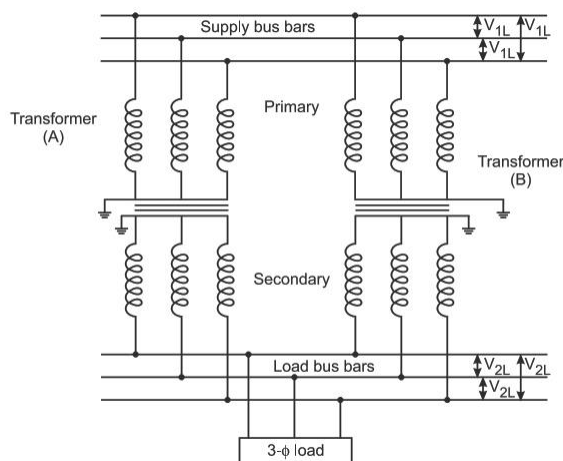


عملکرد موازی ترانسفورمورهای سه فاز

هنگامی که اولیه و ثانویه دو یا چند ترانسفورماتور برای تقسیم بار به طور جداگانه به خطوط ورودی و خروجی یکسان متصل شوند، گفته می‌شود که ترانسفورماتورها به صورت موازی متصل شده اند. دو ترانسفورماتور سه فاز A و B همانطور که در شکل ۳,۱۶ نشان داده شده است، به صورت موازی متصل شده اند.



شکل ۳,۱۶ اتصالات مربوط به عملکرد موازی دو ترانسفورماتور سه فاز

در اینجا سیم‌پیچی‌های اولیه دو ترانسفورماتور به شینه‌های تغذیه و سیم‌پیچی‌های ثانویه از طریق شینه‌های بار به بار متصل می‌شوند. تحت این شرایط:

V_{1L} : ولتاژ اعمالی به اولیه

V_{2L} : ولتاژ بار ثانویه

لزام عملکرد موازی ترانسفورماتورهای سه فاز

همانطور که قبلاً توضیح داده شد، دلایلی که ترانسفورماتورها به صورت موازی قرار می‌گیرند، در زیر آورده شده است.

(الف) هنگامی که بار روی خطوط انتقال به بیش از ظرفیت ترانسفورماتور نصب شده افزایش می‌یابد. برای غلبه بر این مشکل یک راه این است که ترانسفورماتور موجود را با ترانسفورماتور جدید با ظرفیت بیشتر جایگزین کنیم (به این کار تقویت ترانسفورماتور^۱ می‌گویند) و راه دیگر این است که یک ترانسفورماتور دیگر را موازی با ترانسفورماتور موجود قرار دهیم تا بار را به صورت اشتراکی تغذیه کنند. هزینه تعویض ترانسفورماتور بسیار بیشتر از قرار دادن ترانسفورماتور دیگر به موازات ترانسفورماتور موجود است. از این رو، زمانی که بار الکتریکی ترانسفورماتور موجود به میزانی فراتر از ظرفیت نامی آن افزایش می‌یابد، مطلوب است که ترانسفورماتور دیگری به طور موازی با ترانسفورماتور موجود نصب شود.

^۱ . augmentation of transformer

(ب) گاهی اوقات، مقدار توان تبدیل شده^۱ به قدری زیاد است که نمی‌توان یک واحد تنها با آن ظرفیت را ساخت، پس باید دو یا چند ترانسفورماتور را به صورت موازی قرار دهیم. از این رو، کارکرد موازی ترانسفورماتورها زمانی ضروری است که مقدار توانی که باید تبدیل شود بسیار بیشتر از توانی باشد که توسط یک واحد (ترانسفورماتور) مدیریت می‌شود.

(ج) در پست‌های برق شبکه، ترانسفورماتورهای یدکی برای اطمینان از تداوم عرضه در صورت خرابی، همیشه ضروری هستند. اندازه‌ی ترانسفورماتور یدکی به اندازه ترانسفورماتورهای نصب‌شده در پست برق شبکه بستگی دارد. بنابراین، مطلوب است که ترانسفورماتورهای با ظرفیت کمتر بطور موازی با ترانسفورماتور موجود قرار دهند که به نوبه خود اندازه‌ی ترانسفورماتور یدکی را کاهش می‌دهد. بنابراین، اگر بخواهیم ترانسفورماتور یدکی را با اندازه کوچکتر نگه داریم، عملکرد موازی ترانسفورماتورها مطلوب است.

۱۰-۳- شرایط عملکرد موازی ترانسفورماتورهای سه فاز

اگر قرار باشد دو یا چند ترانسفورماتور سه فاز به طور موازی برای تغذیه‌ی یک بار مشترک با موفقیت کار کنند، شرایط زیر باید برآورده شوند.

(الف) هر دو ترانسفورماتور باید نسبت تبدیل یکسانی داشته باشند، یعنی بایستی مقادیر اسمی ولتاژهای اولیه و ثانویه یکسانی داشته باشند. اگر این شرط دقیقاً برآورده نشود، یعنی اگر دو ترانسفورماتور A و B تفاوت جزئی در نسبت ولتاژ یا نسبت تبدیل خود داشته باشند، حتی در این صورت هم عملیات موازی نیز امکان پذیر است.

از آنجایی که نسبت‌های تبدیل نابرابر هستند، ولتاژ اعمالی اولیه برابر است، نیروهای محرکه‌ی الکتریکی القایی (emf) در سیم‌پیچی‌های ثانویه برابر نخواهد بود. به دلیل این نابرابری emf های القایی در سیم‌پیچی‌های ثانویه، حتی در حالت بی‌باری، مقداری جریان گردشی از یک سیم‌پیچی ثانویه (با emf القایی بیشتر) به سیم‌پیچی‌های ثانویه دیگر (دارای emf القایی کمتر) جریان خواهد داشت. به عبارت دیگر، بین سیم‌پیچی‌های ثانویه و در نتیجه بین سیم‌پیچی‌های اولیه نیز زمانی که پایانه‌های ثانویه به صورت موازی متصل می‌شوند، جریان‌های گردشی وجود خواهد داشت. امپدانس ترانسفورماتورها کوچک است، به طوری که درصد کمی اختلاف ولتاژ ممکن است برای گردش جریان قابل توجهی کافی باشد و باعث تلفات I^2R اضافی شود. هنگامی که بار به سمت ثانویه چنین ترانسفورماتوری اعمال می‌شود، جریان گردشی تمایل به ایجاد شرایط بارگذاری نابرابر دارد. از این رو، این امکان وجود دارد که دریافت kVA بار کامل ترکیبی خروجی از گروه با اتصال موازی، بدون داغ شدن بیش از حد یکی از ترانسفورماتورها غیرممکن باشد. برای عملکرد موازی رضایت‌بخش، جریان گردشی نباید از ۱۰ درصد جریان بار نرمال تجاوز کند.

(ب) هر دو ترانسفورماتور باید امپدانس (برحسب درصد یا پریونیت) یکسانی داشته باشند.

اگر این شرط دقیقاً برآورده نشود، یعنی مثلث‌های امپدانس در ظرفیت‌های اسمی خودشان از نظر شکل و اندازه یکسان نباشند، حتی در آن صورت عملیات موازی ترانسفورماتورها نیز امکان‌پذیر خواهد بود، اما ضرایب توانی که ترانسفورماتورها در آن کار می‌کنند با ضریب توان بار متفاوت خواهد بود. بنابراین، در این حالت ترانسفورماتورها بار را متناسب با ظرفیت اسمی خود تقسیم نمی‌کنند.

^۱ . transformed

(ج) هر دو ترانسفورماتور سه فاز باید توالی فاز یکسانی داشته باشند، یعنی ترانسفورماتورها باید به درستی با توجه به توالی فازشان متصل شوند.

اگر این شرط رعایت نشود، ثانویه یک ترانسفورماتور به عنوان بار روی ترانسفورماتور دیگر عمل می‌کند، یعنی ثانویه‌ها در شرایط اتصال کوتاه قرار می‌گیرند، گرم می‌شوند و به سرعت به عایق آسیب می‌رسانند.

(د) در مورد ترانسفورماتورهای سه فاز، دو ترانسفورماتور باید دارای اتصالاتی باشند که بین ولتاژهای خط ثانویه هیچگونه جابجایی فازی وجود نداشته باشد. سیم‌پیچی‌های اولیه و ثانویه ترانسفورماتورهای سه فاز ممکن است به اشکال مختلفی از اتصالات متصل شوند. این اتصالات مقادیر مختلفی از دامنه و جابجایی فاز را ایجاد می‌کنند. دامنه‌ها را می‌توان با تغییر تپ‌ها تنظیم کرد اما جابجایی فاز را نمی‌توان جبران کرد. بنابراین، انواع اتصالات زیر برای اتصال ترانسفورماتورهای سه فاز به صورت موازی مجاز است.

Yd	Yd	Yy	Dd	Yy	ترانسفورماتور ۱
Yz	Dy	Dd	Dd	Yy	ترانسفورماتور ۲

در عین حال، ترانسفورماتورهایی با زاویه $(+ 30^\circ)$ و $(- 30^\circ)$ را نیز می‌توان تنها پس از معکوس کردن اتصالات اولیه یا ثانویه، به صورت موازی متصل نمود.

۱۱-۳- اشتراک‌گذاری بار بین ترانسفورماتورهای سه فاز که به صورت موازی وصل شده اند:

اشتراک‌گذاری بار بین دو ترانسفورماتور که به صورت موازی متصل شده اند، به شرایط مختلفی بستگی دارد. در مورد ترانسفورماتورهای سه فاز، امیدانس هر فاز باید هنگام تعیین اشتراک‌گذاری بار در نظر گرفته شود. اگر درصد امیدانس‌های دو ترانسفورماتور با مقادیر اسمی متفاوت داده شود، مقادیر آنها باید بر اساس kVA مبنا برای محاسبه اشتراک‌گذاری بار تبدیل شوند.

مثال ۳،۱۱

دو ترانسفورماتور سه فاز هر کدام با ظرفیت اسمی ۱۰۰ کیلو ولت آمپر به صورت موازی متصل می‌شوند. یکی از ترانسفورماتورها دارای مقاومت (در هر فاز) و راکتانس (در هر فاز) به ترتیب ۱٪ و ۴٪ و دیگری دارای مقاومت (در هر فاز) و راکتانس (در هر فاز) به ترتیب ۵٪ و ۶٪ می‌باشند. سهم بار و ضریب توان هر ترانسفورماتور را وقتی که کل بار مشترک ۱۲۰ کیلو ولت آمپر، با ضریب توان ۰/۸ پسفاز است، را محاسبه کنید.

Solution:

Here,

Load = 120 kVA at p.f. 0.8 lagging

$$\bar{S} = 120 \angle \cos^{-1} 0.8 = 120 \angle -36.87^\circ$$

Percentage impedance of transformer-I,

$$\bar{Z}_1 = (1 + j4) = 4.12 \angle 76^\circ$$

Percentage impedance of transformer-II,

$$\bar{Z}_2 = (1.5 + j6) = 6.18 \angle 76^\circ$$

$$\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 = (1 + j4) + (1.5 + j6) = (2.5 + j10) = 10.3 \angle 76^\circ$$

$$\begin{aligned} \text{Load shared by transformer-I, } \bar{S}_1 &= \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} \times \bar{S} \\ &= \frac{6.18 \angle 76^\circ}{10.3 \angle 76^\circ} \times 120 \angle -36.87^\circ \\ &= 72 \angle -36.87^\circ \text{ kVA} \\ &= \mathbf{57.6 \text{ kW at 0.8 p.f. lagging (Ans.)}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Load shared by transformer-II, } \bar{S}_2 &= \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} \times \bar{S} = \frac{4.12 \angle 76^\circ}{10.3 \angle 76^\circ} \times 120 \angle -36.87^\circ \\ &= 48 \angle -36.87^\circ \text{ kVA} \\ &= \mathbf{38.4 \text{ kW at 0.8 p.f. lagging (Ans.)}} \end{aligned}$$

مثال ۳-۱۲

دو ترانسفورماتور سه فاز با ظرفیت های اسمی ۱۰۰۰ کیلوولت آمپر و ۵۰۰ کیلوولت آمپر بصورت موازی کار می کنند. نسبت تبدیل برای هر دو ترانسفورماتور یکسان و برابر ۶۶۰۰/۴۰۰ ولت با اتصال مثلث ستاره می باشد. امپدانس های معادل سمت ثانویه ترانسفورماتورها به ترتیب برابر $(0.001 + j0.003)$ و $(0.0028 + j0.005)$ اهم در هر فاز می باشد. در صورتی که بار کل تغذیه شده توسط این دو ترانس ۱۲۰۰ کیلوولت آمپر تحت ضریب توان ۰/۸۶۶ پسفاز باشد، سهم بار و ضریب توان هر کدام از ترانسورماتورها را محاسبه نمایید.

Impedance of 1000 kVA transformer, $\bar{Z}_1 = (0.001 + j0.003) = 0.003162 \angle 71.57^\circ \text{ ohm}$

Impedance of 500 kVA transformer, $\bar{Z}_2 = (0.0028 + j0.005) = 0.00573 \angle 60.75^\circ \text{ ohm}$

$$\begin{aligned}\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 &= (0.001 + j0.003) + (0.0028 + j0.005) = (0.0038 + j0.008) \\ &= 0.00886 \angle 64.59^\circ \text{ ohm}\end{aligned}$$

Load supplied, $\bar{S} = 1200 \angle -\cos^{-1} 0.866 = 1200 \angle -30^\circ \text{ kVA}$

Load shared by 1000 kVA transformer,

$$\begin{aligned}\bar{S}_1 &= \bar{S} \times \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} = 1200 \angle -30^\circ \times \frac{0.00573 \angle 60.75^\circ}{0.00886 \angle 64.59^\circ} \\ &= 776 \angle -33.84^\circ \text{ kVA} \\ &= \mathbf{645 \text{ kW at pf } 0.83 \text{ lagging (Ans.)}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Load shared by 500 kVA transformer, } \bar{S}_2 &= \bar{S} \times \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} = 1200 \angle -30^\circ \times \frac{0.003162 \angle 71.57^\circ}{0.00886 \angle 64.59^\circ} \\ &= 428 \angle -23^\circ \text{ kVA} \\ &= \mathbf{394 \text{ kW at pf } 0.92 \text{ lagging (Ans.)}}\end{aligned}$$

مثال ۳-۱۳

دو ترانسفورماتور سه فاز با ظرفیت های اسمی ۴۰۰ کیلوولت آمپر و ۸۰۰ کیلوولت آمپر بصورت موازی کار می کنند. یکی از آنها (۴۰۰ کیلوولت آمپری) دارای افت ولتاژ مقاومتی ۱/۵ درصدی و افت ولتاژ راکتیو ۵ درصدی می باشد، در حالی که ترانسفورماتور دیگر دارای افت ولتاژ مقاومتی ۱ درصدی و افت ولتاژ راکتیو ۴ درصدی می باشد. ولتاژ ثانویه هر ترانس در شرایط بارگذاری ۴۰۰ ولت است. تعیین کنید این دو ترانس یک بار ۶۰۰ کیلوولت آمپری با ضریب توان ۰/۸ پسفاز را چگونه بین خود تقسیم می کنند؟

Solution:

Let the base kVA be 800 kVA

Percentage impedance of 400 kVA transformer at base kVA

$$\bar{Z}_1 = \frac{800}{400} \times (1 \cdot 5 + j5) = 3 + j10 = 10.44 \angle 73.3^\circ$$

Percentage impedance of 800 kVA transformer at base kVA

$$\bar{Z}_2 = \frac{800}{800} \times (1 + j4) = 1 + j4 = 4.123 \angle 76^\circ$$

$$\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 = (3 + j10) + (1 + j4) = 4 + j14 = 14.56 \angle 74^\circ$$

Load to be shared, $\bar{S} = 600 \angle -\cos^{-1} 0.8 = 600 \angle -36.87^\circ \text{ kVA}$

$$\text{Load shared by 400 kVA transformer, } \bar{S}_1 = \bar{S} \times \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2}$$

$$\begin{aligned}&= 600 \angle -36.87^\circ \times \frac{4.123 \angle 76^\circ}{14.56 \angle 74^\circ} = 169.9 \angle -34.87^\circ \\ &= \mathbf{139.4 \text{ kW at pf } 0.82 \text{ lagging (Ans.)}}\end{aligned}$$

$$\text{Load shared by 800 kVA transformer, } \bar{S}_2 = \bar{S} \times \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2}$$

$$\begin{aligned}&= 600 \angle -36.87^\circ \times \frac{10.44 \angle 73.3^\circ}{14.56 \angle 74^\circ} = 430.2 \angle -37.57^\circ \\ &= \mathbf{340.6 \text{ kW at pf } 0.792 \text{ lagging (Ans.)}}\end{aligned}$$

۳،۱۲ ترانسفورماتورهای سه سیم پیچه (دارای سیم پیچی ثالثیه)

ترانسفورماتورها علاوه بر سیم پیچی های معمولی اولیه و ثانویه، معمولاً دارای سیم پیچی سوم موسوم به سیم پیچی ثالثیه هستند و چنین

ترانسفورماتوری، ترانسفورماتور سه سیم پیچه نامیده می شود. سیم پیچی سوم به یکی از دلایل زیر روی هسته قرار می گیرد:

(الف) در ترانسفورماتورهای با اتصال ستاره-ستاره برای سرکوب ولتاژهای هارمونیک، اجازه دادن به جریان خطای زمین کافی برای

عملکرد دستگاه های حفاظتی و محدود کردن عدم تعادل ولتاژ زمانی که ترانسفورماتور بار نامتقارن را تغذیه می کند.

(ب) در ترانسفورماتورهای با اتصال ستاره-ستاره، برای جلوگیری از نوسان پتانسیل نقطه ی خنثی به میزان نامطلوب.

(ج) برای تغذیه ی یک بار اضافی با ولتاژی متفاوت از ولتاژ اولیه و ثانویه.

(د) برای تأمین توان دستگاه های جبران کننده فاز^۱، مانند کندانسورها، که با ولتاژی متفاوت از ولتاژ اولیه و ثانویه کار می کنند.

(ه) برای اندازه گیری ولتاژ یک ترانسفورماتور آزمایش HV^۲.

معمولاً سیم پیچی های ثالثیه به صورت مثلث متصل می شوند تا مسیری را برای جریان های توالی صفر در مورد خطاهای تک فاز یا دو

فاز به زمین فراهم کنند. این مسیر دارای راکتانس کم، عدم تعادل ولتاژ ناشی از این خطاهای زمین نامتعادل را کاهش می دهد. سیم پیچی

ثالثیه هنگامی که برای تغذیه ی یک بار کوچک اضافی در ولتاژی متفاوت استفاده شود، سیم پیچی کمکی نامیده می شود. از سوی دیگر،

هنگامی که برای محدود کردن جریان اتصال کوتاه استفاده می شود، سیم پیچی تثبیت کننده^۳ نیز نامیده می شود.

اصول عملکرد ترانسفورماتور ۳ سیم پیچه

اصول کار ترانسفورماتور ۳ سیم پیچه اساساً مانند ترانسفورماتور دو سیم پیچه است. سیم پیچی اولیه یک ترانسفورماتور سه سیم پیچه به

عنوان سیم پیچی مغناطیسی عمل می کند و جریان آن، شار مغناطیسی اصلی را تولید می کند. این شار با سیم پیچی های ثانویه و ثالثیه

پیوند می خورد و متناسب با تعداد دورهای این سیم پیچی ها در آنها نیروی محرکه ی الکتریکی القاء می کند.

هنگامی که بارهایی به دو سر سیم پیچی های ثانویه و ثالثیه متصل می شوند، جریان های I₂ و I₃ در آنها جریان می یابد. مطابق رابطه ی

زیر آمپر - دورها متعادل می شوند:

$$I_1 N_1 = (-I_2 N_2) + (-I_3 N_3) + I_0 N_1 \quad \dots (3.11)$$

$$\text{or} \quad I_1 = I_2' + I_3' + I_0 \quad (\text{since } I_2' = -I_2 \frac{N_2}{N_1} \text{ and } I_3' = -I_3 \frac{N_3}{N_1}) \quad \dots (3.12)$$

بنابراین، در یک ترانسفورماتور ۳ سیم پیچه، توان به طور همزمان به سیم پیچی ثانویه و ثالثیه منتقل می شود. معمولاً هر دو سیم پیچی

ثانویه و ثالثیه به طور همزمان بطور کامل بارگذاری نمی شوند، علاوه بر این، جریان های I₂ و I₃ در یک لحظه ی یکسان همفاز نیستند.

بنابراین، سیم پیچی اولیه معمولاً برای بار کمتری نسبت به مجموع توان های نامی سیم پیچی های ثانویه و ثالثیه طراحی می شود.

¹ . phase compensating devices

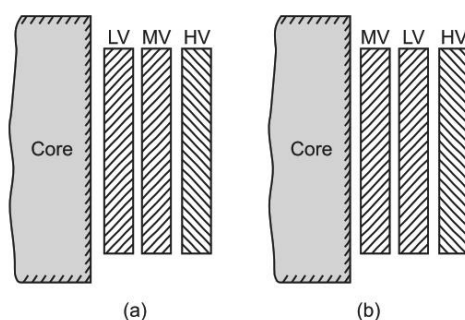
² . HV testing transformer

³ . stabilizing winding

ساختمان

در یک ترانسفورماتور سه سیم پیچه، سه مجموعه سیم پیچی (اولیه، ثانویه و ثالثیه) روی هسته قرار می گیرند. ترانسفورماتور سه سیم پیچه می تواند بصورت یک واحد سه فاز یا سه واحد یک فاز متصل شده بصورت یک واحد سه فاز قرار گرفته در یک تانک و یا سه واحد تک فاز جداگانه متصل شده به صورت یک بانک ترانسفورماتور سه فاز باشند. در این ترانسفورماتور سه سیم پیچی در سه ولتاژ مختلف به نام های سیم پیچی فشار قوی، فشار متوسط و فشار ضعیف کار می کنند.

همانطور که در شکل ۳،۱۷ نشان داده شده است، دو آرایش ممکن برای سیم پیچی ها با شروع از هسته به سمت بیرون عبارتند از: فشار ضعیف، فشار متوسط و فشار قوی و (ب) فشار متوسط، فشار ضعیف و فشار قوی.



شکل ۳-۱۷- آرایش سیم پیچی ها

در ترانسفورماتورهای دو سیم پیچه، ظرفیت اسمی هر دو سیم پیچی اولیه و ثانویه یکسان و با ظرفیت اسمی ترانسفورماتور برابر است، اما در مورد ترانسفورماتورهای ۳ سیم پیچی اینطور نیست. ظرفیت اسمی ترانسفورماتور ۳ سیم پیچه برابر با بزرگترین ظرفیت اسمی هر یک از سیم پیچی های آن (یعنی سیم پیچی اولیه) در نظر گرفته می شود.

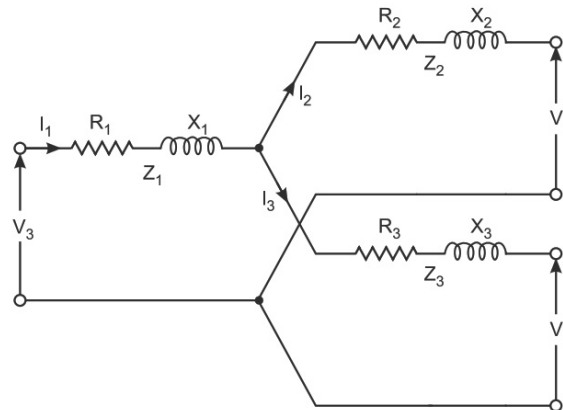
مقادیر اسمی سیم پیچی ثالثیه به کاربرد مورد نظر آن بستگی دارد. در صورتی که این سیم پیچی برای تغذیه بار اضافی در نظر گرفته شده باشد، سیم پیچی بر همان اساسی که اولیه و ثانویه طراحی و محاسبه شده اند، طراحی و محاسبه می شود. هنگامی که این سیم پیچی تنها برای متعادل کردن بارها و کنترل جریان های اتصال کوتاه استفاده می شود، جریان را فقط برای مدت زمانی کوتاه از خود عبور می دهد و مقادیر اسمی آن عمدتاً به ظرفیت گرمایی اش بستگی دارد. در عمل، سطح مقطع هادی های سیم پیچی به طور کلی بر اساس شرایط خطا، صرف نظر از این واقعیت که قرار است برای چه کاربردی استفاده شود، تعیین می شود، زیرا حداکثر جریان را در این شرایط حمل می کند.

مدار معادل

مدار معادل را می توان بگونه ای ترسیم کرد که در آن هر سیم پیچی با مقاومت و راکتانس نشتی خود که به یک ولتاژ مشترک (ولتاژ مبنا) ارجاع شده اند، نشان داده می شود. این مدار معادل در شکل ۳،۱۸ نشان داده شده است. مقاومت ها و راکتانس ها را می توان بر اساس یک kVA مشترک یا مبنای فرضی به مقادیر پریونیتی تبدیل کرد.

با مراجعه به مدار نشان داده شده در شکل ۳، ۱۸، با صرفنظر نمودن از جریان تحریک I_0 ، داریم: $I_1 + I_2 + I_3 = 0$

امپدانس‌ها برای چنین مدار معادلی را می‌توان از داده‌های سه آزمایش اتصال کوتاه انجام شده بر روی ترانسفورماتور تعیین کرد.



شکل ۳-۱۸- مدار معادل ترانسفورماتور سه سیم‌پیچ

امپدانس اتصال کوتاه سیم‌پیچی‌های بین پایانه‌های ۱ و ۲ در شرایط مدار باز بودن سیم‌پیچی ۳ (یعنی امپدانس مدار معادل زمانی که پایانه‌های مدار ۱ و ۲ اتصال کوتاه و پایانه‌های مدار ۳ باز هستند) عبارت است از:

$$\bar{Z}_{12} = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2$$

امپدانس اتصال کوتاه سیم‌پیچی‌ها بین پایانه‌های ۲ و ۳ در شرایط مدار باز بودن سیم‌پیچی ۱ عبارت است از:

$$\bar{Z}_{23} = \bar{Z}_2 + \bar{Z}_3$$

امپدانس اتصال کوتاه سیم‌پیچی‌ها بین پایانه‌های ۱ و ۳ در شرایط مدار باز بودن سیم‌پیچی ۲ عبارت است از:

$$\bar{Z}_{31} = \bar{Z}_3 + \bar{Z}_1$$

تمامی امپدانس‌ها به یک مبناى مشترک ارجاع می‌شوند.

با حل معادلات بالا خواهیم داشت:

$$\bar{Z}_1 = \frac{1}{2} (\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{31} - \bar{Z}_{23}) \quad \dots(3.13)$$

$$\bar{Z}_2 = \frac{1}{2} (\bar{Z}_{23} + \bar{Z}_{12} - \bar{Z}_{31}) \quad \dots(3.14)$$

$$\bar{Z}_3 = \frac{1}{2} (\bar{Z}_{31} + \bar{Z}_{23} - \bar{Z}_{12}) \quad \dots(3.15)$$

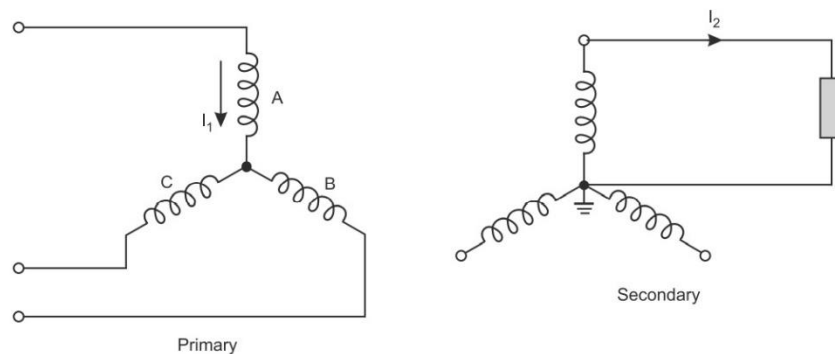
تلفات هسته، امپدانس تحریک یا مغناطیس‌کننده و نسبت دورها را می‌توان با انجام آزمایش مدار باز روی هر یک از سه سیم‌پیچی تعیین کرد.

۱-۱۲-۳- تثبیت فراهم شده توسط سیم‌پیچی سوم در ترانسفورماتورهای با اتصال ستاره- ستاره

ترانسفورماتورهای با اتصال ستاره- ستاره ممکن است از واحدهای تک فاز یا واحدهای سه فاز زرهی یا هسته ای پنج ستونه تشکیل شوند. تمامی این واحدهای ترانسفورماتوری از معایب زیر رنج می‌برند:

(الف) نمی‌توانند بارهای نامتعادل بین خط و خنثی، یعنی بارهای توالی صفر را تغذیه کنند.

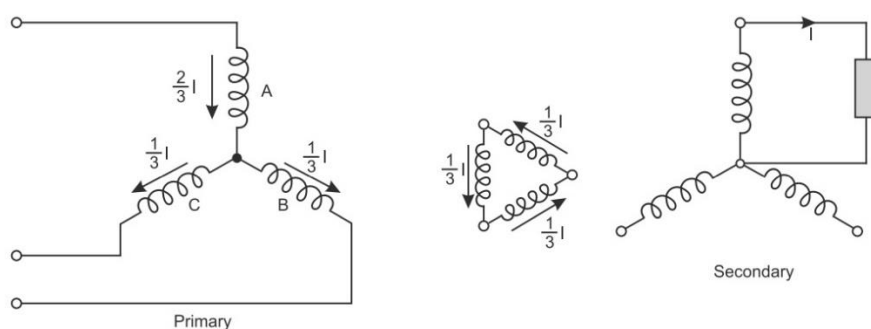
(ب) ولتاژهای فاز آنها ممکن است توسط نیروهای محرکه‌ی الکتریکی هارمونیک سوم دچار اعوجاج شود. دلیل این موضوع این است که mmf ناشی از جریان‌های هارمونیک سوم و توالی صفر یک مسیر آهنی دارد. امپدانس توالی صفر بین سیم‌پیچی‌های اولیه و ثانویه آنقدر زیاد است که باعث عدم تعادل ولتاژ زیادی می‌شود. این را می‌توان به خوبی از شکل ۳-۱۹- (الف) فهمید.



شکل ۳-۱۹- الف- توزیع جریان در سیم‌پیچی‌ها در اثر بار تک‌فاز یا خطای زمین

بار تک‌فاز یا جریان خطای I_2 تمایل به القای I_1 در سیم‌پیچی اولیه متناظر (فاز A) دارد، اما در غیاب سیم خنثی (نوترال)، جریان I_1 باید از طریق دو فاز دیگر B و C برگردد. راکتانس این سیم‌پیچی‌ها که در اینجا به دلیل عدم وجود جریان‌های ثانویه آنها، راکتانس مغناطیسی است، بسیار زیاد می‌باشد.

ولتاژ این فازهای B و C افزایش یافته و تقریباً با ولتاژ خط اولیه برابر می‌شود. از طرف دیگر، ولتاژ فاز معیوب یا بارگذاری شده A به مقدار بسیار پایین کاهش می‌یابد و یک عدم تعادل جدی ولتاژ ایجاد می‌کند. با استفاده از یک سیم‌پیچی ثالثیه با اتصال مثلث، مسیرهایی با راکتانس پایین برای جریان‌های توالی صفر فراهم می‌شود، که از عدم تعادل ولتاژ در صورت وجود بارهای نامتعادل یا خطاهای زمین جلوگیری می‌کند. شکل ۳-۱۹- ب نشان می‌دهد که در شرایط بارهای تک‌فاز یا خطا، جریان‌ها چگونه در سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور با اتصال ستاره-ستاره-مثلث توزیع می‌شوند. فرض بر این است که هر سیم‌پیچی در هر فاز دارای تعداد دور مساوی است.



شکل ۳-۱۹- ب- توزیع جریان نامتعادل در سیم‌پیچی زمانی که یک سیم‌پیچی ثالثیه با اتصال مثلث حضور دارد.

مشاهده می‌شود که هیچ جریانی وجود ندارد که با امپدانس مغناطیس‌کننده مواجه شود و مسیرهای جریان متعادل‌کننده پیوند یافته از لحاظ مغناطیسی در دسترس هستند. بنابراین از عدم تعادل ولتاژ جلوگیری می‌شود. دو نقطه ضعف ذکر شده در بالا در ترانسفورماتورهای از نوع هسته‌ای سه ستونه تا حدی کاهش می‌یابد، زیرا شار توالی صفر مجبور می‌شود که از ستون هسته خارج شده و از طریق مسیر هوایی با رلوکتانس بالا و تانک ترانس مسیر خود را ببندد که این امر به کاهش شار و امپدانس توالی صفر منجر می‌شود و در نتیجه به طور قابل توجهی عدم تعادل ولتاژ را کاهش می‌دهد. مولفه‌ی هارمونیک سوم شار نیز مسیر با رلوکتانس بالای مشابهی دارد و بنابراین دامنه‌ی شار هارمونیک سوم کم است. اعوجاج در شکل موج ولتاژ کوچک است و ترانسفورماتور در زمانی که ولتاژ ورودی سینوسی است، کم و بیش از شار و emf سینوسی برخوردار است. با این وجود، اگر اولیه و ثانویه ترانسفورماتور دارای اتصال ستاره-ستاره باشند، معمول است که حتی برای ترانسفورماتور از نوع هسته‌ای سه‌ستونه، یک سیم‌پیچی ثالثیه با اتصال مثلث تدارک دیده شود. علاوه بر این، مولفه‌ی هارمونیک سوم شار باعث ایجاد تلفات در تانک ترانسفورماتور می‌شود.

مثال ۳-۱۴- با انجام آزمایش‌های اتصال کوتاه روی یک ترانسفورماتور سه سیم پیچه، مقادیر پریونیتی زیر بدست آمده اند:

$$Z_{12} = (0.012 + j0.064); Z_{23} = (0.025 + j0.064); Z_{31} = (0.016 + j0.12)$$

با انجام آزمایش مدار باز روی اولیه، مقادیر پریونیتی زیر حاصل شده است:

$$Y_0 = (0.02 - j 0.05)$$

ثانویه توان اسمی را با تحت ضریب توان 0.8 پس‌فاز تحویل می‌دهد و سیم‌پیچی ثالثیه باز نگه داشته می‌شود. امپدانس هر سیم پیچی را برحسب پریونیت پیدا کنید.

پاسخ: داریم:

$$\bar{Z}_{12} = (0.012 + j 0.064)$$

$$\bar{Z}_{23} = (0.025 + j 0.064)$$

$$\bar{Z}_{31} = (0.016 + j 0.12)$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_1 &= \frac{1}{2} (\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{31} - \bar{Z}_{23}) \\ &= \frac{1}{2} [0.012 + j 0.064 + 0.016 + j 0.12 - 0.025 - j 0.064] \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{2} (0.003 + j 0.12) = \mathbf{(0.0015 + j0.06) (Ans.)}$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_2 &= \frac{1}{2} (\bar{Z}_{23} + \bar{Z}_{12} - \bar{Z}_{31}) \\ &= \frac{1}{2} [0.025 + j 0.064 + 0.012 + j 0.064 - 0.016 - j 0.12] \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{2} (0.021 + j 0.116) = \mathbf{(0.0105 + j0.058) (Ans.)}$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_3 &= \frac{1}{2} (\bar{Z}_{31} + \bar{Z}_{23} - \bar{Z}_{12}) \\ &= \frac{1}{2} [0.016 + j 0.12 + 0.025 + j 0.064 - 0.012 - j 0.064] \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{2} (0.029 + j0.12) = \mathbf{(0.0145 + j0.06) (Ans.)}$$

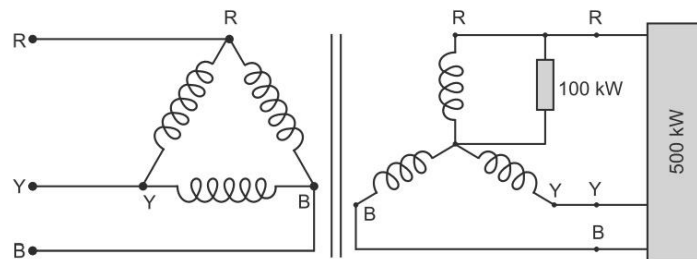
مثال ۳-۱۵- یک ترانسفورماتور سه فاز با اتصال مثلث/ستاره، ۱۱ کیلوولت/۴۰۰ ولت، بار ۱۰۰ کیلوواتی را تحت ضریب توان واحد بین خط R و خنثی تغذیه می‌کند. همچنین، این ترانسفورماتور بار متعادل ۵۰۰ کیلوواتی را با تحت ضریب توان ۰/۸ پسفاز تغذیه می‌کند. مقدار جریان را در هر سیم‌پیچی اولیه و هر خط ورودی تعیین کنید. فرضیات را در صورت وجود بیان کنید و دیاگرام مربوطه را رسم کنید.

پاسخ:

$$\text{Secondary phase voltage, } V_{ph2} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ V}$$

$$\text{Primary phase voltage, } V_{ph1} = V_{L1} = 11000 \text{ V}$$

$$\text{Transformation ratio, } K = \frac{V_{ph2}}{V_{ph1}} = \frac{231}{11000}$$



شکل ۳-۲۰- دیاگرام مداری

Current in red phase of secondary due to single phase load of 100 kW at unity pf .

$$= \frac{100 \times 1000}{231} = 433 \text{ A} \quad (\text{in phase with respective phase voltage})$$

Current in all phases due to balanced load of 500 kW at 0.8 pf lagging

$$= \frac{500 \times 1000}{3 \times 231 \times 0.8} = 902 \text{ A}$$

(lagging behind their respective phase voltages by $\phi = \cos^{-1} 0.8 = 36.87^\circ$)

Assuming phase voltage V_{RY} on primary as reference phasor,

$$\bar{V}_{RY} = 11000 \angle 0^\circ \text{ V}; \bar{V}_{YB} = 11000 \angle -120^\circ \text{ V}; \bar{V}_{BR} = 11000 \angle 120^\circ \text{ V}$$

Current in primary phase RY due to single phase load of 100 kW unity pf

$$I_{RY(1)} = 433 \times \frac{231}{11000} = 9.1 \text{ A in phase with voltage } V_{RY}$$

$$\bar{I}_{RY(1)} = 9.1 \angle 0^\circ \text{ A}$$

Current in primary phase RY due to three-phase balance load of 500 kW at 0.8 pf lagging.

$$I_{RY(2)} = 902 \times \frac{231}{11000} = 18.95 \text{ A lagging } V_{RY} \text{ by } 36.87^\circ$$

$$\therefore \bar{I}_{RY(2)} = 18.95 \angle -36.87^\circ \text{ A}$$

Current in phase RY , $\bar{I}_{RY} = 9.1 \angle 0^\circ + 18.95 \angle -36.87^\circ$

$$= 9.1 + (15.16 - j 11.37) = (24.26 - j11.37)$$

$$= \mathbf{26.8 \angle -25.1^\circ \text{ A (Ans.)}}$$

Current in phase YB , $\bar{I}_{YB} = 18.95 \angle -120^\circ - 36.87^\circ = 18.95 \angle -156.87^\circ = (-17.43 - j7.44) \text{ A}$

$$= \mathbf{18.95 \angle 23.11^\circ \text{ A (Ans.)}}$$

Current in phase BR , $\bar{I}_{BR} = 18.95 \angle 120^\circ - 36.87^\circ = 18.95 \angle 83.13^\circ = (2.67 + j18.81) \text{ A}$

$$= \mathbf{19 \angle 81.92^\circ \text{ (Ans.)}}$$

Line current, $\bar{I}_R = \bar{I}_{RY} - \bar{I}_{BR} = (24 \cdot 26 - j11 \cdot 37) - (2 \cdot 67 + j18 \cdot 81)$

$$= (21.59 - j30.18) = \mathbf{37.1 \angle -54.42^\circ \text{ A (Ans.)}}$$

Line current, $\bar{I}_Y = \bar{I}_{YB} - \bar{I}_{RY} = (-17.43 - j7.44) - (24.26 - j11.37)$

$$= (-41.69 - j18.81) = \mathbf{45.74 \angle 24.28^\circ \text{ A (Ans.)}}$$

Line current, $\bar{I}_B = \bar{I}_{BR} - \bar{I}_{YB} = (2.67 + j18.81) - (-17.43 - j7.44)$

$$= (20.1 + j26.25) = \mathbf{33.1 \angle 52.56^\circ \text{ (Ans.)}}$$