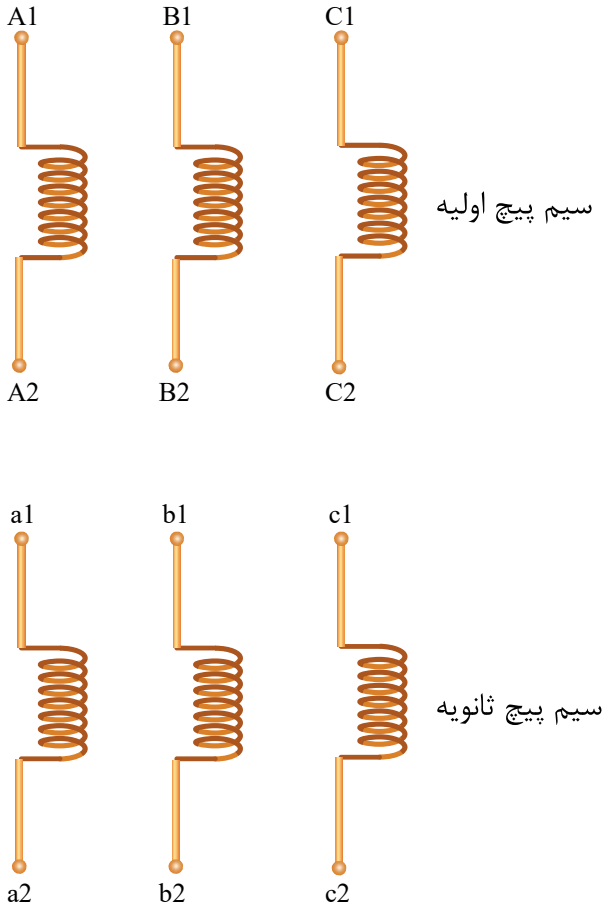
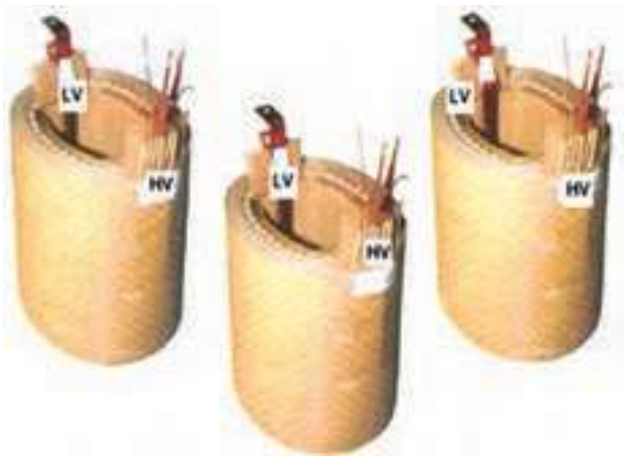
۲

۶ــ۲ــ انواع اتصالات مورد استفاده در ترانسفورماتورهای سه فاز

ترانسفورماتور سه فاز از سه سیم پیچ در سمت اولیه و سه سیم‌پیچ در سمت ثانویه تشکیل شده است که هر یک از این سیم‌پیچ‌ها دارای سه سر و سه ته می‌باشند (شکل ۳۶).

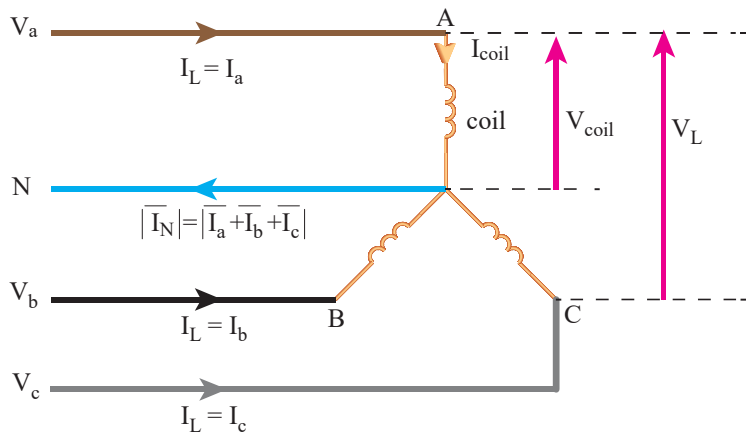
سیم‌پیچ‌های هر طرف ترانسفورماتور را می‌توان به صورت ستاره،مثلث و یا زیگزاگ به هم متصل نمود.

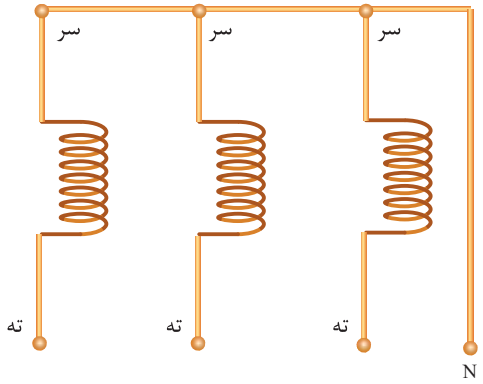


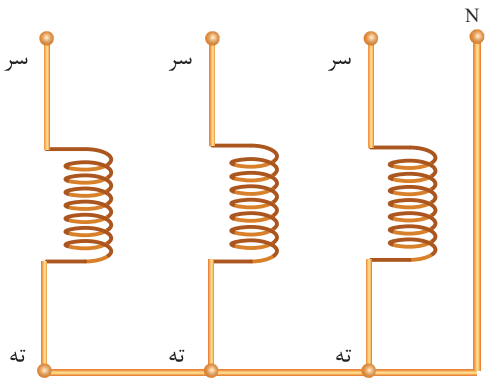


شکل ۳۶ــ سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور سه فاز

۱ــ۶ــ۲ــ اتصال ستاره : در اتصال ستارهٔ سه سر یا سه ته سیم‌پیچ های سه‌فاز را به هم اتصال داده و طرف دیگر را به صورت آزاد برای اتصال به شبکه باقی می‌گذارند. بدین ترتیب این اتصال را اتصال ستاره می‌نامند و آن را به اختصار با حرف Y بزرگ درسمت فشار قوی و حرف y کوچک درسمت فشار ضعیف نمایش می‌دهند (شکل ۳۷).







شکل ۳۷ــ اتصال ستاره

از خصوصیات مهم این اتصال می‌توان به موارد زیر اشاره کرد :

- جریان عبوری از هر بوبین با جریان همان خط برابر است.

$$I_L = I_{Coil}$$

- ولتاژ دو سر بوبین به اندازهٔ ولتاژ فازی می‌باشد و از ولتاژ خط $\sqrt{۳}$ برابر کوچک‌تر است.

$$V_{Coil} = \frac{V_L}{\sqrt{۳}}$$

با استفاده از این اتصال می‌توان به نقطهٔ خنثی (یا صفر) اتصال ستاره یعنی محل تعادل جریان سه فاز $\vec{I_N} = \vec{I_a} + \vec{I_b} + \vec{I_c}$ نیز دست یافت. اگر مرکز خنثی اتصال ستاره از طریق سیم به بیرون آورده شده باشد و در دسترس قرار گیرد بعد از علامت اتصال ستاره (Y) یک حرف n نیز اضافه می‌شود. برای مثال (Yn) دلالت بر دسترسی به نقطه خنثی اتصال ستاره دارد.

۲ــ۶ــ۲ــ اتصال مثلث : هرگاه سه سیم‌پیچ را مطابق شکل (۳۸) با یکدیگر سری کنند یعنی ابتدای یک سیم‌پیچ را به انتهای دیگری اتصال داده تا سه سیم‌پیچ تشکیل یک حلقه دهند، اتصال مثلث ایجاد خواهد شد.

این اتصال نیز می‌تواند مطابق شکل (۳۸) به یکی از دو حالت نشان داده شده اجرا شود.

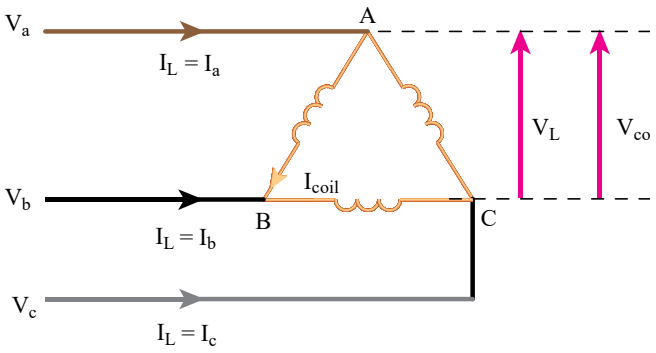
در هر دو اتصال مطابق شکل (۳۸)، سیم‌پیچ‌ها می‌توانند از یک سمت (سر و یا ته) به ترمینال خروجی متصل شوند. از خصوصیات مهم این اتصال عبارتند از :

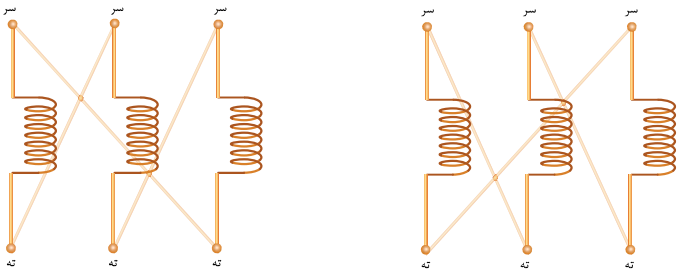
۱ــ برابری ولتاژ دو سر هر بوبین با ولتاژ خط $V_{Coil} = V_L$

۲ــ در صورت متعادل بودن بار سه فاز، جریان عبوری از هر سیم‌پیچ به اندازه $\sqrt{۳}$ برابر از جریان خط کوچک‌تر است.

$$I_{coil} = \frac{I_L}{\sqrt{۳}}$$

اتصال مثلث را با اختصار با حرف D بزرگ در سمت فشار قوی ترانسفورماتور وحرف d کوچک در سمت فشار ضعیف نمایش می‌دهند.





شکل ۳۸ــ اتصال مثلث

۳ــ۶ــ۲ــ مقایسهٔ اتصال مثلث و اتصال ستاره در سیم پیچ‌های ترانسفورماتور :

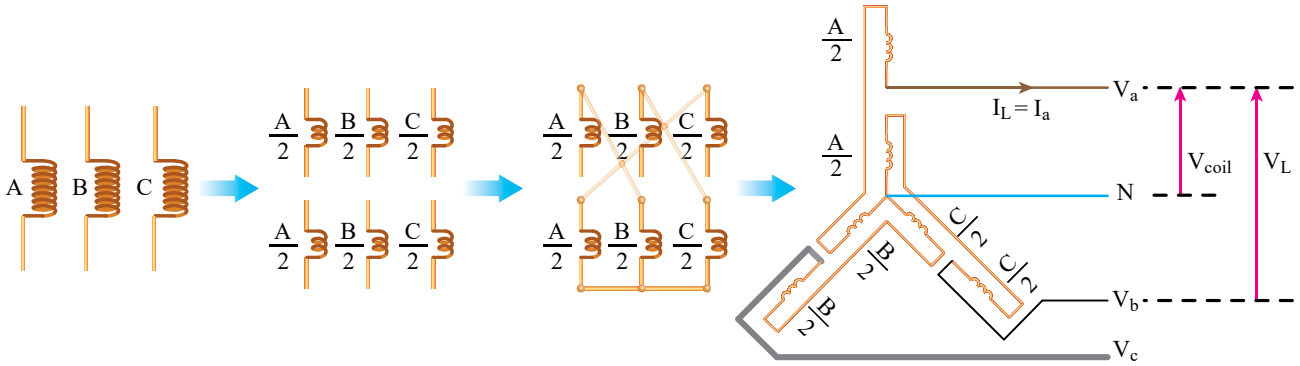
چون ولتاژ دو سر هر سیم‌پیچ در اتصال ستاره $V_{coil} = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$ و در اتصال مثلث $V_{coil} = V_L$ است، در نتیجه در اتصال مثلث تعداد دور سیم‌پیچ برای هر فاز $\sqrt{3}$ برابر بیشتر از اتصال ستاره می‌شود و دیگر آنکه جریان عبوری از هر سیم‌پیچ و جریان خط در اتصال ستاره با هم برابرند در صورتی که در اتصال مثلث به شرط متعادل بودن بار سه فاز جریان خط $\sqrt{3}$ برابر از جریان سیم‌پیچ بیشتر است. بنابراین اگر جریان خط در دو اتصال با هم برابر باشند، در اتصال مثلث می‌توان سطح مقطع سیم را کمتر در نظر گرفت.

در نتیجه در ولتاژهای بالا، اقتصادی‌تر آن است که از اتصال ستاره و در جریان‌های زیاد از اتصال مثلث استفاده شود. زیرا در جریان‌های زیاد مقطع هادی سیم‌پیچ نسبت به اتصال ستاره کمتر است و در ولتاژهای بالا تعداد دور سیم‌پیچ اتصال ستاره نسبت به اتصال مثلث کمتر است.

البته اگر دسترسی به مرکز خنثی در هر سمت ترانسفورماتور مد نظر باشد باید از اتصال ستاره در همان طرف استفاده کرد.

۴ــ۶ــ۲ــ اتصال زیگزاگ : این اتصال مخصوص ترانسفورماتورها است و در دیگر تجهیزات برقی صورت نمی‌پذیرد، همچنین از این اتصال فقط در ثانویه ترانسفورماتور استفاده می‌شود. برای انجام این اتصال مطابق شکل (۳۹) هر بوبین به دو قسمت مساوی تقسیم می‌شود. بنابراین شش بوبین خواهیم داشت. نیمی از بوبین‌ها (نیمه بالایی یا پایینی) را به‌صورت ستاره با یکدیگر اتصال می‌دهند. آنگاه ادامهٔ هر بوبین متصل به اتصال ستاره، با بوبین مربوط به فاز دیگر در جهت عکس سری می‌شود.

به همین خاطر این اتصال را، به‌نام اتصال ستاره شکسته نیز می‌شناسند. چگونگی این اتصال در شکل (۳۹) ملاحظه می‌شود.



شکل ۳۹ــ اتصال زیگزاگ

جریان عبوری از بوبین اتصال زیگزاگ با حالت اتصال ستاره برابر می‌باشد، در حالی که ولتاژ فازی اتصال زیگزاگ از اتصال ستاره کمتر است.

از مزایای این اتصال جاری شدن جریان یک فاز در دو ستون هسته ترانسفورماتور می‌باشد. این موضوع سهم به‌سزایی در متعادل کردن جریان در سمت فشار قوی ترانسفورماتور دارد. به همین جهت در صنعت از این اتصال در سمت ثانویه ترانسفورماتور استفاده می‌شود.

همچنین در این اتصال امکان دسترسی به نقطه خنثی سیم‌پیچ وجود دارد که از دیگر مزایای این اتصال به شمار می‌رود. اتصال زیگزاگ را به‌اختصار با Z نمایش می‌دهند.

خود را بیازمایید

۱ــ اتصال ستاره سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور سه فاز را رسم وروابط ولتاژ وجریان آنها را بنویسید.

۲ــ برای ایجاد نیروی محرکه مغناطیسی مساوی ، تعداد دور و سطح مقطع سیم‌پیچ را در دو اتصال ستاره و مثلث مقایسه کنید.

۳ــ اتصال زیگزاگ در کدام سمت از ترانسفورماتور استفاده شده و چه مزیتی نسبت به اتصال ستاره دارد؟

تحقیق کنید

رابطهٔ ولتاژ فاز با ولتاژ خط در اتصال زیگزاگ چگونه است؟

۷ــ۲ــ تقسیم‌بندی ترانسفورماتورهای سه فاز بر اساس نوع اتصال ورودی و خروجی

هر ترانسفورماتور سه فاز حداقل دارای سه سیم پیچ در سمت اولیه و سه سیم پیچ در سمت ثانویه است. چنین ترانسفورماتورهایی را ترانسفورماتور سه فاز متقارن می‌نامند.

البته ترانسفورماتورهای سه فازی که از این قاعده مستثنی باشند نیز وجود دارند.

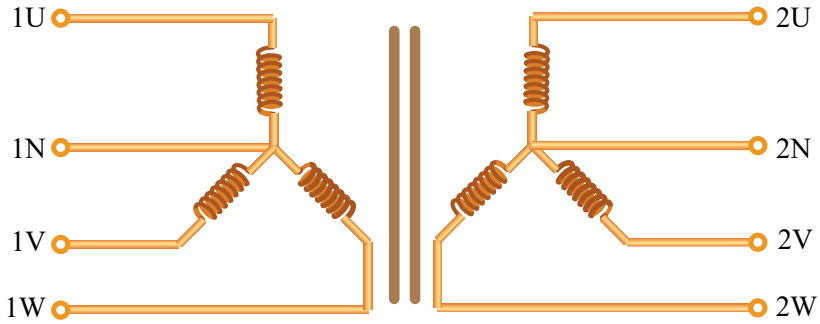
بر اساس سه نوع اتصال ذکر شده و مستقل از اینکه این اتصالات در سمت اولیه یا در سمت ثانویه ترانسفورماتور صورت گیرد انواع اتصالات متقارن عبارتند از :

۱ــ اتصال ستاره ــ ستاره Y – y

۲ــ اتصال مثلث ــ ستاره D – y

۳ــ اتصال ستاره ــ زیگزاگ Y – z

۱ــ۷ــ۲ــ اتصال ستاره ــ ستاره (Y_y) : این اتصال در ترانسفورماتورهایی که دسترسی به نقطه خنثی مد نظر باشد کاربرد دارد. چگونگی این اتصال در شکل (۴۰) مشاهده می‌شود.



شکل ۴۰ــ ترانسفورماتور با اتصال ستاره ــ ستاره

همچنین در ترانسفورماتورهایی که ولتاژ سمت اولیه و ثانویه آن بسیار زیاد باشد، می‌توان از این اتصال استفاده کرد. با توجه به اینکه ولتاژ هرسیم‌پیچ $\sqrt{3}$ برابر کمتر از ولتاژ خط است، بنابراین سبب کاهش مقدار عایق مورد استفاده شده در هر بوبین می‌شود.

در ولتاژهای کمتر از یک کیلوولت تأثیر قابل ملاحظه‌ای بین مقدار عایق مصرفی به‌ازای ولتاژ خط و ولتاژ فاز وجود ندارد. اما در ولتاژهای بالاتر این اختلاف قابل ملاحظه است. به‌عنوان مثال اگر ولتاژ خط ۱۳۲ Kv در یک سمت قرار گیرد با استفاده از این اتصال ولتاژی که به هر سیم‌پیچ می‌رسد در حدود ۷۲ Kv خواهد شد که قطعاً هزینه عایق‌بندی برای این ولتاژ بسیار کمتر از ولتاژ ۱۳۲Kv خواهد بود.

در صورتی که ثانویه این نوع ترانسفورماتور از طریق یک‌فاز زیر بار برود هرسه فاز اولیه زیر بار می‌رود و باعث بالا رفتن جریان بی‌باری و زیاد شدن تلفات در ترانسفورماتور می‌گردد. همچنین ولتاژ در یک فاز در ثانویه افزایش و در فازهای دیگر کاهش یابد. به همین دلیل زیر بار رفتن ترانسفورماتورهای با اتصال Yy (ستاره ــ ستاره) به‌صورت تک‌فاز یا نامتعادل نامطلوب است و استاندارد میزان نامتعادلی را تا ۱۰ درصد توان نامی مجاز می‌داند. در شبکه‌های توزیع از این اتصال به‌ندرت استفاده می‌شود.

خود را بیازمایید

۱ــ معمولاً از ترانسفورماتور ستاره ــ ستاره در چه جایی استفاده می‌شود؟

۲ــ آیا می‌توان ترانسفورماتور ستاره ــ ستاره را از طریق یک فاز زیر بار برد؟ چرا؟

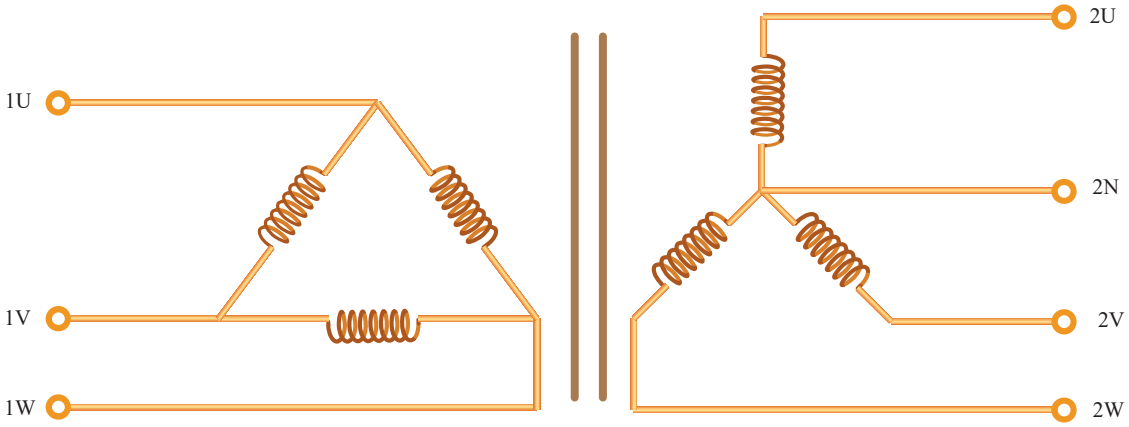
۳ــ ثانویه یک ترانسفورماتور با ولتاژ خط ۴۰۰ ولت دارای اتصال ستاره ــ ستاره می‌باشد و بار متعادلی را با جریان ۲۰آمپر تغذیه می‌کند. بدست آورید :

الف)جریان عبوری از هر بوبین ثانویه

ب) ولتاژ دو سر هر بوبین در ثانویه

۲ــ۷ــ۲ــ اتصال مثلث ــ ستاره (D_y) : این روش اتصال در ترانسفورماتورهای کاهنده و در شبکه‌های توزیع بسیار کاربرد دارد. در کشور ما اغلب مصرف‌کننده‌های توزیع از طریق ترانسفورماتور با اتصال Dyn ۲۰/۰/۴ KV تغذیه می‌شوند.

مصرف کننده‌های تک فاز به سیم نول احتیاج دارند و در شبکهٔ توزیع بسیار فراوان هستند. از خصوصیات مهم این اتصال دسترسی به مرکز اتصال ستاره یعنی نقطهٔ خنثی در سمت مصرف کننده است که امکان اتصال این‌گونه مصرف‌کننده‌ها نیز به آن وجود دارد. از دیگر محاسن این نوع اتصال این است که اگر یکی از فازهای ثانویه به تنهایی زیر بار برود مشکلات مربوط به اتصال ستاره ــ ستاره را ندارد (شکل ۴۱).



شکل ۴۱ــ ترانسفورماتور با اتصال مثلث ــ ستاره

۳ــ۷ــ۲ــ اتصال ستاره ــ زیگزاگ (Y_z) : این نوع اتصال در ترانسفورماتورهای توزیع با مصرف‌کننده‌های سه فاز نامتعادل کاربرد دارد.

در اتصال زیگزاگ ولتاژ سیم‌پیچ‌های هر فاز طبق رابطهٔ (۱ــ۲) ۸۶٪ حالت ستاره می‌باشند.

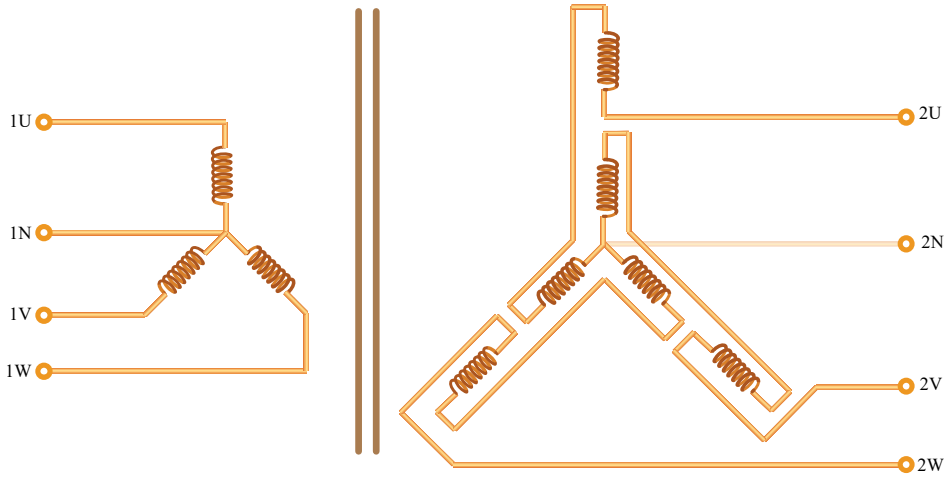
$$V_{Coil-Zigzag} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_{Coil-Star} \qquad (۱ــ۲)$$

با توجه به رابطه (۱ــ۲) مشاهده می‌شود، اگر بخواهیم ولتاژ فازی اتصال زیگزاگ برابر با ولتاژ هر فاز اتصال ستاره شود، تعداد حلقه‌های هر فاز را باید به نسبت $\frac{2}{\sqrt{3}}$ برابر افزایش داد بنابراین با توجه به افزایش تعداد دور (حدوداً ۱۵درصدی[1]) هر بوبین وزن مس مصرفی اتصال Yz نسبت به اتصال Yy افزایش می‌یابد. البته از مزایای این اتصال جاری شدن جریان یک فاز در بوبین‌های دو ستون ترانسفورماتور سمت ثانویه می‌باشد که سبب القا ولتاژ نیز در آن می‌شود. این عمل باعث متعادل شدن جریان در سمت فشار قوی خواهد شد.

دسترسی به نقطهٔ خنثی نیز از دیگر مزایای این ترانسفورماتور محسوب می‌شود یعنی غالباً این اتصال به‌صورت Yzn ارائه می‌گردد. این نیز از خواص اتصال ستاره می‌باشد (شکل ۴۲).

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت مزیت این اتصال ترکیب محاسن اتصال ستاره و مثلث است و عیب آن هزینه بیشتر به‌ازای دریافت قدرت یکسان نسبت به ترانسفورماتور Yyn می‌باشد.

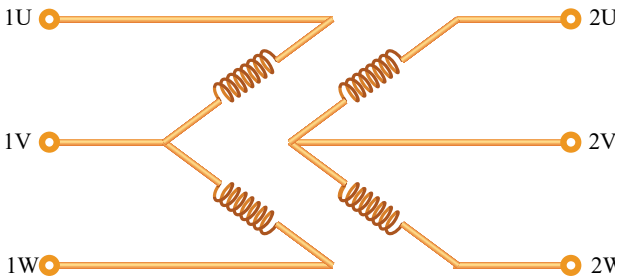
۱ــ $\frac{2}{\sqrt{3}} = ۱/۱۵$



شکل ۴۲ــ ترانسفورماتور با اتصال ستاره ــ زیگزاگ

۴ــ۷ــ۲ــ اتصال مثلث باز (V ــ V) : گاهی اوقات با اتصال دو ترانسفورماتور تک‌فاز مشابه نیز می‌توان انرژی الکتریکی سه فاز را از یک طرف به سمت دیگر منتقل نمود. یکی از این اتصالات را که فقط در سیستم سه فاز سه سیمه با بار کاملاً متعادل کاربرد دارد، اتصال مثلث باز یا V ــ V می‌گویند. زیرا مانند اتصال مثلثی است که از یک طرف باز شده است و البته چون شبیه حرف V لاتین نیز هست به این نام شناخته می‌شود (شکل ۴۳).

اگر در سیستم سه فاز از سه ترانسفورماتور تک‌فاز استفاده شود و یکی از این ترانسفورماتورها دچار اشکال شود، می‌توان به‌جای آنکه کل شبکه را بی برق نمود، ترانسفورماتور معیوب را از مدار خارج کرده و اولیه وثانویه دو ترانسفورماتور دیگر را به‌صورت اتصال V به هم متصل نمود. البته از این اتصال فقط در شبکه سه فاز سه سیمه با بار متعادل می‌توان استفاده کرد.



شکل ۴۳ــ ترانسفورماتور با اتصال V

در اتصال V توان تحویلی به بار کمتر از مجموع توان دو ترانسفورماتور تک‌فاز است. بنابراین این ترانسفورماتور از نظر صنعتی اقتصادی نمی‌باشد و در موارد بسیار خاص و محدود از آن استفاده می‌شود.

مثال توان خروجی دو ترانسفورماتور تک‌فاز با ولتاژ نامی ۴۰۰V و جریان نامی ۱۰A در صورتی که یکبار با اتصال V به عنوان ترانسفورماتور سه فاز مورد استفاده قرار گیرند و بار دیگر به‌صورت تک‌فاز استفاده شوند را با هم مقایسه کنید.

در صورت استفاده از ترانسفورماتور به‌صورت تک‌فاز

$S = U_2 I_2 = ۴۰۰ \times ۱۰ = ۴۰۰۰ VA$

چون تعداد ترانسفورماتورها در صورت استفاده به‌صورت تک‌فاز، دوتا می‌باشند پس مجموعاً ۸۰۰۰VA توان خروجی خواهد داشت.

در صورت استفاده از ترانسفورماتور به‌صورت سه فاز با اتصال V داریم :

$S = \sqrt{۳} U_2 I_2 = \sqrt{۳} \times ۴۰۰ \times ۱۰ = ۶۹۳۰ VA$

تحقیق کنید

چرا در ترانسفورماتورهای اندازه گیری ولتاژ «PT» از اتصال مثلث باز استفاده می‌شود؟

خود را بیازمایید

۱ــ از اتصال مثلث باز در چه شبکه وچه نوع باری می‌توان استفاده کرد؟

۲ــ یک ترانسفورماتور سه فاز با اتصال مثلث باز، باری را با جریان ۲۵ آمپر تحت ولتاژ نامی ۴۰۰ ولت تغذیه می‌کند. اگر همین ترانسفورماتور درشبکه تک‌فاز همان بار را تغذیه کند، مطلوب است مقایسه توان های دریافتی بار در هر دو حالت.

۵ــ۷ــ۲ــ گروه ترانسفورماتور : گروه ترانسفورماتور عددی است قراردادی که به‌ازای هر ۳۰° اختلاف فاز بین ولتاژ اولیه و ثانویه اطلاق می‌شود.

مثلاً اگر گروه یک ترانسفورماتور ۵ باشد. یعنی ولتاژ فاز L_1 در سمت ثانویه ۳۰°×۵ به عبارتی ۱۵۰° نسبت به فاز مشابه در سمت اولیه پس فاز یا عقب‌تر است.

به‌طور کلی فقط چهار گروه اصلی وجود دارند که عبارتند از گروه ۰ و ۵ و ۶ و ۱۱.

گروه برداری یک شاخص مهم برای ترانسفورماتورهای سه فاز محسوب می‌شود که همیشه بعد از علامت اختصاری اتصالات ترانسفورماتور آورده می‌شود.

به‌طور مثال در ترانسفورماتور Dyn۱۱ اتصال اولیه آن مثلث سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور ستاره و نقطهٔ خنثی (مرکز اتصال ستاره) با سیم به بیرون ترانسفورماتور کشیده شده و ترانسفورماتور دارای گروه ۱۱ است. یعنی بین ولتاژهای همنام اولیه و ثانویه ۳۳۰° اختلاف فاز وجود دارد.

۸ــ۲ــ موازی کردن ترانسفورماتورها

در بعضی موارد ظرفیت توان در یک پست توزیع برق ممکن است از ۲۵۰۰KVA تجاوز کند به‌طور مثال ممکن است مصرف داخلی یک واحد صنعتی ۸۰۰۰KVA شود، بدین ترتیب استفاده از یک ترانسفورماتور با این ظرفیت معقول نیست. زیرا هزینه ساخت ترانسفورماتور را بالا می‌برد و خارج از اندازه‌های رایج می‌باشد. در عمل استفاده از چهار ترانسفورماتور ۲۰۰۰KVA به‌صورت موازی ساده‌تر بوده و ضریب اطمینان شبکه را بالا می‌برد.

مزایای اصلی استفاده از ترانسفورماتورهای موازی در شبکهٔ برق عبارت است از :

۱ــ بالا بردن ضریب اطمینان مثلاً زمانی که یک ترانسفورماتور با ایجاد خطا از مدار خارج شود برق کل شبکه قطع نمی‌گردد.

۲ــ امکان برنامه‌ریزی مناسب جهت انجام سرویس تعمیر و نگهداری تجهیزات برقی (مثلاً ترانسفورماتور، تابلوها، کلیدها، ...) بدون آنکه بی برقی کامل در شبکه به‌وجود آید.

۱ــ۸ــ۲ــ شرایط موازی کردن : شرایط موازی کردن ترانسفورماتورها عبارت اند از :

نکتهٔ ۱

الف) ولتاژ دو سمت ترانسفورماتور با هم برابر باشند (که نتیجه می‌گیریم در ترانسفورماتورهای موازی شده با یکدیگر نسبت تبدیل باید برابر باشد)

ب) اختلاف فاز ولتاژ بین فازهای متناظر سمت ثانویه که به هم متصل می‌شوند وجود نداشته باشد یعنی گروه برداری ترانسفورماتورهای موازی نیز باید با هم برابر باشند.

نکتهٔ ۲

حتی‌الامکان همه ترانسفورماتورها به یک نسبت زیر بار رفته و جریان به یک نسبت بین آنها تقسیم شود برای دستیابی به این هدف نیز موارد ذیل باید رعایت شوند :

الف) نسبت توان ترانسفورماتورهای موازی شده از سه برابر تجاوز نکند (بهترین حالت برابری توان همه ترانسفورماتورهای موازی شده است)

ب) ولتاژ اتصال کوتاه ترانسفورماتورها باید با هم برابر باشند. البته ولتاژ اتصال کوتاه ترانسفورماتور با توان کمتر می‌تواند تا ۱۰٪ از ولتاژ اتصال کوتاه ترانسفورماتور با توان بیشتر بزرگ‌تر باشد.