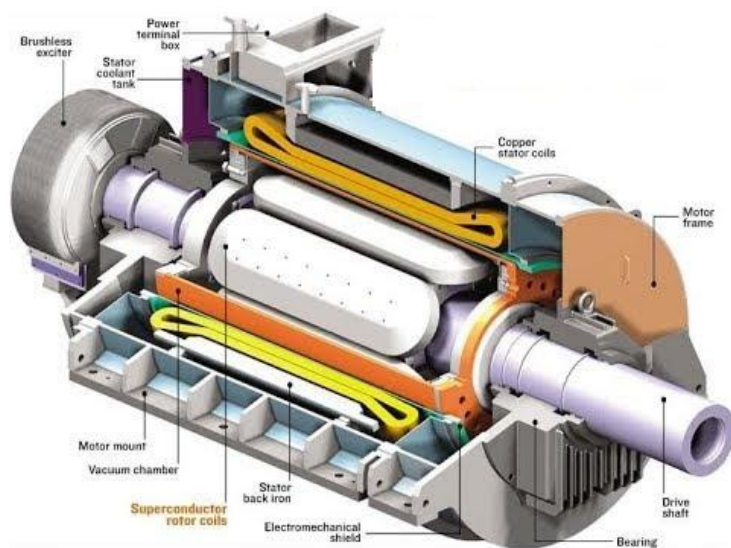
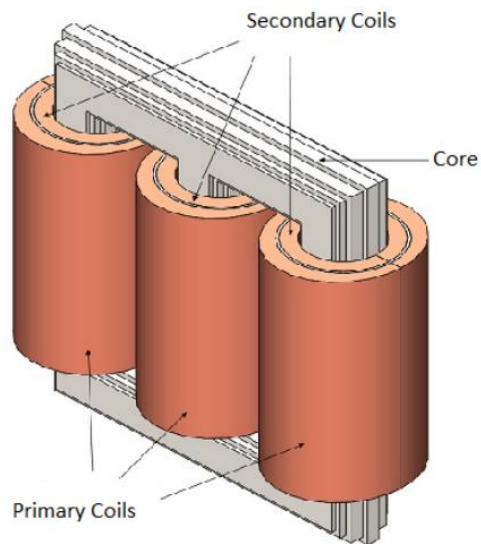


ماشین های الکتریکی ۳



تهیه کننده:

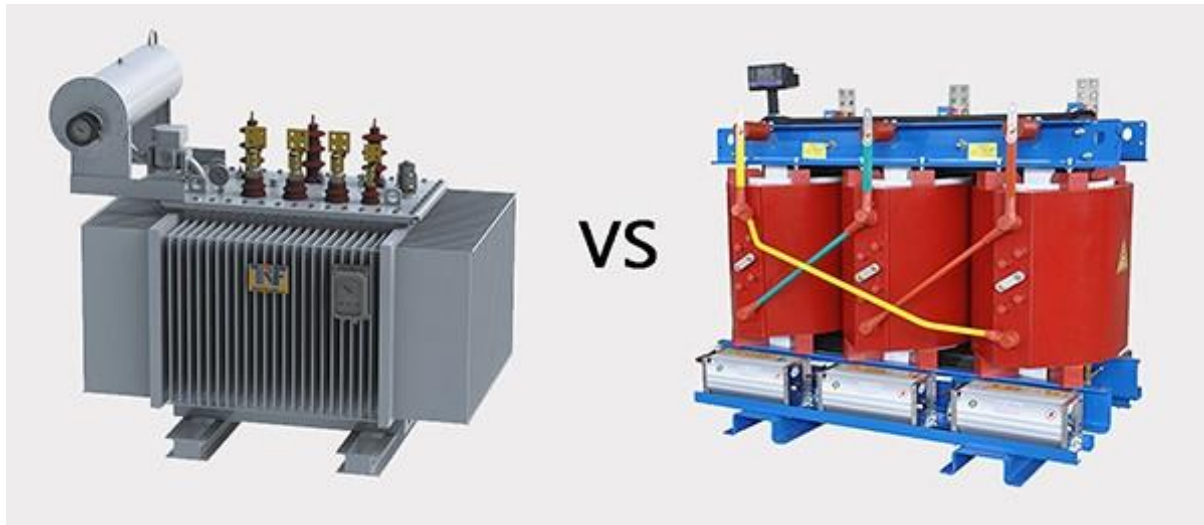
دکتر سعید حسنونند

ترانسفورماتورهای سه فاز

۵-۱- مقدمه

در سیستم های قدرت به علت دور بودن تولید انرژی الکتریکی از شهرها و مراکز مصرف ناچار به احداث خطوط انتقال توان بلند هستیم. این خطوط توسط هادی هایی معمولاً از جنس آلومینیوم که توسط فولاد در مرکز آنها برای استحکام مکانیکی بیشتر تقویت شده اند، الکتریسیته را انتقال می دهند. از آنجاکه هر هادی الکتریسیته دارای مقاومت در برابر عبور جریان الکتریسیته و متناسب با طول آن هادی است، بخشی از انرژی الکتریسیته در این هادی ها تلف می شود. این تلفات که از رابطه $P_{loss}=RI^2$ محاسبه می شود با مجذور جریان نیز رابطه مستقیم دارد. یکی از راه های کاهش این تلفات کاهش جریان است اما برای ثابت ماندن توان انتقالی می بایست طبق رابطه $S=VI^*$ ولتاژ افزایش یابد. این هدف با استفاده از ترانس های قدرت قابل انجام است. در سیستم های انتقال قدرت به علت های مختلف از سیستم های سه فاز به جای تک فاز استفاده می شود که علت های آن از حوصله این بحث خارج است و به خواننده واگذار می شود. (سؤال: چرا از سیستم های چند فاز به جای تک فاز استفاده می شود؟ چرا از سیستم سه فاز استفاده می شود و نه مثلاً ۲ فاز یا ۴ فاز و؟) در این فصل ترانس های سه فاز که به ویژه در سیستم های قدرت سه فاز مورد استفاده قرار می گیرند، بررسی خواهد شد. یک تفاوت اصلی این ترانسفورماتورها با نمونه تک فاز آنها، ایجاد اتصالات مختلف است که هر کدام دارای مزیت هایی هستند و کاربردهای خاص دارند و در این فصل مورد بررسی قرار می گیرند.

۵-۲- انواع ترانسفورماتورها در خنک سازی



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

a- ترانسفورماتورهای روغنی (Oil immersed type)

در این ترانسفورماتورهای کل هسته و سیم پیچ های آن در روغن غوطه ور است و باید ساختمان آنها در برابر نشت روغن و یا نفوذ هوا کاملاً آب بندی 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 آتش سوزی است.

b- ترانسفورماتورهای خشک (Dry type)

به دلیل عدم وجود روغن، نیاز به مخزن نگهدارنده روغن در ترانس های خشک نمی باشد. عایق نهایی سیم پیچ ترانس های خشک، رزین بوده و سیم پیچ ها در تماس با جریان هوا خنک می شوند. استقامت الکتریکی و حرارتی رزین به کار رفته در ترانسفورماتورهای خشک به مراتب بهتر از روغن می باشد. به دلیل تکنولوژی ساخت و مواد مصرفی گران تر، هزینه اولیه ترانسفورماتورهای خشک در مقایسه با نمونه روغنی مشابه بیشتر است. اما هزینه نهایی ترانسفورماتورهای خشک شامل قیمت اولیه و هزینه های تلفات انرژی، نصب و راه اندازی و تعمیر و نگهداری در طول عمر مفید ترانسفورماتور مقرون به صرفه تر از نمونه مشابه روغنی خود می باشند.

به طور کلی برای مقایسه این دو ترانس در جدول زیر داریم:

جدول ۱: مقایسه ترانس های خشک و روغنی

روغنی	خشک	
بیشتر	کمتر	طول و عرض و ارتفاع
بیشتر	کمتر	وزن
کمتر	بیشتر	مقدار عایق
برابر	برابر	وزن هادی
کمتر	بیشتر	تحميل اضافه بار
بیشتر	کمتر	بازدهی
نیستند	هستند	دوست دار محیط زیست
بیشتر	کمتر	تعمیر و نگهداری
کمتر	بیشتر	هزینه
کمتر	بیشتر	طول عمر
کمتر	بیشتر	تلفات بی باری
در توانهای بالا بیشتر	در توانهای پایین کمتر	تلفات تحت بار

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 ۲: مقایسه تلفات بی باری، تلفات تحت بار و ضریب حداکثر راندمان ترانس های خشک و روغنی

جدول پ ۱۲-۱ تلفات بی بار و تلفات بار، تلفات بی بار و ضریب حداکثر راندمان ترانسفورماتورهای روغنی در توان نامی									
ترانسفورماتورهای گروه OIT3			ترانسفورماتورهای گروه OIT2			ترانسفورماتورهای گروه OIT1			S _N (kVA)
K	P _K	P _O	K	P _K	P _O	K	P _K	P _O	
(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	
۰.۳۵	۳۱۵۰	۲۶۰	۰.۴۲	۱۷۵۰	۳۲۰	۰.۳۷	۱۴۷۵	۲۱۰	۱۰۰
۰.۳۵	۲۵۴۵	۳۱۰	۰.۴۴	۲۰۰۰	۳۸۰	۰.۳۹	۱۶۹۵	۲۴۷	۱۲۵
۰.۳۵	۳۱۰۰	۳۷۵	۰.۴۵	۲۳۵۰	۴۶۰	۰.۳۹	۲۰۰۰	۳۰۰	۱۶۰
۰.۳۵	۳۶۰۰	۴۴۵	۰.۴۵	۲۷۶۰	۵۵۰	۰.۳۹	۲۳۵۰	۳۵۵	۲۰۰
۰.۳۶	۴۲۰۰	۵۳۰	۰.۴۵	۳۲۵۰	۶۵۰	۰.۳۹	۲۷۵۰	۴۲۵	۲۵۰
۰.۳۶	۵۰۰۰	۶۲۵	۰.۴۵	۳۸۵۰	۷۸۰	۰.۳۹	۳۲۵۰	۵۰۰	۳۱۵
۰.۳۶	۶۰۰۰	۷۵۰	۰.۴۵	۴۶۰۰	۹۳۰	۰.۴۰	۳۸۵۰	۶۱۰	۴۰۰
۰.۳۵	۷۱۰۰	۸۷۵	۰.۴۵	۵۴۵۰	۱۱۰۰	۰.۴۰	۴۵۵۰	۷۲۰	۵۰۰
۰.۳۳	۸۷۰۰	۹۴۰	۰.۴۲	۶۷۵۰	۱۲۰۰	۰.۳۷	۵۶۰۰	۸۰۰	۶۳۰
۰.۳۳	۱۰۷۰۰	۱۱۵۰	۰.۴۱	۸۵۰۰	۱۴۵۰	۰.۳۶	۷۴۰۰	۹۴۰	۸۰۰
۰.۳۳	۱۳۰۰۰	۱۴۰۰	۰.۴۰	۱۰۵۰۰	۱۷۰۰	۰.۳۵	۹۵۰۰	۱۱۰۰	۱۰۰۰
۰.۳۳	۱۶۰۰۰	۱۷۳۰	۰.۴۰	۱۳۲۰۰	۲۱۰۰	۰.۳۳	۱۱۴۰۰	۱۳۰۰	۱۲۵۰
۰.۳۳	۲۰۰۰۰	۲۲۰۰	۰.۳۹	۱۷۰۰۰	۲۶۰۰	۰.۳۵	۱۴۰۰۰	۱۷۰۰	۱۶۰۰
۰.۳۲	۲۵۳۰۰	۲۶۴۵	۰.۳۹	۲۱۲۰۰	۳۱۳۵	۰.۳۵	۱۷۵۵۰	۲۰۵۵	۲۰۰۰
۰.۳۲	۳۲۰۰۰	۳۲۰۰	۰.۳۷	۲۶۵۰۰	۳۸۰۰	۰.۳۳	۲۲۰۰۰	۲۵۰۰	۲۵۰۰

جدول پ ۱۲-۳ تلفات بی بار و تلفات بار و ضریب حداکثر راندمان ترانسفورماتورهای خشک در توان نامی									
ترانسفورماتورهای گروه CRT3			ترانسفورماتورهای گروه CRT2			ترانسفورماتورهای گروه CRT1			S _N (kVA)
K	P _K	P _O	K	P _K	P _O	K	P _K	P _O	
(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	
۰.۵۱	۲۹۰۰	۷۵۰	۰.۵	۲۶۰۰	۶۵۰	۰.۴۴	۲۴۰۰	۴۸۰	۱۶۰
۰.۴۹	۳۶۰۰	۸۵۰	۰.۴۹	۲۵۰۰	۷۵۰	۰.۴۵	۲۹۰۰	۵۹۰	۲۰۰
۰.۴۸	۴۱۰۰	۹۵۰	۰.۵۳	۳۱۰۰	۸۸۰	۰.۴۶	۳۱۰۰	۶۵۰	۲۵۰
۰.۴۹	۴۶۰۰	۱۱۰۰	۰.۵۳	۳۶۰۰	۱۰۰۰	۰.۴۷	۳۶۰۰	۷۸۰	۳۱۵
۰.۴۷	۵۹۵۰	۱۳۰۰	۰.۵۴	۴۱۰۰	۱۲۰۰	۰.۴۸	۴۱۰۰	۹۴۰	۴۰۰
۰.۴۷	۷۰۰۰	۱۴۵۰	۰.۵۳	۵۰۰۰	۱۴۰۰	۰.۴۷	۵۰۰۰	۱۱۰۰	۵۰۰
۰.۴۶	۸۶۵۰	۱۸۰۰	۰.۵۱	۶۴۰۰	۱۶۵۰	۰.۴۵	۶۴۰۰	۱۲۵۰	۶۳۰
۰.۴۵	۱۰۱۵۰	۲۰۵۰	۰.۴۹	۷۹۰۰	۱۹۰۰	۰.۴۲	۷۹۰۰	۱۴۵۰	۸۰۰
۰.۴۶	۱۱۶۰۰	۲۴۰۰	۰.۵۰	۹۲۰۰	۲۳۰۰	۰.۴۲	۹۶۰۰	۱۷۵۰	۱۰۰۰
۰.۴۵	۱۳۵۰۰	۲۷۵۰	۰.۵۲	۱۰۰۰۰	۲۷۰۰	۰.۴۵	۱۰۵۰۰	۲۱۰۰	۱۲۵۰
۰.۴۵	۱۶۷۰۰	۳۳۰۰	۰.۵۱	۱۱۸۰۰	۳۱۰۰	۰.۴۵	۱۳۲۰۰	۲۴۰۰	۱۶۰۰
۰.۴۶	۱۹۴۰۰	۴۱۰۰	۰.۵۳	۱۴۵۰۰	۴۰۰۰	۰.۴۵	۱۴۹۰۰	۳۰۰۰	۲۰۰۰
۰.۴۷	۲۳۰۰۰	۵۰۵۰	۰.۵۳	۱۷۶۰۰	۵۰۰۰	۰.۴۵	۱۸۰۰۰	۳۶۰۰	۲۵۰۰

۵-۳- کدهای شناسایی ترانسفورماتورها در خنک سازی

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

۱- حرف اول نشان دهنده سیستم خنک کاری داخلی برای سیم پیچ ها 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 نشان دهنده یکی از حالت های زیر است:

N (Natural): چرخش طبیعی مایع خنک سازی از میان سیم پیچ ها و هسته

F (Forced): چرخش اجباری به وسیله پمپ

D (Directed): چرخش اجباری جهت داده شده به وسیله تجهیزات خنک کاری و پمپ

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

A (Air): هوا

W (Water): آب

۴- روش خنک کاری خارجی را بیان می کند:

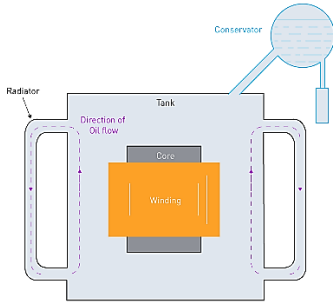
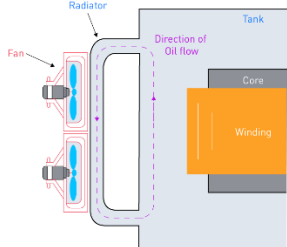
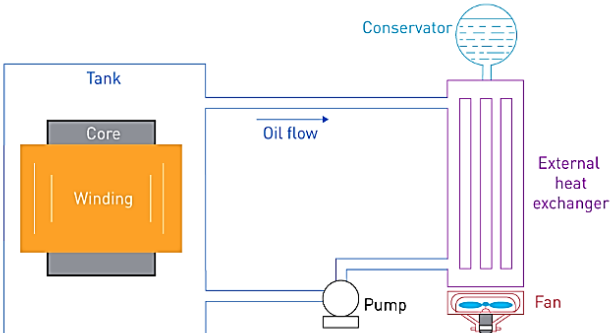
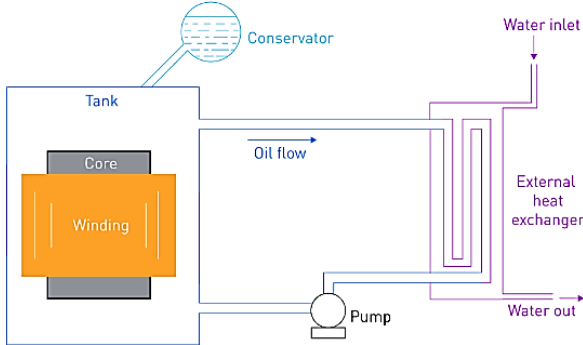
N (Natural): همرفت طبیعی

F (Forced): همرفت اجباری

برای مثال ONAN نشان دهنده یک ترانسفورماتور با مایع خنک سازی روغن برای هسته و سیم پیچ ها است که روغن آن به صورت چرخش طبیعی خنک می شود. سطح مخزن روغن به وسیله هوا و آن هم به صورت طبیعی خنک می شود. اگر این ترانسفورماتور به فن خارجی برای خنک کاری سطح مخزن روغن مجهز باشد از نشانگر ONAF استفاده می کنیم. ترانسفورماتوری که در وضعیت عادی از خنک کاری طبیعی در روغن و هوا استفاده می کند ولی می تواند در هنگام اضافه شدن بار یا گرم شدن روغن از فن نیز استفاده کند با نشانگر ONAN/ONAF مشخص می شود.

در جدول زیر شماتیک انواع روش های خنک سازی نشان داده شده است.

جدول ۳: انواع روش خنک سازی

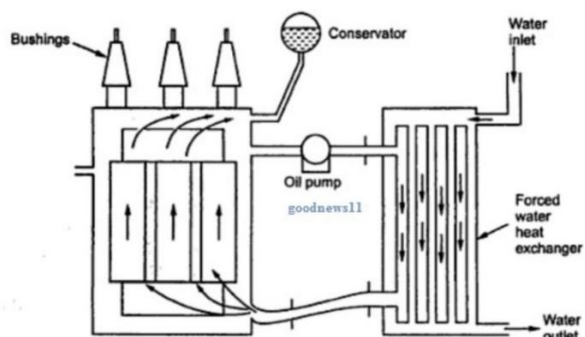
شماتیک	انواع روش خنک سازی
	ONAN
	ONAF
	OFAF
	OFWF

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



شکل (۲): ترانس OFAF

در شکل زیر ترانسفورماتور با خنک سازی OFWF نشان داده شده است. از این نوع خنک کنندگی در ترانسفورماتورهای کوره و ترانسفورماتورهای نیروگاه های برق آبی که محدودیت فضای نصب داشته یا indoor هستند استفاده می شود. لوله های آب و مبدل حرارتی به صورت استوانه عمودی در این ترانسفورماتور قابل مشاهده است.



شکل (۳): ترانس OFWF

افزایش ظرفیت با تغییر روش خنک سازی

افزایش ظرفیت اسمی ترانس وقتی روش خنک کاری را تغییر می کند وابسته به طراحی بدنه، سطح رادیاتورها، مقاومت حرارتی هسته، دمای محیط و محدودیت های عایقی و ... است. ارقام زیر رنج های معمول صنعتی هستند که نسبت به حالت پایه تغییر در سیستم خنک کاری چند درصد به ظرفیت ترانس اضافه می کند، اما تولیدکننده عدد نهایی را مشخص می کند.

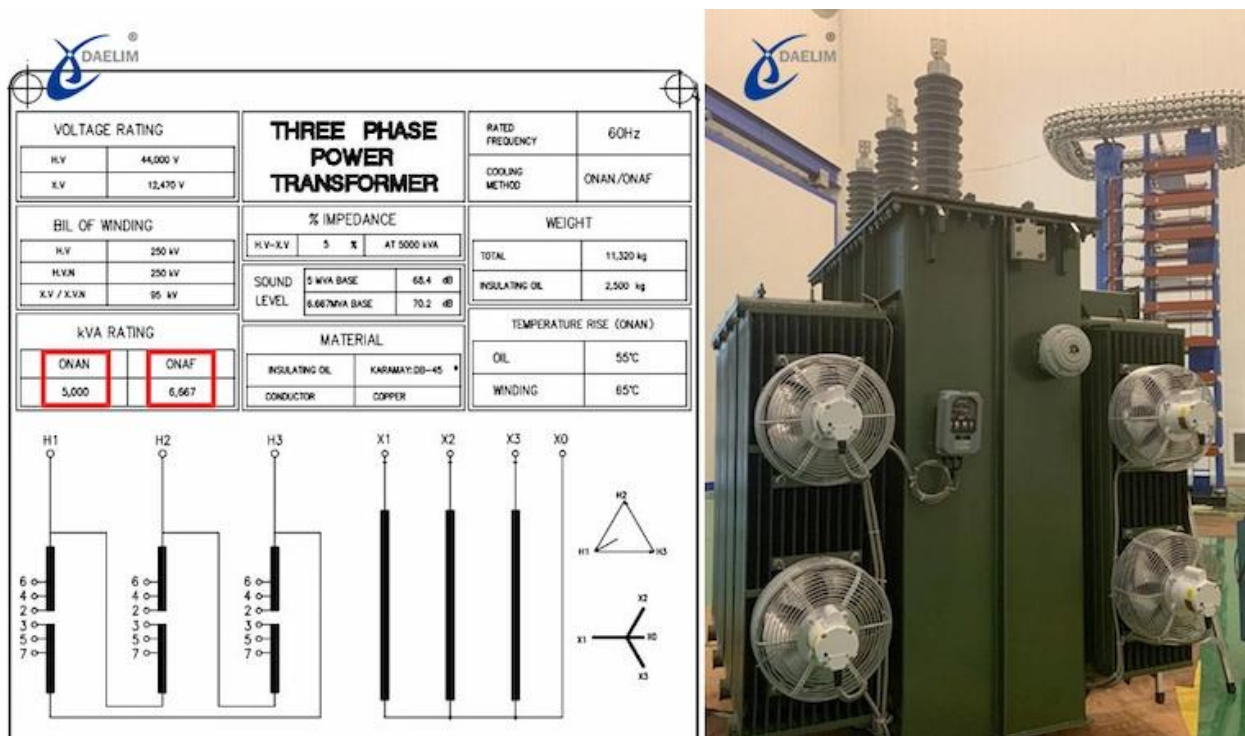
ONAN (پایه) = ۱۰۰٪

ONAF (فقط فن / هوای اجباری) $\approx ۱۲۵\% - ۱۳۳\%$

OFAN (پمپ روغن ، هوا طبیعی) $\approx ۱۲۰\% - ۱۴۰\%$

OFAF (پمپ روغن + فن هوا) $\approx ۱۵۰\% - ۱۶۷\%$

در شکل زیر مشخصات یک ترانس در دو حالت مختلف خنک سازی نشان داده شده است. که از ۵۰۰۰ کیلوولت آمپر به ۶۶۶۷ کیلو ولت آمپر یعنی ۳۳ درصد افزایش رسیده است.

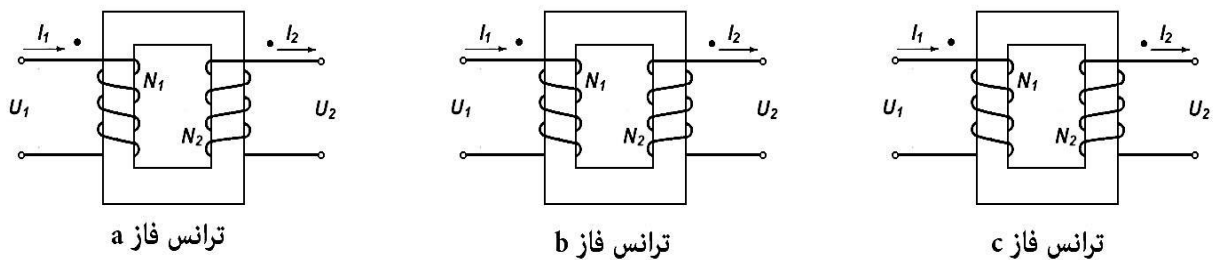


شکل (۴): افزایش توان با تغییر در سیستم خنک سازی

۵-۴- انواع هسته ترانس های 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 می شود. یکی از مزیت های 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 گران تر خواهد بود. در شکل زیر سه ترانس تک فاز به عنوان یک مجموعه ترانس سه فاز نشان داده شده است.



شکل (۵): سه ترانس تک فاز به عنوان یک مجموعه ترانس سه فاز

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

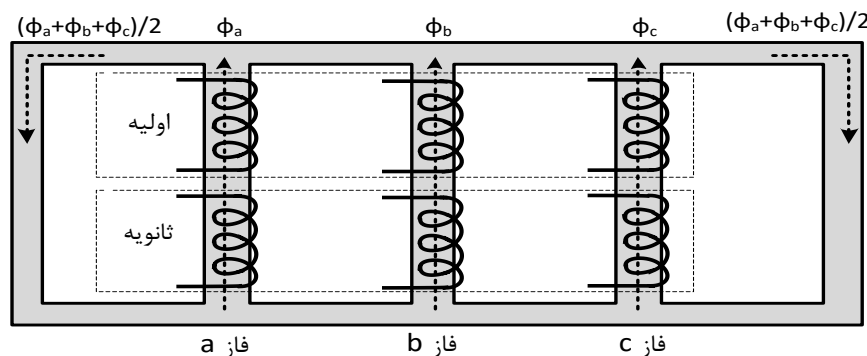


شکل (۶): سه ترانس تک فاز به عنوان یک مجموعه ترانس سه فاز

b- ترانس های سه فاز با هسته واحد

1-b- هسته نوع زرهی Shell Type

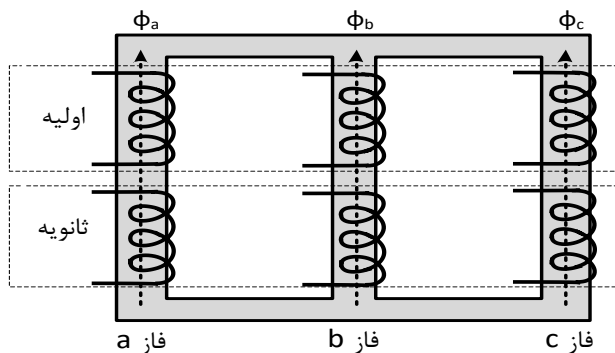
در نوع زرهی سیم پیچ های هر سه فاز بر روی ستون های وسط پیچیده می شوند و دو ستون کناری مانند جدار یا زره دور ستون وسط را در بر می گیرند. بنابراین پراکندگی شار در این حالت کم است چون یک مسیر از هسته در طرفین برای عبور شار وجود دارد به طوری که نصف برآیند شار هر سه فاز از یک طرف و نصف دیگر آن از طرف دیگر عبور می کند. لذا تلفات ناشی از نشت شار به اطراف کم می شود بطوریکه راندمان این نوع بیشتر از نمونه بعدی می باشد. برای اینکه چگالی شار در تمام نقاط مدار مغناطیسی ثابت باشد ضخامت ستون وسط را دو برابر در نظر می گیرند. در شکل زیر این نوع هسته نشان داده شده است.



شکل (۷): هسته نوع زرهی Shell Type

2-b- نوع هسته ای یا ستونی Core Type

در این نوع هسته دارای سه ستون بوده که هرکدام از سیم پیچ ها بر روی یکی از ستون ها پیچیده می شود. بنابراین در این حالت مسیری برای بسته شدن شار نشتی وجود ندارد. در شکل زیر این نوع هسته نشان داده شده است. به منظور استفاده از عایق کمتر سیم پیچ فشار ضعیف داخل و فشار قوی روی آن پیچیده می شود.



شکل (۸): هسته نوع زرهی Core Type

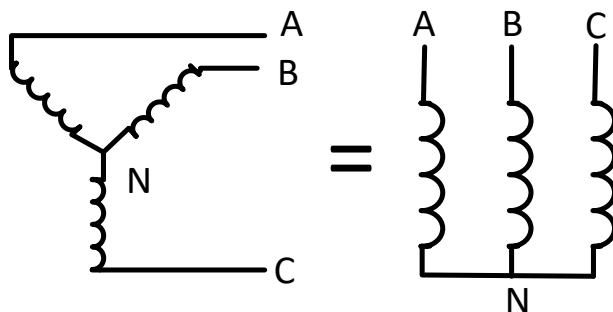
- تفاوت های Core Type و Shell Type را می توان به صورت زیر بیان کرد:

- ۱- در Core Type سیم پیچ ها هسته را احاطه کرده اند 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- خنک سازی 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 سیم پیچ ها در Core Type راحت تر است.
- ۸- تعمیر و نگهداری Core Type ساده تر 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 نمی پذیرد.

۵-۵- انواع اتصالات ترانس های سه فاز

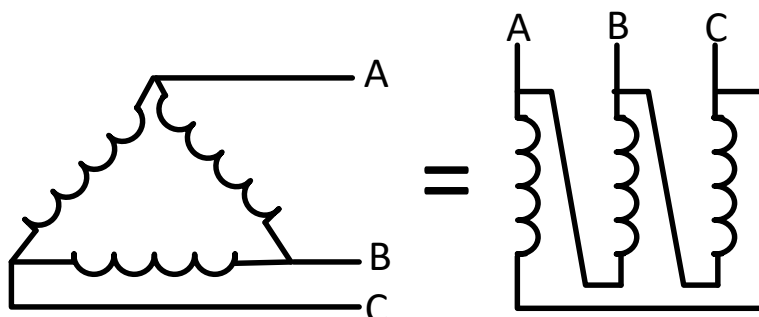
هر ترانس سه فاز دارای ۶ سیم پیچی است که برای هر فاز ۲ سیم پیچی اولیه و ثانویه را شامل می شود. این ۶ سیم پیچی دارای ۱۲ سر هستند (به شکل های ۱، ۲ و ۳ توجه شود) که در نهایت باید ۳ ورودی و ۳ خروجی داشته باشیم. بنابراین برخلاف ترانس های تک فاز بسته به اتصال این ۱۲ سر انواع مختلف ترانس سه فاز را خواهیم داشت که به صورت زیر نام گذاری شده اند.

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



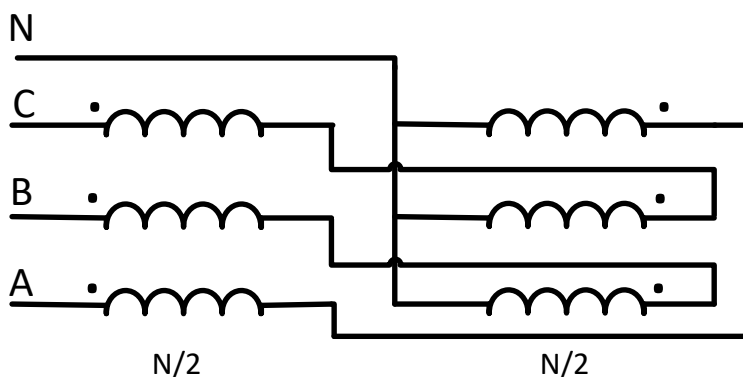
شکل (۹): اتصال ستاره یا Y

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



شکل (۱۰): اتصال مثلث یا Δ

c- اتصال زیگزاگ یا Z که سیم پیچی هر فاز به دو قسمت مساوی تقسیم شده است و انتهای هر نیم سیم پیچ به انتهای نیم سیم پیچ در فاز دیگر متصل می شود. سرهای باقی مانده نیز به یکدیگر متصل شده و نقطه خنثی را تشکیل می دهند. شکل زیر این اتصال را نشان می دهد.



شکل (۱۱): زیگزاگ یا Z

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

- 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

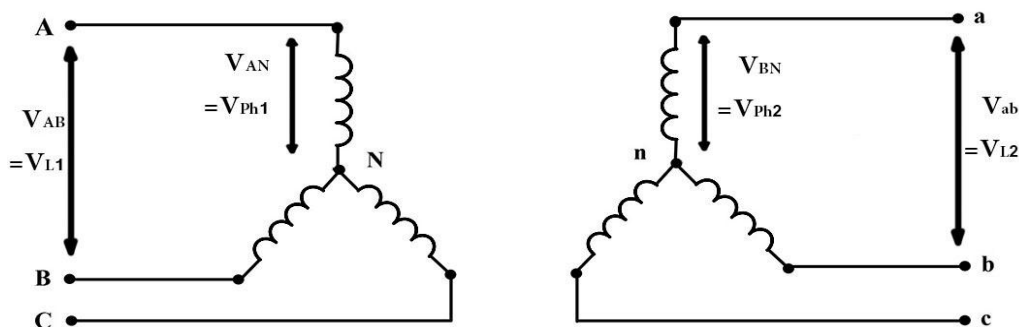
در ترانس های سه فاز علاوه بر ولتاژ هر کدام از فازها ولتاژ بین دوفاز که ولتاژ خط نامیده می شود نیز وجود دارد. بنابراین، علاوه بر متنوع بودن اتصالات در ترانس سه فاز، یکی دیگر از تفاوت های ترانس سه فاز با ترانس تک فاز متفاوت بودن نسبت تبدیل است که نسبت ولتاژ خط اولیه به ولتاژ خط ثانویه تعریف می شود. به عبارت دیگر اگر اولیه و ثانویه اتصال یکسان داشته باشند یعنی $\Delta\Delta$ و Yy نسبت تبدیل برابر با تعداد دور سیم پیچ های 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 می شود:

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

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

۱- اتصال ستاره- ستاره Yy

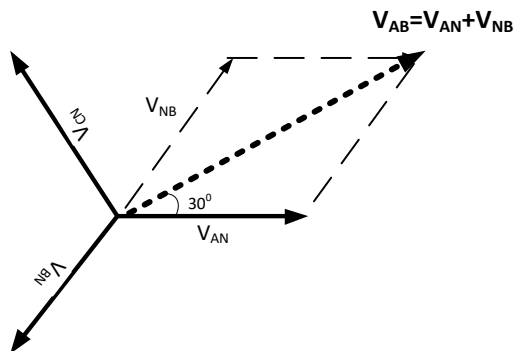
در شکل زیر یک ترانس سه فاز که اولیه و ثانویه آن به صورت ستاره بسته شده است نشان داده شده است. توسط روابط زیر نسبت تبدیل این ترانس به دست خواهد آمد.



شکل (۱۲): اتصال ستاره- ستاره Yy

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

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

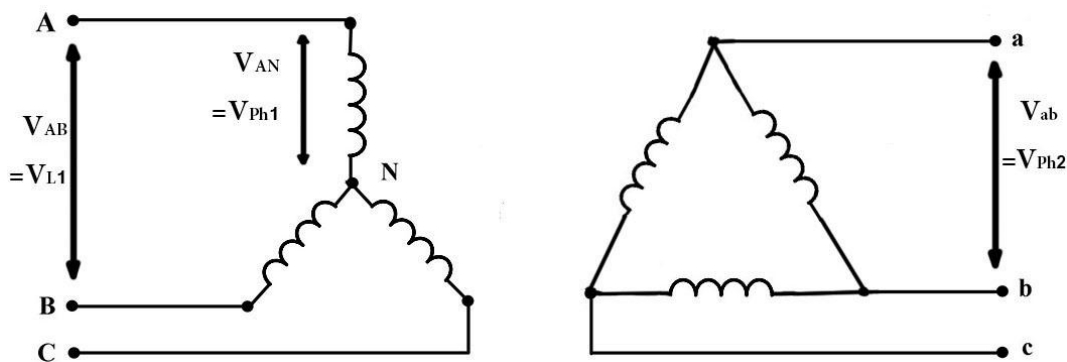


$$(A) = \frac{V_{L1}}{V_{L2}} = \frac{\sqrt{3}V_{ph1}}{\sqrt{3}V_{ph2}} = \frac{V_{ph1}}{V_{ph2}} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

از اثبات روابط بالا این نتیجه حاصل می شود که نسبت تبدیل یا نسبت ولتاژ خط اولیه به ثانویه در ترانس ستاره – ستاره برابر با نسبت تعداد دور سیم پیچ های آنهاست.

۲- اتصال ستاره – مثلث Yd

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



شکل (۱۳): اتصال ستاره- مثلث Yd

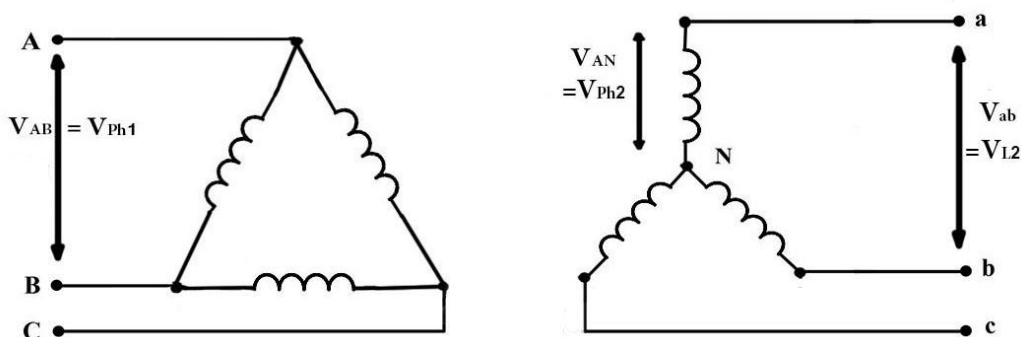
$$V_{L1} = \sqrt{3}V_{ph1}$$

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

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

همان طور که مشاهده شد نسبت تبدیل یا نسبت ولتاژ خط اولیه به ثانویه در ترانس ستاره - مثلث، رادیکال ۳ برابر نسبت تعداد دور سیم پیچ های اولیه به ثانویه است.

۳- اتصال مثلث - ستاره Δy



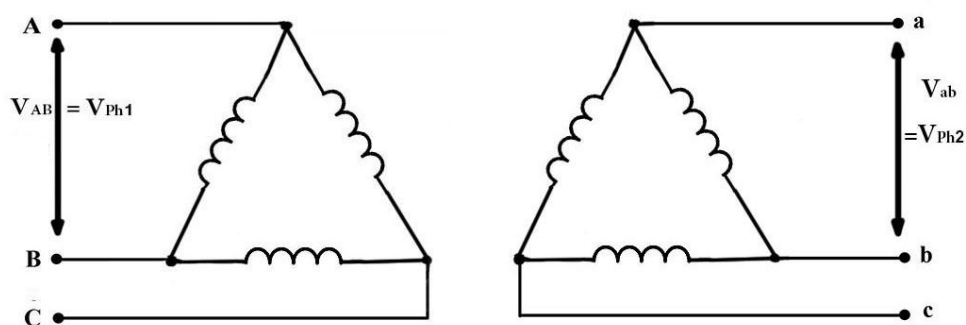
شکل (۱۴): اتصال مثلث - ستاره Δy

$$V_{L1} = V_{ph1}$$

$$V_{L2} = \sqrt{3}V_{ph2}$$

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

۴- اتصال مثلث - مثلث Δd



شکل (۱۵): اتصال مثلث - مثلث Δd

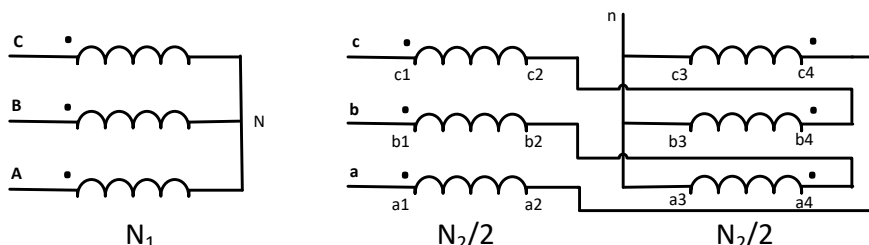
$$V_{L1} = V_{ph1}$$

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

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

۵- اتصال ستاره- زیگزاگ Yz

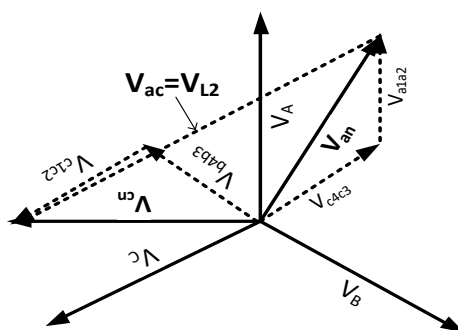
در شکل زیر این اتصال نشان داده شده است. سیم پیچ ثانویه N_2 دور است که به دو قسمت مساوی تقسیم شده و هر نیم سیم پیچ به انتهای نیم سیم پیچ فاز دیگر متصل شده است. برای بدست آوردن نسبت تبدیل به صورت زیر عمل می شود.



شکل (۱۶): 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 می شود ولتاژ V_{an} از جمع ولتاژ V_{a1a2} که بر روی ستون V_A قرار دارد و با آن هم راستا است و ولتاژ V_{c3c4} که به علت متفاوت بودن سر نقطه دار در خلاف جهت V_C است بدست می آید. 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 در نهایت V_{ac} برآیند این دو است:



شکل (۱۷): نحوه بدست آوردن ولتاژهای فازی و خطی در اتصال زیگزاگ به روش برداری

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

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

۶- اتصال مثلث- زیگزاگ Δz : به عنوان تمرین

۵-۷- مقایسه اتصال ستاره، مثلث و زیگزاگ

به منظور مقایسه بهتر از این اتصال ها در ۴ مورد شامل سطح ولتاژ، مقدار عایق، مقدار مس و ضریب بهره برداری به شرح زیر مقایسه انجام شده است:

۱- مقایسه سطح ولتاژ سیم پیچ ها در ولتاژ خط V_L

در اتصال ستاره ولتاژ خط بر رادیکال ۳ تقسیم شده و بر روی هر سیم پیچ قرار می گیرد.

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

در اتصال مثلث ولتاژ خط دقیقاً بر روی هر سیم پیچ قرار می گیرد.

$$V_{Winding_Δ} = V_{L1}$$

در اتصال زیگزاگ ولتاژ هر نیم سیم پیچ 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 سیم پیچ ها در اتصال مثلث بعد از آن اتصال ستاره و در آخر زیگزاگ قرار می گیرد که در محاسبات باید لحاظ شود.

۲- مقایسه مقدار عایق بندی

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

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

$$Insulation_{Δ} \propto V_{L1} \quad \Rightarrow \quad Insulation_{Δ} > Insulation_Z > Insulation_Y$$

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

۳- مقدار مس مورد نیاز

برای داینامو چگالی جریان یکسان حجم مس مورد نیاز به صورت زیر محاسبه می شود. لازم به ذکر است که جریان سیم پیچ ها در اتصال ستاره و زیگزاگ برابر و همان مقدار جریان خط خواهد بود اما جریان سیم پیچ ها در

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

$$\sqrt{3}I_{W-\Delta} = I_{W-Z} = I_{W-Y}$$

$$Cu_Y \propto N_Y \times I_Y$$

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

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

۴- مقایسه ضریب بهره برداری

ضریب بهره برداری به صورت زیر تعریف می شود.

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

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

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

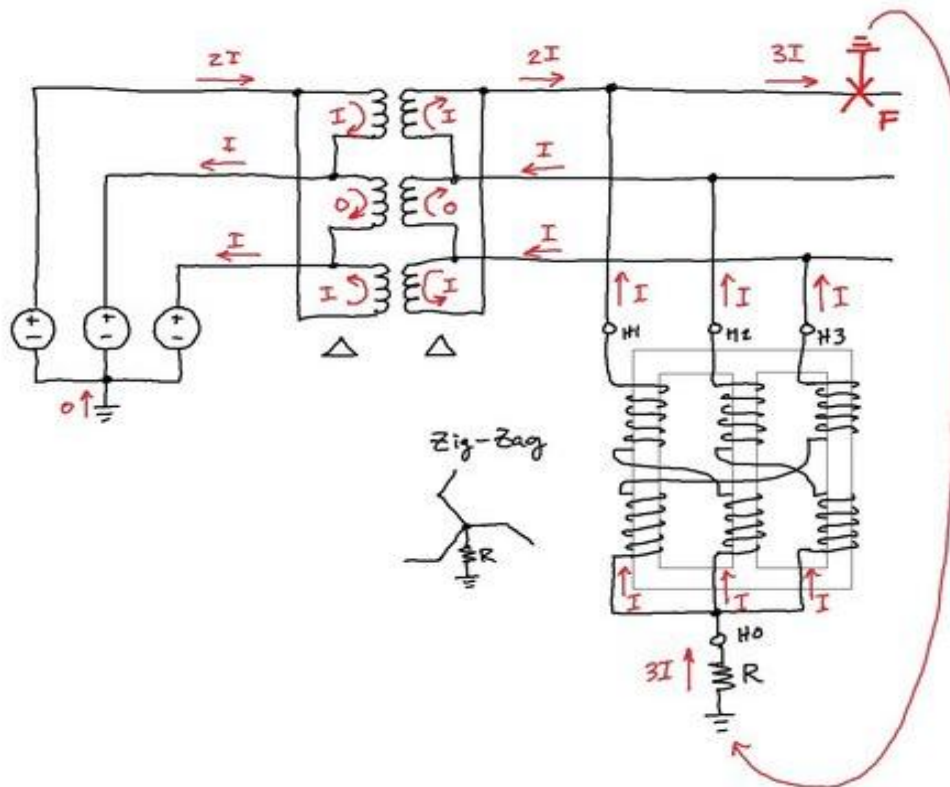
$$\beta_Z \propto \frac{\sqrt{3} \times V_L \times I_L}{6 \times (V_L / 3 \times I_L)} = 0.86 \quad \text{مخرج برابر با قدرت هر نیم سیم پیچ ضرب در تعداد آنها یعنی ۶ عدد:}$$

ملاحظه می شود که در ترانس زیگزآگ حدود ۱۴ درصد ضریب بهره برداری کمتر است یعنی به اندازه هزینه انجام شده قدرت تحویل نمی دهد بنابراین اقتصادی نیست.

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

استفاده به عنوان ترانس زمین : کاربرد دیگر اتصال زیگززاگ

ترانس زمین نوعی ترانسفورماتور است که در سیستم های توزیع و انتقال برای ایجاد نقطه نوترال یا تأمین مسیر برگشت جریان به زمین استفاده می شود. این نوع ترانس در شبکه هایی که معمولاً اتصال ثانویه آنها مثلث است و نقطه خنثی ندارد به منظور تشخیص خطای تک فاز استفاده می شود.



شکل (۱۸): اتصال زیگززاگ برای ایجاد نقطه نول در سمت مثلث

هنگامی که یک خطای زمین در یک فاز رخ می دهد، ترانسفورماتور زیگززاگ مسیر بازگشت به زمین را فراهم می کند. اغلب از مقاومت R برای محدود کردن مقدار جریان خطای زمین استفاده می شود. برای خطای زمین F در یکی از فازها به اندازه $3I$ ، هر سیم پیچ زیگززاگ حامل I است. برای ترانسفورماتور مثلث - مثلث نشان داده شده، جریان هایی که در سیم پیچ ها جاری می شوند فقط توالی مثبت و منفی دارند و بدون مسیر برگشت از طریق زیگززاگ به تشخیص خطای تک فاز به زمین کمک نمی کنند.

ترانس زمین باید توانایی تحمل حرارت و دینامیک ناشی از عبور جریان اتصال کوتاه را داشته باشد. نوع اتصال فازهای توانسفورماتور زمین به صورت ZN است. نقطه نوترال ترانس زمین می تواند به صورت مستقیم و یا

توسط یک امیدانس برای محدود کردن جریان خطای تکفاز به زمین متصل شود. به منظور تغذیه داخلی پست و داشتن اتصال زمین از ترانس کامپکت استفاده میشود که دارای اتصال ZNyn خواهد بود.

جدول ۴ : مشخصات چند نمونه ترانس کامپکت زمین

تلفات کیلووات		امیدانس درصد	گروه برداری	شرح 4 www.atecco.ir
بارداری و جنسی	بی یاری			
۳/۵	۱/۵	۴٪-۶٪	ZNyn11	ترانسفورماتور کمپکت، ۳۳/۰/۴ کیلوولت، ۴۰۰ کیلوولت آمپر، جریان زمین ۱۱۵۵ آمپر
۲/۵	۱/۲	۴٪-۶٪	ZNyn11	ترانسفورماتور کمپکت، ۳۳/۰/۴ کیلوولت، ۲۵۰ کیلوولت آمپر، جریان زمین ۱۱۵۵ آمپر
۴	۱/۸	۴٪-۶٪	ZNyn11	ترانسفورماتور کمپکت، ۲۰/۰/۴ کیلوولت، ۴۰۰ کیلوولت آمپر، جریان زمین ۱۵۵۴ آمپر
۳/۵	۱/۵	۴٪-۶٪	ZNyn11	ترانسفورماتور کمپکت، ۲۰/۰/۴ کیلوولت، ۴۰۰ کیلوولت آمپر، جریان زمین ۱۴۴۳ آمپر
۳/۵	۱/۵	۴٪-۶٪	ZNyn11	ترانسفورماتور کمپکت، ۲۰/۰/۴ کیلوولت، ۴۰۰ کیلوولت آمپر، جریان زمین ۱۱۵۵ آمپر
۲/۵	۱/۲	۴٪-۶٪	ZNyn11	ترانسفورماتور کمپکت، ۲۰/۰/۴ کیلوولت، ۲۵۰ کیلوولت آمپر، جریان زمین ۱۲۰۰ آمپر

سوالاتی که وجود دارد این است که اتصال ستاره هم می تواند نقطه نول ایجاد کند اما:

- این اتصال باعث کاهش عدم تعادل ولتاژ و حذف مؤلفه های ناخواسته می شود.
- ترانس ستاره برای ایجاد نوترال برای تامین بار تک فاز استفاده می شود، اما به دلیل امیدانس بالاتر در برابر جریان های زمین، معمولاً در ترانس زمین کاربرد ندارد.

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 می آید.

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

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

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

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

تلفات مسی در بار کامل

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

الف) در بار کامل:

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos \varphi = 1 \rightarrow \frac{500000 \times 1}{500000 \times 1 + 4490 + 3050} = 98.54\% \\ \cos \varphi = 0.8 \rightarrow \frac{500000 \times 0.8}{500000 \times 0.8 + 4490 + 3050} = 98.2\% \end{array} \right.$$

ب) در نصف بار کامل: جریان نامی نصف می شود در نتیجه تلفات مسی یک چهارم شده و توان کل هم نصف می شود اما تلفات ثابت به بار بستگی ندارد و ثابت می ماند.

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos \varphi = 1 \rightarrow \frac{\frac{1}{2} \times 500000 \times 1}{\frac{1}{2} \times 500000 \times 1 + \frac{1}{4} \times 4490 + 3050} = 98.35\% \\ \cos \varphi = 0.8 \rightarrow \frac{\frac{1}{2} \times 500000 \times 0.8}{\frac{1}{2} \times 500000 \times 0.8 + \frac{1}{4} \times 4490 + 3050} = 98\% \end{array} \right.$$

۵-۸- هارمونیک

۵-۸-۱- مقدمه

هارمونیک‌ها، ولتاژها و جریان‌هایی با فرکانسی که به صورت مضربی از فرکانس موج اصلی بیان می‌شود، هستند. به عبارت دیگر 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:

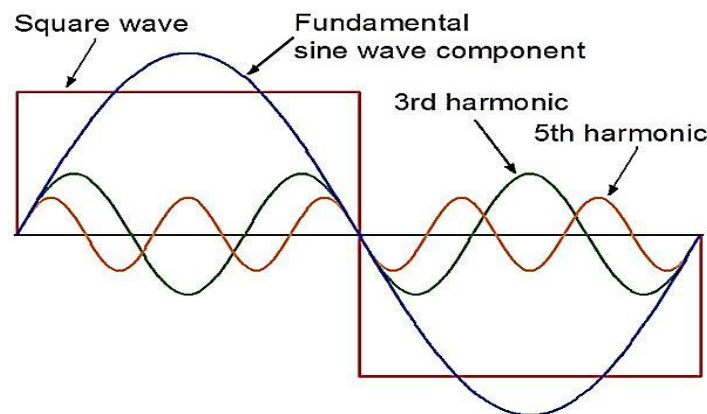
$$f(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t)$$

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

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

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

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 (۱۹): نمودار شکل موج مربعی و سه جمله اول سری فوریه آن

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

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

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

همان طور که گفته شد وقتی شکل موج از حالت سینوسی ایده آل خارج شود حاوی جملات هارمونیکی خواهد شد که از عوامل تولید هارمونیک در ولتاژ در سیستم های قدرت می توان به تولید ولتاژ غیر سینوسی از منبع (ژنراتور سنکرون به علت سیم پیچی 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.

• اثر هارمونیک بر سیستم قدرت

اصولاً هارمونیک ها آلوده سازی شکل موج را در اشکال سینوسی در مضارب فرکانس اصلی آنها نشان می دهند. تخریب شکل موج را می توان در فرکانس های مختلف (مضارب فرکانس اصلی) به عنوان یک نوسان دوره ای به وسیله آنالیز فوریه تجزیه و تحلیل کرد. این نوسانات یا هارمونیک ها می توانند موجب اختلال در عملکرد سیستم های کنترلی، حفاظتی، ارتباطی، صدمات در ترانسفورماتورها، موتورها و رساناها، و افزایش جریان خازن ها شوند. می توان اثر هارمونیک های ولتاژ و جریان را به صورت زیر بیان نمود:

اثرات عمده هارمونیک های ولتاژ: ۱- گرم شدن بیش از حد ماشین ها ۲- تنش ولتاژ بر روی عایق ها و کاهش عمر آنها ۳- تداخل الکترواستاتیکی در سیستم های مخابراتی ۴- ایجاد ولتاژهای تشدید بزرگ ۵- خراب شدن بانک های خازنی

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

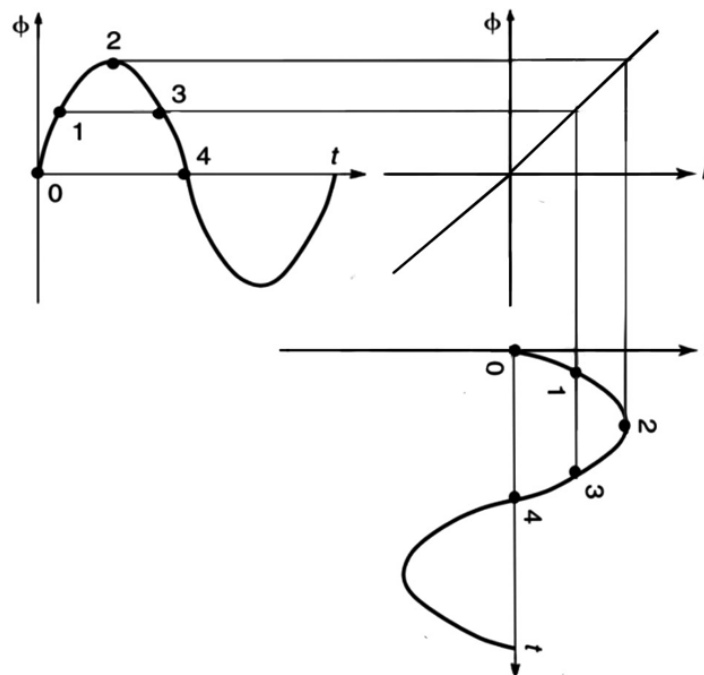
۵-۸-۱- هارمونیک در ترانس سه فاز

در این بخش یک مرتبه فرض می شود مشخصه مغناطیس شوندگی ترانس $(\phi-i)$ خطی است که دیده می شود تاثیری در ایجاد یا حذف هارمونیک در سیستم قدرت ندارد و همچنین غیرخطی بودن مشخصه نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

• مشخصه ترانس خطی باشد:

در شکل زیر مشاهده می شود که اگر شار سینوسی که متناظر با ولتاژ سینوسی است که ترانس خطی اعمال شود جریان مغناطیس شونده گی نیز خطی بود و در این حالت ترانس تاثیری در ایجاد یا حذف هارمونیک های سیستم ندارد.

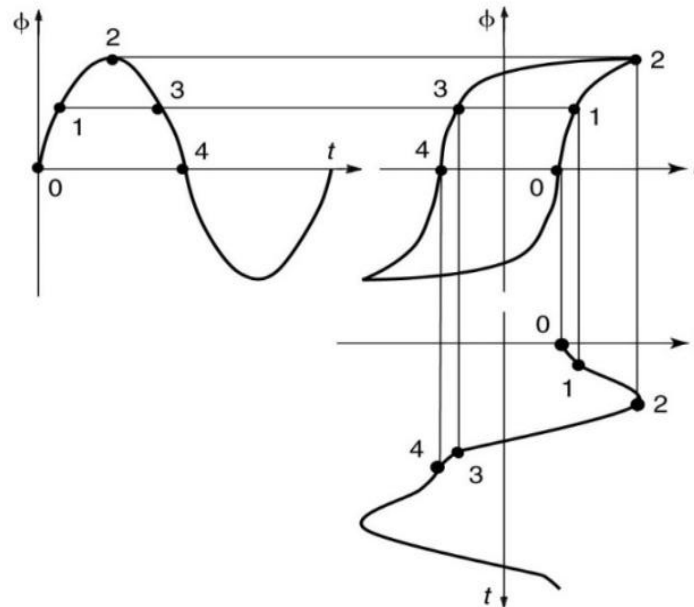
در این شکل فرض شده است که ولتاژ اعمال شده به ترانس سینوسی ایده آل است بنابراین شاری تولیدی که در واقع انتگرال ولتاژ می شود یک سینوسی ایده آل خواهد بود (منحنی بالا سمت چپ). از طرفی منحنی مغناطیس شونده گی مربوط به هسته ترانس به صورت نوعی نمایش داده شده است که یک حلقه هیستریزس و غیرخطی است (منحنی بالا سمت راست). منحنی اول شار بر حسب زمان و منحنی دوم شار بر حسب جریان است لذا به روش ترسیمی می توان شار را از این ۲ منحنی حذف کرد و منحنی جریان بر حسب زمان را بدست آورد. برای این کار ۵ نقطه با نام های ۰ تا ۴ را روی منحنی اول در نظر می گیریم. هرکدام از نقاط را به صورت افقی به منحنی دوم وصل می کنیم. سپس نقاط بدست آمده را به صورت عمودی امتداد می دهیم 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 می شود. منحنی جریان بر حسب زمان در نهایت بدست آمده که مشاهده می شود سینوسی کامل و بدون هارمونیک است.



شکل (۲۰): نمودار جریان- زمان به صورت ترسیمی در ترانس خطی

• مشخصه ترانس غیرخطی باشد:

مراحل بالا را این بار برای مشخصه غیرخطی تکرار می کنیم. در شکل زیر منحنی جریان بر حسب زمان نشان داده شده که یک منحنی دارای اعوجاج است و در واقع هارمونیک در آن ایجاد شده است.



شکل (۲۱): نمودار جریان- زمان به صورت ترسیمی در ترانس غیر خطی و اشباع هسته

نتیجه مهم: در ترانس غیرخطی اگر حتی ولتاژ سینوسی به اولیه آن اعمال شود، جریان مغناطیس شونده دارای هارمونیک خواهد بود و از شبکه جریان های هارمونیکی می کشد.

• بررسی دقیق تر هارمونیک در ترانس سه فاز

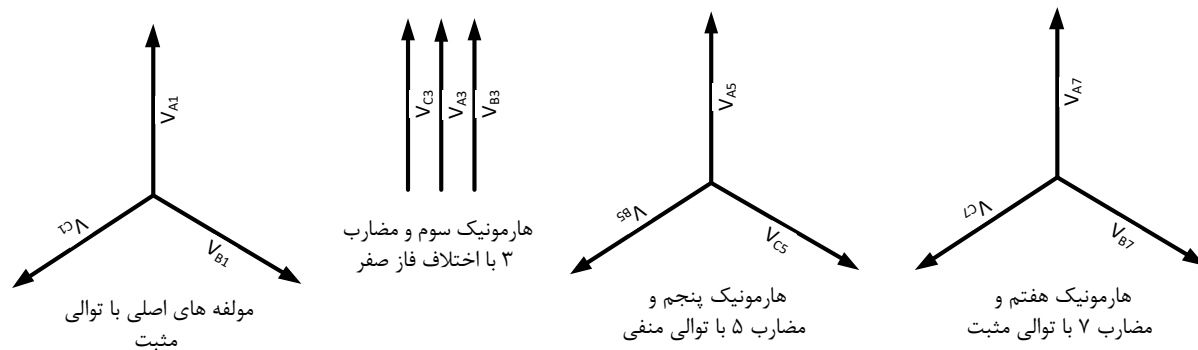
همان طور که قبلاً گفته شده در سیستم قدرت معمولاً جملات کسینوسی و هارمونیک زوج جملات سینوسی وجود ندارد. با این فرض و همچنین با فرض آنکه در سیستم سه فاز هر سه فاز به صورت متقارن دارای جملات هارمونیکی باشند، رابطه ولتاژ هر کدام از فازها به صورت زیر بیان می شود.

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

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

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

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 از آنجاکه با افزایش مرتبه هارمونیک دامنه آنها کمتر می‌شود هارمونیک ۳ دارای بیشترین درجه اهمیت است.



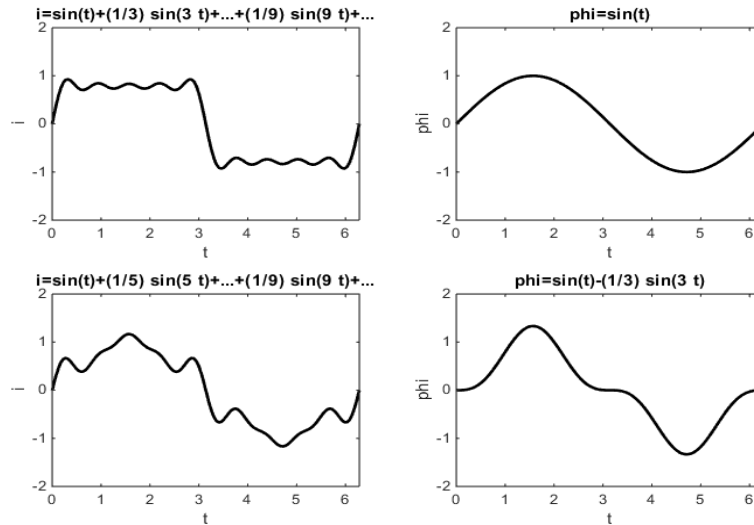
شکل (۲۲): هارمونیک‌ها و توالی آنها

• 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 از آنجاکه هارمونیک‌های به‌جز ضرایب ۳ همگی برآیند صفر دارند مشکلی بوجود 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

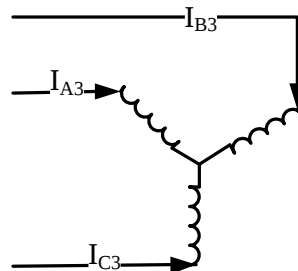
از حالت سینوسی خارج می شود که در شکل پایین سمت راست نشان داده شده است. این موضوع اهمیت جاری شدن هارمونیک سوم جریان را نشان می دهد که در ادامه بررسی خواهد شد.



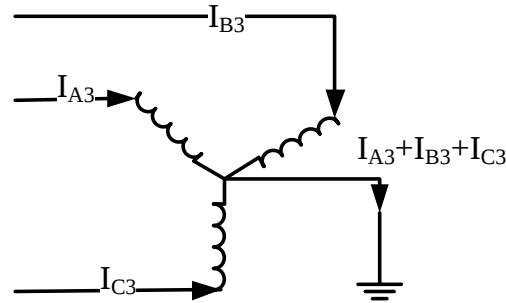
شکل (۲۳): حذف هارمونیک سوم از جریان باعث غیر سینوسی شدن شار می شود

• بررسی هارمونیک سوم در اتصال ستاره- ستاره

در اتصال ستاره - ستاره که نقطه خنثی (نوترال) آن زمین نشده است، برآیند هارمونیک های سوم هر کدام 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 هارمونیک های سوم می توانند 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 جریان های هارمونیک سوم جاری خواهند شد.



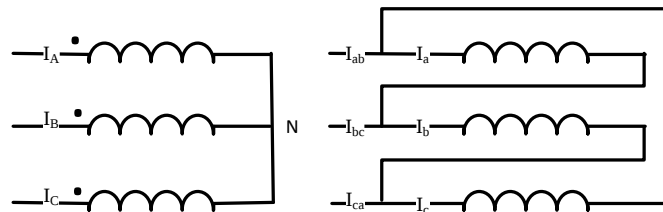
شکل (۲۴): برآیند جریان های هارمونیک سوم صفر نیست و مسیری برای جاری شدن آنها نیز وجود ندارد بنابراین شار غیر سینوسی خواهد شد.



شکل (۲۵): 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 هر کدام 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 (۲۶): جریان‌ها در اتصال ستاره- مثلث

$$I_a = I_{a1} + I_{a3} + I_{a5} + I_{a7} + \dots$$

$$I_b = I_{b1} + I_{b3} + I_{b5} + I_{b7} + \dots$$

$$I_{a3} = I_{b3}$$

$$I_{ab} = I_a - I_b = I_{ab1} + I_{ab5} + I_{ab7} + \dots$$

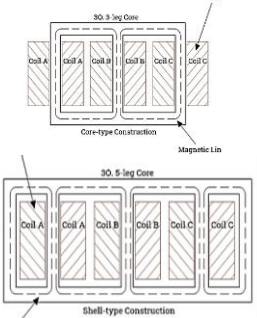
• بررسی هارمونیک سوم در اتصال ستاره- زیگزاگ

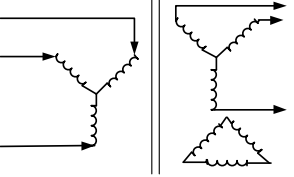
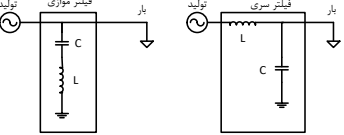
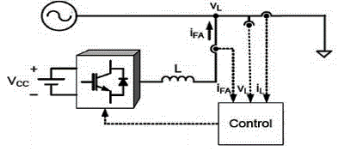
در اتصال ستاره- زیگزاگ ولتاژ هر فاز در ثانویه با توجه به سر نقطه دار هر نیم سیم پیچ از تفاضل دو فاز دیگر تشکیل شده است. بنابراین در هر نیم سیم پیچ جریان هارمونیک سوم وجود دارد اما چون هارمونیک سوم دارای اندازه و فاز برابر هستند از یکدیگر کم شده و حذف می شوند و وارد خط نمی شود. بنابراین حالتی مشابه با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

• روش های حذف هارمونیک

با توجه به اثرات مخربی که هارمونیک ها در سیستم قدرت ایجاد می کنند، تلاش هایی در زمینه طراحی بهتر منابع هارمونیک انجام می گیرد تا هارمونیک کمتری وارد شبکه نمایند، اما هنوز ماهیت غیرخطی بودن هسته ترانس ها و ژنراتورها و برخی از بارهای غیرخطی باعث تزریق هارمونیک در شبکه می گردند، بنابراین بایستی اقداماتی در جهت کنترل آن ها صورت گیرد. با روش های مختلف می توان هارمونیک ها را از سیستم قدرت حذف کرد که در زیر به چندین مورد به صورت خلاصه اشاره می شود.

جدول ۵: 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. به عبارت دیگر در اتصال ستاره- ستاره زمین نشده هارمونیک سوم وجود دارد.	حذف هارمونیک سوم ناشی از غیر خطی بودن ترانس	
۲ نوع هسته ترانس	در قسمت های 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 مؤلفه هایش جاری شود. در این قسمت بررسی هارمونیک های ولتاژ و انتقال آنها به ثانویه مطرح است. در هسته Shell Type برآیند شار هر سه سیم پیچ مسیری برای عبور دارد. بنابراین در صورت هارمونیک 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	

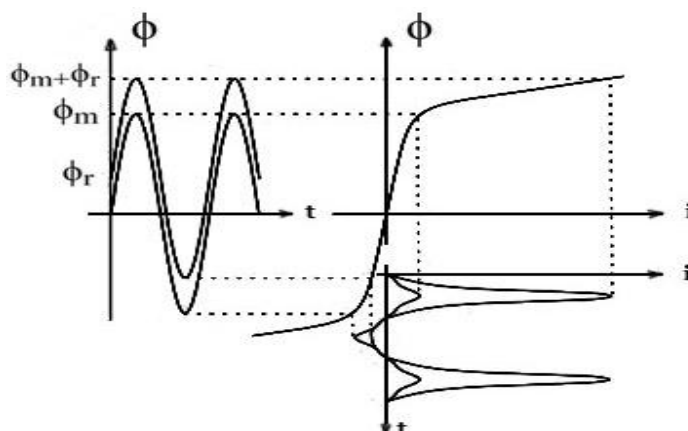
۳	استفاده از ترانس سه سیم- پیچه	در صورتی که اتصال ترانس اصلی انتقال توان ستاره-ستاره زمین نشده باشد، می توان از سیم پیچی سوم به صورت مثلث بسته شده است استفاده کرد. با این کار جریان های هارمونیک سوم در اتصال مثلث که ثالثیه است می توانند جاری شوند و بنابراین شار سینوسی باقی خواهد ماند. اگر ترمینال های اتصال مثلث در دسترس باشند برای تغذیه داخلی نیروگاه استفاده می شوند در صورتی که می توانند اصلاً در دسترس نباشند و این اتصال فقط برای حذف هارمونیک استفاده شود.	حذف هارمونیک 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 می گیرند و هر یک از آن ها بر روی فرکانس خاصی تنظیم می شوند و هارمونیک خاصی را حذف می کنند. هارمونیک های بار بجای عبور از منبع، مسیر خود را از طریق فیلترها به زمین تکمیل می کنند. اگر فیلتر به صورت یک سلف سری و یک خازن موازی باشد فیلتر پایین گذر را ایجاد می کند که فرکانس های بالا که همان هارمونیک ها هستند را عبور نخواهد داد.	حذف هارمونیک های مرتبه بالا در فیلتر سری و هارمونیک 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 می گیرند. اساس کار فیلترهای اکتیو بدین صورت است که در ابتدا باید سیستم اندازه گیری فیلتر با استفاده از فیدبکی که از جریان بار می گیرد مؤلفه های هارمونیک 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 مؤلفه های هارمونیک جریان را با دامنه منفی تولید می نماید و آن را به شبکه تزریق کند تا به این صورت مؤلفه های هارمونیک 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 می دهد که شکل جریان ترانس را به طور کلی تغییر می دهد.

برای بررسی این حالت یک مرتبه فرض می کنیم 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 می یابد و با استفاده از منحنی مغناطیس شونده گی هسته شکل موج جریان بدست خواهد آمد که حالت کار عادی ترانس را نشان می دهد. 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 باقی مانده 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 می شود 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 می شود که جریان بسیار

زیادی از منبع تغذیه کشیده خواهد شد که آن را جریان هجومی (Inrush current) می نامند 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 (۲۷): 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 می تواند تا چندین برابر جریان نامی ترانسفورماتور برسد. جریان هجومی به علت وجود تلفات ترانسفورماتور که عمدتاً مربوط به سیم پیچ است پس از مدتی از بین رفته و جریان مغناطیس کننده به حالت ماندگار خود می رسد. در طول چندین تناوب که جریان هجومی جاری است، همیشه روی منحنی هیستریزس حرکت می کند تا زمانی که اثر شار پسماند از بین برود و به تدریج بر روی منحنی هیستریزس 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 ترانسفورماتورهای توزیع شرکت ایران ترانسفو را نشان می دهد.

جدول ۶: 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 ترانسفورماتور 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 می آورد و ترانسفورماتورها از نظر فیزیکی برای کنترل تنش های مکانیکی از جریان به جریان هجومی طراحی شده اند. 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

به طور کلی موازی کردن دو ترانس دارای مزیت های زیر است:

- ۱- افزایش قابلیت اطمینان (در صورت قطع یکی دیگری در مدار است)
- ۲- بسته به قدرت مورد نیاز، تعدادی از ترانس ها می توانند خاموش باشند بنابراین تلفات ثابت کاهش یافته و راندمان افزایش می یابد.
- ۳- تعمیر و نگهداری ترانس ها بدون قطع کل باز امکان پذیر است.
- ۴- 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
- ۴- 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 می شود. اختلاف فاز یک عدد بین ۰ تا ۳۶۰ درجه است و از آنجا که اختلاف فاز همیشه ضرایب ۳۰ درجه است می توان ۳۶۰ درجه را در یک دایره به صورت ۱۲ گام ۳۰ درجه در نظر گرفت و با استفاده از ساعت های مختلف از ۱ تا ۱۲ بیان کرد. به همین دلیل به گروه برداری، ساعت ترانس نیز گفته می شود.

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

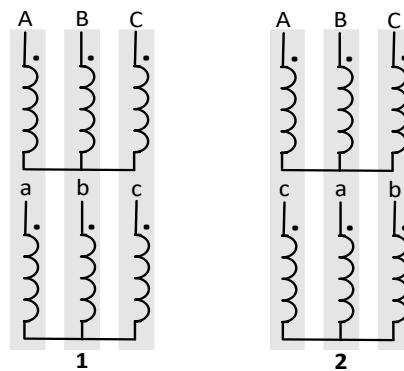
نکات زیر در مبحث گروه برداری مورد توجه است:

- ۱- گروه برداری برای ولتاژهای سه فاز متعادل تعریف می شود.
- ۲- سه بردار که نشان دهنده ولتاژ سه فاز هستند به عنوان مرجع برای ولتاژهای فاز یا خط اولیه با حروف انگلیسی بزرگ در نظر می گیریم و بردارهای ثانویه با حروف انگلیسی کوچک را نسبت به آنها بدست می آوریم.
- ۳- گروه برداری برای ولتاژهای فاز هم نام در اولیه و ثانویه و یا ولتاژهای خط هم نام در اولیه و ثانویه یکسان است.
- ۴- سیم پیچ های 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).
- ۵- گروه برداری نشان دهنده اختلاف فاز ولتاژ اولیه و ثانویه است.
- ۶- گروه برداری به صورت $Xx\#$ نوشته می شود، 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 نام گذاری اتصال سیم پیچ ها، تغییر پلاریته و تغییر سربندی بستگی دارد که در ادامه بررسی می شوند.

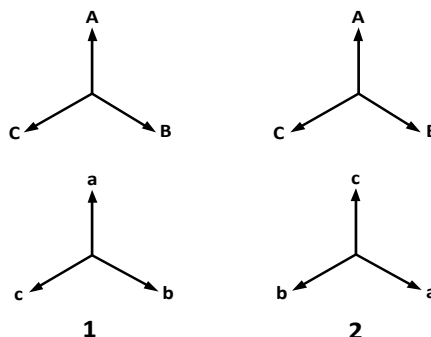
الف) اثر تغییر نام گذاری اتصال سیم پیچ ها در گروه برداری

وقتی نام گذاری سیم پیچ ها تغییر کند برای مثال فرض کنید سیم پیچ 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 می شد در حالت جدید اگر در ثانویه فاز a به عنوان 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 می شود گروه بردای تغییر کند. مثال زیر دو ترانس را برای مقایسه نشان می دهد که ترانس دوم تنها نام گذاری ثانویه آن عوض شده است.

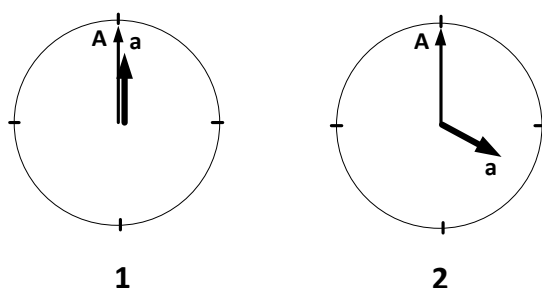
مثال ۱: گروه برداری دو ترانس زیر که اولی دارای ترتیب فاز ثانویه abc و دومی cab یعنی تنها نام گذاری دومی عوض شده را بدست آورید و مقایسه کنید.



برای بدست آوردن گروه برداری ابتدا یک مجموعه بردار سه فاز متعادل برای اولیه (که فرض شده فشار قوی است) با حروف ABC رسم می کنیم. سپس با توجه به این موضوع که ولتاژهای سیم پیچ های پیچیده شده بر روی یک ستون باهم هم فاز هستند (که در شکل نیز در یک راستا هستند) بردارهای متناظر با ولتاژ ثانویه یعنی abc را یک به یک موازی آنها را رسم می کنیم 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 سیم پیچ C و A در یک راستا هستند یعنی روی یک ستون پیچیده شده اند، بردار A و c، B و a، C و b باید در یک راستا باشند.

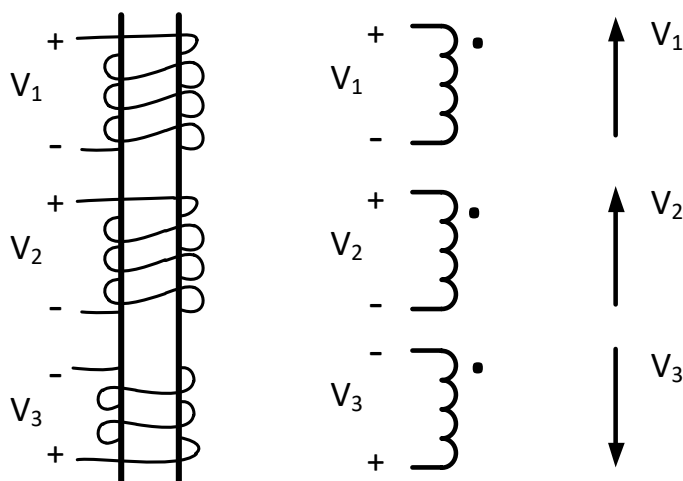


اگر بردار A و a ترانس شماره ۱ و ۲ را از یک نقطه رسم کنیم ملاحظه می شود که اختلاف فاز این دو بردار در ترانس اول صفر درجه و در ترانس دوم 120° درجه است. بنابراین ساعت ترانس اول صفر یعنی $Yy0$ و ترانس دوم 4 یعنی $Yy4$ است. که در شکل زیر نشان داده شده است.



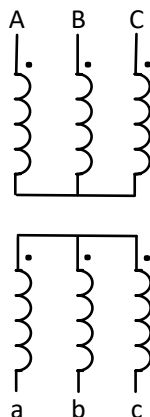
ب) اثر تغییر پلاریته در گروه برداری

ولتاژ القایی سیم پیچ هایی که روی یک ستون پیچیده شده اند یا هم فاز و یا در فاز مقابل (180° درجه) هستند که به از جهت سیم پیچی طبق شکل زیر ناشی می شود. برای نشان دادن این تمایز از نقطه در مدل مداری و جهت پیکان در بردار آنها استفاده می شود. این اختلاف فاز در گروه برداری تأثیر داشته و در مثال بعد بررسی می شود.

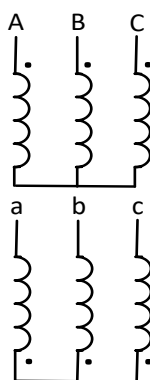


شکل ۲۸: شکل سمت چپ سه سیم پیچ با جهت چرخش متفاوت بر روی یک هسته ترانس. شکل وسط مدل مداری سه سیم پیچ. شکل سمت راست بردار ولتاژ متناظر با آنها

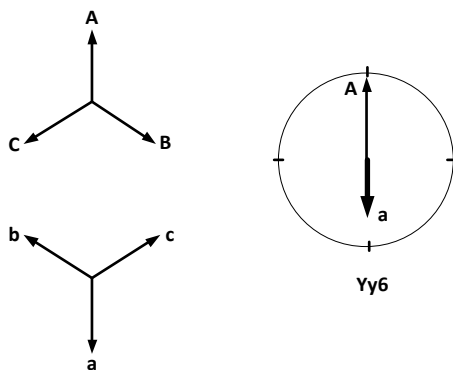
مثال: گروه برداری ترانس زیر را بدست آورید.



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



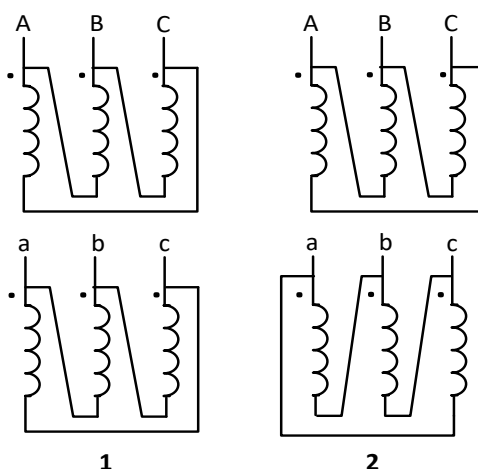
در هر دو شکل ملاحظه می شود که سر نقطه دار در محل اتصال سیم پیچ ها یعنی نقطه نول است. بنابراین ولتاژ هر فاز باید در فاز مخالف اولیه باشد که به صورت زیر خواهد بود و اگر بردار فاز A و a را در یک ساعت رسم کنیم گروه برداری یا ساعت ترانس $Yy6$ بدست خواهد آمد.



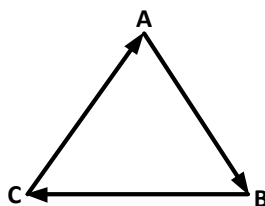
ج) اثر تغییر سربندی در گروه برداری

در اتصال مثلث و زیگزاگ سربندی سیم پیچ ها می تواند متفاوت باشد، برای مثال انتهای فاز A هم می تواند به B وصل شود و هم به C. بنابراین گروه برداری تفاوت خواهد داشت که در مثال های بعدی بررسی می شود.

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

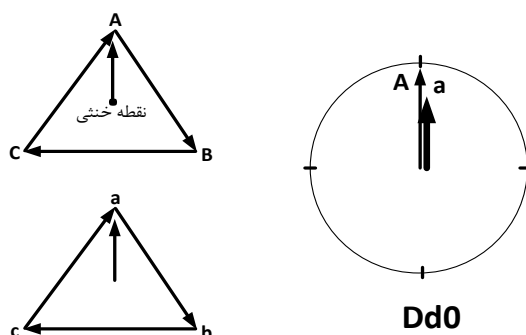


برای رسم گروه برداری در حالتی که اولیه اتصال مثلث است، باید یک مثلث که اضلاع آن نشان دهنده ولتاژهای خطی هستند به عنوان مرجع در نظر گرفته شود. جهت پیکان ها که همان ولتاژهای خط هستند با توجه به سربندی مثلث بدست می آید، یعنی طبق شکل مثلث اولیه شکل شماره یک سر نقطه دار بالای سیم پیچ است و فاز C به انتهای سیم پیچ 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 سیم پیچ هایی که با اولیه بر روی یک ستون پیچیده شده اند (و در شکل در یک راستا هستند) هم فاز هستند بنابراین بردار CA و ca، AB و ab، BC و bc باید در یک راستا باشند.

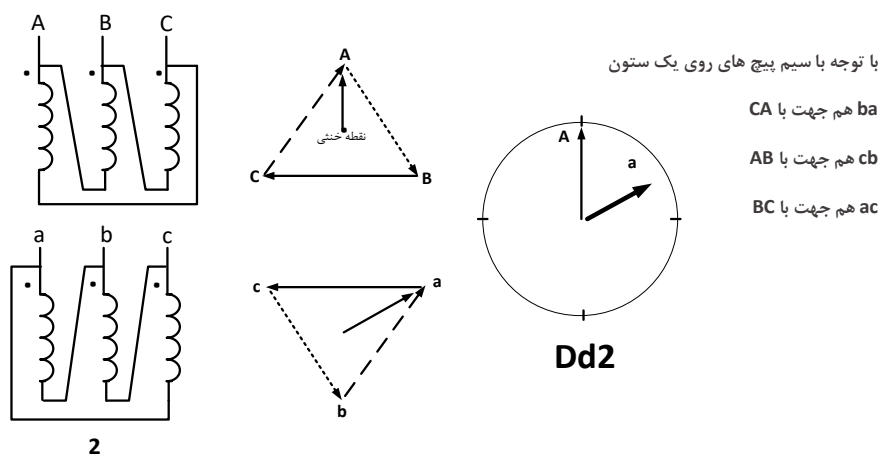
درنهایت برای رسم ساعت ترانس یک نقطه خنثی مجازی برای مثلث در نظر گرفته تا در واقع ولتاژهای فازی آن را بتوانیم بدست آوریم که بردارهای A و a هستند. این بردارها را در یکی ساعت رسم می کنیم تا گروه برداری بدست آید و مشاهده می شود ساعت صفر را نشان می دهد یعنی $Dd0$ است.



برای ترانس شماره ۲ (سمت راست):

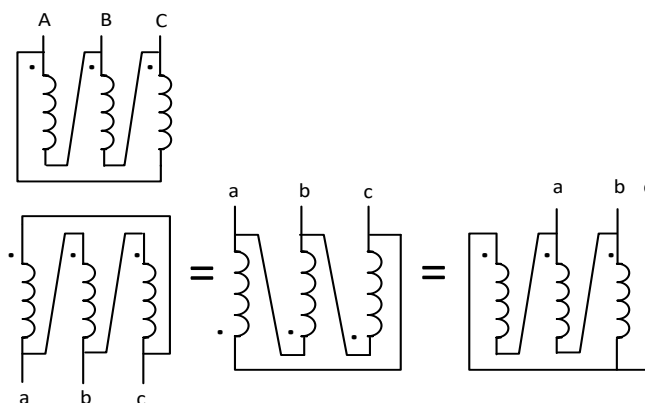
مثلث مرجع اولیه شبیه ترانس قبل است. برای رسم مثلث ثانویه طبق سربندی آن ملاحظه می شود، این بار b به انتهای a وصل شده و در این نوع سربندی بردار ba خواهیم داشت و چون بردار ba با CA بر روی یک ستون است هم راستای CA است. همچنین c به انتهای b وصل شده یعنی بردار cb خواهیم داشت که با AB روی یک ستون است و باید هم جهت 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 می کنیم تا گروه برداری بدست آید و مشاهده می شود ساعت ۲ را نشان می دهد یعنی $Dd2$ است.

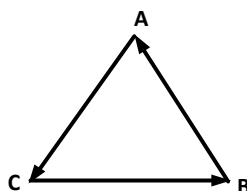


ملاحظه شد که با تغییر سربندی در اتصال مثلث گروه برداری از صفر به ۲ تغییر کرد.

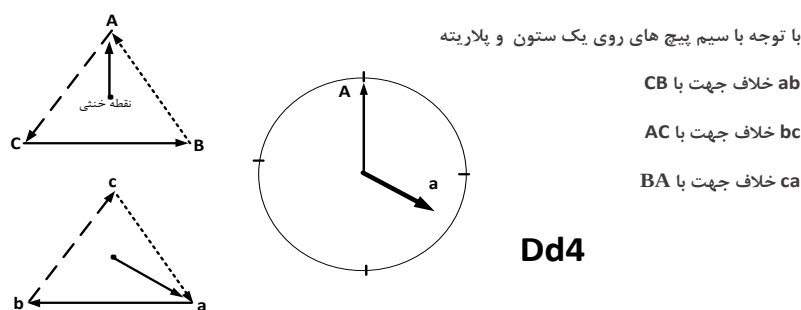
مثال ۱- گروه برداری اتصالات مثلث- مثلث زیر را بدست آورید. (دقت شود که اتصالات دیگر نیز که دقیقاً همان اتصال ثانویه اما به نحو دیگر هستند نمایش داده شده‌اند).



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.

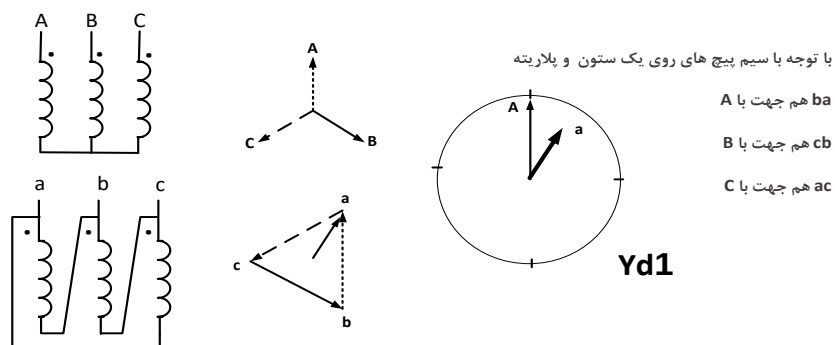


برای ثانویه چون از C به a وصل شده است بردار Ca را خواهیم داشت، اما طبق شکل سر نقطه‌دار یعنی پلاریته سیم‌پیچ‌ها عکس اولیه است یعنی بردار ca ثانویه ۱۸۰ درجه اختلاف فاز با برداری دارد که روی یک ستون هستند که اینجا بردار BA است. به همین ترتیب بردار ab خلاف CB و bc خلاف AC است. در شکل زیر این بردارها نشان 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.

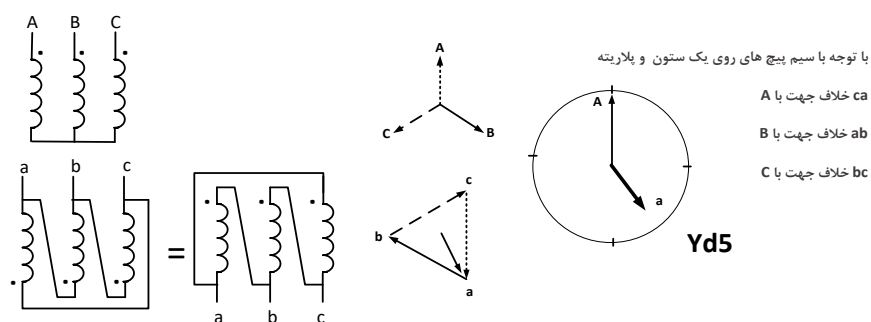


مثال - گروه برداری اتصالات ستاره- مثلث زیر را بدست آورید.

۱-

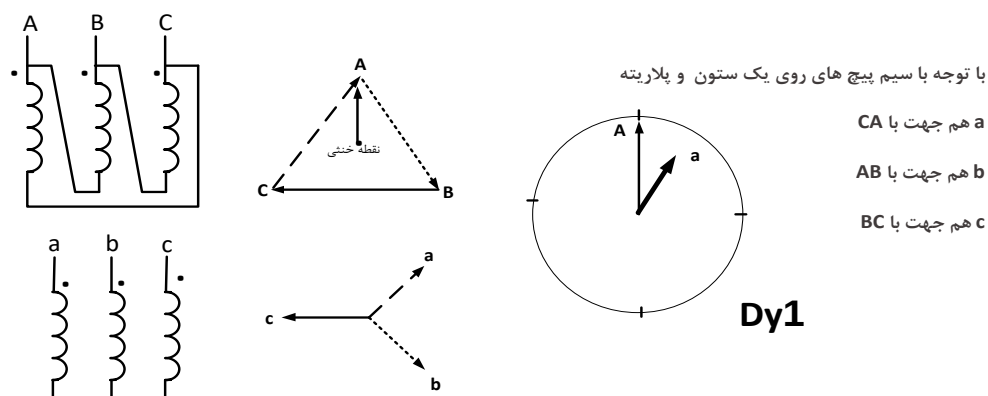


۲-

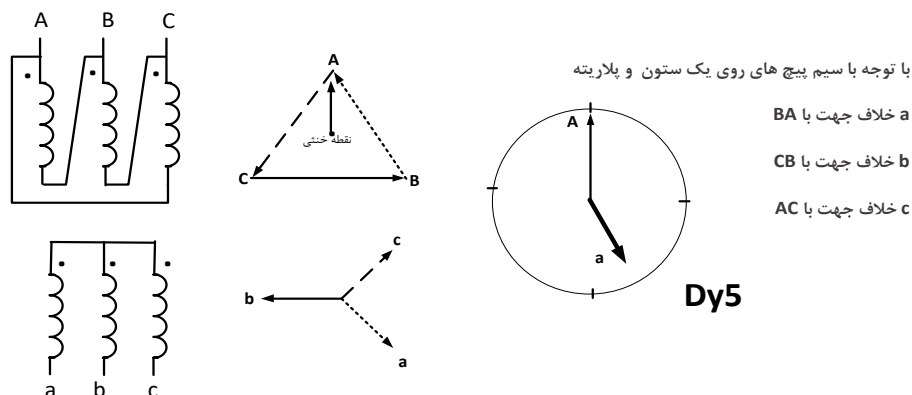


مثال - گروه برداری اتصالات مثلث- ستاره زیر را بدست آورید.

۱-



۲-



د) گروه برداری اتصال زیگزاگ

د-۱) اگر اتصال زیگزاگ در سمت ثانویه باشد (که معمولاً در عمل هم همین طور هست) برای بدست آوردن بردار یک فاز مثلاً فاز a باید بررسی شود که این فاز از جمع ولتاژ کدام نیم سیم پیچ ها بدست آمده است و هر کدام از این نیم سیم پیچ ها در راستای کدام ولتاژ اولیه هستند. بعد از مشخص شدن آن ساعت ترانس بدست می آید.

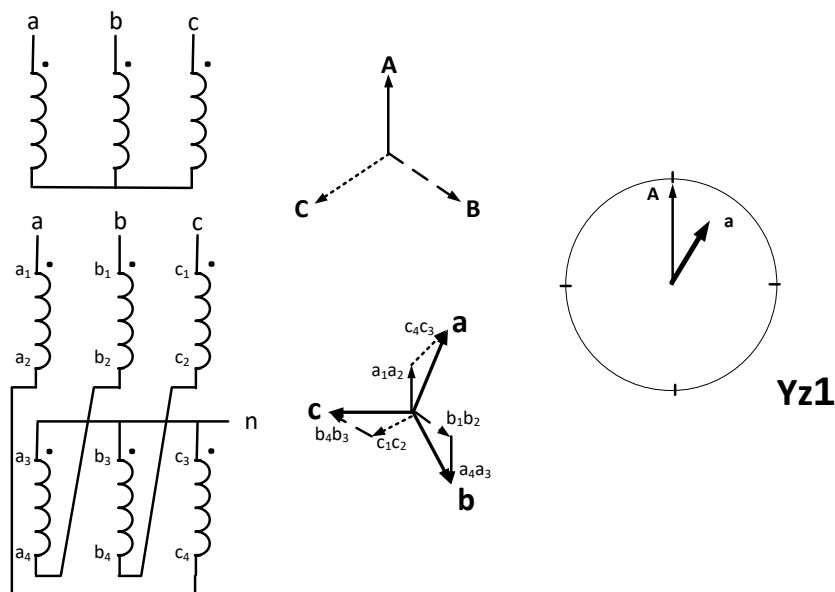
مثال ۱: ترانس زیر با اتصال ستاره- زیگزاگ مفروض است گروه برداری آن را بیابید.

طبق اتصال اولیه که ستاره است یک مجموعه بردار با اختلاف ۱۲۰ با نام های A، B و C برای اولیه رسم می کنیم. برای ثانویه نیز باید بررسی شود کدام نیم سیم پیچ با کدام فاز اولیه در یک راستا یا در فاز مقابل است و هر فاز ثانویه از برآیند بردارهای نیم سیم پیچ های آن بدست می آید. با توجه با سیم پیچ های روی یک ستون و پلاریته آنها داریم:

a_1a_2 هم جهت با A و c_4c_3 خلاف جهت با C که برآیند این دو a می شود.

b_1b_2 هم جهت با B و a_4a_3 خلاف جهت با A که برآیند این دو b می شود.

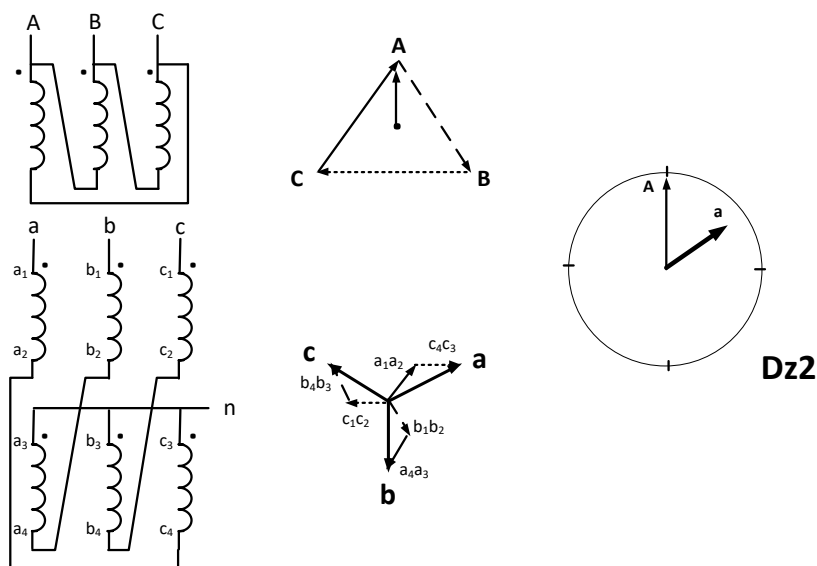
c_1c_2 هم جهت با C و b_4b_3 خلاف جهت با B که برآیند این دو c می شود.



مثال ۲: ترانس زیر با اتصال مثلث- زیگزاگ مفروض است گروه برداری آن را بیابید.

یک مثلث مرجع برای اولیه رسم می کنیم. چون C به A وصل شده است بردار CA داریم که جهت پیکان را نشان می دهد سایر پیکان ها به همین ترتیب بدست می آید. ثانویه نیز به صورت زیر خواهد بود:

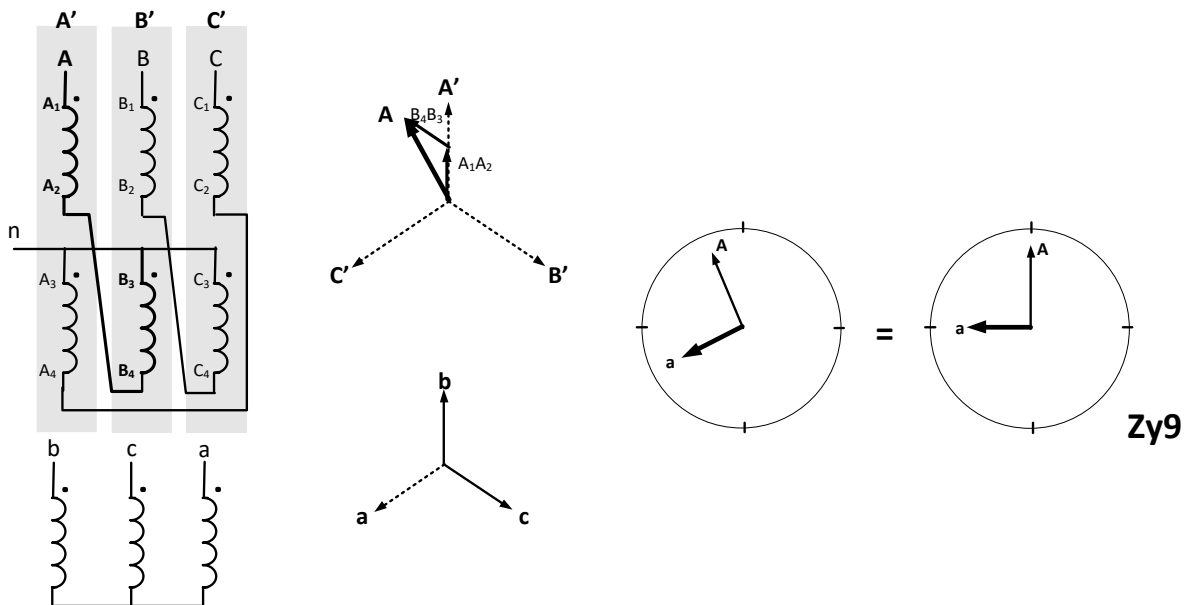
a_1a_2 هم جهت با CA و c_4c_3 خلاف جهت با BC که برآیند این دو a می شود.
 b_1b_2 هم جهت با AB و a_4a_3 خلاف جهت با CA که برآیند این دو b می شود.
 c_1c_2 هم جهت با BC و b_4b_3 خلاف جهت با AB که برآیند این دو c می شود.



د-۲) اگر اتصال زیگزاگ در سمت اولیه باشد: یک دسته بردار با نام های A' ، B' و C' با اختلاف فاز 120° درجه به عنوان مرجع در نظر گرفته می شود و بردار هر فاز مثلاً فاز A از برآیند بردار دو نیم سیم پیچ تشکیل دهنده آن بدست می آید و این بردار بر روی ساعت ۱۲ به عنوان عقربه دقیقه شمار فرض می شود در صورتی که ممکن است بر روی ۱۲ نباشد و در نهایت اختلاف آن با عقربه ساعت شمار لحاظ شده و ساعت ترانس بدست خواهد آمد.

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

بردارهای مرجع را با نام های A' ، B' و C' در نظر می گیریم. بردار فاز A اولیه از برآیند ولتاژ دو نیم سیم پیچ A_1A_2 و B_4B_3 بدست می آید که اولی در جهت A' و دومی خلاف جهت B' است. بردار بدست آمده فاز A اولیه است که باید بر روی ساعت ۱۲ باشد. برای بدست آوردن بردار a ثانویه، مشاهده می شود که این بردار در راستای ستون سوم اولیه است و باید با آن هم فاز باشد یعنی با C' هم فاز است. در نهایت با رسم بردارهای فاز A اولیه و فاز a ثانویه ساعت ترانس به صورت زیر بدست می آید.



توجه: در بحث گروه برداری ۲ حالت وجود دارد:

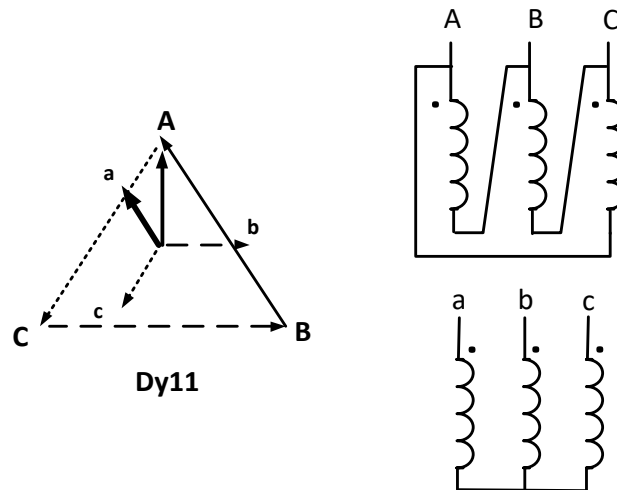
۱- اتصالات ترانس معلوم و گروه برداری مجهول باشد که در این حالت جواب منحصر به فرد خواهیم داشت.

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.

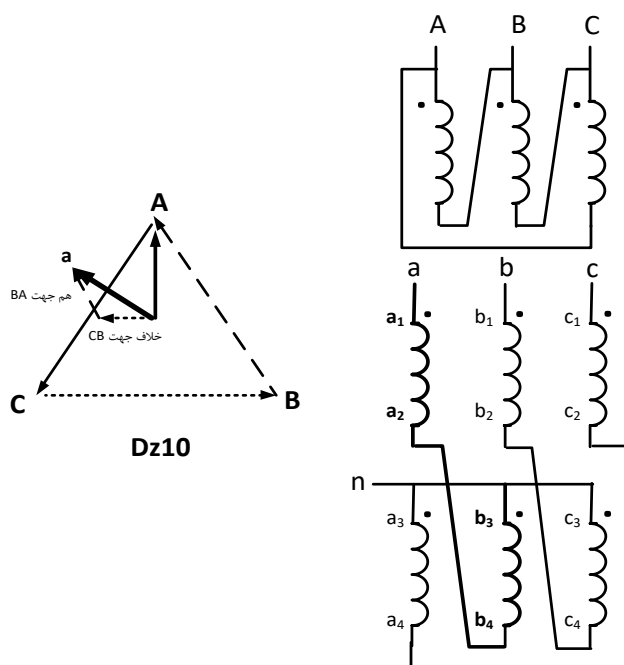
مثال: گروه برداری $Dy11$ و $Dz10$ مفروض است، اتصالات ترانس را بدست آورید.

$Dy11$: 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 اتصالات مثلث اولیه بر این اساس رسم می‌شود. سپس بردار a چنان 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

سیم پیچ دیگر (b_4b_3) خلاف اتصال CB اولیه است (سرنقطه دار مخالف آن است). با این مفروضات ثانویه که اتصال زیگززاگ است قابل رسم است.



۵-۱۱- موازی کردن ترانس های سه فاز با گروه برداری متفاوت

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

از نظر گروه برداری مطابق استانداردهای بین المللی (IEC76-4) ترانس های سه فاز به چهار دسته تقسیم می شوند:

- 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- ترانس های هر دسته با یکدیگر قابل موازی شدن هستند.
- ۲- ترانس های دسته اول و دوم با هیچ دسته ای قابل موازی شدن نیستند.
- ۳- ترانس های دسته سوم و چهارم با یکدیگر قابل موازی شدن هستند.

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

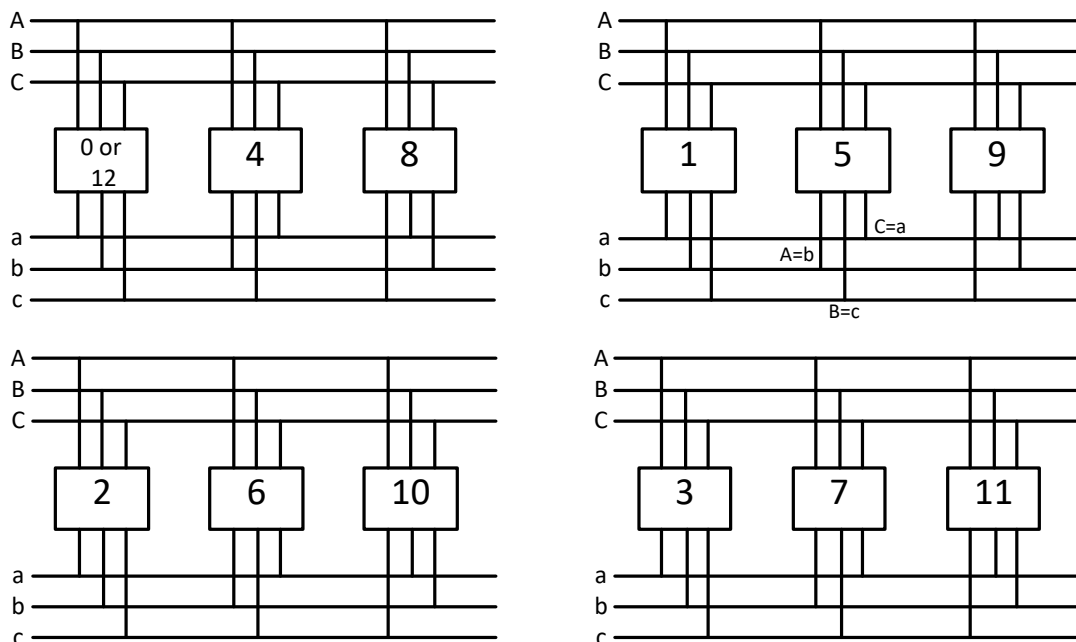
- ۱- ترانس با گروه برداری x در توالی مثبت دارای گروه برداری $12-x$ در توالی منفی است. ترانس های دسته سوم و چهارم با این تغییر قابل موازی شدن می شوند.
- ۲- اگر نام گذاری فازها عوض شود، ترانس با گروه برداری x به $x+4$ و یا $x-4$ تبدیل می شود. ترانس های هر دسته با این کار قابل موازی شدن با یکدیگر هستند چون این کار ۴ ساعت تغییر ایجاد می کند.

• موازی کردن با تغییر نام گذاری

برای جابجا کردن گروه برداری ترانس به اندازه ۴ ساعت کفایت ثانویه آن را به جای abc ، bca در نظر گرفته و به ترانس دیگر وصل کنیم، با این کار ۴ ساعت گروه برداری به عقب رفته یعنی می توان 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 می شوند، 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 ۱ وصل کنیم.

یا اینکه به جای 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 می توانیم آن را می توانیم 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 می شوند، 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 ترانس هایی که با یکدیگر ۴ ساعت اختلاف دارند آورده شده و با استفاده از تغییر نام گذاری اتصال موازی آنها به یکدیگر نشان داده شده است.

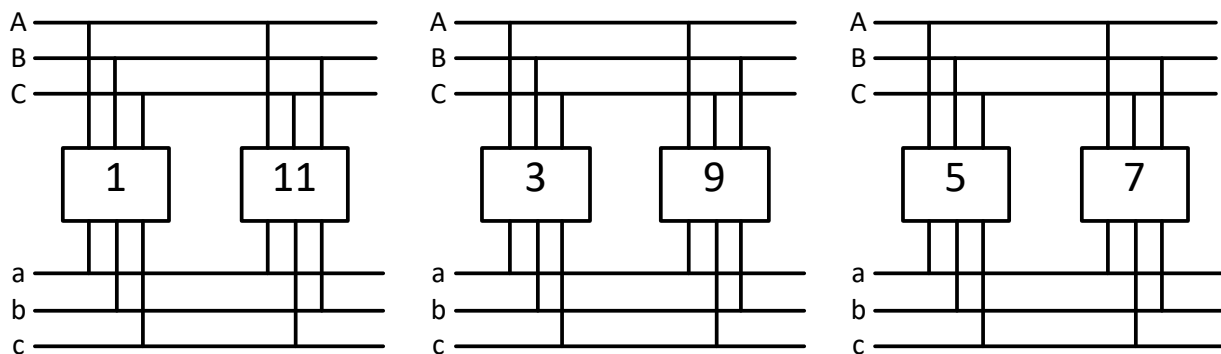
در شکل های زیر ترانس هایی که با این روش موازی می شوند نشان داده شده و سربندی آنها انجام شده است.



• 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 می کند. یعنی کفایت اولیه و ثانویه آن را به جای abc , bac در نظر گرفته و به ترانس دیگر وصل کنیم. یعنی می توان ترانس با ساعت ۱۱ 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 شکل های زیر ترانس هایی که با این روش موازی می شوند نشان داده شده و سربندی آنها انجام شده است.



نکته مهم: به نظر می رسد ترانس های 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 می توان موازی کرد. در حالت کلی این کار را زمانی می توان انجام داد

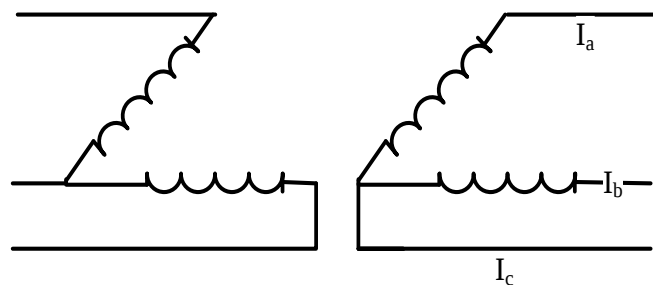
که هر ۱۲ سر سیم پیچ های ترانس در دسترس باشد. اما اگر تنها ۶ سر در دسترس باشد نمی توان تنها با تغییر اتصالات خارجی این کار را انجام داد.

۵-۱۲- اتصالات خاص

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

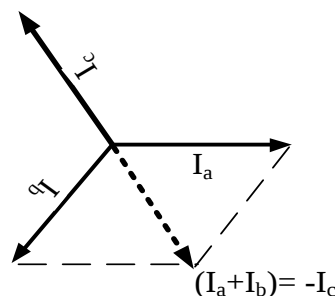
۱- اتصال مثلث باز یا V-V

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



شکل (۲۹): اتصال مثلث باز یا V-V

در صورت قطع شدن یک فاز مثلث جریان یک سیم پیچ صفر می شود اما جریان خط در این حالت همان جریان فاز خواهد بود. به عبارت دیگر به جای اینکه جریان خط رادیکال ۳ برابر جریان فاز باشد در این اتصال جریان خط برابر جریان فاز است. در شکل بالا به وضوح مشخص است که جریان خط اول و دوم همان I_a و I_b است و جریان خط سوم نیز منفی برآیند این دو است که دقیقاً با هر کدام از لحاظ اندازه برابر و ۱۲۰ درجه اختلاف فاز دارد که در شکل زیر نشان داده شده است.



اما همان طور که گفته شد توان انتقالی در این حالت نسبت به اتصال مثلث- مثلث کاهش می یابد چون جریان خط برابر با جریان فاز می شود و همچنین ضریب بهره برداری نیز کمتر از ۱ خواهد شد که در زیر محاسبه شده اند.

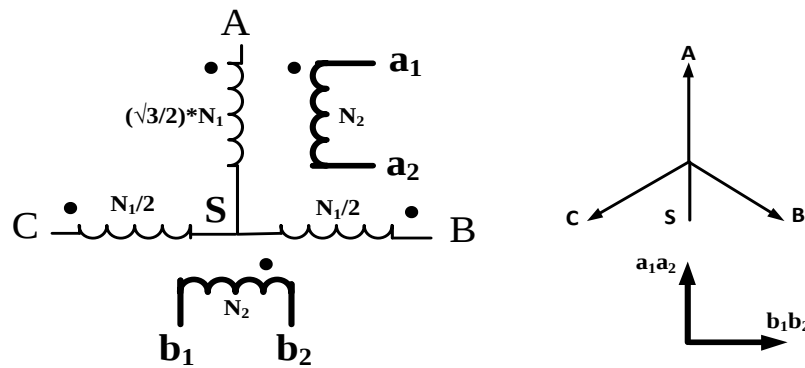
$$\frac{S_{vv}}{S_{\Delta\Delta}} = \frac{\sqrt{3} \times V_{ph} \times I_{ph}}{\sqrt{3} \times V_{ph} \times \sqrt{3} \times I_{ph}} = 0.57$$

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

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

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 می شود. این ترانس در اولیه باید دارای سر وسط باشد. در این ترانس یک ولتاژ سه فاز ABC به اولیه اعمال می شود.



شکل (۳۰): اتصال اسکات یا T

اتصال اولیه به صورت T بوده که دو سیم پیچ آن دارای تعداد دور $N_1/2$ و دیگری دارای تعداد دور $(3/2) \times N_1$ یعنی حدود $0.85 N_1$ است. ثانویه نیز دارای دو سیم پیچ مجزا با ترمینال های a_1a_2 و b_1b_2 است که تعداد دور هر کدام N_2 می باشد. با استفاده از اثبات زیر نشان خواهیم داد که ثانویه ولتاژ ۲ فاز با اختلاف ۹۰ درجه ایجاد می کند.

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

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

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

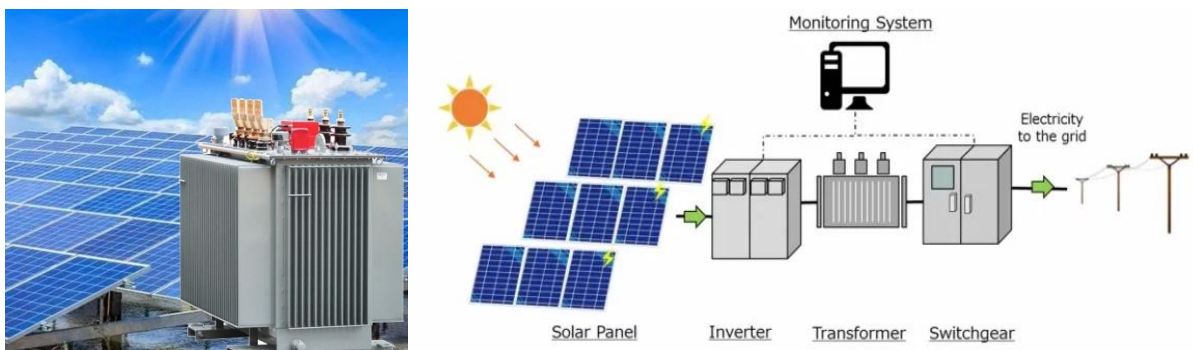
ملاحظه می شود که اندازه V_{a1a2} و V_{b1b2} باهم برابر است و از آنجاکه V_{AS} بر V_{BC} عمود است ولتاژهای متناظر با آنها نیز ۹۰ درجه اختلاف دارند که همان ولتاژ ثانویه است.

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

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

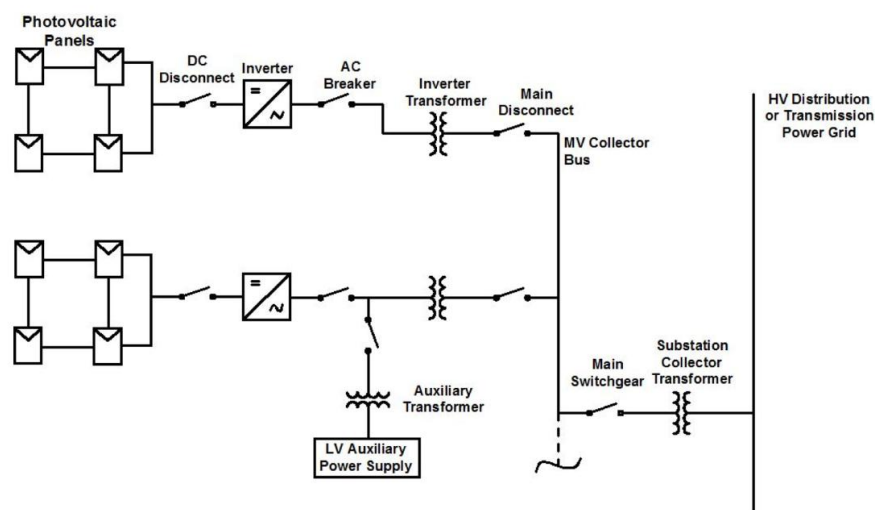
۵-۱۳- ترانسفورماتور سیستمهای خورشیدی متصل به شبکه

در یک نیروگاه خورشیدی چند ترانس کاربرد دارد: ترانسفورماتورهای اینورتر، ترانسفورماتورهای قدرت کمکی و ترانسفورماتورهای پست. این بخش عمدتاً بر روی ترانسفورماتورهای اینورتر متمرکز شده است که میتواند از نوع روغنی یا خشک باشد. ماژول های فتوولتائیک معمولاً می توانند 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 است. اینورتر متعاقباً به ترانسفورماتور اینورتر سیستم فتوولتائیک متصل می شود.

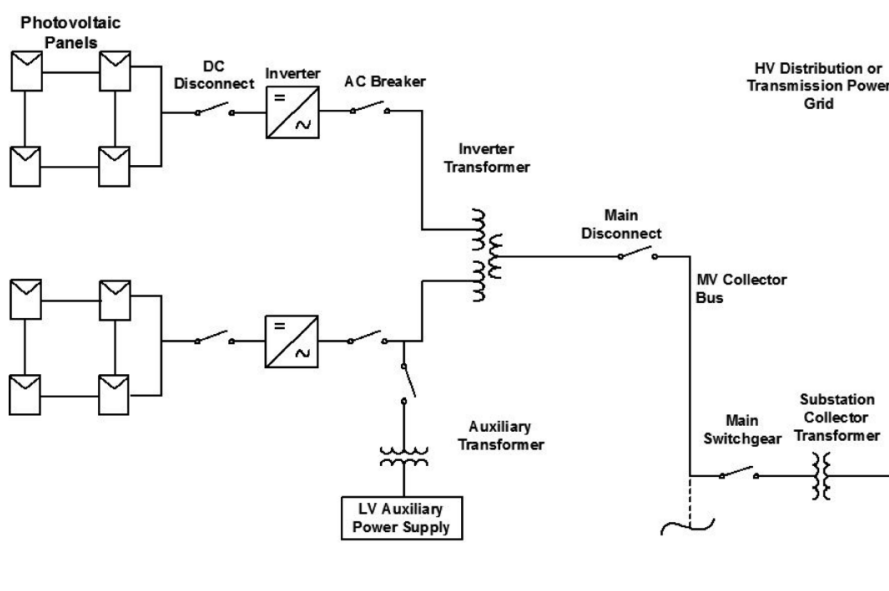


شکل (۳۱): ترانسفورماتور خورشیدی

ترانسفورماتور اینورتر در درجه اول به عنوان یک ترانسفورماتور افزایش دهنده استفاده می شود که ولتاژ ورودی را در محدوده ۳۶ کیلو ولت یا بالاتر تغییر می دهد. ولتاژ خروجی ترانسفورماتور اینورتر به یک شین جمع کننده متصل می شود که می تواند بار 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 شبکه توزیع یا سطح انتقال بالا می برد. شکل ۱ و 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 (۳۲): استفاده از ترانسفورماتورهای دو سیم پیچ بعد از اینورتر



شکل (۳۳): استفاده از ترانسفورماتورهای سه سیم پیچ 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 هارمونیک معمولی کمتر از ۵٪ است. هارمونیک نسبتاً 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 می تواند 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 ۷- هارمونیک های مجاز ترانس سه سیم پیچه

Individual harmonic order h (odd harmonics) ^a	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	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 سوئیچینگ 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.

۵-۱۴- تپ چنجر Tap Changer

وقتی بار گذاری افزایش می یابد ولتاژ افت می کند. 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 می شوند.

تپ چنجرهای 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 چنجرها معمولاً با توجه به نیاز و متناسب با نوسانات بار در فصول مختلف سال انجام می گیرد.

تپ چنجرهای 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 می شود. 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 ادوات مختلفی نصب گردیده همچون کنتاکتور ها، سوئیچهای محدود کننده، بی متال، رله کنترل فاز، نشان دهنده ها، 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 می شود.

۳- Switch Diverter : کلید برگردان، مکانیزمی است که محرک اصلی آن قدرت فنی 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 قرار می گیرند. در ایران این نوع تپ چنجرها برای ترانسفورماتورهای با ولتاژ سمت فشار قوی ۶۳ کیلوولت و در تحت شرایطی در ۱۳۲ کیلوولت مورد استفاده می-باشند.

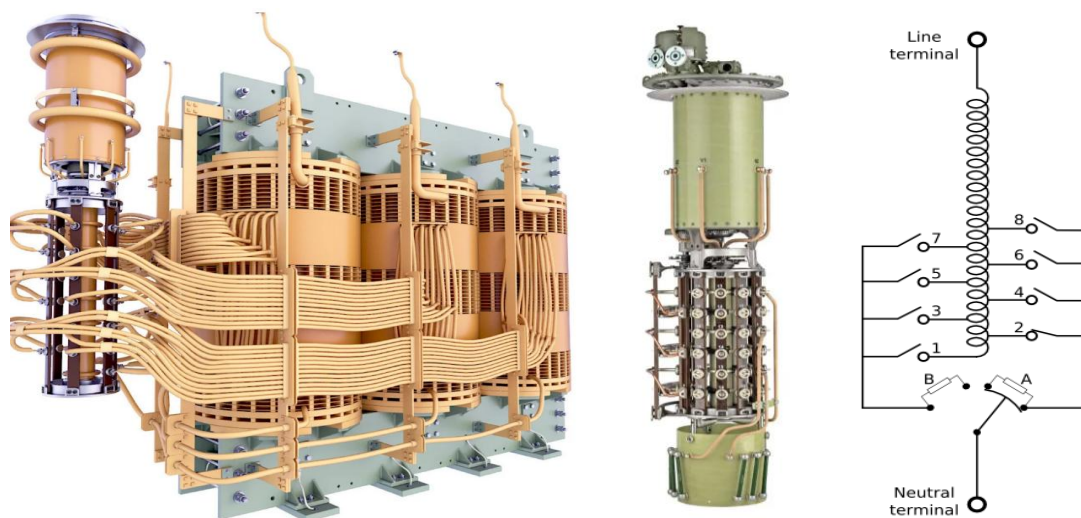
ب- تپ چنجر از نوع تپ سلکتور- دایورتر (Tap selector – Diverter) که در این نوع دایورتر سوئیچ به صورت مستقل در داخل مخزن روغن جداگانه ای که از روغن ترانسفورماتور کاملاً مجزا است قرار دارد. در این نوع تپ چنجر سلکتور از دایورتر کاملاً جدا و در داخل روغن ترانسفورماتور است. این نوع تپ چنجرها برای ولتاژهای تا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

• 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 می شود. این فرمان از طریق محورهای عمودی و افقی و جعبه دنده های مربوطه به تپ سلکتور (یا سلکتور سوئیچ) منتقل می گردد. پس از انتخاب تپ مورد نظر توسط تپ سلکتور که در شرایط بدون بار انجام می شود دایورتر سوئیچ نسبت به انتقال جریان از یک تپ به تپ بعدی عمل می نماید. زمان کل عملکرد تپ چنجر معمولاً از ۳ الی ۵/۵ ثانیه می باشد 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 می پذیرد. باید اضافه نمود که سرعت عملکرد تپ چنجر در تغییر تپ کاملاً مستقل از سرعت موتور درایو می باشد 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 طراحی 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 (دقیقاً مانند عملکرد کلید 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 (۳۴): 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 کاملاً توجه نمود. پلاک به صفحه ای فلزی اطلاق میشود که روی بدنه ترانسفورماتور (معمولاً سمت فشار ضعیف) نصب می شود و مشخصات مربوطه به ترانسفورماتور روی آن چاپ یا حک میشود.

SHERKATE SAHAMI AAM

IRAN-TRANSFO



شرکت سهامی عام

ایران ترانسفو

Type **TSUN6339** No. Year **2001** **IEC76/VDE0532**

Rated power kVA **2000** Kind **P.T** Frequency Hz **50**

6300 Kind of service **CONT.**

Rated voltage V **6000** **400** Vector group **Dyn11**

5700 Sys. highest voltage **7.2/1.1**

Rated current A **192.5** **2886.8** Insulation class **A**

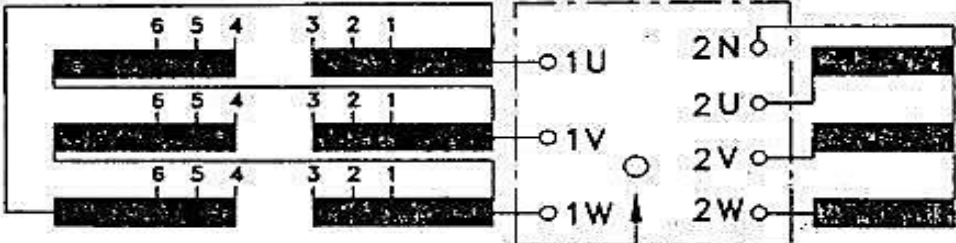
Impedance voltage % Short circuit current kA

Cooling method **ONAN** Max. short circuit duration s **2**

Mass of core & winding t **2.611** Max. ambient temperature °C **50**

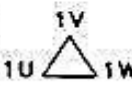
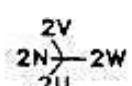
Total weight t **6.205** Sea level altitude m **1000**

Oil weight t **1.32** Oil IEC 296 class **I**



Off circuit tap changer

Caution!: tapping is permissible only in off circuit

HV side				LV side	
Pos.	Tap changer Connections	Voltage	Connection	Voltage	Connection
1	3 - 4	6300		400	
2	4 - 2	6150			
3	2 - 5	6000			
4	5 - 1	5850			
5	1 - 6	5700			

MADE IN IRAN

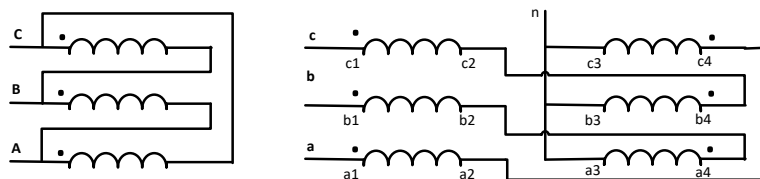
ساخت ایران

253025

شکل (۳۵): یک نمونه پلاک ترانس

تمرینها

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



۲- یک ترانس ستاره مثلث دارای نسبت تبدیل $20000/400$ ولت است. اگر اولیه آن ۱۰۰۰ دور داشته باشد سیم پیچ ثانویه چند دور دارد.

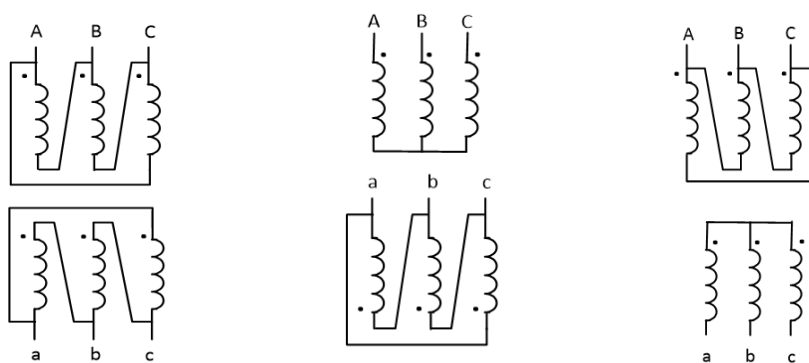
۳- علت بوجود آمدن هارمونیک در ترانس سه فاز را مختصراً توضیح دهید.

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

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

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

۶- گروه برداری ترانس زیر را بدست آورید.



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

۸- می خواهیم ترانس های ۷ و ۱۱ و ترانس های 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؟

ماشین‌های سنکرون

۶-۱- مقدمه

بعد از موتور القایی پرکاربردترین ماشین در صنعت، ماشین سنکرون است. سنکرون بدین معنی است که با توجه به نوع استفاده از این ماشین (ژنراتوری یا موتوری) سرعت روتور و سرعت چرخش میدان استاتور همزمان (سنکرون) است. همان‌طور که از نام این ماشین مشخص است مهم‌ترین مزیت این ماشین ثابت بودن سرعت چرخش ماشین می‌باشد، به همین علت بیشتر به‌عنوان ژنراتور با سرعت ثابت در نیروگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل زیر یک نمونه ژنراتور سنکرون که قادر به تولید 370 – 545 MVA با بازده حدود ۹۹ درصد که استاتور آن از نوع خنک شونده با آب و روتور آن از نوع خنک شونده با هوا است، نشان داده شده است.



شکل (۶-۱): ژنراتور سنکرون

از آنجاکه سرعت چرخش روتور باید مقدار ثابتی باشد از این ماشین معمولاً به‌عنوان موتور استفاده نمی‌شود، چون موتور باید بتواند بار مکانیکی را در سرعت‌های مختلف بچرخاند مگر اینکه برای بارهای ثابت مورد استفاده قرار گیرد. در هر حالت سرعت چرخش روتور ثابت و برابر با سرعت میدان روتور و استاتور است و با رابطه زیر بیان می‌شود که P تعداد قطب‌ها و f فرکانس ولتاژ استاتور است.

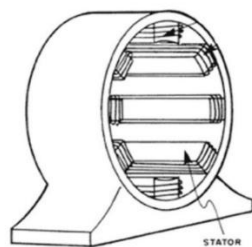
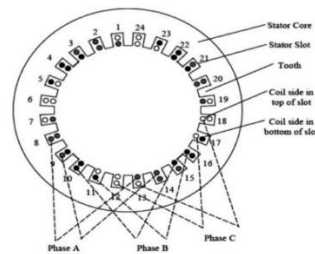
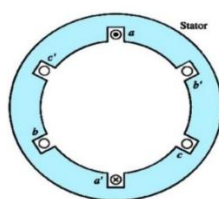
$$N_s = N_r = N_m = \frac{120 \times f}{p}$$

۲-۶- اجزا ماشین سنکرون

الف) استاتور

استاتور در واقع قسمت ثابت ماشین است که در حالت موتوری به سیم‌پیچ‌های آن تغذیه سه فاز داده می‌شود و در حالت ژنراتوری از آن‌ها تغذیه سه فاز گرفته می‌شود، به همین علت به آن آرمیچر گفته می‌شود (برعکس ماشین DC که به روتور آن تغذیه داده یا گرفته می‌شد و روتور آرمیچر بود).

استاتور ماشین سنکرون شبیه به استاتور ماشین القایی می‌باشد یعنی یک استوانه توخالی با شیارهایی در طول استوانه برای تعبیه سیم‌پیچ‌ها، که به صورت سه فاز است. یعنی برای هر فاز حداقل دو شیار یکی برای مسیر رفت و دیگری برای مسیر برگشت وجود دارد. اما تعداد شیارها بیش از این است، زیرا که برای ایجاد یک میدان سینوسی در فضای داخل استاتور سیم‌پیچ‌ها باید به صورت توزیع شده باشند و با تعداد مشخص که در فصل یک توضیح داده شد در شیارها قرار می‌گیرند. شکل زیر به ترتیب از چپ به راست نمونه ساده استاتور، نمونه کامل‌تر با تعداد شیارهای بیشتر، شکل سه‌بعدی استاتور و شکل واقعی آن را نشان می‌دهد.



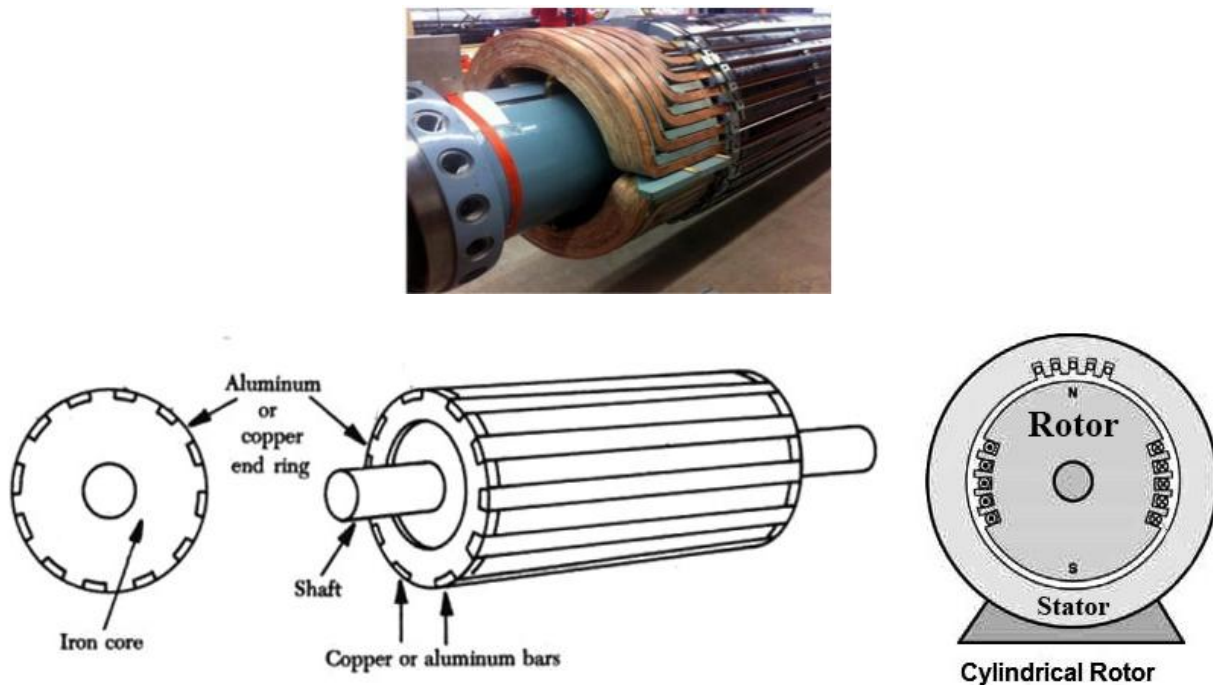
شکل (۲-۶): استاتور ماشین سنکرون

الف) روتور

روتور ماشین سنکرون درون استاتور قرار می‌گیرد و یک تغذیه DC برای تحریک آن و ایجاد میدان مغناطیسی به سیم‌پیچ‌های آن وصل می‌شود. روتور در حالت ژنراتوری باید با سرعت سنکرون چرخانده شود و در حالت موتور با سرعت سنکرون می‌چرخد. روتور به دو صورت استوانه‌ای و قطب برجسته ساخته می‌شود.

الف-۱) روتور استوانه‌ای

روتور استوانه‌ای یک استوانه از جنس مواد فرومغناطیس است که در طول آن شبیه به استاتور شیارهایی برای تعبیه سیم‌پیچ‌های آن ایجاد شده است. در شکل زیر به ترتیب از چپ به راست سطح مقطع روتور استوانه‌ای، شکل سه‌بعدی روتور استوانه‌ای و قرارگیری روتور در استاتور نشان داده شده است.



شکل (۳-۶): روتور استوانه‌ای

ویژگی‌های روتور استوانه‌ای:

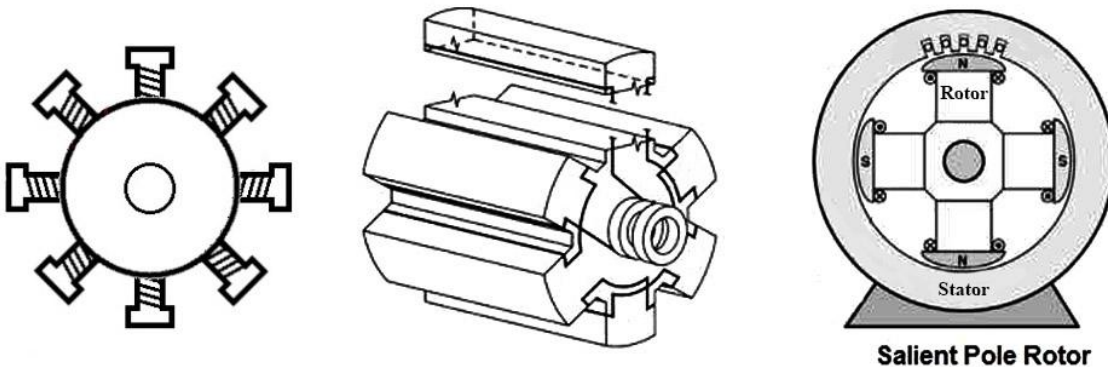
- ۱- تعداد قطب آن کمتر از ۴ تا است.
- ۲- از آنجاکه سرعت سنکرون با تعداد قطب رابطه عکس دارد سرعت چرخش آن بالا است. این نوع روتور در ژنراتور نیروگاه بخار استفاده می‌شود.

۳- سیم‌پیچی تحریک در شیارهای طولی روی آن قرار می‌گیرد،

۴- طول آن‌ها بیشتر از قطرشان است تا در چرخش با سرعت بالا مشکل بالانس نداشته باشند.

الف- (۱) روتور قطب برجسته

این روتور دارای سطح مقطع دایره نیست و قطب‌های آن نسبت به سطح روتور پیش‌آمدگی دارند که به آن‌ها کفشک گفته می‌شود و سیم‌پیچ‌ها به دور آن‌ها پیچیده شده است. در شکل زیر به ترتیب از چپ به راست سطح مقطع روتور قطب برجسته، شکل سه‌بعدی آن و قرارگیری روتور در استاتور نشان داده شده است.



شکل (۴-۶): روتور قطب برجسته

ویژگی‌های روتور قطب برجسته:

۱- تعداد قطب زیاد ۲۴، ۳۶، ۴۸ و ...

۲- تعداد قطب بالا سرعت کم را نتیجه می‌دهد بنابراین در نیروگاه‌هایی که سرعت توربین کم است استفاده می‌شود، مانند نیروگاه آبی.

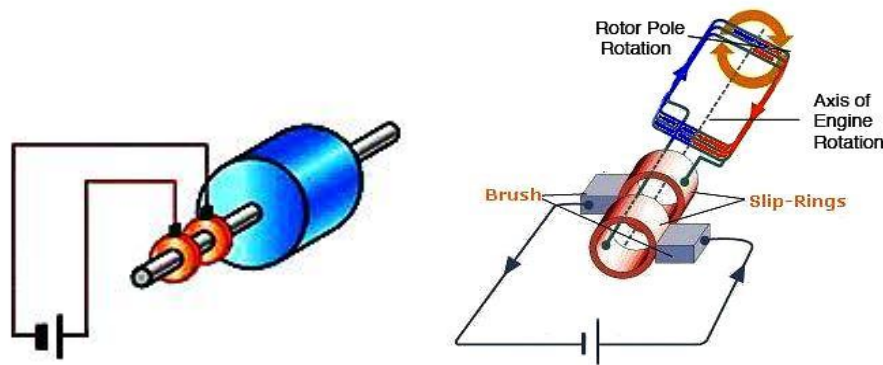
۳- سیم‌پیچی تحریک به دور هر قطب پیچیده می‌شود،

۳-۶- روش‌های تغذیه روتور

روتور در حال چرخش است و از طرفی باید به یک منبع DC متصل باشد. بنابراین برای انتقال جریان به روتور در حال حرکت باید تمهیداتی انجام شود که در ادامه بررسی خواهند شد.

۱-۳-۶- استفاده از حلقه‌های لغزان

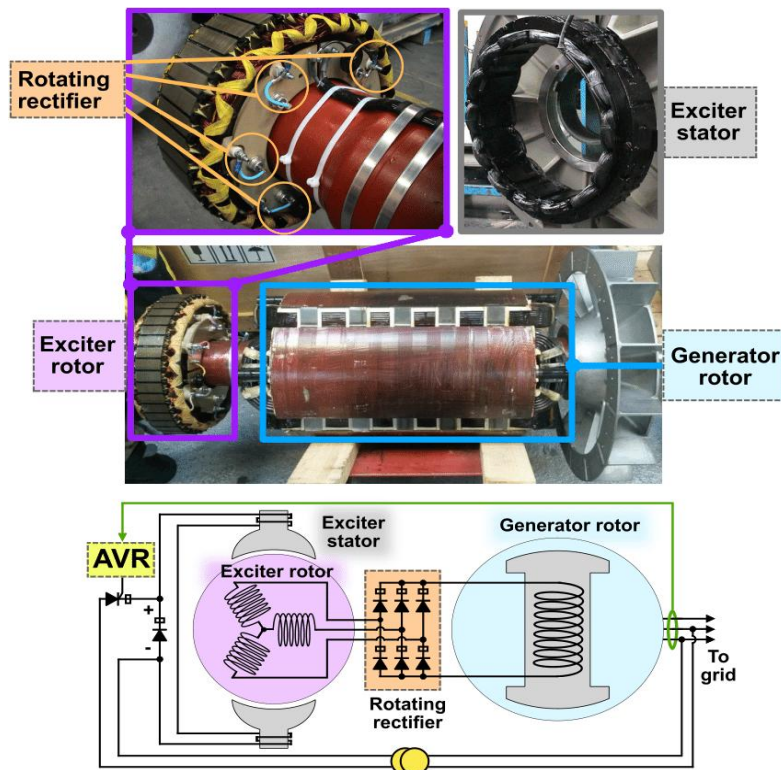
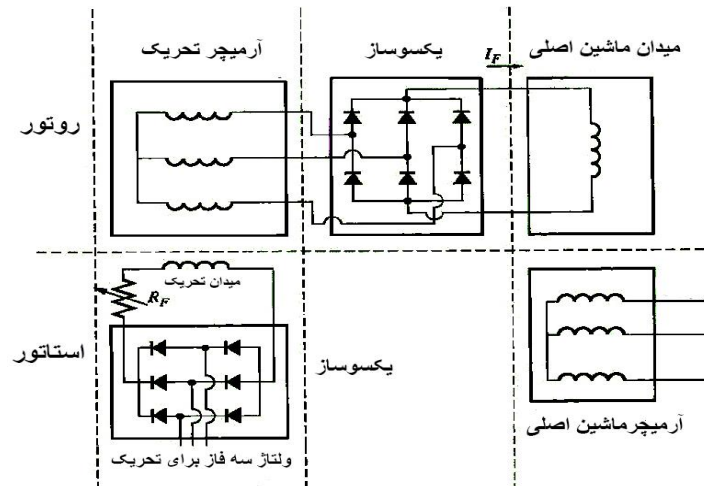
ساده‌ترین و قدیمی‌ترین روش استفاده از حلقه‌های لغزان شبیه آنچه که در ماشین DC وجود داشت، است. اما این روش به علت وجود جاروبک نیاز به تعمیر و نگهداری دارد و از طرفی مقداری توان در جاروبک‌ها که به روتور در حال چرخش چسبیده‌اند تلف می‌شود. در شکل زیر نمونه ساده این طرح نشان داده شده است.



شکل (۵-۶): تحریک با استفاده از حلقه‌های لغزان

۲-۳-۶- تحریک بدون جاروبک

در ژنراتورهای بزرگ به علت معایب حلقه‌های لغزان از روش بدون جاروبک (براش لس) استفاده می‌شود. در این روش از یک ژنراتور سنکرون کوچک استفاده می‌شود. میدان این ژنراتور بر روی استاتور قرار دارد و از طریق یک منبع سه فاز تأمین می‌شود و بعد از یکسو شدن یک جریان DC را برای میدان فراهم می‌آورد. آرمیچر این ژنراتور بر روی روتور قرار دارد که از یک سیم‌پیچی سه فاز تشکیل شده است و به همراه روتور می‌چرخد. با چرخش آن و وجود میدان ولتاژ سه فاز ایجاد می‌شود. این ولتاژ سه فاز یکسویه شده و میدان ژنراتور اصلی را فراهم می‌کند و به روتور ژنراتور اصلی متصل است. در شکل زیر این نوع تحریک نشان داده شده است.

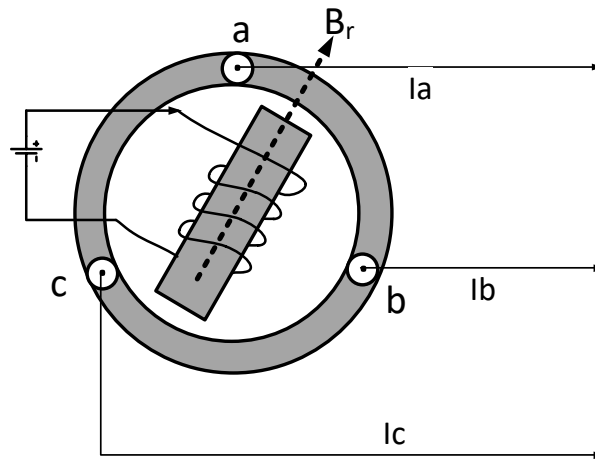


شکل (۶-۶): تحریک بدون جاروبک

۴-۶- تولید ولتاژ در ماشین سنکرون (عملکرد ژنراتوری)

در حالت ژنراتوری سیم‌پیچ‌های استاتور در مقابل میدان روتور قرار می‌گیرند. این میدان دارای اندازه ثابت است اما به علت اینکه گردان است طبق قانون فارادی در سیم‌پیچ‌ها ولتاژی القا می‌شود که با مشتق شار روتور و تعداد دور سیم‌پیچ استاتور رابطه مستقیم دارد. با چرخش روتور به ترتیب میدان آن از سیم‌پیچ‌های هر فاز عبور

کرده و با توجه به اینکه با فاصله مکانی ۱۲۰ درجه در استاتور واقع شده‌اند ولتاژهای سه فازی با اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه در آن‌ها القا می‌شود. البته لازم به ذکر است که سیم‌پیچ هر فاز به صورت توزیع شده سینوسی شبیه آنچه که در فصل اول گفته شد انجام شده است تا ولتاژ القایی سینوسی باشد. اگر ژنراتور به بار متصل باشد جریان‌های سه فاز در آن جاری می‌شود.



شکل (۶-۷): پایانه‌های استاتور و روتور

بنابراین ولتاژهای القایی در هر فاز و سایر روابط به صورت زیر خواهد بود. با توجه به اینکه سیم‌پیچ‌ها به صورت سینوسی توزیع شده هستند، شار دربرگیرنده هر کدام نیز به صورت سینوسی خواهد بود.

$$\varphi_r = \varphi_m \cos \omega t$$

$$E_a = -N \frac{d\varphi_r}{dt} = N\varphi_m \omega \sin \omega t = E_m \sin \omega t$$

بنابراین ولتاژهای سه فاز که با هم ۱۲۰ درجه اختلاف فاز مکانی دارند به صورت زیر خواهد بود

$$E_a = E_m \sin \omega t$$

$$E_b = E_m \sin(\omega t - 120)$$

$$E_c = E_m \sin(\omega t - 240)$$

$$E_m = N\varphi_m \omega \Rightarrow E_{rms} = \frac{N\varphi_m \omega}{\sqrt{2}} = \frac{N\varphi_m 2\pi f}{\sqrt{2}} = 4.44 N\varphi_m f$$

مشاهده می‌شود دامنه ولتاژ القایی هر سیم‌پیچ به سه پارامتر تعداد دور سیم‌پیچ استاتور، شار ایجاد شده توسط روتور و فرکانس وابسته است. در ماشین سنکرون باید سرعت ثابت باشد بنابراین فرکانس هم طبق رابطه اول فصل ثابت است. تعداد دور سیم‌پیچ‌ها نیز یک بار انجام شده و قابل تغییر نیست. اما با تغییر شار روتور که با تغییر جریان روتور انجام می‌شود می‌توان ولتاژ القایی خروجی را تنظیم کرد.

۵-۶- مدار معادل ماشین سنکرون

برای بدست آوردن مدار معادل ماشین سنکرون ابتدا باید عکس‌العمل آرمیچر بررسی و مدل شود. در ماشین سنکرون چون جریان به استاتور داده می‌شود و یا از آن گرفته می‌شود (برخلاف ماشین DC که به روتور آن جریان داده یا گرفته می‌شود)، استاتور ماشین سنکرون آرمیچر نام دارد (برخلاف ماشین DC که روتور آن آرمیچر است). بنابراین اگر باری به ژنراتور سنکرون متصل باشد جریان از سیم‌پیچ‌های استاتور عبور می‌کند. این جریان‌ها که از سیم‌پیچ‌های سه فاز عبور می‌کنند میدانی به وجود می‌آورند که میدان اصلی یعنی میدان روتور را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نتیجه ولتاژ القایی هر فاز نیز تغییر می‌کند. این اثر عکس‌العمل آرمیچر نام دارد یعنی جریان آرمیچر بر میدان به وجود آورنده آن تأثیر می‌گذارد.

می‌توان گفت دو ولتاژ در هر سیم‌پیچ القا می‌شود، یکی ناشی از میدان اصلی یا همان میدان روتور و دیگری ناشی از میدان ایجاد شده توسط جریان استاتور یا عکس‌العمل آرمیچر. میدان مغناطیسی روتور B_r ولتاژ داخلی E_a را تولید می‌کند که با آن هم‌جهت است. جریان سیم‌پیچ استاتور میدان B_s را تولید می‌کند که جهت آن با استفاده از قاعده دست راست برای سیم‌پیچ استاتور بدست می‌آید. میدان B_s ولتاژ E_{stat} را ایجاد می‌کند. بنابراین ولتاژ القایی در هر فاز جمع این دو ولتاژ خواهد بود $V_t = E_a + E_{stat}$ و میدان برآیند نیز جمعه دو میدان است یعنی $B_{net} = B_r + B_s$.

برای مدلسازی عکس‌العمل آرمیچر که ولتاژ E_{stat} را ایجاد می‌کند از دو مورد زیر استفاده می‌شود.

۱- با توجه به روابط زیر E_{stat} از جریان آرمیچر یا همان جریان بار ۹۰ درجه عقب‌تر است:

$$I_a = I_m \sin \omega t$$

$$\phi \propto I$$

$$\phi_a \propto \phi_m \sin \omega t$$

$$E_{stat} = -N \frac{d\phi_a}{dt} = -N\phi_m \omega \cos \omega t = -E_m \sin(90 - \omega t) = E_m \sin(\omega t - 90)$$

۲- مقدار E_{stat} به صورت مستقیم با I_a متناسب است. چون با افزایش جریان آرمیچر میدان ناشی از آن قوی تر شده و ولتاژ منتجه نیز افزایش می یابد.

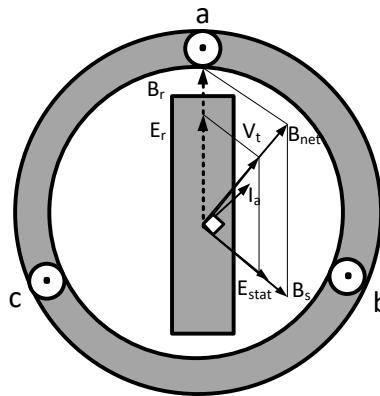
از ۱ و ۲ نتیجه می شود که ولتاژ E_{stat} با یک ضریب می تواند با I_a مرتبط شود و همچنین 90° درجه عقب تر باشد که به صورت زیر بیان می شود و X_{ar} راکتانس معادل عکس العمل آرمیچر تعریف می شود.

$$E_{stat} = -jX_{ar}I_a$$

بنابراین ولتاژ هر فاز به صورت زیر بیان می شود.

$$V_t = E_a + E_{stat} = E_a - jX_{ar}I_a$$

در شکل زیر میدان های روتور و استاتور جریان آرمیچر (که پس فاز با E_a فرض شده) و ولتاژهای القایی نشان داده شده است.



شکل (۶-۸): میدان روتور، استاتور و عکس العمل آرمیچر

توضیح اینکه B_r ابتدا E_a را به وجود می آورد. با فرض یک جریان I_a پس فاز با این ولتاژ میدان B_s 90° درجه عقب تر از این جریان طبق قاعده دست راست وجود آمده و ولتاژ E_{stat} القا می شود. در نهایت ولتاژ القاشده نهایی در هر فاز جمع برداری دو ولتاژ یعنی V_t است.

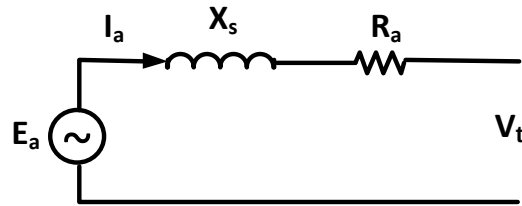
مشاهده شد که عکس العمل آرمیچر می تواند با یک راکتانس یعنی X_{ar} مدل شود. علاوه بر این راکتانس سیم پیچ استاتور نیز دارای یک راکتانس و همچنین یک مقاومت است. اگر راکتانس معادل سیم پیچ ها رو X_a و مقاومت آن ها را R_a بنامیم رابطه ولتاژ به صورت زیر خواهد بود:

$$V_t = E_a - jX_{ar}I_a - jX_aI_a - R_aI_a = E_a - j(X_{ar} + X_a)I_a - R_aI_a$$

با تعریف راکتانس سنکرون به صورت $X_s = X_{ar} + X_a$ داریم:

$$V_t = E_a - jX_s I_a - R_a I_a$$

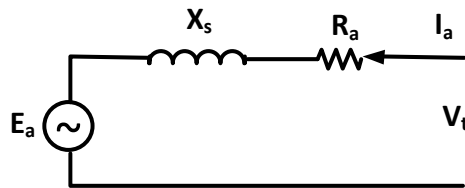
این رابطه یک KVL را نشان می‌دهد که شکل مداری آن به صورت زیر خواهد بود که مدل ژنراتور سنکرون است.



شکل (۶-۹): مدار معادل ژنراتور سنکرون

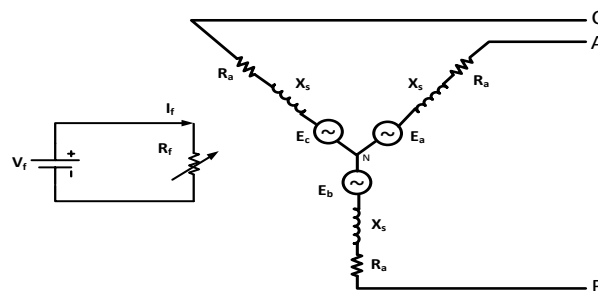
در حالت موتوری جهت جریان عکس می‌شود و از منبع خارجی وارد موتور می‌شود:

$$V_t = E_a + jX_s I_a + R_a I_a$$

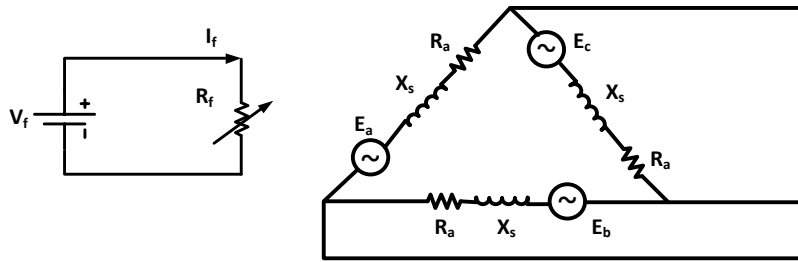


شکل (۶-۱۰): مدار معادل موتور سنکرون

این مدل برای یک فاز ماشین سنکرون است. برای سایر فازها هم به همین شکل تنها با اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه خواهد بود. سیم‌پیچی استاتور ماشین سنکرون هم به صورت ستاره بسته می‌شود و هم مثلث، که در اتصال ستاره ولتاژ خط رادیکال ۳ برابر ولتاژ فاز است و در اتصال مثلث جریان خط رادیکال ۳ برابر جریان فاز می‌باشد. لازم به ذکر است که مدار تحریک هیچ اتصال الکتریکی با مدار استاتور ندارد و تنها رابطه بین جریان تحریک و ولتاژ القایی مشخصه مغناطیس‌شوندگی $E_a - I_f$ شبیه ماشین DC است.



شکل (۶-۱۱): اتصال ستاره برای استاتور و مدار تحریک



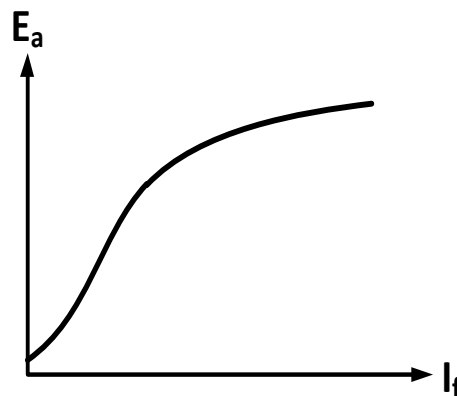
شکل (۶-۱۲): اتصال مثلث ستاره برای استاتور و مدار تحریک

۶-۶- اندازه‌گیری پارامترهای ماشین سنکرون توسط آزمایش

همان‌طور که مشاهده شد مدار معادل ماشین سنکرون دارای دو پارامتر راکتانس سنکرون و مقاومت آرمیچر (سیم‌پیچ استاتور) است. علاوه بر این دو کمیت منحنی مغناطیس شونده‌گی که رابطه بین جریان تحریک و ولتاژ القایی را نشان می‌دهد باید مشخص باشد. این موارد توسط ۳ آزمایش زیر بدست می‌آیند.

۶-۶-۱- آزمایش مدار باز برای تعیین مشخصه مغناطیس شونده‌گی

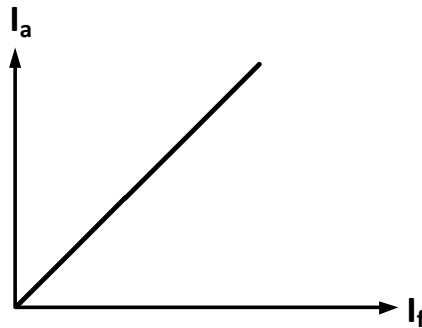
در این آزمایش ترمینال‌های ژنراتور باز و اصطلاحاً بی‌بار است و در سرعت نامی چرخانده می‌شود. جریان میدان در ابتدا صفر بوده و به تدریج افزایش می‌یابد. با هر مرحله افزایش I_f ولتاژ ترمینال V_t ثبت می‌شود و از آنجا که ژنراتور بی‌بار است و جریان آرمیچر صفر است $V_t = E_a$ می‌باشد. مقادیر ثبت شده برای I_f و $V_t = E_a$ را می‌توان روی یک منحنی رسم کرد که مشخصه بی‌باری خواهد بود. این مشخصه در ابتدا خطی است و با افزایش جریان تحریک به اشباع رفته و غیرخطی می‌شود.



شکل (۶-۱۳): مشخصه مغناطیس شونده‌گی ماشین سنکرون

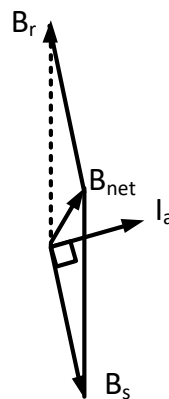
۶-۶-۲- آزمایش اتصال کوتاه برای تعیین راکتانس سنکرون

در این آزمایش ژنراتور در سرعت نامی چرخانده می‌شود. پایانه‌های ژنراتور اتصال کوتاه شده و یک آمپر متر در مسیر آن قرار می‌گیرد. جریان میدان I_f در ابتدا صفر بوده و به تدریج افزایش می‌یابد و در هر مرحله افزایش جریان آرمیچر I_a اندازه‌گیری می‌شود. اگر مقادیر ثبت شده برای جریان میدان و جریان آرمیچر روی یک منحنی رسم شوند منحنی اتصال کوتاه بدست می‌آید که در واقع یک خط راست طبق شکل زیر است.



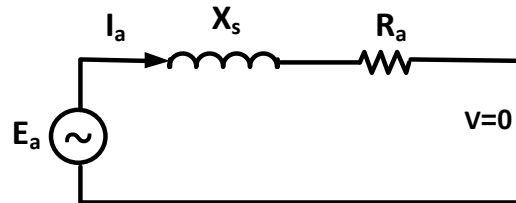
شکل (۶-۱۴): مشخصه اتصال کوتاه ماشین سنکرون

علت خطی بودن این مشخصه این است که در حالت اتصال کوتاه هیچ باری به ژنراتور متصل نیست، بنابراین فقط راکتانس سنکرون و مقاومت سیم‌پیچ‌ها در مدار است و چون $X_s \gg R_a$ زاویه جریان I_a تقریباً اختلاف 90° درجه با ولتاژ داخلی E_a و در نتیجه به علت هم‌راستا بودن این ولتاژ با میدان روتور، جریان I_a زاویه 90° درجه با B_r دارد. از طرفی میدان استاتور یا همان عکس‌العمل آرمیچر 90° درجه عقب‌تر از جریان است بنابراین اختلاف میدان استاتور B_s و B_r حدود 180° درجه است که برآیند آن‌ها B_{net} یک میدان کوچک می‌شود و ماشین به اشباع نمی‌رود و مشخصه خطی است.



شکل (۶-۱۵): میدان روتور و استاتور و برآیند آن‌ها

با استفاده از مدل مداری زیر راکتانس سنکرون محاسبه می‌شود.



$$E_a = jX_s I_a + R_a I_a$$

$$X_s \gg R_a \Rightarrow |X_s| = \frac{|E_a|}{|I_a|}$$

بنابراین برای بدست آوردن راکتانس سنکرون مراحل زیر را داریم:

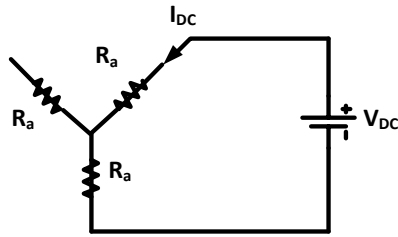
- ۱- ولتاژ داخلی E_a را به ازای یک جریان میدان I_f معین از مشخصه بی‌باری بدست می‌آید.
- ۲- جریان اتصال کوتاه I_a به ازای همان جریان میدان از مشخصه اتصال کوتاه بدست می‌آید.
- ۳- با استفاده از رابطه بالا مقدار راکتانس سنکرون از تقسیم ولتاژ داخلی بر جریان اتصال کوتاه محاسبه می‌شود.

نکته: مقدار X_s تا زمانی به‌صورت ثابت بدست می‌آید که ماشین اشباع نشده باشد. چون در حالت اشباع E_a که به ازای I_f بدست می‌آید همان E_a متناظر در شرایط اتصال کوتاه نیست و نسبت E_a/I_f برابر با X_s نمی‌شود بلکه چون E_a اشباع شده و از مقدار خطی کمتر است X_s کوچک‌تری در این حالت بدست می‌آید.

۳-۶-۶- آزمایش DC برای تعیین مقاومت آرمیچر

در هنگام سکون با اعمال یک ولتاژ DC به سیم‌پیچ استاتور و اندازه‌گیری جریان، مقدار مقاومت آرمیچر بسته به اتصال ستاره یا مثلث از رابطه زیر بدست می‌آید. اما این مقدار به علت اثر پوستی و واقعی‌تر شدن در حالت ac در یک عدد بین ۱/۱ تا ۱/۳ ضرب می‌شود. نکته اینکه چون در حالت DC راکتانس سنکرون صفر است برای جلوگیری از آسیب دیدن سیم‌پیچ‌ها مقدار ولتاژ DC از مقدار ولتاژ حالت نامی باید کمتر باشد.

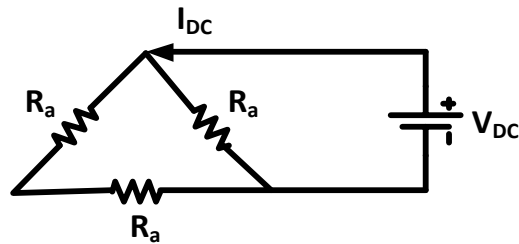
اتصال ستاره:



$$2R_{a-DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \Rightarrow R_{a-DC} = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}}$$

$$R_{a-ac} = [1.1 - 1.3] \times R_{a-DC}$$

اتصال مثلث:



$$2R_{a-DC} \parallel R_{a-DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \Rightarrow R_{a-DC} = \frac{3}{2} \frac{V_{DC}}{I_{DC}}$$

$$R_{a-ac} = [1.1 - 1.3] \times R_{a-DC}$$

مثال ۱: بر روی یک ژنراتور سنکرون ۲۰۰ کیلوولت آمپر، ۴۸۰ ولت و ۵۰ هرتز با اتصال ستاره با جریان میدان ۵ آمپر آزمایش‌های زیر انجام شده است:

۱- ولتاژ ترمینال مدار باز در جریان میدان نامی ۵۴۰ ولت اندازه‌گیری شده است.

۲- جریان خط اتصال کوتاه در جریان نامی ۳۰۰ آمپر به دست آمده است.

۳- با اعمال ولتاژ DC برابر با ۱۰ ولت جریان ۲۵ آمپر اندازه‌گیری شده است.

مقاومت آرمیچر و راکتانس سنکرون را در شرایط نامی بدست آورید. اگر در محاسبات راکتانس سنکرون از R_a صرف‌نظر نکنیم مقدار دقیق راکتانس سنکرون چقدر تغییر خواهد داشت.

حل: چون اتصال ستاره است باید برای آزمایش DC از مدار مربوط به آن استفاده شود و همچنین در محاسبات باید مقدار ولتاژ خط بر رادیکال ۳ تقسیم شود تا ولتاژ فاز بدست آید ولی جریان خط با جریان فاز برابر است. صورت سؤال مقدار مقاومت در حالت ac را نخواسته که محاسبه نمی‌شود.

$$R_a = \frac{1}{2} \frac{V_{DC}}{I_{DC}} = \frac{10}{2 \times 25} = 0.2 \, \Omega$$

در آزمایش مدار باز $E_a = V_t$

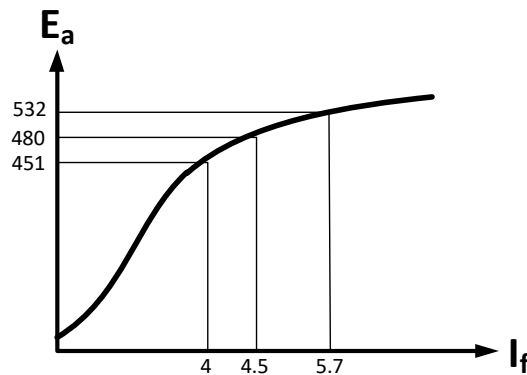
$$E_{a-ph} = \frac{V_t}{\sqrt{3}} = \frac{540}{\sqrt{3}} = 311.8 \text{ V}$$

$$I_a = I_L = 300 \text{ A}$$

$$X_s \gg R_a \Rightarrow Ra \approx 0 \Rightarrow |X_s| = \frac{|E_a|}{|I_a|} = \frac{311.8}{300} = 1.04 \Omega$$

$$Ra \neq 0 \Rightarrow \sqrt{X_s^2 + R_a^2} = \frac{|E_a|}{|I_a|} \Rightarrow \sqrt{X_s^2 + 0.2^2} = \frac{311.8}{300} \Rightarrow X_s = 1.02 \Omega$$

مثال ۲: مشخصه مدار باز یک ژنراتور سنکرون ۴۸۰ ولت، ۶۰ هرتز و ۴ قطب با اتصال مثلث در شکل زیر نشان داده شده است. راکتانس سنکرون ۰.۱ اهم و مقاومت آرمیچر ۰.۰۱۵ اهم است. در بار کامل جریان خروجی ۱۲۰۰ آمپر و ضریب توان ۰.۸ پس فاز و همچنین تلفات اصطکاک و هسته به ترتیب ۴۰ و ۳۰ کیلو وات است.



الف) سرعت چرخش ژنراتور چقدر است.

ب) مقدار جریان میدان برای ایجاد ولتاژ پایانه ۴۸۰ ولت در حالت بی‌باری

ج) مقدار جریان میدان برای ایجاد ولتاژ پایانه ۴۸۰ ولت در حالت بار کامل

د) مقدار جریان میدان برای ایجاد ولتاژ پایانه ۴۸۰ ولت در بار ۱۲۰۰ آمپر و ۰.۸ پیش فاز.

ه) توان ورودی، خروجی و بازده

و) اگر بار ژنراتور به صورت ناگهانی قطع شود ولتاژ ترمینال چقدر خواهد شد.

حل:

الف)

$$N_s = N_m = \frac{120 \times f}{p} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

ب) در حالت بی‌باری $E_a = V_t$

$$V_t = E_a = 480 \text{ V}$$

با استفاده از نمودار $I_f=4.5$ (ج)

$$I_{LL} = 1200 \angle -\cos 0.8 \quad \text{Delta Connection} \quad I_{ph} = \frac{1200}{\sqrt{3}} \angle -\cos 0.8$$

$$E_a = V_t + (R_a + jX_s)I_a = 480 + (0.015 + j0.1) \times \left(\frac{1200}{\sqrt{3}} \angle -36.8\right) = 532 \angle 5.3 \text{ V}$$

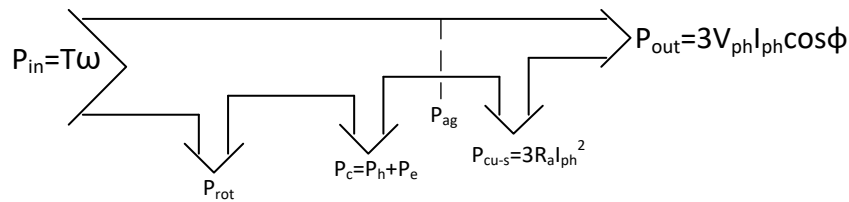
با استفاده از نمودار $I_f=5.7$ (د)

$$I_{LL} = 1200 \angle +\cos 0.8 \quad \text{Delta Connection} \quad I_{ph} = \frac{1200}{\sqrt{3}} \angle +\cos 0.8$$

$$E_a = V_t + (R_a + jX_s)I_a = 480 + (0.015 + j0.1) \times \left(\frac{1200}{\sqrt{3}} \angle +36.8\right) = 451 \angle 7.8 \text{ V}$$

با استفاده از نمودار $I_f=4$ (ه)

تبدیل توان در ژنراتور به صورت زیر است



$$P_{out} = 3V_{t-ph}I_{ph} \cos \phi = 3 \times 480 \times \frac{1200}{\sqrt{3}} \times 0.8 = 789000 \text{ W}$$

$$P_{cu-s} = 3R_a I_{ph}^2 = 3 \times 0.015 \times \left(\frac{1200}{\sqrt{3}}\right)^2 = 21600 \text{ W}$$

$$P_{in} = P_{out} + P_{cu-s} + P_c + P_{rot} = 789000 + 21600 + 40000 + 30000 = 889600 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = 89.7\%$$

(و)

اگر جریان بار به صورت ناگهانی قطع شود $E_a = V_t$ می‌شود و چون در حالت بار کامل $E_a = 532$

$$V_t = E_a = 532 \text{ V}$$

۶-۷- توان الکتریکی تحویلی توسط ژنراتور سنکرون (حد پایداری استاتیکی)

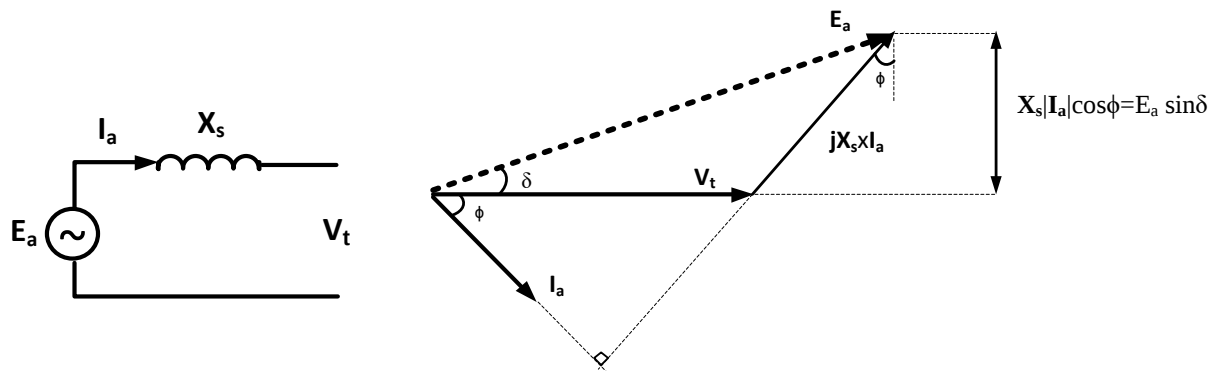
توان الکتریکی تحویل داده شده توسط ژنراتور سنکرون در قسمت قبل بیان شد. به منظور بررسی دقیق تر مقدار این توان برحسب زاویه بین ولتاژ داخلی و ولتاژ پایانه یعنی δ که همان زاویه بین میدان روتور و استاتور است بیان می‌شود. یکی از اهداف این کار این است که وقتی توان ژنراتور افزایش می‌یابد مقدار توان ورودی توسط توربین نیز باید افزایش یابد که باعث تغییر در زاویه بین میدان روتور و استاتور می‌شود. بنابراین بهتر است که توان خروجی الکتریکی نیز برحسب این زاویه بیان شود. مقدار این توان به حد پایداری استاتیکی معروف است چون که درخواست توان بیش از این مقدار از ژنراتور باعث ناپایدار شدن آن می‌شود.

۶-۷-۱- رابطه توان اکتیو تحویلی توسط ژنراتور سنکرون

برای بدست آوردن رابطه توان از مقاومت آرمیچر صرف نظر می‌شود.

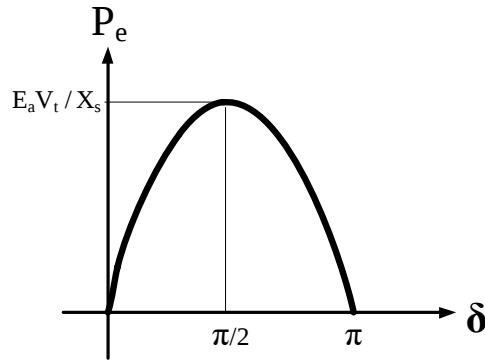
$$X_s I_a \cos \varphi = E_a \sin \delta \Rightarrow I_a \cos \varphi = \frac{E_a \sin \delta}{X_s}$$

$$P_e = 3V_t I_a \cos \varphi \Rightarrow P_e = 3 \frac{E_a V_t}{X_s} \sin \delta$$



شکل (۶-۱۶): دیاگرام برداری ژنراتور سنکرون

شکل زیر نمودار این رابطه را نشان می‌دهد که یک منحنی سینوسی است و همه تحلیل‌های گفته شده درباره پایداری ژنراتور سنکرون که بر روی منحنی گشتاور آن گفته شد را می‌توان با این منحنی نیز بررسی کرد.

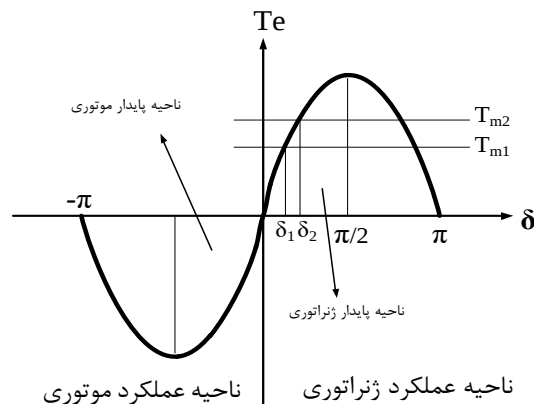


شکل (۶-۱۷): نمودار توان ماشین سنکرون در حالت ژنراتوری

نکته: در حالت کار موتوری از آنجا که علامت δ متفاوت از حالت ژنراتوری است این منحنی از منفی 180° تا صفر درجه و در پایین محور افقی خواهد بود.

۶-۷-۲- نمودار گشتاور- زاویه و تحلیل پایداری

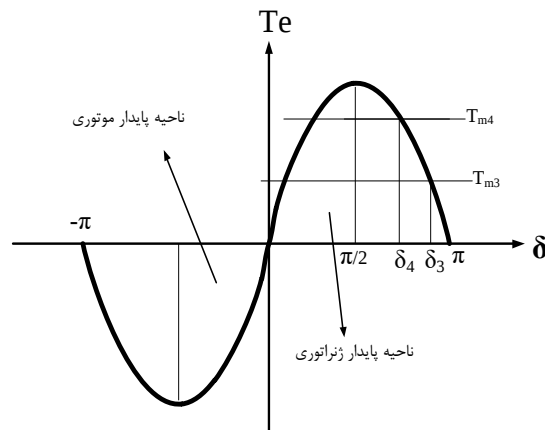
در شکل زیر نمودار گشتاور بر اساس رابطه آن رسم شده است. این نمودار یک نمودار سینوسی است که قسمت δ بزرگ‌تر از صفر آن مربوط به عملکرد ژنراتوری (یعنی میدان روتور جلوتر از میدان استاتور) و قسمت منفی مربوط به عملکرد موتوری است. در این نمودار که تا زاویه 180° درجه برای هر کدام رسم شده است و کل نمودار حالت کار پایدار نیست. بلکه تنها برای حالت ژنراتوری تا 90° درجه و برای حالت موتوری تا منفی 90° درجه ناحیه کار پایدار است. با توجه به تعریف پایداری یک سیستم که داشتن خروجی محدود و رفتن به یک نقطه کار دیگر در صورت تغییر ورودی (اغتشاش) است، ماشین سنکرون نیز در صورت تغییر در ورودی باید بتواند در یک نقطه کار جدید کار کند و خروجی نامحدود نداشته باشد یعنی زاویه بین میدان روتور و استاتور و سایر پارامترهای آن افزایش و کاهش تا بی‌نهایت نداشته باشند.



شکل (۶-۱۸): منحنی گشتاور ماشین سنکرون

برای بررسی ناحیه کار پایدار ژنراتور سنکرون فرض کنید در نقطه (δ_1, T_{M1}) در حالت کار است که (T_M) گشتاور مکانیکی وارد شده به روتور است. اگر ورودی یعنی گشتاور وارده به روتور افزایش یابد و به T_{M2} برسد انتظار داریم با اعمال گشتاور بزرگ‌تر به روتور سرعت آن افزایش یابد بنابراین روتور سرعت می‌گیرد و اختلاف زاویه میدان آن با میدان استاتور یا همان δ بزرگ‌تر می‌شود. از روی نمودار مشاهده می‌شود مقدار این زاویه از δ_1 به δ_2 که $\delta_2 > \delta_1$ تغییر می‌کند و این همان تغییری بود که انتظار می‌رفت یعنی با افزایش گشتاور ورودی به روتور باید روتور سرعت می‌گرفت و اختلاف زاویه میدان‌ها بیشتر می‌شد. بنابراین ژنراتور در یک نقطه کار جدید (δ_2, T_{M2}) با δ بزرگ‌تر به کار خود ادامه می‌دهد و پایدار می‌ماند. بنابراین اگر این تغییر در ناحیه‌ای که زاویه بین صفر تا 90° درجه اتفاق بیافتد ژنراتور پایدار می‌ماند.

همین تحلیل برای موتور سنکرون نیز قابل تعمیم است و نتیجه می‌شود ناحیه کار پایدار موتور سنکرون از δ برابر با صفر شروع می‌شود و تا منفی 90° درجه ادامه دارد.



شکل (۶-۱۹): منحنی گشتاور ماشین سنکرون

برای بررسی ناحیه کار ناپایدار یعنی زاویه بین 90° تا 180° درجه فرض می‌کنیم که ژنراتور در نقطه (δ_3, T_{M3}) در حالت کار است. اگر گشتاور ورودی افزایش یابد و به T_{M4} برسد انتظار داریم روتور سرعت بگیرد و δ افزایش یابد تا به نقطه کار جدید برسد. اما مشاهده می‌شود که در این حالت اگر δ افزایش یابد به 180° درجه می‌رسد و نقطه کار جدید وجود ندارد چون نقطه کار جدید (δ_4, T_{M4}) در δ کمتر یعنی δ_4 است که روتور از آن فاصله گرفته و مدام δ افزایش می‌یابد تا ناپایدار شود. بنابراین نتیجه می‌شود که ژنراتور سنکرون باید در ناحیه صفر تا 90° درجه کار کند تا به تغییرات در ورودی یا اغتشاش مقاوم باشد و پایدار بماند. برای داشتن حاشیه پایداری بیشتر معمولاً زاویه کمتر از 60° درجه تنظیم می‌شود.

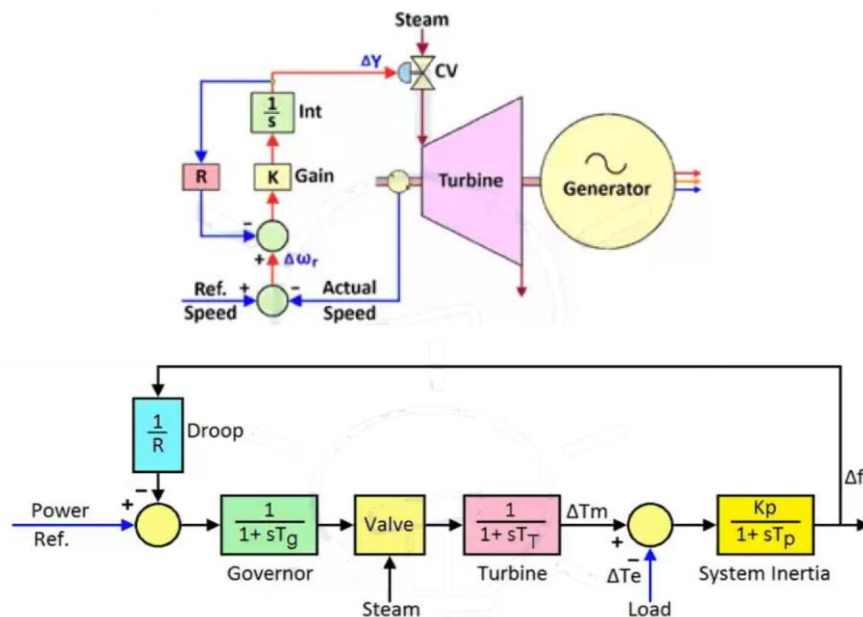
۸-۶- تنظیم توان اکتیو (فرکانس) و راکتیو (ولتاژ)

۸-۶-۱- تنظیم توان اکتیو (فرکانس)

در سیستم‌های قدرت واقعی، ژنراتور به یک توربین (بخار، گاز، آبی) متصل است. وقتی بار شبکه زیاد شود: توان الکتریکی خروجی P_e افزایش می‌یابد، اگر توان مکانیکی ورودی P_m (از توربین) به سرعت زیاد نشود روتور کمی کند می‌شود یعنی فرکانس شبکه کاهش می‌یابد. عمل عکس یعنی کاهش توان الکتریکی و افزایش سرعت نیز اتفاق می‌افتد. این رفتار با معادله دینامیکی ژنراتور معادله نوسانی ی توصیف می‌شود:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e$$

به منظور تنظیم توان اکتیو خروجی در ژنراتور سنکرون طبق رابطه بدست آمده برای توان اکتیو می‌توان با تغییر δ و یا ولتاژ داخلی E_a این کار را انجام داد. برای افزایش توان خروجی ژنراتور باید توان مکانیکی ورودی افزایش یابد که این کار با استفاده از تنظیم دریچه ورودی بخار، گاز و یا آب انجام می‌شود. افزایش توان ورودی به محور ژنراتور باعث می‌شود که روتور نسبت به ژنراتور زاویه بیشتری پیدا کند که طبق رابطه، توان اکتیو خروجی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین به طور کلی تغییر در توان اکتیو ژنراتور با استفاده از تنظیم δ انجام می‌شود. در شکل زیر این فرآیند کنترلی نشان داده شده است:



شکل (۶-۲۰): کنترل فرکانس - (شکل بالا شماتیک اجزا آن)، (شکل پایین تابع تبدیل کنترلی)

۶-۸-۲- تنظیم توان راکتیو (ولتاژ) و دیگرام فازوری ژنراتور سنکرون

با استفاده از مدار معادل بدست آمده می‌توان با در نظر گرفتن ولتاژ ترمینال ژنراتور، ولتاژ داخلی را بدست آورد. برای این کار باید با استفاده از معادله KVL حاکم بر مدار بردارهای مربوطه را با هم جمع برداری کرد. دیگرام فازوری به صورت ترسیمی نشان می‌دهد که با تغییر بار و نوع بار از حالت اهمی، سلفی- اهمی و یا خازنی- اهمی ولتاژ داخلی چگونه تغییر می‌کند. در واقع نشان می‌دهد برای داشتن ولتاژ خروجی ثابت، ولتاژ داخلی چگونه باید تنظیم شود. اختلاف بین ولتاژ ترمینال و ولتاژ داخلی اگر به صورت درصد بیان شود تنظیم ولتاژ را نشان می‌دهد. تنظیم ولتاژ مثبت یعنی ولتاژ از منبع تا بار افت دارد و تنظیم ولتاژ منفی نشان‌دهنده این است که ولتاژ بار بیشتر از منبع است. لازم به ذکر است که تنظیم ولتاژ منفی تنها در بار خازنی- اهمی رخ می‌دهد. طبق تعریف که در فصل‌های قبل نیز بررسی شد تنظیم ولتاژ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$VR\% = \frac{E_a - V_t}{E_a} \times 100$$

دیگرام فازوری ژنراتور سنکرون برای بارگذاری مختلف

در جدول زیر سه بار مختلف سلفی-اهمی، اهمی خالص و خازنی اهمی در پایانه ژنراتور قرار گرفته و مقدار و زاویه ولتاژها در هر حالت مشاهده میشود.

جدول (۶-۱): حالت‌های مختلف بارگذاری

نوع بار	دیگرام فیزیوری
سلفی- اهمی: زاویه جریان از ولتاژ عقب‌تر است	
اهمی خالص: زاویه بین جریان و ولتاژ ترمینال صفر	
خازنی- اهمی: زاویه جریان از ولتاژ جلوتر است	

می‌توان نتیجه گرفت در بار اهمی- سلفی تنظیم جریان مثبت است

در بار اهمی تنظیم جریان مثبت است.

در بار اهمی- خازنی تنظیم جریان میتواند منفی هم باشد.

مجدداً توسط دیاگرام فازوری گفته شده که از مقاومت آرمیچر نیز صرف‌نظر شده بود با استفاده از روابط هندسی برای بدست آوردن رابطه توان راکتیو داریم:

$$X_s I_a \sin \varphi = E_a \cos \delta - V_t \Rightarrow I_a \sin \varphi = \frac{E_a \cos \delta - V_t}{X_s}$$

$$Q_e = 3V_t I_a \sin \varphi \Rightarrow Q_e = 3V_t \frac{E_a \cos \delta - V_t}{X_s}$$

اما به‌منظور تنظیم توان راکتیو مشاهده می‌شود که توان راکتیو تزریقی ژنراتور به علامت جمله $E_a \cos \delta - V_t$ وابسته است. یعنی اگر مثبت باشد تولید توان راکتیو خواهیم داشت. بنابراین برای تنظیم توان راکتیو مقدار ولتاژ داخلی باید تغییر کند که این کار توسط تنظیم جریان تحریک قابل انجام است. به این صورت که با افزایش جریان تحریک مقدار میدان تولدی روتور افزایش می‌یابد و با استفاده از مشخصه مغناطیس شونگی مقدار ولتاژ داخلی نیز افزایش می‌یابد که تولید توان راکتیو را نتیجه می‌دهد. این روند را به‌صورت زیر نیز می‌توان بیان کرد:

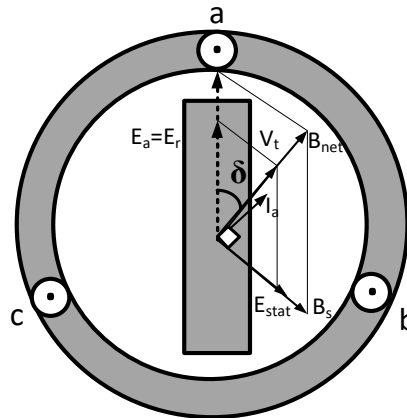
$$I_a \uparrow \Rightarrow \varphi \uparrow \Rightarrow (E_a = 4.44 N f \varphi) \Rightarrow E_a \uparrow \Rightarrow Q \uparrow$$

مدهای کاری ژنراتور به‌منظور تولید توان راکتیو به‌صورت زیر تعریف می‌شوند. لازم به ذکر است که به علت اینکه جریان از ژنراتور خارج می‌شود و به بار وارد می‌شود، تعریف جهت جریان برای این دو متفاوت است بنابراین تعاریف پس فاز و پیش فاز نیز برای بار و ژنراتور متفاوت خواهد بود. بنابراین ژنراتور پس فاز یعنی تولید توان راکتیوی و پیش فاز یعنی مصرف توان راکتیو.

جدول (۶-۲): حالت‌های مختلف تحریک

ضریب توان	مقدار توان راکتیو	مقدار ولتاژ داخلی و پایانه	حالت تحریک	تنظیم جریان تحریک
پس فاز	تولید Q	$E_a \cos \delta > V_t$	فوق تحریک	$I_f > I_{f-n}$
PF=1	$Q = 0$	$E_a \cos \delta = V_t$	تحریک نرمال	$I_f = I_{f-n}$
پیش فاز	مصرف Q	$E_a \cos \delta < V_t$	زیر تحریک	$I_f < I_{f-n}$

نکته مهم: زاویه بین E_a و V_t برابر با δ است که زاویه توان نیز نامیده می‌شود. این زاویه دقیقاً برابر با اختلاف زاویه بین میدان روتور و استاتور در رابطه گشتاور نیز هست. شکل زیر این زاویه را نشان می‌دهد.



شکل (۶-۲۱): زاویه بین میدان روتور و استاتور

مثال ۳: یک ژنراتور سنکرون ۴۸۰ ولت، ۶۰ هرتز و ۶ قطب با اتصال ستاره دارای راکتانس سنکرون ۱ اهم است. جریان آرمیچر در بار کامل ۶۰ آمپر با ضریب توان ۰/۸ پس فاز است. اگر تلفات اصطکاک ۱۵۰۰ وات و تلفات هسته ۱۰۰۰ وات باشد موارد زیر را بدست آورید.

الف) سرعت چرخش ژنراتور

ب) ولتاژ پایانه را در سه حالت جریان نامی با ضریب قدرت ۰/۸ پس فاز، ضریب قدرت ۱ و ضریب قدرت ۰/۸ پیش فاز بدست آورید.

ج) تنظیم ولتاژ در سه حالت فوق چقدر است.

د) بازده ژنراتور در بار کامل و ضریب قدرت ۰/۸ پس فاز.

ه) در بار کامل گشتاور توربین و گشتاور القایی مخالف چقدر است.

حل:

الف)

$$N_s = N_m = \frac{120 \times f}{p} = \frac{120 \times 60}{6} = 1200 \text{ rpm}$$

ب)

$$E_{a-ph} = \frac{480}{\sqrt{3}} = 277 \text{ V}$$

$$I_{ph} = 60 \angle -\cos 0.8$$

$$V_t = E_a - jX_s I_a = 277 - j1 \times (60 \angle -36.8) = 236.9 \text{ V}$$

$$I_{ph} = 60 \angle 0$$

$$V_t = E_a - jX_s I_a = 277 - j1 \times (60) = 270.4 \text{ V}$$

$$I_{ph} = 60 \angle +\cos 0.8$$

$$V_t = E_a - jX_s I_a = 277 - j1 \times (60 \angle +36.8) = 308.8 \text{ V}$$

(ج)

$$VR\% = \frac{E_a - V_t}{E_a} \times 100 = \frac{277 - 236.9}{277} \times 100 = 17\%$$

$$VR\% = \frac{E_a - V_t}{E_a} \times 100 = \frac{277 - 270.4}{277} \times 100 = 2.4\%$$

$$VR\% = \frac{E_a - V_t}{E_a} \times 100 = \frac{277 - 308.8}{277} \times 100 = -10.3\%$$

(د) دقت شود مقاومت آرمیچر داده نشده بنابراین تلفات مسی استاتور صفر است.

$$P_{out} = 3V_{t-ph} I_{ph} \cos \varphi = 3 \times 236.9 \times 60 \times 0.8 = 34100 \text{ W}$$

$$P_{in} = 34100 + 1500 + 1000 = 36600 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = 93.2\%$$

(ه)

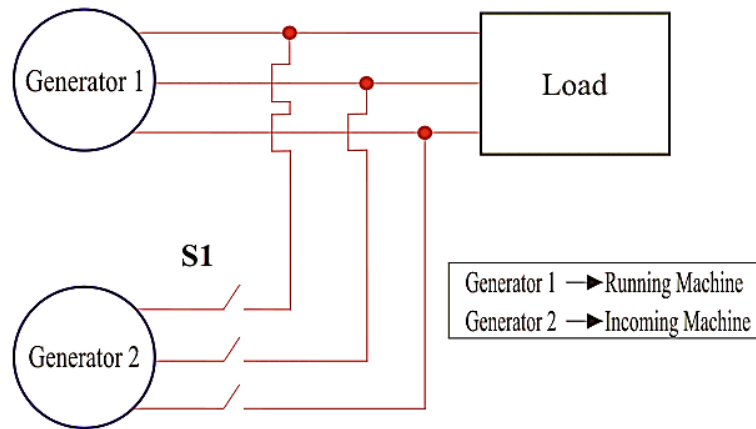
$$T_{turbine} = \frac{P_{in}}{\omega} \quad \omega = \frac{2\pi \times 1200}{60} = 125.7 \text{ rad/s} \Rightarrow T_{turbine} = \frac{36600}{125.7} = 291.2 \text{ N.m}$$

بعد از اینکه تلفات گردشی و هسته از توان ورودی کم می‌شود توان فاصله هوایی بدست می‌آید که اگر بر سرعت تقسیم شود برابر با گشتاور الکترومغناطیسی یا القایی تولیدی ژنراتور خواهد شد.

$$P_{ag} = P_{in} - P_{rot} - P_c = 36600 - 1500 - 1000 = 34100 \text{ W}$$

$$T_{turbine} = \frac{34100}{125.7} = 271.3 \text{ N.m}$$

۹-۶- کارکرد موازی ژنراتورها



شکل (۶-۲۲): کارکرد موازی ژنراتورها

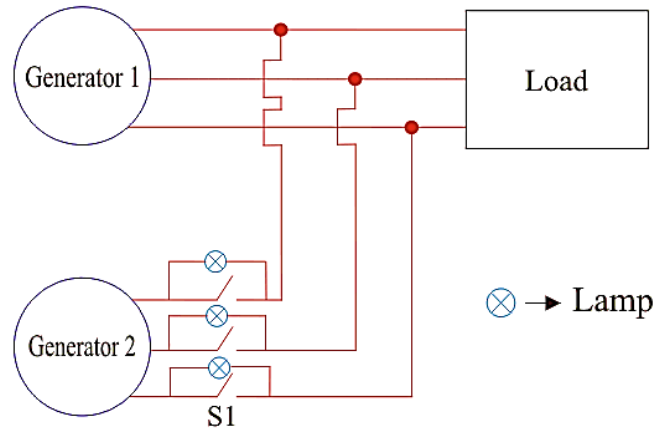
استفاده از مولدهای برق به صورت موازی به دلیل مزایای آن همواره مورد توجه بوده است که به صورت خلاصه این مزایا عبارت‌اند از:

- ۱- افزایش قابلیت اطمینان چون خرابی یکی از ژنراتورها باعث قطع تمام توان تولیدی نمی‌شود.
- ۲- تعمیر و نگهداری بدون خاموشی
- ۳- توسعه سیستم به دلیل رشد بار
- ۴- افزایش راندمان به علت بهره‌برداری در بار نامی و خاموش کردن واحدهای بی‌بار
- ۵- نیاز به واحدهای کوچک‌تر برای رزرو

اما برای موازی کردن ۲ ژنراتور باید شرایط زیر وجود داشته باشد.

- ۱- دامنه ولتاژ برابر
- ۲- فاز ولتاژ برابر
- ۳- برابر بودن توالی فازها
- ۴- برابر بودن فرکانس ژنراتورها
- ۵- برابری امپدانس معادل (این شرط ضروری نیست)

به منظور بررسی این شرایط برای کارکرد موازی دو ژنراتور وسایل اندازه‌گیری مختلف وجود دارد و اما یک روش قدیمی استفاده از روش سه لامپی و روش دیگر استفاده از سنکروسکوپ است.



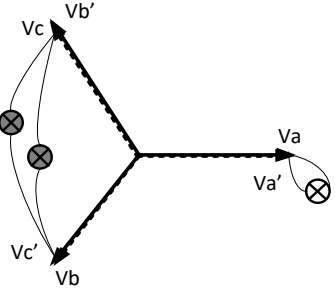
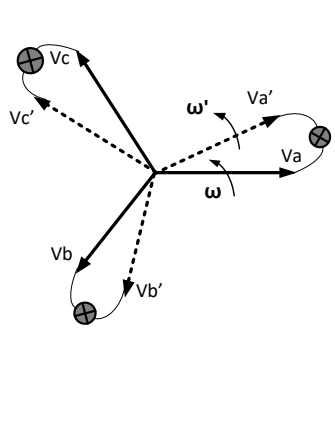
شکل (۶-۲۳): روش سه لامپی

روش سه لامپی

در این روش لامپ‌ها بین فازهای هم نام دو مولد قرار می‌گیرند. زمانی که هر سه لامپ خاموش باشند ۴ شرط اول از شرایط بالا برقرار است. نکته اینکه در این روش لامپ‌ها باید توانایی تحمل ولتاژی به اندازه ۲ برابر ولتاژ مولدها را داشته باشند. در ادامه ۴ حالت مختلف که در هر کدام تنها یک شرط برقرار نیست بررسی خواهد شد و نشان داده خواهد شد که لامپ‌ها روشن و یا خاموش هستند. برای این منظور دو دسته فازور سه فاز شده و جایی که اختلاف ولتاژ بین دو ولتاژ هم فاز وجود داشته باشد لامپ بین آن‌ها روشن خواهد شد.

جدول (۶-۳): روش سه لامپی

دیاگرام برداری	حالت‌های مختلف در روش سه لامپی
	حالت (۱) فقط دامنه ولتاژها برابر نباشد. طبق شکل مشاهده می‌شود اگر دامنه ولتاژها برابر نباشد بین دو سر همه لامپ‌ها اختلاف ولتاژ وجود دارد و همه روشن خواهند شد.
	حالت (۲) فقط فاز ولتاژها برابر نباشد. طبق شکل مشاهده می‌شود اگر فاز ولتاژها برابر نباشد بین دو سر همه لامپ‌ها اختلاف ولتاژ وجود دارد و همه روشن خواهند شد.

	حالت ۳) فقط توالی فازها برابر نباشد. طبق شکل مشاهده می‌شود اگر جای دو فاز در ۲ مولد یکسان نباشد (توالی منفی) بین دو لامپ اختلاف ولتاژی برابر با ولتاژ خط یعنی رادیکال سه برابر ولتاژ فاز وجود دارد و دو لامپ روشن خواهند شد.
	حالت ۴) فقط فرکانس‌ها برابر نباشد. طبق آنچه که در درس مدار الکتریکی ۱ گفته شد یک موج سینوسی را می‌توان با دامنه و فاز آن نشان داد که این دامنه و فاز یک بردار در صفحه مختلط می‌باشد که با سرعت ω در حال چرخش است. بنابراین دو موج سینوسی با فرکانس متفاوت دو بردار هستند که با سرعت‌های متفاوت در حال چرخش هستند. با این مقدمه در روش سه لامپی دو دسته بردار سه فاز وجود دارد که با سرعت مختلف در حال چرخش هستند و مدام فاز بین آن‌ها در حال تغییر است و فقط برای یک لحظه اندک که از روی هم می‌گذرند فاز بین آن‌ها صفر شده و لامپ‌ها خاموش می‌شوند و گرنه در سایر لحظات لامپ‌ها روشن هستند.

استفاده از سنکروسکوپ: سنکروسکوپ ساختمانی شبیه به یک موتور تکفاز دارد به‌طوری‌که استاتور آن به یک فاز شبکه و روتور آن به یک فاز مولد وصل می‌شود. هر وقت دو مولد هم فاز باشند میدان دوار تولیدی در سنکروسکوپ صفر است و سنکروسکوپ می‌ایستد چنانچه مولد شماره ۱ تندتر از مولد شماره ۲ در حال کار باشد زاویه فاز آن جلو می‌رود و عقربه در جهت ساعت‌گرد می‌چرخد و اگر کندتر باشد در جهت پادساعت‌گرد می‌چرخد.



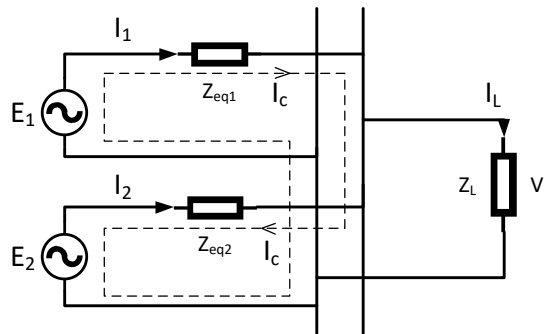
شکل (۶-۲۴): سنکروسکوپ

نکته: سنکروسکوپ نمی‌تواند توالی فاز را چک کند زیرا فقط به یک فاز وصل است.

نکته: حالت مطلوب در موازی کردن قرار گرفتن عقربه سنکروسکوپ نزدیک صفر و در سمت تند است چون مولدی که می‌خواهد به شبکه وصل شود باید در ابتدا به مقدار بسیار اندک فرکانس بیشتری داشته باشد تا به‌صورت بار (موتور) به شبکه متصل نشود. پس از بررسی و تنظیم شرایط بالا می‌توانیم کلید را وصل کنیم تا ژنراتور با شبکه موازی شود و توان کمکی را به شبکه تزریق کند.

۶-۱۰- اتصال موازی دو ژنراتور سنکرون در صورت برابر نبودن شرایط ۵ گانه

اگر دو ژنراتور سنکرون با یکدیگر موازی شوند و طبق شکل زیر به بار متصل شده باشند، با استفاده از روابط KVL سهم جریان هر کدام محاسبه می‌شود. مشاهده می‌شود که هر کدام یک سهم به نسبت عکس امپدانس معادل خود از جریان بار را خواهند داشت. اما یک جریان گردشی به نام I_c به جریان یکی اضافه شده و از جریان دیگری کم می‌شود. این جریان با اختلاف ولتاژ دو ژنراتور رابطه مستقیم دارد. ژنراتوری که جریان گردشی به جریان آن اضافه می‌شود اگر در جریان نامی کار کرده باشد دچار اضافه جریان می‌شود و به ناچار باید ظرفیت خود را کم کند. که این کار باعث می‌شود نتوان از کل ظرفیت نصب شده استفاده کرد.



$$E_1 - Z_{eq1} * I_1 = V_L = E_2 - Z_{eq2} * I_2$$

$$E_1 - E_2 + Z_{eq2} * I_2 = Z_{eq1} * I_1 \Rightarrow (+Z_{eq2} * I_1)$$

$$E_1 - E_2 + Z_{eq2} (I_2 + I_1) = I_1 (Z_{eq1} + Z_{eq2}) \quad , \quad I_1 + I_2 = I_L$$

$$I_1 = \frac{Z_{eq2}}{Z_{eq1} + Z_{eq2}} * I_L + \frac{E_1 - E_2}{Z_{eq1} + Z_{eq2}} \quad I_2 = \frac{Z_{eq1}}{Z_{eq1} + Z_{eq2}} * I_L - \frac{E_1 - E_2}{Z_{eq1} + Z_{eq2}}$$

I_c جریان گردشی

از آنجا که جریان گردشی با اختلاف ولتاژ دو ژنراتور رابطه مستقیم دارد هر کدام از ۴ حالت زیر باعث ایجاد این جریان گردشی می‌شوند. و شرط پنجم نیز باعث می‌شود توان به صورت مساوی بین ژنراتورها تقسیم نشود.

۱- **دامنه ولتاژ نابرابر** --- باعث ایجاد جریان گردشی می‌شود.

۲- **فاز ولتاژ نابرابر** --- اختلاف دو ولتاژ با فاز نابرابر صفر نیست بنابراین این حالت هم باعث ایجاد جریان گردشی می‌شود.

۳- **برابر نبودن توالی فازها** --- بین دو فاز به علت وجود اختلاف ولتاژ جریان گردشی بزرگی ایجاد می‌شود.

۴- **برابر نبودن فرکانس ژنراتورها** --- فاز بین ولتاژ دو ژنراتور مدام در حال تغییر است بنابراین جریان گردشی متغیری به وجود خواهد آمد.

۵- **برابر نبودن امپدانس معادل** --- جمله اول جریان هر ژنراتور به امپدانس‌ها وابسته است. اگر امپدانس‌ها با هم برابر نباشند جریان به نسبت عکس آن‌ها بین دو ژنراتور تقسیم می‌شود و ممکن است یکی دچار اضافه جریان شود.

• بررسی مفهومی کارکرد موازی در صورت برابر نبودن فرکانس

در صورت برابر نبودن فرکانس دو ژنراتور، فازور آن‌ها با سرعت متفاوت می‌چرخد. با گذشت زمان اختلاف فاز آن‌ها بیشتر شده و این اختلاف فاز باعث به وجود آمدن جریان گردشی می‌شود که این جریان متغیر و متناسب با اختلاف فاز است. جریان گردشی به جریان ژنراتوری که فاز بزرگ‌تر دارد یعنی با سرعت بیشتری می‌چرخد اضافه شده و از دیگری کم می‌شود. بنابراین جریان ژنراتور اول زیاد شده و مانند بار برای آن عمل می‌کند که باعث به وجود آمدن یک گشتاور مقاوم برای آن می‌شود. به همین ترتیب برای ژنراتور دیگر جریان کم شده و گشتاور محرک برای آن خواهیم داشت. گشتاور مقاوم باعث می‌شود سرعت ماشین اول که بیشتر بود کم شده و گشتاور محرک سرعت ماشین دوم که کمتر بود را زیاد می‌کند. زمانی فرا می‌رسد که سرعت دو ماشین با هم برابر می‌شود یعنی از این به بعد فاز آن‌ها تغییر نمی‌کند و عامل ایجاد جریان گردشی این بار تنها اختلاف فاز آن‌ها خواهد بود. ممکن است حالتی رخ دهد که سرعت یکسان شود و اختلاف فاز هم به صورت اتفاقی صفر شود. در این حالت جریان گردشی برای یک لحظه صفر می‌شود اما چون عامل اصلی اختلاف سرعت محرک اولیه بوده است دوباره ژنراتور اول پیش می‌افتد و مراحل بالا تکرار می‌شود. پس برای رفع کردن این مشکل باید تنظیمات مربوط به محرک اولیه را تغییر داد تا سرعت برابر شود.

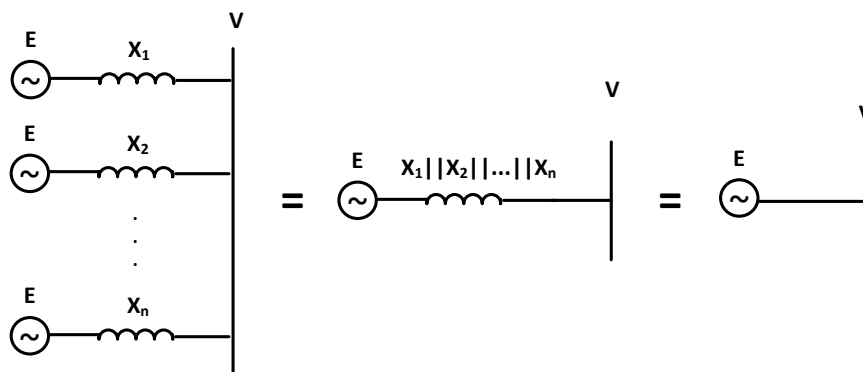
اگر سیستم کنترلی که از توان (جریان) خروجی نمونه می‌گیرد، وجود داشته باشد و به محرک اولیه برای تغییر سرعت فرمان دهد، سرعت نهایی دو ژنراتور مقداری بین سرعت‌های هر کدام خواهد شد. گشتاور محرک و مقاوم که از نظر اندازه با هم برابر بودند بسته به ممان اینرسی هر ژنراتور (J) به آن‌ها گشتاوری وارد می‌کنند. ماشینی که دارای ممان اینرسی بزرگ‌تر است شتاب کمتر و ماشینی که دارای ممان اینرسی کوچک‌تر است شتاب بیشتری می‌گیرد و در نهایت سرعت هر دو ماشین به مقداری بین سرعت‌های قبل می‌رسد.

با استفاده از قانون بقای اندازه حرکت سرعت (فرکانس) نهایی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$J_1\omega_1 + J_2\omega_2 = (J_1 + J_2)\omega \Rightarrow \omega = \frac{J_1\omega_1 + J_2\omega_2}{J_1 + J_2}$$

• کارکرد موازی n ژنراتور سنکرون و مفهوم باس بینهایت

اگر n ژنراتور به یکدیگر متصل شوند و یک شبکه قدرت را برای تأمین بار تشکیل دهند، مدار معادل کل آن‌ها در صورت برابر بودن ولتاژ خروجی به صورت زیر خواهد شد. در این مدار معادل همه امپدانس‌ها با یکدیگر موازی شده و مقدار معادل آن‌ها به سمت صفر میل می‌کند. این مفهوم شبکه بینهایت را نشان می‌دهد. در شبکه بینهایت مقدار امپدانس تونن صفر بوده و تغییر جریان یا بار بر روی ولتاژ شبکه تأثیری نخواهد داشت چون افت ولتاژ به واسطه امپدانس صفر وجود ندارد..



شکل (۶-۲۵): شبکه بینهایت

از طرفی در کارکرد n ژنراتور در یک شبکه مقدار ممان اینرسی معادل کل به سمت بینهایت میل می‌کند. این بدان معنی است اگر یک ژنراتور دیگر به شبکه اضافه شود نمی‌تواند سرعت (فرکانس) شبکه را تغییر دهد، بلکه سرعت آن ژنراتور با شبکه سنکرون خواهد شد.

$$J_1\omega_1 + J_2\omega_2 + \dots J_n\omega_n = (J_1 + J_2 + \dots + J_n)\omega \Rightarrow \omega = \frac{J_1\omega_1 + J_2\omega_2 + \dots J_n\omega_n}{J_1 + J_2 + \dots + J_n}$$

$$J_{eq} = J_1 + J_2 + \dots + J_n \rightarrow \infty$$

ژنراتوری که با سرعت ω' و J' به شبکه بینهایت اضافه می‌شود، فرکانس آن برابر با فرکانس شبکه خواهد شد:

$$J'\omega' + J_\infty\omega_\infty = (J' + J_\infty)\omega \Rightarrow \omega = \frac{J'\omega' + J_\infty\omega_\infty}{J' + J_\infty} \quad J_\infty \rightarrow \infty \Rightarrow \omega = \omega_\infty$$

۶-۱۱- کارکرد موازی ژنراتورها تحت بار

اگر تمام شرایط پنج‌گانه گفته شده فراهم باشد و دو ژنراتور به یکدیگر متصل شوند بار بین آن‌ها تقسیم می‌شود. اما اگر بار افزایش یابد می‌توان سهم هر کدام از ژنراتورها را برای تأمین بار تغییر داد. این کار به مشخصه گاورنر (Governor) و در واقع سرعت عملکرد آن بستگی دارد.

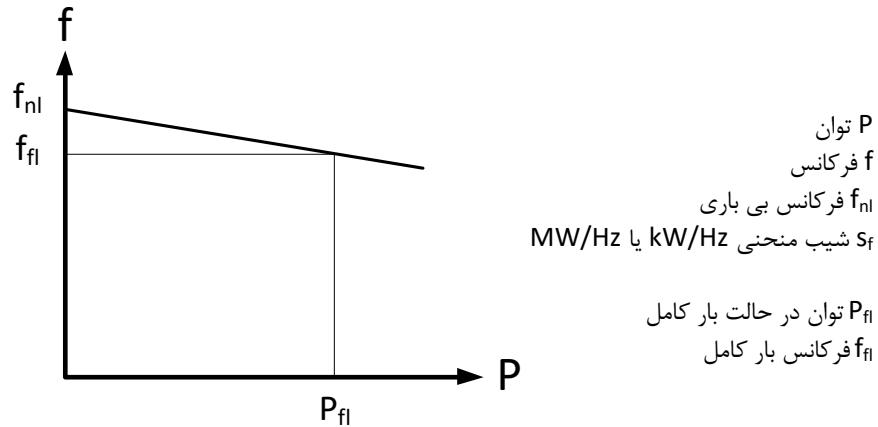
گاورنر: هر واحد نیروگاهی برای کنترل سرعت و قدرت خروجی به گاورنر برای تنظیم بخار، گاز و یا جریان آب ورودی به توربین، مجهز شده است. گاورنرها به ۳ دسته: مکانیکی، الکترومکانیکی و الکترونیکی تقسیم می‌شوند که در حال حاضر فقط از گاورنر الکترونیکی در نیروگاه‌های جدید استفاده می‌شود. گاورنرهای جدید دارای دو قسمت الکترونیکی و هیدرولیکی می‌باشند.

قسمت الکترونیکی گاورنر یک کنترل‌کننده الکترونیکی (معمولاً PID) حلقه بسته است که سیگنال‌های ورودی این کنترل‌کننده توان خروجی ژنراتور و موقعیت گیت‌های توربین است.

بر اساس سیگنال‌های ورودی فوق و پردازش آن‌ها در کنترل‌کننده PLC، سیگنال خروجی گاورنر الکترونیکی به شیر راهنما (Pilot valve) اعمال شده و با عملکرد این شیر، فشار و دبی لازم روغن برای حرکت سروو موتور و دریچه‌های توربین از طریق شیر کنترل اصلی گاورنر فراهم می‌گردد. در صورت بروز اشکال در گاورنر اصلی، کنترل سیستم به صورت خودکار، به گاورنر پشتیبان منتقل می‌شود.

از آنجاکه با افزایش بار ژنراتور سرعت و به تبع آن فرکانس کاهش می‌یابد، مکانیزم گاورنر هر چه که باشد به صورتی عمل می‌کند که افت سرعت در اثر افزایش بار کم باشد که این کار را با تنظیم دریچه ورودی توربین انجام می‌دهد. بنابراین گاورنر دارای مشخصه‌ای به صورت زیر است:

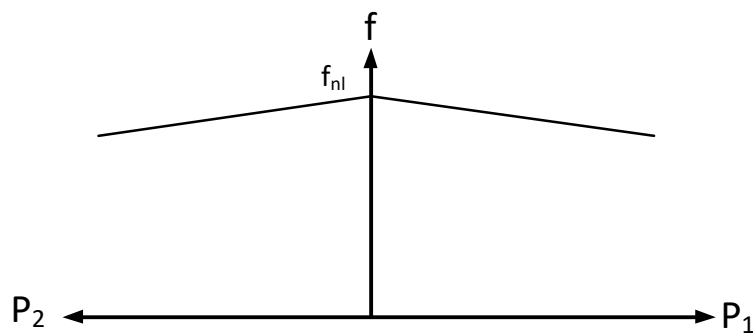
$$P = s_f (f_{nl} - f)$$



شکل (۶-۲۵): مشخصه گاورنر

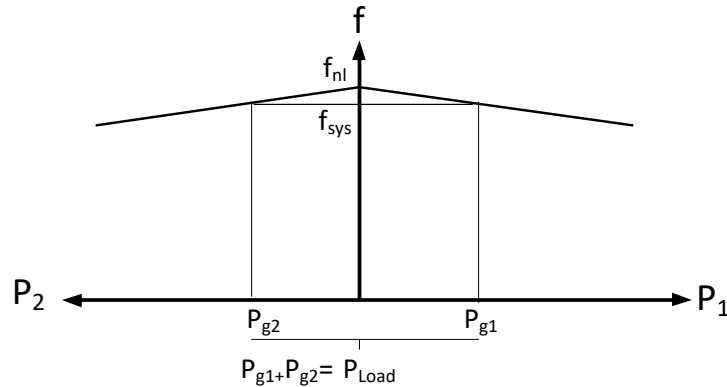
نقطه تنظیم یا Set point: نقطه تنظیم در واقع فرکانس بی‌باری یا f_{nI} است که توسط گاورنر تنظیم می‌شود و در حالت عملکرد ژنراتور به‌تنهایی فرکانس کاری را مشخص می‌کند. در حالت کارکرد موازی یک ژنراتور با ژنراتور دیگر یا شبکه با تغییر آن توان خروجی ژنراتور تغییر خواهد داشت. در کارکرد موازی دو ژنراتور مشخصه آن‌ها بر روی یک نمودار رسم شده و فرکانس کاری و توان هر کدام مشخص خواهد شد. در ادامه چند حالت مختلف کارکرد موازی دو ژنراتور با استفاده از مشخصه گاورنر آن‌ها بررسی خواهد شد.

حالت (۱) دو ژنراتور بدون بار و شرایط یکسان به یکدیگر متصل شده‌اند و نقطه تنظیم آن‌ها شبیه یکدیگر است.



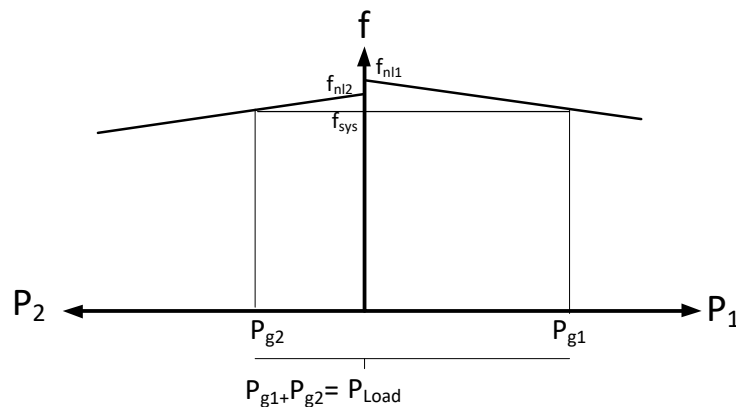
شکل (۶-۲۷): اتصال دو ژنراتور بی‌بار با مشخصه گاورنر یکسان

حالت (۲) دو ژنراتور مشابه به یک بار متصل شده‌اند، فرکانس کاری به f_{sys} کاهش می‌یابد. در این حالت جمع توان تولیدی دو ژنراتور برابر با توان بار است.



شکل (۶-۲۸): اتصال دو ژنراتور تحت بار با مشخصه گاورنر یکسان

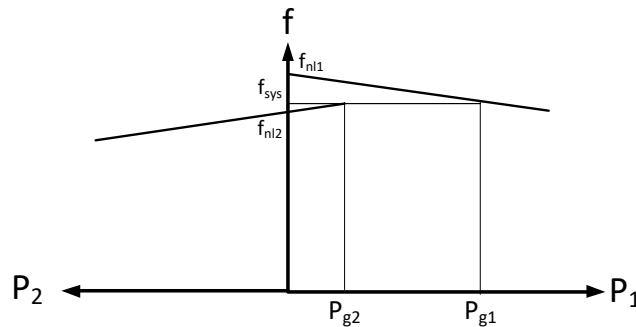
حالت ۳) میزان تولید هر ژنراتور با تغییر نقطه تنظیم (فرکانس بی‌باری) آن تغییر می‌کند. در این حالت فرکانس بی‌باری ژنراتور اول افزایش داده شده است و مشاهده می‌شود توان تولید آن نیز افزایش می‌یابد.



شکل (۶-۲۹): اتصال دو ژنراتور تحت بار با ست پوینت غیر یکسان

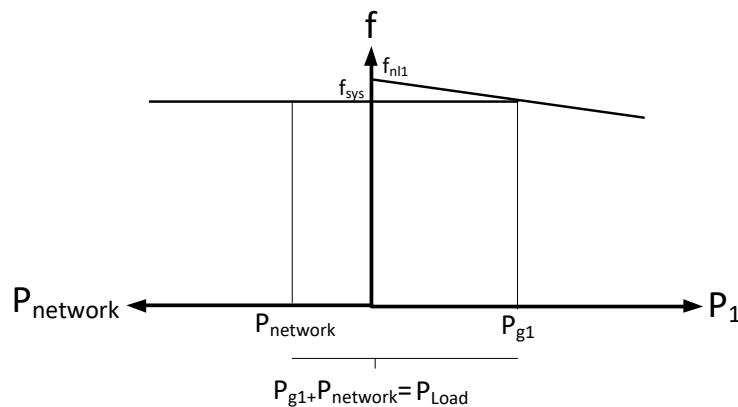
در شکل بالا با تغییر نقطه تنظیم ژنراتور اول تولید آن افزایش یافت و مجموع بار قابل تأمین نیز بیشتر شد. اما اگر بخواهیم در یک بار ثابت مقدار توان تولیدی یک ژنراتور را افزایش دهیم باید نقطه تنظیم آن را بیشتر کنیم و همزمان نقطه تنظیم دیگری را نیز کم کنیم که توان تولیدی آن کم شود. با این کار در یک بار ثابت تولید یک ژنراتور افزایش و تولید دیگری کاهش خواهد داشت و مجموع آن‌ها که بار است ثابت خواهد ماند. اگر نقاط تنظیم دو ژنراتور را همزمان افزایش دهیم سهم هر کدام ثابت و فرکانس سیستم افزایش می‌یابد. (شکل دو مورد اخیر به عهده خواننده)

حالت ۴) اگر نقطه تنظیم به‌درستی تعیین نشود ممکن است حالتی رخ دهد که یکی از ژنراتورها به شکل یک بار برای دیگر باشد. در این حالت مقدار توان تولیدی ژنراتور دوم به قسمت منفی خود رفته یعنی توان منفی دارد و مانند بار خواهد بود.



شکل (۳۰-۶): اتصال دو ژنراتور تحت بار با ست پوینت نامناسب برای یکی از آنها

حالت ۵) از آنجاکه یک شبکه دارای ممان اینرسی بینهایت است و فرکانس آن با تغییر بار تغییر نخواهد داشت، مشخصه آن به‌صورت خط افقی خواهد بود.

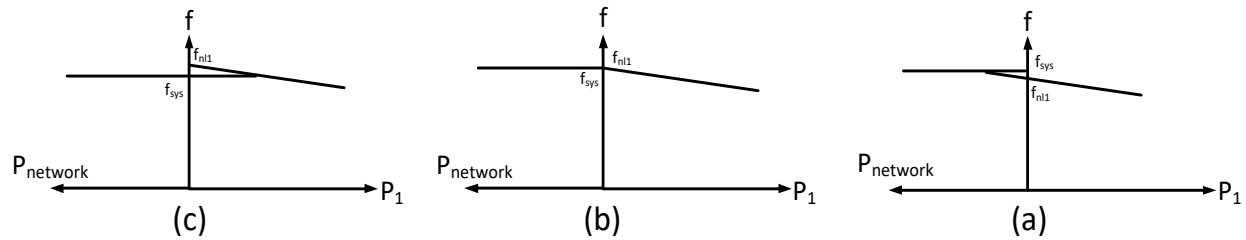


شکل (۳۱-۶): اتصال ژنراتور به شبکه بینهایت

• اتصال یک ژنراتور به شبکه

در لحظه اتصال یک ژنراتور به شبکه باید فرکانس آن اندکی بیشتر از فرکانس شبکه باشد. اگر فرکانس آن کمتر باشد مانند یک بار برای شبکه خواهد بود (شکل a). اگر فرکانس دقیقاً برابر باشد حالت کارکرد شناوری رخ

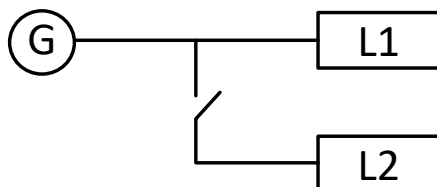
خواهد داد (شکل b). اما اگر فرکانس به مقدار بسیار اندک بیشتر از شبکه باشد ژنراتور به عنوان مولد به شبکه اضافه می‌شود و در تولید نقش خواهد داشت و مقداری از بار مشترک را تأمین می‌کند (شکل c).



شکل (۳۲-۶): اتصال ژنراتور با ست پوینت متفاوت به شبکه بینهایت

نکته اینکه اگر فرکانس کمتر باشد رله‌های برگشت توان آن را از شبکه جدا می‌کنند و مانع عملکرد موتوری آن می‌شوند.

مثال ۴: یک ژنراتور در حال تغذیه باری با توان ۱۰۰۰ کیلو وات و ضریب توان ۰.۸ پس فاز است. فرکانس بی‌باری ژنراتور ۶۱ هرتز و شیب مشخصه گاورنر آن ۱ MW/Hz است. بار دومی توسط یک کلید با توان حقیقی ۸۰۰ کیلو وات و ضریب توان ۰.۷۰۷ پس فاز اضافه می‌شود.



- ۱- قبل از بستن کلید بار دوم فرکانس سیستم چقدر است؟
- ۲- بعد از بستن کلید بار دوم فرکانس سیستم چقدر است؟
- ۳- بعد از بستن کلید اپراتور چه کاری انجام دهد تا فرکانس ۶۰ هرتز شود؟

حل: نکته اینکه در فرمول گاورنر تنها توان اکتیو تأثیر دارد و ضریب توان مهم نیست.

- ۱- قبل از بستن کلید تنها بار ۱۰۰۰ کیلو وات یعنی ۱ مگا وات به ژنراتور وصل است

$$P = s_f (f_{nl} - f) \Rightarrow 1 = 1(61 - f) \Rightarrow f = 60 \text{ Hz}$$

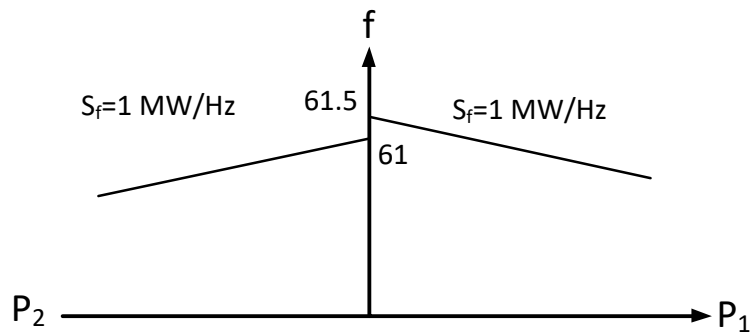
- ۲- بعد از بستن کلید بار ۸۰۰ کیلو وات یعنی ۰.۸ مگاوات به بار قبلی اضافه می‌شود.

$$P = s_f(f_{nl} - f) \Rightarrow 1 + 0.8 = 1(61 - f) \Rightarrow f = 59.2 \text{ Hz}$$

۳- اپراتور می‌تواند نقطه تنظیم یا همان فرکانس بی‌باری را تغییر دهد. بنابراین

$$1.8 = 1(f_{nl} - 60) \Rightarrow f_{nl} = 61.8 \text{ Hz}$$

مثال ۵: دو ژنراتور سنکرون به طور مشترک باری را تغذیه می‌کنند. این بار دارای توان ۲.۵ مگا وات با ضریب قدرت ۰.۸ پس فاز است. نمودار توان و فرکانس دو ژنراتور در شکل زیر نشان داده شده است.



۱- این سیستم در چه فرکانسی کار می‌کند؟

۲- فرض کنید یک بار ۱ مگاوات اضافه شود. فرکانس جدید چقدر می‌شود و ژنراتورها چه توانی تولید می‌کنند؟

۳- با ترکیبی که در حالت ۲ بدست آمد اگر نقطه تنظیم ژنراتور دوم به میزان ۰.۵ هرتز زیاد شود فرکانس سیستم و توان ژنراتورها را بیابید.

حل:

۱-

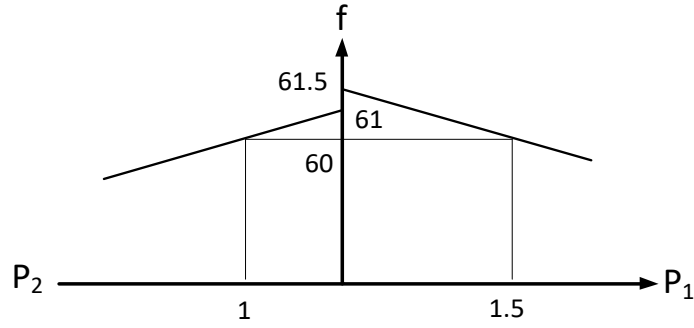
$$P_1 = s_{f1}(f_{nl1} - f)$$

$$P_2 = s_{f2}(f_{nl2} - f)$$

$$P_1 + P_2 = P_{load} = 2.5 \Rightarrow 1(61.5 - f) + 1(61 - f) = 2500 \Rightarrow f = 60 \text{ Hz}$$

$$P_1 = s_{f1}(f_{nl1} - f) = 1(61.5 - 60) = 1.5 \text{ MW}$$

$$P_2 = s_{f2}(f_{nl2} - f) = 1(61 - 60) = 1 \text{ MW}$$

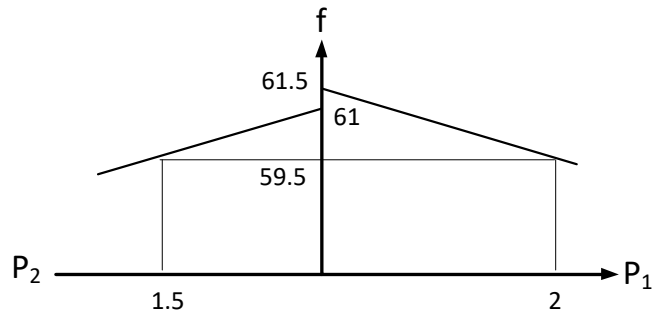


۲- بار به اندازه ۱ مگاوات افزایش یافته است

$$P_1 + P_2 = P_{load} = 2.5 + 1 = 3.5 \Rightarrow 1(61.5 - f) + 1(61 - f) = 3.5 \Rightarrow f = 59.5 \text{ Hz}$$

$$P_1 = s_{f1}(f_{nl1} - f) = 1(61.5 - 59.5) = 2 \text{ MW}$$

$$P_2 = s_{f2}(f_{nl2} - f) = 1(61 - 59.5) = 1.5 \text{ MW}$$

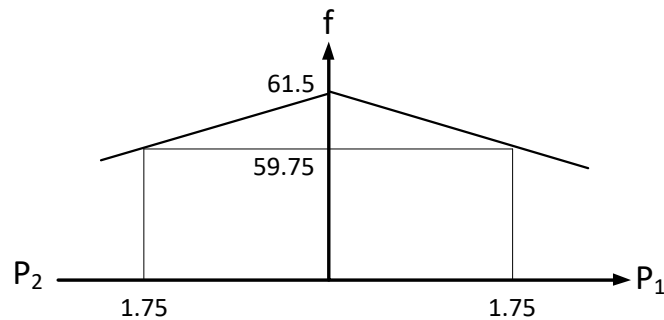


۳- $f_{nl2} = 61.5$

$$P_1 + P_2 = 3.5 \Rightarrow 1(61.5 - f) + 1(61.5 - f) = 3.5 \Rightarrow f = 59.75 \text{ Hz}$$

$$P_1 = s_{f1}(f_{nl1} - f) = 1(61.5 - 59.75) = 1.75 \text{ MW}$$

$$P_2 = s_{f2}(f_{nl2} - f) = 1(61.5 - 59.75) = 1.75 \text{ MW}$$



۱۲-۶- مشخصه‌های قابلیت ماشین سنکرون Capability Curve

در شرایط کار ماندگار به طور معمول ولتاژ ترمینال، جریان تحریک، جریان استاتور (جریان بار)، ضریب توان، قدرت اکتیو و راکتیو، زاویه قدرت و گشتاور تولیدی از مهم‌ترین کمیت‌های ماشین هستند. بدیهی است که هر یک از کمیت‌ها دارای محدودیت‌هایی هستند. محدودیت‌های گفته شده در منحنی قابلیت ماشین سنکرون نشان داده می‌شوند.

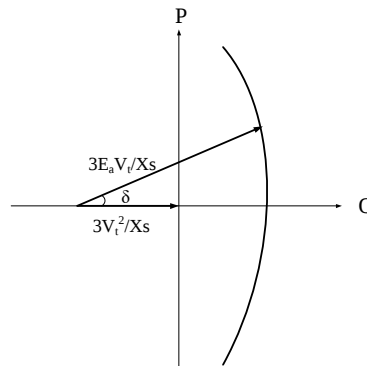
۱- **حد جریان تحریک:** برای افزایش ولتاژ القایی، جریان تحریک افزایش داده می‌شود. اما عبور جریان تحریک با محدودیت‌های حرارتی سیم‌پیچ روتور مواجه است. بنابراین برای جریان تحریک یک مقدار حداکثر وجود خواهد داشت. به ازای این جریان تحریک حداکثر، یک ولتاژ القایی حداکثر وجود خواهد داشت. بنابراین حد جریان روتور متناسب با $E_{a-\max}$ است که یک دایره به مرکز حد پایداری توان در ماشین سنکرون و شعاعی متناسب با $E_{a-\max}$ است.

$$P = 3 \frac{E_a V_t}{X_s} \sin \delta \quad \Rightarrow \quad \sin \delta = \frac{P}{3E_a V_t / X_s}$$

$$Q = 3V_t \frac{E_a \cos \delta - V_t}{X_s} \quad \Rightarrow \quad \cos \delta = \frac{Q + V_t^2 / X_s}{3E_a V_t / X_s}$$

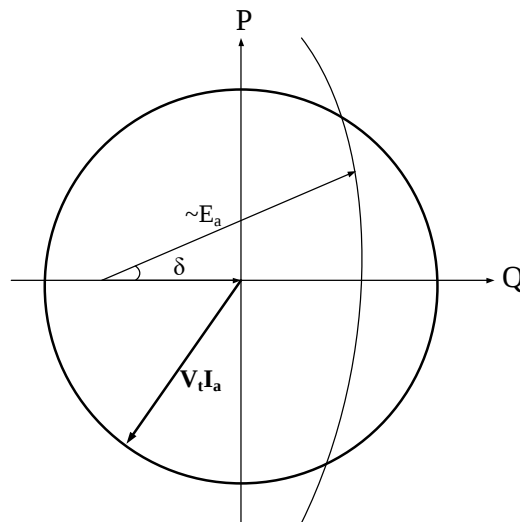
$$\sin^2 \delta + \cos^2 \delta = 1 \Rightarrow P^2 + (Q + 3 \frac{V_t^2}{X_s})^2 = (3 \frac{E_a V_t}{X_s})^2$$

یعنی یک دایره به مرکز $(0, 3V_t^2/X_s)$ و شعاع $3V_tE_a/X_s$ در صفحه توان اکتیو و راکتیو خواهیم داشت. با فرض ثابت بودن ولتاژ ترمینال اگر مقادیر را بر $3V_t/X_s$ که مقدار ثابتی است تقسیم کنیم به دیاگرام فازوری می‌رسیم و شعاع دایره متناسب با E_a یعنی در واقع جریان تحریک است.



۲- **حد جریان استاتور (توان ظاهری):** برای اندازه توان ظاهری ماشین (S) نیز مقدار ماکزیمم وجود دارد که توسط ولتاژ ترمینال و جریان خط طبق رابطه $S=VI^*$ مشخص می‌شود. ولتاژ ترمینال بر اساس قدرت عایقی سیم‌پیچ استاتور تعیین می‌شود و جریان خط نیز به مقطع سیم‌پیچ استاتور یعنی محدودیت حرارتی آن وابسته است. با توجه به رابطه زیر محدودیت توان ظاهری در صفحه توان اکتیو و راکتیو به صورت یک دایره خواهد که مرکز آن مبدأ و شعاع آن متناسب با VI است. اگر مقدار V ثابت فرض شود شعاع دایره دقیقاً متناسب با جریان خط یا همان جریان استاتور است.

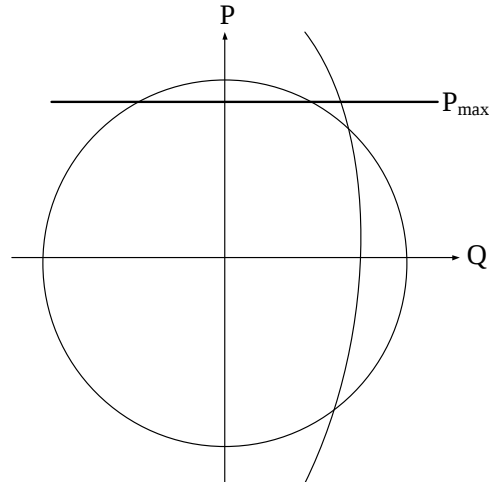
$$S = VI = P - jQ \Rightarrow |S| = |VI| = \sqrt{P^2 + Q^2}$$



۳- **حد توان اکتیو:** از نظر تولید توان اکتیو نیز دو محدودیت وجود دارد. محدودیت اول ماکزیمم توان مکانیکی توسط توربین است. یعنی ماشین قادر به تولید توان اکتیو بیشتر از آنچه توربین به محور روتور وارد می‌کند نیست. محدودیت دوم حد پایداری استاتیکی ماشین است، یعنی اگر توربین بتواند بدون محدودیت توان به ماشین وارد کند از نظر پایداری طبق رابطه زیر ماشین نمی‌تواند از یک مقدار بیشتر انرژی الکتریکی تولید کند. محدودیت اول با یک خط افقی در شکل نشان داده شده است.

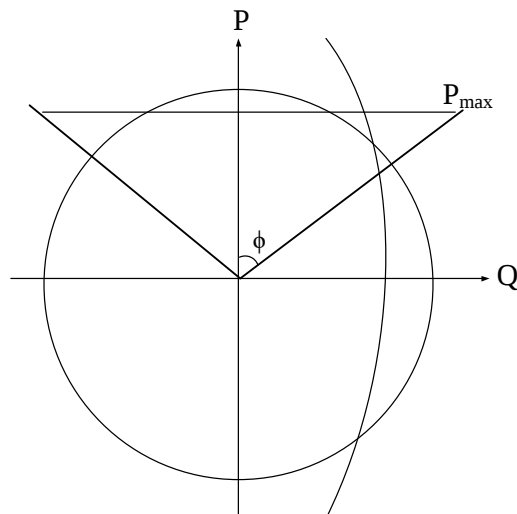
$$P = 3 \frac{E_a V_t}{X_s} \sin \delta \quad \text{حد پایداری استاتیکی}$$

نکته: بهتر است ماشین در شرایط خود تحریک باشد که پایداری استاتیک افزایش یابد. یعنی ماشین می‌تواند برای تأمین توان اکتیو معین چون ولتاژ القایی بالاتر است زاویه گشتاور کوچک‌تر داشته باشد.

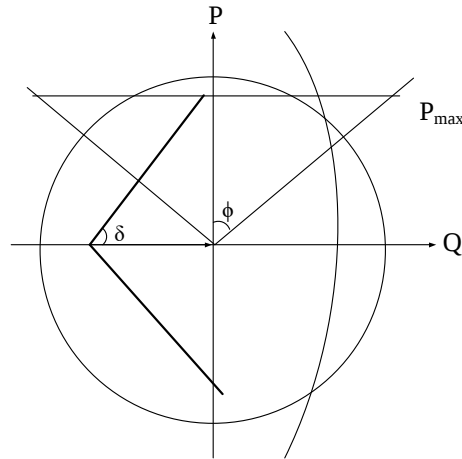


۴- **حد ضریب توان:** از نظر ضریب توان نیز محدودیت وجود دارد. زیرا برای تولید توان راکتیو که با افزایش ولتاژ انجام می‌شود. یعنی اگر ولتاژ در حداکثر خود باشد و جریان نامی نباشد در این شرایط نمی‌توان ضریب توان را کاهش داد (افزایش توان راکتیو با افزایش ولتاژ) زیرا محدودیت ولتاژ نقض می‌شود. با توجه به رابطه بین P و Q که به صورت زیر است، زاویه فاز ϕ که تانژانت آن نسبت توان راکتیو به اکتیو است (ضلع مقابل یعنی Q به ضلع مجاور یعنی P) به صورت زیر بر روی شکل مشخص می‌شود که یک محدودیت دیگر را نشان می‌دهد.

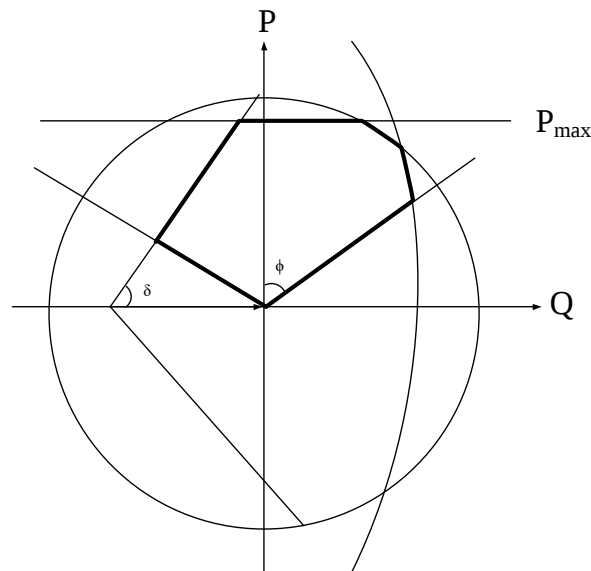
$$\tan \phi = \frac{Q}{P}$$



۵- **حد زاویه گشتاور:** ماشین سنکرون نباید در زوایای بزرگ گشتاور کار کند زیرا به حد پایداری خود که ۹۰ درجه است نزدیک می‌شود. بنابراین نهایتاً زاویه ۶۰ درجه به‌عنوان ماکزیمم زاویه گشتاور در نظر گرفته می‌شود تا در صورت نوسان تا ۳۰ درجه ماشین پایدار بماند.



در نهایت منحنی قابلیت از اشتراک همه این محدودیت‌ها بدست می‌آید. چون همه آن‌ها باید توأمان برآورده شوند که به‌صورت زیر خواهد بود

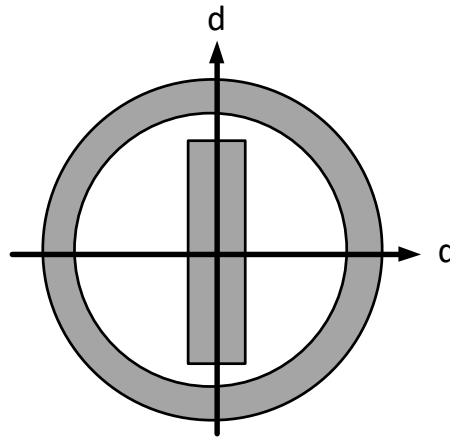


شکل (۶-۳۳): مشخصه قابلیت

نکته: چون ژنراتور نمی‌تواند توان اکتیو منفی داشته باشد معمولاً قسمت زیر نمودار هم جز منحنی قابلیت نیست.

۶-۱۳- ماشین سنکرون قطب برجسته و تئوری دومحوری d-q

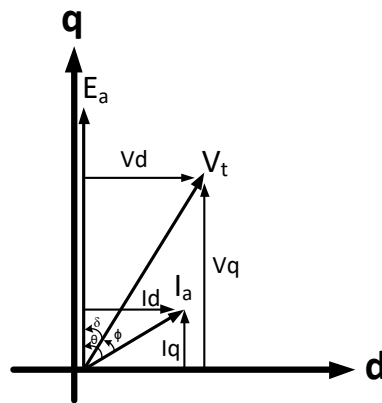
همان‌طور که در ابتدای این فصل گفته شد، روتور ماشین سنکرون می‌تواند به‌صورت استوانه‌ای باشد و یا به‌صورت قطب برجسته طراحی شود. مدار معادل و روابط توان و گشتاوری که تاکنون بررسی شد مربوط به ماشین سنکرون با روتور استوانه بود. اما در روتور قطب برجسته رلوکتانس با چرخش روتور تغییر می‌کند. در مدار معادل این دو نوع روتور ولتاژ القایی به علت اینکه از شار تولیدی روتور ناشی می‌شود ثابت است. اما راکتانس سنکرون مدار معادل به جریان آرمیچر و مقدار رلوکتانس مسیر شار بستگی دارد. بنابراین فرق ماشین سنکرون قطب برجسته و صاف در راکتانس سنکرون معادل آن‌ها است. در ماشین قطب صاف این مقدار ثابت است و در بخش‌های گذشته بررسی شد. اما در ماشین قطب برجسته مقدار راکتانس سنکرون متغیر بوده چون رلوکتانس تغییر می‌کند. برای اینکه راکتانس سنکرون متغیر در ماشین قطب برجسته در محاسبات وارد نشود، از تئوری دومحوری استفاده می‌شود. برای این کار دو محور عمود بر هم با نام‌های d و q به گونه‌ای تعریف می‌شود که محور d در راستای محور روتور و محور دیگر عمود بر آن باشد و این دو محور با سرعت سنکرون همراه با روتور می‌چرخند. شکل زیر این مطلب را نشان می‌دهد.



شکل (۶-۳۴): محورهای d و q

طبق شکل بالا فاصله هوایی در راستای محور d کمترین حالت ممکن است. یعنی رلوکتانس در راستای محور d مینیمم بوده و بنابراین طبق رابطه $L = N^2/R$ اندوکتانس این محور ماکزیمم و راکتانس معادل آن یعنی X_d نیز ماکزیمم است. به طور مشابه رلوکتانس در راستای محور q ماکزیمم است بنابراین راکتانس معادل آن یعنی X_q مینیمم است. در سایر حالات روتور مقدار راکتانس بین این دو حالت مینیمم و ماکزیمم است و تنها این مقادیر در روابط وجود خواهند داشت. بعد از بدست آوردن مقدار راکتانس معادل در راستای هر محور، جریان و

ولتاژ نیز در راستای هر محور تجزیه شده و در شکل زیر نشان داده شده است. روابط مربوطه نیز در ادامه ارائه می‌شود.



شکل (۳۵-۶): تجزیه ولتاژ و جریان در راستای محوره‌های d و q

بردار ولتاژ القایی هم‌راستای محور q است زیرا شار اصلی روتور در راستای محور d بوده و ولتاژ القایی که مشتق آن است ۹۰ درجه پس فاز است و در یک منفی هم به علت قانون لنز ضرب شده که در نهایت ۹۰ درجه نسبت به محور d پیش فاز می‌شود یعنی روی محور q قرار می‌گیرد. ولتاژ و جریان هم به‌صورت زیر تجزیه می‌شوند.

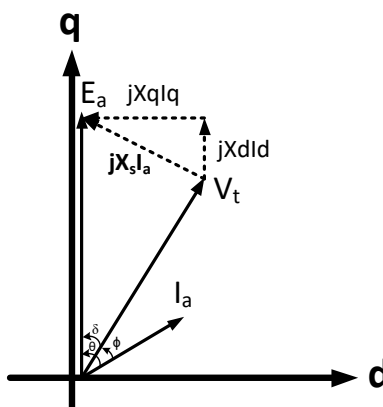
$$I_d = I_a \sin \theta$$

$$V_d = V_t \sin \delta$$

$$I_q = I_a \cos \theta$$

$$V_q = V_t \cos \delta$$

مقدار افت ولتاژ ناشی از امپدانس سنکرون را نیز می‌توان به‌صورت زیر تجزیه کرد:



شکل (۳۶-۶): تجزیه راکتانس در راستای محوره‌های d و q

با استفاده از بردارهای بدست آمده مدل مداری در واقع KVL حاکم بر ماشین به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$\begin{aligned} Vq &= E_a - jXdId \\ Vd &= -jXqIq \end{aligned} \Rightarrow V_t = Vd + Vq = E_a - jXdId - jXqIq$$

اگر از r_a صرف نظر نشود:

$$\Rightarrow V_t = Vd + Vq = E_a - jXdId - jXqIq - r_a I_a$$

• توان در ماشین سنکرون قطب برجسته

بعد از تجزیه ولتاژ، جریان و راکتانس سنکرون در راستای محور d و q توان را نیز می‌توان دو مؤلفه در راستای دو محور در نظر گرفت که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

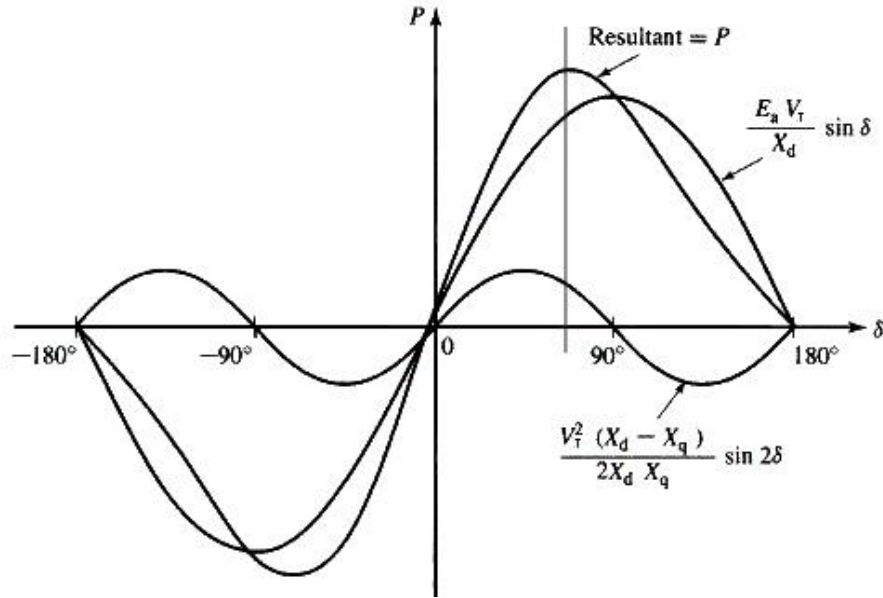
$$\begin{aligned} IdXd &= E_a - V_t \cos \delta \Rightarrow Id = \frac{E_a - V_t \cos \delta}{Xd}, & Vd &= V_t \sin \delta \\ IqXq &= V_t \sin \delta \Rightarrow Iq = \frac{V_t \sin \delta}{Xq}, & Vq &= V_t \cos \delta \end{aligned}$$

$$P = Pd + Pq = 3VdId + 3VqIq = 3V_t I_d \sin \delta + 3V_t I_q \cos \delta$$

$$P = 3V_t \frac{E_a - V_t \cos \delta}{Xd} \sin \delta + 3V_t \frac{V_t \sin \delta}{Xq} \cos \delta$$

$$P = 3 \frac{E_a V_t}{Xd} \sin \delta + 3 \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{Xq} - \frac{1}{Xd} \right) \sin 2\delta$$

جمله اول توان ناشی از تحریک و جمله دوم ناشی از تغییرات رلوکتانس است که گشتاور رلوکتانسی نام دارد و در ماشین قطب صاف وجود نداشت. منحنی توان در شکل زیر رسم شده است که مجموع دو جمله فوق است و مشاهده می‌شود حد پایداری که با یک پاره خط مشخص شده است در ماشین قطب برجسته کمتر از ۹۰ درجه می‌باشد.



شکل (۶-۳۷): منحنی توان در ماشین سنکرون قطب برجسته

توان راکتیو نیز به صورت مشابه بدست می‌آید:

$$Q = Q_d + Q_q = 3V_d(-I_q) + 3V_q I_d = 3V_t I_d \cos \delta - 3V_t I_q \sin \delta$$

$$Q = 3V_t \frac{E_a - V_t \cos \delta}{X_d} \cos \delta - 3V_t \frac{V_t \sin \delta}{X_q} \sin \delta$$

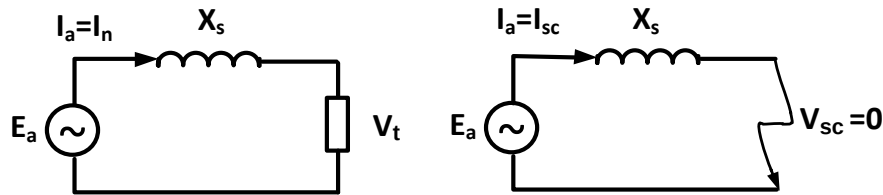
$$Q = 3 \frac{E_a V_t}{X_d} \cos \delta - 3V_t^2 \left(\frac{\cos^2 \delta}{X_d} + \frac{\sin^2 \delta}{X_q} \right)$$

۶-۱۴- حالت گذرا در ماشین سنکرون

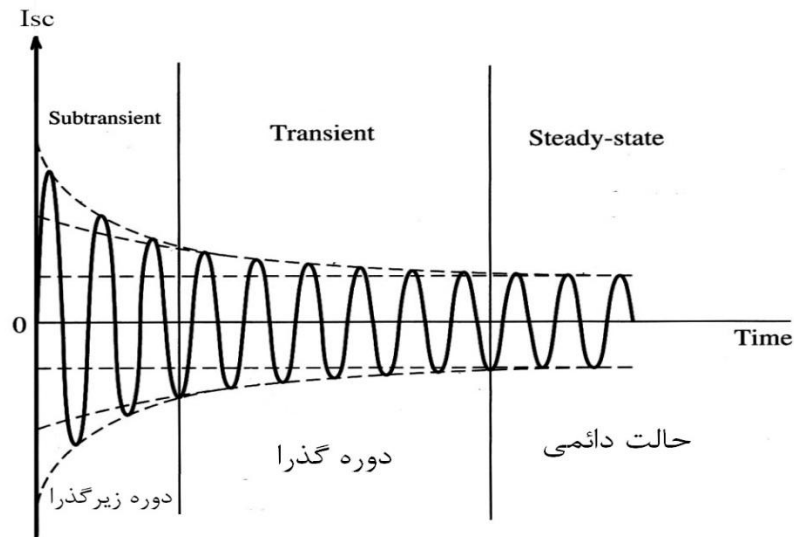
مواردی که تاکنون مورد بررسی قرار گرفت در حالت کار دائمی ماشین سنکرون بوده که همه کمیت‌ها به مقدار ماندگار خود رسیده‌اند. اما در سیستم قدرت یک تغییر در ورودی توان در ماشین سنکرون و یا تغییرات دیگر مانند تغییر بار و خصوصاً اتصال کوتاه شرایط ماندگار را به هم زده و رفتار ماشین در لحظات اولیه این تغییرات متفاوت خواهد بود که در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

اگر از مقاومت مدار آرمیچر ماشین سنکرون صرف‌نظر شود و مدار معادل آن به صورت زیر تنها یک سلف داشته باشد، انتظار داریم در زمان اتصال کوتاه جریان اتصالی که به مراتب از جریان حالت کار دائمی ماشین بزرگ‌تر

است از آن عبور کند. یعنی جریان اتصال کوتاه I_{sc} یک جریان سینوسی با دامنه‌ای بسیار بیشتر از جریان حالت دائمی I_n است.



اما در ماشین سنکرون مقدار جریان خطا در لحظات اولیه اتصالی حتی از جریان اتصال کوتاه I_{sc} نیز بزرگ‌تر است که علت آن رفتار سیم‌پیچ‌های این نوع ماشین است. شکل زیر جریان اتصال کوتاه را نشان می‌دهد که شامل سه دوره زیر گذرا، گذرا و حالت دائمی است که هر کدام در ادامه تشریح می‌شود.



شکل (۶-۳۸): شکل موج جریان آرمیچر در لحظه اتصال کوتاه تا رسیدن به جریان خطای حالت ماندگار

دوره زیر گذرا: در این دوره اتصال کوتاه باعث می‌شود سرعت روتور تغییر کرده و در نتیجه در سیم‌پیچ‌های دمپر (در قسمت بعدی توضیح داده خواهد شد) جریان القا شود که این جریان مانند تحریک عمل کرده و ولتاژ داخلی E_a را افزایش می‌دهد که نتیجه آن افزایش جریان اتصال کوتاه است. مدت زمان این دوره به ثابت زمانی مدار دمپر T'' وابسته است و معمولاً کوچک بوده و ۲-۳ سیکل طول می‌کشد. در دوره زیر گذرا بیشترین جریان اتصال کوتاه را خواهیم داشت که حدود ۱۰ برابر جریان اتصال کوتاه حالت دائمی خواهد بود و با I_{sc} نشان داده می‌شود.

دوره گذرا: در این دوره اتصال کوتاه باعث می‌شود در سیم‌پیچ‌های تحریک جریان القا شود که این جریان ولتاژ داخلی E_a را افزایش می‌دهد که نتیجه آن افزایش جریان اتصال کوتاه است. مدت زمان این دوره به ثابت زمانی مدار تحریک T' وابسته است و معمولاً ۱۰-۱۵ سیکل طول می‌کشد. در دوره گذار جریان اتصال کوتاه از حالت زیر گذرا کمتر است که حدود ۵ برابر جریان اتصال کوتاه دائمی خواهد بود و با I_{sc}' نشان داده می‌شود.

حالت دائمی اتصال کوتاه: در این حالت افزایش جریان به واسطه افزایش تحریک در مدار دمپر و تحریک بر طرف شده و تنها جریان اتصال کوتاه حالت ماندگار تا زمان رفع خطا باقی می‌ماند و با I_{sc} نشان داده می‌شود.

همان‌طور که گفته شد علت افزایش ۲ مرحله‌ای جریان اتصال کوتاه تا قبل از رسیدن به مقدار ماندگار افزایش تحریک و ولتاژ القایی است. می‌توان این افزایش ولتاژ القایی را با کاهش راکتانس عکس‌العمل آرمیچر و یا راکتانس سنکرون مدل کرد. به عبارت دیگر ولتاژ القایی در هر دوره ثابت فرض می‌شود و در دوره زیر گذار راکتانس معادل آن یعنی X_s'' کمترین مقدار را دارد. بعد از آن X_s' را خواهیم داشت که کمتر خواهد بود و در نهایت X_s که همان مقدار واقعی راکتانس سنکرون است.

$$X_s'' = \frac{E_a}{I_{sc}''}$$

$$X_s' = \frac{E_a}{I_{sc}'} \quad X_s'' < X_s' < X_s \quad I_{sc}'' > I_{sc}' > I_{sc}$$

$$X_s = \frac{E_a}{I_{sc}}$$

بنابراین در هر دوره برای محاسبات از راکتانس معادل آن استفاده می‌شود. X_s'' راکتانس زیر گذرا، X_s' راکتانس گذرا و X_s راکتانس حالت دائمی است. مقدار جریان‌های زیر گذرا و گذرا برای تنظیم رله‌های حفاظتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نکته: در ماشین قطب برجسته، همان‌طور که گفته شد در زمان اتصال کوتاه تنها راکتانس محور d را خواهیم داشت یعنی $X_s = X_d$ است. بنابراین در محاسبات از مقادیر راکتانس این محور در دوره‌های زیر گذرا، گذرا و حالت دائمی استفاده می‌کنیم.

$$X_d'' < X_d' < X_d$$

در شکل زیر پارامترهای یک ژنراتور ۷۰۰ مگا ولت-آمپر، ۱۶.۵ کیلو ولت سه فاز با اتصال ستاره زمین شده از کتابخانه نرم افزار دیگسایلنت نشان داده شده است.

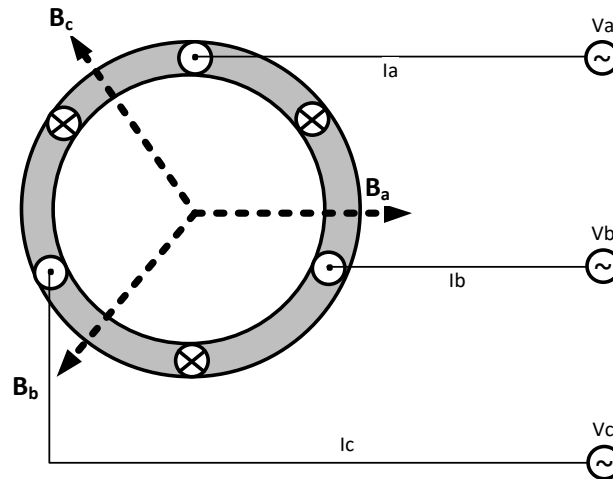
Inertia Constant H (rated to Sgn)		3.471	s		
Stator parameters		Synchronous Reactances			
rstr	0.	p.u.	xd	2.03	p.u.
xl	0.196	p.u.	xq	1.96	p.u.
Rotor Type		Rotor mutual reactances			
☐ Salient pole ☒ Round Rotor		xrld	0.	p.u.	
		xrlq	0.	p.u.	
Transient Time Constants		Transient Reactances			
Td0'	6.7	s	xd'	0.399	p.u.
Tq0'	0.41	s	xq'	0.6377	p.u.
Subtransient Time Constants		Subtransient Reactances			
Td0''	0.05	s	xd''	0.315	p.u.
Tq0''	0.035	s	xq''	0.315	p.u.

شکل (۶-۳۹): پارامترهای یک ژنراتور ۷۰۰ مگا ولت-آمپر

۶-۱۵- موتور سنکرون

در موتور سنکرون مانند همه ماشین‌های دیگر دو میدان وجود دارد که از برهم‌کنش این دو میدان یک نیرو (گشتاور) ایجاد می‌شود. این پدیده دقیقاً شبیه حالتی است که دو آهنربا در کنار یکدیگر قرار گیرند که نیرویی در جهت هم‌راستا شدن آن دو به یکدیگر وارد می‌کنند. اما در ماشین سنکرون همان‌طور که گفته شد روتور دارای تحریک DC است پس یک میدان ثابت تولید می‌کند و از آنجاکه روتور با سرعت سنکرون می‌چرخد میدان آن هم دقیقاً با سرعت سنکرون در حال چرخش است. بنابراین کافیهست میدان استاتور هم یک میدان چرخان با سرعت سنکرون باشد تا این دو میدان با یک سرعت بچرخند و گشتاور دائمی ایجاد شود. استاتور

توسط یک منبع سه فاز متقارن با دامنه ولتاژهای برابر و اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه تغذیه می‌شود که این ولتاژها جریان‌های سه فاز متقارنی در سیم‌پیچ‌های استاتور به‌صورت زیر ایجاد می‌کنند.



شکل (۴۰-۶): سیم‌پیچ ۳ فاز استاتور و میدان‌های آن‌ها

$$I_a = I_m \cos \omega t$$

$$I_b = I_m \cos(\omega t - 120)$$

$$I_c = I_m \cos(\omega t - 240)$$

هر کدام از این جریان‌ها یک میدان مغناطیسی در استاتور به وجود می‌آورند. میدان‌های به وجود آمده از لحاظ دامنه با یکدیگر برابر هستند چون دامنه جریان و تعداد دور همه سیم‌پیچ‌ها یکسان است. اما این میدان‌ها در فضای داخل استاتور دارای زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم هستند چون هر کدام از سیم‌پیچ‌ها در شیارهای خود با زاویه مکانی ۱۲۰ درجه داخل استاتور قرار دارند. بنابراین میدان هر فاز به‌صورت زیر خواهد بود که B_m دامنه آنهاست که برای همه یکسان است و زاویه θ زاویه مکانی درون استاتور است.

$$B_a = B_m \cos \omega t \cos \theta$$

$$B_b = B_m \cos(\omega t - 120) \cos(\theta - 120)$$

$$B_c = B_m \cos(\omega t - 240) \cos(\theta - 240)$$

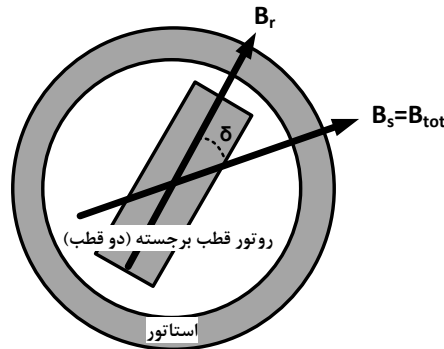
میدان برآیند از جمع این سه میدان با تبدیل ضرب به جمع و ساده‌سازی به‌صورت زیر بدست می‌آید.

$$B_{tot} = B_a + B_b + B_c = \frac{3}{2} B_m \cos(\omega t - \theta)$$

مشاهده می‌شود میدان برآیند دارای دامنه ثابت است و با گذشت زمان یعنی افزایش t با سرعت ω از موقعیت اولیه یعنی θ دور می‌شود. به عبارت دیگر با سرعت ω درون استاتور در حال چرخش است و این همان میدان چرخانی است که برای ایجاد گشتاور باید با سرعت روتور برابر باشد یعنی کافیسست فرکانس زاویه منبع سه فاز برابر با فرکانس چرخش روتور باشد تا میدان استاتور و روتور با یک سرعت که همان سرعت سنکرون است بچرخند.

دو میدان روتور و استاتور با سرعت یکسان در حال چرخش هستند و به یکدیگر گشتاور وارد می‌کنند و از آنجا که استاتور ساکن است این گشتاور باعث چرخش روتور می‌شود. گشتاور وارده با دامنه میدان‌ها رابطه مستقیم دارد یعنی هرچه میدان قوی‌تر باشد گشتاور هم بیشتر است و با زاویه اولیه بین میدان روتور و استاتور نیز مرتبط است به صورتی که اگر این میدان‌ها در یک راستا باشند دیگر گشتاوری وارد نخواهد شد که در رابطه گشتاور به صورتی سینوس زاویه بین دو میدان ظاهر می‌شود. در نهایت یک ضریب ثابت بسته به ساختار ماشین و یک علامت منفی نشان‌دهنده اینکه گشتاور در جهت کاهش زاویه اعمال می‌شود در رابطه وجود دارد که به صورت زیر است. که B_s همان میدان برآیند B_{tot} در استاتور است.

$$T_e = -k B_s B_r \sin(\delta)$$



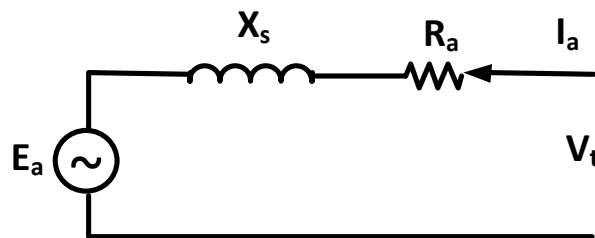
شکل (۶-۴۱): میدان استاتور و روتور

اما δ در حالت کار ژنراتوری بدین صورت ایجاد می‌شود که روتور توسط یک عامل خارجی مانند توربین به چرخش در می‌آید. بعد از شروع حرکت روتور میدان آن هم می‌چرخد و میدان استاتور در صورت بسته بودن مدار استاتور ایجاد شده و جریان برقرار می‌شود. این جریان میدان استاتور را به وجود می‌آورد که با کمی فاصله که همان δ است به دنبال روتور می‌چرخد. مقدار زاویه δ را گشتاور وارده به روتور مشخص می‌کند و δ تا زمانی

افزایش می‌یابد که گشتاور الکترومغناطیسی ماشین با گشتاور خارجی برابر شود. در حالت موتور جریانی که به سیم‌پیچ‌های استاتور داده می‌شود میدان استاتور شروع به چرخیدن می‌کند. با توجه به لختی روتور میدان دوار آن بعد از میدان استاتور با اختلاف زاویه δ شروع به چرخیدن می‌کند و این اختلاف زاویه به اندازه‌ای است که گشتاور تولید موتور سنکرون با گشتاور بار برابر شود. بنابراین در حالت ژنراتوری میدان استاتور عقب‌تر از میدان روتور و در حالت موتوری برعکس است به همین علت علامت گشتاور تولید این دو نیز مخالف یکدیگر است.

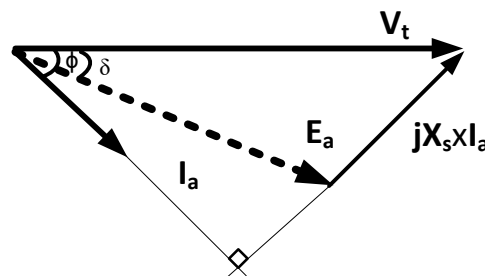
ساختمان موتور سنکرون مانند ژنراتور سنکرون است و تفاوت آن‌ها معکوس بودن جهت توان انتقالی بوده یعنی موتور سنکرون توان الکتریکی می‌گیرد و توان مکانیکی تحویل می‌دهد. بنابراین جهت جریان استاتور نیز عکس حالت ژنراتوری است. مدار معادل موتور سنکرون در شکل زیر نشان داده شده است.

$$V_t = E_a + jX_s I_a + R_a I_a$$



شکل (۶-۴۲): مدار معادل موتور سنکرون

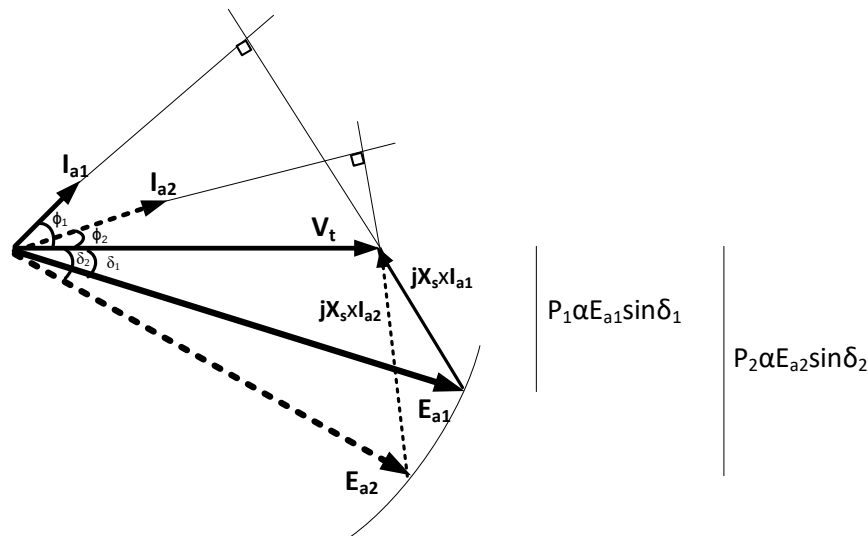
با استفاده از مدار معادل و KVL حاکم بر آن نمودار فازوری رسم شده است. مشاهده می‌شود که مقدار زاویه δ منفی شده یعنی ولتاژ القایی عقب‌تر از ولتاژ ترمینال است. به عبارت دیگر، میدان روتور عقب‌تر میدان استاتور است و توان اکتیو دارای علامتی مخالف حالت ژنراتوری می‌باشد، چون به جای تحویل توان، مصرف توان خواهیم داشت.



موارد استفاده، مزیت‌ها و معایب: موتور سنکرون در توان‌های بالای ۱ مگاوات گزینه مناسب‌تری نسبت به موتورهای القایی است. این موتور همان‌طور که در ادامه گفته می‌شود می‌تواند حتی توان راکتیو تولید کند در صورتی که موتور القایی همیشه توان راکتیو مصرف می‌کند، بنابراین می‌تواند برای تصحیح ضریب توان به کار گرفته شود. نسبت به موتورهای القایی بیشتر قابل کنترل است. اما از معایب آن این است که تنها در یک سرعت که سرعت سنکرون باشد کار می‌کند (البته تغییر اندک مشکلی ندارد) و گشتاور راه‌اندازی ندارد.

۶-۱۵-۱- اثر تغییر بار مکانیکی بر موتور سنکرون

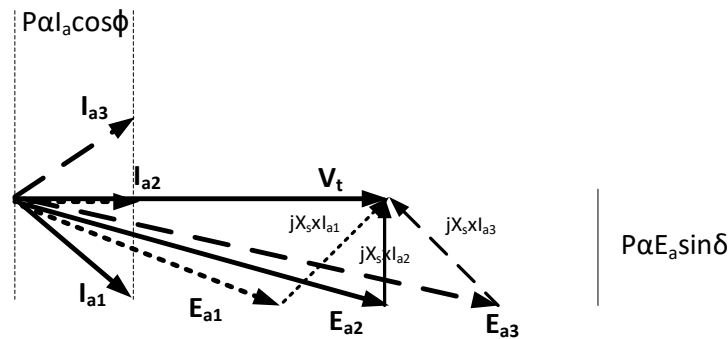
اگر بار مکانیکی روی محور موتور سنکرون افزایش یابد، روتور کند می‌شود و با کند شدن آن زاویه بین میدان روتور و استاتور یعنی δ افزایش می‌یابد. با افزایش این زاویه طبق رابطه $T = -KB_s B_r \sin \delta$ گشتاور القایی افزایش می‌یابد. افزایش گشتاور القایی جریان بیشتری از منبع گرفته و سرعت را افزایش می‌دهد و موتور باز هم به سرعت اولیه خود یعنی سرعت سنکرون می‌رسد اما این بار با زاویه δ بزرگ‌تر کار می‌کند. در شکل زیر نمودار فازوری تغییر بار در موتور سنکرون با صرف‌نظر از مقاومت آرمیچر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار E_a با افزایش بار ثابت می‌ماند چون تنها به جریان تحریک I_f وابسته است. با افزایش بار موتور توان اکتیو یا متناظر با آن $E_a \sin \delta$ زیاد می‌شود. اما چون V_t به منبع متصل است و ثابت است و X_s هم مقدار ثابتی دارد بنابراین برای برقراری KVL باید I_a افزایش یابد که به تبع آن $jX_s I_a$ زیاد شود و بردار E_a را به V_t وصل کند. علاوه بر این مقدار زاویه ϕ نیز تغییر می‌کند. شکل زیر برای بار پیش فاز رسم شده است.



شکل (۶-۴۳): اثر تغییر بار مکانیکی بر موتور سنکرون

۶-۱۵-۲- اثر تغییر جریان تحریک I_f بر موتور سنکرون

افزایش جریان تحریک ولتاژ القایی را افزایش می‌دهد اما بر روی توان اکتیو تأثیری ندارد، زیرا که توان اکتیو تنها وقتی تغییر می‌کند که بار مکانیکی تغییر کرده باشد و به تبع آن جریان آرمیچر تغییر کند. بنابراین در دیگرام فازوری فواصل متناسب با توان اکتیو یعنی $E_a \sin \delta$ و $I_a \cos \phi$ باید ثابت بماند. برای بررسی تغییر جریان تحریک فرض می‌شود موتور در حال کار به صورت پس فاز است. اگر جریان تحریک افزایش یابد E_a زیاد می‌شود و چون جمع آن با افت ولتاژ $jX_s I_a$ برابر V_t است گه ثابت بوده، مقدری جریان کم می‌شود و از درجه پس فازی آن کم می‌شود تا جایی که زاویه صفر با ولتاژ پیدا کند (E_{a2} , I_{a2}). با افزایش بیشتر جریان تحریک E_a بزرگ‌تر شده و جریان نیز پیش فاز می‌شود (E_{a3} , I_{a3}). بنابراین با افزایش جریان تحریک مقدار توان اکتیو ثابت ماند اما حالا کار موتور از پس فاز به پیش فاز تغییر کرد. یعنی موتور سنکرون هم می‌تواند Q مصرف کند و هم تولید کند علی‌رغم اینکه همیشه P مصرف می‌کند. لازم به ذکر است که V_t با توجه به اینکه به منبع متصل است همیشه ثابت می‌ماند.

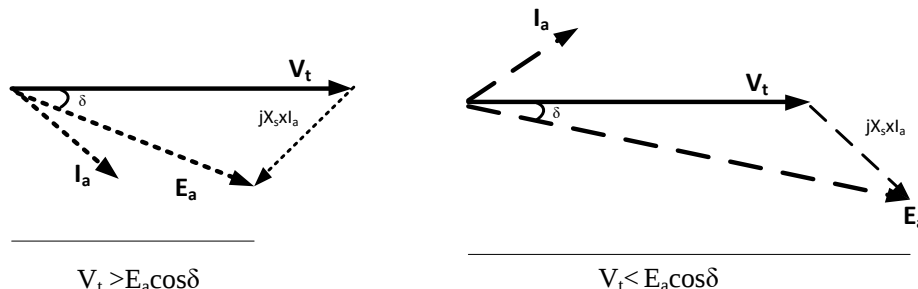


شکل (۶-۴۴): اثر تغییر جریان تحریک I_f بر موتور سنکرون

بنابراین:

۱- اگر $E_a \cos \delta > V_t$ جریان پیش فاز و موتور Q تولید می‌کند.

۲- اگر $E_a \cos \delta < V_t$ جریان پس فاز و موتور Q مصرف می‌کند.

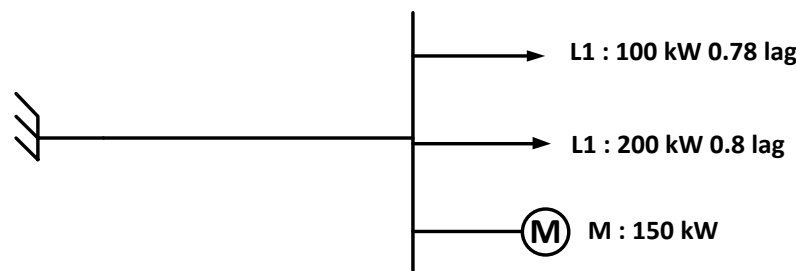


۶-۱۵-۳- کندانسور سنکرون

به موتور سنکرونی که در حالت بی‌بار استفاده می‌شود، کندانسور سنکرون گفته می‌شود. همان‌طور که در قسمت قبل گفته شد، با تغییر جریان تحریک می‌توان حالت عملکرد موتور سنکرون را از پیش فاز به پس فاز و یا بالعکس تغییر داد. بنابراین برای کنترل توان راکتیو در یک منطقه از این موتور می‌توان استفاده کرد. به این صورت که در زمان کمبود Q با افزایش I_f موتور به حالت فوق تحریک رفته و توان راکتیو تولید می‌کند. توسط خازن نیز می‌توان توان راکتیو به‌صورت محلی تولید کرد اما کندانسور سنکرون به‌صورت پیوسته توان راکتیو را کنترل می‌کند بر عکس خازن که به‌صورت گسسته و پله‌ای این کار را انجام می‌دهد چون خازن‌های یک بانک خازنی به ترتیب وارد مدار می‌شوند. بنابراین کندانسور سنکرون اصلاح ضریب توان را انجام می‌دهد و تلفات خط نیز به‌واسطه تأمین محلی توان راکتیو در محل بار کاهش می‌یابد.

مثال: یک موتور سنکرون و ۲ بار مانند شکل زیر توسط یک خط انتقال به باس بی‌نیهایت ۴۸۰ ولت وصل شده‌اند.

- ۱- اگر موتور سنکرون دارای ضریب توان ۰.۸۵ پس فاز باشد جریان خط انتقال چقدر است؟
- ۲- اگر موتور سنکرون دارای ضریب توان ۰.۸۵ پیش فاز باشد جریان خط انتقال چقدر است؟
- ۳- اگر تلفات خط انتقال $P_{Loss} = 3I_L^2 R_L$ باشد، تلفات خط در دو حالت قبل را با هم مقایسه کنید.



حل:

۱-

$$Q_{L1} = P_1 \tan \phi_1 = 100 \tan \cos^{-1} 0.78 = 80.2 \quad kVar$$

$$Q_{L2} = P_2 \tan \phi_2 = 200 \tan \cos^{-1} 0.8 = 150 \quad kVar$$

$$Q_M = P_M \tan \phi = 150 \tan \cos^{-1} 0.85 = 93 \quad kVar$$

$$P_{tot} = 100 + 200 + 150 = 450 \quad kW$$

$$Q_{tot} = 80.2 + 150 + 93 = 323.2 \text{ kVar}$$

$$PF = \cos \varphi = \cos \tan^{-1} \frac{Q}{P} = \cos \tan^{-1} \frac{323.2}{450} = 0.812$$

$$I = \frac{P_{tot}}{\sqrt{3}V_L \cos \varphi} = \frac{450}{\sqrt{3}(480)(0.812)} = 667 \text{ A}$$

۲- توان اکتیو و راکتیو بارها تغییر نکرده فقط توان راکتیو موتور در حالت دوم تغییر می‌کند:

$$Q_M = P_M \tan \varphi = 150 \tan(-\cos^{-1} 0.85) = -93 \text{ kVar}$$

$$P_{tot} = 100 + 200 + 150 = 450 \text{ kW}$$

$$Q_{tot} = 80.2 + 150 + (-93) = 137.2 \text{ kVar}$$

$$PF = \cos \varphi = \cos \tan^{-1} \frac{Q}{P} = 0.957$$

$$I = \frac{P_{tot}}{\sqrt{3}V_L \cos \varphi} = \frac{450}{\sqrt{3}(480)(0.957)} = 566 \text{ A}$$

۳-

$$P_{Loss1} = 3I^2 R_L = 3(667)^2 = 1344700 R_L$$

$$P_{Loss2} = 3I^2 R_L = 3(566)^2 = 961070 R_L$$

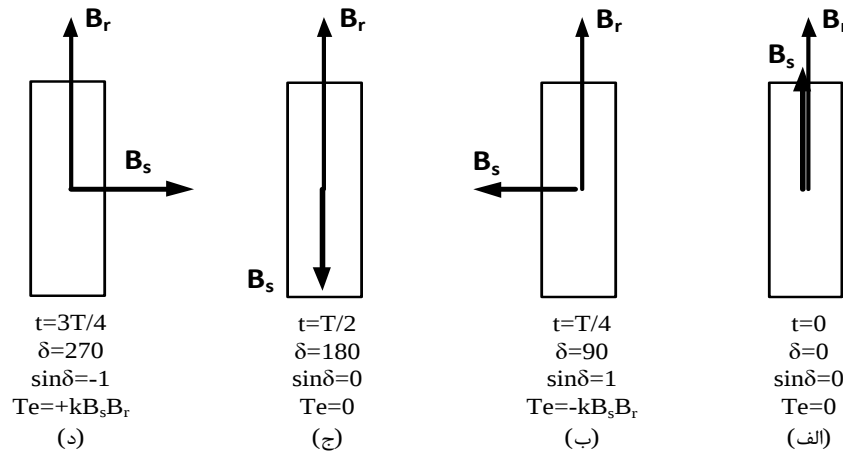
توان حقیقی ثابت بوده اما جریان در حالت دوم به علت ضریب توان بهتر کمتر بوده که تلفات کمتر را نتیجه می‌دهد.

۶-۱۶- راه‌اندازی موتور سنکرون

موتور سنکرون برخلاف موتور القایی نمی‌تواند سرعت بگیرد و به سرعت سنکرون برسد. به عبارت دیگر این موتور گشتاور راه‌اندازی ندارد. برای بررسی بهتر این موضوع، گشتاور وارد شده به موتور در لحظه سکون در یک سیکل طبق رابطه $T = -K B_s B_r \sin \delta$ مورد بررسی قرار می‌گیرد و نشان داده خواهد شد که گشتاور متوسط در یک سیکل صفر بوده و در مجموع موتور نمی‌چرخد.

طبق شکل (الف) که شروع حرکت است اختلاف بین میدان استاتور و روتور یعنی B_s و B_r صفر است بنابراین طبق رابطه گفته شده برای گشتاور مقدار آن صفر خواهد بود. در شکل (ب) B_s که میدان استاتور است و با سرعت سنکرون می‌چرخد فرض شده است که به اندازه ۹۰ درجه چرخیده است اما روتور به علت لختی که دارد حرکتی نکرده است. گشتاور به علت اینکه زاویه بین میدان روتور و استاتور ۹۰ درجه است برابر $-K B_s B_r$ می‌شود. در شکل (ج) میدان استاتور مجدداً ۹۰ درجه چرخیده و روتور کماکان ثابت است. اختلاف زاویه بین

میدان روتور و استاتور ۱۰ درجه می‌شود بنابراین گشتاور صفر خواهد شد. در شکل (د) باز هم میدان استاتور می‌چرخد و زاویه بین میدان روتور و استاتور به ۲۷۰ درجه می‌رسد و گشتاور $+K B_s B_r$ خواهد شد. یک سیکل بررسی شد که مقدار متوسط گشتاور تولیدی ملاحظه می‌شود صفر شده است. در این حالت گشتاورهای وارد شده به روتور در زمان‌های مختلف فقط در روتور ارتعاش ایجاد می‌کنند و باعث گرم شدن آن می‌شوند و برآیند آن‌ها صفر بوده و روتور در هیچ سمتی سرعت نمی‌گیرد.



شکل (۴۵-۶): یک سیکل در زمان راه‌اندازی موتور سنکرون

• روش‌های راه‌اندازی موتور سنکرون

از سه روش زیر برای راه‌اندازی موتور سنکرون می‌توان استفاده نمود.

۱- کاهش سرعت میدان استاتور

فرکانس منبع را کاهش داده تا سرعت میدان استاتور کم شود. با این کار میدان استاتور کندتر شده و روتور فرصت کافی برای شتاب گرفتن و قفل شدن با میدان استاتور را خواهد داشت. کاهش فرکانس توسط ادوات الکترونیک قدرت انجام می‌شود. که از فرکانس کمتر از ۱ هرتز شروع شده و سپس افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که با کاهش فرکانس طبق رابطه $E_a = k\phi\omega$ مقدار ω کم شده و در نهایت ولتاژ القایی نیز کم می‌شود. بنابراین برای جلوگیری از افزایش جریان I_a طبق رابطه زیر باید ولتاژ منبع نیز با فرکانس تغییر کند یعنی نسبت آن‌ها ثابت باشد.

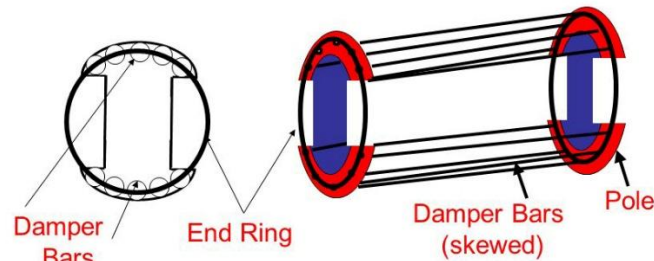
$$I_a = \frac{V_t - E_a}{jX_s} \quad \frac{V_t}{f} = cte$$

۲- راه‌اندازی توسط گرداننده اولیه

در این روش موتور سنکرون به وسیله یک موتور دیگر چرخانده می‌شود. موتور راه‌انداز کافی است بر لختی روتور غلبه کند، بنابراین موتور کوچکی است. چون بیشتر موتورهای سنکرون سیستم تحریک بدون جاروبک دارند که روی محور آن‌ها سوار است، می‌توان از این ماشین‌های تحریک به عنوان موتور راه‌انداز استفاده کرد.

۳- راه‌اندازی با استفاده از سیم‌پیچ‌های میرایی

یکی از متداول‌ترین روش‌های راه‌اندازی موتور سنکرون است. این سیم‌پیچ‌ها در شیارهایی در رخ روتور طبق شکل زیر تعبیه شده‌اند و در نهایت اتصال کوتاه می‌شوند.



شکل (۶-۴۶): روتور ماشین سنکرون به همراه سیم‌پیچ دمپر

• اثر سیم‌پیچ‌های میرایی بر پایداری ماشین سنکرون

با افزودن سیم‌پیچ‌های میرایی در واقع یک تیر و دو نشان می‌زنیم. زیرا پایداری ماشین نیز بهبود می‌یابد. اگر روتور با سرعت سنکرون بچرخد در این سیم‌پیچ‌ها به علت اینکه میدان استاتور نیز با سرعت سنکرون می‌چرخد هیچ جریانی القا نمی‌شود. اما اگر سرعت روتور کم شود جریان القاشده که گشتاوری در جهت افزایش سرعت روتور ایجاد می‌کند. همچنین اگر سرعت روتور زیاد شود باز هم جریانی ایجاد می‌شود که این بار گشتاور مخالف ایجاد می‌کند که سرعت روتور را کاهش دهد. بنابراین تغییرات اندک را این سیم‌پیچ‌ها از بین می‌برند و پایداری را بهبود می‌دهند.

تمرینها (سوالهای مفهومی و مسائل آسان)

۱. نحوه کار ماشین سنکرون را به صورت مختصر توضیح دهید و دو کاربرد مهم آن را در صنعت نام ببرید.
 ۲. تفاوت روتور قطب صاف و قطب برجسته را توضیح دهید و برای هر کدام یک مثال صنعتی بزنید.
 ۳. توان اکتیو ژنراتور سنکرون چگونه به زاویه بار δ وابسته است؟ فرمول را بنویسید و توضیح دهید.
 ۴. اثبات کنید که زاویه بار δ زاویه بین روتور و استاتور هما زاویه بین E_a و V_t است.
 ۵. رابطه گشتاور ماشین سنکرون را اثبات کنید.
 ۶. نقش سیستم تحریک در ماشین سنکرون چیست و چرا اهمیت دارد؟
 ۷. تفاوت عملکرد ماشین سنکرون به عنوان ژنراتور و به عنوان موتور را توضیح دهید.
 ۸. مدار معادل ژنراتور سنکرون را رسم کنید و نقش هر عنصر (منبع ولتاژ داخلی، راکتانس سنکرون، مقاومت) را توضیح دهید.
 ۹. محدوده عملکرد پایدار ژنراتور سنکرون را با رسم شکل توضیح دهید.
 ۱۰. نقش سیم‌پیچ دمپر در ماشین سنکرون چیست و در چه شرایطی استفاده می‌شود؟
 ۱۱. آزمایش مدار باز و اتصال کوتاه چه اطلاعاتی از ژنراتور می‌دهند؟ نحوه تعیین ولتاژ مدار باز و خط مشخصه اتصال کوتاه را توضیح دهید.
 ۱۲. مزایا و معایب استفاده از ماشین سنکرون به عنوان جبران‌ساز سنکرون چیست؟
 ۱۳. تفاوت بین راکتانس‌های X_d و X_q را بیان کنید و اثر آن بر معادله توان را توضیح دهید.
 ۱۴. اگر ضریب دروپ گاورنر ژنراتور ۵ درصد باشد، افزایش بار ۲۰ درصد چه تغییری در فرکانس ایجاد می‌کند؟ فرض کنید فرکانس نامی ۵۰ هرتز است.
 ۱۵. موتور سنکرون ۱.۵ مگاوات آمپر و ۶.۶ کیلو ولت در بار کامل و توان اکتیو ۱.۲ مگاوات کار می‌کند. ضریب توان را با تغییر تحریک می‌توان از ۰.۸ پس‌فاز تا ۰.۹ پیش‌فاز تغییر داد. بازه تغییر توان راکتیو (Q_{min} تا Q_{max}) را محاسبه کنید.
 ۱۶. یک ژنراتور سنکرون سه‌فاز با ولتاژ داخلی $E=1.1$ pu، ولتاژ ترمینال $V=1.0$ pu و راکتانس سنکرون $X_s=1.2$ pu کار می‌کند.
- الف) توان بیشینه قابل انتقال را به دست آورید.
- ب) اگر ژنراتور در توان اکتیو ۰.۸ pu کار کند، زاویه بار δ چند درجه است؟