود مخترعان را بر این داشت که منابع تغذیه ای باخروجی بسیار صاف وایزوله شده و نویز خروجی بسیارکم برای استفاده در مـدارات طراحـی کنند.این کار مستلزم استفاده از آلیاژ و قطعاتی با خاصیت القایی بالا بود که براساس محاسـبات و تحقیقـات گسترده و تجربیات مخترعان و آلیژهای کشف شده و با توجه به قیمت و قابل دسترس بودن آنهـا و انعطـاف آنها در مقابل اشکال درخواستی صنعتی وبه آلیاژی به نام فریت رسیدند که این آلیاژ مـی توانسـت خیلـی از نیازها و درخواست مخترعان از یک آلیاژ ایده ال برای این کار را فراهم کند که به عنوان مثال از فاصله هوایی بین هسته های فریت استفاده های گوناگونی در منابع تغذیه سوئیچینگ می شود. خصوصیت منحصر به فـرد فریت‌ها ، نسبت به آهن و دیگر مواد فرومغناطیس ، عایق آنها است. . مقاومت ویژه نوعی فریت‌ها ۱ تا ۱۰۴ اهم است ، در حالیکه برای آهن بین ۷ تا ۱۰ اهم است. به خاطر این مقاومت ویژه بالا ، فریت‌ها در معرض جریانهای گردابی قرار ندارند و می‌توان از آنها در فرکانسهای بالا بعنوان هسته پیچک rf استفاده کرد مثلا در پیچکهای ترانسفورماتور تلویزیون و حافظه مغناطیسی کامپیوترها.

مزایای هسته فریت :

۱- خاصیت القایی خوب ۲ - ضدآب بودن ۳ - تولید نویز کم ۴- سبک بودن

معای‌ب:

۱- شکننده بودن ۲- قابل انعطاف نبودن

-- سیم پیچی های ترانس:

معمولا برای سیم پیچ اولیه و ثانویه ترانسفورماتور از هادی های مسی با عایق (روپوش) لاکی استفاده می‌کنند. اینها با سطح مقطع گرد و اندازه‌های استاندارد وجود دارند و با قطر مشخص می‌شوند. در ترانسفورماتورهای پرقدرت از هادیهای مسی که به صورت تسمه هستند استفاده می‌شوند و ابعاد این گونه هادی‌ها نیز استاندارد است.

توضیح سیم پیچی ترانسفورماتور به این ترتیب است که می توان سر سیم پیچ‌ها را به وسیله روکش عایقها از سوراخهای قرقره خارج کرد، تا بدین ترتیب سیم ها قطع (خصوصا در سیمهای نازک و لایه‌های اول) یا زخمی نشوند. علاوه بر این بهتر است رنگ روکش‌ها نیز متفاوت باشد تا در ترانسفورماتورهای دارای چندین سیم پیچ ، به راحتی بتوان سر هر سیم پیچ را مشخص کرد. بعد از اتمام سیم پیچی یا تعمیر سیم پیچهای ترانسفورماتور باید آنها را با ولتاژهای نامی خودشان برای کنترل و کسب اطمینان از سالم بودن عایق بدنه و سیم پیچ اولیه ، بدنه و سیم پیچ ثانویه آزمایش کرد.

در ساختمان سیم پیچ های ترانس باید موارد متعددی در نظر گرفته شوند که در ذیل به مهمترین آنها اشاره می نمائیم :

۱- در سیم پیچ هاباید جنبه های اقتصادی که همان مصرف مقدار مس و راندمان ترانس می باشد ، مراعات شود .

۲- ساختمان سیم پیچ ها برای رژیم حرارتی که باید در آن کار کند محاسبه شود ، زیرا در غیر این صورت عمر ترانس کاسته خواهد شد .

۳- سیم پیچ ها در مقابل تنش ها و کشش های حاصل از اتصال کوتاه های ناگهانی مقاوم شوند .

۴- سیم پیچ ها باید در مقابل اضافه ولتاژهای ناگهانی از نقطه نظر عایقی ، مقاومت لازم را داشته باشند .

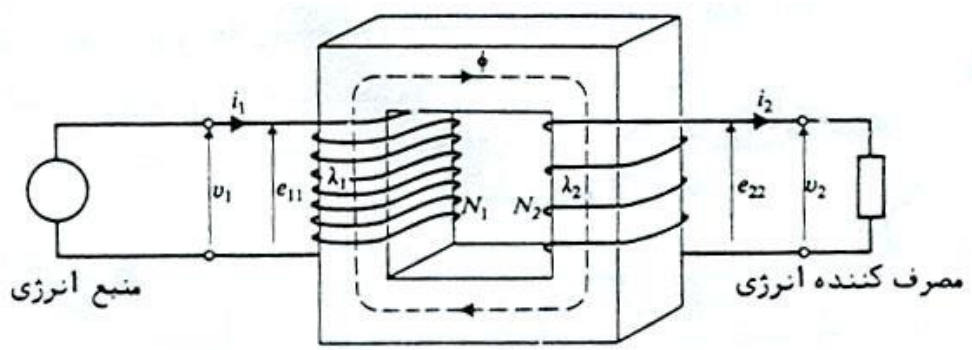
سیم پیچ ترانس ها نسبت به هم در نوع سیم پیچ ، تعداد حلقه ها ،درجه و اندازه سیمها و ضخامت عایق بین حلقه ها متفاوت خواهند بود . هر چه ولتاژ ترانس بالا برود ، تعداد حلقه های سیم پیچ بیشتر می شود و هر چه ظرفیت ترانس بیشتر شود ، اندازه سیم ها بزرگتر می گردد .

کلیه ترانسفورماتور های مصرف داخلی دارای دو سیم پیچ (فشار قوی و فشار ضعیف)می باشند که در ابعاد مختلفی پیچیده میشوند. در ترانس با هسته ستونی ، سیم پیچهای اعم از فشار قوی ، متوسط و فشار ضعیف و سیم پیچ تنظیم بصورت استوانه متحدالمرکز روی ستونهای هسته قرار می گیرند . سیم پیچ های فشار ضعیف از سیم تخت با عایق کاغذی یا فویل مسی بصورت سیم پیچ استوانه ای تولید می گردد و سیم پیچ های فشار قوی از سیم گرد و یا تخت با عایق لاکی بصورت سیم پیچی لایه ای و برای قدرت بالاتر بصورت کلافی و مرکب از قرار گیری کلاف ها بروی هم تشکیل میشود که معمولاً سیم پیچ فشار ضعیف در داخل و فشار قوی در خارج واقع می شوند و ترتیب فوق به این دلیل رعایت می شود که عایق کاری فشار ضعیف نسبت به هسته راحت تر است .

سیم پیچها در کل به دو صورت هستند : نواری ، که غیر قابل تعمیر می باشند یا به صورت طبقه طبقه می باشند که به آنها دیسکی هم گفته می شود و قابل تعمیر هستند . سیم های به کار برده شده در ترانسها ، بسته به قدرت آنها تغییر می کنند مثلاً در قدرتهای پایین و متوسط از سیم های با سطح مقطع کوچک و گرد استفاده می شود . در ترانس هایی با قدرت بالا از شمشهایی با سطح مقطع مربعی و یا نواری استفاده می شود . نحوه ی قرار گرفتن سیم پیچ ها معمولاً در ترانسهای قدرت ، ابتدا سیم پیچ ثانویه یا فشار ضعیف پیچیده می شود و سپس سیم پیچ اولیه یا فشار قوی پیچیده می شود . این کار به خاطر این است که در صورت اتصالی ، سیم پیچ فشار قوی از هسته و اتصال به بدنه دور بماند و همچنین از بالا رفتن شدت میدان میان سیم پیچ اولیه و هسته جلوگیری شود ..

ساختمان ترانسفورماتورترانسفورماتورها را با توجه به کاربرد و خصوصیات آنها به سه دسته کوچک متوسط و بزرگ دسته بندی کرد. ساختن ترانسفورماتورهای بزرگ و متوسط به دلیل مسایل حفاظتی و عایق بندی و امکانات موجود ، کار ساده ای نیست ولی ترانسفورماتورهای کوچک را می توان بررسی و یا ساخت. برای ساختن ترانسفورماتورهای کوچک ، اجزای آن مانند ورقه آهن ، سیم و قرقره را به سادگی می توان تهیه نمود .

ترانسفورماتورهایی که در شبکه های قدرت بکار میروند لازم است از تلف نشدن انرژی اطمینان حاصل کرد برای اینکار سیم پیچی ها روی هسته فرومغناطیسی طوری پیچیده میشوند که توسط جریان هر سیم پیچی شار زیادی در هسته تولید شود و تا حد امکان این شار حلقه های بیشتری از سیم پیچی دیگر را روی هسته در بر بگیرد . شکل (۱) ترانسفورماتوری مرکب از دو سیم پیچی را روی یک هسته فرومغناطیسی نشان میدهد در عمل طراح معمولا ترانسفورماتور را بدلائلی که بعدا خواهیم گفت با این شکل ابتدائی طرح نمیکند .



(شکل ۱) اساس ترانسفورماتور قدرت با دو سیم پیچی

برای تحلیل عملکرد ترانسفورماتور یک مدل ریاضی از آن باید ساخته شود اولین مدلی که از ترانسفورماتور ساخته میشود ترانسفورماتور ایده ال است و برای آن فرض میشود که :

۱. میدان الکتریکی تولیدی توسط سیم پیچها ناچیز است

۲. مقاومت سیم پیچی ها صرفنظر کردنی است

۳. تمام شار مغناطیسی به هسته فرومغناطیسی محدود میشود

۴. ضریب نفوذ نسبی ماده هسته بقدری بالاست که نیروی محرکه مغناطیسی لازم برای تولید شار در هسته بسیار کم است

۵. تلفات هسته قابل صرفنظر کردن است

اگر اختلاف پتانسیل υ_1 به دو سر سیم پیچی N_1 در شکل (۱) اعمال شود جریان i_1 از آن سیم پیچی عبور میکند نیروی محرکه مغناطیسی منتجه $N_1 i_1$ شار Φ را در هسته و شار λ_1 در برگیرنده سیم پیچی N_1 را تولید میکند اگر υ_1 با زمان تغییر کند i_1 و Φ و λ_1 با زمان تغییر خواهند کرد و نیروی محرکه الکتریکی e_{11} در سیم پیچی N_1 القا خواهد شد بطوریکه :

$$e_{11}=\frac{d\lambda_1}{dt}\ \mathrm{V} \qquad (۱)$$

اگر جریان و شار افزایش یابند نیروی محرکه القایی در پیچک با تغییر جریان مخالفت خواهد کرد (قانون لنز) که در جهت شکل (۱) عمل میکند چون فرض بر اینست که تمام شار در هسته محدود میشود و تمام حلقه های سیم پیچی N_1 را در برمیگیرد سپس :

$$\lambda_1=N_1\Phi \quad \mathrm{Wb} \qquad (۲)$$

و :

$$e_{11}=N_1\frac{d\Phi}{dt}\ \mathrm{V} \qquad (۳)$$

بعلاوه چون مقاومت سیم پیچی N_1 ناچیز فرض میشود سپس :

$$\mathrm{V}\ \nu_1=e_{11} \qquad (۴)$$

شار Φ نیز سیم پیچی N_2 را در بر میگیرد و شار در برگیرنده λ_2 را تولید مینماید اگر شار افزایش یابد نیروی محرکه الکتریکی e_{22} در سیم پیچی N_2 القاء شده که در جهت شکل (۱) عمل میکند و مقدار آن :

$$e_{22}=\frac{d\lambda_2}{dt}=N_2\frac{d\Phi}{dt}\ \mathrm{V} \qquad (۵)$$

اگر بار غیرفعال خارجی به دو سر سیم پیچی N_2 وصل شود e_{22} باعث عبور جریان i_2 طبق شکل (۱) خواهد شد چون مقاومت سیم پیچی N_2 ناچیز فرض میشود نتیجه اینست که :

$$\nu_2=e_{22} \qquad (۶)$$

بنابراین باتوجه به سه فرض اول :

$$\frac{v_1}{v_2}=\frac{e_{11}}{e_{22}}=\frac{N_1}{N_2} \qquad (۷)$$

یعنی نسبت پتانسیلها مساوی نسبت تعداد دورهاست و :

$$v_1=\frac{N_1}{N_2}v_2 \qquad (۸)$$

نیروی محرکه مغناطیسی خالص هسته در هر لحظه عبارتست از :

$$\zeta=N_1i_1-N_2i_2 \quad \mathbf{A} \qquad (۹)$$

با فرض ۴ :

$$N_1i_1-N_2i_2=0 \qquad (۱۰)$$

این فرض معادل نمایش حلقه λ-I هسته با خط مستقیم مماس بر محور λ است از معادله (۱۰) :

$$i_1=\frac{N_2}{N_1}i_2 \qquad (۱۱)$$

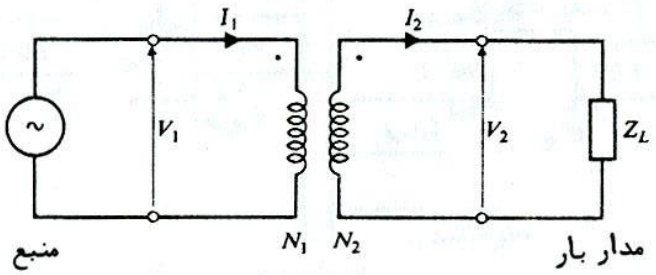
جریانی در سیم پیچی N_1 نمیتواند وجود داشته باشد مگر اینکه جریان متناظری درسیم پیچی N_2 موجود باشد یعنی جریان i_2 باعث وجود جریان i_1 خواهد بود بنابراین نسبت جریانها عکس نسبت تعداد دورهاست .

از معادلات (۸) و (۱۱) داریم :

$$v_1i_2=v_2i_2 \quad \mathbf{W} \qquad (۱۲)$$

که : (۱۳) قدرت لحظه ای خروجی = قدرت لحظه ای ورودی

این مطلب قابل پیش بینی است زیرا فرضهای ۱و۲ و۵ تمام تلفات و ذخیره انرژی را در ترانسفورماتور نفی میکند . اگر اختلاف پتانسیل υ_1 تابع سینوسی از زمان باشد دستگاه از مدار منبع ترانسفورماتور و مدار واکنشی متصل به آن تشکیل یافته که میتوان آنرا با نموداری با نمایش مقدار مؤثر یا rms متغیرها نشان داد . چنین نموداری در شکل (۲) رسم شده که در آن ترانسفورماتور ایده آل با دو سیم پیچی ساده N_1 و N_2 روی هسته را حذف میکند این اطلاعات با گذاشتن نقطه در سرهای دو سیم پیچی در شکل (۲) نمایش داده شده اند . سرهای سیم پیچی ها که روی آنها نقطه گذاری شده است بطور همزمان نسبت به سرهای دیگر دو سیم پیچی پتانسیل مثبت دارند .



(شکل۲) ترانسفورماتور ایده‌آل

از معادلات (۸) و (۱۱) میتوان معادلات برداری زیر را مستقیما نوشت :

$$\bar{V}_1 = \frac{N_1}{N_2}\bar{V}_2 \ \mathbf{V} \qquad (۱۴)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{N_2}{N_1}\bar{I}_2 \quad \mathbf{A} \qquad (۱۵)$$

که از آن :

$$\frac{\bar{V}_1}{\bar{I}_1} = \left[\frac{N_1}{N_2}\right]^2 \frac{\bar{V}_2}{\bar{I}_2} = \left[\frac{N_1}{N_2}\right]^2 Z_L \ \mathbf{\Omega} \qquad (۱۶)$$

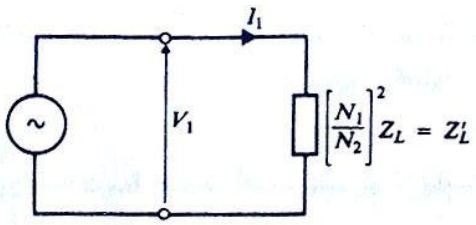
که :

$$Z_L = \frac{\bar{V}_2}{\bar{I}_2} \qquad (۱۷)$$

Z_L مقاومت ظاهری مدار واکنشی وصل به دو سر سیم پیچی N_2 است.

معادله (۱۶) نشان میدهد همانطور که از دستگاه اندازه گیری وصل به منبع مشخص است مدار را میتوان معادل شکل (۳) در نظر گرفت که در آن ترانسفورماتور ایده آل و بار غیرفعال وصل به آن با مقومت ظاهری زیر جانشین شده اند :

$$\mathbf{\Omega}\ Z'_L = \left[\frac{N_1}{N_2}\right]^2 Z_L \qquad (۱۸)$$



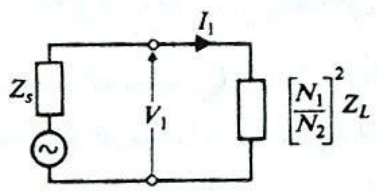
(شکل۳) مقاومت ظاهری بار ازجاع شده به طرف منبع ترانسفورماتور ایده‌آل

مقاومت ظاهری Z_L را Z_L ارجاع شده بطرف N_1 ترانسفورماتور گویند بنابراین نسبت تعداد دورها در ترانسفورماتور میتواند مقاومت ظاهری مؤثر بار تغذیه شده توسط منبع را تغییر دهد . این خاصیت ترانسفورماتور را میتوان برای بدست آوردن قدرت حداکثر از منبع که دارای مقاومت ظاهری داخلی Z_S است بکار برد .در شکل (۴) برای بدست آوردن قدرت انتقالی حداکثر از منبع با مقاومت ظاهریZ_S به بار اهمی با مقاومت ظاهری Z_L ، لازم است نسبت تعداد دورها طوری انتخاب شود که :

$$\Omega \quad Z'_L = \left[\frac{N_1}{N_2}\right]^2 Z_L = Z_S \qquad (۱۹)$$

برای حداکثر قدرت انتقالی وقتی Z_L مختلط باشد . (۲۰) $\Omega \quad Z'_L = Z^*_S$

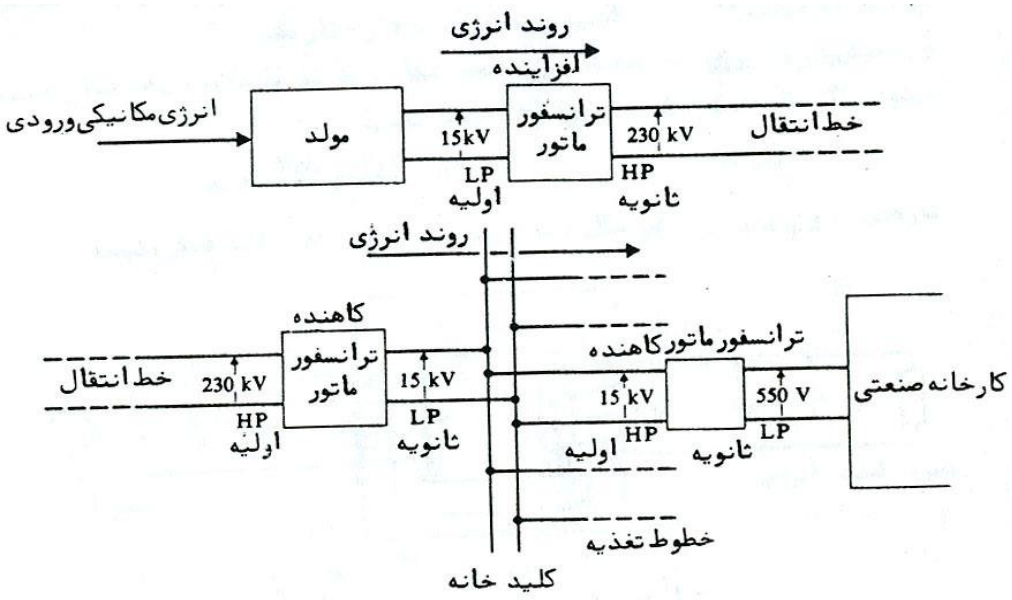
که Z^*_S مزدوج Z_S است .



(شکل٤) حداکثر انتقال قدرت

در عمل که روند جهت انرژی از ترانسفورماتور معلوم است معمولا یک سیم پیچی را بعنوان اولیه و دیگری را ثانویه قلمداد میکنند سیم پیچی اولیه به منبع انرژی وصل است و از آن انرژی میگیرد سیم پیچی ثانویه به شبکه مصرف وصل است و به آن انرژی میدهد معمولا یک سیم پیچی برای اختلاف پتانسیل بالاتر از دیگری طرح میشود اما ترانسفورماتور جداکننده که برای جداسازی دو مدار الکتریکی از یکدیگر بکار میرود دوسیم پیچی یکسان دارد در شرایطی که انرژی در هر دو جهت از ترانسفورماتور میتواند عبور کند سیم پیچی ها را فشارقوی و فشار ضعیف مینامند وقتی سیم پیچی فشار ضعیف اولیه باشد آنرا ترانسفورماتور افزاینده و وقتی سیم پیچی فشارقوی اولیه باشد آنرا کاهنده میگویند هر ترانسفورماتور را میتوان بصورت افزاینده یا کاهنده اختلاف پتانسیل بکار برد و محل آن در شبکه نوع آنرا تعیین میکند .

شکل (۵) این حالات را نشان میدهد که مدار یکفاز بدون کلید نشان داده شده است که در عمل مدار سه فاز همراه با کلید بکار میرود



(شکل۵) نمودار بلوکی یک نمونه شبکه توزیع انرژی

فرکانس ، اختلاف پتانسیل ، جریان و قدرت ترانسفورماتور که برای آن طرح شده مقادیر نامی ترانسفورماتور نامیده میشوند . اختلاف پتانسیل نامی باتوجه به اینکه لازم است هسته در چگالی شار زیر حد اشباع کار کند محدود میگردد جریان نامی با میزان تلفاتی که حرارت زیادی در ترانسفورماتور تولید نکند محدود میشود بنابراین دیده میشود معیاری که قدرت ترانسفورماتور را تعیین میکند باید قدرت ظاهری S به ولت آمپر باشد نه قدرت حقیقی به وات .مقادیر نامی ترانسفورماتور کمیات آنرا هنگام کار با حداکثر ظرفیتش نشان میدهند نه در یک شرایط خاص .

مثال (۱) یک ترانسفورماتور 60Hz ، 50KVA ، 2400/240v برای کاهش ولتاژ از خط انتقال به شبکه توزیع خانگی بکار میرود .

الف :چه مقاومت ظاهری به دو سر سیم پیچی فشارضعیف وصل شود تا بار کامل تحویل دهد ؟

ب : مقدار این مقاومت ظاهری ارجاع شده به طرف فشارقوی ترانسفورماتور چقدر است ؟

ج : جریان در سیم پچی فشارقوی چقدر است ؟

ترانسفورماتور را ایده آل فرض کنید .

حل : الف : چون ترانسفورماتور بدون تلفات است قدرت ظاهری در هر دو سیم پیچی یکی است یعنی :

$$S=V_1I_1=V_2I_2$$

که از آن :

$$I_2 = \frac{S}{V_2} = \frac{50\times10^3}{240} = 20$$

$$Z_L = \frac{V_2}{I_2} = \frac{240}{208} = 1.15$$

این مقاومت ظاهری ممکن است اهمی ، القائی و یا ترکیب آنها باشد.

ب :

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{2400}{240} = 10$$

$$Z'_L = \left[\frac{N_1}{N_2}\right]^2 Z_L = 10^2 \times 1.15 = 11 \ \Omega$$

ج :

$$I_1 = \frac{S}{V_1} = \frac{50\times10^3}{2400} = 20.8 \ \text{A}$$

مدار معادل خطی ترانسفورماتور دو سیم پیچه

ترانسفورماتور ایده آل مدل دقیقی برای تمام موارد نیست و وقتی بررسی دقیق تر ترانسفورماتور لازم باشد مدلی که به ترانسفورماتور واقعی نزدیکتر باشد باید بکار برد و این بدان معنی است که فرضیات بکار رفته در مدل واقعی باید نسبت به مدل ایده آل تقریب بیشتری داشته باشند مدلی که برای بررسی دقیق عمل ترانسفورماتور دراغلب حالات کار مناسب است با در نظرگرفتن فرضهای زیر ساخته میشود :

۱. **میدانهای الکتریکی ناشی از سیم پیچی ها قابل صرفنظر کردنند**

۲. **مقاومت سیم پیچی ها را میتوان با پارامترهای متمرکز در سرهای سیم پیچی ها نشان داد**

۳. **شار تولیدی توسط نیروی محرکه مغناطیسی یک سیم پیچی به دو بخش متمایز تقسیم میشود :**

a. **شار پراکندگی که تمام حلقه های سیم پیچی مولد نیروی محرکه مغناطیسی را در برمیگیرد و حلقه های سیم پیچی دیگر را در بر نمیگیرد .**

b. **شار متقابل که تمام حلقه های هر دو سیم پیچی را در بر میگیرد .**

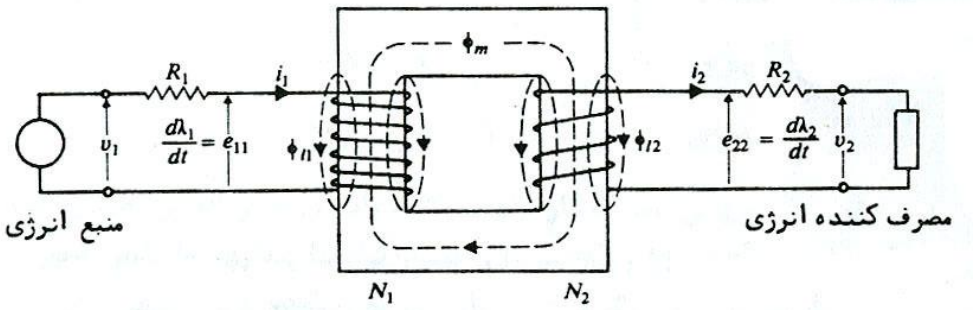
۴. **ضریب نفوذ هسته ثابت است**

۵. **تلفات هسته صرفنظر کردنی است**

فرضهای ۱ و ۵ با فرضهای مربوط به مدل ایده آل ترانسفورماتور یکسانند نتیجه فرضهای ۲و۳ در شکل (۶) آمده است که مدار مغناطیسی وسط شکل ترانسفورماتور را با سیم پیچی های بی مقاومت نشان میدهد این مدار مغناطیسی دیگر نماینده ترانسفورماتور واقعی نیست . شار پراکندگی تولیدی توسط دو سیم پیچی با علائم ϕ_{l1} و ϕ_{l2} مشخص شده اند که جهات آنها با جهات i_1 و i_2 مطابقت دارد شار متقابل که هر دو سیم پیچی را دربر میگیرد و با نیروی محرکه مغناطیسی منتجه آنها تولید شده با علامت Φ_m نشان داده میشود . اگر مقاومت مغناطیسی هسته R_m باشد سپس :

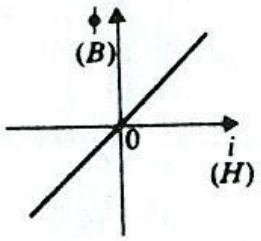
$$\Phi_m = \frac{N_1 i_1 - N_2 i_2}{R_m} \qquad (۲۱)$$

شارهای Φ_{l1} و Φ_{l2} و Φ_m در شکل (۶) وقتی $N_1 i_1 > N_2 i_2$ باشد همگی مثبتند .



(شکل٦) نتیجه فرضهای ۲ و ۳

نتیجه فرضهای ۴و۵ در شکل (۷) آمده است که نمونه چرخه B-H را برای ماده هسته یا حلقه Φ-i را برای هسته و یکی از سیم پیچی ها نشان میدهد چون تلفات هسته صفر فرض میشود سطح حلقه صفر است چون ضریب نفوذ ثابت فرض میشود رابطه خطی بین Φ و i وجود دارد و از این رابطه خطی است که مدار معادل خطی نام گرفته است .



(شکل۷) نتیجه فرضهای ۴ و ۵

وقتی هر دو سیم پیچی حامل از :

$$\Phi_1 = \Phi_{l1} + \Phi_m \qquad (۲۲)$$

بهمین ترتیب شار دربر گیرنده سیم پیچی N_2 عبارتست از : $$\Phi_2 = -\Phi_{l2} + \Phi_m \qquad (۲۳)$$

چون شارهای کل که سیم پیچی های N_1 و N_2 را دربر میگیرد عبارتند از :

$$\lambda_1 = N_1\Phi_1 \ , \ \lambda_2 = N_2\Phi_2 \quad \mathbf{Wb} \qquad (۲۴)$$

از شکل (۶) :

$$v_1 = R_1 i_1 + e_{11} = R_1 i_1 + \frac{d\lambda_1}{dt} \qquad (۲۵)$$

$$v_2 = -R_2 i_2 + e_{22} = -R_2 i_2 + \frac{d\lambda_2}{dt} \qquad (۲۶)$$

نیروی محرکه الکتریکی القائی در دو سیم پیچی از معادلات (۲۲) تا (۲۴) بصورت زیر بیان میگردند .

$$e_{11} = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \frac{d\Phi_{l1}}{dt} + N_1 \frac{d\Phi_m}{dt} \qquad (۲۷)$$

$$e_{22} = \frac{d\lambda_2}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi_{l2}}{dt} + N_2 \frac{d\Phi_m}{dt} \quad \mathbf{V} \qquad (۲۸)$$

ضریب القاء پراکندگی دو سیم پیچ را میتوان بصورت زیر تعریف کرد :

$$L_{l1} = \frac{N_1\Phi_{l1}}{i_1} \quad , \quad L_{l2} = \frac{N_2\Phi_{l2}}{i_2} \qquad (۲۹)$$

و نیروی محرکه الکتریکی القائی در سیم پیچی ها بوسیله شار متقابل Φ_m عبارتست از :

$$, \ N_1 \frac{d\Phi_m}{dt} = e_1 \quad N_2 \frac{d\Phi_m}{dt} = e_2 \qquad (۳۰)$$

با جانشین کردن معادلات (۲۷)- (۳۰) در معادلات (۲۵) و (۲۶) نتیجه میشود :

$$v_1 = R_1 i_1 + L_{l1} \frac{di_1}{dt} + e_1 \qquad (۳۱)$$

$$v_2 = -R_2 i_2 - L_{l2} \frac{di_2}{dt} + e_2 \qquad (۳۲)$$

این دو رابطه در شکل (۸) نمایش داده شده اند که مدار مغناطیسی در وسط نماینده ترانسفورماتوری است که سیم پیچی های آن بدون مقاومت اهمی و القائی پراکندگی است .

از معادله (۳۰) :

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad (۳۳)$$

نسبت این نیروهای محرکه الکتریکی معادل نسبت اختلاف پتانسیلهای دو سر یک ترانسفورماتور ایده آل با N_1 و N_2 دور است . میتوان آنها را بصورت اختلاف پتانسیل دو سر ترانسفورماتور شکل (۸) قلمداد کرد . این

ترانسفورماتور ایده آل نیست چون نیروی محرکه الکتریکی خالص عمل کننده روی هسته صفر نیست زیرا ضریب نفوذ هسته بینهایت نمیباشد .

اگر i'_m جریان سیم پیچی N_1 باشد که بتنهایی برای تولید شار متقابل Φ_m لازم است این جریان را میتوان جریان مغناطیس کننده ارجاع شده به سیم پیچی N_1 نامید و لذا :

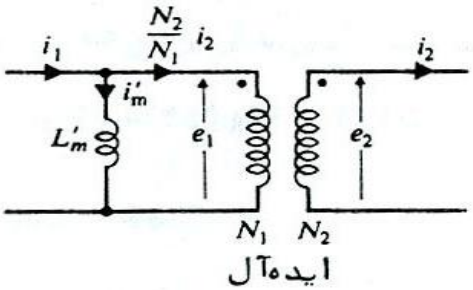
$$N_1 i'_m = N_1 i_1 - N_2 i_2 \qquad (۳۴)$$

که از آن :

$$i_1 = i'_m + \frac{N_2}{N_1} i_2 \qquad (۳۵)$$

چون i'_m جریانی است که شار تولید میکند ، باید در مدار القائی جریان یابد بنابراین معادلات (۳۳) و (۳۵) را میتوان برای بیان مداری شامل یک ترانسفورماتور ایده آل با یک مقاومت القائی که در آن جریان i'_m عبور میکند و به سیم پیچی N_1 وصل است بکار برد این مدار در شکل (۹) نشان داده شده است . شرطی که نیروی محرکه مغناطیسی منتجه در هسته ترانسفورماتور ایده آل باید صفر باشد برقرار بوده زیرا :

$$N_1 \left[\frac{N_2}{N_1} i_2 \right] - N_2 i_2 = 0 \qquad (۳۶)$$



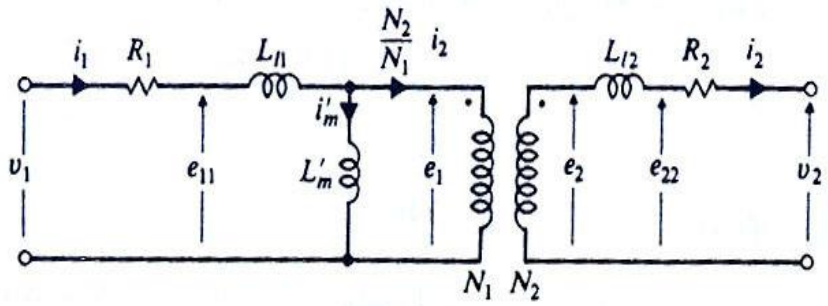
(شکل۹) مدار نماینده معادلات ۳۳ و۳۵

ضریب القاء در شکل (۹) را میتوان بصورت زیر تعیین کرد :

$$L'_m = \frac{N_1 \Phi_m}{i'_m} = \frac{N_1^2}{R_m} \qquad (۳۷)$$

و این ضریب القاء مغناطیس کننده ترانسفورماتور ارجاع شده به سیم پیچی N_1 میباشد .

مدار معادل کامل را میتوان با جانشین کردن مدار شکل (۹) بجای ترانسفورماتور تقریبا ایده آل شکل (۸) بکار برد و باین ترتیب مدار شکل (۱۰) بدست می آید .



(شکل۱۰) مدار معادل خطی ترانسفورماتور

با فرض اینکه جریان مغناطیس کننده در ابتدا i''_m بوده و بتنهایی در سیم پیچی N_2 عبور میکند ضریب القاء L''_m بدست خواهد آمد که با معادله زیر مشخص میگردد :

$$L''_m = \frac{N_2 \Phi_m}{i''_m} = \frac{N_2^2}{R_m} \quad (۳۸)$$ **H**

این ضریب القاء دو سر سیم پیچی N_2 وصل بوده است چون بر اساس آن فرض :

$$N_1 i'_m = N_2 i''_m \quad (۳۹)$$ **A**

سپس از معادلات (۳۷)و(۳۹) :

$$\frac{L'_m}{L''_m} = \left[\frac{N_1}{N_2}\right]^2 \quad (۴۰)$$

بنابراین L''_m ضریب القاء مغناطیس کننده L'_m ارجاع شده به سیم پیچی N_2 خواهد بود .

نمایش مدار تزویج شده یک ترانسفورماتور

ترانسفورماتور دو سیم پیچی شکل (۶) را میتوان با یک مدار خطی شامل دو شاخه با یک ضریب القاء متقابل بین آنها نشان داد . قسم دیگر مدار را میتوان با در نظرگرفتن شار متقابل Φ_m که تمام حلقه های هر دو سیم پیچی را دربر بگیردساخت . این شار مرکب از دو مؤلفه است که هرکدام بوسیله نیروی محرکه مغناطیسی

یکی از سیم پیچی ها تولید میشود بنابراین از معادله (۲۱) :

$$\Phi_m = \frac{N_1 i_1}{R_m} - \frac{N_2 i_2}{R_m} = \Phi_{m1} - \Phi_{m2} \qquad (۴۱)$$

و از معادلات (۲۲)تا (۲۴) :

$$\lambda_1 = N_1(\Phi_{l1} + \Phi_{m1}) - N_1\Phi_{m2} \qquad (۴۲)$$

$$\lambda_2 = -N_2(\Phi_{l2} + \Phi_{m2}) + N_2\Phi_{m1} \qquad (۴۳)$$

در هر دو معادله فوق اولین جمله در طرف چپ شار دربر گیرنده یک سیم پیچی را توسط جریان همان سیم پیچی نشان میدهد در حالیکه جمله دوم شار دربر گیرنده تولیدی در یک سیم پیچی توسط جریان سیم پیچی دیگر خواهد بود ضرایب خودالقاء L_{11} و L_{22} و ضرایب القاء متقابل L_{12} و L_{21} دو سیم پیچی را میتوان بصورت زیر تعیین کرد :

$$L_{11} = \frac{N_1(\Phi_{l1} + \Phi_{m1})}{i_1} \quad , \quad L_{22} = \frac{N_2(\Phi_{l2} + \Phi_{m2})}{i_2} \quad \mathbf{H} \qquad (۴۴)$$

$$, L_{12} = \frac{N_1\Phi_{m2}}{i_2} \quad L_{21} = \frac{N_2\Phi_{m1}}{i_2} \quad \mathbf{H} \qquad (۴۵)$$

از معادله (۴۱) داریم :

$$\Phi_{m2} = \frac{N_2 i_2}{R_m} \quad , \quad \Phi_{m1} = \frac{N_1 i_1}{R_m} \qquad (۴۶)$$

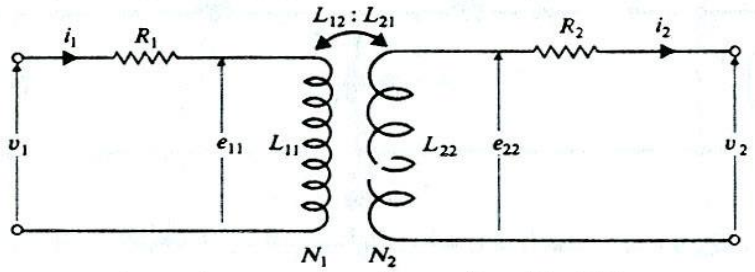
با جانشین کردن Φ_{m1} و Φ_{m2} در معادله (۴۵) نتیجه میشود :

$$, L_{12} = \frac{N_1 N_2}{R_m} \quad L_{21} = \frac{N_2 N_1}{R_m} \quad \mathbf{H} \qquad (۴۷)$$

بنابراین :

$$L_{12} = L_{21} \quad \mathbf{H} \qquad (۴۸)$$

ضرایب القاء در معادلات قبل را اکنون میتوان همراه با مقاومتهای سیم پیچی در مدار شکل (۱۱) نشان داد . متغیرهای این مدار متناظر با مدار معادل شکل (۱۰) بوده باید توجه داشت که مدار شکل (۱۱) یک قسمت از مدار معادل ترانسفورماتور شکل (۱۰) است ولی بااینحال بطور معمول به آن نام مدار معادل میدهند .



(شکل۱۱) نمایش مدار تزویج شده ترانسفورماتور

با جانشین کردن معادلات (۴۴) و (۴۵) در معادلات (۴۲) و (۴۳) چنین خواهیم داشت :

$$\lambda_1 = L_{11} i_1 - L_{12} i_2 \qquad (۴۹)$$

$$\lambda_2 = -L_{22} i_2 + L_{12} i_1 \qquad (۵۰)$$

که در آن L_{12} ضریب القاء متقابل دو سیم پیچی میباشد .

$$e_{11} = \frac{d\lambda_1}{dt} = L_{11}\frac{di_1}{dt} - L_{12}\frac{di_2}{dt} \quad \text{V} \qquad (۵۱)$$

$$e_{22} = \frac{d\lambda_2}{dt} = -L_{22}\frac{di_2}{dt} + L_{12}\frac{di_1}{dt} \quad \text{V} \qquad (۵۲)$$

و از شکل (۱۱) :

$$v_1 = R_1 i_1 + L_{11}\frac{di_1}{dt} - L_{12}\frac{di_2}{dt} \quad \text{V} \qquad (۵۳)$$

$$v_2 = -R_2 i_2 - L_{22}\frac{di_2}{dt} + L_{12}\frac{di_1}{dt} \quad \text{V} \qquad (۵۴)$$

چون مدارهای شکلهای (۱۰) و (۱۱) مدلهای مختلف یک دستگاه هستند باید بین دو دسته پارامتر رابطه ای برقرار باشد از اینرو از معادله (۴۴) :

$$L_{11} = \frac{N_1 \Phi_{l1}}{i_1} + \frac{N_1 \Phi_{m1}}{i_1} \quad \text{H} \qquad (۵۵)$$

$$L_{22}=\frac{N_2\Phi_{l2}}{i_2}+\frac{N_2\Phi_{m2}}{i_2} \qquad (۵۶)$$

دو جمله طرف راست معادله (۵۵) مؤلفه های ضریب القاء L_{11} هستند اولی قبلا با معادله (۲۹) مشخص شده و ضریب القاء پراکندگی سیم پیچی N_1 میباشد جمله دوم که شار متقابل دربر گیرنده سیم پیچی N_1 بر آمپرجریان N_1 است نیز در معادله (۳۷) مشخص گردیده است که ضریب القاء مغناطیس کننده ترانسفورماتور ارجاع شده به سیم پیچی N_1 میباشد بنابراین از معادله (۵۵) :

$$L_{11}=L_{l1}+L'_m \qquad (۵۷)$$

وبهمین ترتیب : $$L_{22}=L_{l2}+L''_m \qquad (۵۸)$$

از معادلات (۳۷) و (۴۷) :

$$L'_m=\frac{N_1^2}{R_m}=\frac{N_1}{N_2}L_{12} \qquad (۵۹)$$

از معادلات (۳۸) و (۴۷) : $$L''_m=\frac{N_2^2}{R_m}=\frac{N_2}{N_1}L_{12} \qquad (۶۰)$$

مدارتزویج شده شکل (۱۱) اغلب برای نشان دادن ترانسفورماتور دو سیم پیچی بدون هسته مغناطیسی بکار میرود و بندرت برای نمایش ترانسفورماتور با هسته آهن استفاده میشود زیرا ضریب نفوذ نسبی هسته خیلی بالاست و مقاومت مغناطیسی هسته R_m خیلی کوچک بوده و مقادیر L_{11} و L_{22} و L_{12} بزرگ خواهند بود اگر هسته کامل فرض شود یعنی با ضریب نفوذ بینهایت تمام ضرایب القاء بینهایت شده و معادلات (۵۳) و (۵۴) نامعین خواهند شد .

ترانسفورماتور با تحریک سینوسی

وقتی اختلاف پتانسیل v_1 اعمال شده از منبع انرژی به سیم پیچی N_1 ترانسفورماتور تابع سینوسی از زمان باشد و شبکه خطی به دو سر سیم پیچی N_2 وصل باشد کل شبکه را میتوان با مدار شکل (۱۲a) نشان داد که در آن تمام متغیرها تابع سینوسی از زمانند مقادیر مؤثر متغیرها روی مدار نشان داده شده است و ضرایب القاء با مقاومتهای القائی به ازاء فرکانسی که ترانسفورماتور کار میکند جایگزین شده اند برای مثال :

$$X_{l1}=2\pi fL_{l1}=\omega L_{l1} \qquad (۶۱)$$

برای جهت روند انرژی نشان داده شده سیم پیچی N_1 را میتوان سیم پیچی اولیه و N_2 را ثانویه درنظر گرفت . تحلیل مدار را میتوان با ارجاع متغیرها و پارامترها در یک طرف ترانسفورماتور ایده آل بطرف دیگر ساده کرد مثلا وقتی تمام کمیات ثانویه به طرف اولیه ارجاع شود مدار شکل (b ۱۲) بدست می آید مقادیر کمیات ارجاع شده را میتوان از معادلات (۸) و (۱۱) و (۱۸) بدست آورد .

$$E_2' = \frac{N_1}{N_2} E_2 \equiv E_1 \qquad (۶۲)$$

$$V_2' = \frac{N_1}{N_2} V_2 \qquad (۶۳)$$

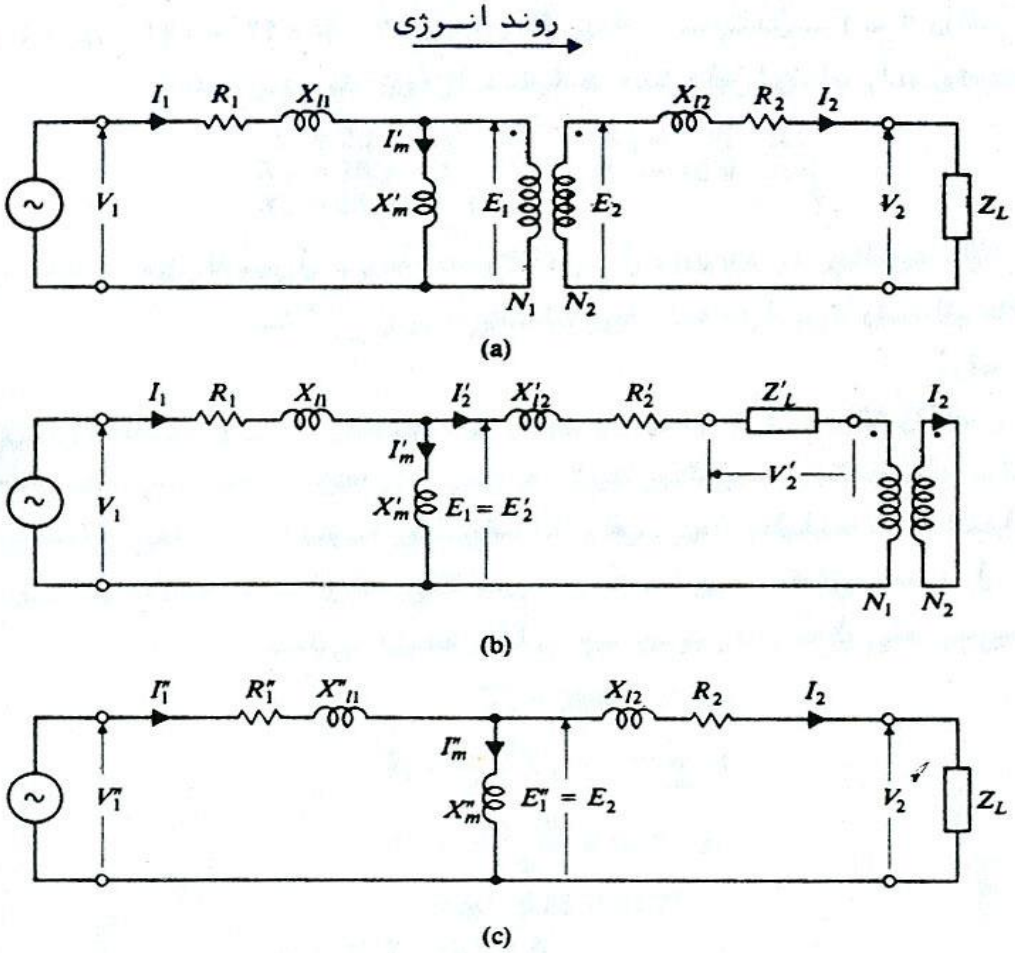
$$I_2' = \frac{N_2}{N_1} I_2 \ \mathbf{A} \qquad (۶۴)$$

$$Z_L' = \left[\frac{N_1}{N_2}\right]^2 Z_L \qquad (۶۵)$$

$$X_{l2}' = \left[\frac{N_1}{N_2}\right]^2 R_2 \ \ \Omega \qquad (۶۶)$$

$$R_2' = \left[\frac{N_1}{N_2}\right]^2 R_2 \qquad (۶۷)$$

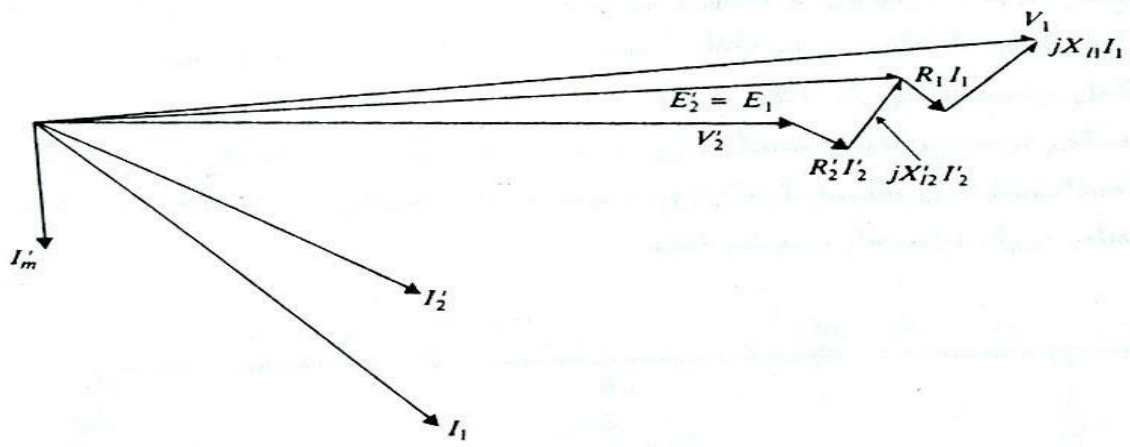
بعد از این تبدیلات دو سر ثانویه ترانسفورماتور ایده آل اتصال کوتاه میشود که به این ترتیب اختلاف پتانسیل بین دو سر سیم پیچی اولیه صفر است . بنابراین این دو سر را میتوان اتصال کوتاه فرض کرد و باین ترتیب ترانسفورماتور ایده آل را از مدار معادل حذف نمود .



(شکل۱۲) مدارهای معادل ترانسفورماتور با تحریک سینوسی

برعکس هر عنصر در طرف اولیه ترانسفورماتور منجمله منبع را میتوان به طرف ثانویه انتقال داد و در نتیجه مدار شکل (c ۱۲) را بدست آورد که ترانسفورماتور ایده آل در مدار معادل وجود ندارد میتوان معادلات نظیر معادلات (۶۲) تا (۶۷) را برای تعیین مقادیر متغیرها و پارامترها در مدار اخیر نوشت انتخاب اینکه کمیات به اولیه ارجاع داده شوند (شکلb ۱۲) و یا به ثانویه (شکل c ۱۲) بستگی به مسئله مورد نظر دارد . نمودار برداری مدار معادل ارجاع شده به اولیه ترانسفورماتور در شکل (۱۳) آمده است برای رسم نمودار برداری فرض میشود که مدار بار دارای مقاومت اهمی و القائی است و بنابراین در ضریب توان پس فاز کار میکند از آنجا که در محاسبات ترانسفورماتور نکته مهم اثر ترانسفورماتور بر مدار بار است بردار V_2 را میتوان بعنوان بردار مبنا در نظر گرفت بطوریکه :

$$\mathbf{V}\,\mathbf{V}_2' = V_2' \angle 0 \qquad (۶۸)$$



(شکل۱۳) نمودار برداری شکل (b) ۱۲

اثر مقاومتهای سیم پیچی و مقاومتهای القایی پراکندگی و همچنین مقدار جریان مغناطیس کننده در شکل (۱۳) خیلی بزرگ در نظر گرفته شده است در عمل این کمیات بقدری کوچکند که بردارهای نمایش دهنده آنها با یک مقیاس خطای ترسیمی خواهد داشت . بنابراین نمودار برداری صرفا راهنمای مفیدی برای محاسبه مقدار متغیرهای مدار خواهد بود .

مثال (۲) یک ترانسفورماتور یکفاز 20KVA ، 2200/220v ، 60Hz دارای پارامترهای مدار ارجاع شده به طرف فشار قوی بشرح زیر است :

$X'_m = 25{,}100\Omega$ و $X'_{l2} = 1.09\Omega$ و $X_{l1} = 1.09\Omega$ و $R'_2 = 3.11\Omega$ و $R_1 = 2.51\Omega$

ترانسفورماتور بار 15KVA را در 220 ولت با ضریب توان پس فاز ۰/۸۵ تغذیه میکند . اختلاف پتانسیل لازم طرف فشارقوی ترانسفورماتور را پیدا کنید .

حل :از مدار معادل شکل (12 b) و نمودار برداری شکل (۱۳) استفاده میکنیم

باید دانست که ترانسفورماتور قدرت خروجی نامی خود را تحویل نمیدهد همچنین نسبت اختلاف پتانسیل های نامی سرهای ترانسفورماتور ضریب تبدیل نامی ترانسفورماتور ایده آل را بدست میدهد این نسبت با تقریب کافی همان نسبت اختلاف پتانسیلها در حالت بی بار با مدار باز بودن سرهای فشار ضعیف میباشد.

$$V'_2 = \frac{2200}{220} V_2 = 2200\angle 0^\circ \text{ v} \qquad V_2 = 2200\angle 0^\circ$$

$$COS^{-1}(0.85) = 31.7^\circ \qquad I_2 = \frac{15\times 10^3}{220} = 68.2$$

$$I_2 = 68.2\angle -31.7^\circ$$

$$I'_2 = \frac{220}{2200} \times 68.2\angle -31.7^\circ = 6.82\angle -31.7^\circ$$

از شکل (12 b) :

$$E_1 = V'_2 + (R'_2 + jX'_{l2}) I'_2 = 2200\angle 0^\circ + (3.11 + j1.09)6.82\angle -31.7^\circ = 2260\angle 1.3^\circ$$

$$I'_m = \frac{E_1}{jX'_m} = \frac{2260\angle 1.3^\circ}{25{,}100\angle 90^\circ} = 0.09\angle -88.7^\circ$$

قابل توجه است که I'_m در مقایسه با I'_2 خیلی کوچکتر است .

$$I_1 = I'_2 + I'_m = 6.82\angle -31.7^\circ + 0.09\angle -88.7^\circ = 6.87\angle -32.3^\circ$$

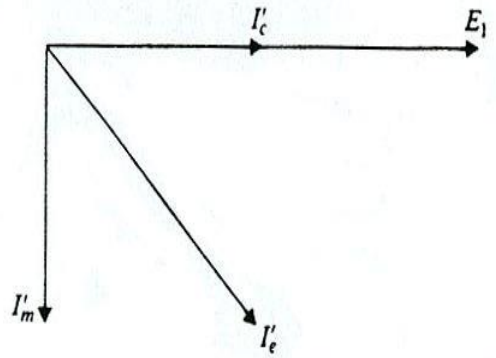
$$V_1 = E_1 + (R_1 + jX_{l1}) I_1 = 2260\angle 1.3^\circ + (2.51 + j1.09)6.87\angle -32.3^\circ = 2311\angle 2.6^\circ$$

بنابراین در مقایسه با مقدار ولتاژ نامی 2200V معادل $V_1 = 2311$ میباشد اختلاف پتانسیل اضافی 111V برای جبران افت ولتاژ ناشی از مقاومت ظاهری ترانسفورماتور لازم است .

تلفات هسته ترانسفورماتور

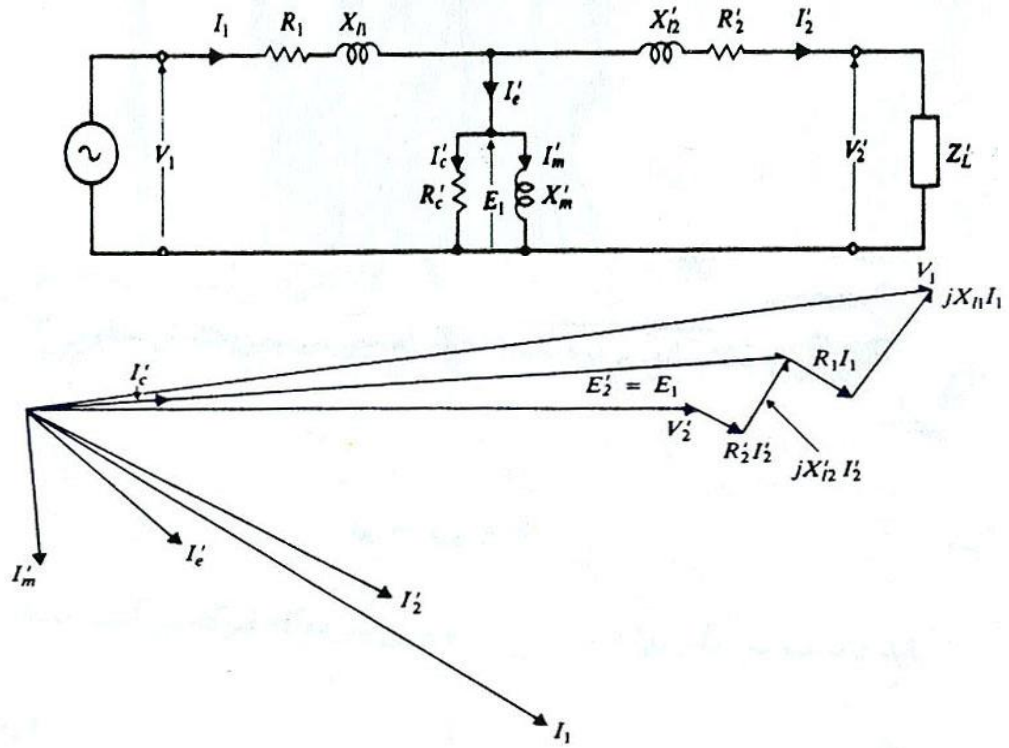
تلفات هسته در ترانسفورماتور دقیقا بهمان دلائلی رخ میدهد که در القاءگر پیش می آید بعلاوه ترانسفورماتور در حالت بی بار مانند یک القاءگر با مقاومت ظاهری بالا بدون فاصله هوائی عمل میکند در این شرایط جریان

تحریک آن همانند یک القاءگر است که از دو مؤلفه I'_m مؤلفه مغناطیس کننده و I'_c مؤلفه تلفات هسته ساخته شدده است با فرض اینکه این مؤلفه ها سینوسی باشد نمودار برداری نمایش دهنده روابط آنها با نیروی محرکه الکتریی القاء شده در سیم پیچی اولیه در شکل (۱۴) نشان داده شده است .



(شکل۱٤) نمودار برداری ترانسفورماتور و مؤلفه‌های جریان تحریک

عنصر R_c به مدار معادل ترانسفورماتور اضافه شده تا نماینده قدرت نظیر تلفات هسته باشد . مدار معادل کامل ترانسفورماتور که تلفات هسته آن صفر نباشد در شکل (۱۵) آمده است نمودار برداری متناظر ترانسفورماتوری که مدار باری با ضریب توان پس فاز را تغذیه میکند در شکل (۱۶) آمده است که قابل مقایسه با شکل (۱۳) میباشد مقدار جریان I'_c در عنصر تلفات هسته R_c با مقیاس بزرگ در نمودار رسم شده است .



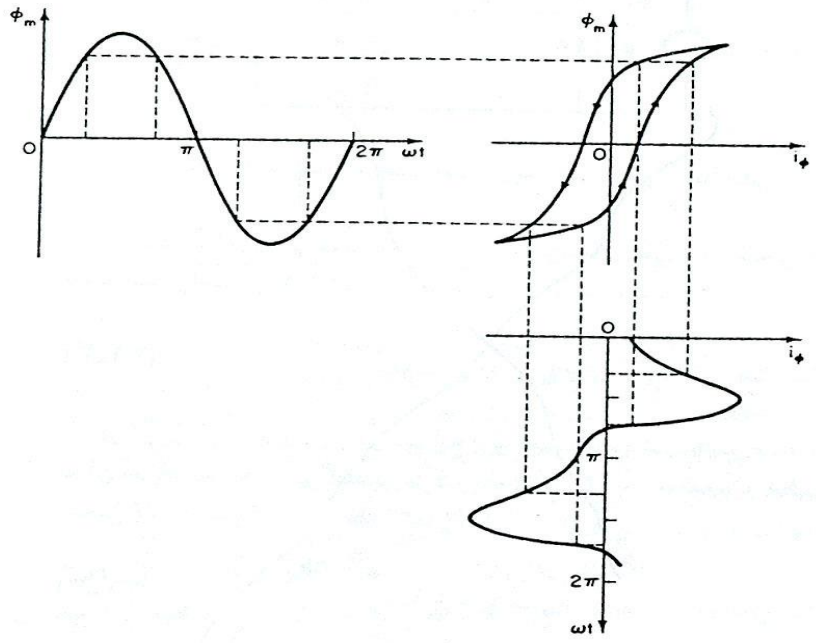
(شکل۱٦) نمودار برداری شکل ۱۵

از طرفی گیریم شار $\Phi_m(t)$ سینوسی میباشد برطبق شکل (۱۷) درمیابیم که جریان تحریک یعنی $i_\Phi(t)$ پریودیک میباشد اما دیگر سینوسی کامل نیست با استفاده از سری فوریه میتوان یک تابع پریودیک منجمله جریان تحریک ترانسفورماتور را اینچنین نوشت :

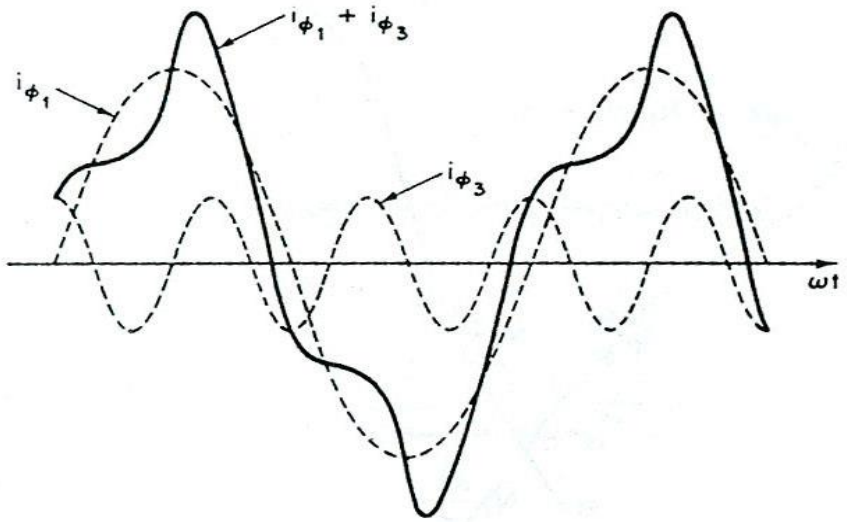
$$i_\Phi = i_{\Phi 1} + i_{\Phi 3} + .. \qquad (۶۹)$$

باید دانست که $i_{\Phi 1}$ و $i_{\Phi 3}$ و ... توابع سینوسی بوده که فرکانس آنها معادل فرکانس ولتاژ ، سه برابر فرکانس ولتاژ منبع ، پنج برابر فرکانس منبع و ... میباشد . به این مؤلفه ها هارمونیک اول ، هارمونیک سوم ، هارمونیک پنجم و ... اطلاق میگردد . لذا جریان تحریک ترانسفورماتور حاوی هارمونیکهای فرد میباشد البته باید در نظر داشت که در جریان تحریک دامنه هارمونیکهای سوم و بالاتر در مقابل دامنه هارمونیک اول ناچیز است و لذا در مدلسازی ترانسفورماتور برای مقاصد عملی از همان هارمونیک اول استفاده کرده و از بقیه صرفنظر میکنیم شکل (۱۸) هارمونیکهای اول و سوم و کل جریان تحریک را نشان میدهد .

حال مدل ترانسفورماتور تکفاز را با فرض سینوسی بودن شار و جریان تحریک (هارمونیک اول) را توسعه میدهیم . با توجه به منحنیهای شار یا $\Phi_m(t)$ و جریان تحریک (هارمونیک اول) یا $i_{\Phi 1}(t)$ در میابیم که بین آنها اختلاف فاز وجود دارد البته اگر مشخصه Φ-i یا λ-i خطی باشد نباید انتظار داشت که بین شار و جریان تحریک اختلاف فازی پدید آید و لذا برای مدل کردن مسیر جریان تحریک از یک اندوکتانس استفاده میکنیم اما در حالت کلی برای بین شار و جریان تحریک موجد آن اختلاف فاز وجود دارد و این امر در شکل (۱۹) نشان داده شده است .



(شکل۱۷) چگونگی پیدایش جریان تحریک ترانسفورماتور از یک شار سینوسی

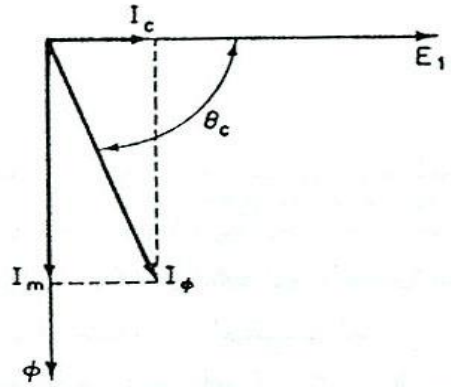


(شکل۱۸) نمایش هارمونیکهای اول و سوم از جریان تحریک ترانسفورماتور

طبق شکل در میابیم که I_Φ دو مؤلفه دارد

۱. $i_m(t)$ که جریان مغناطیسی شوندگی نام دارد و با شار همفاز است .

۲. $i_c(t)$ جریانی که با E_1 همفاز است و تلفات هسته را تأمین میکند .



(شکل۱۹) نحوه نمایش فازوری جریان تحریک ترانسفورماتور

باتوجه به دو جریان فوق الذکر میتوان مسیر آنها را با یک مقاومت یا کندوکتانس G_c و یک راکتانس یا سوستپانس B_m مدلسازی نمود .

عملکرد ترانسفورماتور

تلفات در ترانسفورماتور بصورت حرارت در هسته و سیم ژیچی ها در میآید که برای گرم نشدن زیادی آن و سریع نشدن زوال عایق باید از ترانسفورماتور خارج شود . چون امکان انتقال حرارت از هر ترانسفورماتور

محدودیتی دارد حد متعادلی باید برای تلفات قدرت که مجاز است قرار داد . چنانچه از این مدار معادل در شکل (۱۵) دیده میشود .

تلفات هسته W $P_c = \frac{E_1^2}{R_c} =$ (۷۰)

تلفات مس W $= P_\omega = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2$ (۷۱)

این معادلات نشان میدهند که حرارت مورد انتقال بستگی به اختلاف پتانسیلی دارد که ترانسفورماتور با آن کار میکند و همچنین به جریان سیم پیچی ها وابسته است ولی به ضریب توان مدار بار بستگی ندارد . به این دلیل چنانچه قبلا تذکر داده شد قدرت نامی ترانسفورماتور (مانند هر دستگاه جریان متناوب دیگر) بر حسب قدرت ظاهری به ولت آمپر در اختلاف پتانسیل نامی بیان میشود تا به قدرت حقیقی به کیلووات .

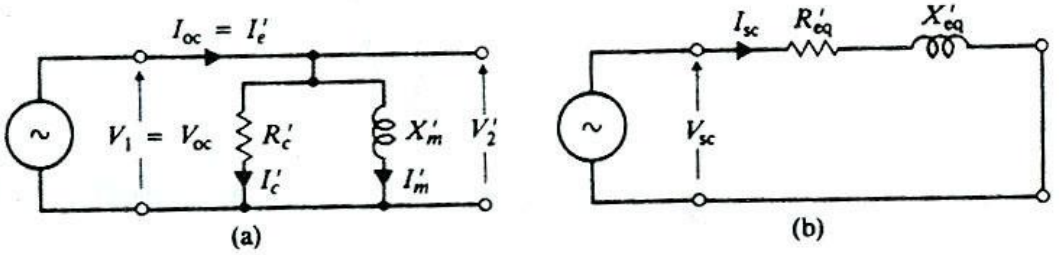
تعیین پارامترهای مدارمعادل

طراح ترانسفورماتور باید بنواند پارامترهای مدار معادل و همچنین قابلیت ترانسفورماتور را برای انتقال حرارت با انتخاب روش خنک کردن ارزیابی کند و بنابراین قادر باشد قدرت خروجی مجاز هر طرح و جزئیات عملکرد را پیش بینی نماید . وقتی ترانسفورماتور ساخته شد مطلوی است که از دقت این پیش بینی مطمئن شد و این را میتوان با آزمایشهائی که برای تعیین پارامترهای مدار معادل در نظر گرفته شده انجام داد .

آزمایشها را میتوان با استفاده از هر سیم پیچی بعنوان اولیه بسته به اختلاف پتانسیلی که سیم پیچی ها طرح شده اند و منابع در دسترس انجام داد برای آزمایش ترجیح داده میشود که با اختلاف پتانسیلهایی که خیلی بالا یا خیلی پایین نباشد کار کرد ولتاژ بالا خطرناک است و ولتاژ پایین نامناسب میباشد . برای آزمایشی که با اختلاف پتانسیل نامی انجام می گیرد اغلب بهتر است که از سیم پیچی فشارضعیف استفاده کرد چون احتمال در دسترس بودن منبع مناسب بیشتر است برای آزمایشهایی که با اختلاف پتانسیل کم انجام میگیرند اغلب بهتر است که از سیم پیچی فشارقوی استفاده کرد زیرا معمولا منبع مناسب در دسترس قرار دارد در زیر فرض میشود که یک سیم پیچی بعنوان اولیه برای هر دو نوع آزمایش بکار میرود . اندازه گیریهایی که امجم میشود مستقیما مدار معادل ارجاع شده به طرف اولیه ترانسفورماتور را میدهند .

الف : آزمایش مدارباز

در این آزمایش اختلاف پتانسیل نامی با فرکانس نامی به دو سر اولیه اعمال میشود در حالیکه دوسر ثانویه باز است چون R_c و X'_m خیلی بزرگتر از R_1 و X_{l1} اند .مدار معادل برای این آزمایش در شکل (۲۰ a) نشان داده شده است که در آن X'_{l2} و R_2 را میتوان حذف کرد چون I'_2 صفر است در این شرایط جریان اولیه همان جریان تحریک I'_e ترانسفورماتور است . I'_e و V_1 و V_2 و P_{oc} توان ورودی ترانسفورماتور اندازه گیری میشود از این اندازه گیریها نسبت تعداد دور V_1/V_2 را میتوان محاسبه و بازبینی کرد و R_c و X'_m را حساب کرد . P_{oc} علا تلفات هسته ترانسفورماتور را در هر شرایط کار نشان میدهد زیرا E_1 تنها با تغییر جریان ترانسفورماتور بطور جزئی تغییر میکند .



(شکل۲۰) مدارهای معادل آزمایش ((a)) مدار باز ((b)) اتصال کوتاه

ب : آزمایش اتصال کوتاه :

در این آزمایش ولتاژ V_{sc} که کسری از اختلاف پتانسیل نامی لازم برای تولید جریان اولیه نامی در فرکانس نامی است به دو سر اولیه اعمال میشود درحالیکه دو سر ثانویه اتصال کوتاه است چون R_c و X'_m خیلی بزرگتر از R_2 و X'_{l2} است مدار معادل این آزمایش در شکل (۲۰ b) نشان داده شده است که R_{eq} و X'_{eq} مقائمت معادل و مقاومت القائی پراکندگی معادل میباشند و بصورت زیر تعریف میشوند :

$$R'_{eq} = R_1 + R'_2 \quad \Omega \qquad (۷۳)$$

$$\Omega \; X'_{eq} = X_{l1} + X'_{l2} \qquad (۷۴)$$

V_{sc} و I_{sc} و P_{sc} قدرت ورودی ترانسفورماتور سنجیده میشوند از این اندازه گیریها R_{eq} و X'_{eq} محاسبه شده و سپس معمولا فرض میشود که :

$$X_{l1} = X'_{l2} = \frac{X'_{eq}}{2} \qquad (۷۵)$$

معنی این روابط اینست که مسیرهای شار پراکندگی هر دو سیم پیچ یک مقاومت مغناطیسی $\mathbf{R_1}$ دارند و لذا :

$$X_{l2}=\frac{\omega N_2^2}{R_1} \quad , \quad X_{l1}=\frac{\omega N_1^2}{R_1} \quad \Omega \qquad (۷۶)$$

بطوریکه :

$$X'_{l2}=\left[\frac{N_1}{N_2}\right]^2 X_{l2}=\frac{\omega N_1^2}{R_1}=X_{l1} \qquad (۷۷)$$

ج : اندازه گیری مقاومت سیم پیچها :

$\mathbf{R_1}$ و $\mathbf{R_2}$ را میتوان با پل وستون یا کلوین اندازه گرفت چنین سنجشهائی مقاومت سیم پیچی ها را با جریان مستقیم بدست میدهند که ممکن است اختلاف قابل ملاحظه ای با مقاومتهای حالت جریان متناوب داشته باشند زیرا توزیع جریان متناوب در هادیها غیریکنواخت است. این مطلب را میتوان با تعیین R_{eq} از آزمایش اتصال کوتاه و مقایسه آن با مقاومت **dc** سیم پیچی ارجاع شده به اولیه ترانسفورماتور کنترل کرد . اگر $\mathbf{R_1}$ و $\mathbf{R_2}$ مقادیر **dc** باشند مقاومت معادل **dc** عبارتست از :

$$R_{dc}=R_1+\left[\frac{N_1}{N_2}\right]^2 R_2 \quad \Omega \qquad (۷۸)$$

اگر R_{dc} با R_{eq} اختلاف قابل ملاحظه ای داشته باشند مقاومت **ac** سیم پیچی ارجاع شده به اولیه را میتوان با تقسیم R_{eq} بر نسبت دو جمله طرف راست معادله (۷۸) تعیین کرد .

مثال (۳) مقادیر زیر از آزمایشهای مربوط به ترانسفورماتور توزیع **10KVA** و **2300/230V** و **60Hz** بدست آمده است :

آزمایش مدار باز با تحریک سیم پیچی فشارضعیف

اختلاف پتانسی اعمال شده $V_{oc}=230V$ ، جریان $I_{oc}=0.45A$ ، توان ورودی $P_{oc}=70W$

آزمایش اتصال کوتاه با تحریک تحریک سیم پیچی فشارقوی

اختلاف پتانسیل اعمال شده $V_{sc}=12V$ ، جریان $I_{sc}=4.5A$ ، توان ورودی $P_{sc}=24W$

مقاومتهای سیم پیچی که با پل **dc** اندازه گیری شده است

$R_{ap}=5.8\Omega$ ، $R_{lp}=0.06\Omega$

الف : مدار معادل ترانسفورماتور ارجاع شده به طرف فشارضعیف را مشخص کنید .

ب : جریان تحریک ترانسفورماتور را بصورت درصد جریان بار کامل (نامی) بیان کنید .

حل :

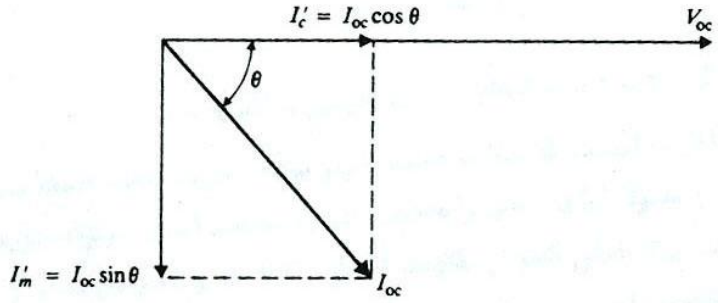
الف : برای آزمایش مدار باز تلفات مس در سیم پیچی فشارضعیف عبارتست از :

$$P_{\omega} = R_{tp} I_{oc}^{2} = 0.060 \times 0.45^{2} = 0.016$$

این بخش کوچکی از توان ورودی در حالت مدار باز است و میتوان از آن صرفنظر نمود ضریب توان مدار باز عبارتست از :

$$\cos(\theta) = \frac{P_{oc}}{V_{oc} I_{oc}} = \frac{70}{230 \times 0.45} = 0.676 \Rightarrow \theta = 47.4^{\circ}$$

نمودار برداری این آزمایش متناظر با مدار شکل (۲۰a) در شکل (۲۱) نشان داده شده است که از این نمودار :



(شکل۲۱) نمودار برداری مدار شکل (a) ۲۰

$$R_c' = \frac{V_{oc}}{I_{oc} \cos(\theta)} = \frac{230}{0.45 \times 0.676} = 75($$

$$X_m' = \frac{V_{oc}}{I_{oc} \sin(\theta)} = \frac{230}{0.45 \times 0.737} = 69.$$

و این پارامترها اندازه گیری شده و بطرف فشار ضعیف ارجاع داده میشوند .

مدار آزمایش اتصال کوتاه در شکل (۲۰ b) نشان داده شده است که از این نمودار :

$$R_{eq}' = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^{2}} = \frac{240}{4.5^{2}} = 1.185$$

مقاومت ظاهری ترانسفورماتور در حالت اتصال کوتاه :

$$Z_{sc} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{120}{4.5} = 26.7\ \Omega$$

بطوریکه :

$$X'_{eq}=\left[Z_{sc}^{2}-\left(R'_{eq}\right)^{2}\right]^{1.2}=\left[2.67^{2}-1.18^{2}\right]^{1.2}=2.4$$

و این پارامترها اندازه گیری شده و بطرف فشارقوی ترانسفورماتور ارجاع داده میشوند با ارجاع بطرف فشار ضعیف :

$$X''_{eq}=\left(\frac{230}{2300}\right)^{2}X'_{eq}=0.24$$

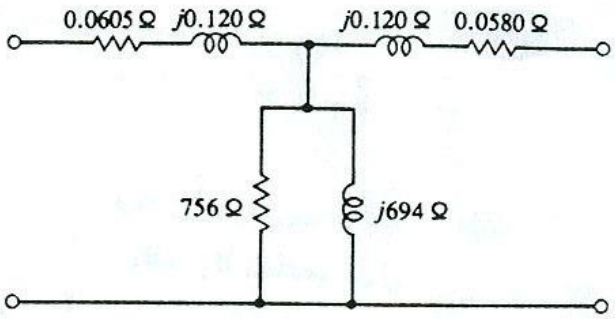
بطوریکه :

$$X_{l2}=X''_{l1}=\frac{0.24}{2}=0.12$$

مقاومت سیم پیچی فشارقوی ارجاع شده بطرف فشار ضعیف :

$$R''_{hp}=\left(\frac{230}{2300}\right)^{2}R_{hp}=0.05$$

مدار معادل ترانسفورماتور ارجاع شده بطرف فشار ضعیف در شکل (۲۲) آمده است .



(شکل۲۲) مدار معادل ترانسفورماتور مثال ۳

ب : توان خروجی نامی S ترانسفورماتور **10KVA** است بنابراین جریان بار کامل در طرف فشار ضعیف عبارتست از :

$$\mathbf{A}\qquad I_{lp}=\frac{S}{V_{lp}}=\frac{10\times10^{3}}{230}=43.5$$

جریان تحریک I_{oc} است که بعنوان درصدی از جریان بار کامل :

$$\frac{I_{oc}}{I_{lp}}\times100\%=\frac{0.45}{43.5}\times100\%=1.04\%$$

مدار معادل تقریبی

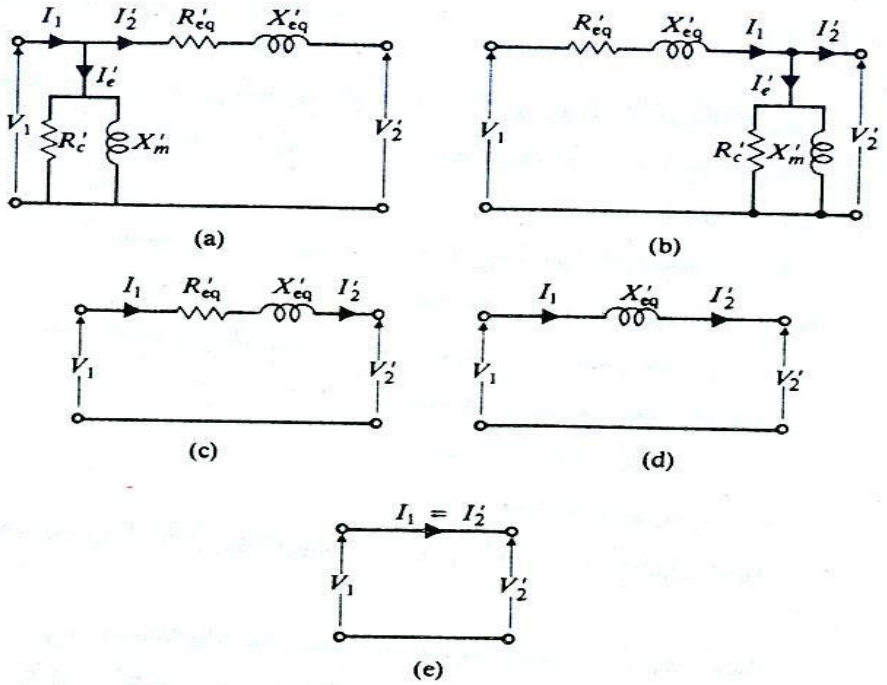
بندرت لازم میشود که مدار معادل کامل شکل (۱۵) را برای بررسی عملکرد ترانسفورماتور با دقت کافی بکار

برد . محاسبات مربوط به استفاده مدار معادل با تقریب بیشتر بسیار کاهش می یابد در شکل (۲۳) یک سری مدار معادل تقریبی با دقتهای مختلف جهت بررسی عملکرد ترانسفورماتور نشان داده شده اند . مدارهای (a) و (b) بر این فرض قرار دارند که :

$$V_1 \cong E_1 \cong E_2' \cong V_2' \qquad (۷۹)$$

شاخه مغناطیس کننده R_c و X_m' موازی بوده و میتوان آنرا در نقطه ای که مسئله براحتی حل شود قرار داد و مقدار I_e' زیاد تحت تأثیر قرار نمیگیرد . مدار (c) بر اساس این فرض ساده شده که جریان تحریک I_e' در مقایسه با جریان سیم پیچی I_1 ناچیز است .

این فرض متناظر با اینست که تلفات هسته ناچیز بوده و ضریب نفوذ هسته بسیار بالاست . مدار (c) معمولا برای یافتن رابطه بین V_1 و V_2 مناسب است . در ترانسفورماتور های بزرگتر مقاومت R_{eq} خیلی کمتر از مقاومت القائی X_{eq}' است و بنابراین مدار (d) الگوی مناسبی برای تعیین رابطه بین V_1 و V_2 میباشد بالاخره اختلاف پتانسیل روی مقاومت القائی پراکندگی در مقایسه با اختلاف پتانسیل اعمال شده میتواند باندازه ای کوچک باشد که بتوان آنرا با مدار ایده آل آن نشان داد (e).



(شکل۲۳) مدارهای معادل تقریبی ترانسفورماتور

بازده (راندمان)

در ترانسفورماتوری که خوب طرح شده باشد تلفات هسته و مس نسبتا کوچکند بطوریکه بازده خیلی بالاست که برای ترانسفورماتورهای بزرگ در حدود ۹۹٪ خواهد بود درصد بازده را میتوان بصورت زیر تعریف کرد :

$$\eta = \frac{\text{توان فعال خروجی}}{\text{توان فعال ورودی}} \times 100\% \qquad (۸۰)$$

$$= \frac{\text{توان خروجی}}{\text{تلفات مس+تلفات هسته+توان خروجی}} \times 100\% \qquad (۸۱)$$

نسبت توان خروجی به ورودی را نمیتوان با اندازه گیری مستقیم این دو کمیت به دقت بدست آورد زیرا اختلاف بین آنها در همان حدود خطای اندازه گیری آنهاست لیکن تلفات مس را میتوان برای هر شرایط کار وقتی جریانهای سیم پیچی و مقاومتهای آنها معلوم باشند تعیین کرد تلفات هسته بستگی به چگالی شار حداکثر تولیدی در هسته دارد و درنتیجه بستگی به اختلاف پتانسیل دو سر ترانسفورماتور خواهد داشت چون ترانسفورماتور قدرت در اختلاف پتانسیل ثابتی کار میکند ، تلفات هسته تقریبا ثابت بوده و معمولا میتوان آنرا معادل توان ورودی بی بار ترانسفورماتور در نظر گرفت (مثال۳) بنابراین اگر پارامترهای مدار معادل ترانسفورماتور معلوم باشد در هر شرایط بازده کار را میتوان تعیین کرد .

نسبت تلفات هسته به تلفات مس در توان خروجی نامی ممکن است برای طرحهای متفاوت ترانسفورماتور برای شرلیط مختلف کار متفاوت باشد دلیل این امر را میتوان از بررسی مدار معادل تقریبی شکل (a ۲۳) بدست آورد .

$$\text{تلفات هسته} = \frac{V_1^2}{R_c} \text{ ثابت} \qquad (۸۲)$$

$$\text{تلفات مس} = R'_{eq}(I'_2)^2 \text{ ثابت} \qquad (۸۳)$$

اگر ضریب توان بار $\cos(\theta)$ باشد بازده ترانسفورماتور چنین است :

$$\eta = \frac{V'_2 I'_2 \cos(\theta)}{V'_2 I'_2 \cos(\theta) + P_c + R'_{eq}(I'_2)^2} \times 100\% \qquad (۸۴)$$

اگر $\cos\theta$ بار ثابت باشد برای بازده حداکثر داریم : $\frac{d\eta}{dI_2'}=0$ (۸۵)

میتوان ثابت کرد که :

$$\mathbf{W}\ P_c = R_{eq}'(I_2')^2 = P_\omega \qquad (۸۶)$$

بنابراین برای حداکثر بازده کار تلفات هسته باید معادل تلفات مس باشد . ترانسفورماتور قدرت که معمولا در نزدیکی ظرفیت نامی خود کار میکند و در هنگامی که لازم نباشد از مدار خارج میشود معمولا برای حداکثر بازده در توان خروجی نامی یا نزدیک به آن طرح میگردد . برای یک ترانسفورماتور توزیع که ۲۴ ساعته کار بکند و در اغلب ساعات زیر توان خروجی نامی خودش کار میکند مطلوب آنست که برای بازده حداکثر در نزدیکی توان خروجی متوسط طرح گردد . یعنی نسبت تلفات هسته به تلفات مس در بار کامل در ترانسفورماتور توزیع کمتر از ترانسفورماتوری است که برای بار ثابت طرح شده است کمیت مهم در ترانسفورماتور توزیع بازده روزانه یا بازده انرژی آن است که بصورت زیر بیان میشود :

$$\eta_{AD}=\frac{\text{انرژی خروجی در ۲۴ ساعت}}{\text{انرژی ورودی در ۲۴ ساعت}}\times 100\% \qquad (۸۷)$$

این مقدار را در صورتیکه برنامه بار ترانسفورماتور معلوم باشد میتوان تعیین کرد

مثال (۴) : ترانسفورماتور توزیع مثال (۳) باری را در ۲۳۰ولت با ضریب توان ۰/۸۵ تغذیه میکند .

الف : درصد بار کامل (نامی) را که در آن بازده ترانسفورماتور حداکثر است پیدا کنید و بازده را در این بار تعیین نمائید .

ب : ترانسفورماتور در ضریب توان ثابت با برنامه باردهی زیر کار میکند.

۹۰٪ بار کامل برای ۶ ساعت ، ۵۰٪ بار کامل برای ۱۰ ساعت ، بی بار برای ۸ ساعت

بازده روزانه یا بازده انرژی ترانسفورماتور را در این شرایط تعیین کنید .

حل :

الف : در بازده حداکثر تلفات هسته معادل تلفات مس است تلفات هسته با توان ورودی آزمایش بی بار تعیین میشود تلفات مس را میتوان با تقریب مناسبی با بکار گرفتن مدار معادل تقریبی شکل (c ۲۳) ارجاع شده

بطرف ثانویه یا فشارضعیف ترانسفورماتور بیان کرد مقاومت معادل $R''_{eq}=0.118\Omega$ مقاومت القائی معادل $X''_{eq}=0.238\Omega$ و بنابراین در بازده حداکثر :

$$W\ P_{eq}=R''_{eq}I_2^2$$

که از آن :

$$I_2=\left(\frac{70}{0.118}\right)^{1/2}=243$$

توان ظاهری خروجی در این بازده عبارتست از :

$$S_2=230\times243=568$$

و درصد آن نسبت به بار کامل S :

$$\frac{S_2}{S}\times100\%=\frac{5680}{10^4}\times100\%=56.8\%$$

توان خروجی فعال در **0.568S** عبارتست از :

$$P=0.568S\times\text{ضریب توان}=5680\times0.85=4820W$$

تلفات مس = تلفات هسته $=P_{oc}=70$

بنابراین بازده حداکثر عبارتست از :

$$\eta_{max}=\frac{4820}{4820+70+70}\times100\%=97.2\%$$

ب : انرژی خروجی در ۲۴ ساعت بر حسب کیلووات ساعت عبارتست از :

$$KWh\qquad 6\times0.9\times10\times0.85+10\times0.5\times10\times0.85=88.3$$

تلفات هسته در ۲۴ ساعت :

$$kWh\qquad 24\times70=1.68$$

جریان بار کامل ارجاع شده بطرف فشار ضعیف **43.5A** بود بنابراین تلفات مس در ۲۴ ساعت عبارت خواهد بود از :

$$KWh\ 6\times(0.9\times435)^2\times0.118+10\times(0.5\times435)^2\times0.118=1.65$$

$$\eta_{AD}=\frac{88.3\times100\%}{88.3+1.68+1.65}=96.3\%$$

ضریب تنظیم(VR)

اختلاف پتانسیل اولیه یک ترانسفورماتور باید طوری باشد که ترانسفورماتور توان خروجی نامی خود را با ثابت نگه داشتن اختلاف پتانسیل در ثانویه تحویل دهد این بدان معنی است که در حالت بی بار اختلاف پتانسیل ثانویه ممکن است از مقدار نامی بعلت اثر مقاومت ظاهری ترانسفورماتور تغییر کند درصد تنظیم ترانسفورماتور بصورت زیر تعریف میشود :

$$= \frac{V_2 \text{ بار نامی} - V_2 \text{ بی بار}}{V_2 \text{ بار نامی}} \times 100\%$$

تنظیم را میتوان با محاسبه اختلاف پتانسیل اولیه لازم جهت تولید ولتاژ نامی ثانویه در بار نامی و سپس محاسبه V_2 در حالت بی بار با همان اختلاف پتانسیل اولیه بدست آورد. برای این منظور معمولا دقت کافی در مدار معادل تقریبی شکل (c ۲۳) وجود دارد که : (۸۹)

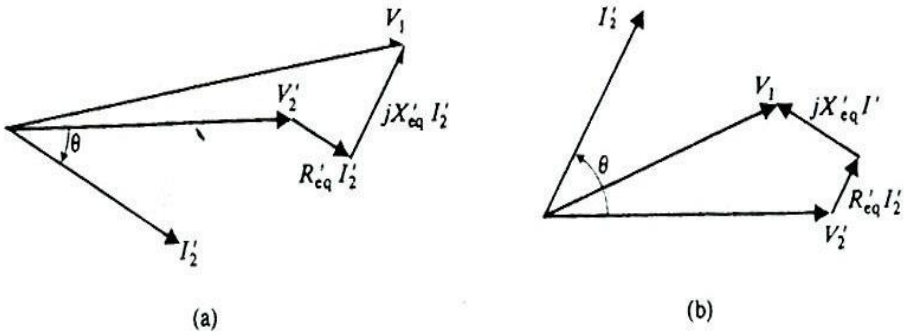
$$I_1 \equiv I_2'$$

در حالت بی بار : (۹۰)

$$V_2 \equiv V_1$$

شکل (۲۴) نمودار برداری مدار معادل شکل (c ۲۳) را در حالت بارداری ترانسفورماتور نشان میدهد طبق معمول بردار اختلاف پتانسیل ثانویه بعنوان مبنا انتخاب میشود و اثر پارامترهای مدار معادل بدون رعایت مقیاس رسم میگردد در شکل (a ۲۴) ضریب توان پس فاز دارد و $V_2 < V_1$ میباشد درشکل (b ۲۴) بار ضریب

توان پیش فاز پائینی دارد و $V_2 > V_1$ است بنابراین تنظیم بسته به طبیعت بار مثبت یا منفی است .



(شکل۲٤) نمودار برداری مدار معادل تقریبی شکل (c-۲۳)

(a) ضریب توان پس فاز (b) ضریب توان پیش فاز

ترانسفورماتورها اغلب با انشعاباتی روی یک سیم پیچی طرح میشوند بطوریکه نسبت تعداد دور در حدود کمی تغییر کند در ترانسفورماتورهای بزرگ تغییر انشعاب اغلب بطور خودکار انجام شده که اختلاف پتانسیل ثانویه را با تغییر بار و ضریب توان آن محسوسا ثابت نگه میدارد در ترانسفورماتورهای توزیع تغییر انشعاب معمولا دستی انجام میگیرد وباید به میزانی تنظیم شود که با برنامه بار مورد تقاضا بهترین عملکرد را داشته باشد تغییر انشعاب نیز میتواند تغییرات ولتاژ اولیه را در اثر مقاومت ظاهری خطوط تغذیه جبران کند .

مثال (۵) : ترانسفورماتور مثال (۳) بارکامل را در ۲۳۰ ولت و ضریب توان ۰/۸ پس فاز تحویل میدهد تعیین کنید :

الف : اختلاف پتانسیل لازم برای اولیه

ب : ضریب توان اولیه

ج : تنظیم ترانسفورماتور

د : تغییر تقریبی در نسبت تعداد دور لازم در صورتیکه اختلاف پتانسیل اولیه در ۲۳۰۰ ولت ثابت بماند .

حل :

چون $\cos^{-1}(0.8)=36.8^\circ$ مدار معادل و نمودار برداری شرایط خاص کار طبق شکل (c ۲۳) و (a ۲۴) میباشد جز اینکه کمیات به دو سیم پیچی ثانویه ارجاع داده شده اند .

الف : چون : $\bar{V}_2=230\angle 0^\circ$ سپس $\bar{I}_2=43.5\angle -36.8^\circ$

$$\bar{V}_1''=\bar{V}_2+(R_{eq}''+jX_{eq}'')\bar{I}_2$$

از مثال (۳) : $R_{eq}''+jX_{eq}''=0.118+j0.238=0.266\angle 63.5^\circ$

بنابراین : $\bar{V}_1''=230\angle 0^\circ+0.266\angle 63.5^\circ\times 43.5\angle -36.8^\circ=240.4\angle 1.24$

درشکل (a ۲۴) زاویه بین $\bar{V}_1''$ و $\bar{V}_2$ برابر 1.24 است .

$$V_1=\frac{2300}{230}\times V_1''=10\times 240.4=2404$$

ب : ضریب توان اولیه عبارتست از : $\cos(36.8+1.24)=0.78$

ج : وقتی بار از ترانسفورماتور برداشته میشود V_2 به مقدار V''_1 (بار کامل) بالا میرود بطوریکه :

بنابراین : $V_2 = 240V$ درصد تنظیم $= \frac{240 - 230}{230} \times 100\% = 4.52$

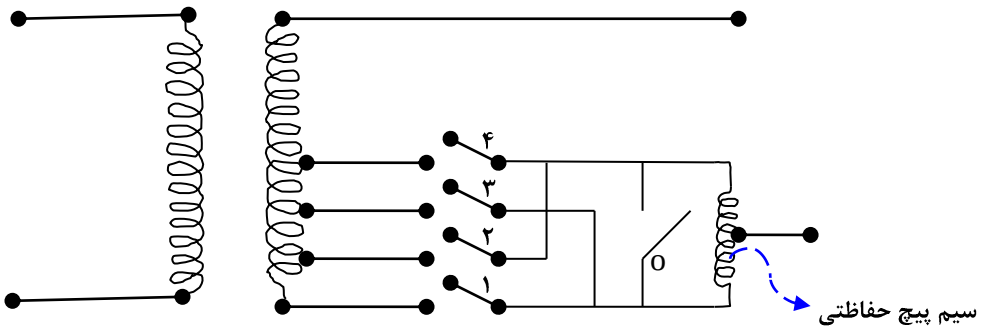
د : نتیجه بند (ج) نشان میدهد که نسبت تعداد دورهای ترانسفورماتور درحالیکه اختلاف پتانسیل ثانویه ثابت بماند باید در حالت بار ۴/۵۲٪کاهش یابد بطوریکه :

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{100 - 4.52}{100} \times 10 = 9.54$$

کنترل ولتاژ ترانسفورماتورتوسط تپ چنجر :

معمولا برای کنترل و تنظیم اختلاف سطح ترانسفورماتورها یکی از سیم پیچی ها را طوری میسازند که تعداد حلقه های آنرا بتوان تغییر داد برای تغییر اختلاف سطح غالبا باید ترانسفورماتور را از سرویس خارج کرد و محل اتصال حلقه های یدکی را به مدار تغییر داد به این ترتیب تعداد حلقه هایی که در تأمین اختلاف سطح شرکت میکنند برای یک مدت طولانی تنظیم میشود با این حال در قطبی از ترانسفورماتور ها یک دسته کلید برای قطع و وصل تعدادی از حلقه های سیم پیچی پیش بینی شده است اختلاف سطح آن را بدون قطع جریان تنظیم میکنند برای اینکار لازم است که پیش از قطع جریان یک حلقه حلقه دیگری در مدار قرار گیرد و در این موقع نباید حلقه هایی که بین دو کلید واقع شده اند اتصال کوتاه شوند . اصول کار و ممکانیسم این طریقه کنترل در شکل (۲۵) نشان داده شده است هر سیم پیچی که جریان از مرکز آن وارد شده و به دو قسمت مساوی تقسیم شود و در دو جهت مخالف از آن عبور کند عملا خاصیت القایی ندارد در حال کار عادی کلید **O** و یکی از کلیدهای دیگر همواره بسته است اگر کلید ۱ بسته باشد تعداد حلقه های متصل به مدار حداکثر خواهد بود برای گذشتن از مرحله ۱ به مرحله ۲ و کاهش اختلاف سطح به این طریق عمل میکنند ابتدا کلید **O** را باز کرده و سپس کلید ۲ را میبندند پس از آن کلید ۱ را باز کرده و کلید **O** را میبندند . درترانسفورماتورهای فشار قوی مکانیسم کنترل اختلاف سطح در طرف فشار ضعیف قرار میگیرد زیرا قطع و وصل جریان در طرف فشارقوی از نظر عایق بندی مشکلاتی دارد . در ترانسفورماتورهایی که با فشارضعیف کار میکنند مکانیسم کنترل در طرف اولیه تعبیه میشود و به همین ترتیب کار میکند درمورد اینگونه

ترانسفورماتورها قطع جریان در طرفی که تعداد آن کمتر باشد آسانتر است در اکثر موارد عملی هدف اصلی عبارت از ثابت نگه داشتن اختلاف سطح در ثانویه ترانسفورماتور است زیرا با تغییر اختلاف سطح اولیه یا مقدار بار این اختلاف سطح تغییر میکند باین جهت مکانیسم کنترل را کاملا خودکار میسازند کلیدها بترتیب خاصی بوسیله یک موتور الکتریکی کوچک قطع و وصل میشوند و این موتور نیز بنوبه خود با رله حساسی که با تغییر اختلاف سطح بکار میافتد کار میکند ترانسفورماتورهایی که به سیستم کنترل خودکار مجهز گردیده اند غالبا دارای ۳۲ مرحله تنظیم ولتاژ هستند و بهمین مناسبت آنها را تنظیم کننده ولتاژ نیز مینامند .



(شکل۲۵)

تنظیم ولتاژ و بهره ترانسفورماتور تکفاز

برای انتخاب ترانسفورماتور تکفاز جهت کاربردی خاص باید به دو کمیت مهم تنظیم ولتاژ و بهره توجه خاص نمود درصد تنظیم ولتاژ تغییرات ولتاژ ثانویه از بی باری تا بار اسمی را تحت ضریب توان ثابت نشان میدهد و اینچنین بیان میشود :

$$PVR=100\frac{|V_{2(noload)}|-|V_{2(rated)}|}{|V_{2(rated)}|} \qquad (۹۱)$$

(درصد تنظیم ولتاژ)

اگر از جریان تحریک صرفنظر شود یعنی شاخه های موازی را از مدل حذف کنیم و کمیتها را به سمت ثانویه ارجاع دهیم مدل ترانسفورماتور تکفاز همچون شکل (۱-۲۶) میشود باتوجه به این شکل میتوان گفت :

$$PVR=100\frac{|V_1/a|-|V_2|}{|V_2|}$$

(درصد تنظیم ولتاژ)

باید دانست نسبت تبدیل اینچنین تعریف میگردد :

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

باتوجه به نمودار فازوری نشان داده شده در شکل (۳-۲۶) داریم :

$$\left|\frac{V_1}{a}\right|=\sqrt{A^2+B^2}=A\left(1+\frac{B^2}{A^2}\right)^{1/2}$$

از ریاضیات بیاد داریم :

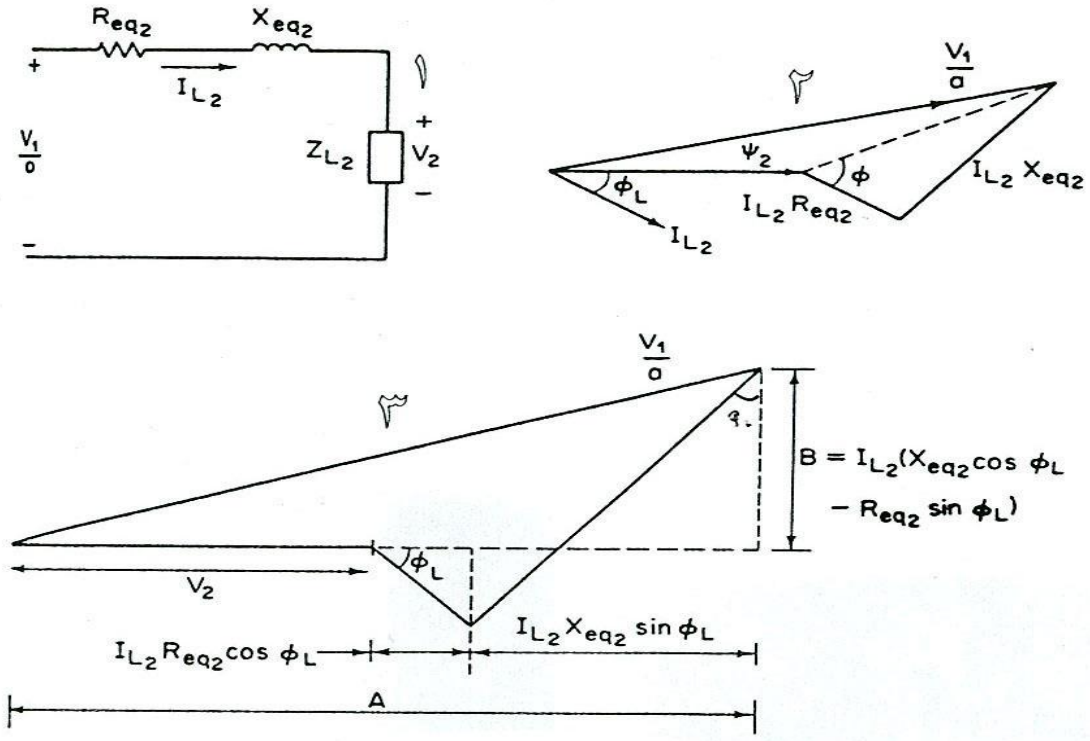
$$\frac{V_1}{a}=A\left(1+\frac{B^2}{2A^2}+\ldots\right)\cong A+\frac{B^2}{2A^2}$$

پس درصد تنظیم ولتاژ اینچنین بیان میشود :

$$PVR=\left(\frac{A-V_2+B^2/2A}{V_2}\right)100\cong\left(\frac{A-V_2+B^2/2V_2}{V_2}\right)10$$

باتوجه به کمیتهای ترانسفورماتور داریم :

$$RVR=100\left\{\frac{I_{L2}\left(R_{eq2}\cos\Phi_L+X_{eq2}\sin\Phi_L\right)}{V_2}+\frac{1}{2}\left[\frac{I_{L2}\left(X_{eq2}\cos\Phi_L-R_{eq2}\sin\Phi_L\right)}{V_2}\right]^2\right\} \qquad (۹۲)$$



۱ـ مدل ساده شده ترانسفورماتور تکفاز نسبت به سمت ثانویه

(شکل ۲۶) ۲ـ نمودار فازوری در حالت کلی

۳ـ نمودار فازوری مناسب برای محاسبه درصد تنظیم ولتاژ

اتصالات ترانسفورماتورهای تکفاز

ترانسفورماتور های تکفاز را میتوان به طرق مختلف به یکدیگر متصل ساخت . گیریم دو ترانسفورماتور تکفاز **A** و **B** در دسترس باشند در زیر انواع اتصالات مربوط به این دو ترانسفورماتور شرح داده و یادآور میشویم که هنگام اتصال دو ترانسفورماتور باید به پلاریته سیم پیچهای آن توجه خاص مبذول داشت .

اتصال سری – سری :

در این اتصال سیم پیچهای اولیه و ثانویه دو ترانسفورماتور **A** و **B** باهم سری میشوند (شکل ۱-۲۷) باتوجه به شکل درمیابیم که :

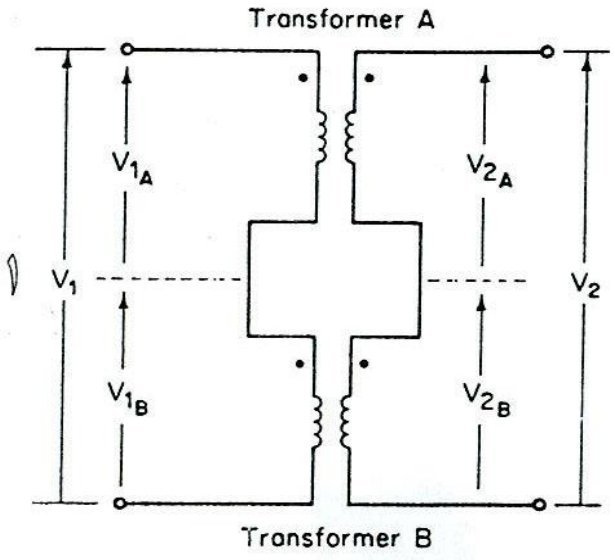
الف : جریان هردو سیم پیچ اولیه یکسان است

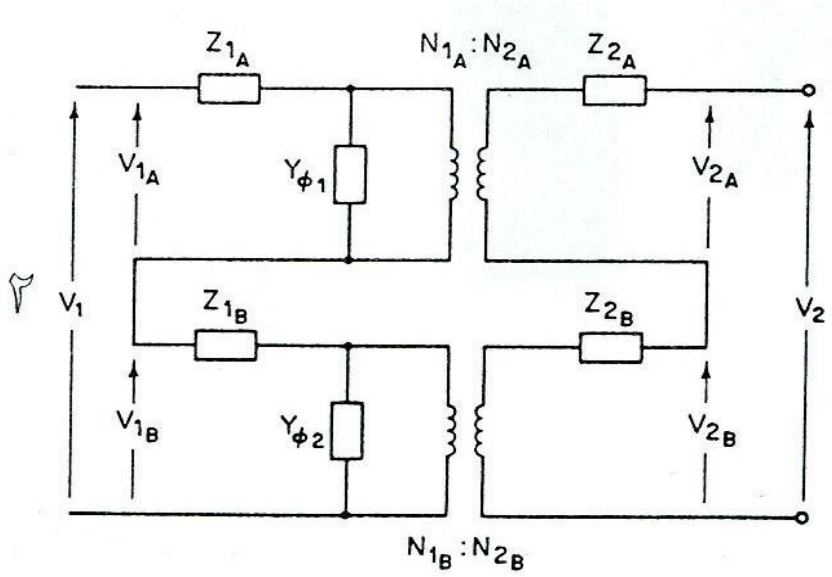
ب : جریان هردو سیم پیچ ثانویه با یکدیگر برابرند

ج : $V_2 = V_{2A} + V_{2B}$

د : $V_1 = V_{1A} + V_{1B}$

باید متذکر شد که جریان عبوری از هر دو سمت نباید از جریان اسمی هر یک از سیم پیچها بیشتر گردد .





(شکل ۲۷)

۱ـ اتصال سری ـ سری

۲ـ مدار معادل

مثال (۶) : دو ترانسفورماتور تکفاز A و B با مشخصات زیر مفروضند :

ولت آمپر ۱۰۰۰= توان اسمی ترانسفورماتور A

ولت آمپر ۶۰۰= توان اسمی ترانسفورماتور B

نسبت تبدیل هر دو ترانسفورماتور یکسان بوده و برابر ۲۴۰/۱۲۰ فرض میگردد این دو ترانسفورماتور را بصورت اتصال سری – سری بهم مربوط میکنیم درباره این اتصال با محاسبات مستدل بحث کنید .

حل :

جریان اسمی دو ترانسفورماتور در سمت اولیه بقرار زیر است :

$$I_{1Ar}=\frac{1000}{240}=4.16A$$

$$I_{1Br}=\frac{600}{240}=25A$$

لذا وقتی آنها را بصورت سری – سری بهم ربط میدهیم جریان سمت اولیه نباید بیش از ۲/۵ آمپر گردد . بطریقی مشابه میتوان اثبات کرد که در اتصال سری – سری جریان ثانویه نباید بیش از ۵ آمپر گردد نسبت

تبدیل در اتصال سری – سری برای این دو ترانسفورماتور ۴۸۰/۲۴۰ ولت است . ولت آمپر اسمی این اتصال نیز اینچنین میشود

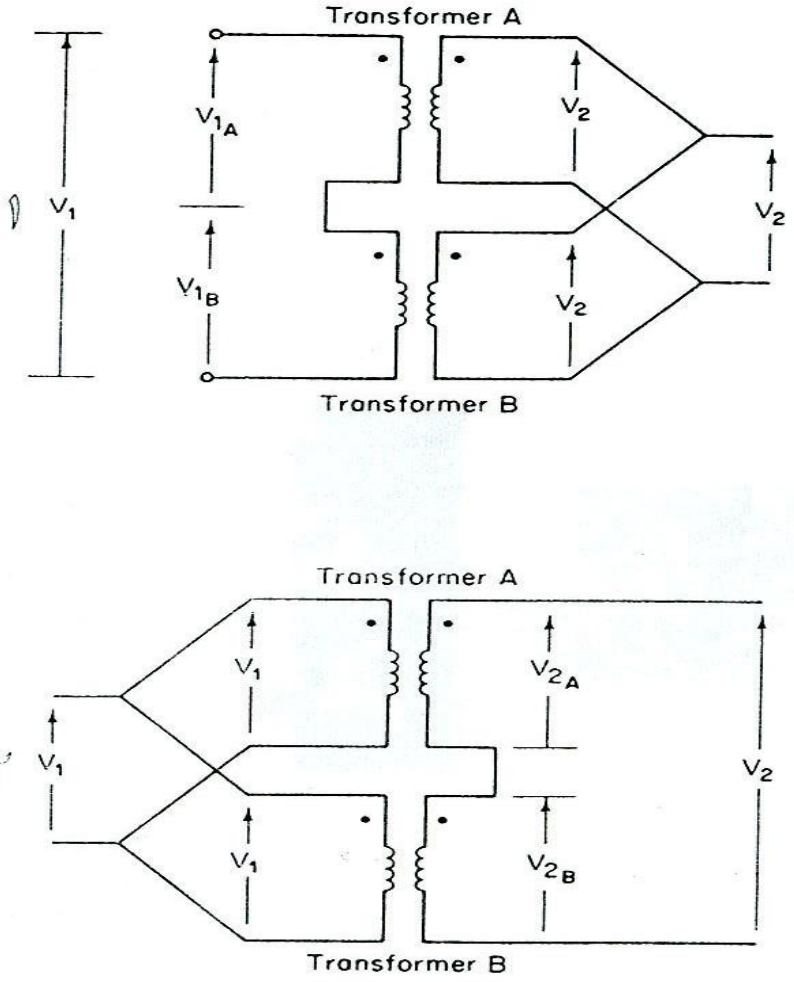
$VA = 480 \times 25 = 12000$

اتصال سری – موازی یا موازی – سری

باز در اینجا دو ترانسفورماتور تکفاز را در نظر میگیریم . شکل (۱-۲۸) نشان دهنده اتصال سری – موازی و شکل (۲-۲۸) نمایانگر اتصال موازی – سری آنهاست باید گفت :

۱. در اتصال سری– موازی سیم پیچهای اولیه باهم سری شده ولی سیم پیچ های ثانویه باهم موازی میشوند .

۲. در اتصال موازی– سری سیم پیچهای اولیه باهم موازی شده ولی سیم پیچهای ثانویه با هم سری میشوند .



(شکل ۲۸) اتصال سری موازی و موازی سری دو ترانسفورماتور تکفاز
۱ـ اولیه‌ها سری شده و ثانویه‌ها موازی گشته‌اند.
۲ـ اولیه‌ها موازی شده و ثانویه‌ها سری گشته‌اند.

باتوجه به شکل درمی یابیم که :

الف : هنگام سری کردن سیم پیچها اعم از اولیه یا ثانویه پلاریته های مخالف بهم وصل میشوند .

ب : هنگام موازی کردن سیم پیچها اعم از اولیه یا ثانویه پلاریته های مشابه بهموصل میشوند .

ج : سیم پیچهایی که دارای ولتاژ اسمی مختلف هستند را میتوان به یکدیگر بطور سری مربوط ساخت .

اتصال موازی

شکل (۱-۲۹) دو ترانسفورماتور تکفاز A و B را نشان میدهد که باهم بطور موازی بسته شده اند باتوجه به شکل (۲-۲۹) میتوان اینچنین گفت :

الف : Z_A امپدانس ترانسفورماتور A نسبت به سمت ثانویه میباشد

ب : Z_B امپدانس ترانسفورماتور B نسبت به سمت ثانویه میباشد .

ج : Z_L امپدانس باری است که هر دو ترانسفورماتور مشترکا تغذیه میکنند .

در اینجا متذکر میشویم که در هنگام موازی کردن دو ترانسفورماتور باید دقت نمود که نسبت تبدیل آنها یکسان باشد تا عمل موازی سازی معقول و منطقی بنظر برسد یعنی :

$$a=\frac{N_{1A}}{N_{2A}}=\frac{N_{1B}}{N_{2B}}$$

جریان تحویلی توسط ترانسفورماتور A بقرار زیر است :

$$I_A=\frac{\Delta V}{Z_A} \qquad (۹۳)$$

جریان تحویلی توسط ترانسفورماتور B بشرح زیر است :

$$I_B=\frac{\Delta V}{Z_B} \qquad (۹۴)$$

باید دانست که :

$$\Delta V=\frac{V_1}{a}-V_2 \qquad (۹۵)$$

جریان تحویلی به بار بقرار زیر است :

$$I_L = I_A + I_B \qquad (۹۶)$$

از روابط (۹۳) تا (۹۶) داریم :

$$I_L = \frac{\Delta V}{Z_{eq}} \qquad (۹۷)$$

Z_{eq} امپدانس معادل دو امپدانس موازی Z_A و Z_B است پس:

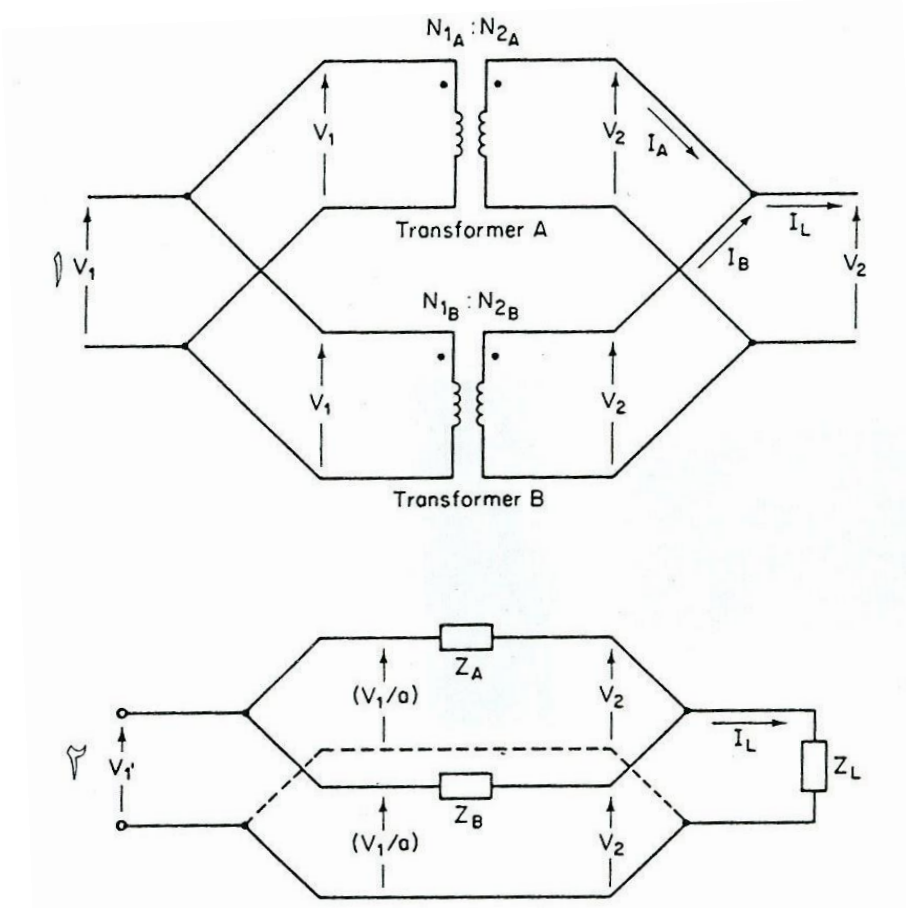
$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} \qquad (۹۸)$$

بسهولت میتوان گفت :

$$\Delta V = \frac{V_1}{a} - I_L Z_L \qquad (۹۹)$$

از روابط (۹۷) و (۹۹) داریم :

$$I_L = \frac{V_1/a}{Z_L + Z_{eq}} \qquad (۱۰۰)$$



(شکل۲۹) : موازی کردن دو ترانسفورماتور تکفاز

۱ـ نمودار اتصالات

۲ـ مدار معادل نسبت به سمت ثانویه

مزیت استفاده از دو ترانس بجای یک ترانس :

۱ . حجم و وزن کمتر میشود و درنتیجه حمل و نقل آنها آسانتر است

۲ . اگر عیبی در یکی از ترانسفورماتورها پیش آید تمام مصرف کننده بی برق نمی ماند و ترانس دوم میتواند قسمتی از بار را تغذیه میکند .

اما برای موازی کردن باید ولتاژ خروجی آنها در هر لحظه برابر باشد .ترانسفورماتور موازی شده میتواند توانهای نابرابر داشته باشد ولی بهتر است که نسبت توانهای ترانس های موازی از سه برابر تجاوز نکند ولتاژ اتصال کوتاه ترانس کوچکتر به هیچ وجه نباید از ولتاژ اتصال کوتاه ترانس بزرگتر کمتر باشد اما ولتاژ اتصال کوتاه میتواند تا حدود ۱۰درصد بیشتر باشد بدین ترتیب ترانسفورماتور کوچکتر همیشه بار کمتری را تحمل میکند وقتی ولتاژ اتصال کوتاه در دو ترانسفورماتور برابر باشد دراینصورت با عبور جریان کمتر از ترانسفورماتور کوچکتر افت ولتاژ آن برابر افت ترانسفورماتور بزرگتر میشود و بدین ترتیب شرط برابر بودن ولتاژ خروجی در ترانسها ی موازی برقرار میشود برای اینکه شرط فازی ولتاژ خروجی برقرار باشد باید دو ترانس از یک گروه باشند .

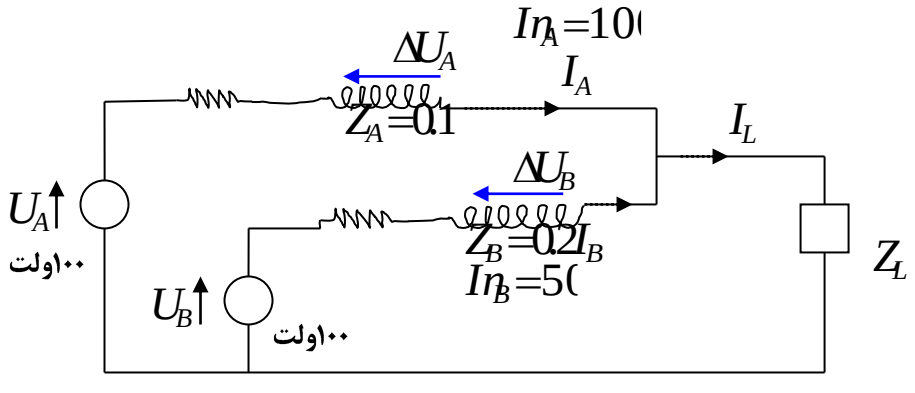
شرایط : ولتاژ نامی – ولتاژ اتصال کوتاه – گروه

$\frac{\Delta}{Z}-\frac{\Delta}{\Delta}-Y-Y$ گروههای زوج ۱۲ ، ۱۰ ، ۸ ، ۶ ، ۴ ، ۲

$\frac{\Delta}{Y}-\frac{Y}{\Delta}-\frac{Y}{Z}$ گروههای فرد ۱۱ ، ۹ ، ۷ ، ۵ ، ۳ ، ۱

گروههای اصلی ۱۲ ، ۱۱ ، ۶ ، ۵

موازی بستن ترانسها



$$\bar{I}_A+\bar{I}_B=\bar{I}_L$$

(شکل۳۰)

۱. مساوی نبودن ولتاژهای دو ترانسفورماتور (منبع U_A و U_B) که موازی کردیم باعث میشود که جریان نامی که از مجموع هر دو ترانسفورماتور میباشد نمیتوانیم خوب استفاده کنیم و در مدار یک جریان گردشی بوجود خواهد آمد که باعث نامتعادل شدن مدار خواهد شد و قدرت ظاهری بطور نامی دریافت نمیشود

۲. $\frac{UIn_A}{UIn_B}=\frac{Z_B}{Z_A}$ $\qquad$ $\frac{P_A}{P_B}=\frac{|Z_B|}{|Z_A|}$

شرط دوم اینکه نسبت جریانها با عکس امپدانسها یکی باشد . $\qquad$ $\frac{In_A}{In_B}=\frac{Z_B}{Z_A}$

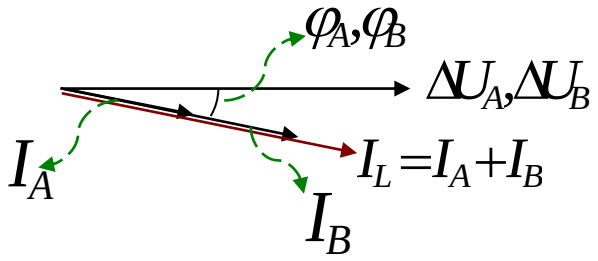
چون شرط اول این بود که U_A و U_B بابر باشد در حالت دوم چون این دو باهم موازی هستند ΔU_A و ΔU_B باهم برابرند .

$|\Delta U_A|=|\Delta U_B| \qquad |Z_A|I_A=|Z_B|I_B$

۳. شرط سوم : $\qquad \varphi_{scA}=\varphi_{scB}$

$$tg^{-1}\left(\frac{x_A}{R_A}\right)=tg^{-1}\left(\frac{x_B}{R_B}\right)\Rightarrow\frac{x_A}{R_A}=\frac{x_B}{R_B}$$

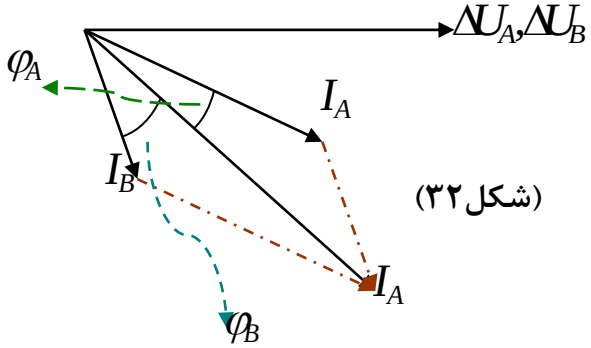
این به این معنی است که ΔU_A و ΔU_B باهم برابر باشد و زاویه بین آنها با هم برابر باشد درنتیجه I_A و I_B باهم همفاز شد و I_L که جمع برداری I_A و I_B میباشد به جمع جبری تبدیل میشود .



(شکل۳۱)

اگر این شرط را رعایت نکنیم باعث میشود مثلا اگر ترانس اولی ۱۰۰ آمپر و ترانس دومی ۵۰آمپر به مصرف کننده میدهد مصرف کننده وقتی ۱۳۰آمپر میکشد هر دو ترانس به جریان نامی خود میرسند چون جمع

برداری ۱۰۰و۵۰برابر ۱۳۰ میباشد بنابراین اگر جنس ترانس ها ار یکی درنظر گیریم درنتیجه $\frac{X_A}{X_B}=\frac{R_A}{R_B}$ برقرار میشود و $\varphi_A=\varphi_B$ میشود .



(شکل ۳۲)

که برآیند I_L صددرصد از جمع جبری کمتر است

حال برای اینکه هر سه شرط رعایت شود مدارها را به حوزه مختلط میبریم

$$U_L+\Delta U_A=U_A \qquad Z_L(I_A+I_B)+Z_AI_A=U_A$$

$$U_L+\Delta U_B=U_B \qquad Z_L(I_A+I_B)+Z_BI_B=U_B$$

$$I_A(Z_L+Z_A)+I_BZ_L=U_A$$

$$I_AZ_L+I_B(Z_L+Z_B)=U_B$$

$$I_A=\frac{\begin{vmatrix}U_A & Z_L\\ U_B & Z_L+Z_B\end{vmatrix}}{\begin{vmatrix}Z_L+Z_A & Z_L\\ Z_L & Z_L+Z_B\end{vmatrix}}=\frac{U_AZ_B+Z_L(U_A-U_B)}{Z_L(Z_A+Z_B)+Z_AZ_B}$$

از مقدار Z_AZ_B به دلیل کوچکی نسبت به Z_L میتوان صرفنظر نمود درنتیجه :

$$I_A=\frac{U_AZ_B}{Z_L(Z_A+Z_B)}+\frac{U_A-U_B}{Z_A+Z_B}$$

$$I_B=\frac{\begin{vmatrix}Z_L+Z_A & U_A\\ Z_L & U_B\end{vmatrix}}{\begin{vmatrix}Z_L+Z_B & Z_L\\ Z_L & Z_L+Z_B\end{vmatrix}}=\frac{U_BZ_A+Z_L(U_B-U_A)}{Z_L(Z_A+Z_B)+Z_AZ_B}$$

$$Z_AZ_B=0\Rightarrow I_B=\frac{U_BZ_A}{Z_L(Z_A+Z_B)}-\frac{U_A-U_B}{Z_A+Z_B}$$

مثال (۷) : ترانس A با مشخصات ۲۰۰/۱۰۰ با قدرت 5kvA تحت آزمایش اتصال کوتاه تغذیه از طرف فشار قوی قرار گرفته و وسایل اندازه گیری اعداد ۴۰ولت ، ۲۵آمپر ، ۸۰۰وات را نشان میدهد و ترانس B با مشخصات ۲۰۰/۹۸ ولت با قدرت 3kvA تحت آزمایش اتصال کوتاه تغذیه از طرف فشارقوی قرار گرفته و وسایل اندازه گیری اعداد ۵۰ ولت ، ۱۵ آمپر ، ۳۰ آمپر و ۵۰۰ وات را نشان داده اند اگر دو ترانس فوق باهم موازی شده از طرف فشارقوی به شبکه ۲۰۵ولت متصل شده و از طرف فشارضعیف :

الف : اهمی $Z_L=1\angle 0$ و $Z_L=1.25\angle 0$

ب : سلفی $Z_L=1\angle 30$

ج : خازنی $Z_L=1.5\angle 30$

متصل شود مطلوبست جریان هر ترانس وجریان بار و نیز مقایسه نمایید هر ترانس جریانش به چند درصد نامی رسیده است و تعیین اینکه آیا ترانسها میتوانند چنین باری را تغذیه کنند یا خیر . سپس مشخص کنید اگر بار از ترانس جدا شده باشد جریان گردشی دو ترانس از دیدگاه فشار ضعیف چقدر است .

s.c $40\frac{200}{100}V$ $50,25A$ $800W$ $In_1=25A, In_2=50A$

$\frac{200}{98},50V$ **B** **s.c** $In_1=15A, In_2=30A$ $500W$ $30,15A$

از طریق آزمایش اتصال کوتاه R_e و Z_e از طریق فشار قوی بدست می آوریم و به طرف فشار ضعیف میبریم .

$$R_{e1A}=\frac{P}{In_1^2}=\frac{800}{25^2}=1.28\Omega \qquad Z_{e1A}=\frac{U}{I}=\frac{40}{25}=1.6$$

$$X_{e1}=\sqrt{Z_{e1}^2-R_{e1}^2}=\sqrt{1.6^2-1.28^2}=0.96$$

$$R_{e2A}=\frac{1}{4}\times 1.28=0.32 \qquad X_{e2A}=\frac{1}{4}\times 0.96=0.24$$

$$R_{e1B}=\frac{500}{15^2}=2.22 \qquad Z_{e1B}=\frac{50}{15}=3.33$$

$$X_{e1B}=\sqrt{3.33^2-2.22^2}=2.48\Omega$$

$$R_{e2B}=\left(\frac{98}{200}\right)^2\times 2.22=0.53 \qquad X_{e2B}=\left(\frac{98}{200}\right)^2\times 2.48=0.59$$

$$\Rightarrow U_A = 205 \times \frac{100}{200} = 102.5 \qquad \text{و} \qquad U_B = 205 \times \frac{98}{200} = 100.45$$

$$I_A = \frac{102.5(0.53 + j0.59)}{1\angle 30(0.32 + j0.24 + 0.53 + j0.59)} + \frac{102.5 - 100.45}{(0.32 + j0.24 + 0.53 + j0.59)} = 63 - j31.7 = 70.54\angle -26$$

$$I_B = \frac{100.45(0.32 + j0.24)}{1\angle 30(0.32 + j0.24 + 0.53 + j0.59)} - \frac{102.5 - 100.45}{(0.32 + j0.24 + 0.53 + j0.59)} = 25.77 - j19.6 = 32.31\angle -37$$

$$I_L = I_A + I_B = 88.77 - j51.3 = 102.5\angle -30$$

جواب قسمت دوم منفی است چون بیشترین جریان نامی ما ۸۰ آمپر میباشد در اینجا امپدانس بار ۱۰۲/۵ آمپر میکشد پس نمیتواند تغذیه کند درنتیجه ترانس A زودتر قطع میکند و بعد ترانس B توسط کلید دپژنکتور قطع میشود چون نمیتواند جریان زیاد را تحمل کند .

$$\frac{70.54}{50} \times 100 = 140\%$$

$$\frac{32.31}{30} \times 100 = 110\%$$

ترانسفورماتورهای تکفاز سه سیم پیچه

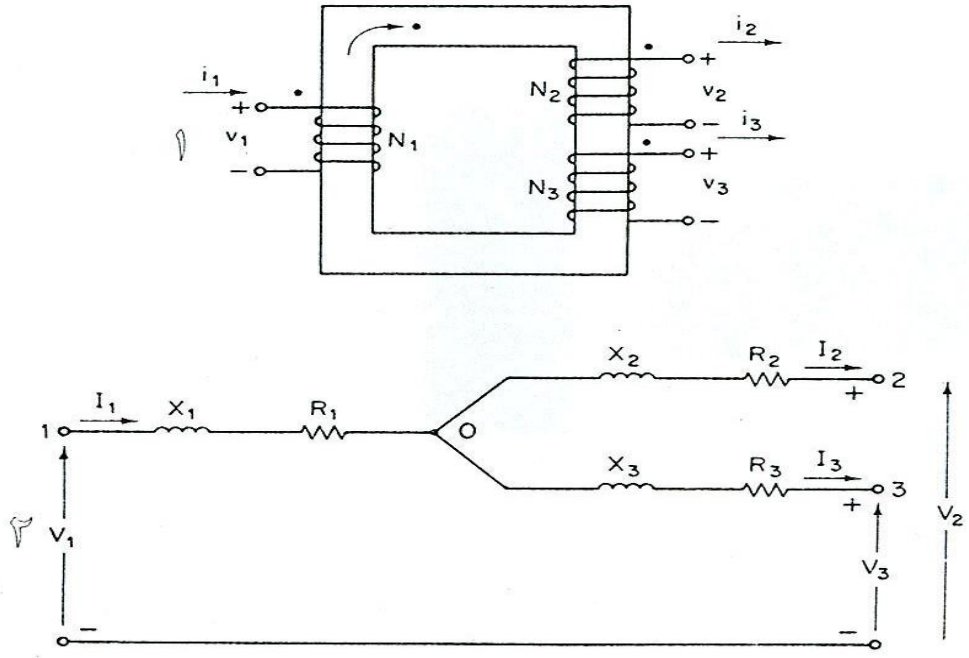
در این ترانسفورماتورها بر روی هسته سه سیم پیچ قرار دارند و شکل (۱-۳۳) شمای اینگونه ترانسفورماتورهای تکفاز را نشان میدهد این سه سیم پیچ به نامهای زیر معروفند :

سیم پیچ اولیه که به منبع AC وصل میشود .

سیم پیچ ثانویه که بار را تغذیه میکند (بار شماره ۱)

سیم پیچ ثالثیه که بار دیگری را تغذیه میکند (بار شماره ۲)

باید دانست که این ترانسفورماتورها موقعی مورد استفاده قرار میگیرند که به سطوح مختلف ولتاژ برای تغذیه بارهای گوناگون نیاز داشته باشیم برای تحلیل اینگونه ترانسفورماتورهای تکفاز از مدار معادل شکل (۲-۳۲) استفاده میشود . این مدار معادل نسبت به سمت اولیه بوده و از شاخه های موازی برای سهولت محاسبات صرفنظر میشود و این مدل از تقریب نسبتا خوبی برخوردار است در اینگونه ترانسفورماتورها تعاریف زیر را در نظر میگیریم :



(شکل۳۳) : ترانسفورماتور تکفاز سه سیم پیچه

۱ـ شمای کلی

۲ـ مدار معادل نسبت به سمت اولیه

۱. R_1 مقاومت سیم پیچ اولیه

۲. R_2 مقاومت سیم پیچ ثانویه ارجاع شده نسبت به سمت اولیه

۳. R_3 مقاومت سیم پیچ ثالثیه برده شده به سمت اولیه

۴. X_1 راکتانس نشتی سیم پیچ اولیه

۵. X_2 راکتانس نشتی سیم پیچ ثانویه ارجاع شده به سمت اولیه

۶. X_3 راکتانس نشتی سیم پیچ ثالثیه ارجاع شده به سمت اولیه

۷. Z_1 امپدانس سیم پیچ اولیه

۸. Z_2 امپدانس سیم پیچ ثانویه ارجاع شده بطرف اولیه

۹. Z_3 امپدانس سیم پیچ ثالثیه ارجاع شده بطرف اولیه

باید دانست که Z_1 و Z_2 و Z_3 از روابط زیر بدست می آیند :

$$Z_1 = \frac{Z_{12} + Z_{13} - Z_{23}}{2} \qquad (۱۰۱)$$

$$Z_2 = \frac{Z_{12} + Z_{23} - Z_{13}}{2} \qquad (۱۰۲)$$

$$Z_3 = \frac{Z_{13} + Z_{23} - Z_{12}}{2} \qquad (۱۰۳)$$

باید متذکر شد که :

الف : Z_{12} امپدانسی است که از آزمایش اتصال کوتاه حاصل میشود یعنی سیم پیچ ثانویه را اتصال کوتاه مینمائیم و به سیم پیچ اولیه ولتاژ اعمال میکنیم تا از اولیه جریان اسمی بگذرد (ثالثیه باز است)

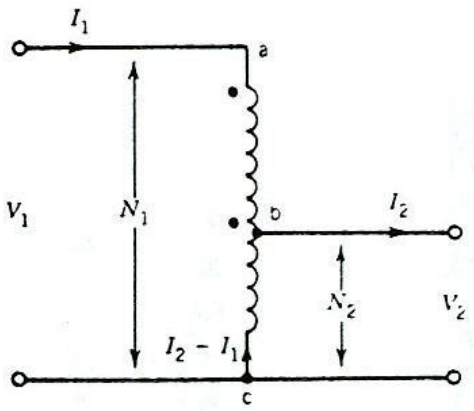
ب : Z_{13} امپدانسسی است که از آزمایش اتصال کوتاه بدست می آید یعنی سیم پیچ ثالثیه را اتصال کوتاه مینمائیم و به سیم پیچ اولیه ولتاژ اعمال میکنیم تا از اولیه جریان اسمی بگذرد (ثانویه باز است)

ج : Z_{23} امپدانسی است که از آزمایش اتصال کوتاه بدست می آید یعنی سیم پیچ ثالثیه را اتصال کوتاه مینماییم و به سیم پیچ ثانویه ولتاژ اعمال میکنیم تا از ثانویه جریان اسمی بگذرد .(اولیه باز است)

اتو ترانسفورماتور تکفاز

اتو ترانسفورماتورهای تکفاز اتصال خاصی از ترانسفورماتورهای تکفاز هستند و در آنها میتوان به ولتاژ خروجی متغیر از نوع AC دست یافت . اتو ترانسفورماتورهای تکفاز حاوی یک سیم پیچ مشترک پیچیده شده بر روی هسته میباشند و خروجی توسط انشعاب بر روی این سیم پیچ مشخص میشود (شکل ۳۴) برخلاف ترانسفورماتورهای تکفاز که در آنها دو سیم پیچ اولیه و ثانویه باهم اتصال الکتریکی ندارند و فقط پیوند مغناطیسی بین آنها برقرار است ، در اتوترانسفورماتورهای تکفاز علاوه بر پیوند مغناطیسی ، پیوند الکتریکی نیز بین سیم پیچهای اولیه و ثانویه که تواما سیم پیچ مشترکی را تشکیل میدهند وجود دارد باید گفت عملکرد اتو ترانسفورماتورهای تکفاز شبیه ترانسفورماتورهای تکفاز است در اینجا یادآوری میکنیم که همچنانکه ترانسفورماتورهای سه فاز وجود دارند و مورد بهره برداری قرار میگیرند اتو ترانسفورماتورهای سه فاز نیز ساخته شده و در شبکه های برق مورد استفاده و بهره برداری واقع میشود . باتوجه به شکل (۳۴) داریم :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \qquad (۱۰۴)$$



(شکل۳٤) اتوترانسفورماتور تکفاز

اگر انشعاب ثانویه بصورت لغزان باشد داریم : $0<V_2<V_1$

آمپردور (mmf) بین نقاط a و b در شکل (۳۴) بقرار زیر است :

$$F_U=(N_1-N_2)I_1=\left(1-\frac{1}{a}\right)N_1I_1 \qquad (۱۰۵)$$

آمپردور (mmf) بین نقاط b و c در شکل (۳۴) بقرار زیر است :

$$F_L=N_2(I_2-I_1)=\frac{N_1}{a}(I_2-I_1) \qquad (۱۰۶)$$

برای تعادل بین آمپردورها در دو بخش بالا و پایین اتوترانسفورماتور باید :

$$N_1I_1\left(1-\frac{1}{a}\right)=\frac{N_1}{a}(I_2-I_1)\Rightarrow\frac{I_1}{I_2}=\frac{1}{a} \qquad (۱۰۷)$$

میبینیم روابط اتوترانسفورماتور تکفاز شبیه ترانسفورماتور تکفاز است مزایای عمده اتوترانسفورماتور نسبت به ترانسفورماتورهای معمولی بشرح زیر است :

۱. راکتانسهای نشتی اتوترانسفورماتور کمتر است

۲. تلفات اتوترانسفورماتور کمتر است

۳. توان ظاهری اتوترانسفورماتور نسبت به ترانسفورماتور معمولی بیشتر است

۴. اگر از انشعاب لغزان استفاده شود در خروجی به ولتاژ متغیر AC دست میابیم .

تنها نکته منفی در رابطه با اتوترانسفورماتور ها آنستکه بین سیم پیچها اتصال الکتریکی وجود دارد .

ترانسفورماتورهای اندازه گیری

الف : ترانسفورماتورهای جریان (CT)

این ترانسفورماتورها همراه با آمپرمترهای با حد سنجش کم جهت اندازه گیری جریانهای در مدارهای ولتاژ جریان متناوب بکار میروند آنها علاوه بر عایق کردن دستگاه از خط فشار قوی جریان را به نسبت معینی کاهش میدهند اینگونه ترانسفورماتورها دارای اولیه با سیم ضخیم و تعداد دور کم و ثانویه با سیم نازک و تعداد دور زیاد میباشد که به دو سر یک آمپرمتر که معمولا حد سنجش آن ۵ آمپر است بسته میشود یکی از عمومی ترین ترانسهای جریان از نوع انبری یا گلویی میباشد که کاربرد وسیعی در اندازه گیری جریانهای در حال کار دارد .

چون مقاومت آمپرمتر خیلی کم است لذا از ترانسفورماتورهای جریان بطور نرمال در حالت اتصال کوتاه کار میکند اگر بهر دلیلی آمپرمتر از سیم پیچ ثانویه برداشته شود در آنصورت این سیم پیچ بایستی اتصال کوتاه شود اگر این کار انجام نگیرد در آنصورت بدلیل عدم حضور آمپردورهای مخالف ثانویه نیروی محرکه مغناطیسی اولیه بدون مخالف فوران بسیار زیاد و غیرعادیی در هسته ایجاد خواهد کرد که تلفات هسته بیش از اندازه ای را باعث شده و این هم نیز گرمای غیر معمولی در هسته ایجاد میکند و یک ولتاژ زیاد در دو سر ترمینالهای ثانویه ظاهر خواهد شد این حالتی نیست که در ترانسفورماتورهای فشار ثابت معمول اتفاق بیافتد زیرا جریان اولیه آنها توسط بار واقع بر ثانویه شان تعیین می گردد درصورتیکه در یک ترانسفورماتور جریان ، جریان اولیه بطور کلی توسط بار واقع بر سیستم تعیین میشود و نه توسط بار واقع بر ثانویه خودش ، ازاینرو یک ترانسفورماتور جریان هرگز نباید تحت هیچ شرایطی بار گذاشته شود

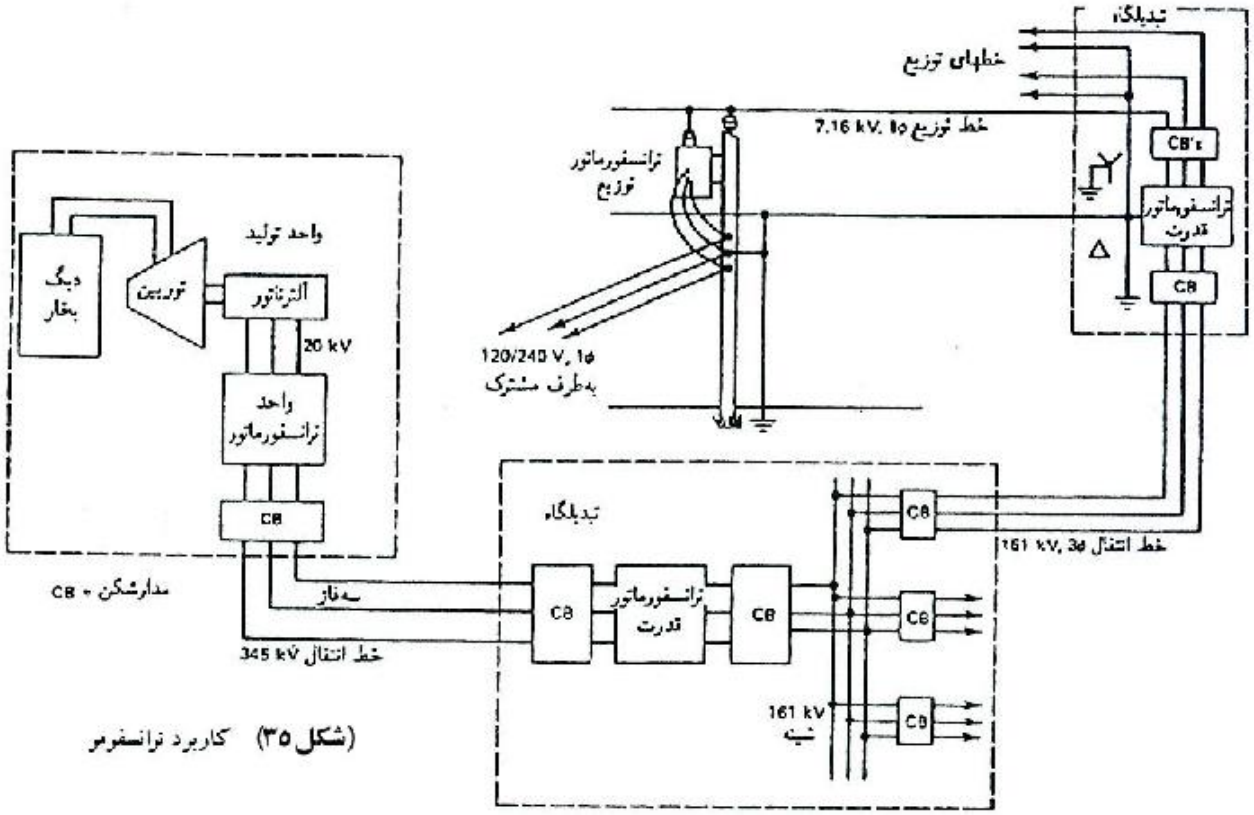
ب : ترانسفورماتورهای ولتاژ (PT ,CVT)

این ترانسفورماتورها ترانسفورماتورهای کاهنده با نسبت فوق العاده دقیقی هستند و همراه با ولتمترهای استاندارد با حد سنجش کم (معمولا ۱۵۰ولت) بکار میروند که وقتی انحرافشان به نسبت تبدیل تقسیم شود ولتاژ حقیقی در طرف فشار قوی را بدست میدهند .

در ولتاژهای ۵۰۰۰ولت ، ترانسفورماتورهای فشار قوی معمولا از نوع خشک هستند و بین ۵۰۰۰ و ۱۳۸۰۰ ولت ، آنها همیشه از نوع روغنی (روغن فشار قوی) میباشند چون سیم پیچهای ثانویه آنها برای بکار انداختن دستگاهها یا رله ها یا لامپهای اطمینان یا اضطراری مورد نیاز است لذا قدرتهای نامی آنها معمولا ۴۰ تا ۱۰۰ ولت میباشد برای اطمینان ثانویه بایستی کاملا از اولیه فشارقوی عایق شده و بعلاوه بایستی از جهت حفاظت اپراتور ایمن شود .

ترانسهای سه فاز

توان الکتریکی در مقیاس وسیع عملا سه فاز و ولتاژهای تولید شده حدود ۳۲ کیلوولت است انتقال این توان نسبت به بعد مسافت بین تولید و توزیع در ولتاژهای بالای ۱۳۲ کیلوولت تا ۱۰۰۰ کیلوولت انجام میگیرد برای نیل به این هدف به ترانسهای سه فاز احتیاج است تا ولتاژ تولید شده را به مقدار ولتاژ خط انتقال افزایش دهند همچنین در محلهای توزیع بار ولتاژ انتقال به حدود ۶۳۰۰۰ ، ۲۰۰۰۰ و ۱۱۰۰۰ ولت کاهش یافته و در بیشتر مصرف کننده ها ولتاژ توزیع به ولتاژهای مصرف مانند ۱۱۰ و ۲۲۰ ولت (۳۸۰ ولت خط به خط) کاهش میابند این تغییرات ولتاژ سه فاز را میتوان هم توسط سه ترانس مشابه تکفاز (استاندارد آمریکایی ، گروه ترانس سه فاز) و هم توسط یک ترانس سه فاز (استاندارد اروپایی ، ترانس سه فاز تک هسته) انجام داد شکل (۳۵) عناصر یک سیستم تولید انتقال و توزیع را نشان میدهد .



(شکل ۳۵) کاربرد ترانسفورمر

ترانس سه فاز در حقیقت سه ترانس پیچیده شده به دور یک هسته مشترک مطابق شکل (۳۶) است همانطور که در شکل ملاحظه میشود سه هسته ۱۲۰ درجه از هم فاصله دارند و یک ستوان از هر هسته با یکدیگر در تماس هستند ستون مرکزی که از این سه ستون تشکیل شده است حامل فوران ایجاد شده توسط جریانهای سه فاز است از آنجا که در یک سیستم متقارن مجموع سه فوران در ستون مرکزی صفر است بنابراین بدون هیچ اشکالی میتوان آنرا حذف نمود (مانند حذف سیم خنثی در سیستم سه فازه) در اینحالت فوران فازها مسیرهای مشترکی را طی میکنند . ترانسفورماتوری که دارای چنین هسته ای باشد در ابتدا مورد استفاده قرار می گرفت ولی به دلیل دست و پاگیری آن با کمی تغییر میتوان آنرا بصورت غیر متقارن و یا در اصطلاح به صورت معمولی ساخت (شکل ج۳۶) با قرارگرفتن ستونها در یک صفحه بازدارندگی مغناطیسی دیده شده از هر ستون کناری بیش از بازدارندگی دیده شده از ستون وسط گردیده که اینحالت باعث بروز یک عدم تقارن در جریانهای بی باری سه ترانس خواهد شد . این عدم تقارن در حالت بارداری قابل چشم پوشی است و با انتخاب سطح مقطعهای کوچک برای پایه های عمودی و سطح مقطعهای بزرگ برای شاخه های افقی میتوان از

اهمیت آن کاست در بعضی موارد نیز بجای این ترانس از ترانس پنج شاخه استفاده میکنند ترانسهای سه فاز همانند ترانسهای تکفاز در دو نوع هسته ای (شکل۳۶) و صدفی (شکل۳۷) ساخته میشوند مزایای اصلی یک ترانس سه فاز در مقایسه با سه ترانس تکفاز عبارتند از :

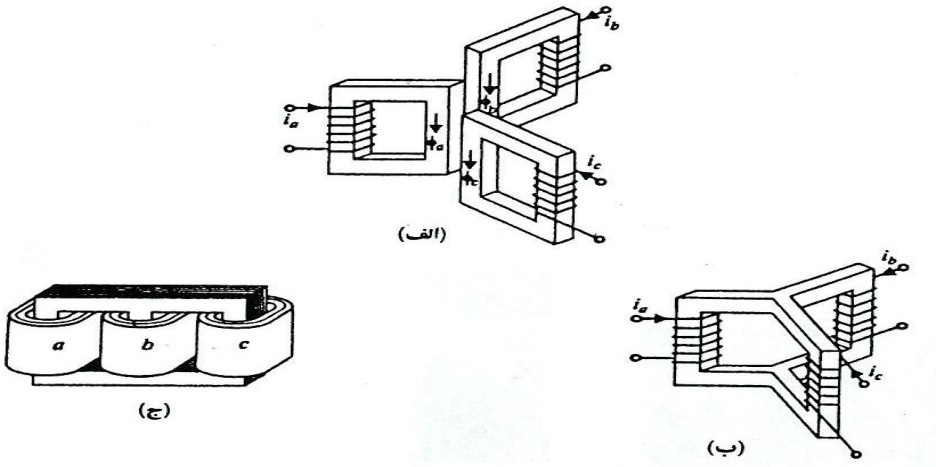
۱. ترانس سه فاز کم حجمتر و سبکتر است . (با توان نامی مساوی)

۲. ترانس سه فاز به مواد اولیه کمتری برای ساخت هسته نیاز دارد . (با توان نامی مساوی)

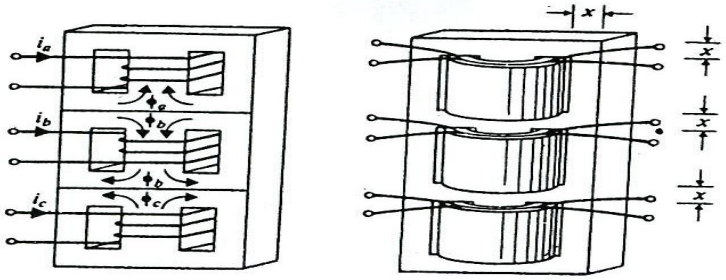
۳. از نظر هزینه ترانس سه فاز تقریبا ۱۵٪ ارزانتر تمام میشود .

۴. برای سیم پیچی ، اتصالات و عایق بندی و مخزن روغن ، ترانسهای سه فاز به مواد کمتری نیاز دارند .

۵. بازدهی بالاتر است .



(شکل۳۵)



(شکل۳٦) ترانس سه‌فاز نوع صدفی

نقص اصلی ترانس سه فاز انعطاف ناپذیری آنست . بعنوان مثال یک ترانس تکفاز از سه ترانس تکفاز ممکن است مقدار توان نامی بالاتری نسبت به دوتای دیگر جهت تغذیه یک بار نامتعادل داشته باشد . همچنین درصورت خرابی یکی از فازها تمام ترانس سه فاز باید جهت تعمیر از خط خارج شود درحالیکه برای سه

ترانس تکفاز اگر یکی از ترانسها از خط خارج شود سیستم هنوز میتواند بصورت مثلث باز (V-V) با ظرفیت کمتر به کار خود ادامه دهد و یا اینکه میتوان بجای ترانس معیوب ترانس سالم یدکی کار گذاشت .

در حال حاضر به ذلایل بهبود ساختمان ترانس سه فاز و وجود وسایل حفاظتی بهتر در مقابل ازدیاد ولتاژ و مشکل اتصال کوتاه ترانسها خیلی دیر خراب میشوند . ازاینرو به استثنای مدارهای توزیع که هم به تغذیه بار تکفاز و هم به سه فاز احتیاج است در تأسیسات جدید از سه ترانس تکفاز بندرت استفاده میشود البته تصمیم گیری درباره استفاده از ترانس سه فاز و یا سه ترانس تکفاز به کشور و نوع استفاده در سیستم بستگی دارد .

ناگفته نماند که واکاری این دو نوع سیستم یکسان است و کیلوولت آمپر اسمی ترانس سه فاز سه برابر توان ظاهری هر فاز است .

در امنقال ولتاژ سه فاز و همچنین در استفاده از ترانس بعنوان تغییر دهنده تعداد فاز در یک سیستم چند فاز اتصالهای متنوعی امکانپذیر است که انواع معمولی آن ستاره – ستاره ($Y-Y$) مثلث – مثلث ($\Delta-\Delta$) ستاره – مثلث ($Y-\Delta$) مثلث – ستاره ($\Delta-Y$) مثلث باز (**V-V**) تی – تی (**T-T**) و اتصال اسکات است مزایا و کمبودهای هر اتصال پس از این مورد مطالعه قرار میگیرند .

اتصال ستاره – ستاره ($Y-Y$) :

شکل ( ) طریقه اتصال و نمودار فازوری $Y-Y$ را نشان میدهد اگر ولتاژ اولیه خط به خط V_L باشد ولتاژ خط به خنثای اولیه ($V_L/\sqrt{3}$) خواهد بود . اگر نسبت انتقال **a>1** فرض شود (ترانس کاهنده) مقدار ولتاژ خط به خنثی بر روی ثانویه ($V_L/a\sqrt{3}$) است اگر جریان خط بر روی اولیه **I** باشد که همان جریان فاز یا سیم پیچ است جریان خط روی ثانویه **aI** خواهد بود

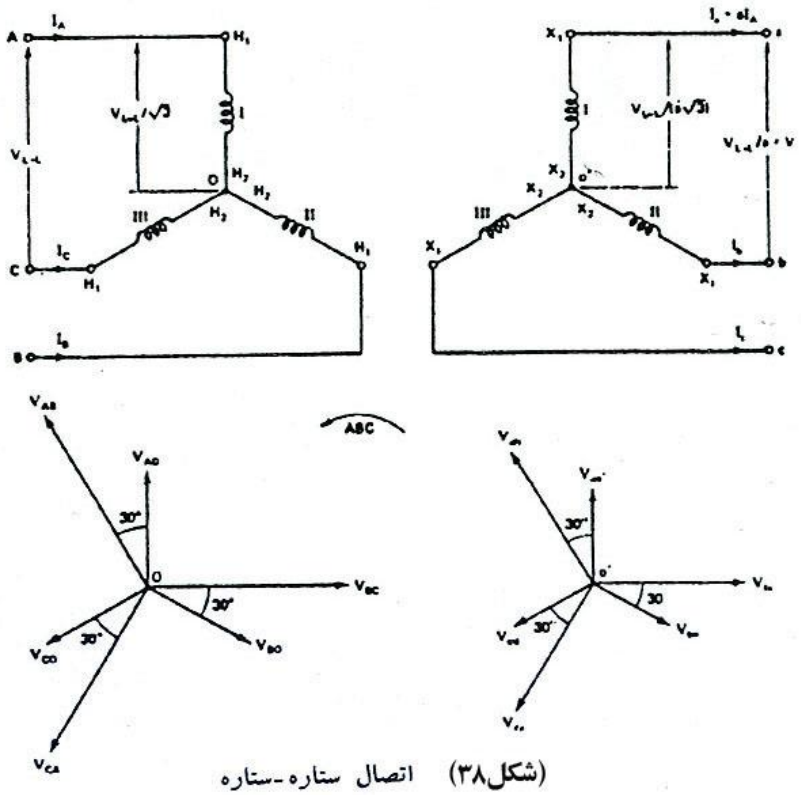
$$a_{Y-Y}=\frac{V_{LP}}{V_{LS}}=\frac{\sqrt{3}V_P}{\sqrt{3}V_S}=\frac{I_S}{I_P}=a$$

بطور کلی در این اتصال میتوان گفت که :

(۱۰۸)

لازم به یادآوری است که اتصالات ترانسها باید با قطباورد درست انجام پذیرد بعنوان مثال فرض کنید ترانس **I**

با قطب آورد وارون در اولیه بسته شده باشد و اتصالهای خروجی بدون تغییر بماند ولتاژهای فاز ورودی همانهایی است که از منبع تغذیه گرفته میشوند و بنابراین تغییری نمیکنند اما اکنون ولتاژ خروجی ترانس I به جای X_2 به X_1 از X_1 به X_2 است و نسبت به حالت قبل ۱۸۰ درجه چرخیده و درنتیجه یک سیستم سه فاز متقارن روی خروجی نخواهیم داشت . خطری در اتصال ترانس ستاره – ستاره با قطب آورد نادرست قبل از اعمال بار وجود ندارد و دلیل آن مدار باز بودن این اتصال است اما قبل از اعمال بار باید از قطباورد درست ترانسها اطمینان حاصل کرد این کار با یک آزمایش ساده امکانپذیر است کافیست که ولتاژهای خط خروجی را اندازه گرفته و اگر همگی باهم مساوی و۱/۷۳ برابر ولتاژ فاز باشند اتصال قطباورد درست انجام گرفته است .



(شکل۳۸) اتصال ستاره-ستاره

امتیازات سیستم ستاره – ستاره عبارتند از :

۱. ولتاژهای وارد شده بر کلافهای ترانس مساوی ولتاژ فاز است که ۰/۵۷۷ ولتاژ خط میباشد از اینرو به عایق کمتری برای کلافها و اندازه کوچکتری برای هسته به دلیل فوران کمتر احتیاج است .

۲. جریان کلافها مساوی جریان خط است و درنتیجه سطح مقطع بزرگتری (نسبت به مثلث – مثلث) برای کلافها لازم است هادیهای سنگین تر از نظر مکانیکی قویتر بوده که این خود استقامت در مقابل جریانهای

اتصال کوتاه را افزایش میدهد حادثه خبر نمیکند برای مثال هنگام بدی آب و هوا ممکن است خط قطع شده و اتصالی بوجود آورد و یا اینکه با افتادن درختی بر روی خطوط اتصال کوتاه در شبکه بوجود آید هادیهای با سطح مقطع بزرگتر از نظر اقتصادی یک کمبود و لیکن از نظر مکانیکی یک مزیت بحساب می آیند .

۳. وجود نقاط ستاره (خنثی) در دو سمت این اتصال فراهم نمودن اتصال خنثی را ممکن میسازد و از اینرو میتوان دو اندازه ولتاژ برای بارهای مختلف بدست آورد از ترکیب ۲۲۰ ولت تکفاز و ۳۸۰ ولت سه فاز بسیار استفاده میشود در مناطق مسکونی از برق تکفاز ۲۲۰ ولت میتوان برای مصارف روشنایی اجاق برقی موتورهای کوچک و از سه فاز ۳۸۰ ولت برای آسانبرها و مصارف پرقدرت تر سود جست . معمولا برای هر طبقه یا قسمتی از ساختمان از یک فاز استفاده میشود بطوریکه بار روی فازها متعادل باشد .

کمبودهای سیستم ستاره – ستاره عبارتند از :

الف : اگر بار روی ترانس سه فاز نامتعادل باشد ولتاژ فازهای ترانس نامتعادل میگردد

ب : مشکلات ناشی از هماهنگ سوم

اتصال ستاره – ستاره فقط در حالت بار متعادل رضایت بخش است . اگر نقطه های ستاره ، زمین (و یا متصل) نشده باشند و بار متعادل باشد ولتاژهای فاز از نظر قدر مطلق باهم برابر و متعادل می مانند . درصورت عدم تعادل بارها نقطه صفر تغییر محل داده و برحسب تغییرات بار حالت شناور بخود میگیرد و ولتاژهای فاز دیگر باهم برابر نخواهند بود بعنوان مثال اگر یکی از ترانسها اتصال کوتاه شود ولتاژهای دو ترانس دیگر به ولتاژ خط نزدیک میشوند بعبارت دیگر انتظام ولتاژ هر ترانس جداگانه ممکن است به دلیل عدم تعادل بار و نه بخاطر اندازه بار خیلی ضعیف گردد .

از بحثهای گذشته متوجه شدید که جریان تحریک هر ترانس غیرسینوسی است و درحقیقت دارای یک مؤلفه بزرگ هماهنگ سوم است که لازمه غلبه بر اشباع برای فراهم نمودن فوران سینوسی است در یک سیستم سه فاز متقارن سه جریان هماهنگ سوم همگی باهم مساوی و همفاز هستند . با اعمال قانون جریان کیرشف در نقطه ستاره متوجه میشوید که جمع سه جریان خط باید صفر باشد این موضوع مشکلی برای جریانهای

پایه که با هم ۱۲۰ درجه اختلاف فاز دارند بوجود نمی آورد با داشتن هماهنگ سوم جمع سه جریان مساوی و همفاز باید صفر شود و این بدان معنی است که هرکدام از آنها باید مساوی صفر باشد به عبارت دیگر اگر اتصالی بین نقطه ستاره و منبع سه فاز وجود نداشته باشد هیچ جریان هماهنگ سومی در ستاره به گردش در نمی آید و درنتیجه فوران نمیتواند با زمان سینوسی تغییر نماید درحقیقت فوران ، یک هماهنگ سوم شدید (حدود ۳۰٪) در غیبت هماهنگ سوم جریان مغناطیس کنندگی خواهد داشت چون ولتاژ القاء شده هم متناسب با اندازه فوران و هم متناسب با فرکانس است از اینرو مؤلفه هماهنگ سوم ولتاژ القاء شده تقریبا به بزرگی ولتاژ پایه خواهد بود . با جمع شدن این مؤلفه به مقدار پایه مقدار بیشینه ولتاژ تقریبا دو برابر اندازه معمول خواهد شد .

دو راه حل برای رفع مشکل شناور شدن نقطه ستاره و هماهنگ سوم دراتصال ستاره – ستاره وجود دارد آشکارترین راه حل فراهم نمودن اتصال خنثی قوی (کم امپدانس) برای نقطه های ستاره ترانس بخصوص اولیه ترانس است تا به جریانهای هماهنگ سوم اجازه عبور بدهد . این بدان معنی است که سیم صفر نقطه ستاره اولیه ترانس و نقطه ستاره منبع تغذیه (مولد) را بهم وصل نماید تا یک جریان قوی ۱۵۰ هرتزی در یک سیستم ۵۰ هرتزی از خود عبور دهد که خود سبب اختلال در سیمهای تلفن کشیده شده به موازات خطوط انتقال میگردد .

راه حل دوم نصب یکدسته کلاف به نام کلافهای سومین در ترانس بصورت مثلث است در اینصورت جریانهای هماهنگ سوم در سیمهای سوم به گردش در می آید تا مؤلفه ای از جریان تحریک لازم را تغذیه نموده و موج فوران را به شکل سینوسی نزدیک نماید با اینحال مقدار کوچکی از فوران هماهنگ سوم یعنی آن اندازه ای که ولتاژ هماهنگ سوم را القاء میکند تا جریان گردشی فراهم شود در ورودی باقی خواهد ماند .

کلافهای سوم همچنین سه فاز را به یکدیگر پیوند میدهند هرگونه اختلال در ولتاژ با فرکانس پایه بین فازها که بدلیل اختلال در جریان خط خروجی بوجود آید سبب به گردش درآمدن جریان با فرکانس پایه ای در کلافهای سوم میگردد این عمل ولتاژهای فاز را به طرف تعادل سوق میدهد و سبب توزیع بهتر اختلال بار خروجی بین فازها میشود .

کلافهای سوم معمولا برای یک سوم ولت آمپر اسنی ترانس طراحی میگردند و در بعضی از ترانسهای سه فاز حتی پایانه های این کلافها از محفظه ترانس بیرون آورده نمیشوند (وظیفه آنها جلوگیری از نوسان نقطه صفر است و به سیم پیچ پایدار کننده موسومند) در بعضی موارد کلافهای سوم برای تغذیه لوازم پست نیز (موتور پمپها ، پنکه ها و روشنایی)بکار گرفته می شوند که در اینصورت به کلافهای کمکی موسومند .

در ترانس سه فاز نوع هسته ای با سه ستون مجموع فورانهای سه فاز در هر یک از دو سر ستون وسط باید برابر با صفر باشد از آنجا که مجموع هماهنگهای سوم فازها نمیتواند صفر شود فوران مشترک نمیتواند هماهنگ سوم داشته باشد و بنابراین ترانس نوع هسته ای میتواند بدون کلاف سوم بصورت Y/Y کار کند .

بطور کلی میتوان نتیجه گیری کرد که اتصال ستاره – ستاره برای ترانسهای فشارقوی با کیلوولت آمپر پایین اقتصادی است استفاده از آن در سیستمهای توزیع منطقه ای زیاد مشکل ساز نیست بخصوص در کارخانجات صنعتی منطقه ای که به وجود خنثی هم در مدار ورودی و هم در مدار خروجی احتیاج است و خنثی اتصال زمین است .

اتصال مثلث – مثلث ($\Delta-\Delta$) :

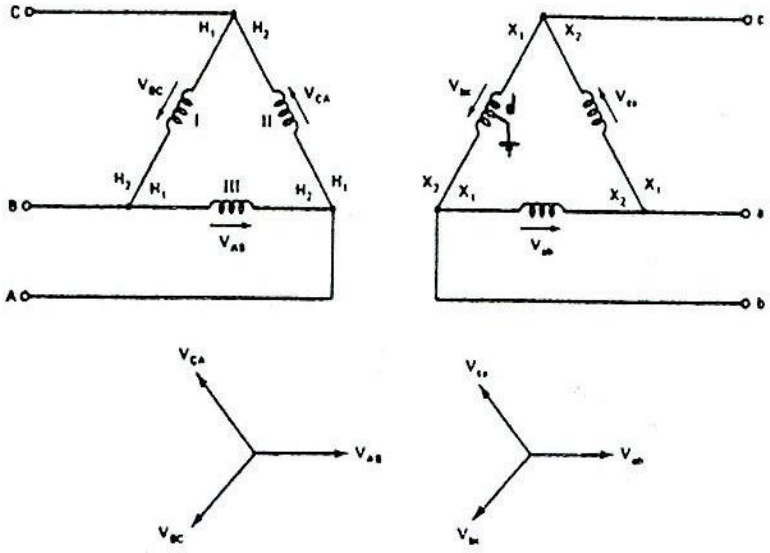
شکل (۳۹) شیوه اتصال و نمودار فازوری مثلث – مثلث را نشان میدهد در این روش رابطه زیر بین ولتاژهای فاز ($\mathbf{V}$) و ولتاژهای خط ($\mathbf{V_L}$) برقرار است :

$$a_{\Delta-\Delta}=\frac{V_{LP}}{V_{LS}}=\frac{V_P}{V_S}=a \qquad (۱۰۹)$$

جابجایی زاویه بین ولتاژ اولیه و ثانویه وجود ندارد بنابراین ترانس سه فاز مثلث – مثلث را میتوان با ترانس سه فاز ستاره – ستاره بشرط داشتن نسبت ولتاژهای برابر موازی نمود . ولتاژهای القاء شده در خروجی باهم سری هستند و بر حلقه بسته ای متشکل از سه کلاف خروجی عمل میکنند با داشتن سه ترانس یکسان و اعمال یک سیستم متقارن سه فاز روی ورودی ولتاژهای خروجی کاملا باهم مساوی شده و اختلاف فازشان باهم نیز ۱۲۰ درجه خواهد بود مجموع این سه ولتاژ صفر است و در بی باری هیچ جریانی در کلافهای خروجی به گردش درنمی آید با یکسان نبودن نسبت ولتاژها و یا وجود اختلاف فاز بین ورودی و خروجی (و یا وجود هر دو حالت) ولتاژ خروجی برآیند غیر صفر در حلقه بسته بوجود می آید که سبب به گردش درآمدن جریان در خروجی ترانسها حتی در غیبت بار میشود . تحت شرایط عادی این جریان قابل چشم پوشی است اما اگر

ترانسها با قطب آورد درست بسته نشوند در اینصورت حتی با وجود ترانسهای یکسان جریان گردشی سنگینی بوجود می آید که سبب خرابی همه ترانسها می گردد بعنوان مثال اگر قطباورد ترانس I I عوض شود ، V_{ca} یعنی ولتاژ القایی خروجی در ترانس نسبت به دو ولتاژ دیگر تغییر جهت میدهد که درنتیجه ولتاژ برآیندی به اندازه دو برابر مقدار ولتاژ خط در حلقه بسته بوجود می آید .

از اینرو قبل از بستن کامل مدار مثلث باید از قطباورد صحیح مطمئن شد و این عمل با قرار دادن ولت متری بین دو سر باز خروجی ترانس (مثلث باز شده) انجام میگیرد اگر ولت متر دو برابر مقدار ولتاژ فاز را بخواند نشانه آنست که یکی از کلافها با پلاریته غلط متصل شده است با جابجایی کلافها از طریق حدس و آزمون اتصال صحیح بدست می آید ناگفته نماند که گاهی اوقات ولت متر نه مقدار صفر و نه دو برابر ولتاژ فاز را نشان میدهد مقدار این ولتاژ گاهی ممکن است به ۵۰ ولت برسد و دلیل آن هماهنگهای سوم نسبتا بزرگ موجود در سه ترانس است .



(شکل۳۹) اتصال مثلث-مثلث

مزایای این سیستم عبارتند از :

۱. برای داشتن ولتاژ خروجی سینوسی لازم است که جریان مغناطیس کنندگی ترانس حاوی هماهنگ سوم باشد (به دلیل اشباع هسته) در اینصورت مؤلفه هماهنگ سوم جریان مغناطیس کنندگی میتواند در ورودیهای متصل شده بصورت مثلث به گردش درآید بدون اینکه از خطوط انتقال جاری شود بنابراین در ولتاژ خروجی هماهنگ سوم ظاهر نمیگردد .

۲. بار نامتعادل فقط سبب بروز مقدار بسیار کمی اختلال (عدم تعادل) در ولتاژها آنهم بدلیل اختلاف در افت داخلی ترانسها میشود از اینرو میتوان گفت که در تمام پهنه عمل ترانس سه فاز مثلث– مثلث سیستم ولتاژ متقارن موجود است .

۳. مهمترین مزیت آنست که اگر ترانسی از کار بیافتد سیستم سه فاز با دو ترانس بصورت مثلث باز (V-V) به کار خود با کاهش ظرفیت مفید ادامه خواهد داد .

نقصهای این سیستم عبارتند از :

الف : فشار ولتاژ وارد بر کلافهای ترانس همان فشار ولتاژ خط است و از اینرو به عایق بیشتری برای کلافها و درنتیجه هزینه بالاتری در مقایسه با اتصال ستاره – ستاره احتیاج است اختلاف هزینه معمولا در ولتاژهای زیر یازده کیلوولت کوچک است و در ولتاژهای بالاتر تقریبا ۱۰٪ به میزان هزینه بدلیل عایق ضخیمتر اضافه میگردد همچنین ولتاژ بالاتر هزینه بزرگتری را برای همان تعداد دور نسبت به اتصال ستاره – ستاره ایجاب میکند .

ب : در این اتصالها تنها به یک مقدار از ولتاژ برای بار دسترسی داریم همچنین در موقع بروز مشکل اتصال کوتاه در یک خط ولتاژ بین هسته و سیم پیچ مساوی ولتاژ کامل خط خواهد بود .

بطور کلی میتوان گفت که اتصال مثلث – مثلث در فشار ضعیف با کیلوولت آمپر نسبتا بالا اقتصادی است و به کار گرفته میشود .

اتصال ستاره – مثلث ($\Delta-Y$) :

شیوه اتصال و نمودار فازوری در شکل (۴۰) نشان داده شده است کاربرد اصلی این اتصال در پستهای فرعی انتهایی خطوط انتقال برای کاهش و توزیع ولتاژ به بار است در این نوع اتصال هم مزیتهای مخصوص اتصال مثلث و هم اتصال ستاره مورد بهره برداری قرار می گیرد کلافهای فشار قوی بصورت ستاره به خطوط اننتقال متصل میگردند بنابراین فشار وارد بر هر کلاف تنها ۰/۵۷۷ ولتاژ خط است بار فشار ضعیف به خروجی مثلث شکل وصل است که درنتیجه جریان خروجی هر کلاف ۰/۵۷۷ جریان خط خواهد شد در این سیستم برعکس

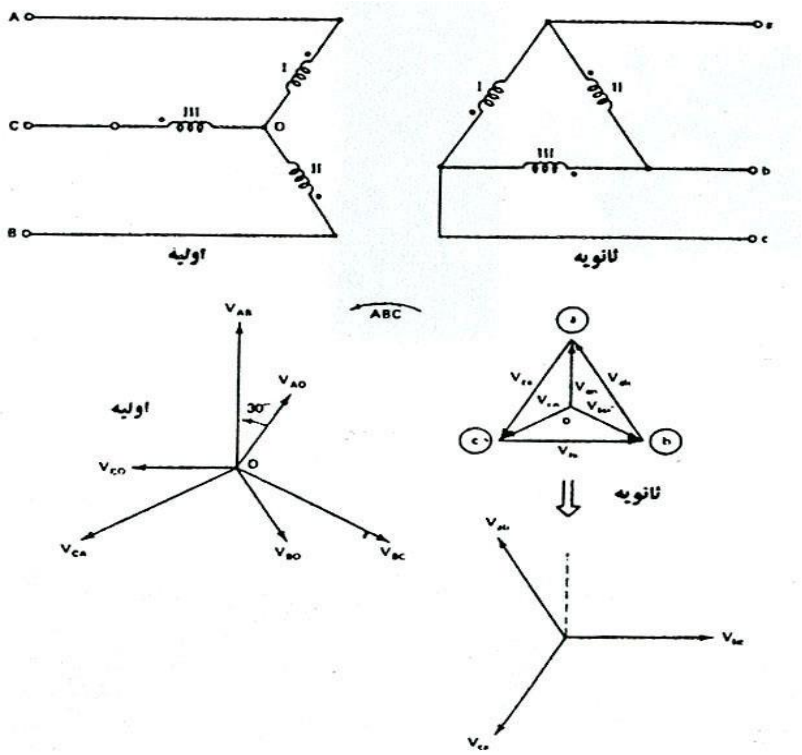
اتصالات ستاره – ستاره و مثلث – مثلث نسبت ولتاژهای خط (ورودی به خروجی) با نسبت دورهای کلافها متفاوت است بعبارت دیگر نسبت تبدیل این اتصال عبارتست از :

$$a_{Y-\Delta} = \frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_P}{V_S} = \sqrt{3}a \qquad (۱۱۰)$$

در این اتصال بار نامتعادل اثر نامطلوبی بر روی ولتاژها ندارد (برعکس ستاره – ستاره) و فقط جریانهای خط و جریانهای داخل سیم پیچ ثانویه را نامتعادل میکند .

مقایسه شکلهای فیزوری ولتاژ در اولیه و ثانویه چنین نشان میدهد که در اتصال ستاره – مثلث در مقایسه با اتصالات ستاره – ستاره و یا مثلث - مثلث یک اختلاف فاز ۳۰ درجه بین ولتاژهای اولیه و ثانویه وجود دارد از اینرو حتی درصورت مساوی بودن اندازه ولتاژ خطوط ، یک سیستم ستاره – مثلث را نمیتوان با سیستم مثلث – مثلث و یا ستاره – ستاره موازی کرد .

اتصال متقارن و درست پایانه ها همانطور که در شکل (۴۰) به نمایش درآمده است در خروجی برآیند ولتاژی برابر صفر میدهد و درنتیجه هیچ جریان گردشی در مثلث جاری نمیشود . اما اگر نقطه ستاره زمین نشده باشد هر ولتاژ هماهنگ سوم موجود در سیستم تغذیه ، در خروجی ظاهر گشته و در مثلث باهم جمع میشوند بعنوان مثال اگر ولتاژ فاز خروجی ۱۰۰ ولت باشد ولتاژ هماهنگ سوم ممکن است به بزرگی ۵۰ ولت باشد و درنتیجه قبل از بستن مدار مثلث ، ولت متر در دو سر باز مثلث مقداری به بزرگی ۵۰ ولت را نشان بدهد (با اینکه قطبیت درست رعایت شده است) . با رعایت نکردن قطبیت درست ولت متر ممکن است مقداری بالاتر از ۲۰۰ ولت را نشان بدهد . این دو حالت باید از هم تمیز داده شوند زیرا که فقط در حال اول (مقدار ولتاژ کمتر) میتوان مدار مثلث را بست و این بدان خاطر است که مقاومت ظاهری ترانس برای هماهنگ سوم سه برابر حالت پایه است و درنتیجه جریان گردشی ناچیز خواهد بود هماهنگ سوم در جریانهای خط ثانویه (در طرف مثلث) وجود نخواهد داشت زیرا جریانهای خط مساوی اختلاف جریانهایی است که در سیم پیچهای مثلث شکل در گردش است . اگر نقطه ستاره زمین شده باشد در اینصورت مشکل هماهنگ در ولتاژ وجود نداشته و آزمایش اتصال درست مثلث – ستاره بسیار ساده میگردد .



(شکل ٤٠) اتصال ستاره-مثلث

اتصال مثلث – ستاره ($\Delta - Y$) :

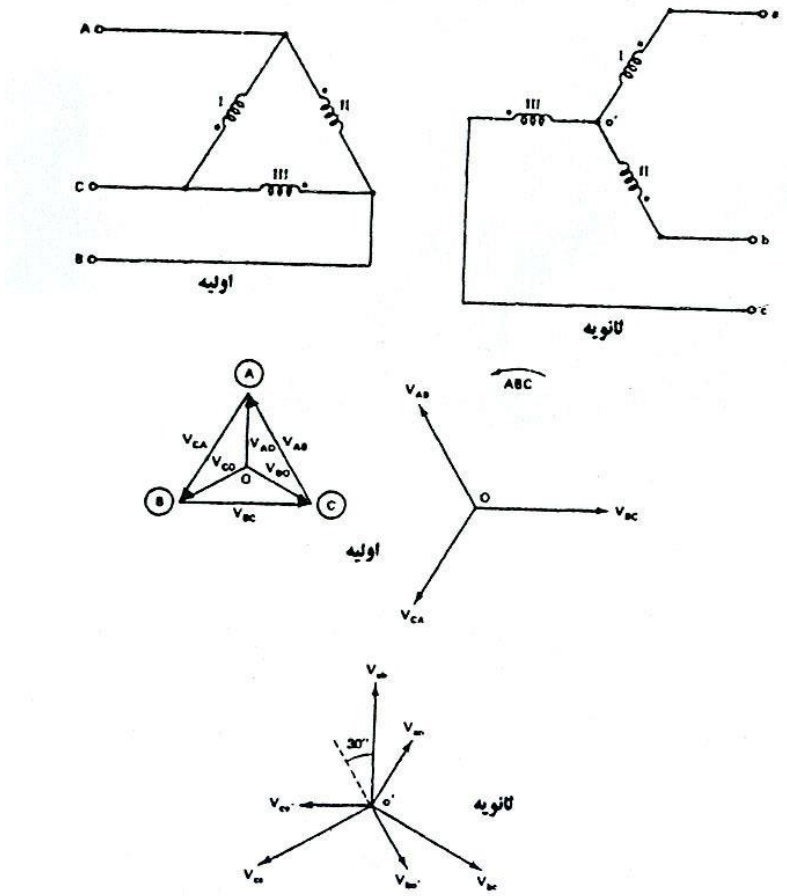
این اتصال که شبیه اتصال ستاره- مثلث است در شکل (۴۱) به نمایش درآمده است . همانطور که مشاهده میشود بار دیگر همانند اتصال ستاره- مثلث بین ولتاژهای خط ورودی و خروجی جابجایی فاز ۳۰ درجه موجود است از اینرو موازی کردن یک چنین مجموعه ای با ترانسهای ستاره- ستاره و یا مثلث- مثلث غیر ممکن است حتی اگر نسبت ولتاژها بطور صحیح تنظیم شده باشد همانطور که قبلا هم ملاحظه کرده اید نسبت تبدیل فازی در ترانسهای سه فاز برابر نسبت تبدیل دورهاست اما نسبت ولتاژهای خط بستگی به اتصال بکار برده شده دارد در اتصال مثلث – ستاره نسبت تبدیل $a_{\Delta\text{-}Y}$ مطابق رابطه زیر است :

$$a_{\Delta\text{-}Y} = \frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_P}{\sqrt{3}V_S} = \frac{a}{\sqrt{3}} \qquad (111)$$

از اتصال مثلث- ستاره اغلب در شروع خطوط انتقال انرژی برای افزایش ولتاژ تولید شده (توسط مولد) استفاده میگردد در اینحالت بار دیگر همانند ستاره- مثلث هم مزیتهای مخصوص مثلث و هم ستاره بکار گرفته میشوند . در سالهای اخیر استفاده از این اتصال عمومیت بیشتری پیدا کرده است و از آن بعنوان ترانس کاهنده نیز استفاده میشود این نوع بهره برداری در پستهای فرعی توزیع توان شهری و همچنین در کارخانه های صنعتی که به دو مقدار ولتاژ بدست آمده از ستاره احتیاج دارند (سه فاز برای بارهای پرقدرت و تکفاز

برای مصارف روشنایی با استفاده از زمین کردن صفر ستاره) دیده میشود قسمت اعظم ترانسهای سه فاز در سیستمهای قدرت از نوع Y/Δ یا Δ/Y هستند زیرا هم امکان زمین کردن در یک سمت آنها وجود دارد و هم اینکه سیم پیچ Δ میتواند هماهنگهای سوم را درون خود نگاه دارد و نگذارد که از ترانس عبور کند .

در این اتصال هیچگونه نگرانی از شناور شدن نقطه ستاره و یا اعوجاج در ولتاژ وجود ندارد زیرا اتصال مثلث مسیری برای جریانهای هماهنگ سوم ایجاد نموده و فوران سینوسی باقی میماند بطور کلی اتصال مثلث در برابر بارهای نامتعادل پایدارتر است زیرا مثلث ، عدم تعادل را در هر فاز دوباره توزیع میکند .



(شکل ٤١)

سیستم چهار سیمه مثلثی

شکل (۳۹) ترانس سه فازی را که ورودی آن مثلث و خروجی آن مثلث چهارسیمه است نشان میدهد .این سیستم در جاهایی که هم بارهای سه فاز (متصل بین نقاط **a,b,c**) و هم بار تکفاز (متصل بین **bd** یا **cd** که **d** نقطه انشعاب است) لازم است بکار رود .

نکته قابل تذکر آنست که این اتصال نباید با سه فاز چهارسیمه متداول اشتباه گرفته شود . در چهارسیمه مرسوم ولتاژ هر خط به نقطه مشترک (صفر ستاره) با هم مساوی است درحالیکه با سیستم چهارسیمه مثلثی دو ولتاژ خط به نقطه انشعاب باهم مساوی و ولتاژ خط سوم تا مشترک ۱/۷۳ برابر دو تای دیگر است بعنوان مثال اگر ولتاژ خط خروجی ۴۴۰ ولت باشد دوبار تکفاز ۲۲۰ ولتی را میتوان روی bd و cd متصل نمود درصورت اتصال بار تکفاز ۲۲۰ ولتی بین a و d ($V_{ad}=\frac{\sqrt{3}}{2}\times 440=380$) دستگاه از بین خواهد رفت بعضی مواقع نقطه d را زمین کرده که خود سردرگمی این سیستم با سیستم چهارسیمه متداول را افزایش میدهد .

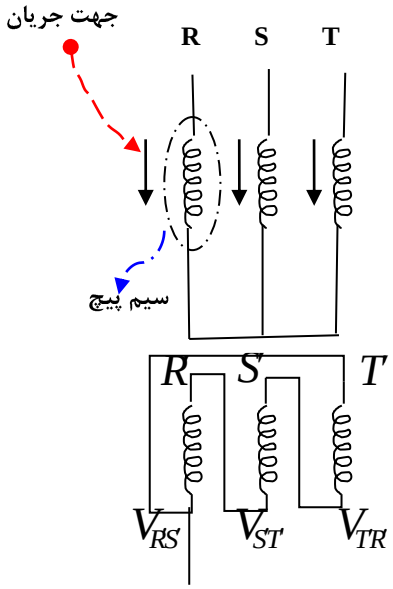
ترانس ستاره – ستاره را هم میتوان با مثلث – مثلث و هم با مثلث – مثلث چهارسیمه موازی نمود به شرط آنکه نقطه ستاره را به نقطه انشعاب مثلث وصل ننمائیم . اختلاف ولتاژ بین نقطه های مشترک ستاره و مثلث چهارسیمه ۲۹٪ ولتاژ خط است و با اتصال این دو نقطه بهم جریان گردشی شدید بوجود می آید .

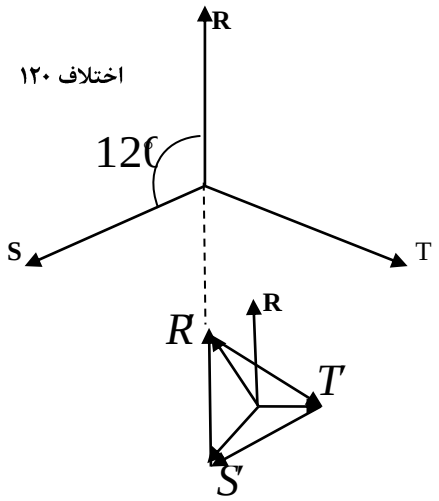
گروههای اتصال در ترانسهای سه فاز

همانگونه که از مطالب و شکلهای فیزوری بخشهای قبلی مشاهده میگردد ممکن است بین ولتاژهای یکمین و دومین یک ترانس سه فاز اختلاف فازی وجود داشته باشد ترانسهای سه فاز را باتوجه به اختلاف فاز بین ولتاژهای خط اولیه و ثانویه گروه بندی مینمایند اهمیت شناخت گروههای اتصال در ترانس سه فاز از آنجاست که در زمان موازی کردن ترانسها باهم علاوه بر مساوی بودن فرکانسها و ولتاژهای نظیر در ترانسها ، باید دو فاز از نظر زاویه نیز برهم منطبق باشند بعبارت دیگر فیزور فازهای نظیر باید کاملا برهم منطبق گردند بهمین علت تنها نشان دادن شیوه اتصال سیم پیچهای اولیه و ثانویه در یک ترانس سه فاز کافی نیست بلکه باید اختلاف فاز بین ولتاژهای خط اولیه وثانویه ترانس نیز مشخص باشد .

برای این منظور معمولا از روشی بنام روش ساعت استفاده میشود در این روش ولتاژ خط سمت اول را بر روی عقربه دقیقه شمار که روی عدد ۱۲ است قرار میدهید . اکنون اگر عقربه ساعت شمار طوری میزان شود که با عقربه دقیقه شمار همان زاویه ای را که ولتاژ خط ثانویه با اولیه بوجود می آورد بسازد ساعت نشان دهنده گروه ترانس مذکور خواهد بود . بعنوان مثال در شکلهای (۳۹) و (۴۰) و (۴۱) گروههای ترانس بترتیب ۱۲ و یا

صفر (ولتاژ خط ثانویه همفاز با ولتاژ خط اولیه) ، ۱۱ (ولتاژ ثانویه ۳۰ درجه جلوتر از ولتاژ اولیه) و ۱ (ولتاژ ثانویه ۳۰ درجه عقبتر از ولتاژ اولیه) است . در پایان لازم به گفتن است که چهار گروه ۱۲ و یا ۰ ، ۶ ، ۵ ، ۱۱ گروههای اصلی را تشکیل میدهند و در صنعت معمولا این گروهها را بترتیب با حرف A,B,C,D نمایش میدهند .



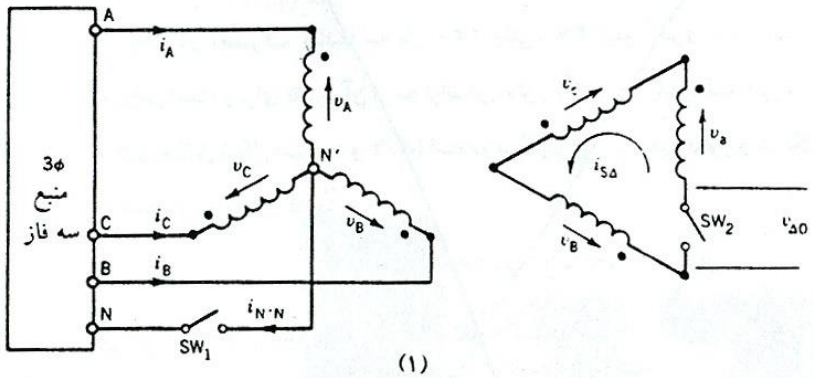


مثال : (۸)

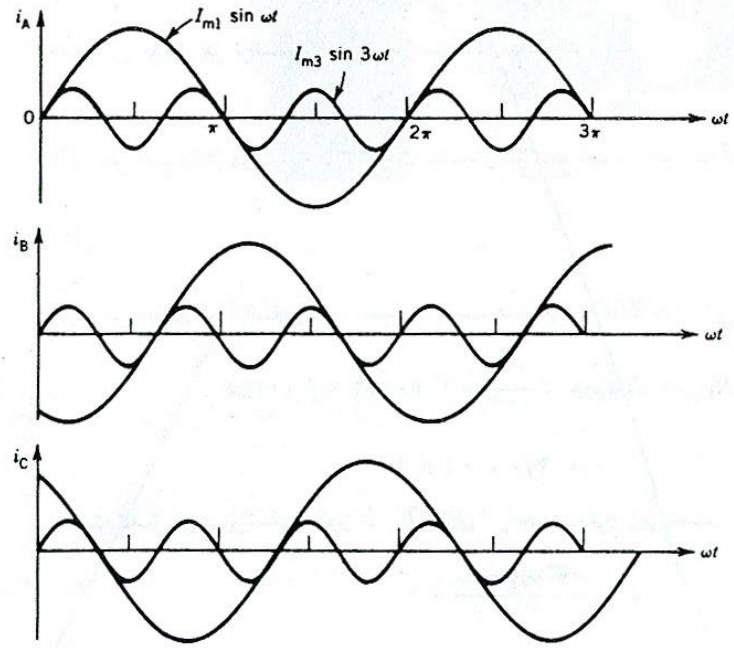
بررسی هارمونیکها در ترانسفورماتورهای سه فاز

همانطور که دیدیم اگر چگالی شار در هسته زیاد باشد دراینصورت به هسته کوچکتری نیاز داریم از نظر اقتصادی ترانسفورماتورها را طوری طراحی میکنند که در ناحیه اشباع کار کنند و این امر باعث میگردد جریان تحریک غیر سینوسی گردد . جریان تحریک غیر سینوسی حاوی هارمونیک اصلی یا هارمونیک اول و سایر هارمونیکهای فرد میباشد بعد از هارمونیک اول هارمونیک سوم از بقیه هارمونیکهای فرد قویتر است لذا در مقاصد عملی میتوان از هارمونیکهای ۵ و ۷ و ۹ و ... صرفنظر نمود گفتنی است که تحت ولتاژ اسمی ، هارمونیک سوم جریان تحریک ۵ تا ۱۰ درصد هارمونیک اول است اگر ولتاژ اعمالی به ترانسفورماتور ۱۵۰ درصد ولتاژ اسمی باشد هارمونیک سوم جریان تحریک ۳۰ تا ۶۰ درصد هارمونیک اول خواهد بود در این بخش نحوه تولید هارمونیک در انواع اتصالات ترانسفورماتورهای سه فاز مورد بررسی قرار گرفته و نحوه محدود سازی اثرات آنها مورد بحث قرار میگیرد شکل (۱-۴۵) را در نظر میگیریم که در آن اولیه بصورت Y

بوده و نقطه خنثی شبکه تغذیه نیز در دسترس است (نقطه N). اتصال ثانویه Δ میباشد اکنون حالات زیر را درنظر میگیریم .



(۱)



(۲)

(شکل ٤٥) هارمونیک جریان در ترانسفورماتور سه فاز ۱-اتصال $Y - \Delta$ ۲-شکل موج جریان‌های تحریک

کلید SW_1 بسته و کلید SW_2 باز است . شکل (۴۵)

چون SW_2 باز است لذا در سیم پیچهای ثانویه جریان براه نمی افتد و جریانهای اولیه همان جریانهای تحریک خواهد بود .گیریم جریانهای تحریک حاوی هارمونیکهای اول و سوم باشند (شکل۲-۴۵) . پس :

$$i_A = I_{m1}\sin(\omega t) + I_{m3}\sin(3\omega t) \qquad (۱۱۸)$$

$$i_B = I_{m1}\sin(\omega t - 120) + I_{m3}\sin 3(\omega t - 120) \qquad (۱۱۹)$$

$$i_C = I_{m1}\sin(\omega t - 240) + I_{m3}\sin 3(\omega t - 240) \qquad (۱۲۰)$$

جریان در سیم خنثی بقرار زیر است :

$$i_{NN} = i_A + i_B + i_C = 3I_{mB}\sin 3\omega t \qquad (۱۲۱)$$

گفتنی است که مؤلفه های هارمونیک اول باهم ۱۲۰ درجه اختلاف فاز دارند ولی مؤلفه های هارمونیک سوم همفازند . مشاهده میشود سیم خنثی حامل هارمونیک سوم است (شکل۱-۴۶) از آنجائیکه جریان تحریک سینوسی نیست (شکل۲-۴۶) شار در هسته و ولتاژهای القایی در سیم پیچها سینوسی خواهند بود چون سیم پیچهای ثانویه باز هستند (SW_2 باز است) پس :

$$v_{\Delta_0} = v_a + v_b + v_c = 0 \qquad (۱۲۲)$$

SW_1 و SW_2 باز هستند:

در اینحالت در اولیه هارمونیک سوم نمیتواند برقرار گردد و لذا جریان اولیه (جریان تحریک) اساسا سینوسی است . اگر جریان تحریک سینوسی باشد بخاطر غیرخطی بودن منحنی **B-H** شار غیر سینوسی شده و حاوی هارمونیک سوم میباشد . پس ولتاژهای القایی نیز حاوی هارمونیک سوم میشوند . برای ولتاژهای القایی در سمت اولیه داریم :

$$v_A = v_{A1} + v_{A3} \qquad (۱۲۳)$$

$$v_B = v_{B1} + v_{B3} \qquad (۱۲۴)$$

$$v_C = v_{C1} + v_{C3} \qquad (۱۲۵)$$

اندیسهای ۱ و ۳ نمایانگر هارمونیکهای اول و سوم است ولتاژ خط – خط بقرار زیر است :

$$v_{AB} = v_A - v_B = v_{A1} - v_{B1} + v_{A3} - v_{B3} \qquad (۱۲۶)$$

از آنجائیکه v_{A3} و v_{B3} همفاز و مساویند پس : (۱۲۷)

$$v_{A3} - v_{B3} = 0$$

لذا :

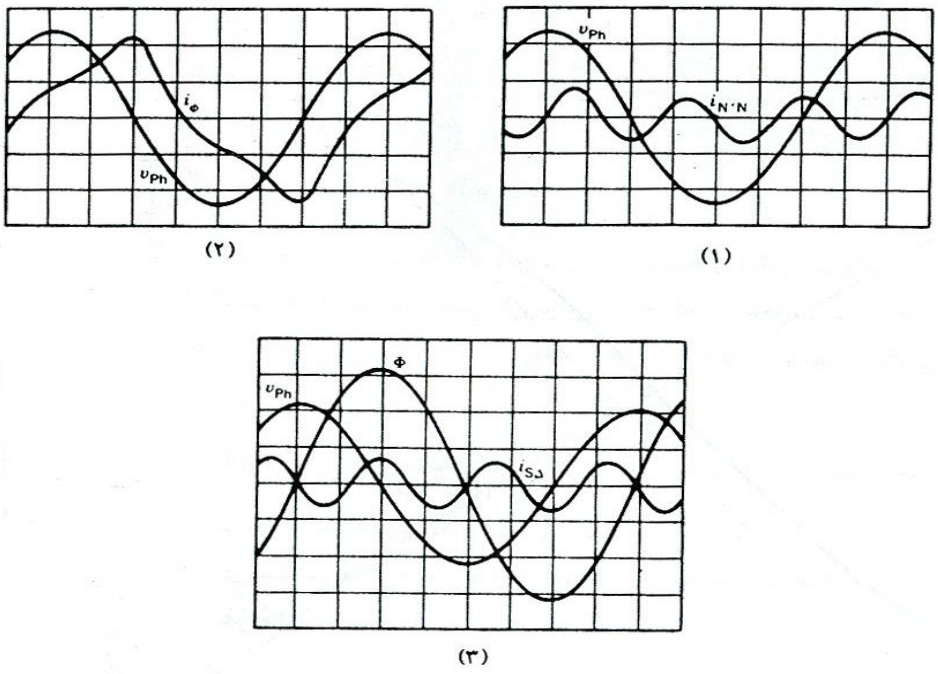
$$v_{AB} = v_{A1} - v_{B1} \qquad (۱۲۸)$$

نتیجه میگیریم با آنکه ولتاژهای فاز حاوی هارمونیک سوم هستند ولی ولتاژهای خط – خط حاوی هارمونیک سوم نمی باشند ولتاژ مثلث باز در شکل (۱-۴۵) در ثانویه ترانسفورماتور بقرار زیر است :

$$v_{\Delta 0} = v_a + v_b + v_c = (v_{a1} + v_{b1} + v_{c1}) + (v_{a3} + v_{b3} + v_{c3}) = v_{a3} + v_{b3} + v_{c3} = 3v_{a3} \qquad (۱۲۹)$$

کلید SW_1 باز و SW_2 کلید بسته است :

اگر SW_2 کلید بسته شود $v_{\Delta 0}$ جریان هارمونیک سوم را در اتصال مثلث ثانویه براه می اندازد این امر هارمونیک سوم گم شده جریان تحریک در سمت اولیه را تأمین کرده و لذا شار و ولتاژهای القایی سینوسی می گردند (شکل۳-۴۶)

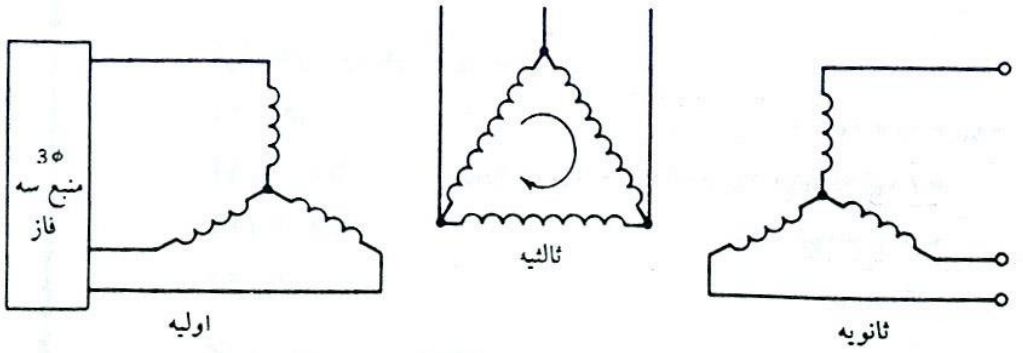


(شکل٤٦) اسیلوگرام ولتاژ و جریان در اتصال Y - Δ

اتصال $Y-Y$ با سیم پیچ ثالثیه Δ

اگر دو سمت ترانسفورماتور سه فاز فشارقوی باشد و مجبور باشیم هر دو سمت اولیه و ثانویه را بصورت اتصال ستاره ببندیم (شکل۴۷) در اینصورت هارمونیک سوم جریان تحریک در هیچ طرف براه نمی افتد . برای تأمین هارمونیک سوم سه سیم پیچ اضافی با اتصال Δ تعبیه میکنیم و به آن سیم پیچ ثالثیه اطلاق میگردد این سیم پیچ سه فاز مثلث شکل

هارمونیک سوم جریان تحریک را تأمین مینماید همچنین این سیم پیچ سه فاز مثلث شکل میتواند در مواقع لزوم مصرف کننده دیگری را نیز تغذیه نماید .



(شکل۴۷) اتصال Y-Y با سیم‌پیچ ثالثیه Δ

اتصال مثلث باز یا V-V

این اتصال ما را قادر میسازد که با استفاده از دو ترانسفورماتور تکفاز یک سیستم سه فاز را مورد بهره برداری قرار دهیم این اتصال شبیه اتصال $\Delta-\Delta$ برای سه ترانسفورماتور تکفاز است که یکی از ترانسفورماتورها از مدار به عللی خارج شده باشد شکل (۲-۴۸) شمای اتصال V-V را نشان میدهد که دو ترانسفورماتور تکفاز بین منبع و بار سه فاز قرار گرفته اند . نمودار فازوری شکل (۱-۴۸) نشان میدهد که منبع سه فاز متعادل به دو سیم پیچ اولیه متصل است باید دانست که V_{CA} منتجه V_{BC} و V_{AB} است ولتاژهای القاء شده در ثانویه یعنی V_{an} و V_{bn} ولتاژهای سه فاز متعادلی بنامهای V_{ar} ، V_{br} ، V_{cn} در دو سر مصرف کننده (بار) ایجاد میکنند (شکل ۳-۴۸) ولتاژ و جریان بار را اینچنین درنظر میگیریم :

$$V_{an}=V_2\angle 0 \qquad V_{bn}=V_2\angle -120 \qquad V_{cn}=V_2\angle +120$$

$$I_{an}=I_2\angle -\phi \qquad I_{bn}=I_2\angle -120-\phi \qquad I_{cn}=I_2\angle 120-\phi$$

ثانویه ترانسفورماتور شماره (۱) بار را تحت جریان I_{ar} و ولتاژ V_{ab} تغذیه میکند و باید دانست :

$$V_{ab}=\sqrt{3}V_2\angle 30 \qquad (۱۳۰)$$

توان ظاهری تحویلی به بار توسط ترانسفورماتور شماره (۱) بقرار زیر است :

$$S_1=V_{ab}I_{an}=\sqrt{3}V_2I_2\angle\phi+30 \qquad (۱۳۱)$$

پس ترانسفورماتور شماره (۱) تحت ضریب توان $\cos(\Phi+30)$ کار میکند بطریقی مشابه توان ظاهری تحویلی به بار توسط ترانسفورماتور شماره (۲) بقرار زیر است :

$$S_2=V_{cb}I_{cn}^*=(\sqrt{3}V_2\angle 90)(I_2\angle\phi-120) \qquad \Rightarrow S_2=V_2I_2\angle\phi-30 \qquad (۱۳۲)$$

پس ترانسفورماتور شماره (۲) تحت ضریب توان $\cos(\Phi-30)$ کار میکند پرواضح است کل توان ظاهری تحویلی به بار بقرار زیر است :

$$S_t = S_1 + S_2 = \sqrt{3} V_2 I_2 \angle \phi \qquad (۱۳۳)$$

پس توان اسمی در اتصال **V-V** بشرح زیر است : $VA_{rating} = \sqrt{3} V_2 I_2$

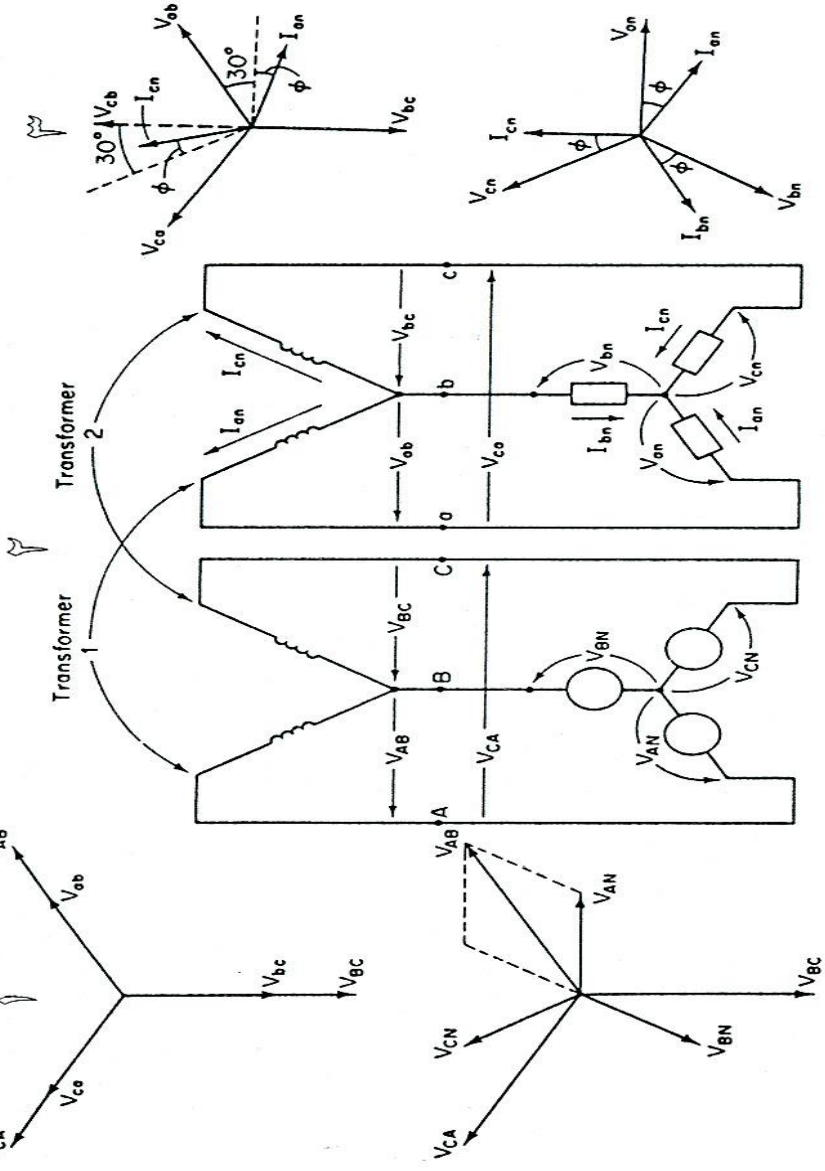
لذا ولت آمپر اسمی در اتصال **V-V** بر حسب ولت آمپر اسمی هر ترانسفورماتور بقرار زیر است :

$$|S_t| = \sqrt{3} VA_{rating} \qquad (۱۳۴)$$

اما در اتصال $\Delta-\Delta$ ولت آمپر اسمی باتوجه به ولت آمپر اسمی هر ترانسفورماتور بقرار زیر است :

$$|S_{t\Delta}| = 3 VA_{ratir} \qquad (۱۳۵)$$

پس :(توان اسمی در اتصال **V-V**) $\sqrt{3}$ = توان اسمی در اتصال $\Delta-\Delta$



(شکل۴۸) ۱ـ نمودار فازوری در اولیه اتصال $V-V$ ۲ـ شمای اتصال $V-V$
۳ـ نمودار فازوری در ثانویه اتصال $V-V$

اتصال T-T

در این اتصال همچون اتصال V-V میتوان از دو ترانسفورماتور تکفاز در یک سیستم سه فاز استفاده کرد . ترانسفورماتور شماره (۱) حاوی یک سیم پیچ اولیه و یک سیم پیچ ثانویه است . تعداد دور اولیه $2N_1$ و تعداد دور ثانویه $2N_2$ است . معمولا به ترانسفورماتور شماره (۱) لفظ ترانسفورماتور اصلی نیز اطلاق میگردد . ترانسفورماتور شماره (۲) نیز شامل یک سیم پیچ اولیه و یک سیم پیچ ثانویه است . تعداد دور سیم پیچ اولیه $\sqrt{3}N_1$ و تعداد دور سیم پیچ ثانویه $\sqrt{3}N_2$ میباشد . معمولا با ترانسفورماتور شماره (۲) لفظ ترانسفورماتور تیسر نیز اطلاق میگردد . باید دانست همچون شکل (۴۹) یک سر سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور تیسر به وسط سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور اصلی وصل بوده و عین همین عمل در ثانویه تکرار شده است باز در اینجا فرض میکنیم ولتاژ بر هر دور در هر دو ترانسفورماتور یکسان است و لذا ولتاژ اسمی سیم پیچهای اولیه و ثانویه ترانسفورماتور تیسر معادل ۰/۸۶۶ برابر ولتاژ اسمی سیم پیچهای اولیه و ثانویه ترانسفورماتور اصلس است .

باید دانست :

$$0.866=\frac{\sqrt{3}}{2}$$

حال دوباره اتصال T-T همچون شکل (۴۹) را در نظر میگیریم و فرض میکنیم که اولیه آن به یک منبع سه فاز با اتصال ستاره وصل شده باشد و ولتاژهای فاز منبع را اینچنین درنظر میگیریم :

$$V_{AN}=\frac{V_1}{\sqrt{3}}\angle -30$$

$$V_{BN}=\frac{V_1}{\sqrt{3}}\angle -15$$

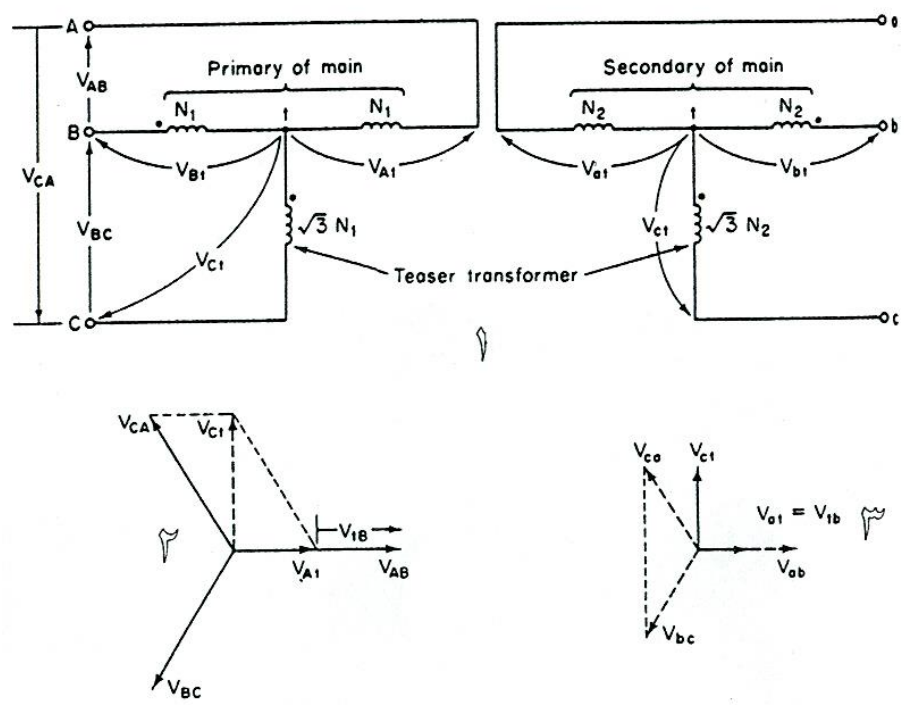
$$V_{CN}=\frac{V_1}{\sqrt{3}}\angle 90$$

گیریم جریان فازها همفاز ولتاژهای فاز باشند پس :

$$I_{AN}=I_1\angle -30$$

$$I_{BN}=I_1\angle -15$$

$$I_{CN}=I_1\angle 90$$



(شکل ۴۹) : اتصال $T-T$

پس جریانهای سیم پیچ های موجود در اولیه بقرار زیر میشود :

$$I_{At}=I_1\angle -3($$

$$I_{Bt}=I_1\angle -15($$

$$I_{Ct}=I_1\angle 9($$

ولتاژهای اعمال شده به سیم پیچهای اولیه متعادل بوده و بقرار زیرند :

$$V_{AB}=V_1\angle 0$$

$$V_{BC}=V_1\angle -12($$

$$V_{CA}=V_1\angle 12($$

V_{AB} **به نسبت مساوی بین سیم پیچهای A-t و B-t تقسیم میشود یعنی :**

$$V_{AB}=V_{At}+V_{tB}=V_1\angle 0$$

باتوجه به شکل (۴۹) داریم :

$$V_{At}=\frac{V_1}{2}\angle 0$$

$$V_{Bt}=\frac{V_1}{2}\angle 18($$

برای بدست آوردن V_{ct} اینچنین عمل میکنیم :

$$V_{Ct}=V_{CA}+V_{At}=V_1\angle 120+\frac{V_1}{2}\angle 0$$

$$V_{Ct}=\frac{\sqrt{3}}{2}V_1\angle 9($$

برای سیم پیچهای ثانویه نیز داریم :

$$V_{at}=\frac{N_2}{N_1}V_{At}=\frac{N_2}{N_1}\frac{V_1}{2}\angle 0$$

$$V_{bt}=\frac{N_2}{N_1}V_{Bt}=\frac{N_2}{N_1}\frac{V_1}{2}\angle 18($$

$$V_{ct}=\frac{\sqrt{3}N_2}{\sqrt{3}N_1}V_{Ct}=\frac{N_2}{N_1}\frac{\sqrt{3}}{2}V_1\angle 9($$

جریانهای ثانویه نیز اینچنین حساب میشود :

$$I_{ta}=\frac{N_1}{N_2}I_{At}=\frac{N_1}{N_2}I_1\angle -3($$

$$I_{tb}=\frac{N_1}{N_2}I_{Bt}=\frac{N_1}{N_2}I_1\angle -15($$

$$I_{tc}=\frac{\sqrt{3}N_1}{\sqrt{3}N_2}I_{Ct}=\frac{N_1}{N_2}I_1\angle 9($$

توانهای ظاهری در قسمتهای A و B در سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور اصلی اینچنین حساب میشود :

$$S_{At}=V_{At}I_{At}^{*}=\frac{V_1I_1}{2}\angle 30=\frac{V_1I_1}{2}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}+j\frac{1}{2}\right)$$

$$S_{Bt}=V_{Bt}I_{Bt}^{*}=\frac{V_1I_1}{2}\angle -30=\frac{V_1I_1}{2}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}-j\frac{1}{2}\right)$$

توجه کنید که توان راکتیو قسمت A اندوکتیو و توان راکتیو قسمت B خازنی یا کاپاسیتیو است . کل توان ظاهری در اولیه ترانسفورماتور اصلی بقرار زیر است و پرواضح است که ضریب توان واحد میباشد .

$$S_{primary} = S_{At} + S_{Bt} = V_1 I_1 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

توان ظاهری در اولیه ترانسفورماتور تیسر اینچنین حساب میشود :

$$S_{Ct} = V_{Ct} I_{Ct}^* = V_1 I_1 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

پس توان ظاهری در اولیه ترانسفورماتور اصلی معادل توان ظاهری در اولیه ترانسفورماتور تیسر میباشد . اگر ترانسفورماتورها را ایده آل بگیریم پرواضح است که روابط زیر نیز در ثانویه برقرار است :

$$S_{ta} + S_{tb} = \frac{V_1 I_1 \sqrt{3}}{2} \qquad S_{tc} = \frac{V_1 I_1 \sqrt{3}}{2}$$

اتصال اسکات

هنگام تحلیل اتصال T-T دریافتیم که V_{at} و V_{ct} ازنظر مقدار نامساوی و باهم ۹۰ درجه اختلاف فاز دارند همچنین بین V_{ct} و V_{bt} نیز ۹۰ درجه اختلاف فاز وجود دارد .

در اینجا یادآوری میکنیم که یک سیستم دوفاز از دو فازور ولتاژ تشکیل شده که از نظر مقدار باهم برابر اما با یکدیگر ۹۰ درجه اختلاف فاز دارند . واضح است که اتصال T-T را میتوان با اندک تغییری به شکلی درآورد که یک سیستم سه فاز را به یک سیستم دوفاز تبدیل نماید . این عمل را تبدیل اسکات نامند و نوع اتصال را اتصال اسکات گویند .

اولیه در اتصال اسکات عینا شبیه اتصال T-T میباشد (شکل۱-۵۰) اما اتصال ثانویه ترانسفورماتور اصلی و ترانسفورماتور تیسر در اتصال اسکات با اتصال T-T متفاوت است و این امر در شکل (۱-۵۰) نشان داده شده است . تعداد دور سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور اصلی برابر $2N_2$ و تعداد دور سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور تیسر نیز برابر $2N_2$ میباشد .

فرض کنید به اولیه اتصال اسکات همانند اتصال T-T یک منبع سه فاز متعادل وصل شود . پرواضح است که :

$$V_{At} = \frac{V_1}{2} \angle 0 \qquad V_{Bt} = \frac{V_1}{2} \angle 180 \qquad V_{Ct} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_1 \angle 90$$

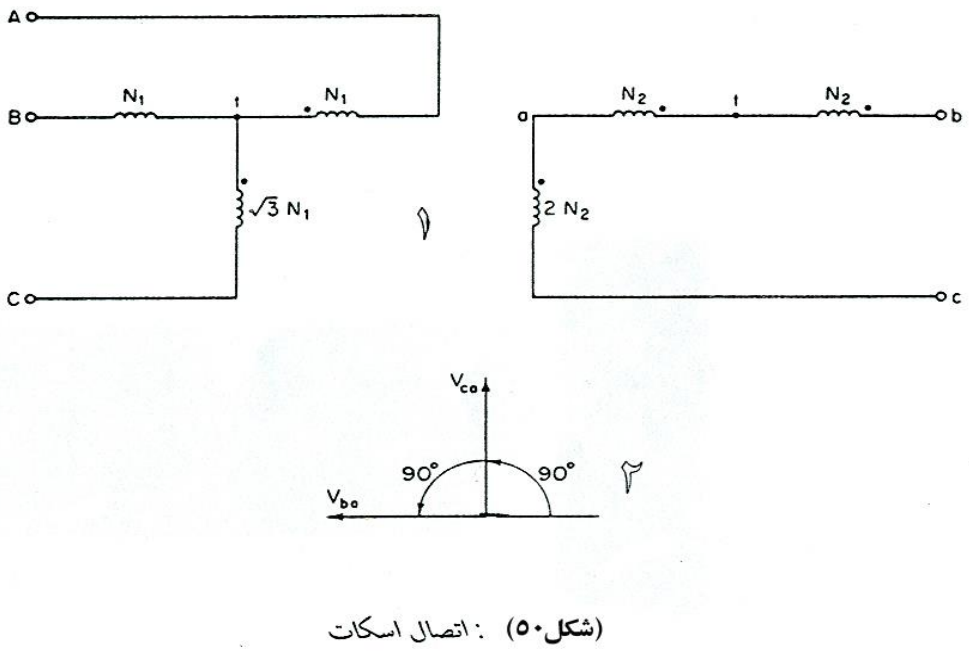
باتوجه به نسبت تبدیلها در ثانویه داریم :

$$V_{at}=\frac{V_1}{2}\frac{N_2}{N_1}\angle 0 \qquad V_{bt}=\frac{V_1}{2}\frac{N_2}{N_1}\angle 180 \qquad V_{ct}=\frac{\sqrt{3}}{2}V_1\frac{2N_2}{\sqrt{3}N_1}\angle 90$$

به سهولت داریم :

$$V_{ba}=V_{bt}+V_{ta}=\frac{N_2}{N_1}V_1\angle 180 \qquad V_{ca}=\frac{N_2}{N_1}V_1\angle 90$$

ملاحظه میشود که از یک سیستم سه فاز به یک سیستم دوفاز دست یافته ایم .



(شکل۵۰) : اتصال اسکات

طریقه خنک کردن ترانسفورماتورها :

تلفات ترانسفورماتور باعث گرم شدن ترانسفورماتور میشود و اگر حرارت ایجاد شده بخارج هدایت نشود بازدهی ترانسفورماتور کم شده و جه بسا باعث سوختن ترانسفورماتور میشود . برای خنک کردن ترانسفورماتور برحسب نوع ترانسفورماتور (خشک یا روغنی) طرق مختلفی موجود است که عبارتند از :

۱. ترانسفورماتور خشک

ترانسفورماتور خشک باقدرت زیاد بندرت ساخته میشود زیرا این ترانسفورماتورها از نظر استقامت الکتریکی و دینامیکی خیلی ضعیفتر از ترانسفورماتورهای روغنی میباشند .

ترانسفورماتورهای خشک معمولا با قدرت 300KVA و ماکزیمم ولتاژ 10KVA ساخته میشوند . در ترانسفورماتورهای خشک با قدرت کم معمولا وسیله اضافی برای خشک کردن ترانسفورماتور بکار برده نمی

شود بلکه همان خنک شدن طبیعی در اثر تماس مداوم و عادی هوا با سطوح ترانسفورماتور کافی است . این نوع ترانسفورماتور را که معمولا خودبخود خنک میشود با TS نشان میدهند ترانسفورماتورهای خشک با قدرت بیشتر را به کمک فتیلاتورهای (بادزن) مخصوص خنک میکنند این ترانسفورماتورها با علامت TF مشخص میشوند .

در این طریقه خنک کردن حرکت و سیرکولاسیون هوا بوسیله فتیلاتور زیاد و سریع شده درنتیجه هدایت حرارت بخارج سریعتر عملی میگردد . ترانسفورماتورهای خشک باید حتی الامکان بطور دائمی به ولتاژ وصل باشد و از شبکه برق قطع نگردند زیرا قطع شدن آن باعث خنک شدن و عرق کردن و مرطوب شدن ترانسفورماتور میگردد .

۲. ترانسفورماتور روغنی

ترانسفورماتورهای قدرت زیاد تماما روغنی هستند بطوریکه هسته ترانسفورماتور با سیم پیچی در داخل محفظه پر از روغن قرار میگیرند . در این ترانسفورماتورها روغن واسطه انتقال حرارت از هسته و سیم پیچی ترانسفورماتور به هوای خارج میباشد . طرق مختلف خنک کردن ترانسفورماتورهای روغنی بشرح زیر است :

الف : خنک شدن طبیعی (OS)

این نوع خنک کردن عملا بدون هیچ واسطه ای انجام میگیرد و درحقیقت برداشت حرارت در اثر تشعشع هدایت و انتقال حرارت بطور عادی و طبیعی انجام میگیرد و ساده ترین و ارزانترین روش خنک کردن ترانسفورماتور است زیرا ترانسفورماتور احتیاج به هیچگونه مراقبت و نگهداری خاصی ندارد .

در ترانسفورماتورهای کوچک تا قدرت 30KVA کافی است که سطوح خارجی منبع روغن صاف باشد و در قدرتهای بیشتر تا 6000KVA برای بزرگ کردن سطح تماس منبع روغن با هوا منبع روغن را پره دار و یا موجی درست می کنند و در قدرتهای بیشتر تا حدود 20000KVA منبع روغن دارای لوله های خنک کننده مجزا میباشد . لوله ها متناسب با قدرت ترانسفورماتور در ۲ یا ۵ ردیف در اطراف منبع ترانسفورماتور نصب میشود . عمل خنک کردن بطور طبیعی را میتوان با جریان انداختن سریع روغن توسط پمپ مخصوصی تسریع نمود .

ب : **خنک کردن غیرطبیعی**

ترانسفورماتورهای خیلی بزرگ و یا ترانسفورماتورهایی که در اتاق سرپوشیده و کوچک نصب میشوند باید بطور مصنوعی خنک شوند تا عمل خنک شدن تسریع یابد و از بازدهی ترانسفورماتور کاسته نگردد . خنک کردن مصنوعی بیشتر به کمک آب (OW) و یا به کمک جریان انداختن سریع هوا (فتیلاتور)(OF) انجام میشود .خنک کردن ترانسفورماتور به کمک آب دو طریق است :

۱. **خنک کردن روغن ترانسفورماتور در داخل منبع**
۲. **خنک کردن روغن ترانسفورماتور در خارج از منبع**

در طریقه اول لوله های آب سرد از داخل منبع ترانسفورماتور در کنار دیواره های منبع و یا در سقف منبع عبور داده میشود و جریان آب سرد باعث خنک کردن روغن میگردد در این طریقه نشت کردن احتمالی آب باعث خراب شدن ترانسفورماتور میشود .

در طریقه دوم روغن گرم از ترانسفورماتور خارج شده و به کمک آب خنک شده مجددابه داخل ترانسفورماتور تزریق میشود . در اینگونه ترانسفورماتورها روغن از بالای ترانسفورماتور توسط پمپ روغن خارج شده پس از خنک شدن در کولر آبی مجددا از زیر ترانسفورماتور وارد منبع روغن میشود .

در ترانسفورماتورهای با قدرت خیلی زیاد از کولر مخصوصی استفاده میشود .

- تانک اصلی روغن :

تانک ترانس یک ظرف مکعب یا بیضوی شکل است که هسته و سیم پیچ های ترانس در آن قرار می گیرند و نقش یک پوشش حفاظتی را برای آنها ایفا می کند داخل این ظرف از روغن پر می شود بطوریکه هسته و سیم پیچ کاملاً در روغن فرو می روند . سطح خارجی تانک تلفات گرمایی داخل ترانس را به بیرون منتقل می کند از هر مترمربع سطح تانک حدوداً ۴۰۰ الی ۴۵۰ وات توان گرمایی به خارج منتقل می شود ، بطوریکه در ترانسهای کوچک ، همین سطح برای خنک کاری کافی است و به تمهیدات دیگری نظیر رادیاتور وفن نیاز نمی باشد.در ترانسهای تا ۵۰ KVA بدنه تانک از ورق ساده فولادی به ضخامت حدوداً ۳MM ساخته می شود ،

سطح آن صاف بوده و نیازی به میله های تقویتی یا لوله های خنک کن ندارد . هر ۴ وجه ترانس از یک ورق یک پارچه درست می شود و فقط در یک گوشه جوشکاری می گردد .

تانک ترانس بایستی موجب شود که موارد مشروحه ذیل تأمین گردند :

- حفاظتی برای هسته ، سیم پیچ ، روغن و سایر متعلقات داخلی باشد .

- دارای استقامت کافی باشد که در حین حمل و نقل و نیز در زمان اتصال کوتاه داخلی بتواند تنش های مکانیکی ایجاد شده را تحمل نماید .

- ارتعاشات و صدا درآن به حداقل می رسد.

- ساختمان آن در برابر نشت روغن و یا نفوذ هوا کاملاً آب بندی باشد .

- سطوح کافی برای دفع گرمای ناشی از تلفات ترانس را تأمین کند .

- محلی برای نصب بوشینگها ، تب چنجر ، مخزن ذخیره روغن و سایر متعلقات باشد.

- در حدی باشد که براحتی قابل تحمل و حمل و نقل از طریق جاده یا راه آهن باشد .

- حداقل تلفات فوکو در آن ایجاد شود .

- حداقل میدان مغناطیسی در خارج از آن وجود داشته باشد .

در ضمن طراحی تانک ترانس به روش پیش بینی شده برای حمل و نقل آن نیز بستگی دارد .

• روغن ترانس :

روغن ترانسفورماتور بخش تصفیه شده روغن معدنی می باشد که در دمای بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی گراد به جوش آمده است . این روغن پس از تصفیه از لحاظ شیمیایی کاملاً خالص بوده و تنها شامل هیدرو کربنهای مایع می باشد. روغن ترانسفورماتورهای قدرت نقش بسیار مهمی در عملکرد ترانسفورماتورها دارند. نقش

عایق کنندگی، خنک کنندگی و تشخیص عیب از جمله مهمترین وظـایف روغــن مــی باشــند. بـا پیرشــدن ترانسفورماتور ، روغن این دستگاه بعضی از خصوصیات شیمیایی و الکتریکی خود را از دست می دهد.

- روغن ترانسفورماتور دو وظیفه اساسی بر عهده دارد:

اول اینکه بعنوان عایق الکتریکی عمل می نمایـد و ثانیـاً حـرارت هـای ایجـاد شـده در قسـمتهای برقـدار ترانسفورماتور را به خارج منتقل می کند.

با ولتاژ های بالایی که هم اکنون در شبکه انتقال انرژی صورت می گیرد نیاز به روغن ترانسفورماتور ها بعنوان عایق الکتریکی و وسیله خنک کننده افزایش یافته است.چنانچه روغن خالص باشد مشخصات الکتریکـی آن خوب خواهد بود و نیز اگر ویسکوزیته (چسبندگی) روغن کم باشد ، خاصیت خنک کنندگی بهتـری خواهـد داشت و **POUR POINT** آن پائین خواهد بود . به هر حال ویسکوزیته روغن را نمـی تـوان بسـیار پـائین انتخاب کرد زیرا در این صورت **flash point** روغن پائین تر خواهد آمد و از روغن با **flash point** پائین نبایستی استفاده کرد.پائین ترین حد **flash point** در اینگونه موارد ۱۳۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفتـه میشود.در عین حال ویسکوزیته روغن نباید به اندازه کافی پائین باشد تا **p.p** روغن کمتر از ۴۰- درجه سانتی گراد باشد.(در بعضی کشورهای اروپای شمالی از روغنهایی با **p.p** پائیت استفاده میشود) .

خصوصیات یک روغن ایده آل میتواند آیتمهای زیر را در بر داشته باشد :

۱- استقامت الکتریکی بالایی داشته باشد.

۲- انتقال حرارت را بخوبی انجام دهد .

۳- جرم مخصوص پائینی داشته باشد . در روغن هایی که جرم مخصوص پائینی دارند ، ذرات معلق براحتـی و بـه سـرعت تـه نشـین میگردنـد و ایـن خاصـیت باعـث تسـریع در رونـد همـوژنیزه روغـن میشـود.
۴- ویسکوزیته پائینی داشته باشد، روغنی که وسکوزیته پائینی دارد سیالیت آن بهتر است و بیشتر اسـت و در نتیجه خاصیت خنک کنندگی بهتری خواهد داشت.

۵- **Pour point** پائینی داشته باشد .روغنی که **Pour point** پائینی دارد در درجه حرارت هـای پـائین حرکت خود را از دست خواهد داد.

۶- **Flash point** بالایی داشته باشد. **Flash point** مشخص کننده تمایل روغن به تبخیـر شـدن مـی باشد. هر چه **Flash point** روغن پائین تر باشد تمایل به تبخیر شدن در روغن بیشتر اسـت.هنگامی کـه روغن تبخیر میشود ، ویسکوزیته آن بالا میرود و روغن های تبخیر شده ترکیبات اتش زایی را با هوای بـالای روغن ایجاد می کنند.

۷- به مواد عایقی و استراکچر فلزی نمی بایستی آسیبی برساند.

۸- خاصیت شـیمیایی پایـداری داشـته باشـد.این مسـئله بـه عمـر بیشـتر روغـن کمـک خواهـد کـرد.

• خصوصیات روغن ترانسفورماتور :

روغنـــی کـــه در ترانســـفورماتور بکـــار میـــرود مـــی بایســـتی دو خصیصـــه زیـــر را داشـــته باشـــد :

۱- روغن باید تمییز باشد .مواد جامد معلق یا ترکیبات شیمیایی زیان آور و یا آب در آن هرگز موجود نباشد.

۲- روغن از لحاظ شیمیایی بایستی پایدار باشد .تغییرات روغن با توجه به گرما و اکسیژنی که با آن در تماس باشد در درجه حرارت کار نرمال ترانس میبایستی تا حد امکان کم باشد.

• ناخالصی ها :

ناخالصی ها در اولین قدم خاصیت الکتریکی روغن را تحت تاثیر قرار می دهد. با توجه به نوع ناخالصی تـاثیر پذیری روغن متفاوت خواهد بود.بطور مثال :

۱- ذرات جامد با قطر بیشتر از **m** ۱۵ **µ** و قطرات کوچک آب استقامت دی الکتریک روغن را کاهش میدهد.

۲- چنانچه ذرات جامد در روغن باشد ، استقامت دی الکتریک روغن توسط آب های غیـر محلـول در روغـن کاهش خواهد یافت.

۳- ذرات جامد بسیار کوچک (<۱۵μm) برای مثال ترکیبات قطبی حل نشده در میدانهای الکتریکی بالا تلفات دی الکتریکی در روغن را بالا خواهد برد.

به هر حال هر چه میزان ناخالصی ها در روغن بیشتر باشد،تاثیر پذیری روغن بیشتر خواهد شد.بنابر این برای انواع مختلف نا خالصی ها و خصوصیات الکتریکی وابسته به روغن می بایستی محدودیت هایی در نظر گرفت.

• زوال و اضمحلال روغن :

از آنجا که روغن یک ترکیب آلی است زوال و تاثیر ناپذیری آنرا در مقابل گرما و اکسیژن نمی توانیم کاملاً از بین ببریم. بنابراین روغن اکسیده میشود و ترکیبات اسیدی و قطبی به تبع آن بوجود می آید و کشش سطحی روغن در مقابل آب کاهش می باید.

از طرف دیگر ترکیبات اسیدی بر کاغذ و تخته های فشرده شده عایق های سیم پیچی ها تاثیر نامطلوبی خواهد گذاشت. در حقیقت سلول های عایقی هنگامی که تحت حرارت قرار می گیرند در محیط اسیدی سریعتر از محیط خنثی ترد و شکننده می شوند.

تشکیل لجن و کثافات در روغن ترانسفورماتور از پیامدهای دیگر زوال و اضمحلال روغن می باشد. پس از این مرحله تغییرات در روغن نسبتاً سریعتر صورت می گیرد . برای مثال کشش سطحی در این مرحله از مقدار اولیه خود **45 * 10 -3 N/M** به مقدار **15 * 10 -3 N/M** کاهش می یابد.لجن و کثافات هنگامی که در روغن ترانسفورماتور تشکیل میشوند ، بر روی سیم پیچی ها رسوب می کنند و باعث می گردند که سیم پیچی ها بطور موثر خنک نشوند.

• تجزیه و تحلیل گازها برای آشکار کردن نقصهای ابتدایی در ترانسفورماتور :

عایقها در یک ترانسفورماتور تنها به دلیل حرارت و تجزیه شیمیایی زائل نمی شوند، بلکه تخلیه الکتریکی نیز در این فرایند موثر می باشند. بوسیله تخلیه الکتریکی و درجه حرارت نسبتاً بالای محیط ، روغن و کاغذ به مواد گازی از قبیل هیدروژن – متان – اتیلن – استیلن – و اکسید کربن تجزیه می گردند . این پدیده در

ترانسفورماتور بدین معنی است که نقصی وجود دارد . این نقص می تواند کاملاً بی ضرر باشد و نیز مـی توانـد بسیار جدی بوده و دیر یا زود منتهی به عملکرد بد ترانسفورماتور شود.

منشاء و میزان گازهای مختلف تولید شده بستگی به نوع و جدی بودن خطا دارد. بنابراین با بررسـی گازهـای حل نشده در روغن ترانسفورماتور نیاز به بازدید و تعمیر ترانسفورماتور آشکار می گردد. بـرای مثـال اضـافه حرارت روغن باعث ایجاد گاز متان و اتیلن ، تخلیه الکتریکی جزئی در روغن باعث ایجاد هیـدروژن و تخلیـه الکتریکی شدید ، گاز استیلن در روغن ایجاد خواهد نمود.

به هر حال ، چگونگی بررسی اینگونه گاز های ایجاد شده در روغن و تجزیه و تحلیل آنها هنـوز کـاملاً قطعـی نشده و در کشور های مختلف در این خصوص مطابق با استاندارد های **IEC** تحقیقات ادامه دارد.

• نظارت بر روغن و رطوبت گیر :

بررسی روغن های نمونه برداری شده از ترانس که در فواصل منظمی صورت می گیرند ، نظارت خوبی بـر کـار ترانسفورماتور خواهد بود . با این عمل نه تنها برخی مشخصات روغن در زمانهای معینی ضبط می گردد ، بلکه همچنین میزان پیشرفت و تغییرات این مشخصه با زمان نیز آشکار خواهد شد.که این خود مبنای بهتری برای ارزیابی وضعیت روغن می باشد.چنانچه نتایج بعضی از اندازه گیریها هماهنگ با نتایج قبلی نباشد ، این بـدان معنی است که در اندازه گیری ها و یا هنگام نمونه برداری خطایی وجود داشته است . روغن نمونه برداری شده براحتی بوسیله آلودگی و رطوبت شیر ها و یا بطری نمونه برداری ، آلوده می گردد و بنابراین نمونه بـرداری از روغن ترانسفورماتور بایستی با حد اکثر دقت صورت گیرد.

• ترکیب روغن ها :

چه نوع روغنی را میتوانیم به ترانسفورماتورها اضافه نمائیم؟ در حقیقت ترکیب دو نوع روغـن متفـاوت مـی تواند نتایج غیر قابل انتظاری به همراه داشته باشد.بازدارنده اکسیداسیون دو روغن ممکن است بـر یکـدیگر تاثیر گذاشته و یا ترکیبات ناشی از کهولت در یک روغن می تواند رسوبات ایجاد کند در حالیکه این رسوبات توسط روغن دوم رقیق گردد. به هر حال روغن ها می توانند به دلایل مختلفی با یکدیگر نا سازگار باشند.

در موارد نامشخص، آزمایشات مربوط به ترکیبات دو نوع روغن متفاوت می تواند انجام شود . معمولاً باید اصول زیر را همواره در ترکیب دو نوع روغن متفاوت مراعات نمود.

روغن دو نوع ترانسفورماتور را در صورت داشتن شرایط زیر می توان ترکیب نمود.

۱- مطابق با استاندارد واحدی باشند.

۲- شامل باز دارنده اکسیداسیون یکسان و یا باز دارنده اکسیداسیون قابل مقایسه ای باشند.

۳- مقدار خنثی (**Neutralization value**) کوچکتر از **mg KOH/g 0.5** داشته باشد.

۴- میزان آب در روغن از **µg/g ۲۰** کمتر باشد.

آزمایشگاه روغن ترانسفورماتور :

روغن ترانسفورماتور بعنوان تنها عاملی است که می تواند وضعیت اکتیوپارت ترانسفورماتور را بازگو کند . انجام آزمایشهای زیر روی روغن ، نه تنها وضعیت فیزیکی و شیمیایی روغن را برای ما مشخص می کند ، بلکه میتواند فعل و انفعالات داخلی ترانسفورماتور را نیز بازگو نماید:

۱- گاز کروماتوگرافی ۲ – ویسکوزیته ۳ - کشش سطحی ۴ – رنگ ۵ - نقطه اشتعال ۶- اسیدیته ۷- سنجش ولتاژ شکست ۸- تانژانت دلتا روغن

ضرورت وجود آزمایشگاه روغن :

جهت انجام آزمایشات می توان از استانداردهای زیر استفاده کرد :

استانداردهای بین جهانی **IEEE-DIN-ISO-IEC-ASTM**

-آزمایشات روغن سه دسته می باشند:

۱) فیزیکی ۲) شیمیای ۳) الکتریکی

۱- آزمایشات فیزیکی روغن:

a) نقطه اشتعال

نقطه اشتغال حداقل دمایی است که روغن در آن دما در مجاورت یک شعله کوچک مشتعل می گردد . از آنجائیکه اشتعال روغن موجود در ترانسفورماتورهای قدرت فوق العاده خطرناک می باشد باید حداکثر دمای کار مجاز دستگاه بر مبنای این پارمتر مشخص گردد .

b) ویسکوزیته

این مشخصه بیانگر زمان عبور حجم مشخصی از روغن از یک لوله مویین است و میزان نیروی لازم برای سیرکولاسیون روغن را مشخص می نماید . این ویژگی در سیستم خنک کننده ترانسفورماتور بسیار موثر می باشد.

c) کشش سطحی :

بیانگر نیروی حذف بین دو ماده مختلف است که در مورد روغن عایقی بین روغن و آب است. این روش یک روش فوق العاده حساس جهت تشخیص میزان آلودگی روغن با مواد قطبی است . این تست جزو تستهای دوره ای روغن عایقی است و بهترین مشخصه تشخیص زوال روغن است ..

d) رنگ :

رنگ روغن یکی از ویژگیهای مهم روغن است که مبنای سنجش آن ASTM D1500 می باشد.

۲- آزمایشات شیمیایی روغن :

a) آب موجود در روغن :

مقدار آب موجود در روغن با میزان تلفات عایقی نسبت مستقیم دارد همچنین آب باعث خوردگی اجزای فلزی و کاهش ولتاژ شکست می گردد..

b) اندازه گیری گازهای محلول در روغن (DGA) :

این تست مهمترین تست دوره ای روغن عایقی می باشد و بر خلاف تست های دیگر که کیفیت روغن عـایقی را مشخص می نماید ، جهت بررسی خطاهای ترانسفورماتور بکار می‌رود . در این آزمایش گازهـای محلـول در روغن نظیر هیدروژن ، دی اکسید کربن ، متان ، استیلن ، اتیلن ، اندازه گیری میگردد .

c) اسیدیته :

این آزمایش برای کم کردن هدایت الکتریکی (افزایش خاصیت عایقی) و کم کردن خوردگی در فلز و افزایش طول عمر عایق سیستم ضروری است .

۳- آزمایشات الکتریکی روغن :

a) ولتاژ شکست : ولتاژ قابل تحمل روغن می باشد و بیانگر حداکثر ولتاژ مجاز است . در مـورد روغـن هـای عایقی کارکرده علت کاهش این مشخصه وجود آب و سایر ذرات معلق هادی است .

b) تلفات عایقی(تانژانت دلتا) :

این مشخصه بیانگر میزان تلفات عایقی روغن است و مقادیر بالای آن بیانگر وجود مقادیر زیاد یونهای قطبـی محلول در آن است . این مشخصه در روغن های کارکرده میزان زوال روغن را مشخص می کند .

c) مقاومت ویژه الکتریکی :

مقاومت ویژه الکتریکی ، نسبت گرادیان پتانسیل به جریان در نمونه می باشد و از میزان ترکیبات یونی محلول در روغن خبر می دهد .

- سیستم آنالیز روغن ترانسفورماتورهای قدرت :

یکی از روشهای خوب و مناسب جهت بررسی تحولات داخل ترانسفورماتورهای قدرت ، آنالیز گازهای موجود و محلول در روغن ترانسفورماتور می باشد ؛ این گازها از تنش های الکتریکی ، حرارتی و مکانیکی در داخـل

ترانسفورماتور تولید می شوند و معمولاً عبارتند از هیدروژن (**H2**) ، متان (**CH4**) منو اکسید کـربن (**CO**) ، دی اکسید کربن (**CO2**) ، اتیلن (**C2H4**) ، اتـان (**C2H6**) ، و اسـتیلن (**C2H2**) کـه انـدازه و مقـدار موجودیت هر یک از این گازها در روغن ترانسفورماتور بیانگر یک عیب ویژه ای در داخل ترانس قدرت است.

مطابق با استاندارد(**IEC 61599**) و عدم توجه به میزان این گازها موجب خسارتهای مالی و جانی خواهـد بود.

جهت اندازه گیری گازهای داخل روغن دستگاههای کوچک و بزرگ متفاوتی وجـود دارد کـه در مـدل هـای مختلف کار متشابهی را انجام می دهند . یکی از انواع این دستگاهها بروی خـود تـرانس نصـب میشـود کـه بصورت مداوم با روغن داخل ترانس ارتباط دارد و روغن را مورد تجزیه و تحلیل قرار می دهد . از جمله کارایی های این نوع آنالیزر ها بررسی مداوم روغن تراسفورماتور و تجزیه وتحلیل گازهای موجود در ترانسـفورماتور است که حتی زیر بار و در حالت برق دار کار می کند و تعبیه کنتاکت های کمکی جهت ارسال آلارم و هشـدار به اتاق فرمان در زمان زیاد شدن این نوع گازها در روغن ترانسفورماتور است این دستگاهها در هر زمانی که اشکالی در ترانس بوجود بیاید حتی خیلی جزیی باشد با اعلام هشدار از وارد شدن صدمات بیشتر جلـوگیری می کند .

یکی از دستگاههای متداول جهت نصب بروی ترانسفورماتورهای قدرت دستگاه آنالیز گاز هیدروژن و سنجش رطوبت است که در اغلب خطاهای داخل ترانسفورماتورها گاز هیدروژن تولید میشود ؛ رطوبـت نیـز یکـی از خطاهای مخرب در روغن ترانسفورماتور و بروی عایق های آن است ؛ عمر عایق ها متناسب بـا میـزان جـذب رطوبت آنهاست و از طرفی با افزایش میزان رطوبت در نواحی با شدت میدان الکتریکی بیشتر موجب آسـتانه شروع تخلیه جزیی و افزایش شدت آن می شود و در نهایت باعث وارد شدن خسارات جـدی بـه ترانسـهای قدرت می شود.

علاوه بر هیدروژن و رطوبت ، میزان منواکسید کربن که در اثر تغییرات در مواد عایقی در داخل ترانسفورماتور

تولید می شود یکی از علایم افزایش حرارت نقطه ای در داخل سیم پیچ های ترانسفورماتور است ، میزان منواکسید کربن تولیدی میتواند نشان دهنده سطح وقوع تجزیه حرارتی سلولز باشد .

- سیستمهای جلوگیری از فساد روغن :

۱- سیستم با کنسرواتور معمولی(باز) **Open type conservator system**

۲- سیستم با تانک بسته (تحت فشار هوا) **Air Sealed Tank system**

۳- سیستم با تانک بسته (تحت فشار گاز نیتروژن) **Nitrogen sealed tank system**

۴- سیستم کنسرواتور دیافراگمی **Diaphragm conservator system**

۵- سیستم بالشتک هوائی با فشار ثابت **Bellows – sesl constant Pressur system**

۶- سیستم های با مواد جذب کننده رطوبت **Activated alumina Tveater system**

۷- سیستم های با مواد افزودنی **Additive system**

از انواع سیستمهای فوق سیستم های کنسرواتور معمولی و کنسرواتور دیافراگمی بسیار متداول می باشد که به طور مشروح مورد بررسی قرار می گیرند .

۱- کنسرواتور معمولی :

در این سیستم کنسرواتور به عنوان یک منبع ذخیره و جابجایی روغن در بالای تانک اصلی قرار گرفته و به کمک مواد رطوبت گیر به هوای خارج ارتباط دارد .

در این سیستم رطوبت هوا بکمک مواد موجود در محفظه رطوبت گیر (**Silicagel-breather**) جذب شده و بنابراین روغن با هوای نسبتاً خشک در تماس می باشد . این نوع کنسرواتور از متداولترین انواع کنسرواتورها می باشدکه برای سالیان دراز مورد استفاده قرار می گرفته و امروزه نیز برای ولتاژ پایین تر از **100** کیلوولت کاربرد بسیاری دارد . در این سیستم سطح تماس روغن با هوا در حداقل می باشد و با توجه به

اینکه درجه حرارت روغن نیز در داخل کنسرواتور کم می باشد بنابراین سرعت واکنش روغن با اکسیژن هـوا بسیار کند می‌باشد.

ضمناً تغییرات عدد اسیدی روغن نیز در این سیستم بنحوی است که پس از حدود ۱۵ الی ۲۰ سال بـه مقـدار مجاز یعنی ۰/۳ تا ۰/۴ میلی گرم **KOH** در هر گرم می رسد و لذا لازم است بعد از هر ۱۵ تـا ۲۰ سـال روغـن ترانسفورماتور تعویض گردد از مزایای این نوع کنسرواتور ، سادگی ، ارزانی و جلوگیری از اعمال فشارهای بالا به ترانسفورماتور می باشد .

۲- سیستم کنسرواتور نوع دیافراگمی :

در این نوع کنسرواتور از یک کیسه لاستیکی (ضد روغن) به منظور ایزوله کردن روغن از هوا مطـابق شـکل استفاده می شود .

در این سیستم فشار داخل کیسه هوایی متناسب با فشار بیرون بوده و به ترانسفورماتور فشار زیادی وارد نمی شود . جنس کیسه هوایی از سه لایه مواد لاستیکی بوده که لایه های داخلی و خارجی آن با مواد ضد روغن از جنس نیتریل (**NBR**) می باشد . با کاربرد این نوع کنسرواتور از فساد روغن تا مدت ۵۰ سال جلوگیری می شود و چون عملاً عمر ترانسفورماتور در حدود ۲۰ تا ۳۰ سال می باشد در طول عمر ترانسفورماتور احتیاجی به تعویض روغن در صورت نگهداری مناسب سیستم نمی باشد

ترانسفورماتور هرمتی‌ک:

ترانسفورماتور هایی که روغن آنها با هوای آزاد هیچگونه ارتباطی ندارد و مخازن آنها کاملا مسدود مباشد به ترانسفورماتور های هرمتیک مشهورند . از بهترین ویژگی های این نوع ترانسفورمانور ها کاهش میزان فرسودگی مواد عایقی آنها در مقایسه با ترانسفور ماتور های با منبع انبساط ، بعلت عدم ارتباط با هوا با روغن میباشد. بطوریکه در این نوع ترانسفور ماتور ها اصولا نیازی به تعویض روغن نبوده و در نهایت هزینه مراقبت و نگهداری آنها به مقدار زیادی کاهش می یابد در کارخانجات ایران ترانسفور ، ترانسفور ماتورهای هرمیتک

در دو نوع ، هر متیک با بالشتک گازی (رادیاتوری) و روغنی (پره ای) طراحی و ساخته می شوند .

الف)ترانسفور ماتور های هرمتی‌ک با بالشتک گازی (رادی‌اتوری)

+این ترانسفورماتور ها بطور کلی بر دو نوع اند و در هر محدوده قدرت قابل ساخت می باشند . محفظه گاز در این ترانسفور ماتور علاوه بر جلوگیری از ارتباط روغن با هوای محیط نقش حجم الاستیک را ایفا می نماید . از گازی بی اثر باید در محفظه استفاده نموده که تاثیر تخریبی بر روی روغن دارد و سایر مواد عایقی و قسمتهای داخلی و ترانسفورماتور ها نداشته باشد ./ گازی که معمولا برای این منظور به کار میرود ، گاز ازت (نیتروژن N_2) و در برخی موارد هوای خشک است این ترانسفورماتور ها عمدتا دارای مخزن کاملا صلب بوده و در دو نوع زیر تولید می شوند :

الف : با حجم ثابت گاز (در محدوده ترانسفور ماتور توریع).

ب : فشار ثابت گاز (در محدوده ترانسفور موتور های قدرت).

در ترانمسفورماتور های هرمتیک با بالشتک گازی برای کاهش دامنه تغییرات فشار ، حجم محفظه تحت فشار به قدر کافی بزرگ در نظر گرفته میشود . بسته به شرایط بارگیری مقداری از درون روغن حل می شود که میزان گاز حل شده در روغن تابع خطی از فشار بوده و دما تاثیر نا چیزی در حلالیت گاز دارد ، گاز هیدروژن دارای حجمی معادل ۲۰ ٪ الی ۵۰ ٪ خجم روغن ترانسفورماتور می باشد به دلیل بزرگ بودن حجم محفظه گاز در مواردی که از لحاظ ارتفاع ترانسفور ماتور ویا نصب بوشینگها محدودیت وجود داشته باشد می توان بخشی از محفظه گاز را به مخازنی در جنب دیواره های ترانسفورماتور انتقال داده و توسط لوله ای ارتباط آن ها با محفظه بالای روغن بر قرار نمود

ب)ترانسفور ماتور های هرمتی‌ک روغنی (پره ای)

در این نوع از خاصیت ارتجایی پره های خنک کننده (وله ها) ، برای جبران تغییرات حجم روغن استفاده شده است ، به طوری که در اثر افزایش حجحم روغن پره ها باز و در کاهش حجم روغن پره ها فشرده می شوند نوسانات بار و فشار در طی عمر ترانسفور ماتور مذکور ، پره ها را در معرض پدیده خستگی قرار می دهد لذا طراحی این ترانسفورماتور ها باید به گونه ای باشند که تنشهای حاصله از حد تنش خستگی پره ها تجاوز

ننماید . به کار گیری سیستم های پیشرفته ی جوشکاری و استفاده روش های مناسب تولید مخزن تاثیر مهمی در افزایش عمر مخازن ترانسفور ماتور های مذکور دارد . این نوع ترانسفورماتورها کاملا از روغن پر شده و در محدوده ظرفیت ترانسفور ماتور های توزیع ساخته می شوند .

شکل ظاهری ترانسفور ماتور های هرمتیک روغنی (پره ای