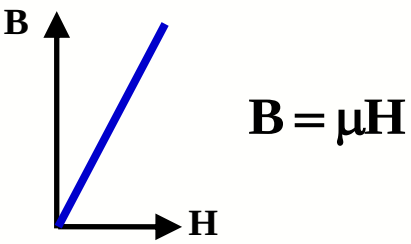
مبحث چهاردهم:

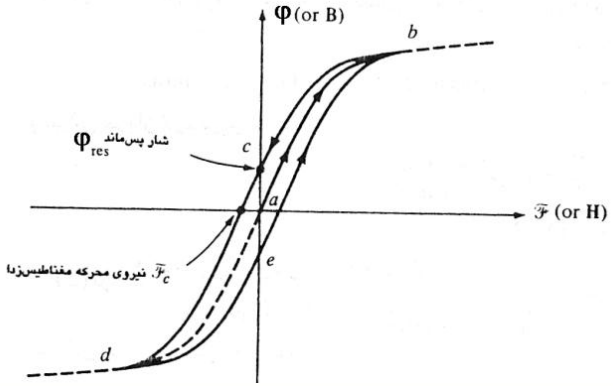
تحریک و هارمونیکها در ترانسفورماتورهای سه فاز

- هارمونیک‌ها در ترانسفورماتورها
- عیوب هارمونیک‌ها
- روش‌های حذف هارمونیک ها

- ✓ در یک ترانسفورماتور ایده‌ال مشخصه مغناطیسی هسته به صورت خطی است و در نتیجه ولتاژهای هر دو طرف ترانس کاملا سینوسی هستند.
- ✓ اما در عمل هسته ترانسفورماتورها غیرخطی بوده که منجر به ایجاد ولتاژهای غیرسینوسی و هارمونیکها می گردد.
- ✓ علل غیرخطی بودن: ۱- حلقه هیسترزیس ۲- اشباع

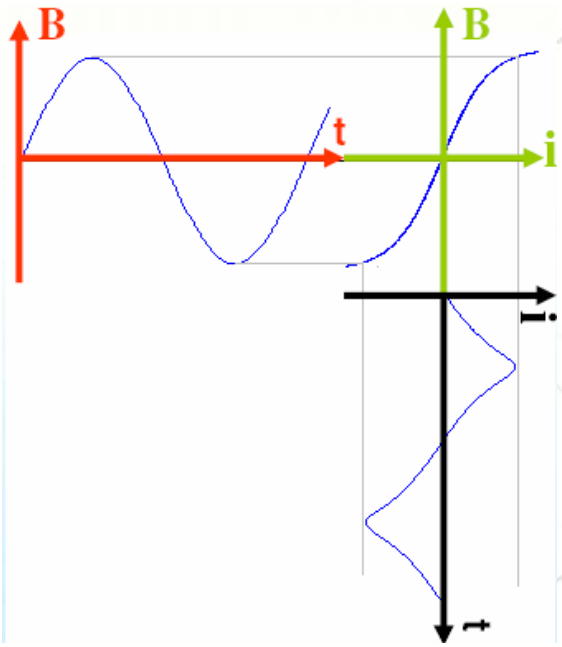


مدل ایده آل (خطی) یک هسته مغناطیسی

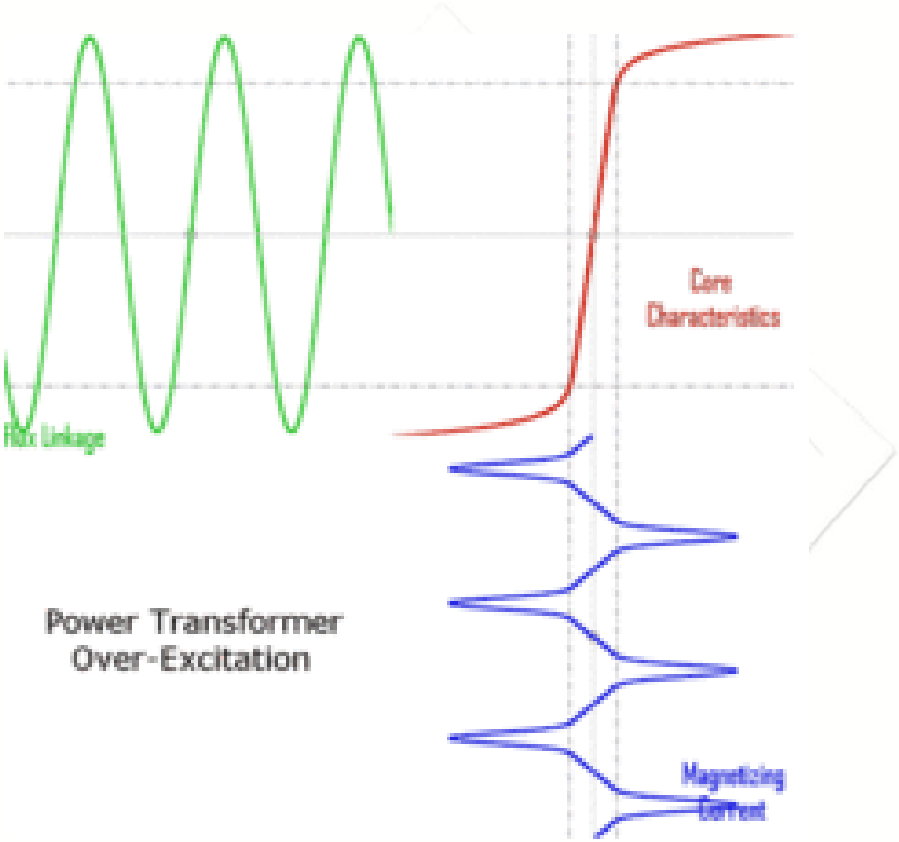


مدل واقعی (غیرخطی) یک هسته مغناطیسی

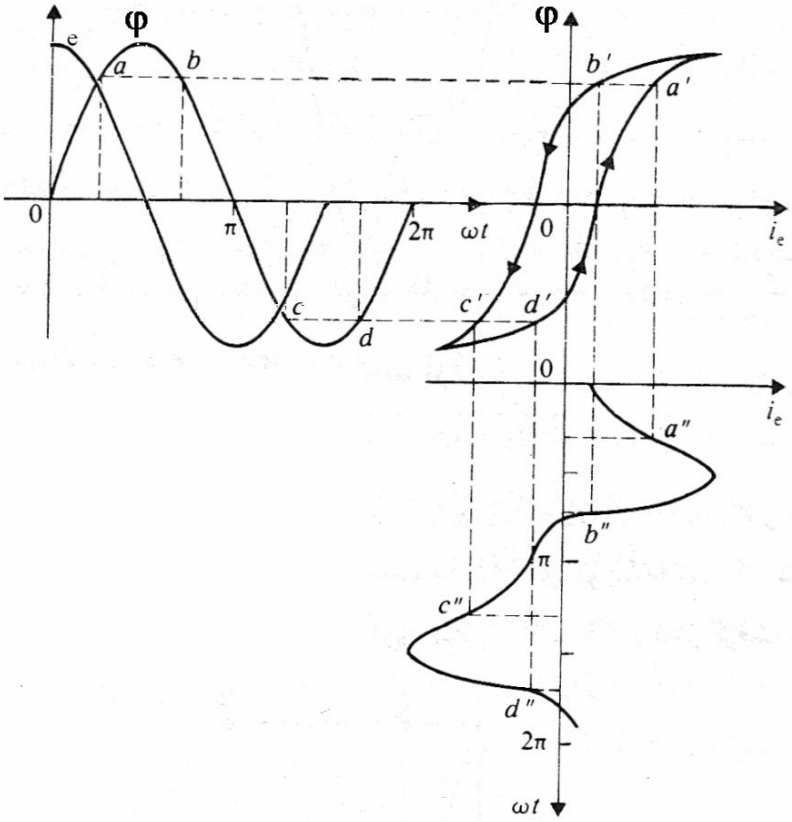
عامل ایجاد هارمونیکها در ترانسهائیکه با منبع سینوسی تغذیه می شوند ، مشخصه مغناطیسی غیر خطی هسته می باشد .



می دانیم که ولتاژ با مشتق شار متناسب است لذا اگر ولتاژ سینوسی به ترانسفورماتوری اعمال شود ، شار نیز باید سینوسی باشد . اما همان گونه که از شکل زیر پیداست برای داشتن شار سینوسی ، یک جریان غیر سینوسی لازم است که ترکیبی است از مولفه اصلی و مولفه های فرد دیگر.

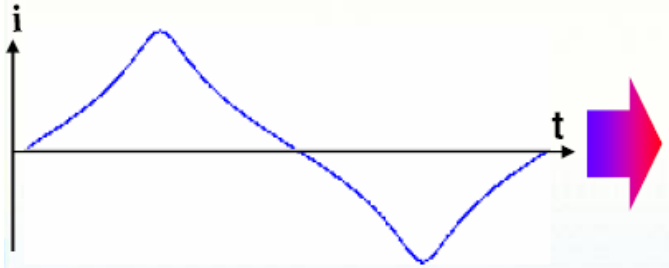


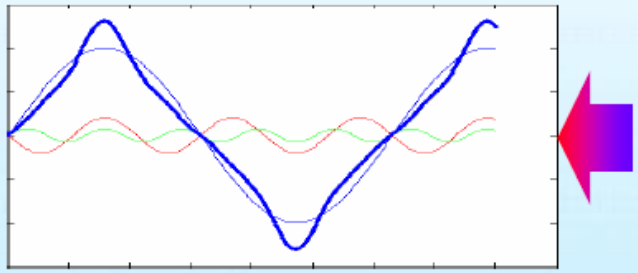
شکل موج جریان ناشی از ایجاد شار سینوسی در یک هسته غیرخطی

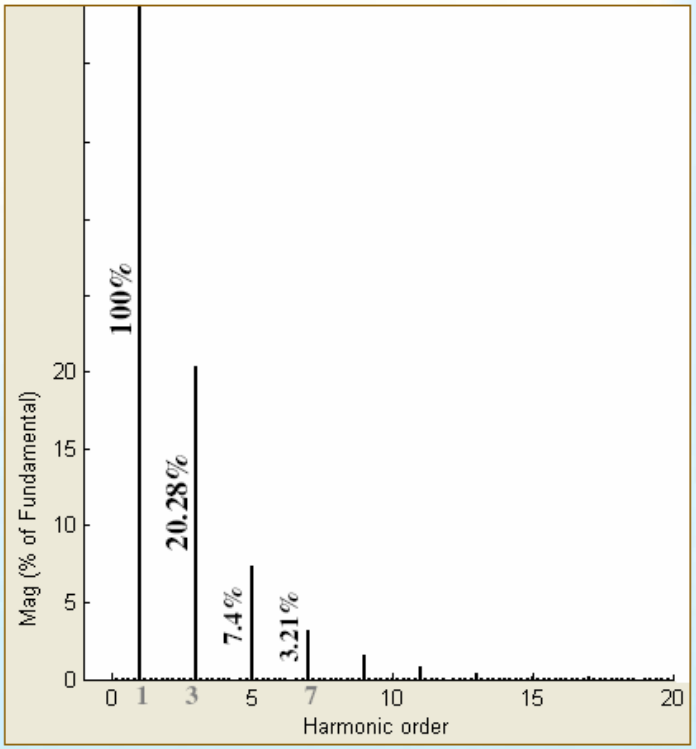


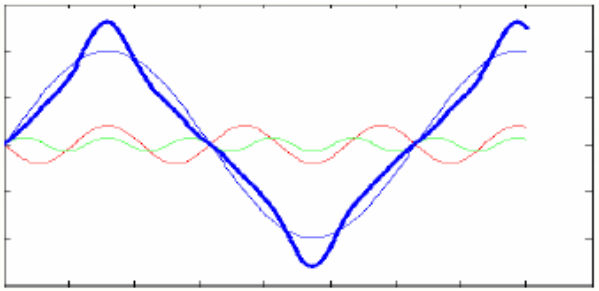
شکل موج جریان ناشی از ایجاد شار سینوسی در یک هسته غیرخطی

این شکل موج شامل هارمونیکهای مرتبه اول ، سوم ، پنجم و سایر مولفه های فرد است که فقط هارمونیکهای اول وسوم از نظر دامنه قابل ملاحظه می باشند .









همانطور که می بینید این شکل موج دارای مولفه های فرد می باشد . روابط مربوط به مولفه های اول تا پنجم در زیر آمده است .

مولفه اول
سه فاز متقارن ،توالی مثبت

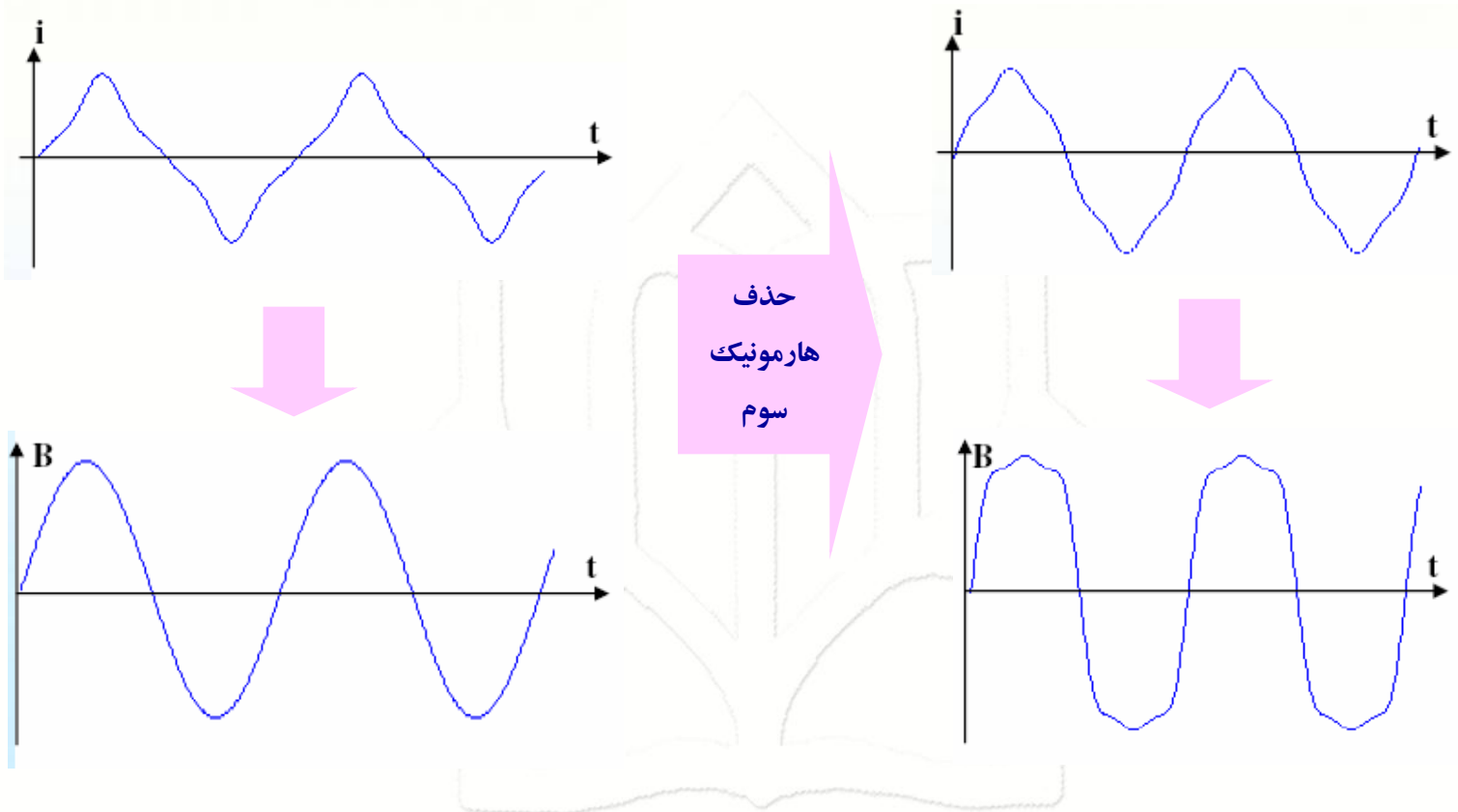
$$\left.\begin{aligned} I_{A1} &= I_{m1}\sin(\omega t) \\ I_{B1} &= I_{m1}\sin(\omega t - 120) \\ I_{C1} &= I_{m1}\sin(\omega t + 120) \end{aligned}\right\} \quad I_{A1} + I_{B1} + I_{C1} = 0$$

مولفه سوم
سه موج هم فاز

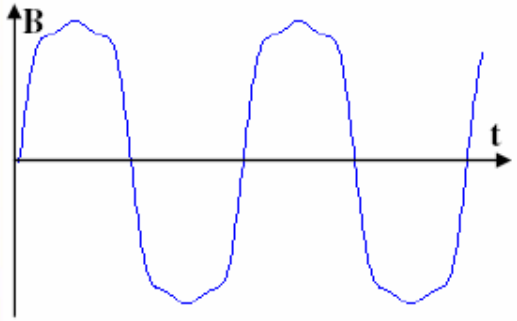
$$\left.\begin{aligned} I_{A3} &= I_{m3}\sin 3(\omega t) \\ I_{B3} &= I_{m3}\sin 3(\omega t - 120) = I_{m3}\sin(3\omega t - 360) = I_{m3}\sin(3\omega t) \\ I_{C3} &= I_{m3}\sin 3(\omega t + 120) = I_{m3}\sin(3\omega t + 360) = I_{m3}\sin(3\omega t) \end{aligned}\right\} \quad I_{A3} + I_{B3} + I_{C3} = 3I_{m3}\sin(3\omega t)$$

مولفه پنجم
سه فاز متقارن ،توالی منفی

$$\left.\begin{aligned} I_{A5} &= I_{m5}\sin(5\omega t) \\ I_{B5} &= I_{m5}\sin 5(\omega t - 120) = I_{m5}\sin(5\omega t - 600) = I_{m5}\sin(5\omega t - 240) \\ I_{C5} &= I_{m5}\sin 5(\omega t + 120) = I_{m5}\sin(5\omega t + 600) = I_{m5}\sin(5\omega t + 240) \end{aligned}\right\} \quad I_{A5} + I_{B5} + I_{C5} = 0$$



✓ در صورتیکه مسیری برای جاری شدن هارمونیک سوم جریان وجود نداشته باشد، لاجرم شار دارای هارمونیک سوم خواهد شد.



ملاحظه می شود که شکل موج شار غیر سینوسی شده و باعث تولید ولتاژ غیر سینوسی خواهد گردید . این شکل موج دارای یک مولفه سوم مزاحم است .

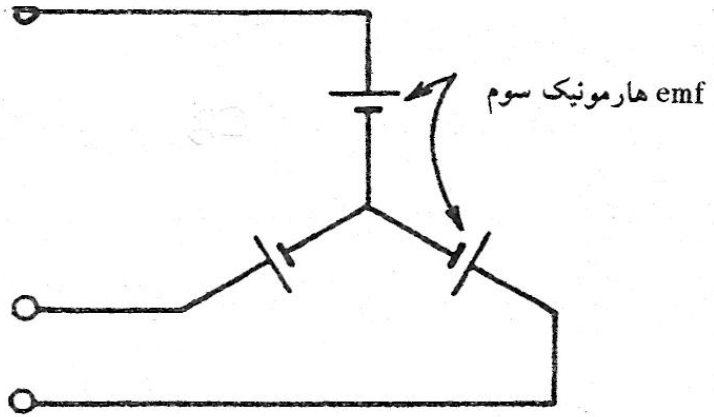
می توان بطور تقریبی نوشت :

$$\phi_1 = \phi_{m1}\sin(\omega t) \qquad E_1 = n\frac{d\phi_1}{dt} = n\phi_{m1}\omega\cos(\omega t)$$

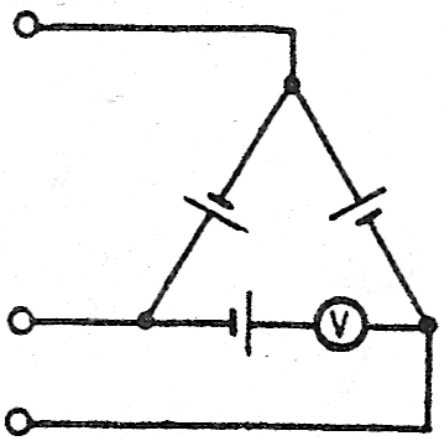
$$\phi_3 = \phi_{m3}\sin(3\omega t) \qquad E_3 = n\frac{d\phi_3}{dt} = n\phi_{m3}\times 3\omega\cos(3\omega t)$$

حالت اخیر ممکنست اضافه ولتاژهای بزرگی تولید کند که باعث آسیب ترانسفورماتور یا مصرف کننده شود .

$$E_{rms} = \sqrt{E_1^{\,2} + E_3^{\,2}}$$



مولفه‌های هارمونیک سوم ولتاژ در اتصال ستاره



مولفه‌های هارمونیک سوم ولتاژ در اتصال مثلث

- ✓ در صورتیکه هارمونیک سوم ولتاژ در هر فاز اتصال ستاره بوجود آید، در ولتاژ خط، مولفه هارمونیک سوم وجود نخواهد داشت.
- ✓ در اتصال مثلث، اگر هارمونیک سوم ولتاژ در هر فاز وجود داشته باشد، در ولتاژ خط نیز مولفه هارمونیک سوم وجود خواهد داشت.
- ✓ در ادامه، وجود هارمونیک ولتاژ و جریان در اتصالات مختلف ترانسفورماتورهای سه فاز بررسی می شود.

❑ (الف) اتصال Yy بدون زمین:

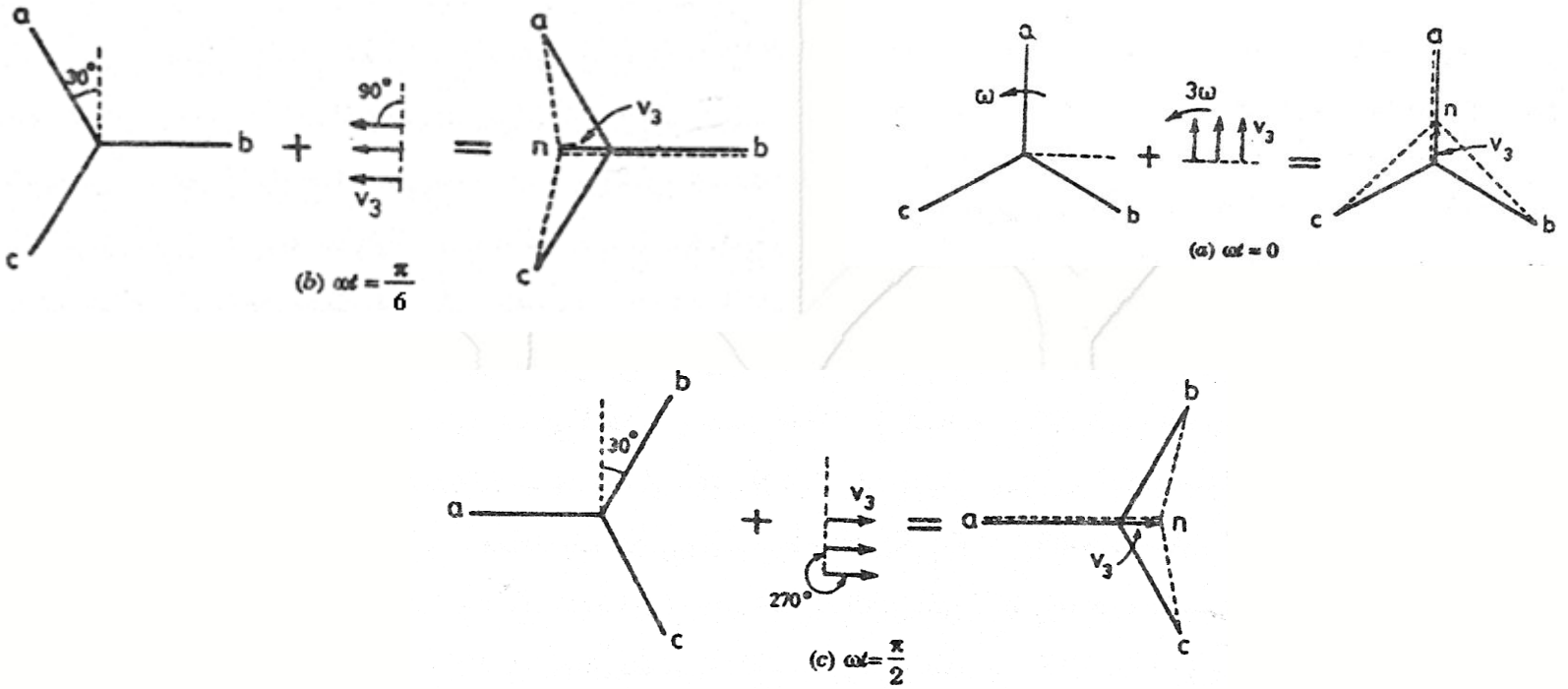
ترانسفورماتورهای با مدار مغناطیسی مجزا (بانک ترانس):

- ✓ به دلیل هم فاز بودن مولفه های هارمونیک سوم جریان، و همچنین عدم وجود هیچ مسیری برای عبور این جریان، الزاما مولفه هارمونیک سوم جریان در فازهای اولیه و ثانویه صفر خواهد شد.
- ✓ در نتیجه شار مغناطیسی دارای مولفه هارمونیک سوم زیادی (مثلا ۲۰ درصد) خواهد بود.
- ✓ لذا ولتاژ القائی (E_1 , E_2) دارای هارمونیک سوم شدید (در حد ٦٠ درصد) خواهد گردید.
- ✓ در اینحالت مقدار ولتاژ هر فاز به ١٦٠٪ خواهد رسید که ممکن است به عایق بندی ترانس آسیب بزند.
- ✓ با این وجود، ولتاژهای خط به خط عاری از هارمونیک سوم ولتاژ می باشند.
- ✓ مقدار موثر ولتاژ هر فاز برابر با ۱/۱۷ برابر مولفه اصلی ولتاژ فاز است. بنابراین رابطه (ولتاژ فاز × √۳ = ولتاژ خط) برقرار نخواهد بود.
- ✓ جریان خط در این حالت سینوسی خواهد بود.

❑ ... اتصال Yy بدون زمین:

... ترانسفورماتورهای با مدار مغناطیسی مجزا (بانک ترانس):

✓ عیب دیگر این نوع آرایش، نوسان ولتاژ نقطه خنثی می باشد. لذا ولتاژ خط به نقطه خنثی دارای نوسان خواهدشد.



❑ (ب) اتصال Yy با نقطه خنثی زمین شده:

- ✓ همانطور که قبل اشاره شد، یکی از راه حلهای موجود برای حذف هارمونیک سوم ولتاژ، ایجاد یک مسیر برای عبور هارمونیک‌های سوم جریان می باشد.
- ✓ با استفاده از اتصال ستاره-ستاره و اتصال نقاط ستاره به زمین، جریان هارمونیک سوم قادر به جاری شدن بین ترانس و منبع (با اتصال ستاره خنثی شده) خواهد بود.
- ✓ جریان عبوری از سیم متصل به نقطه خنثی، در این حالت سه برابر جریان مغناطیس کننده هارمونیک سوم هر فاز می باشد.
- ✓ در این حالت شار فاقد مولفه هارمونیک سوم خواهد بود و در نتیجه، در ولتاژ فاز، هارمونیک سوم ولتاژ بوجود نخواهد آمد. در ولتاژ خط نیز هارمونیک سوم ولتاژ وجود نخواهد داشت.

مشکلات این روش:

۱- تداخل قابل ملاحظه با خطوط مخابراتی که به موازات خطوز انتقال قدرت کشیده شده‌اند.

۲- هزینه بالا

❑ (الف) اتصال مثلث – مثلث:

- ✓ در این نوع آرایش، هارمونیک سوم جریان در مثلث های اولیه و ثانویه قادر به چرخش خواهد بود و در نتیجه، هارمونیک سوم شار و ولتاژ بوجود نخواهند آمد.
- ✓ جریانهای خط و ولتاژهای خط در این آرایش، فاقد مولفه های هارمونیک سوم خواهند بود.
- ✓ عیب این روش همان وجود جریان چرخشی دائمی در ترانس حتی در حالت بی باری است.

❑ (ب) اتصال ستاره – مثلث:

- ✓ در این نوع آرایش، به دلیل اعمال ولتاژ سینوسی به اولیه و عدم توانائی جاری شدن جریان هارمونیک سوم در مدار ستاره، هارمونیک سوم شار مغناطیسی را بوجود می آورد.
- ✓ اما در مدار ثانویه، هارمونیک سوم شار، هارمونیک سوم ولتاژ را بوجود می آورد که در نتیجه، هارمونیک سوم جریان در مدار مثلث در ثانویه جاری خواهد گردید. جاری شدن جریان هارمونیک سوم، سبب مخالفت با عامل بوجود آورنده اش یعنی هارمونیک سوم شار شده و لذا موجب سینوسی تر شدن شار خواهد گردید.
- ✓ لذا در این آرایش شکل موجهای فاز اولیه و ثانویه تقریبا سینوسی است و وضعیت از حالت Yy بمراتب بهتر است.
- ✓ جریانهای خط نیز سینوسی هستند.
- ✓ تحلیل فوق به کمک روش تعادل mmf ها نیز قابل بیان است.

❑ (ج) اتصال مثلث – ستاره:

- ✓ این آرایش نیز مشابه آرایش ستاره – مثلث قابل تحلیل است. در این آرایش نیز ولتاژهای فازها تقریبا سینوسی است.

۱- افزایش تلفات اهمی در ترانس: وجود هارمونیک‌های گردشی

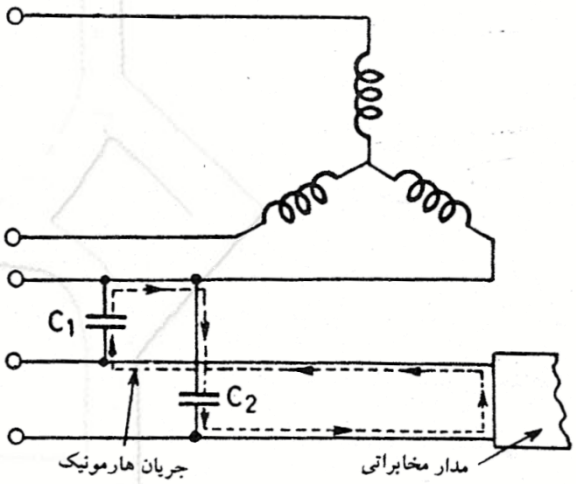
۲- تداخل الکترومغناطیسی با مدارهای مخابراتی: ایجاد شار هارمونیکی در اطراف خطوط انتقال و القا ولتاژ در خطوط مخابراتی که به موازات خطوط انتقال کشیده شده‌اند.

۳- افزایش تلفات هسته: به دلیل افزایش حداکثر دامنه شار هسته

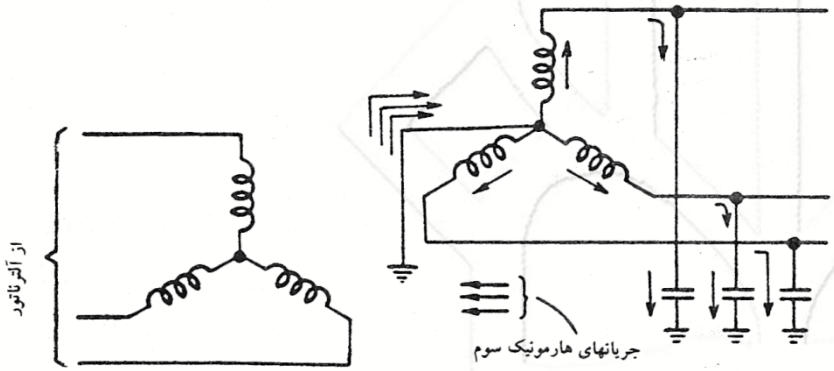
۱- تنش ولتاژ روی عایق

۲- تداخل الکتروستاتیکی با مدارهای مخابراتی: تشدید بین اندوکتانس مدار مخابراتی و خازن خط انتقال

۳- ولتاژهای تشدید بزرگ



تداخل الکتروستاتیکی با مدارهای مخابراتی

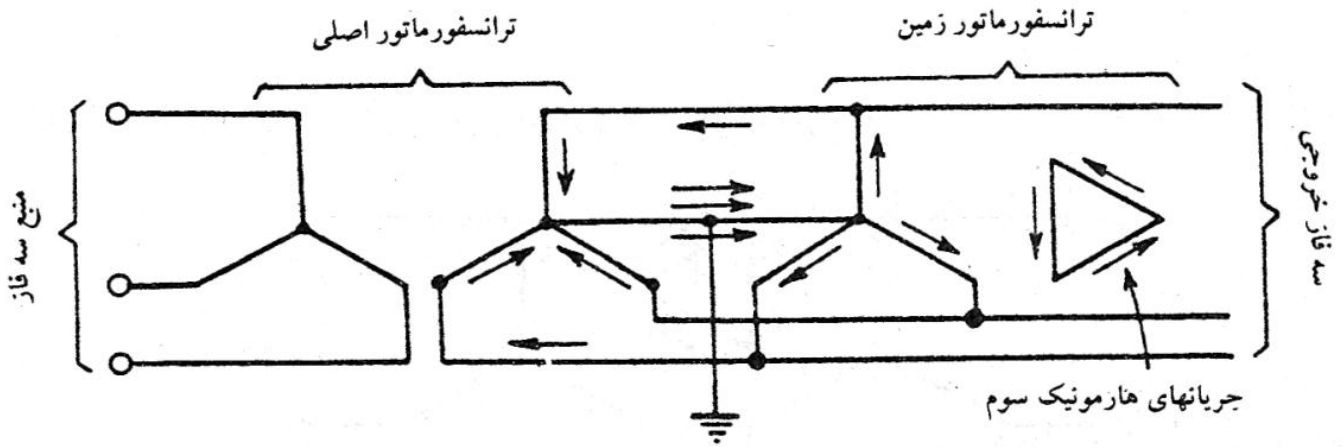


تشدید بین خازن خط و راکتانس هر فاز در فرکانس 3f

۱- استفاده از اتصال مثلث در قسمت اولیه و یا ثانویه

۲- استفاده از ترانسفورماتور ستاره-مثلث زمین: در موقعیکه اتصال ترانس اصلی ستاره-ستاره باشد.

۳- استفاده از سیم‌پیچ سومین (سیم پیچ ثالثیه)



شکل ۳۷-۸: ترانسفورماتور ستاره - مثلث زمین برای حذف هارمونیکهای مضرب ۳ ولتاژ

❑ روش‌های حذف هارمونیک سوم ولتاژ

➢ استفاده از سیم‌پیچ ثالثیه

- ✓ به ترانسهایی که شامل سیم‌پیچ ثالثیه هستند، ترانس سه سیم‌پیچه گفته می شود.
- ✓ سیم پیچ ثالثیه به صورت مثلث بسته می شود و در اغلب اوقات، سرهای آن داخل محفظه ترانسفورماتور باقی می‌مانند.

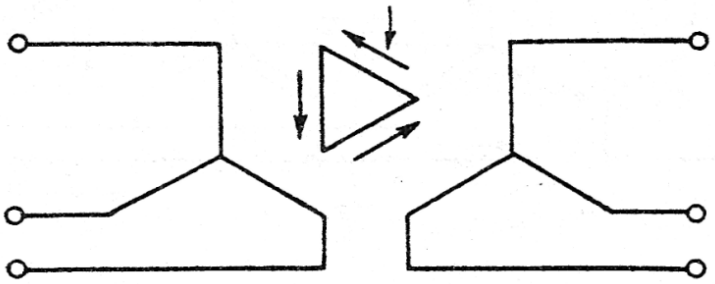
➢ وظیفه سیم پیچ ثالثیه:

۱- حذف هارمونیک سوم ولتاژ از خطوط متصل به اولیه و ثانویه

۲- ایجاد امکان تغذیه بارهای تکفاز بوسیله ترانسفورماتورهای Yy

۳- اگر ترمینالهای آن بیرون باشد برای تغذیه مصرف‌کننده‌های داخلی نیروگاه یا پست استفاده می شود.

جریان هارمونیک سوم



شکل ۳۸-۸: سیم پیچی سومین (ثالثیه)