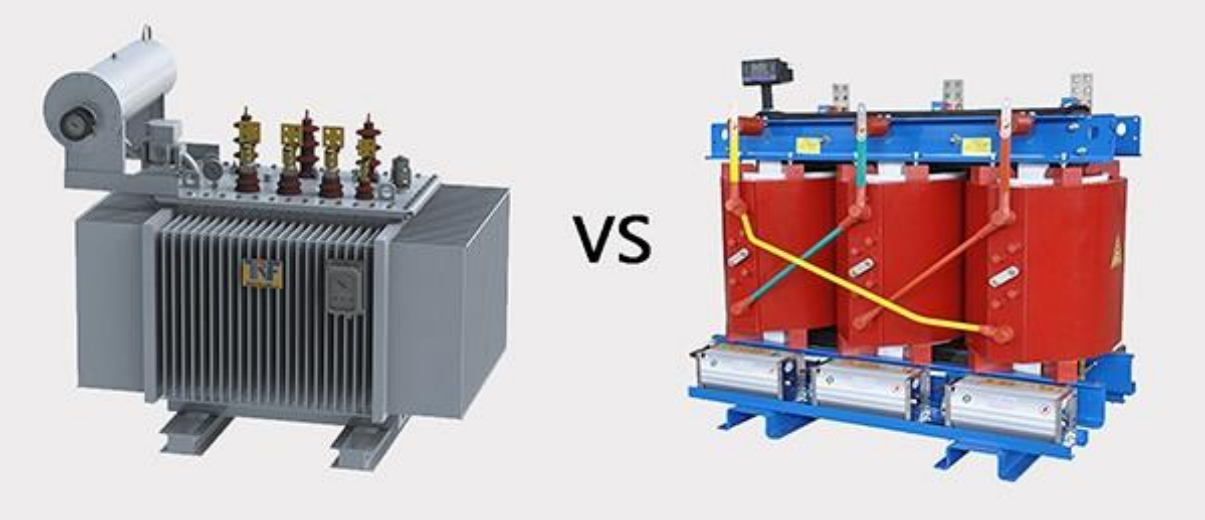
فصل پنجم

ترانسفورماتورهای سه فاز

۵-۱- مقدمه

در سیستم‌های قدرت به علت دور بودن تولید انرژی الکتریکی از شهرها و مراکز مصرف ناچار به احداث خطوط انتقال توان بلند هستیم. این خطوط توسط هادی‌هایی معمولاً از جنس آلومینیوم که توسط فولاد در مرکز آنها برای استحکام مکانیکی بیشتر تقویت‌شده‌اند، الکتریسیته را انتقال می‌دهند. ازآنجاکه هر هادی الکتریسیته دارای مقاومت در برابر عبور جریان الکتریسیته و متناسب با طول آن هادی است، بخشی از انرژی الکتریسیته در این هادی‌ها تلف می‌شود. این تلفات که از رابطه‌ی $P_{loss}=RI^2$ محاسبه می‌شود با مجذور جریان نیز رابطه مستقیم دارد. یکی از راه‌های کاهش این تلفات کاهش جریان است اما برای ثابت ماندن توان انتقالی می‌بایست طبق رابطه $S=VI^*$ ولتاژ افزایش یابد. این هدف با استفاده از ترانس‌های قدرت قابل انجام است. در سیستم‌های انتقال قدرت به علت‌های مختلف از سیستم‌های سه فاز به‌جای تک فاز استفاده می‌شود که علت‌های آن از حوصله این بحث خارج است و به خواننده واگذار می‌شود. (سؤال: چرا از سیستم‌های چند فاز به‌جای تک فاز استفاده می‌شود؟ چرا از سیستم سه فاز استفاده می‌شود و نه مثلاً ۲ فاز یا ۴ فاز و ....؟) در این فصل ترانس‌های سه فاز که به‌ویژه در سیستم‌های قدرت سه فاز مورد استفاده قرار می‌گیرند، بررسی خواهد شد. یک تفاوت اصلی این ترانسفورماتورها با نمونه تک فاز آنها، ایجاد اتصالات مختلف است که هرکدام دارای مزیت‌هایی هستند و کاربردهای خاص دارند.

۵-۲- انواع ترانسفورماتورها در خنک‌سازی



شکل (۵-۱): ترانسفورماتور خشک (شکل راست) روغنی (شکل چپ)

a- ترانسفورماتورهای روغنی (Oil immersed type)

در این ترانسفورماتورهای کل هسته و سیم‌پیچ‌های آن در روغن غوطه ور است و باید ساختمان آنها در برابر نشت روغن و یا نفوذ هوا کاملاً آب‌بندی باشد. مزایای این نوع ترانس انتقال حرارت آنها توسط روغن و جلوگیری از خوردگی در اثر رطوبت است. معایب این روش نیاز به نگهداری و تعمیر بیشتر و همچنین احتمال بیشتر خطر آتش‌سوزی است.

b- ترانسفورماتورهای خشک (Dry type)

به دلیل عدم وجود روغن، نیاز به مخزن نگهدارندهٔ روغن در ترانس‌های خشک نمی‌باشد. عایق نهایی سیم‌پیچ ترانس‌های خشک، رزین بوده و سیم‌پیچ‌ها در تماس با جریان هوا خنک می‌شوند. استقامت الکتریکی و حرارتی رزین به کار رفته در ترانسفورماتورهای خشک به مراتب بهتر از روغن می‌باشد. به دلیل تکنولوژی ساخت و مواد مصرفی گران‌تر، هزینه اولیهٔ ترانسفورماتورهای خشک در مقایسه با نمونهٔ روغنی مشابه بیشتر است. اما هزینه نهایی ترانسفورماتورهای خشک شامل قیمت اولیه و هزینه‌های تلفات انرژی، نصب و راه‌اندازی و تعمیر و نگهداری در طول عمر مفید ترانسفورماتور مقرون به صرفه‌تر از نمونهٔ مشابه روغنی خود می‌باشند.

به‌طورکلی برای مقایسه این دو ترانس در جدول زیر داریم:

جدول ۱: مقایسه ترانس‌های خشک و روغنی

	خشک	روغنی
طول و عرض و ارتفاع	کمتر	بیشتر
وزن	کمتر	بیشتر
مقدار عایق	بیشتر	کمتر
وزن هادی	برابر	برابر
تحمل اضافه بار	بیشتر	کمتر
بازدهی	کمتر	بیشتر
دوست دار محیط زیست	هستند	نیستند
تعمیر و نگهداری	کمتر	بیشتر
هزینه	بیشتر	کمتر
طول عمر	بیشتر	کمتر
تلفات بی باری	بیشتر	کمتر
تلفات تحت بار	در توانهای پایین کمتر	در توانهای بالا بیشتر
دمای مجاز سیم پیچ (درجه)	۱۴۰	۱۰۵

در دو جدول زیر مقایسه ای بین تلفات بی باری، تلفات تحت بار و ضریب حداکثر راندمان ترانسهای خشک و روغنی در سه گروه از نقطه نظر تلفات از مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان آورده شده است.

جدول ۱: مقایسه تلفات بی باری، تلفات تحت بار و ضریب حداکثر راندمان ترانس‌های خشک و روغنی

جدول پ۱۲-۳ تلفات بی‌بار و تلفات بار و ضریب حداکثر راندمان ترانسفورماتورهای خشک در توان نامی

توان نامی ترانسفورماتورها	ترانسفورماتورهای گروه CRT1			ترانسفورماتورهای گروه CRT2			ترانسفورماتورهای گروه CRT3		
	P_O	P_K	K	P_O	P_K	K	P_O	P_K	K
(kVA)	(W)	(W)		(W)	(W)		(W)	(W)	
۱۶۰	۴۸۰	۲۴۰۰	۰.۴۴	۶۵۰	۲۶۰۰	۰.۵	۷۵۰	۲۹۰۰	۰.۵۱
۲۰۰	۵۹۰	۲۹۰۰	۰.۴۵	۷۵۰	۲۵۰۰	۰.۴۹	۸۵۰	۳۶۰۰	۰.۴۹
۲۵۰	۶۵۰	۳۱۰۰	۰.۴۶	۸۸۰	۳۱۰۰	۰.۵۳	۹۵۰	۴۱۰۰	۰.۴۸
۳۱۵	۷۸۰	۳۶۰۰	۰.۴۷	۱۰۰۰	۳۶۰۰	۰.۵۳	۱۱۰۰	۴۶۰۰	۰.۴۹
۴۰۰	۹۴۰	۴۱۰۰	۰.۴۸	۱۲۰۰	۴۱۰۰	۰.۵۴	۱۳۰۰	۵۹۵۰	۰.۴۷
۵۰۰	۱۱۰۰	۵۰۰۰	۰.۴۷	۱۴۰۰	۵۰۰۰	۰.۵۳	۱۴۵۰	۷۰۰۰	۰.۴۶
۶۳۰	۱۲۵۰	۶۴۰۰	۰.۴۵	۱۶۵۰	۶۴۰۰	۰.۵۱	۱۸۰۰	۸۶۵۰	۰.۴۶
۸۰۰	۱۴۵۰	۷۹۰۰	۰.۴۲	۱۹۰۰	۷۹۰۰	۰.۴۹	۲۰۵۰	۱۰۱۵۰	۰.۴۵
۱۰۰۰	۱۷۵۰	۹۶۰۰	۰.۴۲	۲۳۰۰	۹۲۰۰	۰.۵۰	۲۴۰۰	۱۱۶۰۰	۰.۴۶
۱۲۵۰	۲۱۰۰	۱۰۵۰۰	۰.۴۵	۲۷۰۰	۱۰۰۰۰	۰.۵۲	۲۷۵۰	۱۳۵۰۰	۰.۴۵
۱۶۰۰	۲۴۰۰	۱۲۳۰۰	۰.۴۵	۳۱۰۰	۱۱۸۰۰	۰.۵۱	۳۳۰۰	۱۶۷۰۰	۰.۴۵
۲۰۰۰	۳۰۰۰	۱۴۹۰۰	۰.۴۵	۴۰۰۰	۱۴۵۰۰	۰.۵۳	۴۱۰۰	۱۹۴۰۰	۰.۴۶
۲۵۰۰	۳۶۰۰	۱۸۰۰۰	۰.۴۵	۵۰۰۰	۱۷۶۰۰	۰.۵۳	۵۰۵۰	۲۳۰۰۰	۰.۴۷

جدول پ۱۲-۱ تلفات بار، تلفات بی‌بار و ضریب حداکثر راندمان ترانسفورماتورهای روغنی در توان نامی

توان نامی ترانسفورماتورها	ترانسفورماتورهای گروه OIT1			ترانسفورماتورهای گروه OIT2			ترانسفورماتورهای گروه OIT3		
	P_O	P_K	K	P_O	P_K	K	P_O	P_K	K
(kVA)	(W)	(W)		(W)	(W)		(W)	(W)	
۱۰۰	۲۱۰	۱۴۷۵	۰.۳۷	۳۲۰	۱۷۵۰	۰.۴۲	۲۶۰	۲۱۵۰	۰.۳۵
۱۲۵	۲۴۷	۱۶۹۵	۰.۳۹	۳۸۰	۲۰۰۰	۰.۴۴	۳۱۰	۲۵۴۵	۰.۳۵
۱۶۰	۳۰۰	۲۰۰۰	۰.۳۹	۴۶۰	۲۳۵۰	۰.۴۵	۳۷۵	۳۱۰۰	۰.۳۵
۲۰۰	۳۵۵	۲۳۵۰	۰.۳۹	۵۵۰	۲۷۶۰	۰.۴۵	۴۴۵	۳۶۰۰	۰.۳۵
۲۵۰	۴۲۵	۲۷۵۰	۰.۳۹	۶۵۰	۳۲۵۰	۰.۴۵	۵۳۰	۴۲۰۰	۰.۳۶
۳۱۵	۵۰۰	۳۲۵۰	۰.۳۹	۷۸۰	۳۸۵۰	۰.۴۵	۶۲۵	۵۰۰۰	۰.۳۶
۴۰۰	۶۱۰	۳۸۵۰	۰.۴۰	۹۳۰	۴۶۰۰	۰.۴۵	۷۵۰	۶۰۰۰	۰.۳۶
۵۰۰	۷۲۰	۴۵۵۰	۰.۴۰	۱۱۰۰	۵۴۵۰	۰.۴۵	۸۷۵	۷۱۰۰	۰.۳۵
۶۳۰	۸۰۰	۵۶۰۰	۰.۳۷	۱۲۰۰	۶۷۵۰	۰.۴۲	۹۴۰	۸۷۰۰	۰.۳۳
۸۰۰	۹۴۰	۷۴۰۰	۰.۳۶	۱۴۵۰	۸۵۰۰	۰.۴۱	۱۱۵۰	۱۰۷۰۰	۰.۳۳
۱۰۰۰	۱۱۰۰	۹۵۰۰	۰.۳۵	۱۷۰۰	۱۰۵۰۰	۰.۴۰	۱۴۰۰	۱۳۰۰۰	۰.۳۳
۱۲۵۰	۱۳۰۰	۱۱۴۰۰	۰.۳۳	۲۱۰۰	۱۳۲۰۰	۰.۴۰	۱۷۳۰	۱۶۰۰۰	۰.۳۳
۱۶۰۰	۱۷۰۰	۱۴۰۰۰	۰.۳۵	۲۶۰۰	۱۷۰۰۰	۰.۳۹	۲۲۰۰	۲۰۰۰۰	۰.۳۳
۲۰۰۰	۲۰۵۵	۱۷۵۵۰	۰.۳۵	۳۱۳۵	۲۱۲۰۰	۰.۳۹	۲۶۴۵	۲۵۳۰۰	۰.۳۲
۲۵۰۰	۲۵۰۰	۲۲۰۰۰	۰.۳۳	۳۸۰۰	۲۶۵۰۰	۰.۳۷	۳۲۰۰	۳۲۰۰۰	۰.۳۲

۵-۳- کدهای شناسایی ترانسفورماتورها در خنک‌سازی

استاندارد ANSI/IEEE C 57.12.00 برای مشخص کردن سیستم خنک کاری ترانسفورماتورها یک روش ۴ حرفی ارائه می‌کند.

۱- حرف اول نشان‌دهنده سیستم خنک کاری داخلی برای سیم‌پیچ‌ها و هسته است:

O (Oil): روغن با نقطه اشتعال کمتر از ۳۰۰ درجه

K: روغن با نقطه اشتعال بیش از ۳۰۰ درجه

L: روغن مصنوعی با نقطه اشتعال نامعلوم

G (Gas): گاز مانند SF6

۲- حرف دوم نشان‌دهنده یکی از حالت‌های زیر است:

N (Natural): چرخش طبیعی مایع خنک‌سازی از میان سیم‌پیچ‌ها و هسته

F (Forced): چرخش اجباری به‌وسیله پمپ

D (Directed): چرخش اجباری *جهت داده شده* به‌وسیله تجهیزات خنک کاری و پمپ

۳- حرف سوم نشان‌دهنده ماده بکار گرفته شده در سیستم خنک کاری خارجی است:

A (Air): هوا

W (Water): آب

٤- روش خنک کاری خارجی را بیان می‌کند:

N (Natural): همرفت طبیعی

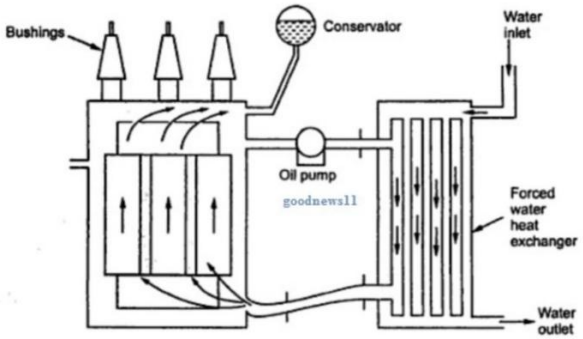
F (Forced): همرفت اجباری

برای مثال ONAN نشان‌دهنده یک ترانسفورماتور با مایع خنک‌سازی روغن برای هسته و سیم‌پیچ‌ها است که روغن آن به صورت چرخش طبیعی خنک می‌شود. سطح مخزن روغن به‌وسیله هوا و آن هم به صورت طبیعی خنک می‌شود. اگر این ترانسفورماتور به پنکه‌های خارجی برای خنک کاری سطح مخزن روغن مجهز باشد از نشانگر ONAF استفاده می‌کنیم. ترانسفورماتوری که در وضعیت عادی از خنک کاری طبیعی در روغن و هوا استفاده می‌کند ولی می‌تواند با در هنگام اضافه شدن بار یا گرم شدن روغن از پنکه نیز استفاده کند با نشانگر ONAN/ONAF مشخص می‌شود.

در شکل زیر ترانسفورماتور اصلی نیروگاه نکا نشان داده شده است. ترانسفورماتور اصلی با ظرفیت ۵۲۰ مگاولت آمپر و ۲۰۴۰۰ کیلو ولت واحد بخار نیروگاه نکا با گروه برداری Ynd5 و سیستم خنک‌سازی OFAF نشان داده شده است.

شکل (۵-۱): ترانس OFAF

در شکل زیر ترانسفورماتور کیلوولت آمپر با خنک‌سازی OFWF نشان داده شده است. از این نوع خنک‌کنندگی در ترانسفورماتورهای کوره و ترانسفورماتورهای نیروگاه‌های برق‌آبی که محدودیت فضای نصب داشته یا indoor هستند استفاده می‌شود. لوله های آب و مبدل حرارتی به صورت استوانه عمودی در این ترانسفروماتور قابل مشاهده است.

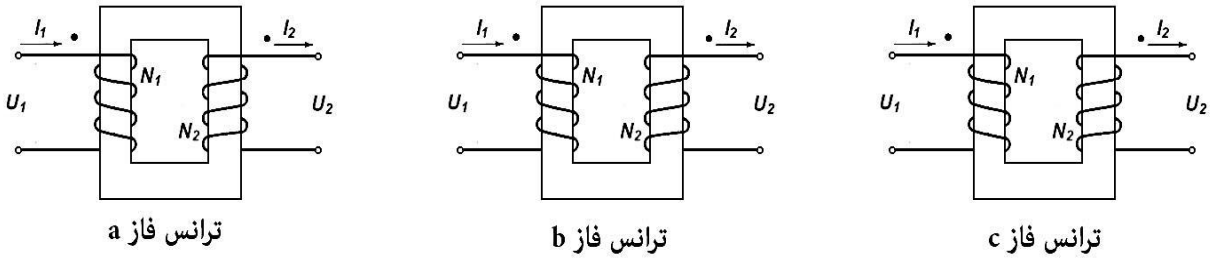


شکل (۵-۱): ترانس OFWF

۵-۴- انواع هسته ترانس‌های سه فاز

a- استفاده از سه هسته مجزای تک فاز

در این حالت از سه هسته جداگانه شبیه ترانس تک فاز برای ایجاد یک ترانس سه فاز استفاده می‌شود. یکی از مزیت‌های این کار قابلیت بهره بردای از ۲ ترانس دیگر در صورت خراب شدن یکی از آنهاست. اما در این روش به مواد اولیه بیشتری نیاز است و گران‌تر خواهد بود. در شکل زیر سه ترانس تک فاز به‌عنوان یک مجموعه ترانس سه فاز نشان داده شده است.



شکل (۵-۱): سه ترانس تک فاز به‌عنوان یک مجموعه ترانس سه فاز

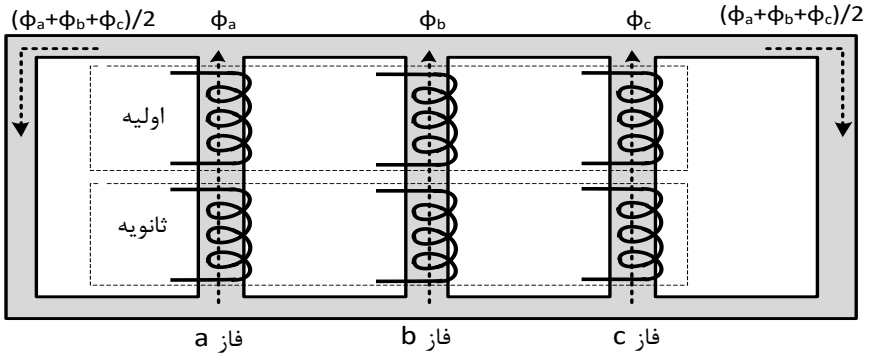
در شکل زیر سه ترانس تک فاز تشکیل دهنده واحد ۳ فاز ۵۰۰ کیلو ولت و ۱۰۰ مگاولت آمپر نشان داده شده است.

شکل (۵-۱): سه ترانس تک فاز به‌عنوان یک مجموعه ترانس سه فاز

b- ترانس‌های سه فاز با هسته واحد

b-1- هسته نوع زرهی Shell Type

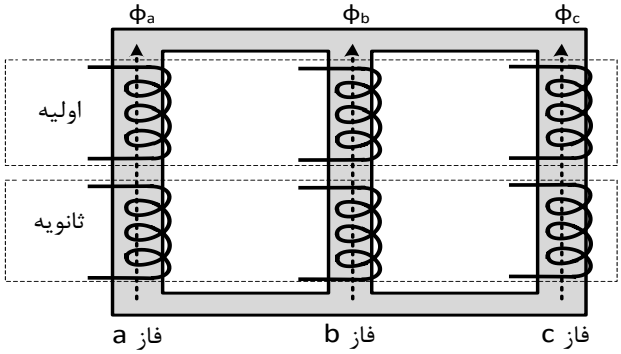
در نوع زرهی سیم‌پیچ‌های هر سه فاز بر روی ستون‌های وسط پیچیده می‌شوند و دو ستون کناری مانند جدار یـا زره دور سـتون وسط را در بر می‌گیرند. بنابراین پراکندگی شار در این حالت کم است چون یک مسیر از هسته در طرفین برای عبور شار وجود دارد به‌طوری‌که نصف برآیند شار هر سه فاز از یک طرف و نصف دیگر آن از طرف دیگر عبور می‌کند. لذا تلفات ناشی از نشت شار به اطراف کم می‌شود بطوریکـه راندمان این نوع بیشتر از نمونه بعدی می‌باشد. برای اینکه چگالی شار در تمام نقاط مدار مغناطیسی ثابت باشد ضـخامت ستون وسط را دو برابر در نظر می‌گیرند. در شکل زیر این نوع هسته نشان داده شده است.



شکل (۵-۲): هسته نوع زرهی Shell Type

b-2- نوع هسته‌ای یا ستونی Core Type

در این نوع هسته دارای سه ستون بوده که هرکدام از سیم‌پیچ‌ها بر روی یکـی از ستون‌ها پیچیده می‌شود. بنابراین در این حالت مسیری برای بسته شدن شار نشتی وجود ندارد. در شکل زیر این نوع هسته نشان داده شده است. به‌منظور استفاده از عایق کمتر سیم‌پیچ فشار ضعیف داخل و فشار قوی روی آن پیچیده می‌شود.



شکل (۵-۳): هسته نوع زرهی Core Type

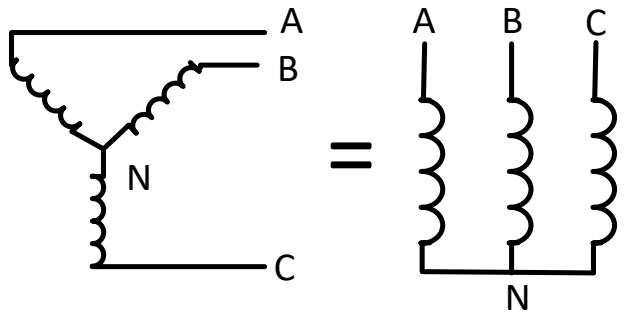
- تفاوت‌های Core Type و Shell Type را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱- در Core Type سیم‌پیچ‌ها هسته را احاطه کرده‌اند اما در Shell Type برعکس است.
۲- راکتانس نشتی و در نتیجه تلفات در Shell Type کمتر است.
۳- استحکام مکانیکی Shell Type بیشتر است.
۴- خنک‌سازی طبیعی در Shell Type وجود دارد.
۵- مواد به کار رفته در Shell Type بیشتر است.
۶- صدا در Shell Type کمتر است.
۷- دسترسی به سیم‌پیچ‌ها در Core Type راحت‌تر است.
۸- تعمیر و نگه‌داری Core Type ساده‌تر است.
۹- Core Type برای ولتاژ بالا مناسب است چون فضای بیشتری برای عایق دارد.
۱۰- در حالت ستاره زمین نشده ایجاد مؤلفه صفر و هارمونیک سوم در Core Type کمتر است و جابجایی نقطه صفر صورت نمی‌پذیرد.

۵-۵- انواع اتصالات ترانس‌های سه فاز

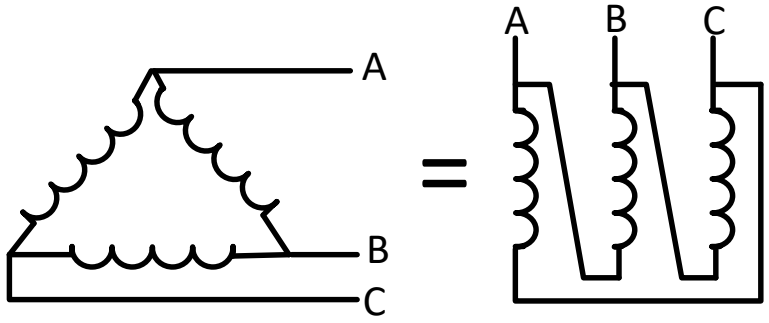
هر ترانس سه فاز دارای ۶ سیم‌پیچی است که برای هر فاز ۲ سیم‌پیچی اولیه و ثانویه را شامل می‌شود. این ۶ سیم‌پیچی دارای ۱۲ سر هستند (به شکل‌های ۱،۲و۳ توجه شود) که درنهایت باید ۳ ورودی و ۳ خروجی داشته باشیم. بنابراین برخلاف ترانس‌های تک فاز بسته به اتصال این ۱۲ سر انواع مختلف ترانس سه فاز را خواهیم داشت که به صورت زیر نام‌گذاری شده‌اند.

a- اتصال ستاره یا Y که در این اتصال یک سر همه سیم‌ها به یکدیگر وصل شده و نقطه خنثی را تشکیل می‌دهند که برای تغذیه بار تک فاز استفاده می‌شود و یا زمین می‌شود. سه خروجی دیگر به منبع یا بار وصل خواهد شد. در شکل زیر این اتصال نشان داده شده است.



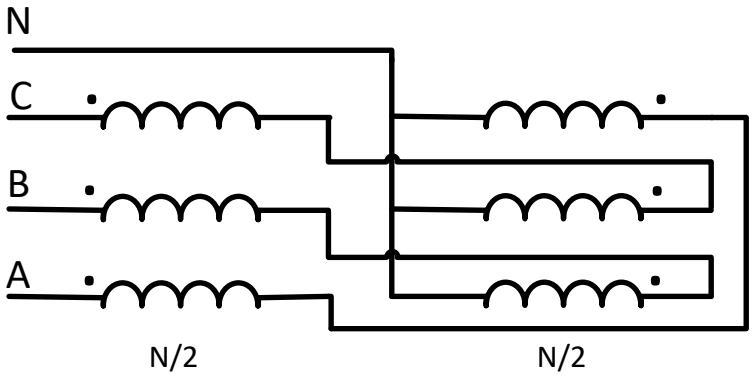
شکل (۵-۴): اتصال ستاره یا Y

b- در اتصال مثلث یا دلتا که با نماد Δ نشان داده می‌شود سربندی به صورت شکل زیر انجام می‌شود. ملاحظه می‌شود در این حالت نقطه خنثی ایجاد نمی‌شود.



شکل (۵-۵): اتصال مثلث یا Δ

c- اتصال زیگزاگ یا Z که سیم‌پیچی هر فاز به دو قسمت مساوی تقسیم شده است و انتهای هر نیم سیم‌پیچ به انتهای نیم سیم‌پیچ در فاز دیگر متصل می‌شود. سرهای باقی‌مانده نیز به یکدیگر متصل شده و نقطه خنثی را تشکیل می‌دهند. شکل زیر این اتصال را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۶): زیگزاگ یا Z

برای تشخیص نوع اتصال ترانس از روی پلاک مشخصات ترانس موارد زیر استفاده می‌شود. نکته اینکه اتصال زیگزاگ معمولاً در طرف فشار قوی استفاده نمی‌شود.

- فشار قوی ستاره Y
- فشار ضعیف ستاره y
- فشار قوی مثلث Δ یا D
- فشار ضعیف مثلث d
- فشار ضعیف زیگزاگ z

۵-۶- نسبت تبدیل در ترانس سه فاز

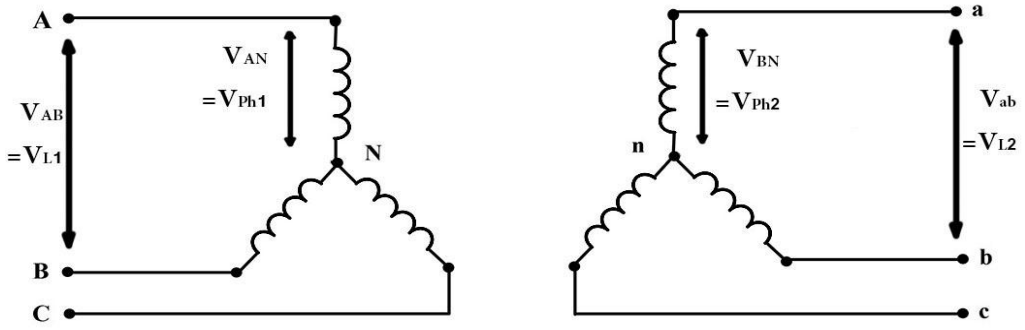
در ترانس‌های سه فاز علاوه بر ولتاژ هرکدام از فازها ولتاژ بین دوفاز که ولتاژ خط نامیده می‌شود نیز وجود دارد. بنابراین، علاوه بر متنوع بودن اتصالات در ترانس سه فاز، یکی دیگر از تفاوت‌های ترانس سه فاز با ترانس تک فاز متفاوت بودن نسبت تبدیل است که نسبت ولتاژ خط اولیه به ولتاژ خط ثانویه تعریف می‌شود. به‌عبارت‌دیگر اگر اولیه و ثانویه اتصال یکسان داشته باشند یعنی Yy، Δd و Zz نسبت تبدیل برابر با تعداد دور سیم‌پیچ‌های اولیه به ثانویه است، اما اگر اتصالات اولیه و ثانویه تفاوت داشته باشند نسبت تبدیل ولتاژ خط اولیه به ولتاژ خط ثانویه در یک عدد ضرب خواهد شد که در این قسمت بررسی خواهد شد. در ابتدا تعاریف اولیه به صورت زیر انجام می‌شود:

$$\text{نسبت تبدیل } (A) = \frac{\text{ولتاژ خط اولیه}}{\text{ولتاژ خط ثانویه}} = \frac{V_{L1}}{V_{L2}}$$

$$\mathrm{a} = \frac{\text{ولتاژ فاز اولیه}}{\text{ولتاژ فاز ثانویه}} = \frac{V_{ph1}}{V_{ph2}} = \frac{\text{تعداد دور سیم پیچ اولیه}}{\text{تعداد دور سیم پیچ ثانویه}} = \frac{N_1}{N_2}$$

۱- اتصال ستاره- ستاره Yy

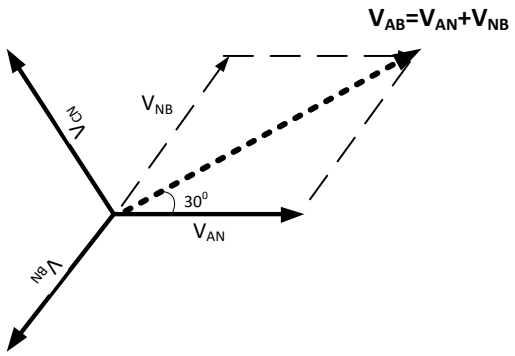
در شکل زیر یک ترانس سه فاز که اولیه و ثانویه آن به صورت ستاره بسته شده است نشان داده شده است. توسط روابط زیر نسبت تبدیل این ترانس به دست خواهد آمد.



شکل (۵-۷): اتصال ستاره- ستاره Yy

$$KVL \rightarrow V_{L1} = V_{AB} = V_{AN} + V_{NB} = V_{AN} - V_{BN} = \sqrt{3}V_{AN} = \sqrt{3}V_{ph1}$$

$$KVL \rightarrow V_{L2} = V_{ab} = V_{an} + V_{nb} = V_{an} - V_{bn} = \sqrt{3}V_{an} = \sqrt{3}V_{ph2}$$

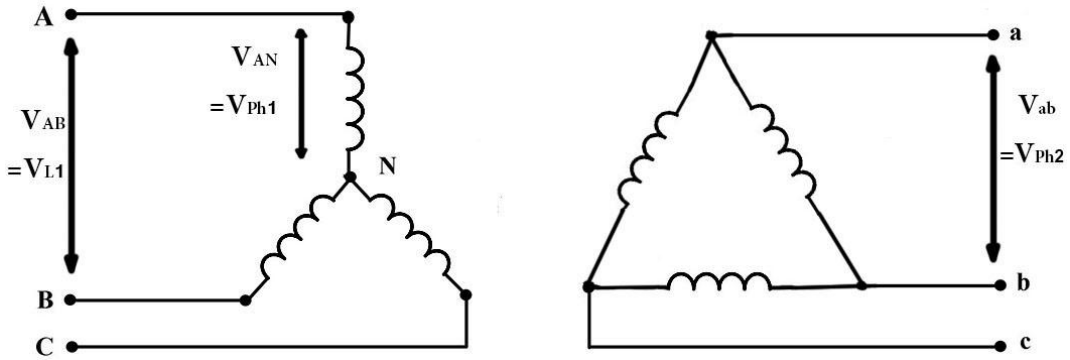


$$\text{نسبت تبدیل } (A) = \frac{V_{L1}}{V_{L2}} = \frac{\sqrt{3}V_{ph1}}{\sqrt{3}\,V_{ph2}} = \frac{V_{ph1}}{V_{ph2}} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

از اثبات روابط بالا این نتیجه حاصل می‌شود که نسبت تبدیل یا نسبت ولتاژ خط اولیه به ثانویه در ترانس ستاره – ستاره برابر با نسبت تعداد دور سیم‌پیچ‌های آنهاست.

۲- اتصال ستاره – مثلث Yd

شکل زیر یک ترانس سه فاز با اولیه ستاره و ثانویه مثلث را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۸): اتصال ستاره- مثلث Yd

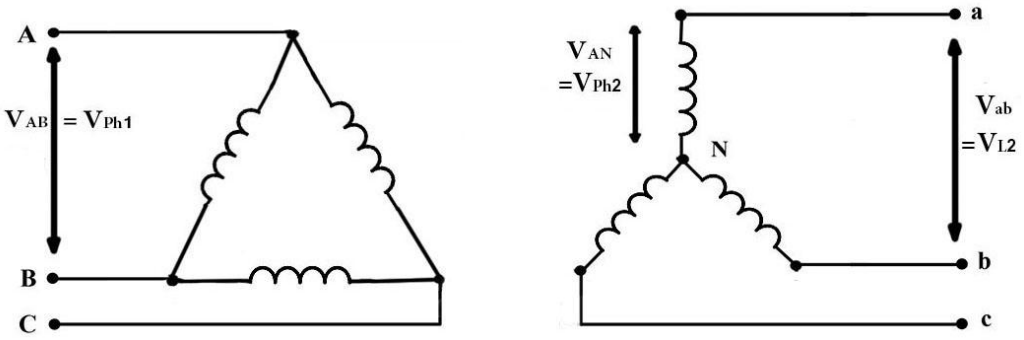
$$V_{L1} = \sqrt{3}V_{ph1}$$

$$V_{L2} = V_{ph2}$$

$$\text{نسبت تبدیل } (A) = \frac{V_{L1}}{V_{L2}} = \frac{\sqrt{3}V_{ph1}}{V_{ph2}} = \sqrt{3}\frac{N_1}{N_2} = \sqrt{3}a$$

همان‌طور که مشاهده شد نسبت تبدیل یا نسبت ولتاژ خط اولیه به ثانویه در ترانس ستاره – مثلث، رادیکال ۳ برابر نسبت تعداد دور سیم‌پیچ‌های اولیه به ثانویه است.

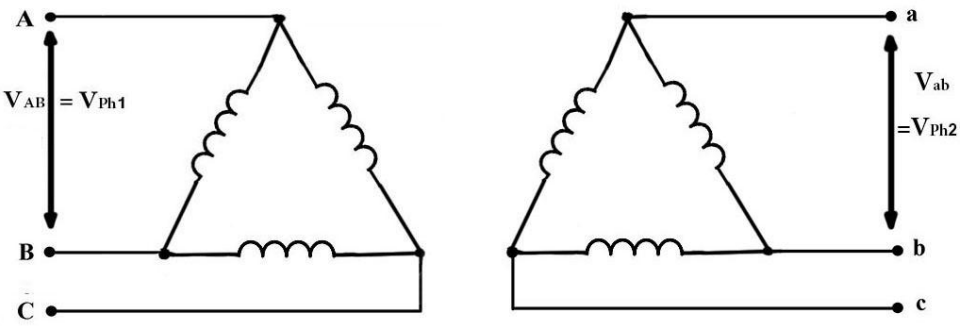
۳- اتصال مثلث – ستاره Δy



شکل (۵-۹): اتصال مثلث – ستاره Δy

$$V_{L1} = V_{ph1}$$
$$V_{L2} = \sqrt{3}V_{ph2}$$
$$\text{نسبت تبدیل } (A) = \frac{V_{L1}}{V_{L2}} = \frac{V_{ph1}}{\sqrt{3}V_{ph2}} = \frac{1}{\sqrt{3}}\frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{\sqrt{3}}a$$

۴- اتصال مثلث – مثلث Δd

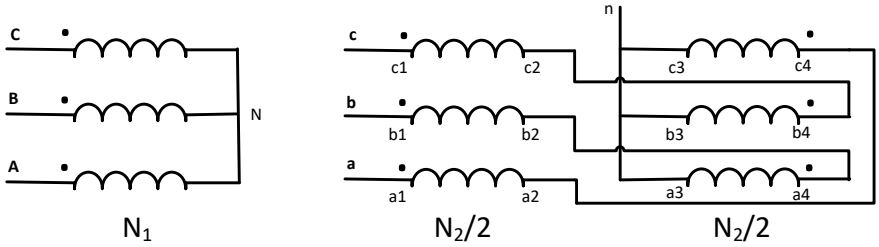


شکل (۵-۱۰): اتصال مثلث – مثلث Δd

$$V_{L1} = V_{ph1}$$
$$V_{L2} = V_{ph2}$$
$$\text{نسبت تبدیل } (A) = \frac{V_{L1}}{V_{L2}} = \frac{V_{ph1}}{V_{ph2}} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

۵- اتصال ستاره- زیگزاگ Yz

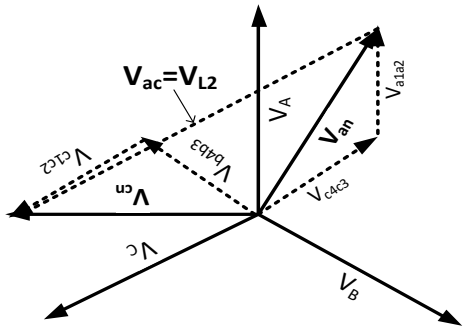
در شکل زیر این اتصال نشان داده شده است. سیم‌پیچ ثانویه N_2 دور است که به دو قسمت مساوی تقسیم شده و هر نیم سیم‌پیچ به انتهای نیم سیم‌پیچ فاز دیگر متصل شده است. برای بدست آوردن نسبت تبدیل به صورت زیر عمل می‌شود.



شکل (۵-۱۱): اتصال ستاره – زیگزاگ Yz

$$KVL \rightarrow V_{an} = V_{a1a2} + V_{c4c3} = V_{a1a2} - V_{c3c4} = \frac{V_{AN}}{N_1}\frac{N_2}{2} - \frac{V_{CN}}{N_1}\frac{N_2}{2} = \frac{N_2}{2N_1}(V_{AN} - V_{CN}) = \frac{N_2}{2N_1}V_{AC} = \frac{N_2}{2N_1}V_{L1}$$

طبق شکل زیر مشاهده می‌شود ولتاژ V_{an} از جمع ولتاژ V_{a1a2} که بر روی ستون V_A قرار دارد و با آن هم‌راستا است و ولتاژ V_{c3c4} که به علت متفاوت بودن سر نقطه‌دار در خلاف جهت V_c است بدست می‌آید. در اتصال زیگزاگ نیز ولتاژ خط رادیکال ۳ برابر ولتاژ فاز است زیرا که ولتاژ هر فاز با فاز دیگر ۱۲۰ درجه اختلاف دارد، بنابراین V_{cn} هم به صورت مشابه با V_{an} بدست آمده و درنهایت V_{ac} برآیند این دو است:



شکل ۱۲ – نحوه بدست آوردن ولتاژهای فازی و خطی در اتصال زیگزاگ به روش برداری

$$V_{L2} = V_{ac} = \sqrt{3}V_{an} = \sqrt{3}\frac{N_2}{2N_1}V_{L1}$$

$$\text{نسبت تبدیل } (A) = \frac{V_{L1}}{V_{L2}} = \frac{V_{L1}}{\sqrt{3}\frac{N_2}{2N_1}V_{L1}} = \frac{2}{\sqrt{3}}\frac{N_1}{N_2} = \frac{2}{\sqrt{3}}a$$

۶- اتصال مثلث- زیگزاگ Δz : به عنوان تمرین

۵-۷- مقایسه اتصال ستاره، مثلث و زیگزاگ

به‌منظور مقایسه بهتر از این اتصال‌ها در۴ مورد شامل سطح ولتاژ، مقدار عایق، مقدار مس و ضریب بهره برداری به شرح زیر مقایسه انجام شده است:

۱- مقایسه سطح ولتاژ سیم‌پیچ‌ها در ولتاژ خط V_L

در اتصال ستاره ولتاژ خط بر رادیکال ۳ تقسیم شده و بر روی هر سیم‌پیچ قرار می‌گیرد.

$$V_{Winding_Y} = \frac{V_{L1}}{\sqrt{3}}$$

در اتصال مثلث ولتاژ خط دقیقاً بر روی هر سیم‌پیچ قرار می‌گیرد.

$$V_{Winding_\Delta} = V_{L1}$$

در اتصال زیگزاگ ولتاژ هر نیم سیم‌پیچ برابر با ولتاژ خط تقسیم بر ۳ است که این قضیه با استفاده از نسبت تبدیل ترانس مثلث- زیگزاگ قابل محاسبه است.

$$V_{Half_Winding_Z} = \frac{V_{L1}}{3}$$

بنابراین بیشترین مقدار ولتاژ بر روی سیم‌پیچ‌ها در اتصال مثلث بعد از آن اتصال ستاره و در آخر زیگزاگ قرار می‌گیرد که در محاسبات باید لحاظ شود.

۲- مقایسه مقدار عایق‌بندی

مقدار عایق مورد نیاز با ولتاژ رابطه مستقیم دارد بنابراین برای اتصال زیگزاگ با ۲ برابر ولتاژ هر نیم سیم‌پیچ متناسب است. لذا مقدار عایق برای اتصال مثلث بیشترین است:

$$Insulation_Y \propto \frac{V_{L1}}{\sqrt{3}}$$

$$Insulation_\Delta \propto V_{L1} \qquad \Rightarrow Insulation_\Delta > Insulation_Z > Insulation_Y$$

$$Insulation_Z \propto \frac{2}{3}V_{L1}$$

۳- مقدار مس مورد نیاز

برای داشتم چگالی جریان یکسان حجم مس مورد نیاز به صورت زیر محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که جریان سیم‌پیچ‌ها در اتصال ستاره و زیگزاگ برابر و همان مقدار جریان خط خواهد بود اما جریان سیم‌پیچ‌ها در

اتصال مثلث با ضریب رادیکال ۳ کمتر از جریان خط است. طبق روابط زیر اتصال زیگزاگ بیشترین مقدار مس را مصرف می‌کند.

$$\sqrt{3}I_{W_\Delta} = I_{W_Z} = I_{W_Y}$$

$$Cu_Y \propto N_Y \times I_Y$$

$$Cu_\Delta \propto N_\Delta \times I_\Delta = \sqrt{3}N_Y \times \frac{1}{\sqrt{3}} I_Y = N_Y \times I_Y \qquad \Rightarrow Cu_\Delta = Cu_Y < Cu_z$$

$$Cu_Z \propto N_Z \times I_Z = \frac{2}{\sqrt{3}} N_Y \times I_Y$$

۴- مقایسه ضریب بهره‌برداری

ضریب بهره‌برداری به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\text{ضریب بهره‌برداری } (\beta) = \frac{\text{قدرت قابل انتقال}}{\text{مجموع قدرت سیم پیچ ها = قدرت نصب شده یا هزینه شده}}$$

$$\beta_Y = \frac{\sqrt{3} \times V_L \times I_L}{3 \times (V_L / \sqrt{3} \times I_L)} = 1$$

$$\beta_\Delta = \frac{\sqrt{3} \times V_L \times I_L}{3 \times (V_L \times I_L / \sqrt{3})} = 1$$

مخرج برابر با قدرت هر نیم سیم‌پیچ ضرب در تعداد آنها یعنی ۶ عدد:

$$\beta_Z \propto \frac{\sqrt{3} \times V_L \times I_L}{6 \times (V_L / 3 \times I_L)} = 0.86$$

ملاحظه می‌شود که در ترانس زیگزاگ حدود ۱۴ درصد ضریب بهره‌برداری کمتر است یعنی به اندازه هزینه انجام شده قدرت تحویل نمی‌دهد بنابراین اقتصادی نیست.

اما با این وجود مزیت این اتصال کجاست که استفاده می‌شود؟ این ترانس مانند اتصال ستاره دارای نقطه خنثی است که برای تغذیه بارهای تکفاز استفاده می‌شود (بنابراین یکی از موارد استفاده آن سیستم‌های توزیع است) و از طرفی مانند اتصال مثلث هارمونیک سوم را حذف می‌کند که در ادامه مسئله **هارمونیک** بررسی خواهد شد.

نکته: سایر محاسبات ترانس سه فاز شبیه ترانس تک فاز است که در فصول قبل بررسی شد با این تفاوت که در ترانس سه فاز نسبت تبدیل به نوع اتصال بستگی دارد و همچنین در محاسبه توان و تلفات باید عدد ۳ در محاسبات ضرب شود.

مثال: یک ترانس 500KVA سه فاز 50 Hz دارای نسبت ولتاژ 33/11 KV است. اولیه اتصال مثلث و ثانویه اتصال ستاره دارد.مقاومت هر فاز طرف فشار قوی ۳۵ اهم و فشار ضعیف ۰/۸۷۶ اهم است. اگر تلفات آهنی ۳۰۵۰ وات باشد، راندمان ترانس را در بار کامل و نصف بار کامل و هرکدام در ضریب توان واحد و ضریب توان ۰/۸ پس فاز بدست آورید.

حل: چون اتصال مثلث-ستاره است پس ولتاژ فاز ثانویه از تقسیم ولتاژ خط بر رادیکال ۳ بدست می‌آید.

$$a = \frac{V_{ph1}}{V_{ph2}} = \frac{33}{11/\sqrt{3}} = 3\sqrt{3}$$

با استفاده از نسبت تبدیل به دست آمده مقاومت طرف اولیه را به ثانویه ارجاع می‌دهیم تا مقاومت معادل کل از دید ثانویه بدست آید.

$$R_{eq} = R_2 + \frac{1}{a^2} R_1 = 0.876 + \frac{1}{\left(3\sqrt{3}\right)^2} \times 35 = 2.172\Omega$$

$$I_{ph2} = I_{L2} = \frac{S}{\sqrt{3}V_L} = \frac{500000}{\sqrt{3} \times 11000} = \frac{500}{\sqrt{3} \times 11} A$$

تلفات مسی در بار کامل

$$P_{cu-n} = 3R_{eq} {I_{ph2}}^2 = 3 \times 2.172 \times (\frac{500}{\sqrt{3} \times 11})^2 = 4490w$$

الف) در بار کامل:

$$\eta = \frac{S \cos\varphi}{S \cos\varphi + P_{cu} + P_c} \times 100$$

$$\begin{cases} \cos\varphi = 1 \rightarrow \dfrac{500000 \times 1}{500000 \times 1 + 4490 + 3050} = 98.54\% \\ \cos\varphi = 0.8 \rightarrow \dfrac{500000 \times 0.8}{500000 \times 0.8 + 4490 + 3050} = 98.2\% \end{cases}$$

ب) در نصف بار کامل: جریان نامی نصف می‌شود در نتیجه تلفات مسی یک چهار شده و توان کل هم نصف می‌شود اما تلفات ثابت به بار بستگی ندارد و ثابت می‌ماند.

$$P_{cu} = 3R_{eq}\left(\frac{1}{2} I_{ph2}\right)^2 = \frac{1}{4} 3R_{eq} {I_{ph2}}^2 = \frac{1}{4} P_{cu-n}$$

$$\begin{cases} \cos\varphi = 1 \rightarrow \dfrac{\frac{1}{2}\times 500000\times 1}{\frac{1}{2}\times 500000\times 1+\frac{1}{4}\times 4490+3050} = 98.35\% \\ \cos\varphi = 0.8 \rightarrow \dfrac{\frac{1}{2}\times 500000\times 0.8}{\frac{1}{2}\times 500000\times 0.8+\frac{1}{4}\times 4490+3050} = 98\% \end{cases}$$

۵-۸- هارمونیک

هارمونیک‌ها، ولتاژها و جریان‌هایی با فرکانسی که به صورت مضربی از فرکانس موج اصلی بیان می‌شود، هستند. به‌عبارت‌دیگر اگر یک شکل موج دارای هارمونیک باشد دیگر سینوسی ایده‌آل نبوده و در صورت محاسبه سری فوریه این شکل موج یک جمله با فرکانس اصلی و چندین جمله با فرکانسی بالاتر از شکل موج اصلی بدست خواهد آمد. اگر فرکانس شکل موج با فرکانس بالاتر به صورت یک ضریب در فرکانس اصلی نوشته شود این ضریب مرتبه هارمونیک و دامنه جمله سینوسی اندازه هارمونیک را نشان می‌دهد.

سری فوریه شکل موج $f(\omega t)$ با دوره تناوب T به صورت زیر تعریف می‌شود:

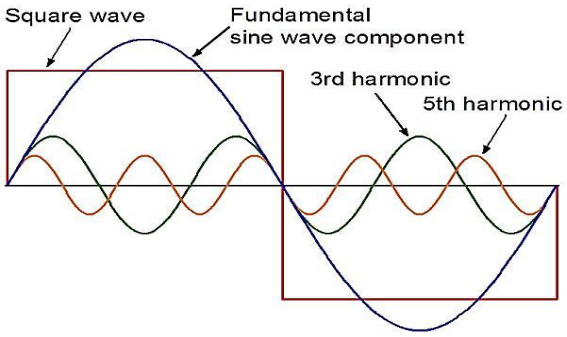
$$f(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t)$$

$$a_0 = \frac{1}{2\pi}\int_0^T f(\omega t)\, d\omega t$$

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_0^T f(\omega t)\cos(n\omega t)\, d\omega t$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^T f(\omega t)\sin(n\omega t)\, d\omega t$$

برای مثال سری فوریه شکل زیر یعنی یک تابع مربعی که چند هارمونیک آن بر روی شکل نشان داده شده است به صورت زیر است:



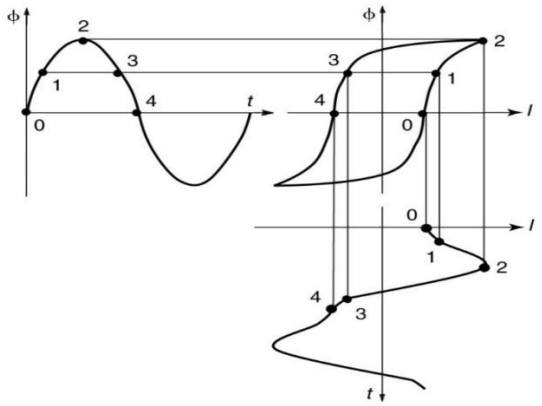
شکل (۵-۱۴): نمودار شکل موج مربعی و سه جمله اول سری فوریه آن

$$f(\omega t)=\frac{4}{\pi}\left[\sin(\omega t)+\frac{1}{3}\sin(3\omega t)+\frac{1}{5}\sin(5\omega t)+\frac{1}{7}\sin(7\omega t)+\ldots\right]$$

لازم به ذکر است اگر تابع فرد باشد جملات کسینوسی و اگر زوج باشد جملات سینوسی از رابطه اصلی محاسبه سری فوریه حذف می‌شوند. همچنین اگر تابع مقدار متوسط یا همان مقدار DC صفر داشته باشد جمله a_0 نیز حذف می‌شود. در مثال بالا مقدار متوسط صفر بوده و تابع فرد است.

در سیستم قدرت یک شکل موج معمولاً بر حسب سینوسی نوشته می‌شود و معمولاً جملات با فرکانسی با ضریب زوج (هارمونیک زوج) نداریم، چرا؟ چه موقع هارمونیک زوج خواهیم داشت؟

همان‌طور که تعریف شد وقتی شکل موج از حالت سینوسی ایده‌آل خارج شود حاوی جملات هارمونیکی خواهد شد که از عوامل تولید هارمونیک در ولتاژ در سیستم‌های قدرت می‌توان به تولید ولتاژ غیر سینوسی از منبع (ژنراتور سنکرون به علت سیم‌پیچی با توزیع غیر سینوسی، اینورترها و ....) و همچنین اشباع شدن هسته ژنراتور اشاره کرد. عوامل ایجاد هارمونیک در جریان نیز بارهای غیرخطی و اشباع هسته ترانسفورماتورها است. در شکل زیر چگونگی ایجاد هارمونیک در جریان به علت اشباع هسته ترانس توضیح داده خواهد شد.



شکل (۵-۱۵): رسم نمودار جریان- زمان به صورت ترسیمی در شرایط اشباع هسته

در این شکل فرض شده است که ولتاژ اعمال شده به ترانس سینوسی ایده‌آل است بنابراین شاری تولیدی که در واقع انتگرال ولتاژ می‌شود یک سینوسی ایده‌آل خواهد بود (منحنی بالا سمت چپ). از طرفی منحنی مغناطیس شوندگی مربوط به هسته ترانس به صورت نوعی نمایش داده شده است که یک حلقه هیسترزیس و غیرخطی است (منحنی بالا سمت راست). منحنی اول شار بر حسب زمان و منحنی دوم شار برحسب جریان است لذا به روش ترسیمی می‌توان شار را از این ۲ منحنی حذف کرد و منحنی جریان برحسب زمان را بدست آورد. برای این کار ۵ نقطه با نام‌های ۰ تا ۴ را روی منحنی اول در نظر می‌گیریم. هرکدام از نقاط را به صورت افقی به منحنی دوم وصل می‌کنیم (لازم به ذکر است که نقطه شماره ۲ پیک را نشان می‌دهد بنابراین نقاط قبل از آن بر روی منحنی رفت هیسترزیس واقع می‌شوند چون شار در حال افزایش است و نقاط بعد از آن بر روی منحنی برگشت به علت کاهش شار مدل می‌شوند). سپس نقاط بدست آمده را به صورت عمودی امتداد می‌دهیم تا مقدار جریان بر روی منحنی جریان- زمان بدست آید و زمان هر نقطه را از روی منحنی اول در نظر گرفته و هر نقطه به صورت معین دارای طول و عرض یعنی زمان و جریان مشخص می‌شود. درنهایت این نقاط را به یکدیگر وصل کرده و به‌وضوح مشاهده می‌شود که منحنی حاصل شده به علت رفتار غیرخطی هسته ترانس از حالت سینوسی خارج می‌شود و در واقع دارای هارمونیک است.

- **اثر هارمونیک بر سیستم قدرت**

اصولاً هارمونیک‌ها آلوده‌سازی شکل موج را در اشکال سینوسی در مضارب فرکانس اصلی آنها نشان می‌دهند. تخریب شکل موج را می‌توان در فرکانس‌های مختلف (مضارب فرکانس اصلی) به‌عنوان یک نوسان دوره‌ای به‌وسیله آنالیز فوریه تجزیه و تحلیل کرد. این نوسانات یا هارمونیک‌ها می‌توانند موجب اختلال در عملکرد سیستم‌های کنترلی، حفاظتی، ارتباطی، صدمات در ترانسفورماتورها، موتورها و رساناها، و افزایش جریان خازن‌ها شوند. می‌توان اثر هارمونیک‌های ولتاژ و جریان را به صورت زیر بیان نمود:

اثرات عمده هارمونیک‌های ولتاژ: ۱- گرم شدن بیش از حد ماشین‌ها ۲- تنش ولتاژ بر روی عایق‌ها و کاهش عمر آنها ۳- تداخل الکترواستاتیکی در سیستم‌های مخابراتی ۴- ایجاد ولتاژهای تشدید بزرگ ۵- خراب شدن بانک‌های خازنی

اثرات عمده هارمونیک‌های جریان: ۱- ایجاد اختلال الکترومغناطیسی در سیستم‌های مخابراتی ۲-افزایش تلفات خطوط انتقال و کاهش راندمان ۳- افزایش تلفات هسته

- **بررسی هارمونیک در ترانس سه فاز**

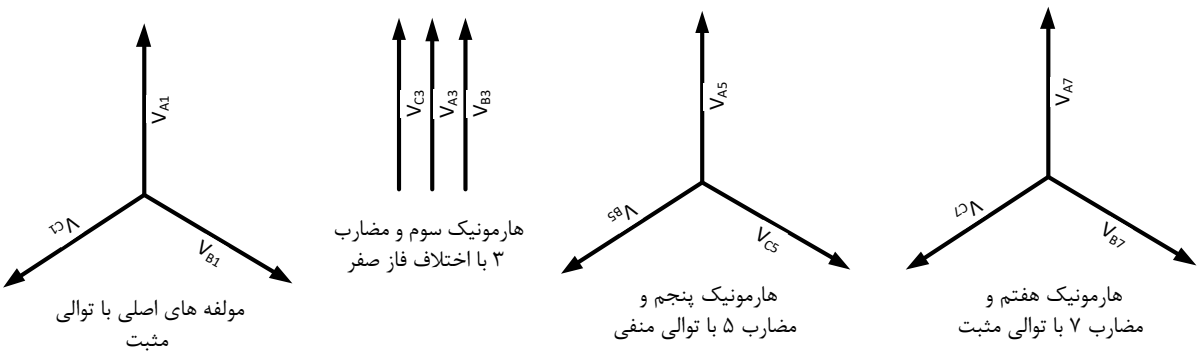
همان‌طور که قبلاً گفته شده در سیستم قدرت معمولاً جملات کسینوسی و هارمونیک زوج جملات سینوسی وجود ندارد. با این فرض و همچنین با فرض آنکه در سیستم سه فاز هر سه فاز به صورت متقارن دارای جملات هارمونیکی باشند، رابطه ولتاژ هرکدام از فازها به صورت زیر بیان می‌شود.

$$V_A = V_{m1}\sin(\omega t) + V_{m3}\sin 3(\omega t) + V_{m5}\sin 5(\omega t) + V_{m7}\sin 7(\omega t) + \ldots$$

$$V_B = V_{m1}\sin(\omega t - 120) + V_{m3}\sin 3(\omega t - 120) + V_{m5}\sin 5(\omega t - 120) + V_{m7}\sin 7(\omega t - 120) + \ldots$$

$$V_C = V_{m1}\sin(\omega t - 240) + V_{m3}\sin 3(\omega t - 240) + V_{m5}\sin 5(\omega t - 240) + V_{m7}\sin 7(\omega t - 240) + \ldots$$

اگر مرتبه هارمونیک که به صورت فاکتور قبل از کمان سینوس نوشته شده است را در کمان ضرب کنیم، جملات ضریب ۳ دارای فاز صفر خواهند شد یعنی هارمونیک‌های ۳، ۹، ۱۵ و... هم‌فاز می‌شوند. جملات ضریب ۵ توالی منفی و جملات ضریب ۷ توالی مثبت خود را حفظ می‌کنند. ملاحظه می‌شود به‌جز هارمونیک‌های مضرب ۳ بقیه هارمونیک‌ها دارای سه فاز متعادل هستند و جمع جبری آنها صفر می‌شود. بنابراین هارمونیک‌های مضرب ۳ صفر نشده و در سیستم سه فاز مشکل ساز خواهند شد و ازآنجاکه با افزایش مرتبه هارمونیک دامنه آنها کمتر می‌شود هارمونیک ۳ دارای بیشترین درجه اهمیت است.



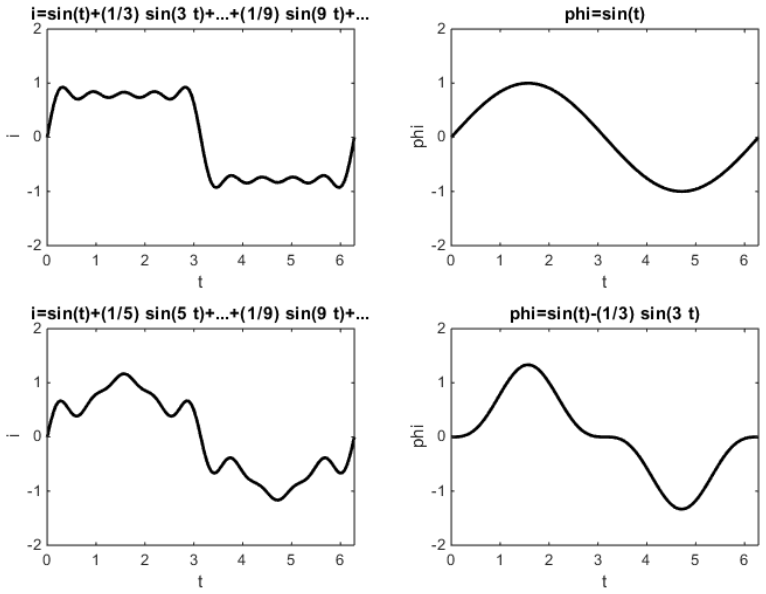
شکل (۵-۱۶): هارمونیک‌ها و توالی آنها

- **بررسی هارمونیک سوم در ترانس سه فاز**

همان‌طور که اشاره شد به علت رفتار غیرخطی هسته یعنی منحنی شار-جریان، جریان ترانس همیشه دارای هارمونیک است حتی اگر شار یا ولتاژ سینوسی باشد. بنابراین یک شار سینوسی با توجه به رفتار هسته جریان هارمونیکی ایجاد کرده است و برای اینکه شار از حالت سینوسی خارج نشود باید همه مؤلفه‌های هارمونیکی

جریان بتوانند وجود داشته باشند. اگر برخی از مؤلفه‌های هارمونیکی جریان نتوانند جاری شوند، شار یا ولتاژ از حالت سینوسی خارج می‌شود و در طرف ثانویه القا شده و سیستم را دارای هارمونیک می‌کند. این قضیه که حذف یکی از مؤلفه‌های جریان باعث غیر سینوسی شدن شار یا ولتاژ می‌شود در شکل زیر نمایش داده شده است. اما ازآنجاکه هارمونیک‌های به‌جز ضرایب ۳ همگی برآیند صفر دارند مشکلی بجود نمی‌آورند و فقط هارمونیک‌های مضرب ۳ مشکل ساز هستند.

همان‌طور که شکل بالا سمت چپ نشان می‌دهد جریان به علت غیرخطی بودن هسته دارای همه هارمونیک‌ها است و در این حالت شار کاملاً سینوسی است که در شکل بالا سمت راست آورده شده است. حال اگر هارمونیک سوم جریان نتواند جاری شود و از شکل موج جریان حذف شود (شکل پایین سمت چپ) شار متناظر با آن نیز از حالت سینوسی خارج می‌شود که در شکل پایین سمت راست نشان داده شده است. این موضوع اهمیت جاری شدن هارمونیک سوم جریان را نشان می‌دهد که در ادامه بررسی خواهد شد.

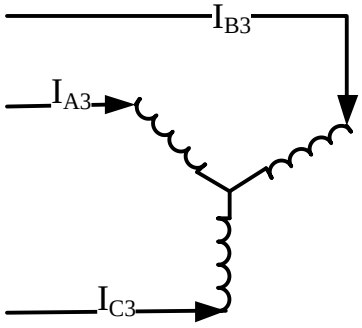


شکل (۵-۱۷): حذف هارمونیک سوم از جریان باعث غیر سینوسی شدن شار می‌شود

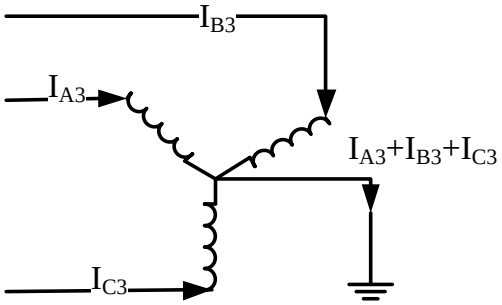
- **بررسی هارمونیک سوم در اتصال ستاره- ستاره**

در اتصال ستاره – ستاره که نقطه خنثی (نوترال) آن زمین نشده است، برآیند هارمونیک‌های سوم هرکدام از فازها جمع غیر صفر داشته و مسیری برای جاری شدن هم وجود ندارد، بنابراین طبق آنچه که گفته شد شار غیر سینوسی خواهد شد. حال اگر نقطه خنثی زمین شود هارمونیک‌های سوم می‌توانند جاری شوند و شار و در

نتیجه ولتاژ سینوسی باقی خواهد ماند. در دو شکل زیر این قضیه نشان داده شده است. بنابراین یکی از اتصالات اولیه دارای نقطه خنثی زمین شده باشد به علت القا جریان‌های هارمونیک سوم جاری خواهند شد.



شکل (۵-۱۸): برآیند جریان‌های هارمونیک سوم صفر نیست و مسیری برای جاری شدن آنها نیز وجود ندارد بنابراین شار غیر سینوسی خواهد شد.

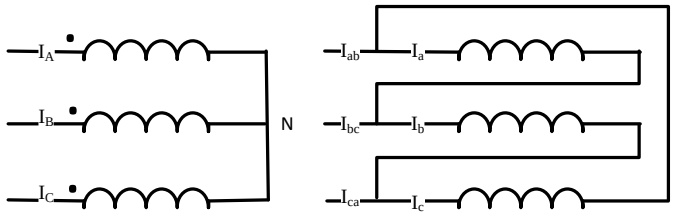


شکل (۵-۱۹): برآیند جریان‌های هارمونیک سوم صفر نیست ولی مسیری برای جاری شدن آنها وجود دارد بنابراین شار سینوسی خواهد ماند.

- **بررسی هارمونیک سوم در اتصال ستاره- مثلث**

مشکل اتصال ستاره زمین نشده این بود که جریان‌های هارمونیک سوم فازها برآیند غیر صفر داشتند و امکان جاری شدن نیز وجود نداشت و یا اینکه باید نقطه خنثی به زمین وصل شود که مشکلاتی دارد (مانند هزینه بیشتر، تداخل با خطوط مخابراتی و ...). اما اگر یکی از اتصالات مثلث باشد جریان‌های هارمونیک سوم به یک نقطه وارد نمی‌شوند که برآیند آنها مشکل ساز شود و در هرکدام از سیم‌پیچ‌ها (یعنی جریان فازها) هارمونیک سوم می‌تواند جاری شود و شار سینوسی خواهد ماند. ضمناً در اتصال مثلث، هارمونیک‌های سوم تنها در سیم‌پیچ‌ها جاری می‌شوند و وارد خط نمی‌شوند چون در این اتصال جریان خط تفاضل جریان ۲ فاز است و

هارمونیک‌های سوم هر فاز دارای مقدار برابر هستند و با تفاضل صفر می‌شوند. که در زیر شکل این اتصال و محاسبه جریان خط ab که فاقد هارمونیک سوم می‌باشد نشان داده شده است.



شکل (۵-۲۰): جریان‌ها در اتصال ستاره- مثلث

$$I_a = I_{a1} + I_{a3} + I_{a5} + I_{a7} + \dots$$
$$I_b = I_{b1} + I_{b3} + I_{b5} + I_{b7} + \dots$$
$$I_{a3} = I_{b3}$$
$$I_{ab} = I_a - I_b = I_{ab1} + I_{ab5} + I_{ab7} + \dots$$

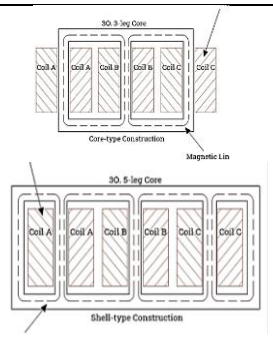
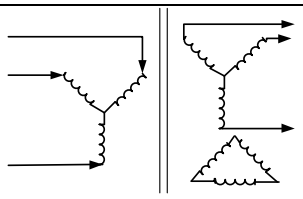
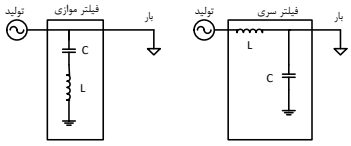
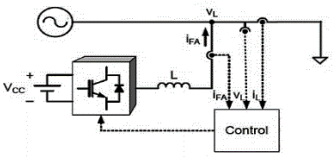
- **بررسی هارمونیک سوم در اتصال ستاره- زیگزاگ**

در اتصال ستاره- زیگزاگ ولتاژ هر فاز در ثانویه با توجه به سر نقطه‌دار هر نیم سیم‌پیچ از تفاضل دو فاز دیگر تشکیل شده است. بنابراین در هر نیم سیم‌پیچ جریان هارمونیک سوم وجود دارد اما چون هارمونیک سوم دارای اندازه و فاز برابر هستند از یکدیگر کم شده و حذف می‌شوند و وارد خط نمی‌شود. بنابراین حالتی مشابه با اتصال مثلث خواهیم داشت که جریان‌های هارمونیک سوم از طرف اولیه کشیده می‌شوند اما وارد خط ثانویه نخواهند شد یعنی شار سینوسی خواهد ماند.

- **روش‌های حذف هارمونیک**

با توجه به اثرات مخربی که هارمونیک‌ها در سیستم قدرت ایجاد می‌کنند، تلاش‌هایی در زمینه طراحی بهتر منابع هارمونیک انجام می‌گیرد تا هارمونیک کمتری وارد شبکه نمایند، اما هنوز ماهیت غیرخطی بودن هسته ترانس‌ها و ژنراتورها و برخی از بارهای غیرخطی باعث تزریق هارمونیک در شبکه می‌گردند، بنابراین بایستی اقداماتی در جهت کنترل آن‌ها صورت گیرد. با روش‌های مختلف می‌توان هارمونیک‌ها را از سیستم قدرت حذف کرد که در زیر به چندین مورد به صورت خلاصه اشاره می‌شود.

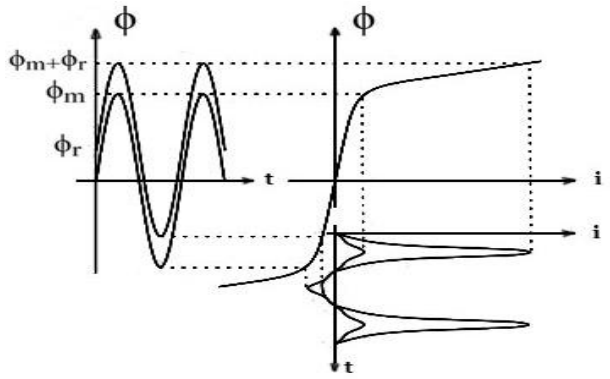
جدول: روشهای حذف هارمونیک

	روش	توضیح	کاربرد	شکل
۱	نوع اتصال ترانس	اگر اولیه یا ثانویه در ترانس سه فاز ستاره زمین شده، مثلث و یا زیگزاگ باشد هارمونیک سوم ولتاژ نخواهیم داشت. به‌عبارت‌دیگر در اتصال ستاره- ستاره زمین نشده هارمونیک سوم وجود دارد.	حذف هامونیک سوم ناشی از غیر خطی بودن ترانس	
۲	نوع هسته ترانس	در قسمت‌های قبل راجع به هارمونیک جریان صحبت شد و گفته شد جریان به علت غیرخطی بودن هسته حتماً دارای هارمونیک است. حال اگر بخواهیم ولتاژ سینوسی باشد باید جریان باهمه مؤلفه‌هایش جاری شود. در این قسمت بررسی هارمونیک‌های ولتاژ و انتقال آنها به ثانویه مطرح است. در هسته Shell Type برآیند شار هر سه سیم‌پیچ مسیری برای عبور دارد. بنابراین در صورت هارمونیکی بودن ولتاژ هارمونیک سوم وجود خواهد داشت. اما در هسته Core Type مسیری برای برآیند هارمونیک سوم شار وجود ندارد در نتیجه دامنه شار این هارمونیک کوچک خواهد بود و ولتاژ هارمونیک سوم نیز به همین صورت است و در صورت وجود هارمونیک ولتاژ از منبع در سمت ثانویه این هارمونیک وجود نخواهد داشت.	حذف هارمونیک سوم به علت وجود هارمونیک در ولتاژ و شار	
۳	استفاده از ترانس سه سیم- پیچه	در صورتی که اتصال ترانس اصلی انتقال توان ستاره-ستاره زمین نشده باشد، می‌توان از سیم‌پیچی سوم مه به صورت مثلث بسته شده است استفاده کرد. با این کار جریان‌های هارمونیک سوم در اتصال مثلث که ثالثیه است می‌توانند جاری شوند و بنابراین شار سینوسی باقی خواهد ماند. اگر ترمینال‌های اتصال مثلث در دسترس باشند برای تغذیه داخلی نیروگاه استفاده می‌شوند در صورتی که می‌توانند اصلاً در دسترس نباشند و این اتصال فقط برای حذف هارمونیک استفاده شود.	حذف هامونیک سوم به علت غیر خطی بودن ترانس و استفاده از اتصال ستاره- ستاره	
۴	فیلترهای غیرفعال (پسیو)	فیلتر موازی از سلف و خازن تشکیل شده و با بار به صورت موازی قرار می‌گیرند و هر یک از آن‌ها بر روی فرکانس خاصی تنظیم می‌شوند و هارمونیک خاصی را حذف می‌کنند. هارمونیک‌های بار بجای عبور از منبع، مسیر خود را از طریق فیلترها به زمین تکمیل می‌کنند. اگر فیلتر به صورت یک سلف سری و یک خازن موازی باشد فیلتر پایین گذر را ایجاد می‌کند که فرکانس‌های بالا که همان هارمونیک‌ها هستند را عبور نخواهد داد.	حذف هامونیک های مرتبه بالا در فیلتر سری و هامونیک خاص در نوع موازی	
۵	فیلترهای فعال (اکتیو)	فیلترهای اکتیو مبتنی بر تکنولوژی ادوات الکترونیک قدرت هستند و به صورت موازی با بار غیرخطی قرار می‌گیرند. اساس کار فیلترهای اکتیو بدین صورت است که در ابتدا باید سیستم اندازه‌گیری فیلتر با استفاده از فیدبکی که از جریان بار می‌گیرد مؤلفه‌های هارمونیکی جریان بار که یک جریان غیرخطی است را شناسایی کند. سپس ادوات الکترونیک قدرت (اینورتر) با استفاده از مدار فرمانی که از فیدبک جریان تشکیل شده است مؤلفه‌های هارمونیکی جریان را با دامنه منفی تولید می‌نماید و آن را به شبکه تزریق کند تا به این صورت مؤلفه‌های هارمونیکی از خط حذف شوند.	امکان حذف همه هارمونیک ها به صورت دقیق	

۵-۹- جریان هجومی ترانس

در حالت کارکرد عادی ترانس جریان طبق سه منحنی شار – جریان و زمان بدست آمد و ملاحظه شد که دارای هارمونیک است. اما در شرایط گذرا مانند وصل کلید و اعمال ولتاژ منبع به ترانس حالت دیگری در لحظات اولیه وصل کلید رخ می‌دهد که شکل جریان ترانس را به‌طورکلی تغییر می‌دهد.

برای بررسی این حالت یک مرتبه فرض می‌کنیم که مقدار شار پسماند در ترانس در آخرین مرتبه قطع آن از شبکه صفر بوده است. بنابراین در یک نیم سیکل با وصل کلید شار تا مقدار ϕ_m افزایش می‌یابد و با استفاده از منحنی مغناطیس شوندگی هسته شکل موج جریان بدست خواهد آمد که حالت کار عادی ترانس را نشان می‌دهد. اما حالتی دیگر ممکن است که رخ دهد که در آخرین لحظه قطع ترانس از شبکه مقداری شار پسماند (Residual Flux) مثبت ϕ_r در هسته باقی‌مانده است. حال بعد از وصل کلید اگر پلاریته ولتاژ در جهتی باشد که شار تولیدی آن در جهت مثبت و شار پسماند باشد، مقدار ماکزیمم شار در این حالت $\phi_m+\phi_r$ خواهد شد. این فوران زیاد باعث می‌شود که هسته به حالت اشباع مغناطیسی برود و اگر طبق شکل موج شار- زمان و شار-جریان شکل موج جریان شار در این حالت به صورت ترسیمی بدست آید ملاحظه می‌شود که جریان بسیار زیادی از منبع تغذیه کشیده خواهد شد که آن را جریان هجومی (Inrush current) می‌نامند و دارای مقدار پیک بسیار بالایی دارد و در شکل زیر نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این حالت شکل موج جریان تقارن نیم موج ندارد و در نتیجه دارای هارمونیک زوج است.



شکل (۵-۲۳): جریان ترانس در حالت عادی و جریان هجومی

البته شرایطی که در بالا در نظر گرفته شد، یعنی حداکثر پسماند مثبت و زاویه ولتاژ صفر موج ولتاژ در لحظه وصل، بدترین شرایط برقرار شدن ترانسفورماتور است که دامنه جریان هجومی در بدترین شرایط می‌تواند تا چندین برابر جریان نامی ترانسفورماتور برسد. جریان هجومی به علت وجود تلفات ترانسفورماتور که عمدتاً مربوط به سیم‌پیچ است پس از مدتی از بین رفته و جریان مغناطیس کننده به حالت ماندگار خود

می‌رسد. در طول چندین تناوب که جریان هجومی جاری است، همیشه روی منحنی هیسترزیس حرکت می‌کند تا زمانی که اثر شار پسماند از بین برود و به تدریج بر روی منحنی هیسترزیس معمولی بازگشت نماید. جریان هجومی در لحظه برق دار کردن ترانسفورماتور جهت انتخاب فیوز و وسایل حفاظتی دارای اهمیت است. جدول زیر مقدار جریان هجومی برای تارنسفورماتور های توزیع شرکت ایران ترانسفو را نشان میدهد.

جدول (۵-۱): جریان هجومی

گروه اتصال		Yz			Dy						
قدرت نامی ترانسفورماتور (kVA)		50	100	2000	250	630	1600	250	630	1600	2000
جریان هجومی بصورت مضربی از جریان نامی	UK %4	22	20	19	19	16	18	---			
	UK %6	16	15	14	15	14	13	9	8	8	8/5

نحوه کاهش جریان هجومی ترانسفورماتور

روش های زیر می توانند جریان هجومی را در ترانسفورماتور کاهش دهند:

۱- **تنظیم فاز ولتاژ ورودی:** جریان هجومی ترانسفورماتور در صورتی رخ می دهد که ولتاژ اعمالی در لحظه وصل ترانسفوماتور از صفر شروع شود. اگر فاز ولتاژ ورودی از ۹۰ درجه (حداکثر دامنه) شروع شود، مقدار متناظر جریان صفر خواهد بود، زیرا جریان ۹۰ درجه در یک سلف عقب می افتد. با این حال، جریان هجومی تنها برای چند میلی ثانیه دوام می‌آورد و ترانسفورماتورها از نظر فیزیکی برای کنترل تنش‌های مکانیکی از جریان به جریان هجومی طراحی شده‌اند. تنظیم زاویه فاز ولتاژ اعمال شده برای کاهش جریان هجومی معمولاً ضروری یا اقتصادی نیست.

۲- **استفاده از حفاظت جریان هجومی:** ترمیستورها می توانند برای محدود کردن جریان راه اندازی بالا در ترانسفورماتور استفاده شوند. ترمیستور در دمای محیط مقاومت بسیار بالایی دارد و در دماهای بالا مقاومت پایینی دارد. ترمیستور به صورت سری به خط ورودی منبع تغذیه متصل می شود. بنابراین، هنگامی که دستگاه روشن می شود، مقاومت بالا جریان هجومی را برای ورود به سیستم محدود می کند. با جریان مداوم، دمای ترمیستور افزایش می یابد که مقاومت را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد. از این رو، ترمیستور جریان هجومی را تثبیت می کند و به جریان ثابت اجازه می دهد تا به مدار برود.

۵-۱۰- گروه برداری در ترانس سه فاز

به‌طورکلی موازی کردن دو ترانس دارای مزیت‌های زیر است:

۱- افزایش قابلیت اطمینان (در صورت قطع یکی دیگری در مدار است)
۲- بسته به قدرت مورد نیاز، تعدادی از ترانس‌ها می‌توانند خاموش باشند بنابراین تلفات ثابت کاهش یافته و راندمان افزایش می‌یابد.
۳- تعمیر و نگه‌داری ترانس‌ها بدون قطع کل باز امکان پذیر است.
٤- به دلیل توسعه سیستم و رشد بار

برای کارکرد موازی دو ترانس تک فاز ۴ شرط زیر باید برقرار باشد:

۱- برابر بودن پلاریته ولتاژ ثانویه
۲- نسبت تبدیل برابر
۳- امپدانس معادل Z_{eq} برابر
٤- نسبت X_{eq}/R_{eq} برابر

اما در ترانس سه فاز چون فاز ولتاژ ثانویه نسبت به اولیه با توجه به نوع ترانس و سربندی آن متفاوت است، شرط برابر بودن فاز ولتاژ در ثانویه نیز به کارکرد موازی ۲ ترانس سه فاز اضافه می‌شود. اختلاف فاز یک عدد بین ۰ تا ۳۶۰ درجه است و ازآنجاکه اختلاف فاز همیشه ضرایب ۳۰ درجه است می‌توان ۳۶۰ درجه را در یک دایره به صورت ۱۲ گام ۳۰ درجه در نظر گرفت و با استفاده از ساعت‌های مختلف از ۱ تا ۱۲ بیان کرد. به همین دلیل به گروه برداری، ساعت ترانس نیز گفته می‌شود.

برای یافتن گروه برداری یا ساعت ترانس، بردار ولتاژ فشار قوی را عقربه دقیقه شمار فرض کرده و در راستای ساعت ۱۲ در نظر می‌گیریم. سپس بردار ولتاژ فشار ضعیف که ثانویه است و با آن روی یک ستون پیچیده شده است بدست می‌آوریم و عقربه ساعت شمار لحاظ می‌کنیم. ساعت بدست آمده، گروه برداری یا ساعت ترانس است که هر ساعت معادل ۳۰ درجه اختلاف فاز ولتاژ ثانویه نسبت به اولیه می‌باشد.

نکات زیر در مبحث گروه برداری مورد توجه است:

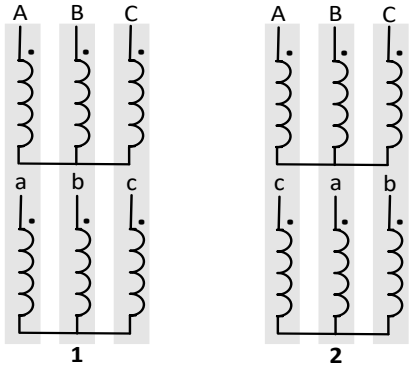
۱- گروه برداری برای ولتاژهای سه فاز متعادل تعریف می‌شود.
۲- سه بردار که نشان‌دهنده ولتاژ سه فاز هستند به‌عنوان مرجع برای ولتاژهای فاز یا خط اولیه با حروف انگلیسی بزرگ در نظر می‌گیریم و بردارهای ثانویه با حروف انگلیسی کوچک را نسبت به آنها بدست می‌آوریم.

۳- گروه برداری برای ولتاژهای فاز هم نام در اولیه و ثانویه و یا ولتاژهای خط هم نام در اولیه و ثانویه یکسان است.
٤- سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه پیچیده شده بر روی یک ستون دارای ولتاژهای موازی هم هستند (پلاریته یکسان اختلاف فاز صفر درجه و پلاریته عکس اختلاف فاز ۱۸۰ درجه دارند).
٥- گروه برداری نشان‌دهنده اختلاف فاز ولتاژ اولیه و ثانویه است.
٦- گروه برداری به صورت Xx# نوشته می‌شود، که X نوع ترانس اولیه، x نوع ترانس ثانویه و # ساعت گروه برداری است. برای مثال Yd5 اتصال اولیه ستاره، ثانویه مثلث و ساعت ۵ یعنی اختلاف فاز ۱۵۰ درجه بین اولیه و ثانویه.
۷- گروه برداری به نوع ترانس، تغییر نام‌گذاری اتصال سیم‌پیچ‌ها، تغییر پلاریته و تغییر سربندی بستگی دارد که در ادامه بررسی می‌شوند.

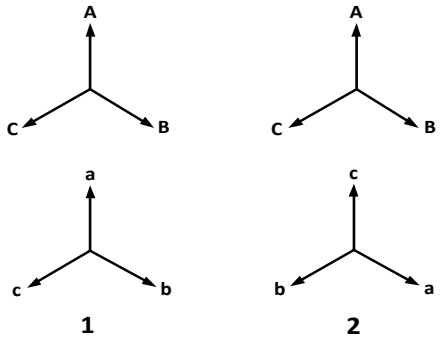
الف) اثر تغییر نام‌گذاری اتصال سیم‌پیچ‌ها در گروه برداری

وقتی نام‌گذاری سیم‌پیچ‌ها تغییر کند برای مثال فرض کنید سیم‌پیچ فاز A اولیه و فاز a ثانویه بر روی یک ستون پیچیده شده باشند. ولتاژ فاز A که در اولیه است و قبلاً با فاز a مقایسه می‌شد در حالت جدید اگر در ثانویه فاز a به‌عنوان ترمینال c در نظر گرفته شود، این بار فاز A با فاز c روی یک ستون است اما باید فاز A اولیه با a ثانویه مقایسه شود که جابجا شده است و باعث می‌شود گروه بردای تغییر کند. مثال زیر دو ترانس را برای مقایسه نشان می‌دهد که ترانس دوم تنها نام‌گذاری ثانویه آن عوض شده است.

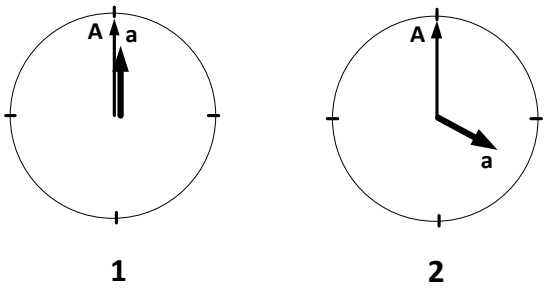
مثال ۱: گروه برداری دو ترانس زیر که اولی دارای ترتیب فاز ثانویه abc و دومی cab یعنی تنها نام‌گذاری دومی عوض شده را بدست آورید و مقایسه کنید.



برای بدست آوردن گروه برداری ابتدا یک مجموعه بردار سه فاز متعادل برای اولیه (که فرض شده فشار قوی است) با حروف ABC رسم می‌کنیم. سپس با توجه به این موضوع که ولتاژهای سیم‌پیچ‌های پیچیده شده بر روی یک ستون باهم هم‌فاز هستند (که در شکل نیز در یک راستا هستند) بردارهای متناظر با ولتاژ ثانویه یعنی abc را یک به یک موازی آنها را رسم می‌کنیم برای ترانس شماره ۱ بردار A و a، B و b، C و c باید در یک راستا باشند. برای ترانس شماره ۲ با توجه به اینکه سیم‌پیچ c و A در یک راستا هستند یعنی روی یک ستون پیچیده شده‌اند، بردار A و c، B و a، C و b باید در یک راستا باشند.

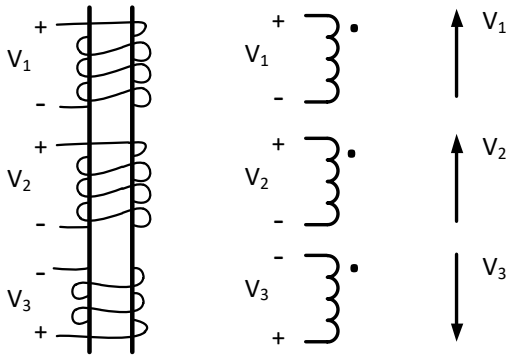


اگر بردار A و a ترانس شماره ۱ و ۲ را از یک نقطه رسم کنیم ملاحظه می‌شود که اختلاف فاز این دو بردار در ترانس اول صفر درجه و در ترانس دوم ۱۲۰ درجه است. بنابراین ساعت ترانس اول صفر یعنی Yy0 و ترانس دوم ۴ یعنی Yy4 است. که در شکل زیر نشان داده شده است.



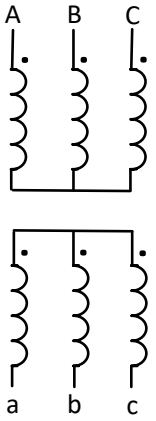
ب) اثر تغییر پلاریته در گروه برداری

ولتاژ القایی سیم‌پیچ‌هایی یکه روی یک ستون پیچیده شده‌اند یا هم‌فاز و یا در فاز مقابل (۱۸۰ درجه) هستند که به از جهت سیم‌پیچی طبق شکل زیر ناشی می‌شود. برای نشان دادن این تمایز از نقطه در مدل مداری و جهت پیکان در بردار آنها استفاده می‌شود. این اختلاف فاز در گروه برداری تأثیر داشته و در مثال بعد بررسی می‌شود.

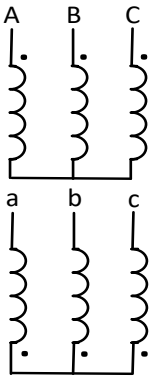


شکل ۲۲ – شکل سمت چپ سه سیم‌پیچ با جهت چرخش متفاوت بر روی یک هسته ترانس. شکل وسط مدل مداری سه سیم‌پیچ. شکل سمت راست بردار ولتاژ متناظر با آنها

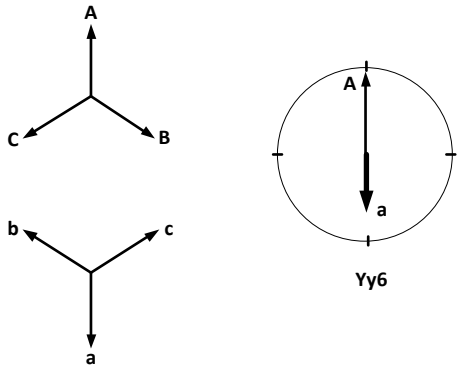
مثال: گروه برداری ترانس زیر را بدست آورید.



حل: این ترانس را به صورت زیر نیز می‌توان نمایش داد.



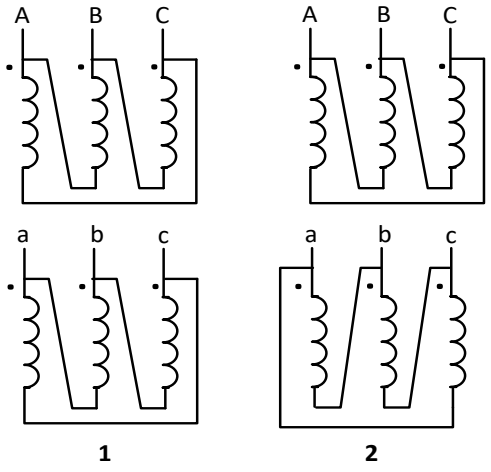
در هر دو شکل ملاحظه می‌شود که سر نقطه‌دار در محل اتصال سیم‌پیچ‌ها یعنی نقطه نول است. بنابراین ولتاژ هر فاز باید در فاز مخالف اولیه باشد که به صورت زیر خواهد بود و اگر بردار فاز A و a را در یک ساعت رسم کنیم گروه برداری یا ساعت ترانس Yy6 بدست خواهد آمد.



ج) اثر تغییر سربندی در گروه برداری

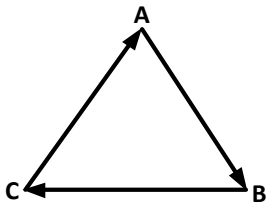
در اتصال مثلث و زیگزاگ سربندی سیم‌پیچ‌ها می‌تواند متفاوت باشد، برای مثال انتهای فاز A هم می‌تواند به B وصل شود و هم به C. بنابراین گروه برداری تفاوت خواهد داشت که در مثال‌های بعدی بررسی می‌شود.

مثال: دو ترانس زیر مشابه هستند و تنها تفاوت آنها تغییر سربندی در ثانویه است. گروه برداری آنها را بدست آورید.



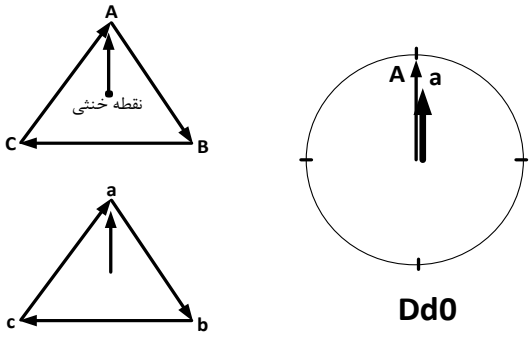
برای رسم گروه برداری در حالتی که اولیه اتصال مثلث است، باید یک مثلث که اضلاع آن نشان‌دهنده ولتاژهای خطی هستند به‌عنوان مرجع در نظر گرفته شود. جهت پیکان‌ها که همان ولتاژهای خط هستند با توجه به سربندی مثلث بدست می‌آید، یعنی طبق شکل مثلث اولیه شکل شماره یک سر نقطه‌دار بالای سیم‌پیچ است و

فاز C به انتهای سیم‌پیچ A متصل شده است پس ولتاژ CA را خواهیم داشت یعنی نوک پیکان به سمت A است. به همین ترتیب برای بردارهای بعدی از A به B و از B به C وصل شده است، بنابراین مثلث مرجع برای اولیه به صورت زیر است.



حال برای رسم بردار ثانویه سیم‌پیچ‌هایی که با اولیه بر روی یک ستون پیچیده شده‌اند (و در شکل در یک راستا هستند) هم‌فاز هستند بنابراین بردار CA و ca، AB و ab، BC و bc باید در یک راستا باشند.

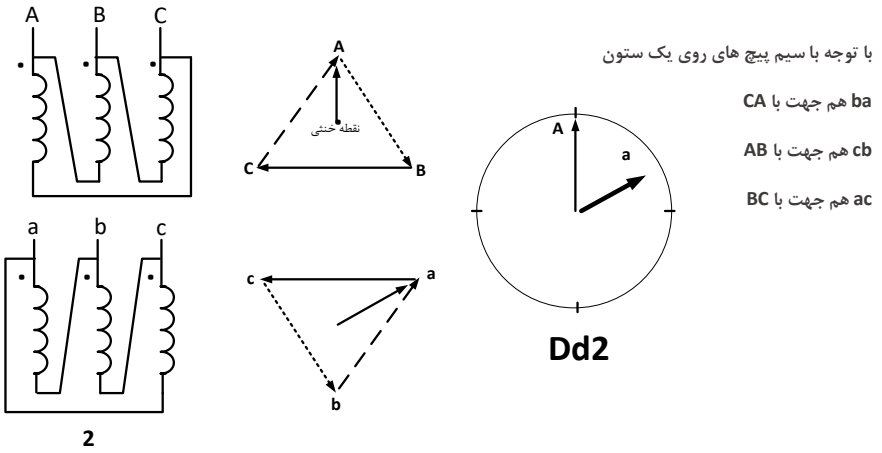
درنهایت برای رسم ساعت ترانس یک نقطه خنثی مجازی برای مثلث در نظر گرفته تا در واقع ولتاژهای فازی آن را بتوانیم بدست آوریم که بردارهای A و a هستند. این بردارها را در یکی ساعت رسم می‌کنیم تا گروه برداری بدست آید و مشاهده می‌شود ساعت صفر را نشان می‌دهد یعنی Dd0 است.



برای ترانس شماره ۲ (سمت راست):

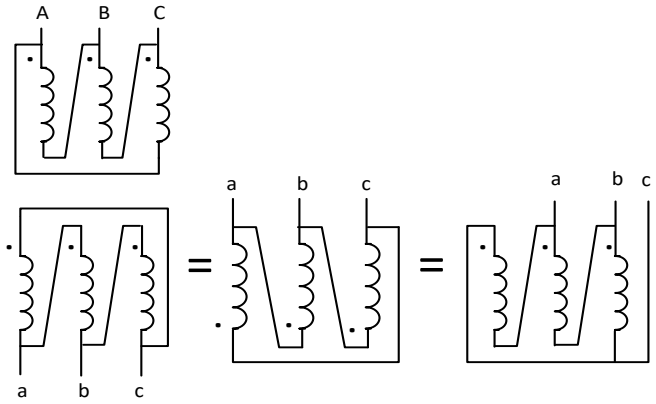
مثلث مرجع اولیه شبیه ترانس قبل است. برای رسم مثلث ثانویه طبق سربندی آن ملاحظه می‌شود، این بار b به انتهای a وصل شده و در این نوع سربندی بردار ba خواهیم داشت و چون بردار ba با CA بر روی یک ستون است هم‌راستای CA است. همچنین c به انتهای b وصل شده یعنی بردار cb خواهیم داشت که با AB روی یک ستون است و باید هم‌جهت آن باشد. به همین ترتیب a به انتهای c وصل شده است، پس بردار ac نیز با BC باید در یک راستا باشند.

درنهایت برای رسم ساعت ترانس یک نقطه خنثی مجازی برای مثلث در نظر گرفته و بردارهای A و a در یکی ساعت رسم می‌کنیم تا گروه برداری بدست آید و مشاهده می‌شود ساعت ۲ را نشان می‌دهد یعنی Dd2 است.

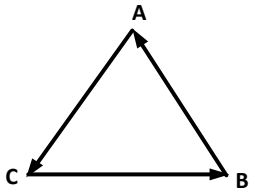


ملاحظه شد که با تغییر سربندی در اتصال مثلث گروه برداری از صفر به ۲ تغییر کرد.

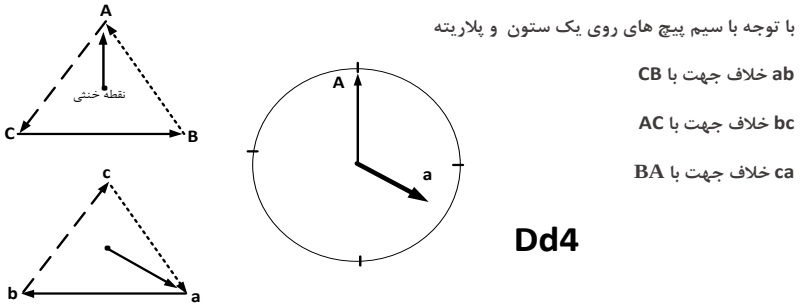
مثال۱- گروه برداری اتصالات مثلث- مثلث زیر را بدست آورید. (دقت شود که اتصالات دیگر نیز که دقیقاً همان اتصال ثانویه اما به نحو دیگر هستند نمایش داده شده‌اند.)



حل ۱- ابتدا یک مثلث مرجع برای اولیه طبق سربندی اتصالات آن رسم می‌کنیم. چون از B به A وصل شده است بردار BA و از C به B وصل شده است بردار CB و درنهایت AC خواهیم داشت که به صورت زیر خواهد بود.

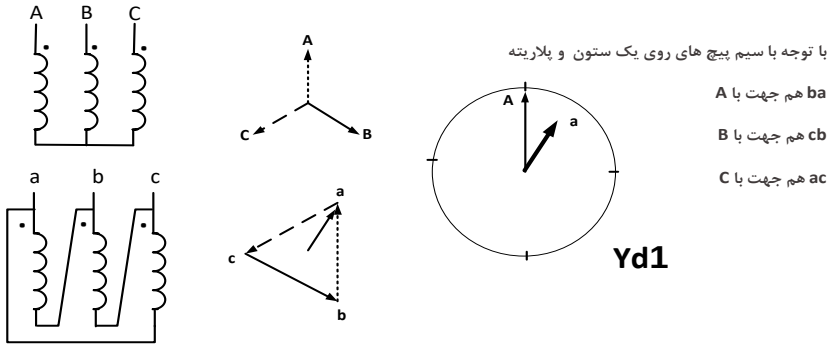


برای ثانویه چون از c به a وصل شده است بردار ca را خواهیم داشت، اما طبق شکل سر نقطه‌دار یعنی پلاریته سیم‌پیچ‌ها عکس اولیه است یعنی بردار ca ثانویه ۱۸۰ درجه اختلاف فاز با برداری دارد که روی یک ستون هستند که اینجا بردار BA است. به همین ترتیب بردار ab خلاف CB و bc خلاف AC است. در شکل زیر این بردارها نشان داده شده است و درنهایت بردار A و a از نقطه خنثی فرضی هر دو بر روی یک ساعت نمایش داده شده که ساعت ۴ را نشان می‌دهد.

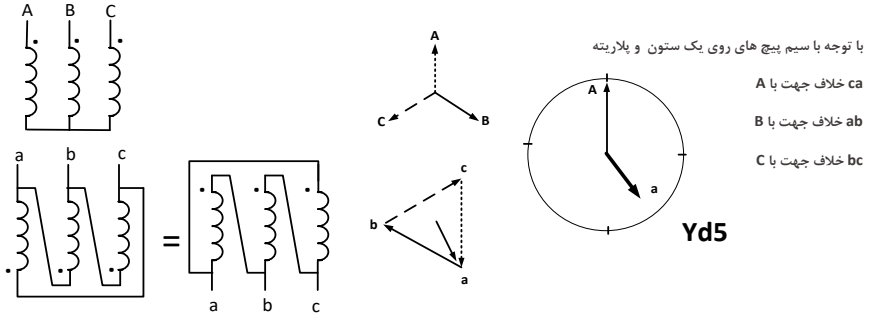


مثال- گروه برداری اتصالات ستاره- مثلث زیر را بدست آورید.

-۱

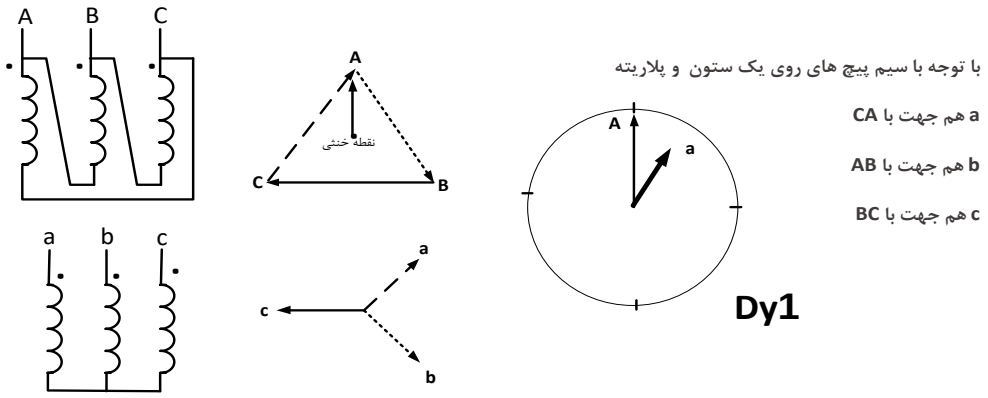


-۲

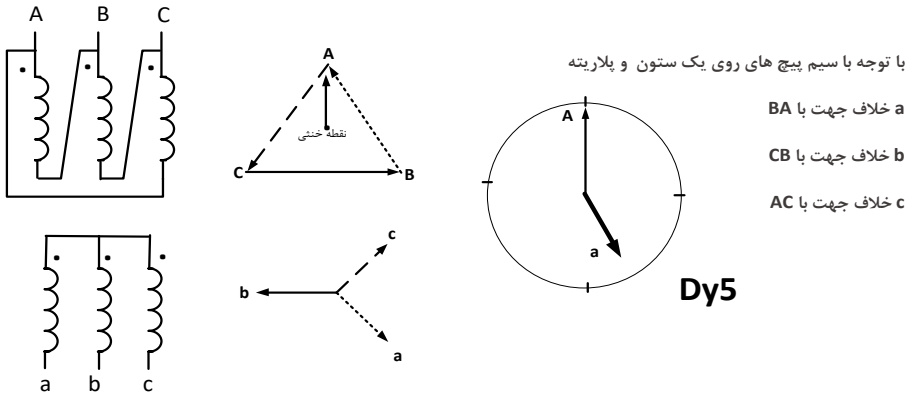


مثال- گروه برداری اتصالات مثلث- ستاره زیر را بدست آورید.

-۱



-۲



د) گروه برداری اتصال زیگزاگ

د-۱) اگر اتصال زیگزاگ در سمت ثانویه باشد (که معمولاً در عمل هم همین‌طور هست) برای بدست آوردن بردار یک فاز مثلاً فاز a باید بررسی شود که این فاز از جمع ولتاژ کدام نیم سیم‌پیچ‌ها بدست آمده است و هرکدام از این نیم سیم‌پیچ‌ها در راستای کدام ولتاژ اولیه هستند. بعد از مشخص شدن آن ساعت ترانس بدست می‌آید.

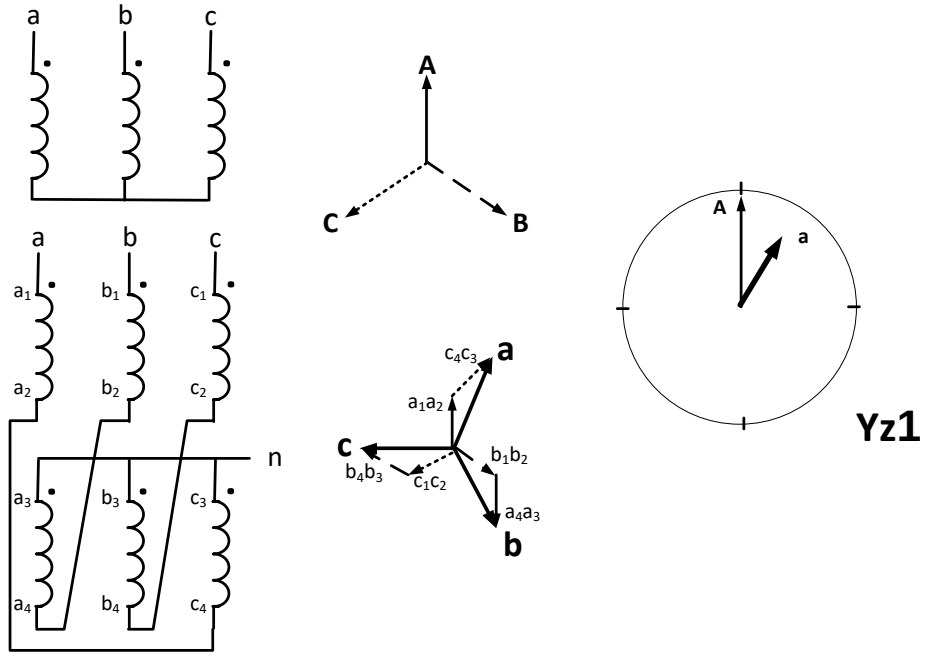
مثال۱: ترانس زیر با اتصال ستاره- زیگزاگ مفروض است گروه برداری آن را بیابید.

طبق اتصال اولیه که ستاره است یک مجموعه بردار با اختلاف ۱۲۰ با نام‌های A، B وC برای اولیه رسم می‌کنیم. برای ثانویه نیز باید بررسی شود کدام نیم سیم‌پیچ با کدام فاز اولیه در یک راستا یا در فاز مقابل است و هر فاز ثانویه از برآیند بردارهای نیم سیم‌پیچ‌های آن بدست می‌آید. با توجه با سیم‌پیچ‌های روی یک ستون و پلاریته آنها داریم:

a_1a_2 هم‌جهت با A و c_4c_3 خلاف جهت با C که برآیند این دو a می‌شود.

b_1b_2 هم‌جهت با B و a_4a_3 خلاف جهت با A که برآیند این دو b می‌شود.

c_1c_2 هم‌جهت با C و b_4b_3 خلاف جهت با B که برآیند این دو c می‌شود.



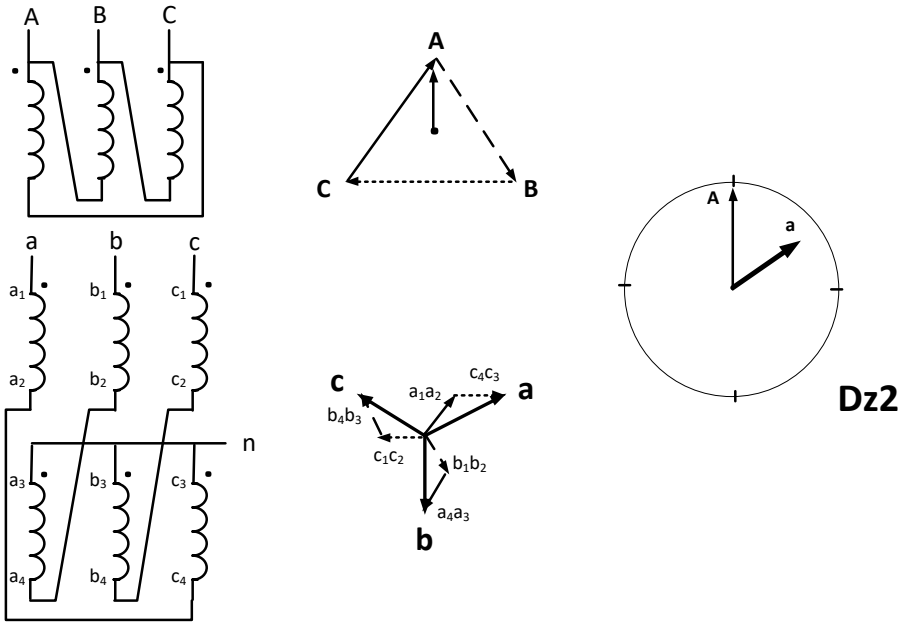
مثال۲: ترانس زیر با اتصال مثلث- زیگزاگ مفروض است گروه برداری آن را بیابید.

یک مثلث مرجع برای اولیه رسم می‌کنیم. چون C به A وصل شده است بردار CA داریم که جهت پیکان را نشان می‌دهد سایر پیکان‌ها به همین ترتیب بدست می‌آید. ثانویه نیز به صورت زیر خواهد بود:

a_1a_2 هم‌جهت با CA و c_4c_3 خلاف جهت با BC که برآیند این دو a می‌شود.

b_1b_2 هم‌جهت با AB و a_4a_3 خلاف جهت با CA که برآیند این دو b می‌شود.

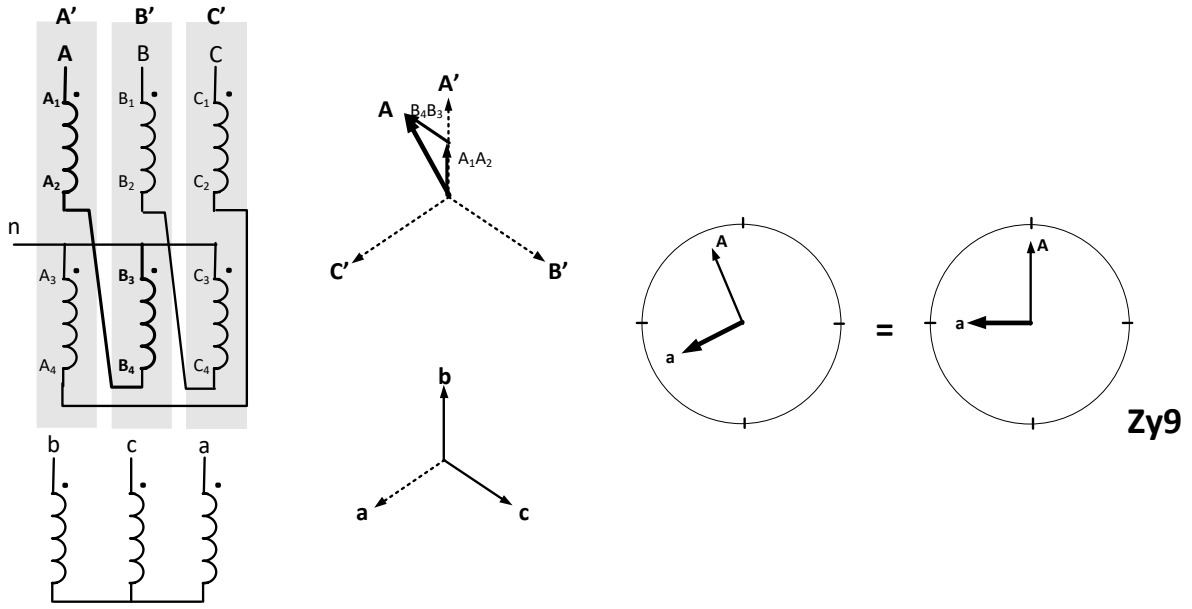
c_1c_2 هم‌جهت با BC و b_4b_3 خلاف جهت با AB که برآیند این دو c می‌شود.



د-۲) اگر اتصال زیگزاگ در سمت اولیه باشد: یک دسته بردار با نام‌های A’، B’ و C’ با اختلاف فـاز ۱۲۰ درجه به‌عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شود و بردار هر فاز مثلاً فاز A از برآیند بردار دو نیم سـیم‌پـیچ تشـکیل دهنده آن بدست می‌آید و این بردار بر روی ساعت ۱۲ به‌عنوان عقربه دقیقه شمار فرض می‌شود در صورتی کـه ممکن است بر روی ۱۲ نباشد و درنهایت اختلاف آن با عقربه ساعت شمار لحاظ شده و سـاعت تـرانس بدسـت خواهد آمد.

مثال: گروه برداری اتصال زیگزاگ- ستاره زیر را بیابید.

بردارهای مرجع را با نام‌های A’، B’ و C’ در نظر می‌گیریم. بردار فاز A اولیه از برآیند ولتاژ دو نیم سـیم‌پـیچ A_1A_2 و B_4B_3 بدست می‌آید که اولی در جهت A’ و دومی خلاف جهت B’ است. بردار بدست آمـده فـاز A اولیه است که باید بر روی ساعت ۱۲ باشد. برای بدست آوردن بردار a ثانویه، مشاهده می‌شود که این بـردار در راستای ستون سوم اولیه است و باید با آن هم‌فاز باشد یعنی با C’ هم‌فاز است. درنهایت با رسم بردارهای فاز A اولیه و فاز a ثانویه ساعت ترانس به صورت زیر بدست می‌آید.



توجه: در بحث گروه برداری ۲ حالت وجود دارد:

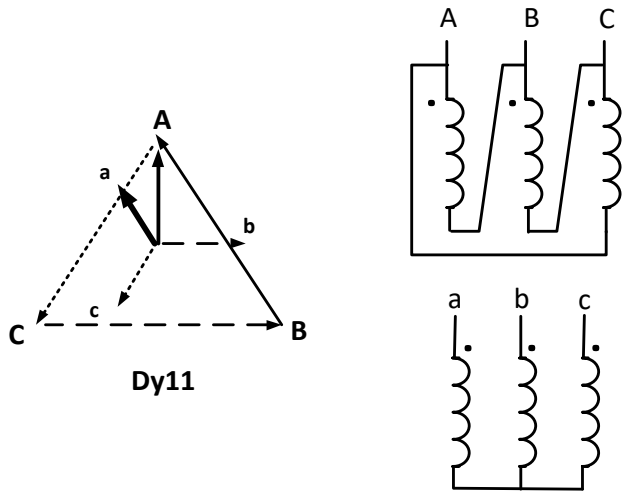
۱- اتصالات ترانس معلوم و گروه برداری مجهول باشد که در این حالت جواب منحصربه‌فرد خواهیم داشت.

۲- گروه برداری معلوم و اتصالات مجهول باشد که ممکن است بیش از یک جواب داشته باشد و بستگی فرض‌های انجام شده برای اتصالات اولیه دارد.

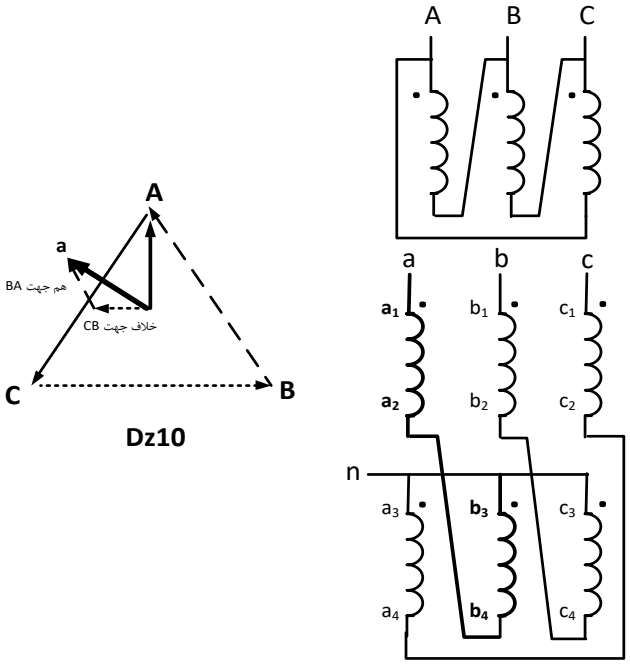
برای حل سؤال در این حالت ابتدا بردارهای اولیه را رسم می‌کنیم سپس بردارهای ثانویه را طوری روی همان شکل می‌کشیم که بردارهای A و a ساعت مورد نظر را بسازد. حال با توجه به اینکه کدام بردارها با یکدیگر موازی هستند اتصالات را بدست می‌آوریم.

مثال: گروه برداری Dy11 و Dz10 مفروض است، اتصالات ترانس را بدست آورید.

Dy11: اتصال اولیه مثلث است بنابراین یک مثلث مرجع برای اولیه رسم می‌کنیم. جهت بردارهای ولتاژهای خطی اختیاری است یعنی هم می‌توانیم بردار AB داشته باشیم و هم BA. برای حالت اول A به انتهای B وصل می‌شود و برای حالت دوم برعکس. در اینجا حالت دوم لحاظ می‌شود. سپس یک مجموعه بردار برای اتصال ستاره به صورتی روی همان شکل رسم می‌شود که بردارهای A و a ساعت ۱۱ را نشان دهد. درنهایت با توجه به هم‌راستا بودن بردارها اتصالات مشخص می‌شود. یعنی در این مثال a هم‌جهت با BA، b هم‌جهت با CB، c هم‌جهت با AC است، که اتصالات به صورت زیر خواهد بود.



Dz10: اتصال اولیه مثلث است بنابراین یک مثلث مرجع برای اولیه رسم می‌کنیم. جهت بردارهای ولتاژهای خطی BA، AC و CB در نظر گرفته می‌شود و اتصالت مثلث اولیه بر این اساس رسم می‌شود. سپس بردار aچنان رسم می‌شود که با A اولیه ساعت ۱۰ را نشان دهد. ملاحظه می‌شود بردار a از برآیند دو نیم بردار AB و CB– بدست می‌آید. یعنی یک نیم سیم‌پیچ فاز a ثانویه (a_1a_2) در راستای AB و نیم سیم‌پیچ دیگر (b_4b_3) خلاف اتصال CB اولیه است (سرنقطه‌دار مخالف آن است). با این مفروضات ثانویه که اتصال زیگزاگ است قابل رسم است.



۵-۱۱- موازی کردن ترانس‌های سه فاز با گروه برداری متفاوت

علاوه بر ۴ شرط موازی کردن ترانس‌های تکفاز، در ترانس‌های سه فاز باید گروه بردای دو ترانس برای کارکرد موازی مشابه باشد. در برخی ترانس‌ها با گروه برداری متفاوت، می‌توان با تغییراتی گروه برداری را یکسان کرده و دو ترانس عملکرد موازی داشته باشند.

از نظر گروه برداری مطابق استانداردهای بین‌المللی (IEC76-4) ترانس‌های سه فاز به چهار دسته تقسیم می‌شوند:

۱- دسته اول با گروه برداری ۴-۸-۱۲
۲- دسته دوم با گروه برداری ۲-۶-۱۰
۳- دسته سوم با گروه برداری ۱-۵-۹
۴- دسته چهارم با گروه برداری ۳-۷-۱۱

برای موازی کردن:

۱- ترانس‌های هر دسته با یکدیگر قابل موازی شدن هستند.
۲- ترانس‌های دسته اول و دوم با هیچ دسته‌ای قابل موازی شدن نیستند.
۳- ترانس‌های دسته سوم و چهارم با یکدیگر قابل موازی شدن هستند.

نکات زیر برای موازی کردن برخی ترانس‌ها با گروه برداری متفاوت مورد توجه است:

۱- ترانس با گروه برداری x در توالی مثبت دارای گروه برداری 12-x در توالی منفی است. ترانس‌های دسته سوم و چهارم با این تغییر قابل موازی شدن می‌شوند.
۲- اگر نام‌گذاری فازها عوض شود، ترانس با گروه برداری x به x+4 و یا x-4 تبدیل می‌شود. ترانس‌های هر دسته با این کار قابل موازی شدن با یکدیگر هستند چون این کار ۴ ساعت تغییر ایجاد می‌کند.

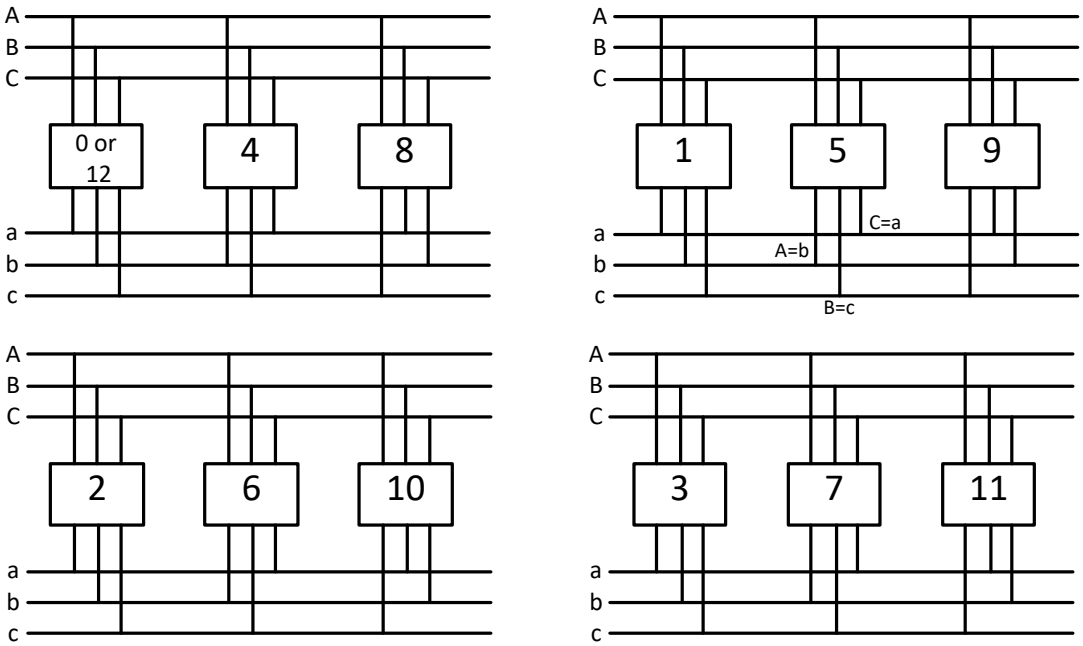
- **موازی کردن با تغییر نام‌گذاری**

برای جابجا کردن گروه برداری ترانس به اندازه ۴ ساعت کافیست ثانویه آن را به‌جای abc، bca در نظر گرفته و به ترانس دیگر وصل کنیم، با این کار ۴ ساعت گروه برداری به عقب رفته یعنی می‌توان ترانس با ساعت ۵ را با

ترانس با ساعت ۱ موازی کرد. برای به عقب بردن گروه برداری به اندازه ۴ ساعت فازهای آن به فاز با نام بعدی (نام بعد از a حرف b و بعد از b حرف c و نام بعد از c حرف a است.) ترانس دیگر وصل می‌شوند، یعنی فاز a ترانس با ساعت ۵ را به فاز b ترانس با ساعت ۱، فاز b آن را به فاز c ترانس با ساعت ۱ و فاز c آن را به فاز a ترانس با ساعت ۱وصل کنیم.

یا اینکه به‌جای abc، cab در نظر بگیریم که گروه برداری را ۴ ساعت به جلو برده و اگر این کار را برای ترانس با گروه برداری ۱ انجام دهیم می‌توانیم آن را می‌توانیم با ترانس با گروه برداری ۵ موازی کنیم. برای به جلو بردن گروه برداری به اندازه ۴ ساعت فازهای آن به فاز با نام قبلی ترانس دیگر وصل می‌شوند، یعنی فاز a ترانس با ساعت ۱ را به فاز c ترانس با ساعت ۵، فاز b آن را به فاز a ترانس با ساعت ۵ و فاز c را به فاز b ترانس با ساعت ۵ وصل کنیم. در شکل زیر همه ترانس‌هایی که با یکدیگر ۴ ساعت اختلاف دارند آورده شده و با استفاده از تغییر نام‌گذاری اتصال موازی آنها به یکدیگر نشان داده شده است.

در شکل‌های زیر ترانس‌هایی که با این روش موازی می‌شوند نشان داده شده و سربندی آنها انجام شده است.

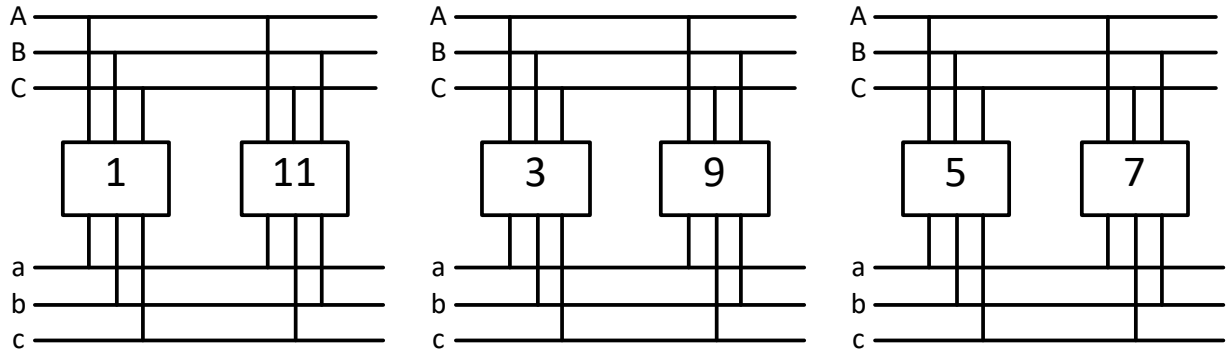


- **موازی کردن با تغییر توالی**

برای جابجا کردن دو فاز در اولیه و ثانویه یک ترانس گروه برداری ترانس آن از x به 12-x تغییر می‌کند. یعنی کافیست اولیه و ثانویه آن را به‌جای abc، bac در نظر گرفته و به ترانس دیگر وصل کنیم. یعنی می‌توان ترانس

با ساعت 11 را با ترانس با ساعت ۱ موازی کرد. یعنی جای فازهای a و b را هم در اولیه و هم در ثانویه باید عوض شود.

در شکل‌های زیر ترانس‌هایی که با این روش موازی می‌شوند نشان داده شده و سربندی آنها انجام شده است.



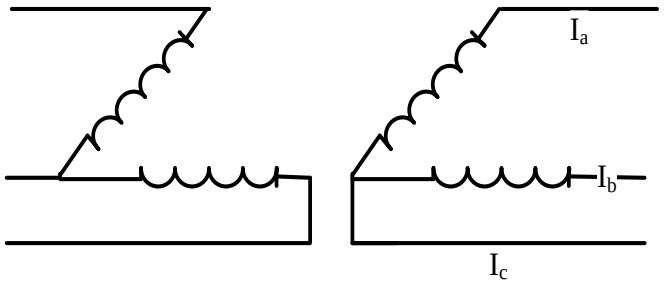
نکته مهم: به نظر می‌رسد ترانس‌های دسته اول ۴-۸-۱۲ و دسته دوم ۲-۶-۱۰ با توجه به اینکه با یکدیگر ۶ ساعت یا ۱۸۰ درجه اختلاف فاز دارند را می‌توان موازی کرد. در حالت کلی این کار را زمانی می‌توان انجام داد که هر ۱۲ سر سیم‌پیچ‌های ترانس در دسترس باشد. اما اگر تنها ۶ سر در دسترس باشد نمی‌توان تنها با تغییر اتصالات خارجی این کار را انجام داد.

۵-۱۲- اتصالات خاص

علاوه بر اتصال ستاره، مثلث و زیگزاگ اتصالات دیگری نیز وجود دارد که کاربرد کمتری خصوصاً در سیستم قدرت و برق‌رسانی دارند که در اینجا به دو نمونه اشاره می‌شود.

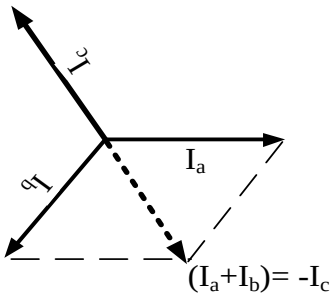
۱- اتصال مثلث باز یا V-V

در صورت معیوب شدن یک فاز اتصال مثلث باز یا V-V حاصل می‌شود. در این شرایط توان کماکان انتقال می‌یابد اما حدود ۴۳ درصد کاهش خواهد داشت. در شکل زیر این اتصال نشان داده شده است.



شکل (۵-۲۴): اتصال مثلث باز یا V-V

در صورت قطع شدن یک فاز مثلث جریان یک سیم‌پیچ صفر می‌شود اما جریان خط در این حالت همان جریان فاز خواهد بود. به‌عبارت‌دیگر به‌جای اینکه جریان خط رادیکال ۳ برابر جریان فاز باشد در این اتصال جریان خط برابر جریان فاز است. در شکل بالا به‌وضوح مشخص است که جریان خط اول و دوم همان Ia و Ib است و جریان خط سوم نیز منفی برآیند این دو است که دقیقاً با هرکدام از لحاظ اندازه برابر و ۱۲۰ درجه اختلاف فاز دارد که در شکل زیر نشان داده شده است.



اما همان‌طور که گفته شد توان انتقالی در این حالت نسبت به اتصال مثلث- مثلث کاهش می‌یابد چون جریان خط برابر با جریان فاز می‌شود و همچنین ضریب بهره‌برداری نیز کمتر از ۱ خواهد شد که در زیر محاسبه شده‌اند.

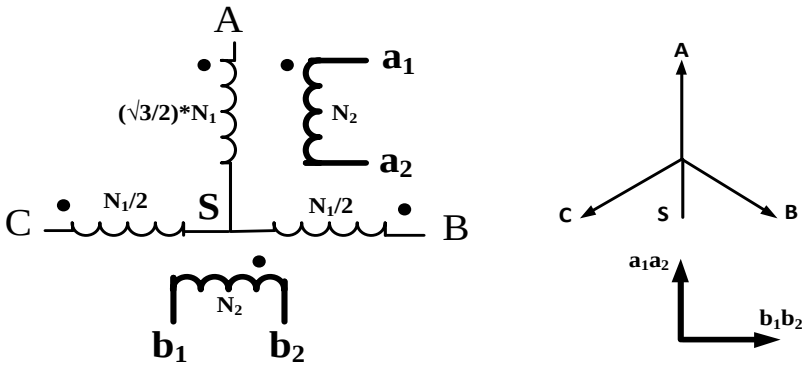
$$\frac{S_{vv}}{S_{\Delta\Delta}} = \frac{\sqrt{3}\times V_{ph}\times I_{ph}}{\sqrt{3}\times V_{ph}\times\sqrt{3}\times I_{ph}} = 0.57$$

$$\text{ضریب بهره‌برداری } (\beta) = \frac{\text{قدرت قابل انتقال}}{\text{مجموع قدرت سیم پیچ ها = قدرت نصب شده یا هزینه شده}}$$

$$\beta_{vv} = \frac{\sqrt{3}\times V_{ph}\times I_{ph}}{2\times V_{ph}\times I_{ph}} = 0.86$$

۲- اتصال اسکات یا T

این اتصال برای تولید ولتاژ ۲ فاز متقارن یعنی اندازه ولتاژ در ثانویه برای هر فاز برابر و اختلاف زاویه ۹۰ درجه استفاده می‌شود. این ترانس در اولیه باید دارای سر وسط باشد. در این ترانس یک ولتاژ سه فاز ABC به اولیه اعمال می‌شود.



شکل (۵-۲۴): اتصال اسکات یا T

اتصال اولیه به صورت T بوده که دو سیم‌پیچ آن دارای تعداد دور $N_1/2$ و دیگری دارای تعداد دور $(\sqrt{3}/2)*N_1$ یعنی حدود $0.85\ N_1$ است. ثانویه نیز دارای دو سیم‌پیچ مجزا با ترمینال‌های a_1a_2 و b_1b_2 است که تعداد دور هرکدام N_2 می‌باشد. با استفاده از اثبات زیر نشان خواهیم داد که ثانویه ولتاژ ۲ فاز با اختلاف ۹۰ درجه ایجاد می‌کند.

$$V_{AS} = V_{AB} \times \cos\frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_L$$

$$V_{a1a2} = \frac{N_2}{\frac{\sqrt{3}}{2} N_1} V_{AS} = \frac{N_2}{N_1} \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{3}}{2} V_L = \frac{N_2}{N_1} V_L$$

$$V_{b1b2} = \frac{N_2}{N_1} V_{BC} = \frac{N_2}{N_1} V_L$$

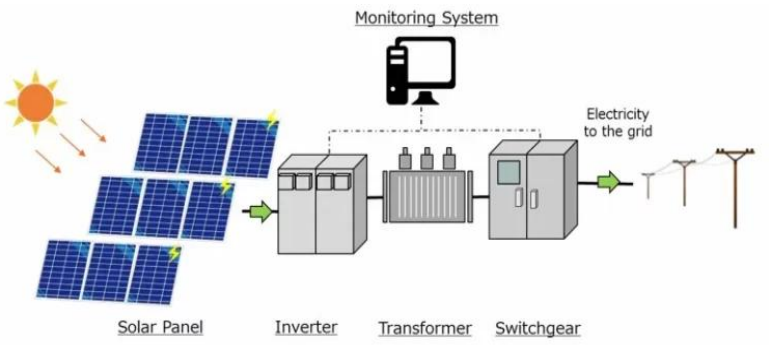
ملاحظه می‌شود که اندازه V_{a1a2} و V_{b1b2} باهم برابر است و ازآنجاکه V_{AS} بر V_{BC} عمود است ولتاژهای متناظر با آنها نیز ۹۰ درجه اختلاف دارند که همان ولتاژ ثانویه است.

$$V_{a1a2} = \frac{N_2}{N_1} V_L \prec 0$$

$$V_{b1b2} = \frac{N_2}{N_1} V_L \prec -90$$

۵-۱۳- ترانسفورماتور سیستمهای خورشیدی متصل به شبکه

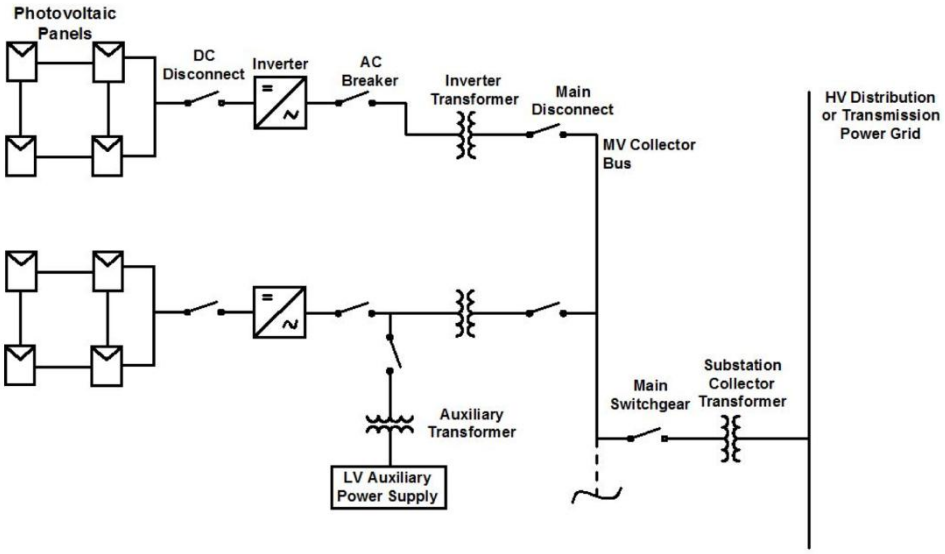
انواع مختلفی از ترانسفورماتورها می توانند بخشی از سیستم تولید برق خورشیدی باشند: ترانسفورماتورهای اینورتر، ترانسفورماتورهای قدرت کمکی و ترانسفورماتورهای پست. این بخش عمدتاً بر روی ترانسفورماتورهای اینورتر متمرکز شده است که میتواند از نوع غوطه ور در مایع یا خشک باشد. تولید برق فتوولتائیک از صفحات خورشیدی متشکل از رشته‌ای از ماژول‌های فتوولتائیک ساخته شده از سیلیکون، استفاده می‌کند. ماژول‌های فتوولتائیک معمولاً می‌توانند یک ولتاژ DC تا ۱۱۰۰ ولت تولید کنند. سپس ولتاژ DC تولید شده با استفاده از یک اینورتر سه فاز یا چند میکرو اینورتر تک فاز به ولتاژ ac سه فاز تبدیل می شود. ولتاژ ac خروجی اینورتر ۵۰ هرتز یا ۶۰ هرتز توسط اینورتر دیکته می شود. (عملکرد موازی چندین اینورتر متصل به یک سیم پیچ LV معمولاً با اینورترهای kVA بزرگ استفاده نمی شود.) اینورتر متعاقباً به ترانسفورماتور اینورتر سیستم فتوولتائیک متصل می شود. این ترانسفورماتور گاهی اوقات ترانسفورماتور ولتاژ متوسط (MV) نیز نامیده می شود.



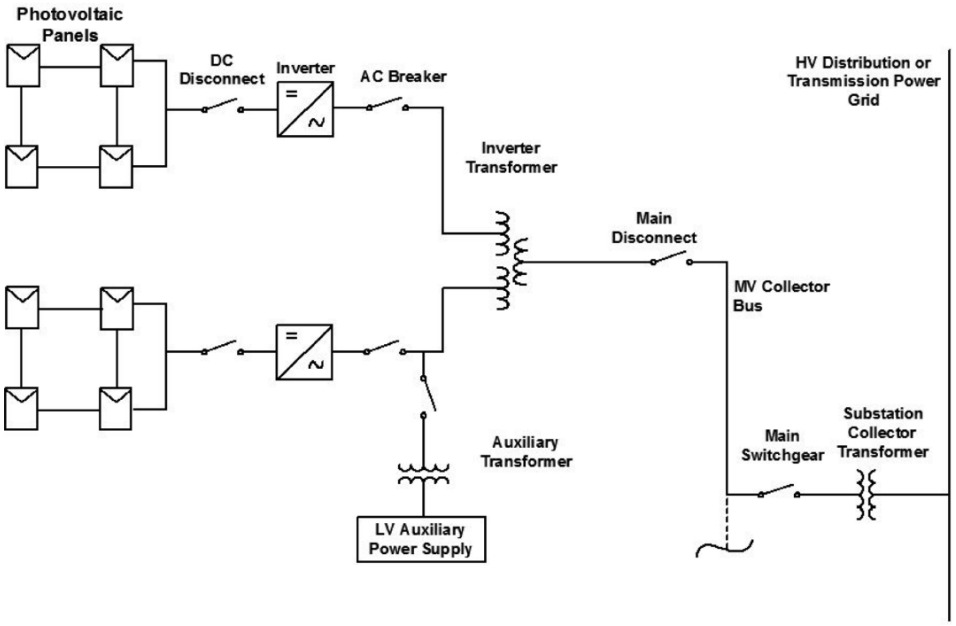
شکل (۵-۲۵): ترانسفورماتور خورشیدی

ترانسفورماتور اینورتر در درجه اول به عنوان یک ترانسفورماتور افزاینده استفاده می شود که ولتاژ ورودی را در محدوده ۳۶ کیلو ولت یا بالاتر در صورت تغییر میدهد. ولتاژ خروجی ترانسفورماتور اینورتر بیشتر به یک شین جمع کننده تامین می شود که می تواند بار مناسبی را بر روی سیستم توزیع تغذیه کند یا به ترانسفورماتور پست در پست برق متصل شود که خروجی توان چندین منبع را ترکیب می کند و ولتاژ را تا بار محلی، توزیع یا سطح انتقال بالا می برد. ترانسفورماتور پست معمولاً دارای توان اسمی در محدوده ۲۰ MVA تا ۴۰ MVA با ولتاژ بالا در سطح شبکه مربوطه است، با این حال، نیروگاه های فتوولتائیک در مقیاس بزرگ ممکن است به ترانسفورماتور پست بزرگتر (تا چند صد MVA) نیاز داشته باشند. شکل ۱ و شکل ۲ فرآیند تبدیل انرژی

خورشیدی به برق متناوب قابل استفاده و قابل انتقال را به ترتیب با استفاده از ترانسفورماتورهای دو سیم پیچ یا سه سیم پیچ نشان می دهند.



شکل (۵-۲۶): استفاده از ترانسفورماتورهای دو سیم پیچه بعد از اینورتر



شکل (۵-۲۷): استفاده از ترانسفورماتورهای سه سیم پیچه بعد از اینورتر

به دلایل اقتصادی، هزینه های سرمایه ای مرتبط و نیازهای فضای محدود، بسیاری از سیستمهای خورشیدی از جفت اینورتر برای تغذیه یک ترانسفورماتور اینورتر چند سیم پیچ همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است

استفاده می کنند. البته ولتاژ نامتعادل از اینورترها می تواند باعث گرم شدن هسته یا سیم پیچ، نویز بیش از حد هسته و اشباع هسته احتمالی شود، در نتیجه جریان تحریک و دمای هسته را افزایش می دهد.

اتصال سیم پیچ و گروه برداری

عملکرد اینورتر تحت تأثیر گروه بردار ترانسفورماتور اینورتر قرار نمی گیرد (Dy1، Dy5 یا Dy11 تفاوتی نخواهد داشت). اتصال خنثی در سمت اولیه (LV) ترانسفورماتور مورد نیاز نیست. اگر یک نقطه خنثی از سیم پیچ اولیه (LV) موجود باشد، توصیه می شود که این نقطه خنثی نه به زمین متصل شود و نه به سایر نقاط زمین متصل شود. در سمت ثانویه (HV)، ترانسفورماتور اینورتر می تواند یک نقطه خنثی ایزوله یا زمین داشته باشد. به عنوان مثال، نمودارهای اتصال سیم پیچ و گروه های برداری زیر را می توان استفاده کرد.

طراحی دو سیم پیچ - Dy1، YNd1، YNy0.

طراحی سه سیم پیچ - Dy1y1، YNd1d1، YNy0y0.

در ترانسفورماتور سه سیم پیچ، توصیه می شود ولتاژهای اولیه و جریان های تحریک مربوطه هر دو سیم پیچ LV با یکدیگر هم فاز باشند، بنابراین فقط می توان از نمودارهای اتصال سیم پیچ یکسان برای دو سیم پیچ LV (۲ "Y" یا ۲ "D") استفاده کرد.

هارمونیک و تلفات

بسته به نوع اینورتر، مقدار جریان هارمونیکی معمولی کمتر از ۵٪ است. هارمونیک نسبتا پایین در سیستم تولید برق خورشیدی به دلیل فیلتر ارائه شده در اینورترها برای برآوردن الزامات اتصال است. فرکانس سوئیچینگ نسبتاً بالای اینورترهای مدرن نیازمند فیلترهای نسبتاً کوچکی برای دستیابی به اعوجاج خروجی هارمونیک پایین است. با این حال، اتصال اینورتر-ترانسفورماتور و رزونانس‌ها در سیستم هارمونیک‌هایی با دامنه‌ها و فرکانس‌هایی ایجاد میکند که می‌تواند برای ترانسفورماتور مخرب باشد، برای مثال، بالاتر از حداکثر جریان هارمونیک توصیه شده طبق استاندارد IEEE Std 1547 که در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۱- هارمونیک های مجاز ترانس سه سیم پیچه

Individual harmonic order h (odd harmonics)[a]	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	Total demand distortion (TDD)
Percent (%)	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0

در ترانسفورماتورهای سه سیم پیچ، که در آن هر یک از دو سیم پیچ LV توسط اینورتر اختصاصی جداگانه تغذیه می شود، اثر رزونانس می تواند در صورتی رخ دهد که زمان عملکرد سوئیچینگ ترانزیستور آن اینورترها هماهنگ نباشد. اگر احتمال چنین ناهمزمانی سوئیچینگی وجود دارد، توصیه می شود برای جلوگیری از اثرات مخرب ارزیابی و هارمونیک باید در مشخصات ترانسفورماتور برای در نظر گرفتن طراحی ترانسفورماتور گنجانده شود.

جریان های گردابی و تلفات در هر ترانسفورماتور وجود دارد. سهم عمده تلفات ناشی از جریان های فرکانس اساسی است، اما تلفات می تواند در حضور هارمونیک ها افزایش یابد. اگر اینورتر تغذیه کننده به ترانسفورماتور بیش از سطح استاندارد هارمونیک تولید کند، تلفات افزایش می یابد. تأثیر این افزایش تلفات بار بر راندمان معمولاً نگران کننده نیست. نگرانی بسیار بیشتر، افزایش احتمالی دمای نقطه داغ سیم پیچ و نقاط داغ در قطعات فلزی است. افزایش نقاط داغ می تواند عمر ترانسفورماتور را کاهش دهد. گرمای بیش از حد موضعی میتواند منجر به خرابی فاجعه بار ترانسفورماتور شود. افزایش توان ترانسفورماتور تلفات بار در جریان نامی را کاهش می دهد و ممکن است دماهای کاری بالاتری را که در این شرایط رخ می دهد جبران کند. توجه ویژه به تلفات در پیکربندی های چند سیم پیچه در صورت وجود هر گونه تفاوت محسوس در بار بین سیم پیچ های LV مورد نیاز است.

۵-۱۴- تپ چنجر Tap Changer

وقتی بار گذاری افزایش می‌یابد ولتاژ افت می‌کند. برای بازگرداندن ولتاژ به مقدار نامی، ولتاژ ثانویه ترانس اگر افزایش یابد ولتاژ بار نیز افزایش خواهد داشت. با تغییر تعداد دور سیم پیچ در ترانسفورماتورها می توان ولتاژ خروجی را تنظیم نمود. این کار را در ترانسفورماتورها، تپ چنجرها به عهده دارند. معمولاً تپ چنجرها بر روی سیم پیچی که از نظر اقتصادی و فنی مقرون به صرفه باشد قرار می گیرند: بروی اتصال ستاره چون ولتاژ سیم پیچ‌ها از ولتاژ خط کمتر است و یا سمت فشار قوی که جریان کمتر است.

تپ چنجرها بر حسب نوع کار به دو دسته قابل تغییر زیر بار (On Load) و غیر قابل تغییر در زیر بار (Off Load) تقسیم می‌شوند.

تپ چنجر های غیر قابل تغییر زیر بار دارای ساختمان ساده ای بوده و جهت تغییر آن حتماً باید ترانس قدرت را از مدار خارج نمود. تغییرات این نوع تپ چنجر ها معمولاً با توجه به نیاز و متناسب با نوسانات بار در فصول مختلف سال انجام می گیرد.

تپ چنجر های قابل تغییر زیر بار از چند قسمت مختلف تشکیل شده اند :

۱- Motor Drive : جعبه موتور بروی بدنه ترانسفورماتور نصب است و حرکت موتور آن به جعبه دنده و از آنجا به قسمت دیگر تپ چنجر منتقل می‌شود. به منظور تنظیم تپ ها و تغییر در گردش موتور و سیستمهای کنترل از راه دور و دادن فرامین از دور و نزدیک و قرائت مقدار تپ در داخل این جعبه اداوات مختلفی نصب گردیده همچون کنتاکتور ها، سوئیچ‌های محدود کننده، بی‌متال، رله کنترل فاز، نشان‌دهنده‌ها، جعبه دنده و...

۲- مکانیزم انتقال حرکت : حرکت موتور چه در جهت کاهش دور سیم پیچ و چه در جهت افزایش دور پس از موتور به جعبه دنده ها و از آنجا توسط محورهای رابط به قسمت داخلی مکانیزم تغییر تپ، منتقل می‌شود.

۳- Switch Diverter : کلید برگردان، مکانیزمی است که محرک اصلی آن قدرت فنری است که در آن تعبیه شده است و در محفظه حاوی روغن ترانس (که البته با روغن تانک اصلی در ترانس ایزوله است) قرار دارد.

۴- Tap Selector : کلید انتخاب تپ، در قسمت زیرین محفظه کلید برگردان قرار دارد و از تعدادی کنتاکت لغزشی تشکیل شده است.

- **انواع تپ چنجر on load عبارتند از:**

الف- تپ چنجر از نوع سلکتور سوئیچ (selector switch) که در آن دایورتر و تپ سلکتور بصورت کمپاکت در داخل مخزن تپ چنجر قرار دارند. این نوع تپ چنجر برای ولتاژهای تا ۱۴۵ کیلوولت بصورت اتصال ستاره یا مثلث و جریان ۷۰۰ آمپر طراحی و مورد استفاده قرارمی‌گیرند. در ایران این نوع تپ‌چنجرها برای ترانسفورماتورهای با ولتاژ سمت فشار قوی ۶۳ کیلوولت و در تحت شرایطی در ۱۳۲ کیلوولت مورد استفاده می-باشند.

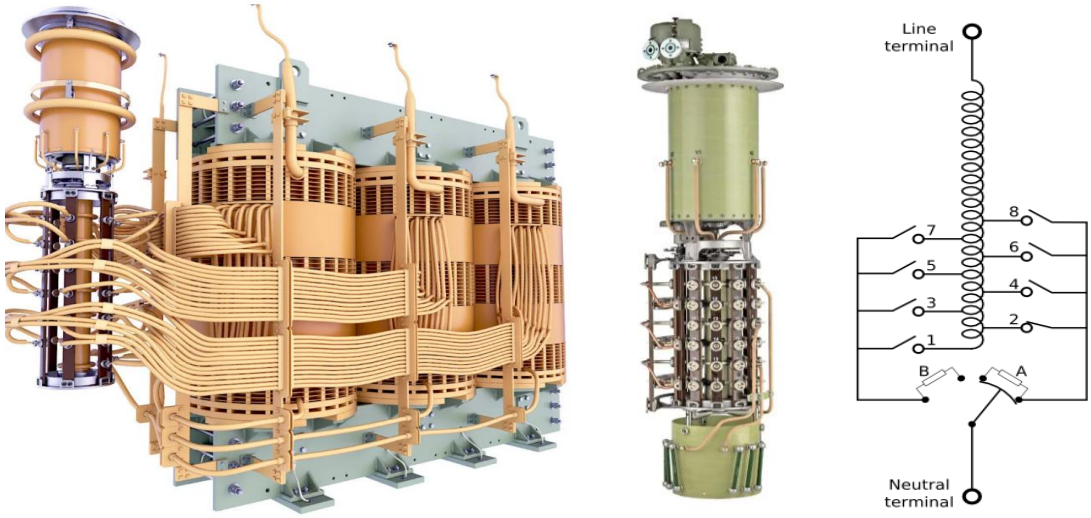
ب- تپ چنجر از نوع تپ سلکتور- دایورتر (Tap selector – Diverter) که در این نوع دایورتر سوئیچ به صورت مستقل در داخل مخزن روغن جداگانه ای که از روغن ترانسفورماتور کاملاً مجزا است قرار دارد. در این نوع تپ چنجر سلکتور از دایورتر کاملا جدا و در داخل روغن ترانسفورماتور است. این نوع تپ چنجرها برای ولتاژهای تا ۴۲۰ کیلوولت و جریانهای تا ۴۵۰۰ آمپر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- **نحوه عملکرد تپ چنجر**

برای عملکرد تپ چنجر و تغییر وضعیت تپ ها و به دنبال آن تغییر نسبت تبدیل ترانسفورماتور و افزایش و یا کاهش ولتاژ شبکه ابتدا فرمان لازم بصورت محلی یا از راه دور بنا به تشخیص رگلاتور ولتاژ (AVR) و یا

تصمیم اپراتور به موتور درایو داده می‌شود. این فرمان از طریق محورهای عمودی و افقی و جعبه دنده های مربوطه به تپ سلکتور (یا سلکتور سوئیچ) منتقل می‌گردد. پس از انتخاب تپ مورد نظر توسط تپ سلکتور که در شرایط بدون بار انجام می‌شود دایورتر سوئیچ نسبت به انتقال جریان از یک تپ به تپ بعدی عمل می‌نماید. زمان کل عملکرد تپ چنجر معمولاً" از ۳ الی ۵/۵ ثانیه میباشد که از این زمان فقط در حدود ۴۰ تا ۱۸۰ میلی ثانیه آن که بستگی به نوع تپ چنجر و کارخانه سازنده آن دارد صرف تغییر از یک تپ به تپ بعدی خواهد شد . عملکرد دایورتر سوئیچ توسط فنرهای شارژ شده و به کمک مقاومتهای گذرا و با سرعت بسیار زیاد انجام میپذیرد . باید اضافه نمود که سرعت عملکرد تپ چنجر در تغییر تپ کاملاً مستقل از سرعت موتور درایو میباشد و بستگی به سرعت تخلیه انرژی ذخیره شده در فنر دارد.

در یک شکل ساده تصور کنید وقتی بخواهیم از یک تپ به تپ دیگر تغییر حالت دهیم، چون باعث قطع جریان بالا می شود و ولتاژ نامی نیز بالا می باشد جرقه بسیار شدیدی رخ خواهد داد. برای جلوگیری از رخ دادن جرقه باید طرحی اندیشید در تپ چنجر ON LOAD برای تغییر تپ مثلاً از ۱ به ۲ ابتدا تپ سلکتور تپ مورد نظر را انتخاب می کند. یعنی در حالیکه روی تپ ۱ می باشد تپ ۲ را نیز انتخاب می کند، ولی هنوز جریان از تپ ۱ عبور می کند حالا برای جابجایی از تپ ۱ به ۲ به کمک دایورترسویچ با سرعت بسیار بالا در حد ۲۰ میلی ثانیه انجام می شود. البته دایورترسویچ نیز در محفظه روغن جداگانه قرار داشته و به نوعی جرقه خفه می شود (دقیقا مانند عملکرد کلیه های قدرت از نوع روغنی) برای اینکه در مدت ۲۰ میلی ثانیه طول قوسی را کوچک کنند از مقاومت گذرا استفاده می کنند یعنی ابتدا مقاومت در مدار قرار میگیرد سپس در چند مرحله مقاومت نیز از مدار خارج می شود این عملیات در یک پریود صورت میگیرد. به تصویر زیر توجه کنید:

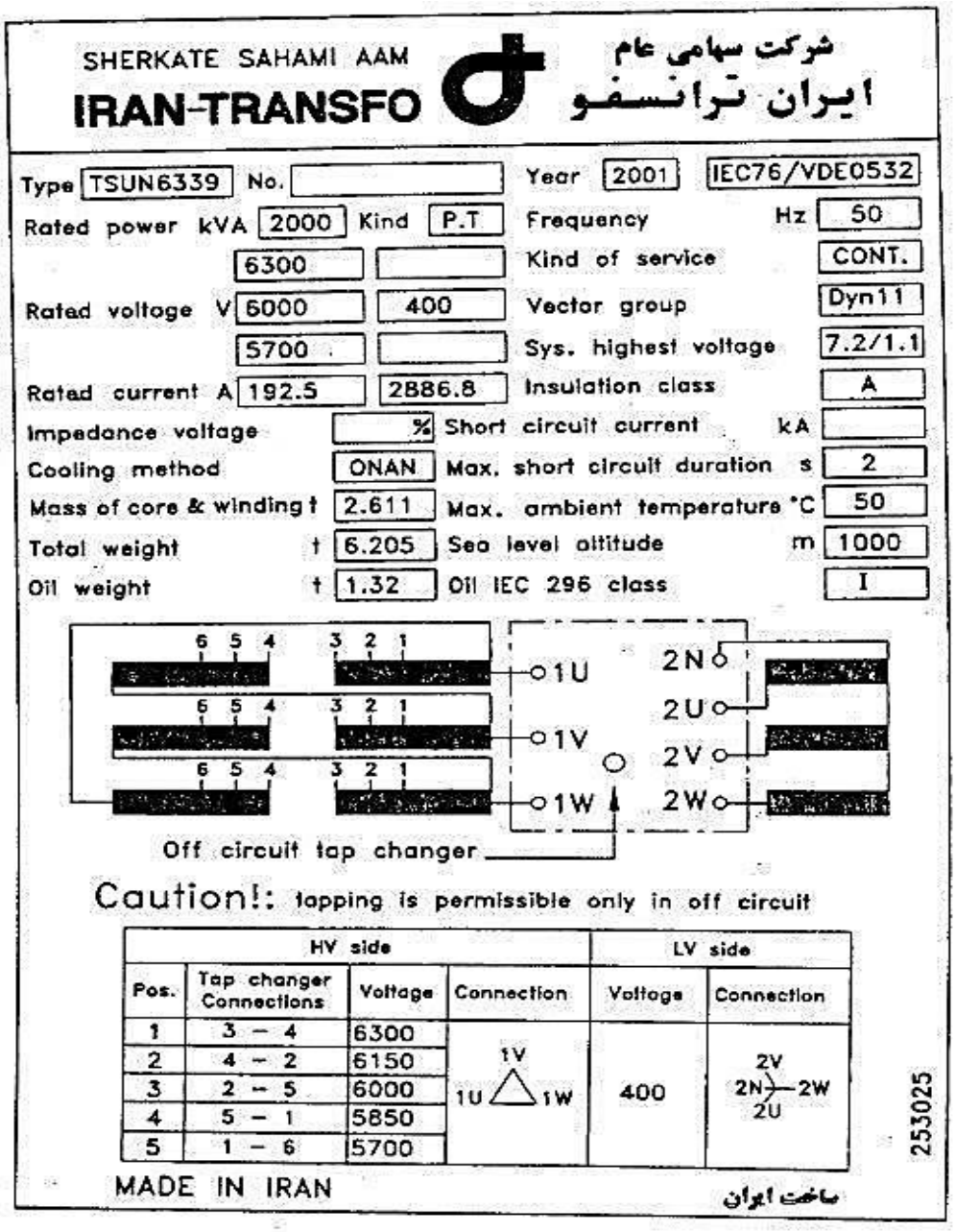


شکل (۵-۲۸): تپ چنجر

۵-۱۵- پلاک مشخصات ترانس Name Plate

برای خرید، تعمیرات، راه اندازی و آزمایش ترانسفورماتور باید پلاک و مشخصات آن بررسی شود. همچنین برای انتخاب صحیح و مناسب تجهیزات باید به توضیحات روی پلاک مشخصات کاملا توجه نمود.

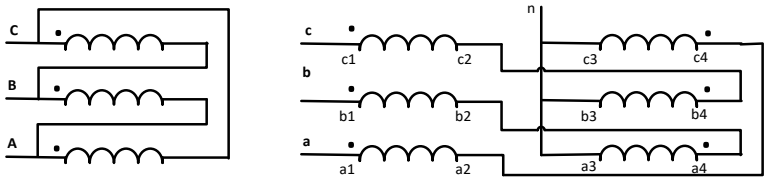
پلاک به صفحه ای فلزی اطلاق میشود که روی بدنه ترانسفورماتور (معمولا سمت فشار ضعیف) نصب می شود و مشخصات مربوطه به ترانسفورماتور روی آن چاپ یا حک میشود.



شکل (۵-۲۹): یک نمونه پلاک ترانس

تمرینها

۱- نسبت تبدیل ترانس مثلث- زیگزاگ را اثبات کنید.



۲- یک ترانس ستاره مثلث دارای نسبت تبدیل ۲۰۰۰۰/۴۰۰ ولت است. اگر اولیه آن ۱۰۰۰ دور داشته باشد سیم پیچ ثانویه چند دور دارد.

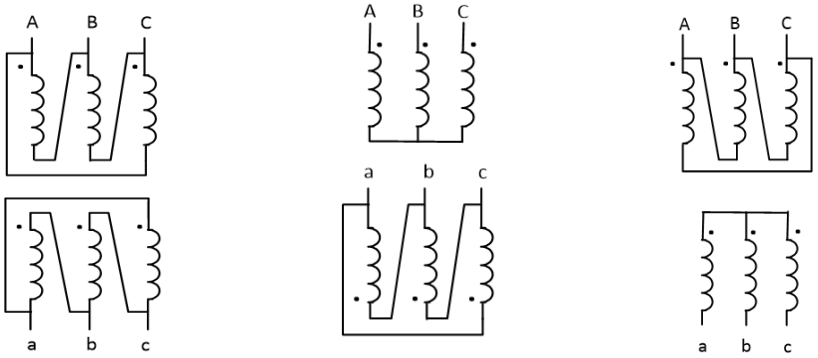
۳- علت بوجود آمدن هارمونیک در ترانس سه فاز را مختصرا توضیح دهید.

۴- یک فیلتر پسیو موازی برای حذف هارمونیک پنجم طراحی کنید.

۵- اگر هر کدام از شرایط ۵ گانه موازی کردن ترانسها برقرار نباشد چه اتفاقی رخ می‌دهد.

- برابر بودن پلاریته ولتاژ ثانویه
- نسبت تبدیل برابر
- امپدانس معادل Z_{eq} برابر
- نسبت X_{eq}/R_{eq} برابر
- گروه برداری برابر

٦- گروه برداری ترانس زیر را بدست آورید.



۷- چگونگی تغییر گروه برداری با تغییر نام گذاری و تغییر توالی را اثبات کنید.

۸- می‌خواهیم ترانس‌های ۷ و ۱۱ و ترانس‌های ۵ و ۱۱ را باهم موازی کنیم اتصالات آنها را رسم کنید.

۹- اگر تپ چنجر بر روی اولیه نصب باشد برای افزایش ولتاژ ثانویه چه کاری باید انجام دهیم و چرا؟