

مدار معادل سیستم‌های قدرت

تحلیل سیستم‌های انرژی الکتریکی ۱

ایمان صادق‌خانی

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد



در سیستم‌های قدرت معمولاً به جای کار با کمیت‌های واقعی، از کمیت‌های پریونیت شده استفاده می‌شود. یک کمیت پریونیت شده به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{کمیت پریونیت شده} \triangleq \frac{\text{کمیت واقعی}}{\text{کمیت مبنا}}$$

برای هر کمیت، یک کمیت مبنا انتخاب می‌کنیم $\leftarrow S_b, V_b, I_b, Z_b$ (b: base)

- کمیت‌های مبنا انتخاب هستند اما معمولاً مقادیر نامی سیستم به عنوان کمیت مبنا انتخاب می‌شوند.
- کمیت‌های مبنا زاویه ندارند؛ بنابراین پریونیت کردن زاویه را تغییر نمی‌دهد.
- کمیت‌های پریونیت شده واحد ندارند؛ تنها مخفف pu را در مورد آنها بکار می‌بریم تا مشخص شود پریونیت شده است.

مثال ۱: اگر در یک سیستم 400 V ، ولتاژ یک نقطه $\bar{V} = 200 \angle 30^\circ$ باشد، داریم:
ولتاژ مبنا را برابر با ولتاژ نامی انتخاب می‌کنیم: $V_b = 400 \text{ V}$.

$$\bar{V}^{\text{pu}} = \frac{200 \angle 30^\circ}{400} = 0.5^{\text{pu}} \angle 30^\circ$$

مثال ۲: اگر در یک سیستم 20 kV ، ولتاژ یک نقطه $\bar{V} = 24^{\text{kV}} \angle 10^\circ$ باشد، داریم:
ولتاژ مبنا را برابر با ولتاژ نامی انتخاب می‌کنیم: $V_b = 20 \text{ kV}$.

$$\bar{V}^{\text{pu}} = \frac{24 \angle 10^\circ}{20} = 1.2^{\text{pu}} \angle 10^\circ$$

به عبارت دیگر، با انتخاب مقادیر نامی سیستم به عنوان کمیت‌های مبنا، دیدی نسبت به بزرگی / کوچکی کمیت‌ها پیدا می‌کنیم؛ در مثال ۱ ولتاژ نصف مقدار نامی است در حالیکه در مثال ۲ ولتاژ ۲۰٪ از مقدار نامی بزرگتر و طبیعتاً خطرناک است.

مزایای پریونیت کردن عبارتند از:

- با اعداد کوچک سر و کار داریم (معمولا بین صفر تا یک).
- دیدی سریع نسبت به بزرگی / کوچکی کمیت‌ها پیدا می‌کنیم.
- مدل ترانسفورماتورها ساده خواهد شد.

در سیستم‌های تکفاز ولتاژ فاز و توان تکفاز به عنوان ولتاژ و توان مبنا انتخاب می‌شوند در حالیکه در سیستم‌های سه‌فاز، ولتاژ خط و توان سه‌فاز به عنوان کمیت‌های مبنا انتخاب می‌گردند. بین کمیت‌های مبنا، روابط مداری حاکم است؛ یعنی:

در سیستم تکفاز:

$$S_b = V_b \times I_b$$

$$V_b = Z_b \times I_b$$

در سیستم سه‌فاز:

$$S_b = \sqrt{3} V_b \times I_b$$

$$V_b = \sqrt{3} V_{b,1\phi} = \sqrt{3} Z_b \times I_b$$

بنابراین با انتخاب دو مقدار مبنا، دو مقدار مبنای دیگر از روابط ذکر شده محاسبه می شوند. در سیستم های قدرت معمولاً توان و ولتاژ نامی سیستم مشخص هستند. بنابراین این مقادیر را به عنوان مقدار مبنای سیستم انتخاب می کنیم.

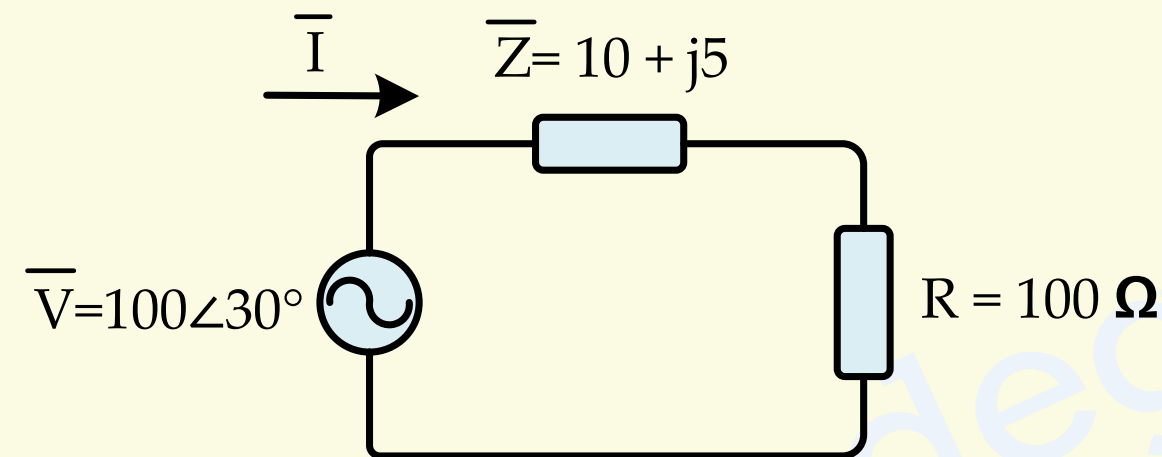
در سیستم تکفاز:

$$I_b = \frac{S_b}{V_b} \quad , \quad Z_b = \frac{V_b}{I_b} = \frac{V_b}{S_b/V_b} = \frac{V_b^2}{S_b}$$

در سیستم سه فاز:

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}V_b} \quad , \quad Z_b = \frac{V_b}{\sqrt{3}I_b} = \frac{V_b}{\sqrt{3}S_b/\sqrt{3}V_b} = \frac{V_b^2}{S_b}$$

مثال: در مدار زیر با انتخاب $V_b = 100 \text{ V}$ و $S_b = 500 \text{ VA}$ ، ولتاژ دو سر مقاومت را بر حسب پریونیت محاسبه نمایید.



$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{100^2}{500} = 20 \, \Omega$$

$$(Y_b = \frac{1}{Z_b} = 0.05 \text{ U})$$

$$I_b = \frac{S_b}{V_b} = \frac{500}{100} = 5 \text{ A}$$

$$\bar{V}^{\text{pu}} = \frac{100 \angle 30^\circ}{100} = 1^{\text{pu}} \angle 30^\circ$$

$$\bar{Z}^{\text{pu}} = \frac{10 + j5}{20} = 0.5 + j0.25 \text{ pu}$$

$$R^{\text{pu}} = \frac{100}{20} = 5 \text{ pu}$$

$$\bar{I}^{\text{pu}} = \frac{\bar{V}^{\text{pu}}}{\bar{Z}^{\text{pu}} + R^{\text{pu}}} = \frac{1 \angle 30^\circ}{0.5 + j0.25 + 5} = \frac{1 \angle 30^\circ}{5.5 \angle 0.26^\circ} = 0.18^{\text{pu}} \angle 29.74^\circ$$

$$\bar{V}_R^{\text{pu}} = R^{\text{pu}} \times \bar{I}^{\text{pu}} = 5 \times 0.18 \angle 29.74^\circ = 0.9^{\text{pu}} \angle 29.74^\circ$$

بعد از حل مسئله، برای یافتن مقادیر واقعی، کافی است کمیت پریونیت شده را در مقدار مبنا ضرب نماییم:

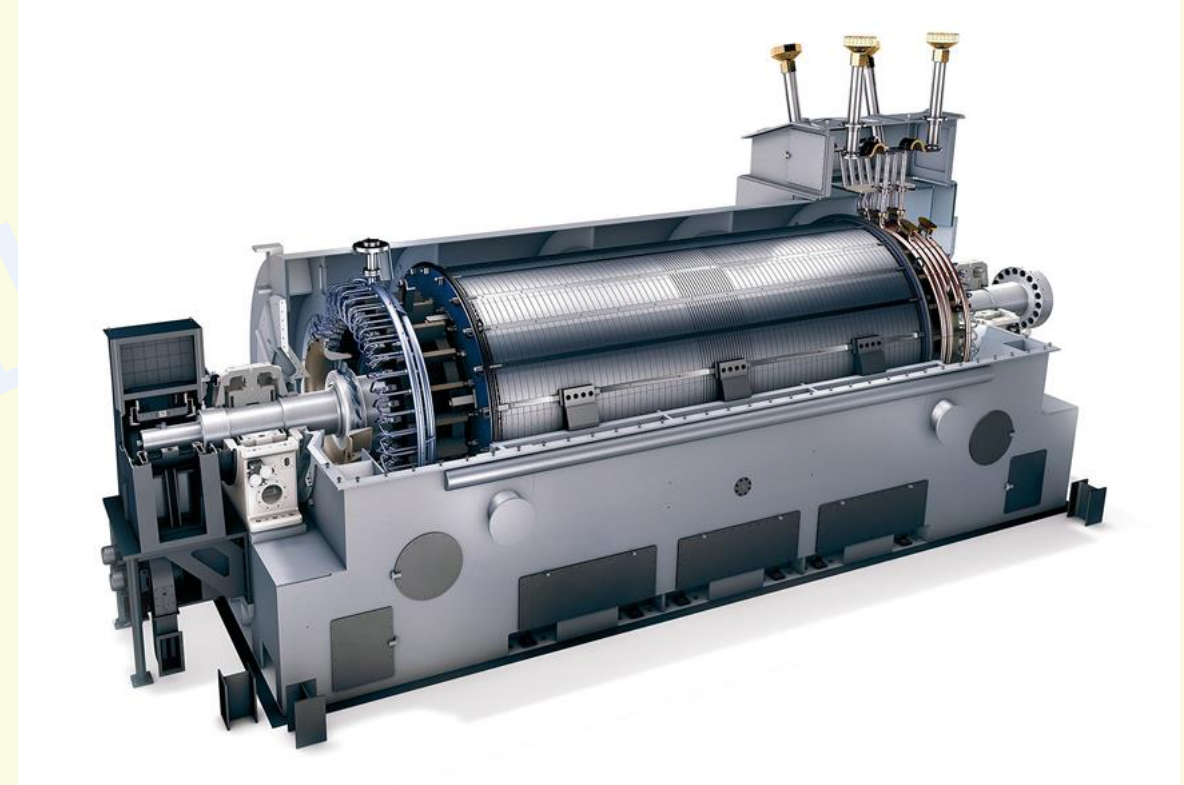
$$\bar{V}_R = \bar{V}_R^{\text{pu}} \times V_b = 0.9^{\text{pu}} \angle 29.74^\circ \times 100 = 90^{\text{V}} \angle 29.74^\circ$$

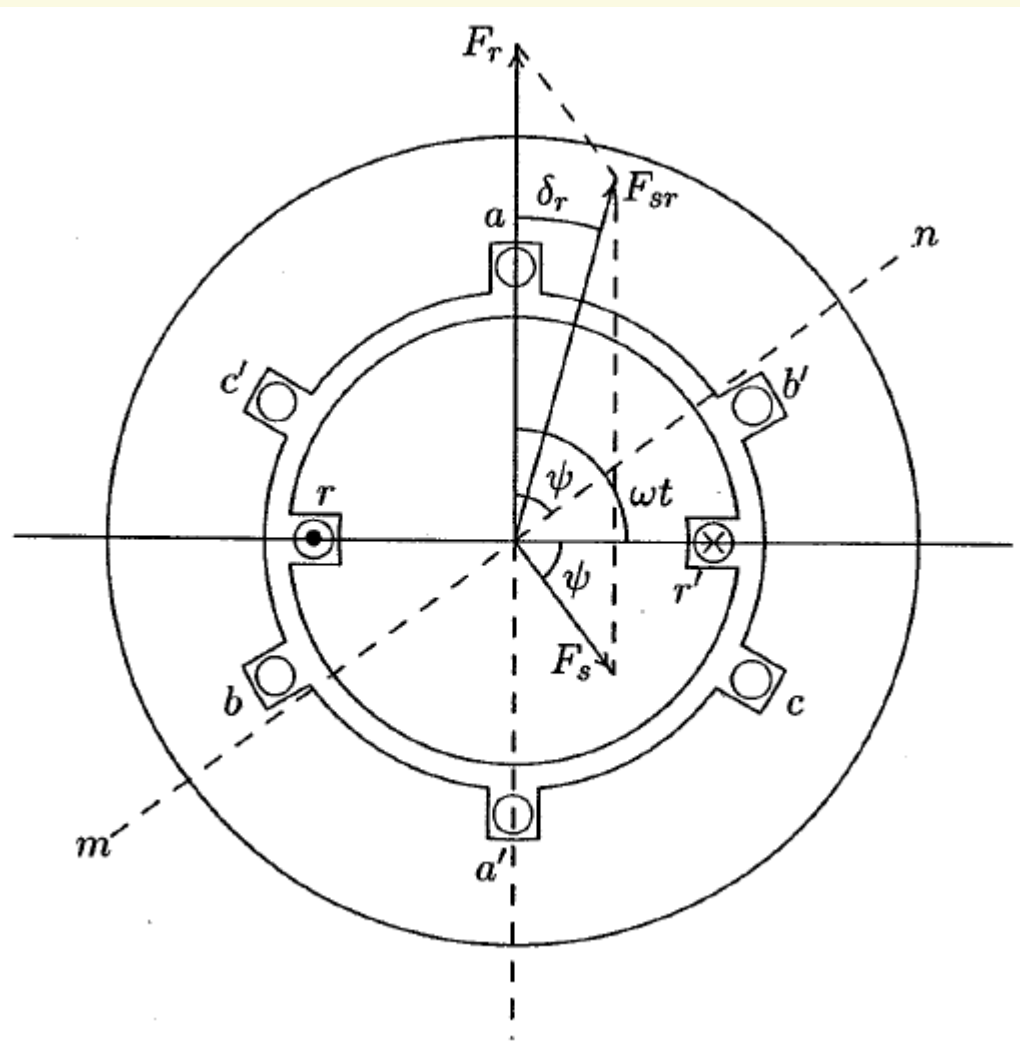
تغییر مبنا: اگر یک امپدانس ($\bar{Z}$) به ازای یکسری مقادیر مبنا $(S_b^{\text{old}}, V_b^{\text{old}})$ پریونیت شده باشد $(\bar{Z}_{\text{old}}^{\text{pu}})$ و بخواهیم آن کمیت را به ازای مقادیر مبنای جدید $(S_b^{\text{new}}, V_b^{\text{new}})$ محاسبه نماییم $(\bar{Z}_{\text{new}}^{\text{pu}})$ ، کافی است بصورت زیر عمل کنیم:

$$\bar{Z}_{\text{old}}^{\text{pu}} = \frac{\bar{Z}}{Z_b^{\text{old}}} = \frac{\bar{Z}}{V_b^{\text{old}^2} / S_b^{\text{old}}} \quad = \quad \bar{Z}_{\text{new}}^{\text{pu}} = \frac{\bar{Z}}{Z_b^{\text{new}}} = \frac{\bar{Z}}{V_b^{\text{new}^2} / S_b^{\text{new}}}$$

$$\bar{Z}_{\text{new}}^{\text{pu}} = \bar{Z}_{\text{old}}^{\text{pu}} \left(\frac{S_b^{\text{new}}}{S_b^{\text{old}}} \right) \left(\frac{V_b^{\text{old}}}{V_b^{\text{new}}} \right)^2$$

- توان شبکه‌های برق معمولاً توسط ژنراتورهای سنکرون سه‌فاز تأمین می‌شود که توسط توربین بخار، توربین آبی و یا توربین گازی انرژی آنها تأمین می‌گردد.
- سیم‌پیچ‌های آرمیچر (سیم‌پیچی که در آن ولتاژ القاء می‌شود) در قسمت ثابت ماشین یعنی استاتور قرار گرفته و برای تولید ولتاژ سه‌فاز متعادل طراحی می‌شوند. میدان مغناطیسی (تحریک) مورد نیاز بسیار کم است ($0/2$ تا 3 درصد توان ماشین) و در روتور قرار می‌گیرد. سرعت چرخش روتور توسط محرک‌های فوق ثابت است و جریان میدان آن توسط جریان مستقیم تحریک می‌شود.
- روتور ماشین سنکرون دارای دو نوع قطب صاف و قطب برجسته است. در قطب صاف فاصله هوایی یکنواخت بوده و انرژی آنها توسط توربین‌های بخار تأمین می‌شود؛ در سرعت بالای 3600 یا 1800 دور بر دقیقه (به ترتیب برای ماشین دو و چهار قطبی) کار می‌کنند. 70% از ژنراتورهای سنکرون بزرگ از نوع قطب صاف با توان 150 تا 1500 مگاوات-آمپر هستند. ماشین قطب برجسته دارای فاصله هوایی نامنظم بوده و تعداد نسبتاً زیادی قطب دارد؛ محور طولی آن کوتاه و قطر آن بزرگ است؛ ژنراتورهای نیروگاه آبی از این دسته هستند.





یک ژنراتور سه فاز دو قطب در شکل نشان داده شده است. سه سیم پیچ ۱۲۰ درجه الکتریکی نسبت به هم اختلاف دارند. هنگامیکه روتور تحریک شده تا شار فاصله هوایی Φ را در هر قطب تولید کند که با سرعت ω می چرخد، شار پیوندی سیم پیچ با مکان محور نیرو محرکه مغناطیسی (MMF) روتور ωt تغییر می کند؛ بر حسب رادیان و از محور مغناطیسی سیم پیچ aa' اندازه گیری می شود. با فرض سیم پیچی توزیع شده، شار پیوندی سیم پیچ a (λ_a) بصورت زیر بیان می شود:

$$\lambda_a = N\phi \cos \omega t$$

N تعداد دور سیم پیچ است.

ولتاژ القایی در سیم پیچ 'aa' از قانون القای فارادی بدست می آید:

$$e_a = -\frac{d\lambda}{dt} = \omega N\phi \sin\omega t = E_{\max} \sin\omega t$$

$$E_{\max} = \omega N\phi = 2\pi f N\phi$$

پس مقدار مؤثر ولتاژ القایی برابر است با:

$$E = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = 4.44 f N\phi$$

از آنجایی که در عمل سیم پیچ آرمیچر در چندین شیار قرار گرفته و **emf** القایی در شیارهای مختلف همفاز نیست، ضریب کاهشی K_w که معمولاً بین ۰/۸۵ تا ۰/۹۵ است، اعمال می گردد:

$$E = 4.44 K_w f N\phi$$

میدان مغناطیسی روتور که با سرعت ثابت می چرخد باعث القای ولتاژ سینوسی سه فاز با اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه در آرمیچر می شود که فرکانس آن بصورت زیر بدست می آید:

$$f = \frac{P}{2} \frac{n}{60}$$

n سرعت روتور بر حسب **rpm** است که سرعت سنکرون نامیده می شود. **P** تعداد قطب های ماشین است. در شرایط عادی ژنراتور به صورت سنکرون با شبکه کار کرده و جریان متعادل سه فاز در آرمیچر جاری می شود. با فرض اینکه جریان فاز **a** به اندازه ψ نسبت به **emf** تولیدی e_a پسفاز است (که در شکل قبل توسط خط **mn** نشان داده شده است)، داریم:

$$i_a = I_{\max} \sin(\omega t - \psi)$$

$$i_b = I_{\max} \sin(\omega t - \psi - 2\pi/3)$$

$$i_c = I_{\max} \sin(\omega t - \psi + 2\pi/3)$$

e_a زمانی حداکثر است که محور مغناطیسی روتور زیر فاز a قرار گیرد. از آنجایی که i_a به اندازه ψ نسبت به e_a پسفاز است، هنگامیکه خط mn به محور سیم پیچ aa' می رسد، جریان فاز a حداکثر می شود. در هر لحظه، سیم پیچ هر فاز موج MMF توزیع شده سینوسی ایجاد می کند که پیک آن در امتداد محور سیم پیچی فاز است. دامنه این موج (F) را می توان به صورت ضربی (K) از جریان لحظه ای در نظر گرفت:

$$F_a = KI_{\max} \sin(\omega t - \psi) = F_m \sin(\omega t - \psi)$$

$$F_b = KI_{\max} \sin(\omega t - \psi - 2\pi/3) = F_m \sin(\omega t - \psi - 2\pi/3)$$

$$F_c = KI_{\max} \sin(\omega t - \psi + 2\pi/3) = F_m \sin(\omega t - \psi + 2\pi/3)$$

ضریب K به تعداد دور سیم پیچی آرمیچر و نوع سیم پیچی بستگی دارد.

MMF برآیند جمع برداری MMF های فوق است. برای بدست آوردن آن می توان از تصویر این MMF ها بر خط mn و بدست آوردن مؤلفه های هم فاز و عمودی استفاده کرد.

مؤلفه همفاز برآیند بصورت زیر می باشد:

$$F_1 = F_m \sin(\omega t - \psi) \cos(\omega t - \psi) + F_m \sin(\omega t - \psi - 2\pi/3) \cos(\omega t - \psi - 2\pi/3) \\ + F_m \sin(\omega t - \psi + 2\pi/3) \cos(\omega t - \psi + 2\pi/3)$$

با استفاده از رابطه $\sin\alpha.\cos\alpha=(1/2)\sin2\alpha$ داریم:

$$F_1 = \frac{F_m}{2} [\sin 2(\omega t - \psi) + \sin 2(\omega t - \psi - 2\pi/3) + \sin 2(\omega t - \psi + 2\pi/3)]$$

جمع سه موج سینوسی با اختلاف فاز ۱۲۰ درجه صفر است $\leftarrow F_1 = 0$.

جمع مؤلفه‌های عمودی برابر است با:

$$F_2 = F_m \sin(\omega t - \psi) \sin(\omega t - \psi) + F_m \sin(\omega t - \psi - 2\pi/3) \sin(\omega t - \psi - 2\pi/3) \\ + F_m \sin(\omega t - \psi + 2\pi/3) \sin(\omega t - \psi + 2\pi/3)$$

با استفاده از رابطه $\sin^2\alpha = (1/2)(1 - \cos 2\alpha)$ داریم:

$$F_2 = \frac{F_m}{2} \left[3 - \cos 2(\omega t - \psi) - \cos 2(\omega t - \psi - 2\pi/3) - \cos 2(\omega t - \psi + 2\pi/3) \right]$$

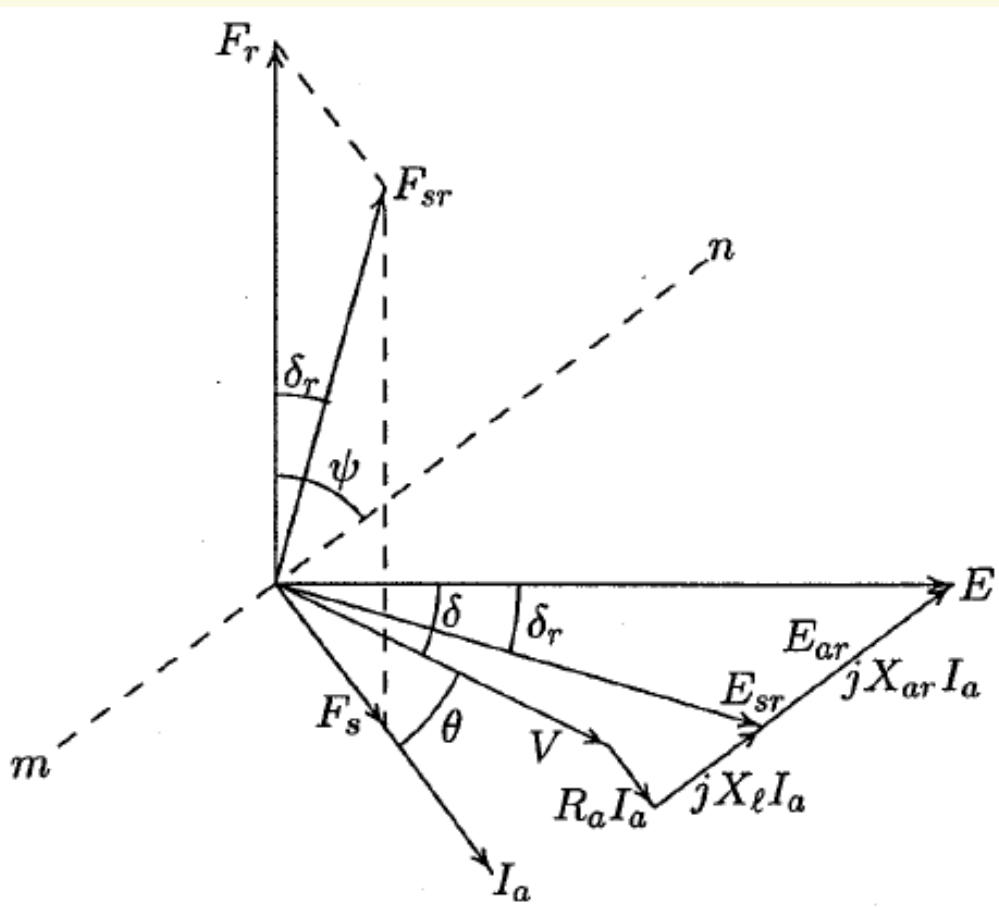
جمع سه موج سینوسی با اختلاف فاز ۱۲۰ درجه صفر است $\leftarrow F_2 = (3/2)F_m$

بنابراین دامنه MMF برآیند آرمیچر یا MMF استاتور برابر است با:

$$F_s = \frac{3}{2} F_m$$

بنابراین MMF برآیند آرمیچر دارای دامنه ثابت و عمود بر خط mn است، با سرعت ثابت می چرخد و با MMF میدان F_r سنکرون است.

مدلسازی ژنراتور سنکرون قطب صاف



دیاگرام برداری یک ژنراتور سنکرون نشان داده شده است. هنگامیکه روتور در سرعت سنکرون می چرخد و جریان آرمیچر صفر است، F_r باعث ایجاد EMF بی باری E در هر فاز می شود. ولتاژ بی باری تولیدی متناسب با جریان میدان بوده و ولتاژ تحریک نامیده می شود. فازور ولتاژ فاز a که 90° درجه نسبت به F_r پسفاز است با دیاگرام برداری MMF ترکیب شده است. هنگامیکه آرمیچر جریان سه فاز متعادل را حمل می کند، F_s تولیدی عمود بر خط mn است. تعامل MMF آرمیچر و MMF میدان (عکس العمل آرمیچر) باعث افزایش MMF برآیند فاصله هوایی F_{sr} می شود. جمع برداری F_r و F_s بوده و مسئول ایجاد شار برآیند فاصله هوایی Φ_{sr} است که EMF تولیدی در شرایط تحت بار E_{sr} را القاء می کند.

F_s باعث القای نیرو محرکه الکتریکی E_{ar} می شود (ولتاژ عکس العمل آرمیچر) که عمود بر F_s است. E_{ar} نسبت به I_a به اندازه ۹۰ درجه پیشفاز است؛ در نتیجه می توان آن را با یک افت ولتاژ دو سر راکتانس X_{ar} حاصل از جریان I_a نشان داد. X_{ar} راکتانس عکس العمل آرمیچر است. جمع فازوری E و E_{ar} با E_{sr} نشان داده می شود که عمود بر F_{sr} بوده و بیانگر EMF تولیدی تحت بار است.

$$E = E_{sr} + jX_{ar}I_a$$

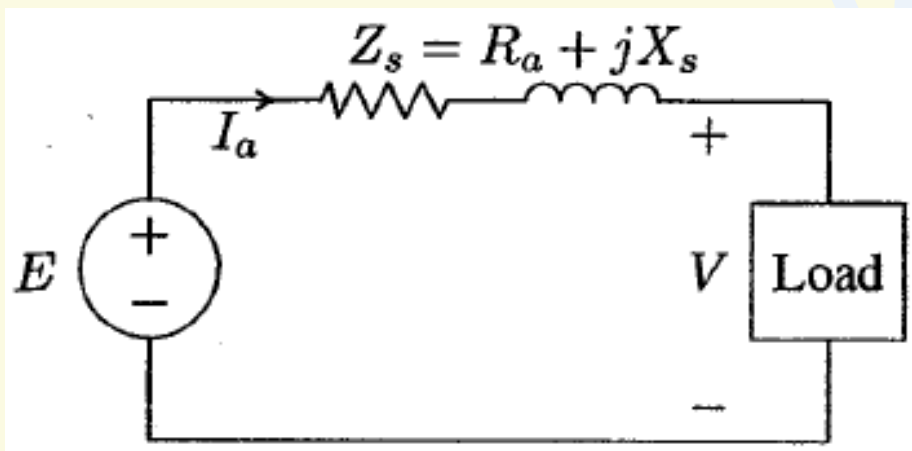
ولتاژ ترمینال V به اندازه افت ولتاژ مقاومتی $R_a I_a$ و افت ولتاژ راکتانس نشتی $X_l I_a$ کمتر از E_{sr} است:

$$E = V + [R_a + j(X_l + X_{ar})]I_a = V + [R_a + jX_s]I_a$$

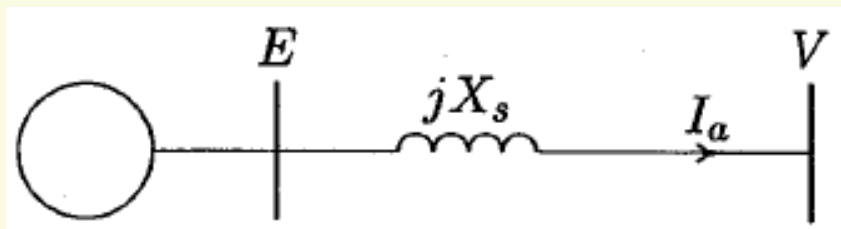
که در آن $X_s = X_l + X_{ar}$ راکتانس سنکرون نامیده می شود.

کسینوس زاویه بین I_a و V ($\cos\theta$) بیانگر ضریب توان در ترمینال ژنراتور است. زاویه بین E و E_{sr} برابر با زاویه بین F_r و F_{sr} است که با δ_r نشان داده می شود. توان تولیدی ماشین متناسب با ضرب F_r و F_{sr} ، $\sin\delta_r$ است. اگر F_r جلوتر از F_{sr} باشد، ماشین به عنوان ژنراتور کار می کند و وقتی F_r پشت F_{sr} قرار می گیرد، ماشین به عنوان موتور کار خواهد کرد.

- از آنجایی که E و E_{sr} متناسب با F_r و F_{sr} هستند، توان تولیدی ماشین متناسب با ضرب E ، E_{sr} و $\sin\delta_r$ است. زاویه δ_r زاویه توان نامیده می شود. معمولاً توان تولیدی بر حسب ولتاژ تحریک E ، ولتاژ ترمینال V و $\sin\delta$ بیان می شود که δ تقریباً با δ_r برابر است زیرا امپدانس نشتی در مقایسه با راکتانس مغناطیس شوندگی بسیار کوچک است.
- مدل ساده هر فاز یک ژنراتور قطب صاف نشان داده شده است. مقاومت آرمیچر معمولاً بسیار کوچکتر از راکتانس سنکرون بوده و اغلب از آن صرف نظر می شود.

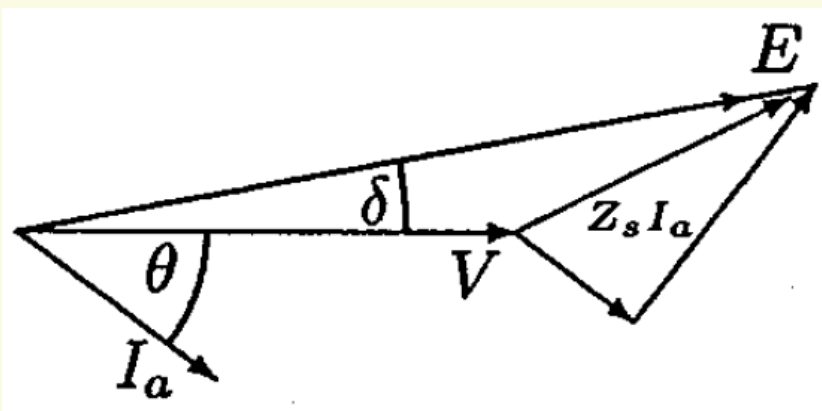


$$E = V + (R_a + jX_s)I_a$$

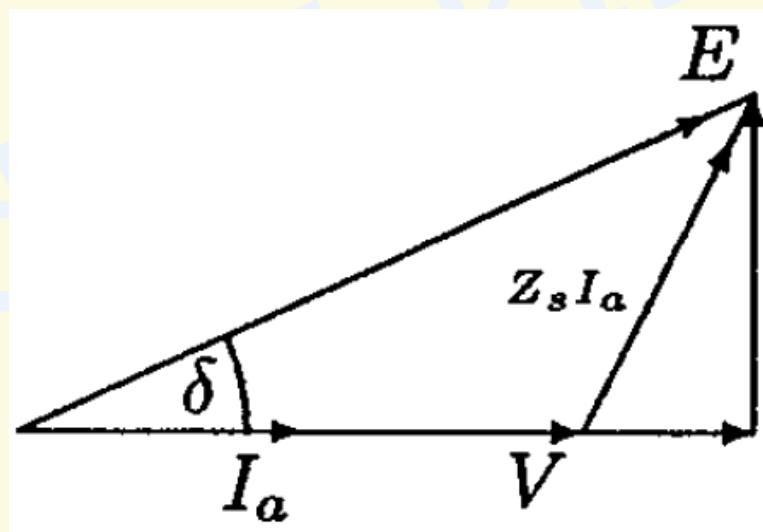


یک ژنراتور سنکرون متصل به بار بی نهایت نشان داده شده است:

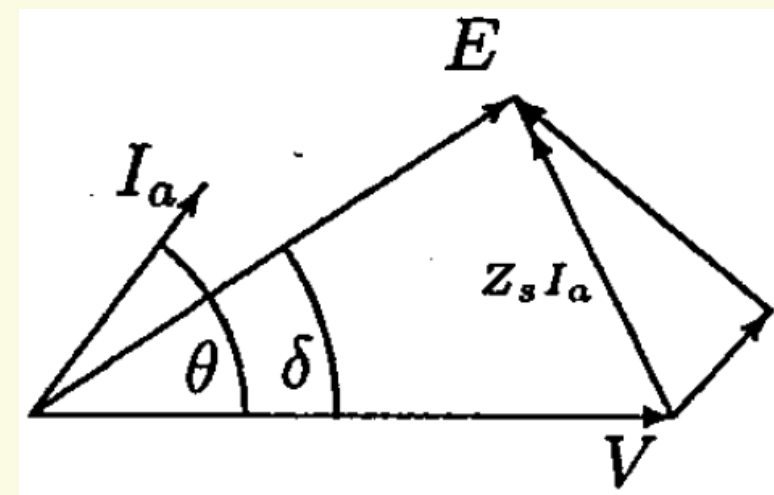
دیاگرام فازوری ژنراتور سنکرون با انتخاب ولتاژ ترمینال به عنوان مرجع در سه حالت پسفاز، پیشفاز و همفاز:



پسفاز



همفاز



پیشفاز

ماشین‌های سنکرون معمولاً به شبکه‌های سراسری بزرگ متصل می‌شوند. این شبکه‌ها مشخصه مهمی دارند: دامنه، فاز و فرکانس ولتاژ سیستم در نقطه اتصال ثابت است؛ این نقطه را باس بی‌نهایت می‌نامند. بنابراین شرایط کاری ژنراتور سنکرون اثری بر ولتاژ نقطه اتصال ندارد.

مدار معادل تکفاز ژنراتور سنکرون متصل به باس بی‌نهایت در صفحه قبل نشان داده شده است. با صرفنظر از مقاومت آرمیچر، توان خروجی برابر با توان تحویلی ژنراتور است. این توان ثابت فرض شده و بصورت زیر بدست می‌آید:

$$P_{3\phi} = \Re[3\bar{V}\bar{I}_a^*] = 3VI_a \cos\theta$$

V ولتاژ فاز به خنثی ترمینال ژنراتور بوده که ثابت فرض می‌شود. اگر توان و ولتاژ ثابت فرض شوند، آنگاه $I_a \cos\theta$ باید ثابت باشد. بنابراین وقتی ضریب توان با تغییر جریان میدان تغییر می‌کند، انتهای فازور جریان آرمیچر بایستی بر روی خطی عمودی قرار گیرد.

کنترل ضریب توان

در این حالت داریم:

$$cd = E_1 \sin \delta_1 = X_s I_{a1} \cos \theta_1$$

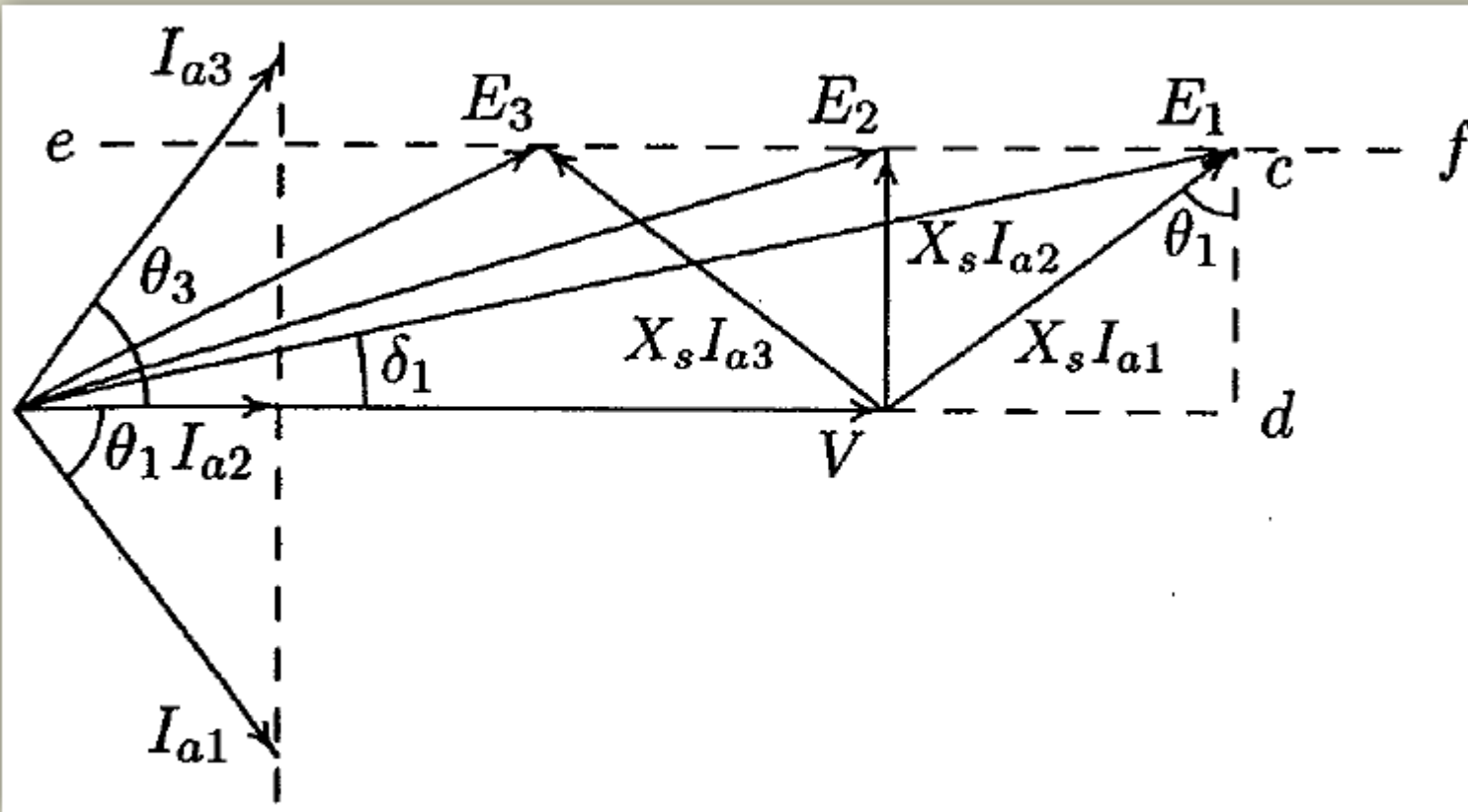
بنابراین $E_1 \sin \delta_1$ ثابت بوده و مکان هندسی E_1 بر روی خط ef قرار دارد.

E_1 و I_{a1} برای حالت ضریب توان پسفاز است.

E_2 و I_{a2} برای حالت ضریب توان واحد است

که جریان آرمیچر حداقل می باشد.

E_3 و I_{a3} برای حالت ضریب توان پیشفاز است.

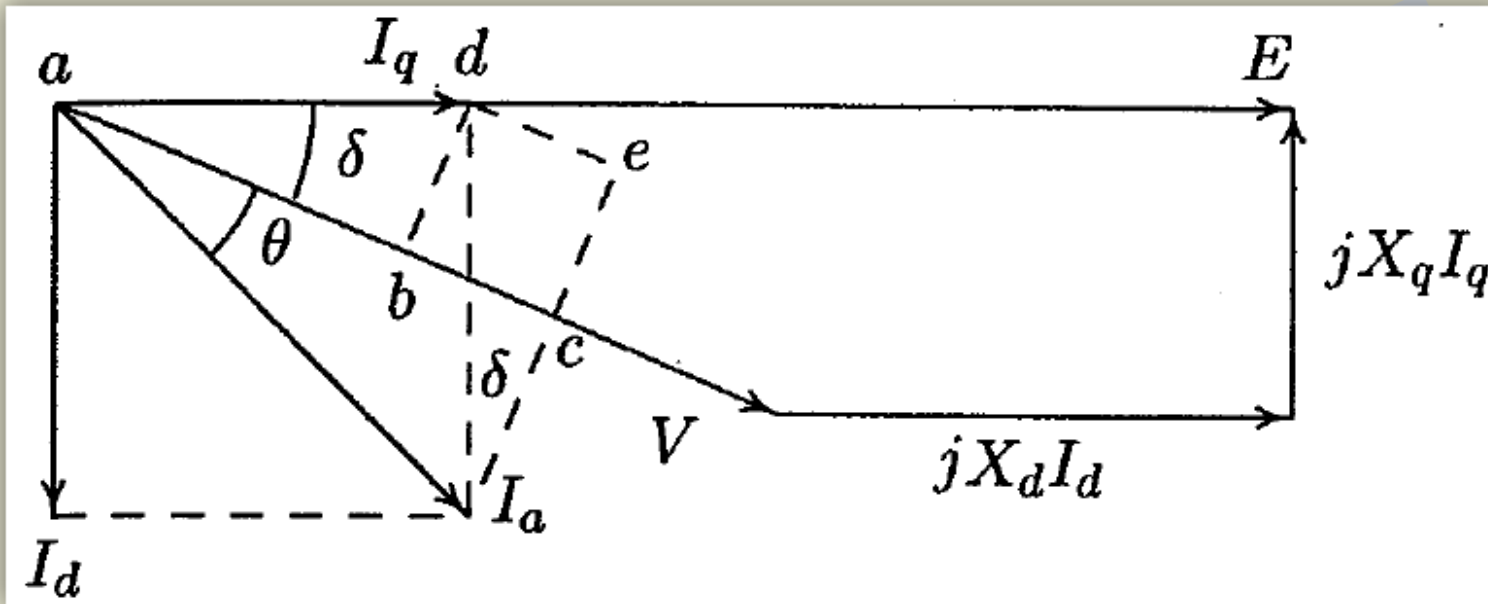


بنابراین می توان با تغییر جریان تحریک، توان راکتیو ژنراتور رو کنترل کرد در حالیکه توان حقیقی خروجی ثابت است:

- در حالت پسفاز، توان راکتیو تولید می شود $Q > 0$ (فوق تحریک)
- در حالت همفاز، توان راکتیو صفر است $Q = 0$ (تحریک نرمال)
- در حالت پیشفاز، توان راکتیو مصرف می شود $Q < 0$ (زیر تحریک)

ژنراتور سنکرون قطب برجسته

در روتور قطب برجسته، رلوکتانس مغناطیسی فاصله هوایی غیریکنواخت است.
 رلوکتانس در امتداد محور قطبی (محور مستقیم (محور d)) بسیار کمتر از رلوکتانس
 در امتداد محور درون قطبی (محور عمود (محور q)) است.



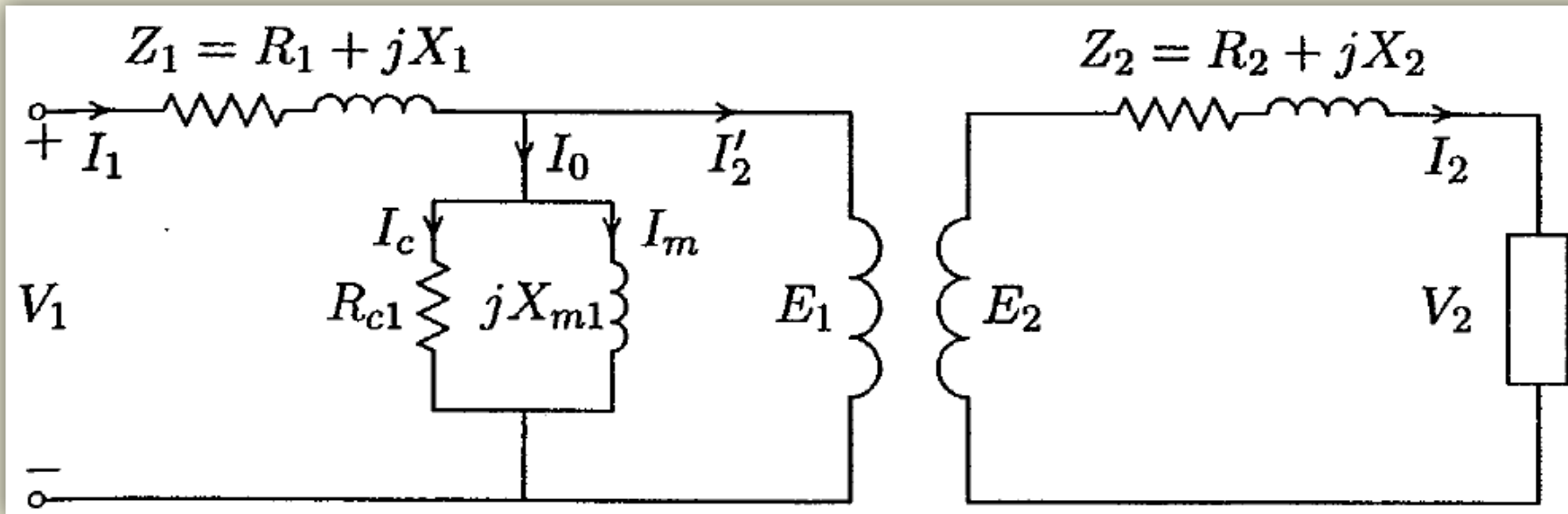
بنابراین راکتانس در امتداد محور مستقیم X_d
 بزرگ و راکتانس در امتداد محور عمود X_q
 کوچک است. این راکتانس‌ها باعث افت ولتاژ
 در آرمیچر شده که می‌توان این افت ولتاژ را با
 تجزیه I_a به دو مؤلفه I_q همفاز و I_d عمود بر
 ولتاژ تحریک E بدست آورد. با صرف نظر از
 مقاومت آرمیچر دیاکرام فازوری به صورت رو
 به رو می‌شود.

نمی‌توان ماشین سنکرون قطب برجسته را با یک مدار معادل ساده نشان داد.



یکی از اجزای اصلی سیستم قدرت ترانس ها هستند.
این تجهیز امکان افزایش ولتاژ نسبتاً کوچک ژنراتورها
(حدود ۱۰ تا ۳۰ کیلوولت) به مقادیر بسیار بزرگ
(مثلاً ۴۰۰ کیلوولت) به منظور انتقال بهینه توان را
فراهم می کند. در نزدیکی مصرف کننده ها، ولتاژ
افزایش یافته با استفاده از ترانس کاهش داده می شود تا
برای مصرف کنندگان قابل استفاده باشد.





مدار معادل شامل یک ترانس ایده آل با نسبت تبدیل $N_1:N_2$ است. ولتاژ دو سر ترانس ایده آل برابر است با:

$$E_1 = 4.44N_1f\phi_{\max}, E_2 = 4.44N_2f\phi_{\max}$$

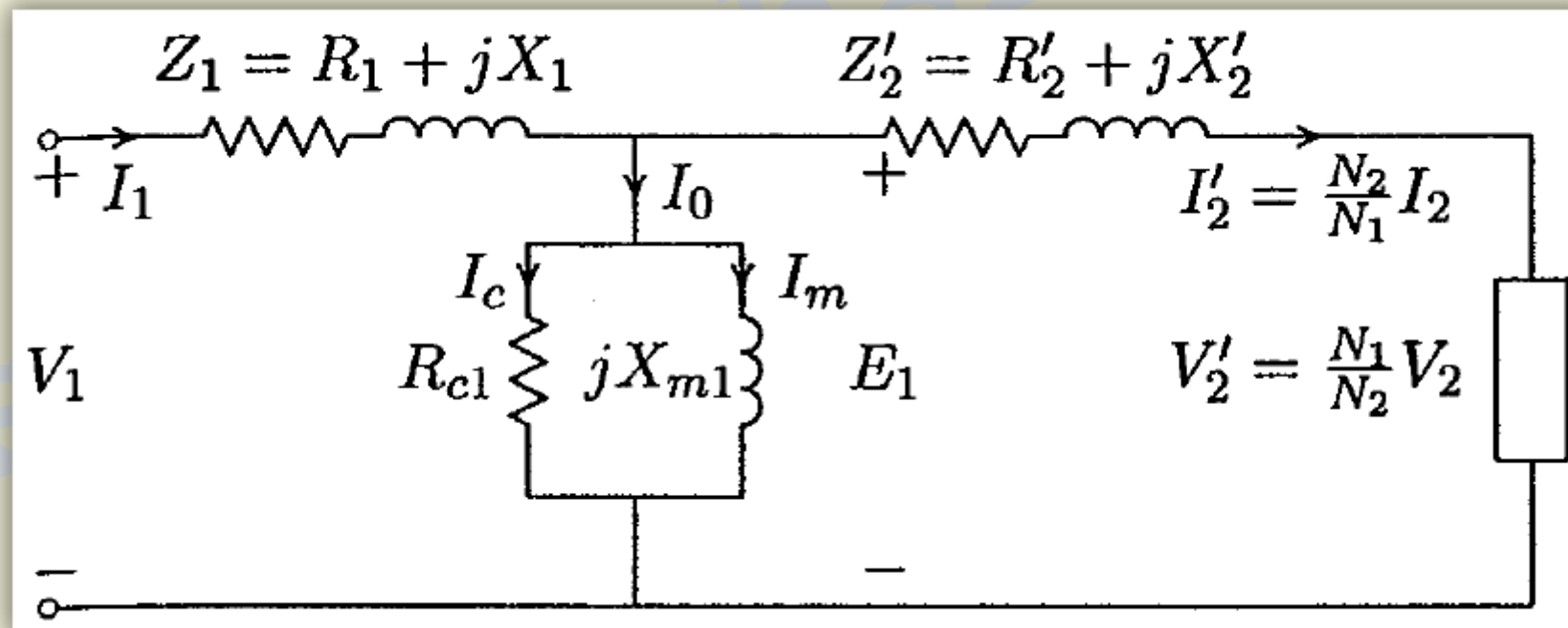
در ترانس ایده آل رابطه زیر برقرار است:

$$\frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}'_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

- R_1 و R_2 مدل مقاومت سیم پیچی های اولیه و ثانویه ترانس هستند.
- X_1 و X_2 مدل شار نشتی سیم پیچی های اولیه و ثانویه ترانس هستند زیرا کل شار تولیدی سیم پیچ ها از هسته نمی گذرد و مقداری در هوا نشت می کند.
- R_{c1} مدل توان تلف شده در هسته ترانس است که شامل تلفات هیستریزیس و تلفات فوکو می شود. از آنجایی که تلفات از جنس توان حقیقی است، با مقاومت مدل شده و جریان آن I_c همفاز با E_1 است.
- X_{m1} مدل کننده جریان مغناطیس کنندگی ترانس I_m است که باعث ایجاد شار هسته می شود. از آنجایی که جریان مغناطیس شوندگی همفاز با شار بوده و شار طبق قانون القای فارادی، ۹۰ درجه از ولتاژ القایی عقب تر است، این مؤلفه با استفاده از یک سلف مدل شده است.
- جریان شاخه موازی I_0 را جریان بی باری می نامند.

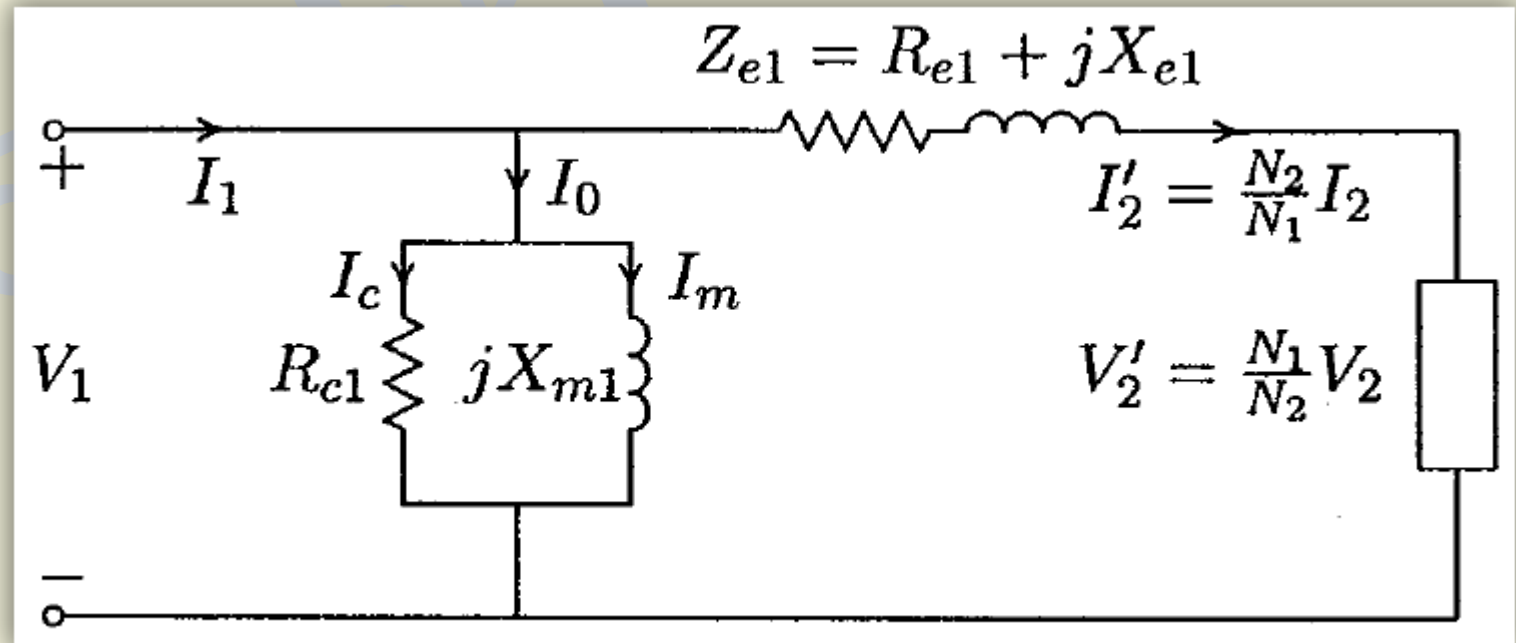
با استفاده از قانون انتقال امپدانس، می توان امپدانس ثانویه را به اولیه انتقال داد:

$$\bar{Z}'_2 = \bar{Z}_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

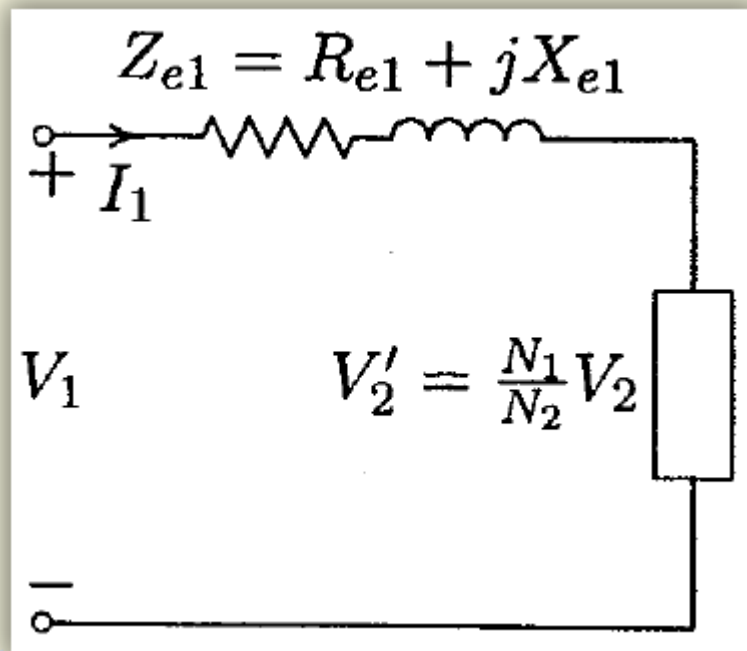


افت ولتاژ روی Z_1 کوچک بوده و می توان شاخه موازی را به سمت چپ انتقال داده تا بتوان از V_1 برای محاسبه جریان بی باری استفاده کرد. در این حالت امپدانس Z_1 با Z_2 ترکیب می شوند.

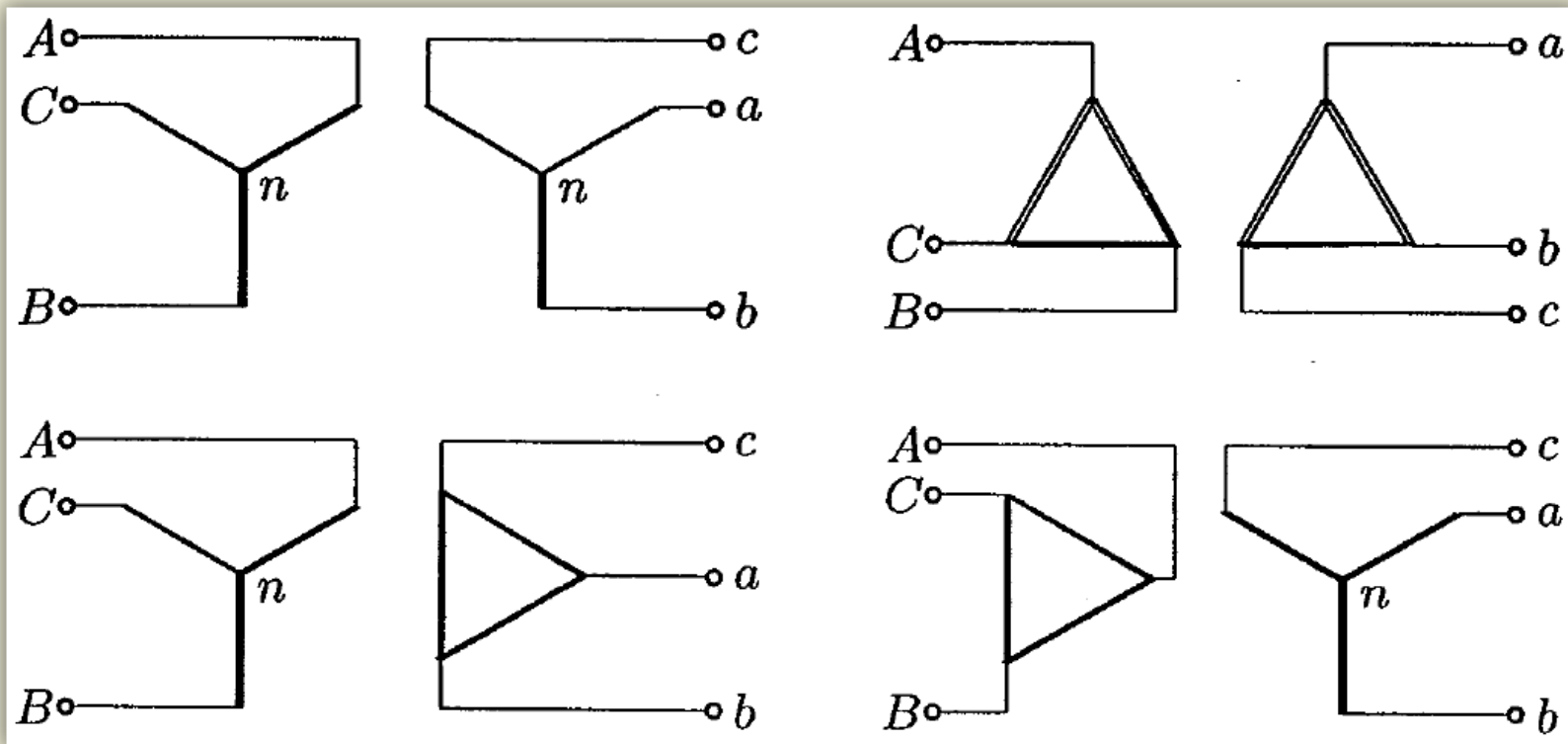
$$R_{e1} = R_1 + R'_2, \quad X_{e1} = X_1 + X'_2$$



در ترانس‌های قدرت معمولاً قابلیت نفوذپذیری مغناطیسی هسته بسیار بالا و در نتیجه تلفات هسته بسیار کم است. در نتیجه می‌توان با تقریب خوبی از شاخه موازی صرف‌نظر کرد:



در مدل رو به رو ترانس ایده‌آل کماکان وجود دارد زیرا ولتاژ بار V_2 دارای ضریب N_1/N_2 است. اگر کمیت‌های ترانس را پریونیت کنیم، ترانس ایده‌آی از مدل حذف می‌شود و در مدل رو به رو V_2^{pu} داریم. بنابراین در حالت پریونیت ترانس به راحتی با استفاده از یک امپدانس سری مدل می‌شود.



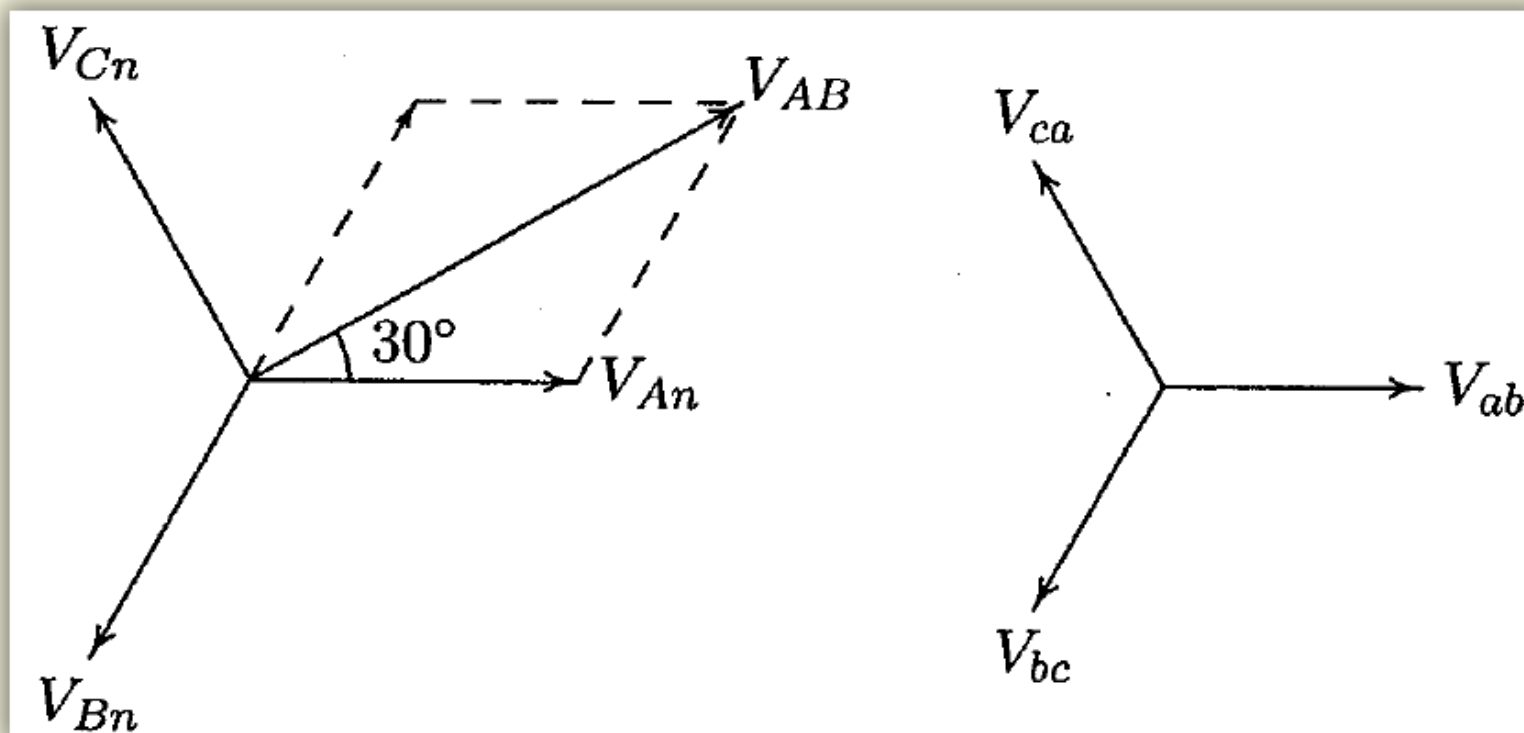
توان سه فاز با استفاده از ترانس های سه فاز انتقال می یابد. اما در ولتاژهای بسیار بالا (EHV)، معمولاً از سه ترانس تکفاز که با ساختار سه فاز متصل شده اند، بهره برده می شود. هر کدام از سیم پیچی های اولیه و ثانویه می تواند دارای اتصال ستاره یا مثلث باشد.

- در سیم‌پیچ با اتصال ستاره ولتاژ دو سر هر سیم‌پیچ ولتاژ فاز است در حالیکه در اتصال مثلث، ولتاژ خط دو سر هر فاز قرار دارد. پس در اتصال ستاره هزینه عایقی کمتر می‌شود. اتصال ستاره برای سمت فشار قوی مناسب است در حالیکه اتصال مثلث برای سمت فشار ضعیف که جریان بیشتر است، مناسب می‌باشد.
- اتصال $Y-Y$ دارای هزینه عایقی کم و وجود سیم نول (برای زمین کردن و اتصال بارهای تکفاز) است. اما به دلیل مشکلات ناشی از هارمونیک سوم، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای حذف هارمونیک سوم از سیم‌پیچ سوم (ثالثیه) با اتصال مثلث استفاده می‌شود تا مسیری برای جریان‌های هارمونیک سوم ایجاد شود (هارمونیک سوم در داخل آن گیر بیفتد و وارد شبکه نشود). به این ترانس‌ها ترانس سه سیم‌پیچه می‌گویند. می‌توان یک راکتور یا بانک خازنی به سیم‌پیچ سوم متصل کرد تا بتوان از آن برای جبران توان راکتیو استفاده نمود.

نرم افزار تحلیل هارمونیک ها در سیستم قدرت



- در اتصال $\Delta-\Delta$ مسیری برای اتصال نول وجود نداشته و ولتاژ دو سر هر سیم پیچ ولتاژ خط است. اما علاوه بر حذف هارمونیک سوم جریان، می تواند با دو سیم پیچ به کار خود ادامه دهد؛ در این حالت ۵۸ درصد توان منتقل می شود. در این حالت اتصال را V می نامند.
- اتصال ستاره-مثلث متداول تر است. از اتصال $\Delta-Y$ معمولاً برای کاهش سطح ولتاژ استفاده شده و نقطه نول سمت فشار قوی را می توان زمین کرد. اتصال $\Delta-Y$ معمولاً برای افزایش ولتاژ مورد استفاده قرار می گیرد.



- در اتصالات $Y-Y$ و $\Delta-\Delta$ نسبت ولتاژهای خط در سمت فشار قوی به فشار ضعیف با نسبت ولتاژهای فاز آنها برابر است. همچنین شیفت فازی بین ولتاژهای خط دو طرف وجود ندارد.
- اتصالات $Y-\Delta$ و $\Delta-Y$ باعث شیفت فاز 30° درجه بین ولتاژهای خط اولیه و ثانویه می شوند.

با فرض نمایش سمت فشار قوی با H و فشار ضعیف با X ، L به عنوان کمیت خط

و P به عنوان کمیت فاز، N_H و N_X تعداد دور سمت فشار قوی و فشار ضعیف،

برای ترانس $Y-\Delta$ داریم: نسبت تبدیل ترانس: $a = N_H/N_X = V_{HP}/V_{XP}$

$$V_{HL} = \sqrt{3}V_{HP}, V_{XL} = V_{XP} \rightarrow \frac{V_{HL}}{V_{XL}} = \sqrt{3}a$$

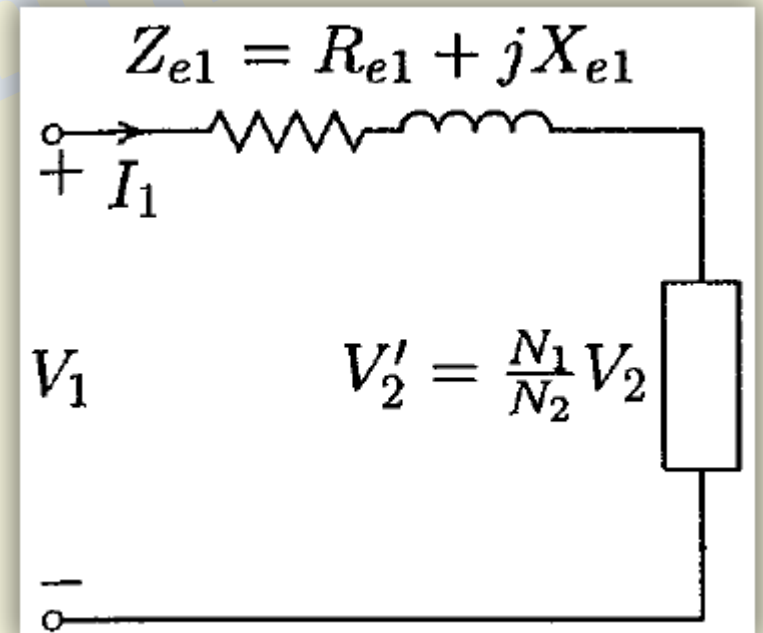
بدلیل اینکه تلفات هسته و جریان مغناطیس شوندگی در حدود ۱ درصد ظرفیت

ترانس هستند، از شاخه موازی صرفنظر شده و ترانس فقط با امپدانس معادل سری

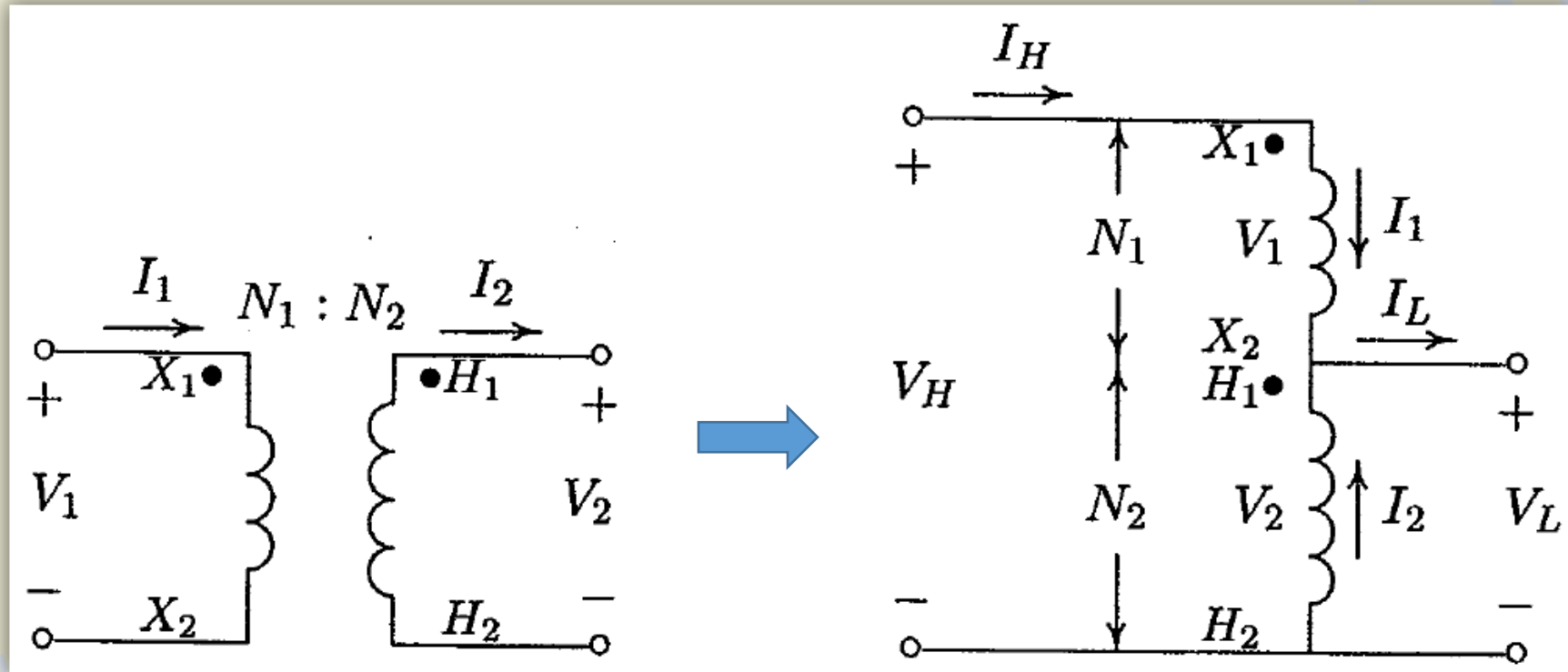
مدل می شود. برای استفاده از مدار معادل تکفاز، سمت مثلث را به ستاره تبدیل

می کنیم. همچنین باید امپدانس های سمت مثلث را بر ۳ تقسیم کرد تا بتوان آنها را

در مدار معادل قرار داد.



در اتوترانسفورماتور سمت اولیه و ثانویه بر خلاف ترانس معمولی ایزوله نبوده و از نظر الکتریکی بهم ارتباط دارند.



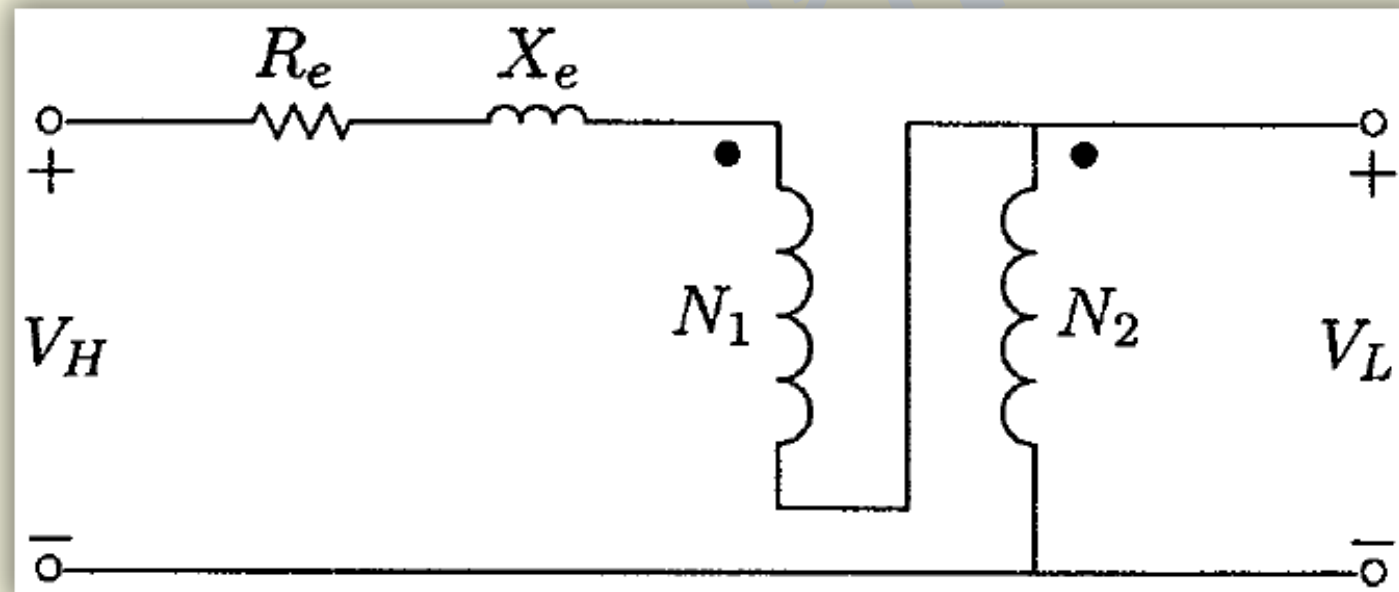
تبدیل ترانس به اتوترانس

انتقال توان در اتوترانس هم از طریق میدان مغناطیسی (مثل ترانس معمولی) و هم بواسطه ارتباط الکتریکی انجام می گیرد. در اتوترانس نشان داده شده نسبت توان انتقالی اتوترانس به ترانس $1 + (1/a)$ است که a نسبت تبدیل ترانسی است که اتوترانس از روی آن ساخته شده است. اگر نسبت تبدیل ترانس $1:10$ باشد، آنگاه توان انتقالی در اتوترانس 11 برابر ترانس است در حالیکه سیم پیچ ها و هسته تغییری نکرده اند.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \rightarrow \frac{V_H}{V_L} = \frac{V_1 + V_2}{V_2} = \frac{\left(\frac{N_1}{N_2}\right) V_2 + V_2}{V_2} = 1 + \frac{N_1}{N_2}$$

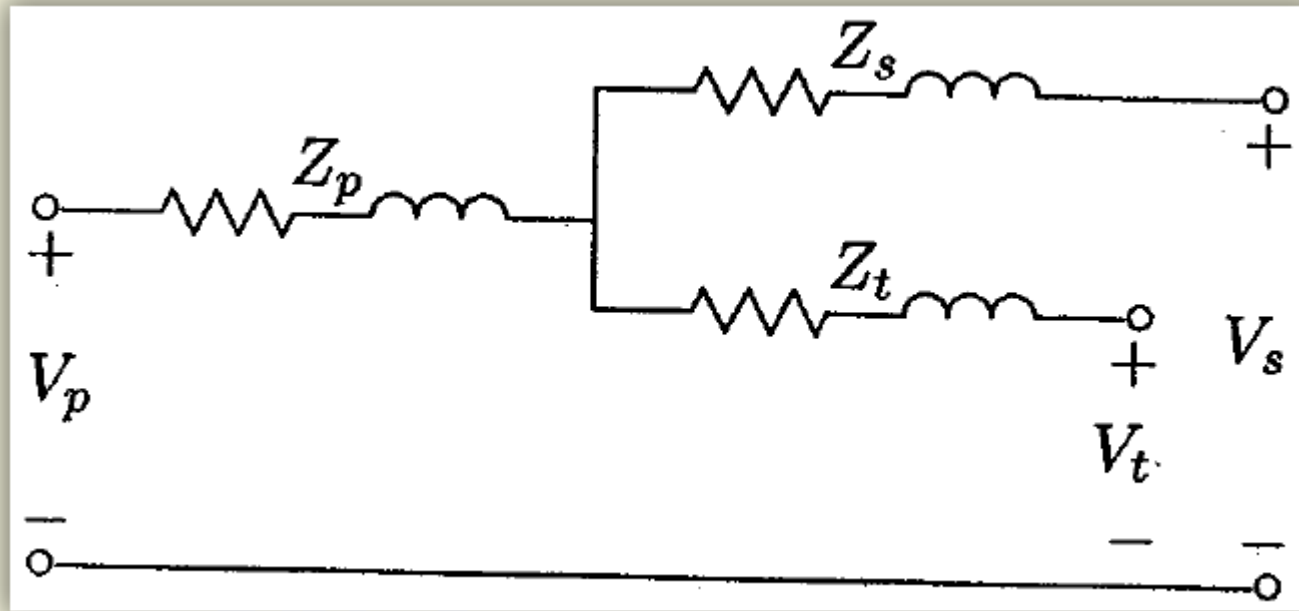
$$S_A = S_T \left(1 + \frac{V_2}{V_1} \right)$$

امپدانس معادل پریونیت شده یک اتوترانس بسیار کوچکتر از ترانس سازنده آن می باشد. معمولاً اتوترانس را به صورت یک ترانس دو سیم پیچه با اتصال سری دو سیم پیچ در نظر می گیرند. در شکل زیر، امپدانس ها به سمت $N1$ انتقال یافته اند.



مدل ترانس سه سیم پیچه

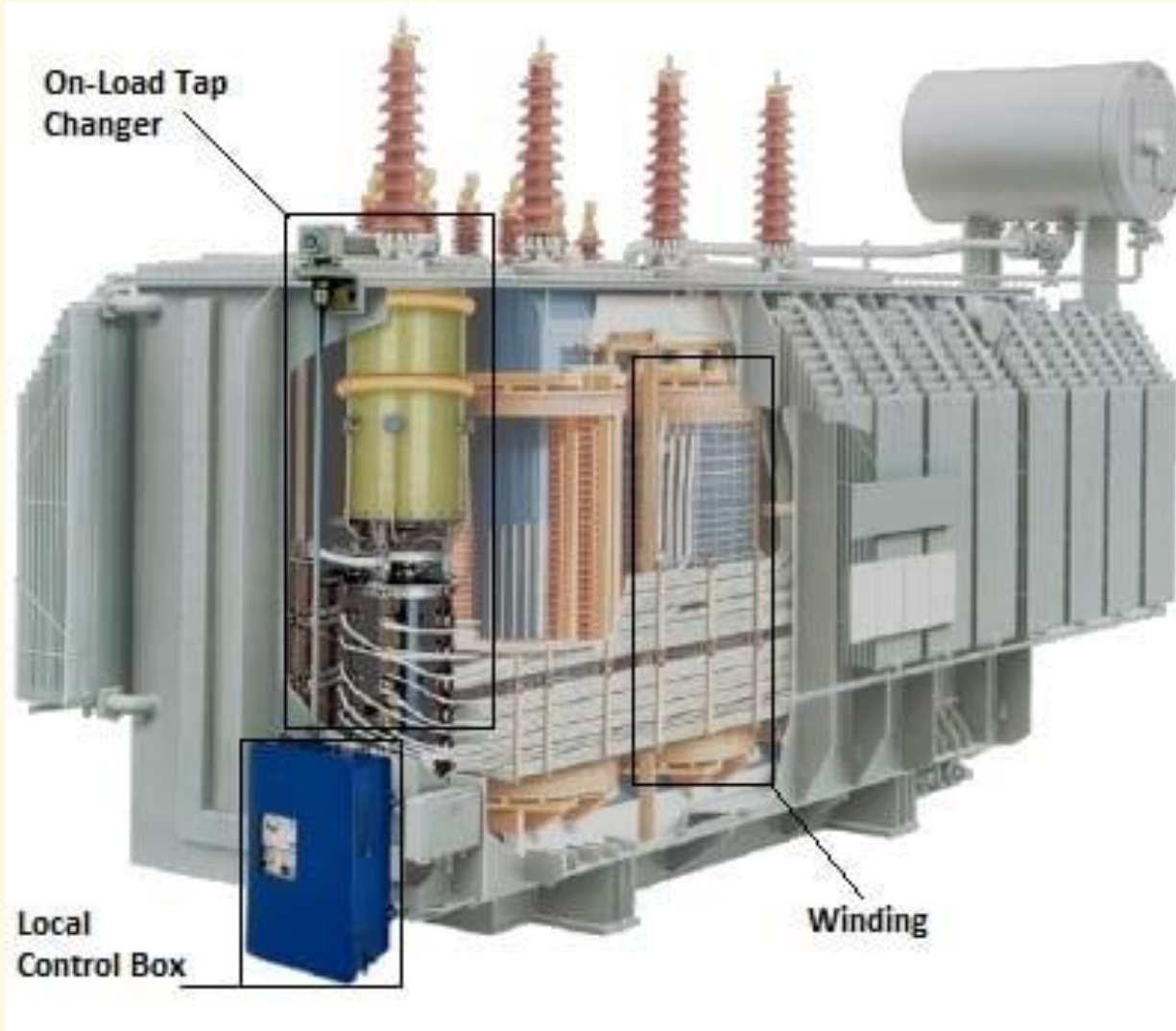
از ترانس های سه سیم پیچه معمولاً برای اتصال سه مدار با ولتاژ متفاوت استفاده می شود. مثلاً برای تغذیه دو بار مستقل با ولتاژ متفاوت از یک منبع از این نوع ترانس استفاده می شود.



از سیم پیچ سوم معمولاً به منظور تأمین ولتاژ برای سیستم های توان کمکی در پست ها و یا تغذیه سیستم توزیع محلی استفاده می شود. همچنین می توان برای جبران توان راکتیو، به این سیم پیچ راکتور یا خازن متصل کرد. در بعضی اوقات در ترانس های Y-Y از سیم پیچ سوم Δ استفاده می شود تا هارمونیک سوم حذف شود. با صرف نظر از جریان تحریک، از مدار معادل تک فاز رو به رو برای مدلسازی ترانس های سه سیم پیچه استفاده می شود.

- معمولاً همه ترانس‌های قدرت و اکثر ترانس‌های توزیع مجهز به تپ در یک یا چند سیم‌پیچ خود برای تغییر نسبت دور هستند. تغییر تپ با تغییر دامنه ولتاژ بر توزیع توان راکتیو اثر گذاشته و بنابراین برای کنترل پخش توان راکتیو از آن بهره برده می‌شود. دو نوع ترانس مجهز به تپ چنجر وجود دارد:
- ترانس مجهز به تپ چنجر غیرقابل قطع زیر بار که به قطع برق ترانس قبل از تغییر تپ نیاز دارند. در مواردی که تغییر تپ بطور متناوب رخ نمی‌دهد (مثل رشد بار یا برخی تغییرات فصلی)، از این نوع استفاده می‌شود.
- ترانس مجهز به تپ چنجر قابل قطع زیر بار که برای مواردی که تغییر تپ زیاد بوده و یا قطع برق آن برای تغییر تپ مطلوب نیست، مناسب است.

ترانس مجهز تب چنجر



- معمولاً ترانس ها دارای ۴ تب ۲/۵ درصدی هستند که امکان تغییر ولتاژ در بازه $\pm 5\%$ را فراهم می کنند. البته ممکن است پله ها بیشتر نیز شوند.

- برای نمایش سیستم قدرت و تحلیل آن، از دیاگرام تک خطی استفاده می کنند که در واقع مدار معادل تکفاز شبکه است.
- در این دیاگرام، مدار معادل اجزای مختلف در حالت پریونیت قرار داده می شود. همه کمیت ها باید در یک مبنای مشترک پریونیت شده باشند. توان مبنا در کل شبکه یکسان بوده ولی ولتاژ مبنا با توجه به نسبت تبدیل ترانس ها تغییر می کند.
- سمت فشار قوی ترانس ها دارای اتصال ستاره و سمت فشار ضعیف آنها دارای اتصال مثلث می باشد.

مثال: در شبکه هشت باس زیر مدار معادل تکفاز سیستم را رسم کرده و محاسبات مربوطه را انجام دهید. توان مبنا و ولتاژ مبنا را در باس ۴ و به ترتیب برابر با 500 MVA و 500 kV در نظر بگیرید. پارامترهای فراهم شده توسط شرکت‌های سازنده به قرار زیر است:

G1: 500 MVA, 13.8 kV, $X = 20\%$

G2: 750 MVA, 18 kV, $X = 18\%$

M: 500 MVA, 13.8 kV, $X = 9\%$

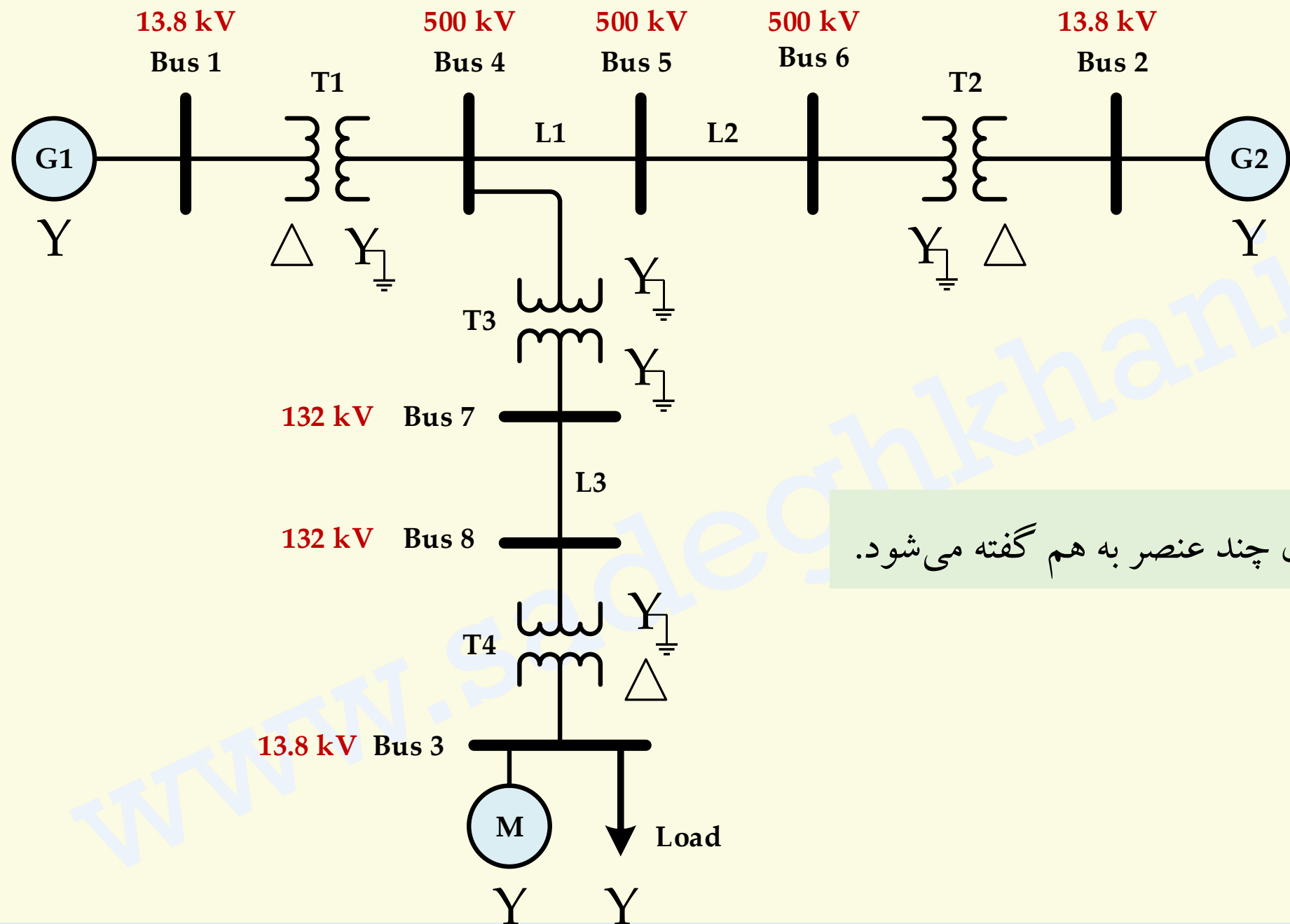
T1,T2: 500 MVA, 13.8/500 kV, $X = 12\%$

T3: 500 MVA, 500/132 kV, $X = 9\%$

T4: 500 MVA, 132/13.8 kV, $X = 27\%$

L1,L2,L3: $X = 50\Omega$

Load: 160 MW, 10 kV, P.F. = 0.8 Lag



باس بار (باس / شینه): به محل اتصال چند عنصر به هم گفته می شود.

- باید امپدانس پریونیت شده همه عناصر را در مبنای خواسته شده بدست آوریم. امپدانس های ارائه شده دو حالت دارند:
- یا بصورت پریونیت (درصد) داده شده اند که در این حالت باید بررسی شود آیا مبنای پریونیت شرکت سازنده و مبنای انتخاب ما یکسان است یا خیر. در صورت جواب منفی، باید از فرمول تغییر مبنا استفاده شود.
 - یا بصورت اهمی داده شده اند که باید امپدانس مبنا در محل آن تجهیز محاسبه شده و امپدانس پریونیت شده محاسبه گردد.

برای محاسبه امپدانس مبنا، به توان و ولتاژ مبنا در همه نقاط شبکه نیاز داریم ($Z_b = V_b^2 / S_b$). توان مبنا در همه جا یکسان و برابر **MVA ۵۰۰** است. بنابراین ولتاژ مبنا را باید در همه باس های شبکه محاسبه نماییم. ولتاژ مبنا در همه نقاط شبکه یکسان است مگر اینکه ترانس وجود داشته باشد که با توجه به نسبت تبدیل ترانس تغییر می کند.

$$V_{b4} = V_{b5} = V_{b6} = 500 \text{ kV}$$

$$V_{b1} = (13.8/500) \times V_{b4} = 13.8 \text{ kV}$$

$$V_{b2} = (13.8/500) \times V_{b6} = 13.8 \text{ kV}$$

$$V_{b7} = (132/500) \times V_{b4} = 132 \text{ kV} = V_{b8}$$

$$V_{b3} = (13.8/132) \times V_{b8} = 13.8 \text{ kV}$$

در مورد ترانس‌ها، سمت مثلث سمت فشار ضعیف (سمت ژنراتور/بار) و سمت ستاره سمت فشار قوی (سمت خط انتقال) است.

ولتاژ مبنا و توان نامی ژنراتور **G1** که به عنوان کمیت‌های مبناى شرکت سازنده انتخاب شده‌اند با ولتاژ و توان مبناى

انتخابی یکسان است ← $X = 0.2 \text{ pu}$ ✓

ولتاژ مبنا و توان نامی ژنراتور **G2** که به عنوان کمیت‌های مبناى شرکت سازنده انتخاب شده‌اند با ولتاژ و توان مبناى

انتخابی یکسان نیست ← $X = 0.18 \text{ pu}$ ✗

$$X_{G2,new}^{pu} = X_{G2,old}^{pu} \left(\frac{S_b^{new}}{S_b^{old}} \right) \left(\frac{V_b^{old}}{V_b^{new}} \right)^2 = 0.18 \left(\frac{500}{750} \right) \left(\frac{18}{13.8} \right)^2 = 0.204 \text{ pu} \quad \checkmark$$

ولتاژ مبنا و توان نامی موتور سنکرون **M** که به عنوان کمیت‌های مبناى شرکت سازنده انتخاب شده‌اند با ولتاژ و توان

مبناى انتخابی یکسان است ← $X = 0.09 \text{ pu}$ ✓

ولتاژ مبنا و توان نامی ترانس‌های T1 تا T4 که به عنوان کمیت‌های مبنای شرکت سازنده انتخاب شده‌اند با ولتاژ و

توان مبنای انتخابی یکسان است ← راکتانس آنها قابل قبول است ✓

نکته: لازم به ذکر است اگر ولتاژهای مبنای انتخابی با شرکت سازنده ترانس فرق می‌کرد، باید در فرمول تغییر مبنا، در صورت و مخرج ولتاژ یک طرف ترانس را قرار داد.

چون خطوط بصورت اهمی داده شده‌اند، باید خودمان امپدانس آنها را پیونیت کنیم:

$$L1, L2: Z_b = \frac{V_{b4}^2}{S_b} = \frac{(500 \text{ kV})^2}{500 \text{ MVA}} = 500 \Omega \rightarrow X_{L1, L2} = \frac{50}{500} = 0.1 \text{ pu}$$

$$L3: Z_b = \frac{V_{b7}^2}{S_b} = \frac{(132 \text{ kV})^2}{500 \text{ MVA}} = 34.8 \Omega \rightarrow X_{L3} = \frac{50}{34.8} = 1.4 \text{ pu}$$

بارهای سیستم قدرت معمولاً با توان و ولتاژ معرفی می‌شوند. باید ابتدا از روی این پارامترها، امپدانس آنها را محاسبه کرده و بعد پریونیت کنیم:

$$S_{\text{Load}} = \frac{P_{\text{Load}}}{PF} = \frac{160}{0.8} = 200 \text{ MVA} \rightarrow Z_{\text{Load}} = \frac{V_{\text{Load}}^2}{S_{\text{Load}}} = \frac{10 \text{ kV}^2}{200 \text{ MVA}} = 0.5 \Omega$$

$$Z_b = \frac{V_{b3}^2}{S_b} = \frac{13.8 \text{ kV}^2}{500 \text{ MVA}} = 0.38 \Omega \rightarrow Z_{\text{Load}}^{\text{pu}} = \frac{0.5}{0.38} = 1.32 \text{ pu}$$

$$\bar{Z}_{\text{Load}}^{\text{pu}} = 1.32^{\text{pu}} \angle +36.87^\circ = 1.06 + j0.79 \text{ pu}$$



ضریب توان پسفاز ← سلفی ← قسمت موهومی امپدانس مثبت

