



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
مجمع آموزش عالی کناباد

« به نام خدا »



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
مجمع آموزش عالی کناباد

تحلیل سیستم های قدرت ۱

دکتر امین رنجبران

عضویت علمی مجمع آموزش عالی کناباد



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

❖ سرفصل درس:

1. مقدمه
2. ✓ مفاهیم اساسی سیستم های انرژی الکتریکی
3. پارامترهای خطوط انتقال $\leftarrow R, L, C$
4. روابط ولتاژ و جریان در خطوط انتقال \leftarrow مدل های خط انتقال \leftarrow مدل خط کوتاه، متوسط - بلند
5. ماتریس های امپدانس و ادمیتانس در شبکه $\leftarrow [I_{bus}] = [Y_{bus}] \cdot [V_{bus}]$
6. مطالعات پخش بار \leftarrow Load flow study
7. - بازار برق \leftarrow Electricity Market

مراجع

۱- سیستم‌های قدرت الکتریکی تألیف: احد کاظمی

۲- مبانی بررسی سیستم‌های قدرت تألیف: ویلیام دی. استیونسون ترجمه: پیروز پروین و علی شاعری

۳- بررسی سیستم‌های قدرت، تألیف: هادی سعادت، مترجمین: حیدرعلی شایانفر، شهرام جدید، احد کاظمی

۴- نظریه سیستم‌های انرژی الکتریکی تألیف: الگرد مترجمین: مهدی طباطبائی، سعید قاسم زاده، سید حسین حسینی

۵- خلاصه درس و حل مسائل بررسی سیستم‌های قدرت ۱ تألیف: دکتر مصطفی عیدیانی

6- Power System Analysis and Design, by J. Duncan Glover and Mulukutla S. Sarma, Brooks/Cole Third Edition, 2002.

7- Power System Analysis, By Grainger, McGraw Hill, 1994.

8- Elements of Power System Analysis, by William Stevenson, McGraw Hill 4th Edition, 1982

بارم نمرات

❖ تمرینات و **حضور در کلاس** ۲ نمره

❖ امتحانات میان ترم ۴ نمره

❖ پایان ترم ۱۴ نمره

مقدمه

رشد سیستم‌های قدرت الکتریکی

❖ اولین سیستم‌های قدرت تحت عنوان شرکت‌های روشنایی در حدود ۱۸۸۰ میلادی

معروفترین آنها شرکت روشنایی پرل استریت در نیویورک که توسط ادیسون تأسیس گردید

قدرت الکتریکی DC و توسط کابل زیر زمینی توزیع گردید. بارها لامپ‌های التهابی

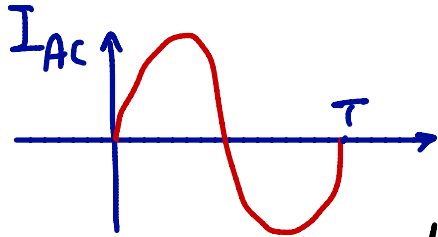
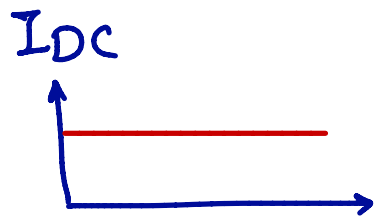
❖ در اواخر قرن ۱۹ ← موتور القایی AC اختراع شد

❖ در سال ۱۸۸۵ جرج ویستینگ‌هاوس اولین سیستم توزیع جریان متناوب با تأمین ۱۵۰ لامپ را نصب کرد

❖ در سال ۱۸۹۰ اولین خط انتقال AC بطول ۲۱ کیلومتر

❖ دلیل عمده سیستم‌های AC ← ترانسفورماتور ← انتقال انرژی الکتریکی در ولتاژ بالاتر

افزایش قابلیت انتقال قدرت



سوال 1: تفاوت جریان DC با جریان AC؟ $f = \frac{1}{T}$ Hz

$$i = \frac{dq}{dt}$$

Direct current



Alternating current AC جریان متناوب یا



سوال 2: چرا از سطح قدرت AC بجای DC استفاده می شود؟ کاهش تلفات

$P \propto VI$

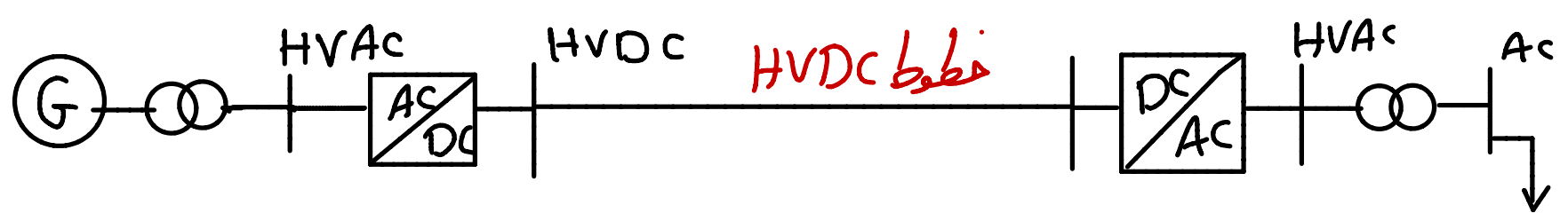
1) $V \uparrow I \downarrow$

2) $V \downarrow I \uparrow$

تولید سافت طولانی صورت میگیرد
 آتوان است

$P_{loss} = R I^2$
 توان تلفاتی

ولتاژ AC ← ترانسفورماتور ← HVAC
 High Voltage AC
 ولتاژ AC فست رتوی



رشد سیستم‌های قدرت

❖ توربین بخار توسط پارسون Parson ارائه شد. **تولید ایران در سال ۹۵ در حدود**

۵۲۰۰۰ MW

❖ فرکانس ولتاژ ایجاد شده توسط توربین بخار و آب اولیه ۲۵ هرتز

❖ امروزه فرکانس ۶۰ هرتز در آمریکا و ۵۰ هرتز در ایران و اروپا

❖ در ایالات متحده آمریکا

• در سال ۱۸۹۰ ولتاژ خطوط انتقال معادل ۳.۳ کیلوولت

• در سال ۱۹۶۹ به ۷۹۵ kv رسید.

• در سال ۱۹۸۲ ظرفیت نصب شده به ۶۰۰۰۰۰ MW رسید. که متوسط ۲.۵ kw برای هر نفر

• تا سال ۱۹۱۷ سیستم‌های قدرت به صورت واحدهای مستقل

• در ایران در سال ۱۳۶۰ ظرفیت نصب شده ۱۱۸۰۰ MW که حدود ۳۰۵ w برای هر نفر

سیستم‌های قدرت بهم پیوسته

❖ مزایای سیستم‌های قدرت بهم پیوسته:

۱- استفاده بهینه از ظرفیت موجود

۲- ثابت شدن ولتاژ و فرکانس

۳- صرفه جویی در رزرو

۴- مناسب تر شدن بار

❖ معایب سیستم‌های قدرت بهم پیوسته:

۱- پیچیده تر شدن سیستم

۲- بالا رفتن قدرت کلیدهای قدرت

حرم مطهر رضوی

نخستین جلوه روشنایی برق در ایران

نخستین بار در سال ۱۲۷۹ هجری شمسی روشنایی برق بر چشم زائران حرم مطهر رضوی و بارگاه علی ابن موسی الرضا (ع) نشست.

تاریخچه صنعت برق در ایران

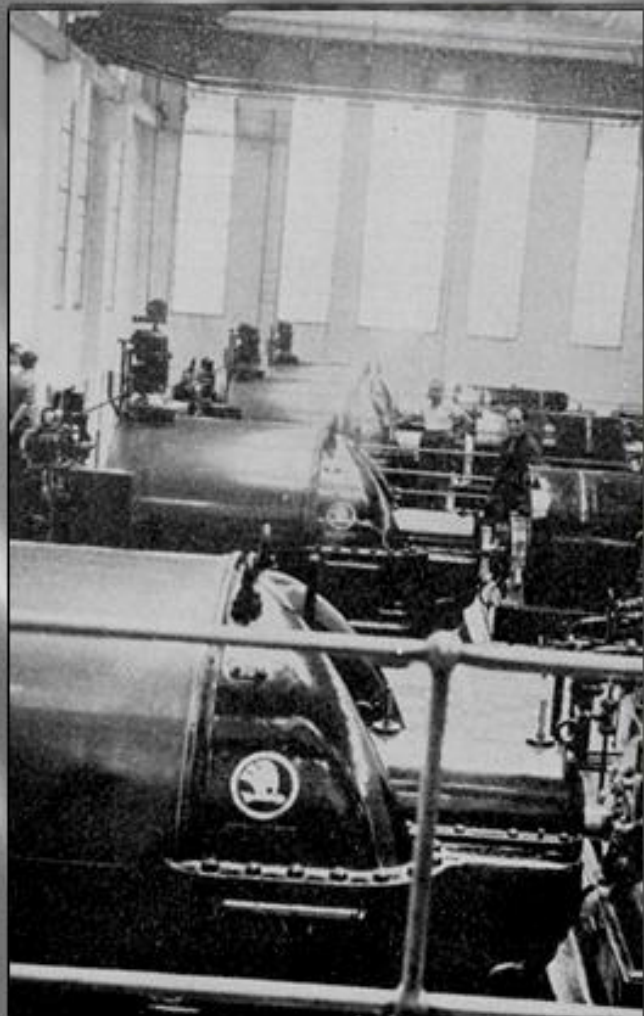
ایجاد کارخانه برق عمومی در ایران

حاج حسین امین الضرب بازرگان ایرانی برای اولین بار در سال ۱۲۸۳ هجری شمسی مجوز دایر کردن کارخانه برق را در تهران دریافت داشت .

همزمان فعالیتهای مشابهی در شهرهای بزرگ کشور از جمله اصفهان ، تبریز ، مشهد ، رشت و شیراز آغاز شد.



شصت سال اول – تا دهه چهل :



ایجاد نیروگاههای کوچک توسط بخش خصوصی

دخالت محدود دولت در حد:

صدور مجوز

نظارت بر تعرفه

روشنائی معابر عمومی

برق کالائی لوکس که:

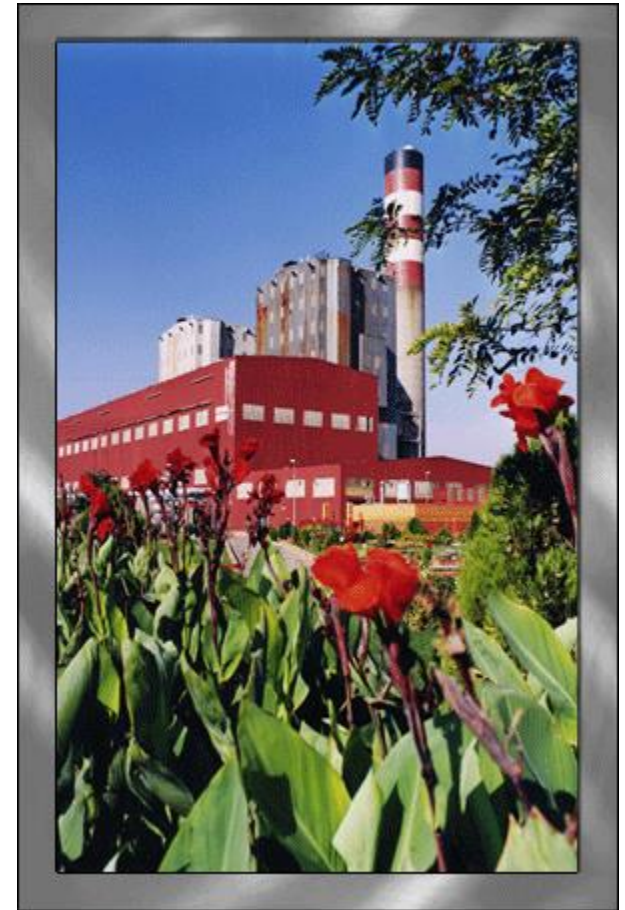
مصرف کننده بهای آنرا می پرداخت

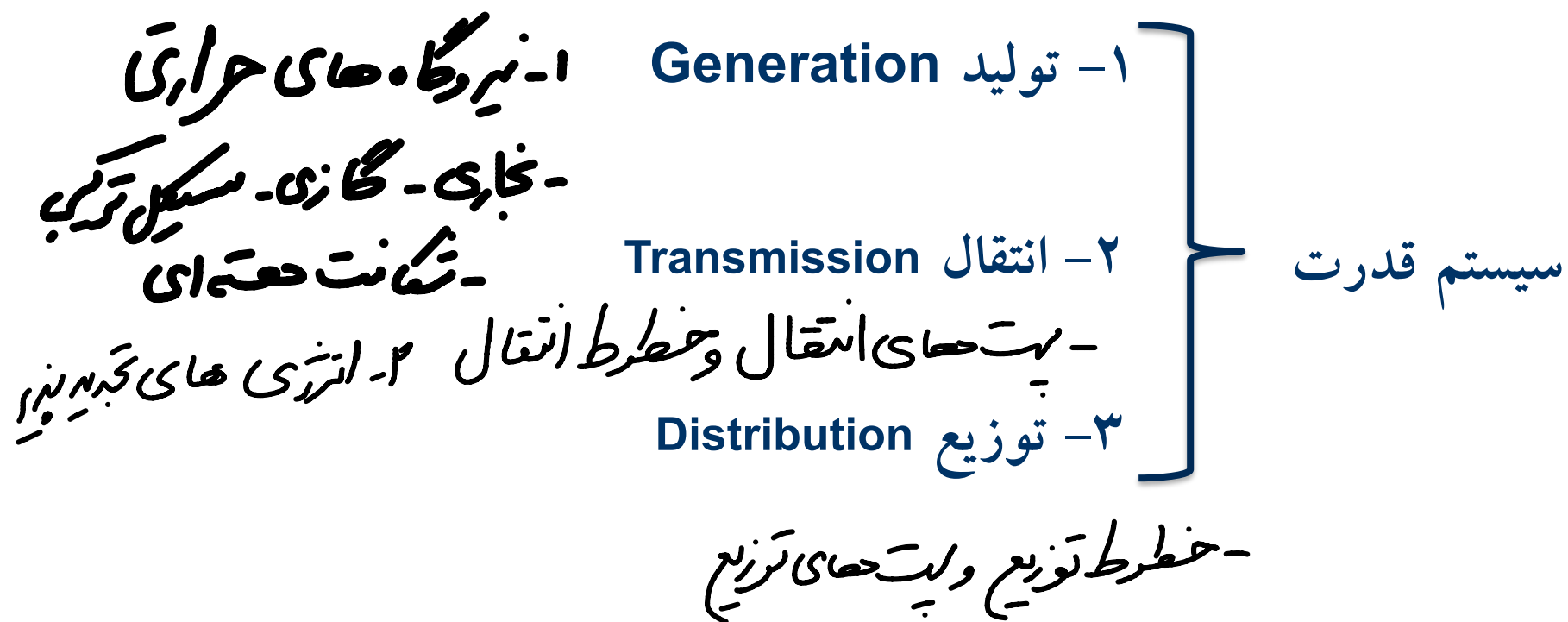
بخش خصوصی سود خود را می برد

دولت مالیات و حق امتیاز می گرفت

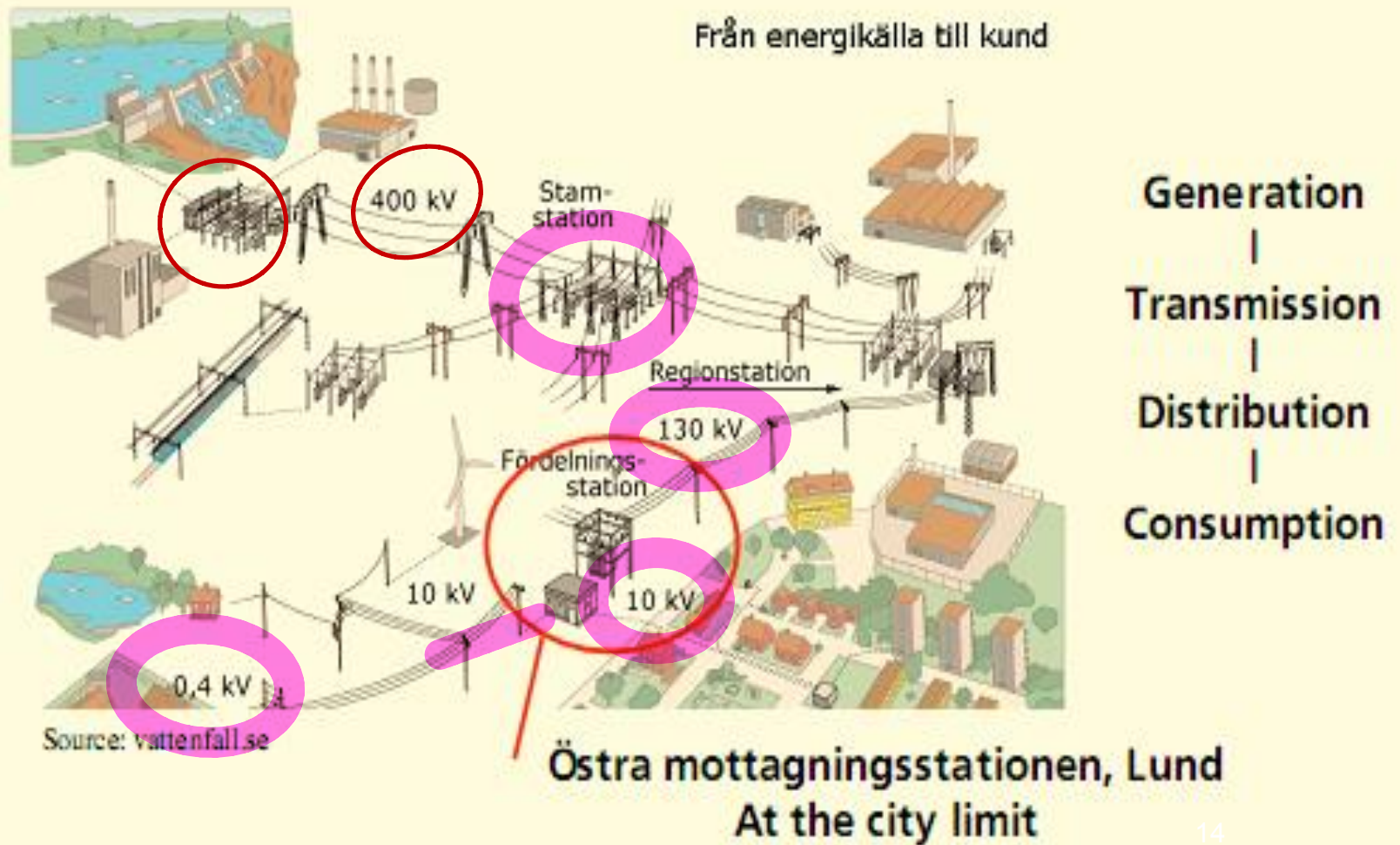
تاریخچه صنعت برق در ایران

- ورود تاسیسات مهم آبی دز، کرج و سفیدرود به مدار
- تاسیس سازمان برق ایران در سال ۱۳۴۱
- تشکیل وزارت آب و برق در سال ۱۳۴۳
- تاسیس شرکت توانیر در سال ۱۳۴۸
- تبدیل وزارت آب و برق به وزارت نیرو در سال ۱۳۵۳

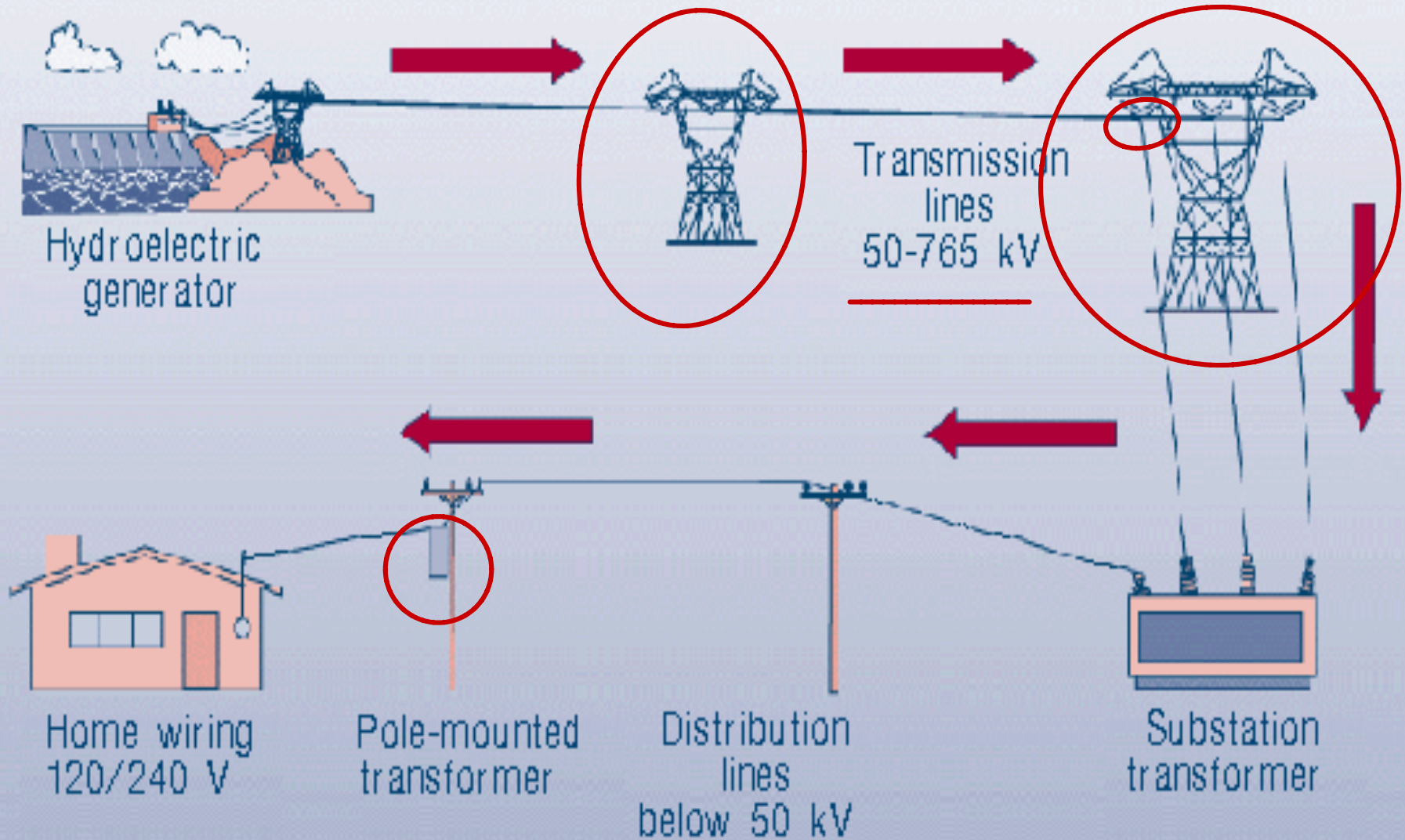


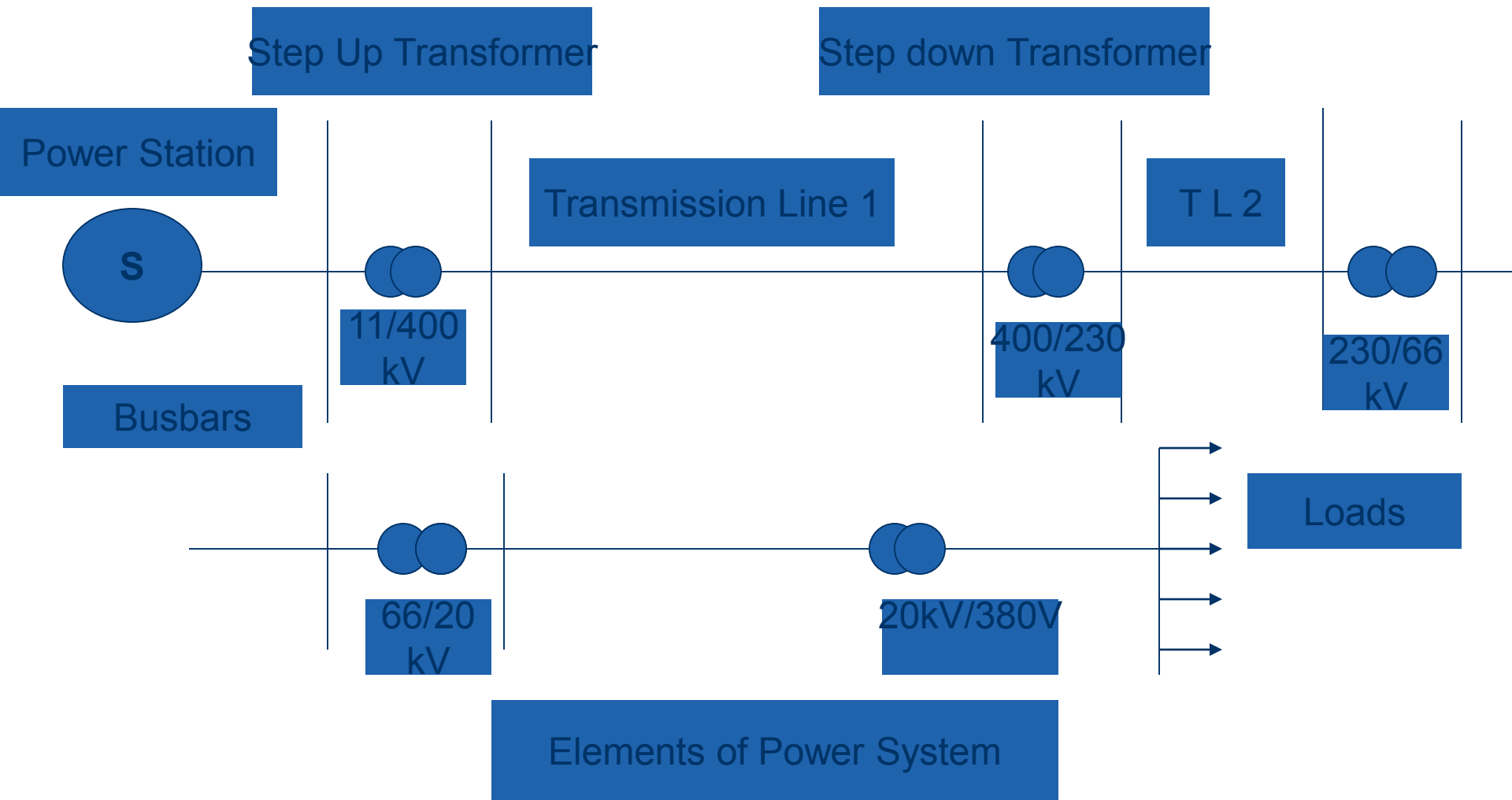


From generator to customer



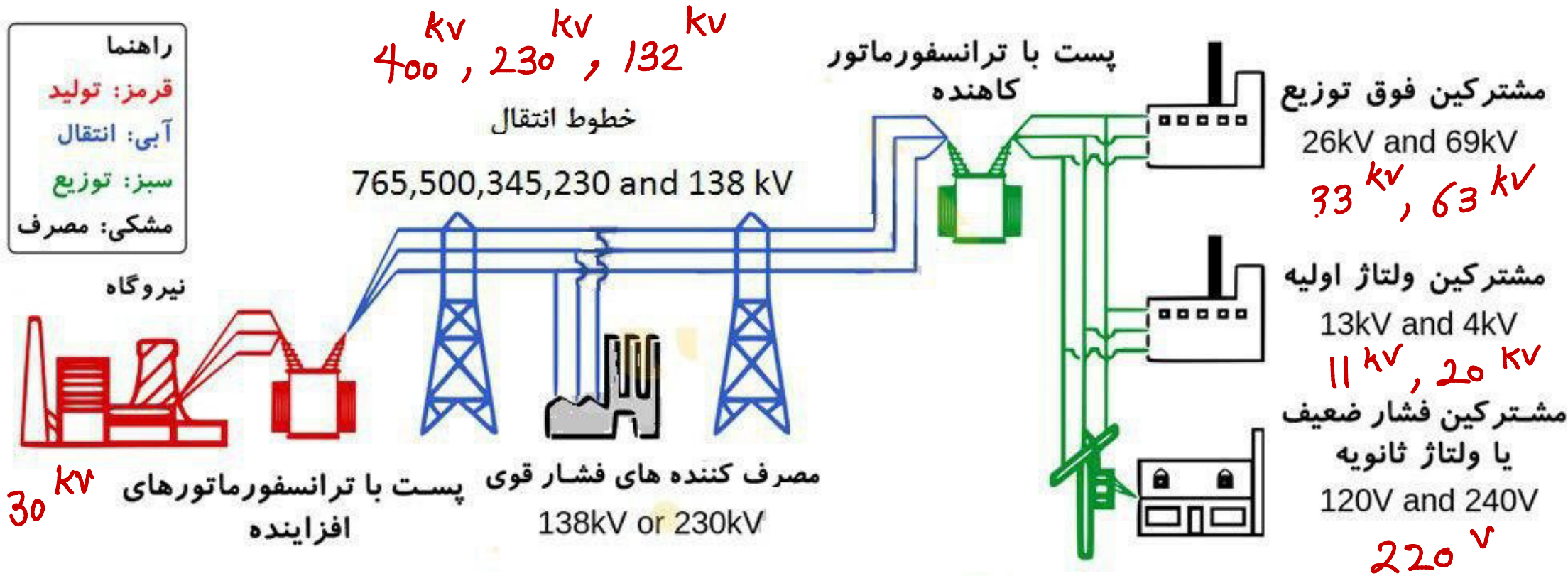
Basic Electric Power System





اینفوگرافیک سیستم قدرت از تولید تا مصرف

راهنما
 قرمز: تولید
 آبی: انتقال
 سبز: توزیع
 مشکی: مصرف



توجه: ولتاژها بر اساس استاندارد ایران نمی باشد

سطوح نامی ولتاژ در ایران

حداکثر ولتاژ سیستم kv	سطوح نامی ولتاژ KV	سطح ولتاژ
-	۰/۴	فشار ضعیف LV
۲۴ (۱۲ و ۳۶)	۲۰ (۱۱ و ۳۳)	فشار متوسط توزیع MV
۷۲/۵	۶۳	فشار قوی (فوق توزیع) HV
۱۴۵	۱۳۲	فشار قوی (فوق توزیع) HV
۲۴۵	۲۳۰	فشار قوی (انتقال) HV
۴۲۰	۴۰۰	فوق فشار قوی (انتقال) HV EHV

Power stations نیروگاه‌ها

Types of power stations :

1. Thermal power stations .
2. Gas power stations .
3. Hydro power stations .

فصل دوم

مفاهیم اساسی سیستم‌های انرژی الکتریکی

AC vs DC

- ❖ **AC is alternating current.**
- ❖ **AC quantities always vary sinusoidally in time.**
- ❖ **We know frequency and able to solve for the amplitude and phase.**
- ❖ **DC is direct current.**
- ❖ **DC quantities are always constant in time.**
- ❖ **DC cannot be directly transformed to lower or higher voltage levels.**

❖ مقادیر لحظه‌ای ولتاژ و جریان

$$v = 141.4 \cos(\omega t + 30^\circ)$$

$$i = 7.07 \cos \omega t$$



❖ $V_{\max} = 141.4$

❖ $I_{\max} = 7.07$

❖ دامنه یا مقدار موثر یا rms ولتاژ و جریان root-mean-square

$$|V| = 100 \text{ V} \quad \text{and} \quad |I| = 5 \text{ A}$$

$$V_{\text{rms}} = \frac{141.4}{\sqrt{2}} \approx 100$$

$$I_{\text{rms}} = \frac{7.07}{\sqrt{2}}$$

❖ مقادیر فازوری جریان و ولتاژ

شانه / رادین $\omega = 2\pi f$ فرکانس زاویه‌ای

فازور جریان $I = 5 \varepsilon^{j0^\circ} = 5 \angle 0^\circ = 5 + j0 \text{ A}$

ولتاژ $V = 100 \varepsilon^{j30^\circ} = 100 \angle 30^\circ = 86.6 + j50 \text{ V}$

$$V = 220\sqrt{2} \sin(\omega t + 60^\circ)$$

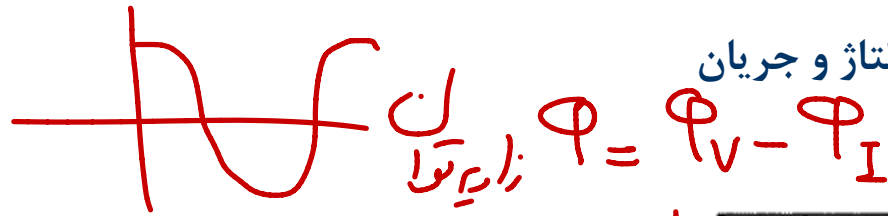
$$V_{\text{rms}} = 220 \angle -30^\circ$$

$$V = 220\sqrt{2} \cos(\omega t - 90 + 60) = 220\sqrt{2} \cos(\omega t - 30) \Rightarrow$$

قدرت در مدارهای سینوسی یک فاز

$$v(t) = V_{max} \cos \omega t$$

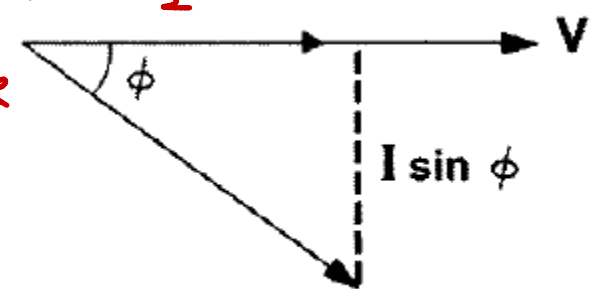
$$i(t) = I_{max} \cos(\omega t - \phi)$$



❖ مقادیر لحظه‌ای ولتاژ و جریان

زاویه توان $\phi = \phi_V - \phi_I$

Power angle



توان لحظه‌ای $p(t) = v(t)i(t) = V_m I_m [\cos(\omega t) \cos(\omega t - \phi)]$

$$p(t) = \frac{V_m I_m}{2} [\cos \phi + \cos(2\omega t - \phi)]$$

$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)]$$

توان متوسط $p_{av} = \frac{V_m I_m}{2} \cos \phi$

$$V_m = \sqrt{2}(V_{rms}), \text{ and } I_m = \sqrt{2}(I_{rms})$$

$$p_{av} = V_{rms} I_{rms} \cos \phi$$

ω, kW, MW

Active power is P , and the reactive power, designated Q ,

$$P = VI \cos \phi$$

توان راکتیو $Q = VI \sin \phi$

Var - kVar - MVar

Basic Power Engineering Formulas

❖ Ohm's Law

- $E = I \cdot R$

$$S = V e^{j\theta_v} \cdot I e^{-j\theta_i}$$

❖ Active Power

- $P = |V||I|\cos\theta$

❖ Reactive Power

- $Q = |V||I|\sin\theta$

❖ Power Factor

- $p.f. = \cos\theta$

- $\theta = \theta_v - \theta_i$

❖ Complex Power

توان مختلط

- $S = VI^* = P + jQ$
 $= |V||I| e^{j(\theta_v - \theta_i)} = |V||I|\cos\theta + j|V||I|\sin\theta$

❖ Impedance

$$= P + jQ$$

- $Z = R + j(X_C + X_L)$

❖ Reactive Power

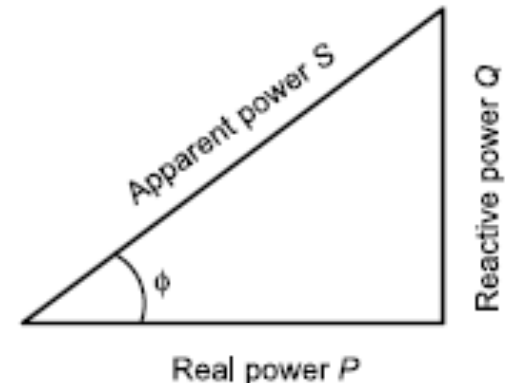
کاپیسانس یا ظرفیت خازنی (F) و اندوکتانس (H)

- $X_C = 1/(2\pi fC)$

ملفی و

- $X_L = 2\pi fL \rightarrow$

ضریب قدرت



$$S = V \cdot I^* = VI \angle \theta = P + jQ \quad \text{VA - kVA - MVA}$$

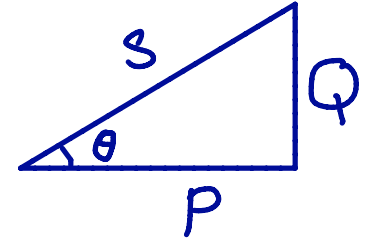
$$Z = \frac{V}{I} = \frac{|V| \angle \theta_v}{|I| \angle \theta_i} = |Z| \angle \theta_v - \theta_i = \theta$$

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad \theta = \tan^{-1} \frac{Q}{P}$$

$$P = |S| \cos \theta$$

$$Q = |S| \sin \theta$$

توان ظاهری: $S = |V| \cdot |I|$



$$Z = R + jX = |Z| \angle \theta$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X}{R}$$

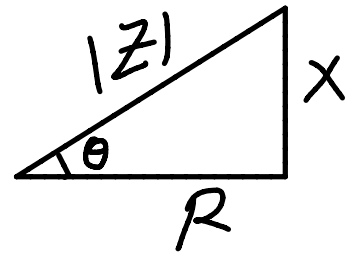
$$R = |Z| \cos \theta$$

\Rightarrow

$$\cos \theta = \frac{P}{|S|} = \frac{R}{|Z|}$$

$$X = |Z| \sin \theta$$

$$\sin \theta = \frac{Q}{|S|} = \frac{X}{|Z|}$$



Basic Power Engineering Formulas

برای خازن توان راکتیو تولید میکنند (Q<0)

❖ For capacitive load,

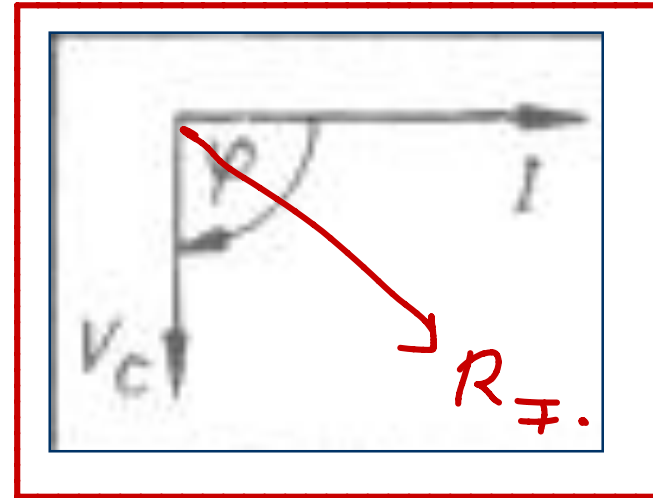
$P = 0$ ← برای خازن خالص $P = -Q$

- Current is leading the voltage

- $\theta = \theta_v - \theta_i < 0$

$Q = VI \sin \phi < 0$
توان راکتیو تولید میکنند

- Q is negative



خازن
خالص

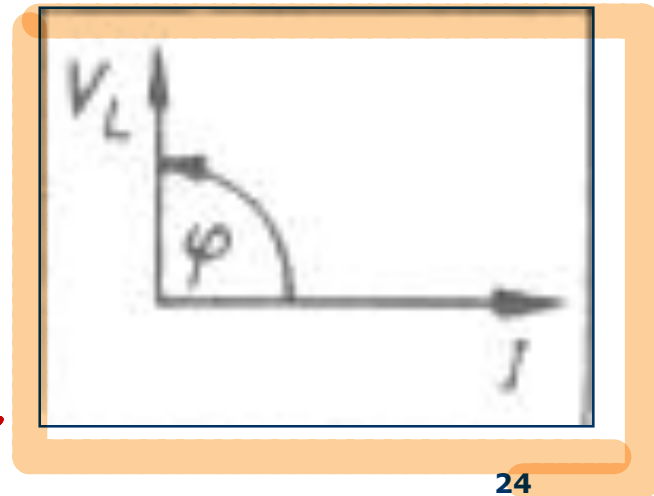
$R = 0$

❖ For inductive load,

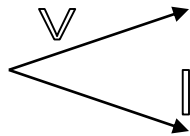
- Current is lagging the voltage

- $\theta = \theta_v - \theta_i > 0$

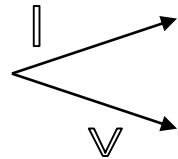
- Q is positive
- بار منفی توان راکتیو مصرف میکنند
 $Q > 0$



❖ پس فاز و پیش فاز :



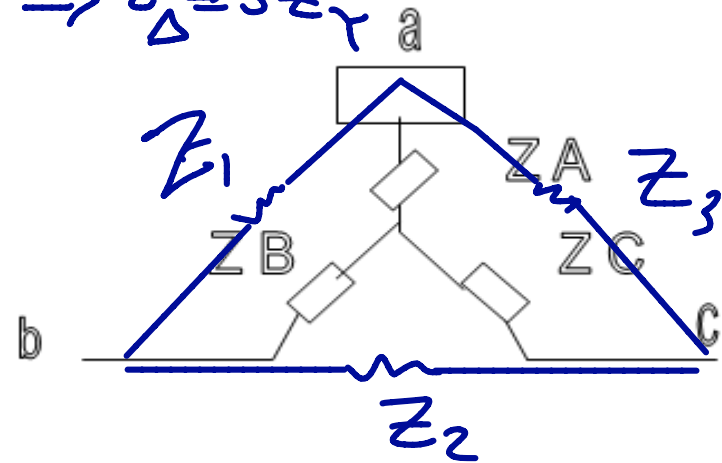
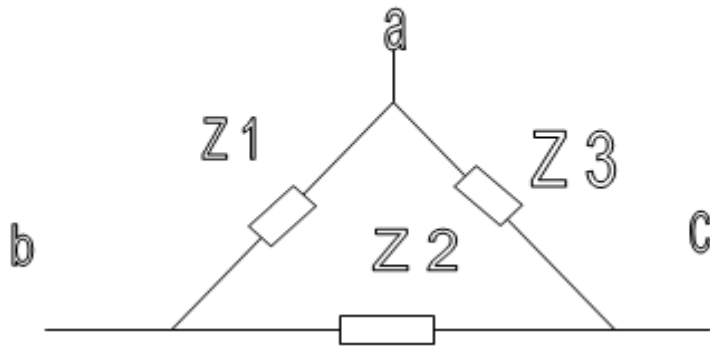
❖ بار سلفی توان موهومی مصرف می کند جریان از ولتاژ عقب تر است



❖ بار فازنی توان موهومی تولید می کند جریان از ولتاژ جلوتر است

تبدیل ستاره به مثلث

$$Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z \Rightarrow Z_{\Delta} = 3Z_Y$$

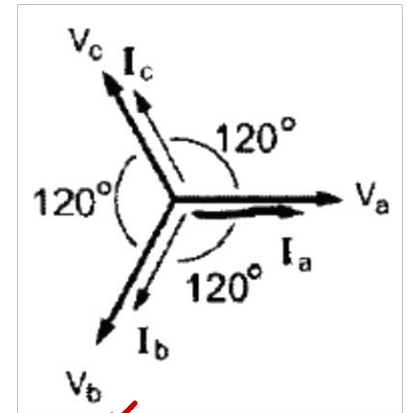
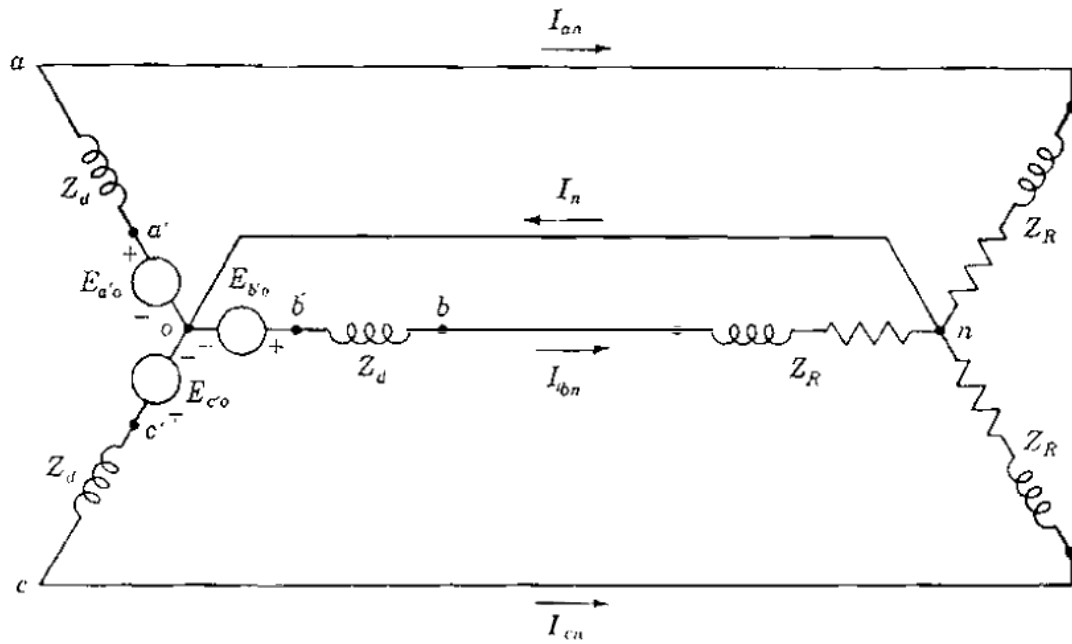


$$\begin{cases} Z_A = \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \\ Z_B = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \\ Z_C = \frac{Z_2 Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{Z_A Z_B + Z_A Z_C + Z_B Z_C}{Z_C} \\ Z_2 = \frac{Z_A Z_B + Z_A Z_C + Z_B Z_C}{Z_A} \\ Z_3 = \frac{Z_A Z_B + Z_A Z_C + Z_B Z_C}{Z_B} \end{cases}$$

مدارهای سه فاز با اتصال بار به صورت ستاره

$$E_{a'o} = 100 \angle 0^\circ \text{ V} \quad E_{b'o} = 100 \angle 240^\circ \text{ V} \quad E_{c'o} = 100 \angle 120^\circ \text{ V}$$



توالی مثبت یا استاندارد abc

ولتاژ عصبی فازها

$$V_{ao} = E_{a'o} - I_{an} Z_d$$

$$V_{bo} = E_{b'o} - I_{bn} Z_d$$

$$V_{co} = E_{c'o} - I_{cn} Z_d$$

$$I_{an} = \frac{E_{a'o}}{Z_d + Z_R} = \frac{V_{an}}{Z_R}$$

$$I_{bn} = \frac{E_{b'o}}{Z_d + Z_R} = \frac{V_{bn}}{Z_R}$$

$$I_{cn} = \frac{E_{c'o}}{Z_d + Z_R} = \frac{V_{cn}}{Z_R}$$

$$V_a = V_a \angle 0$$

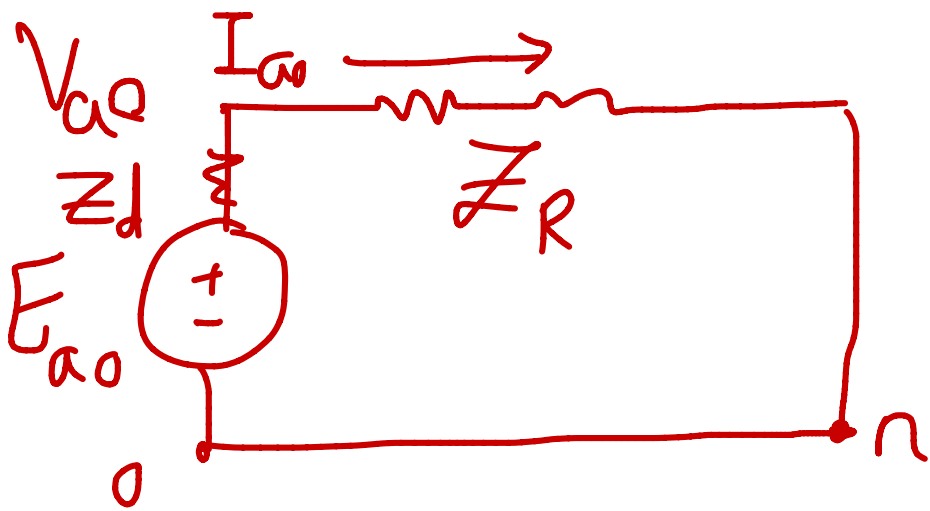
$$V_b = V_a \angle -120$$

$$V_c = V_a \angle 120$$

سیستم فاز متوازن:

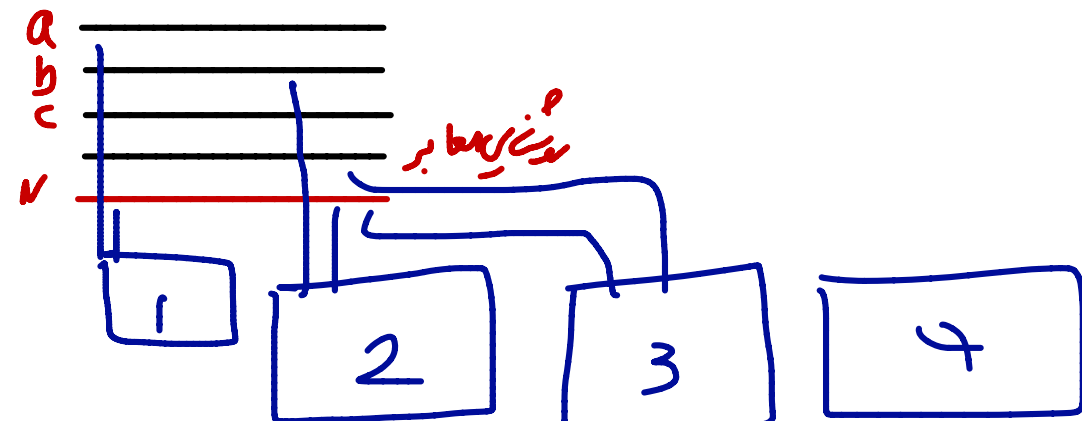
۱- اندازه ها با هم برابر

۲- اختلاف بین فازها 120°

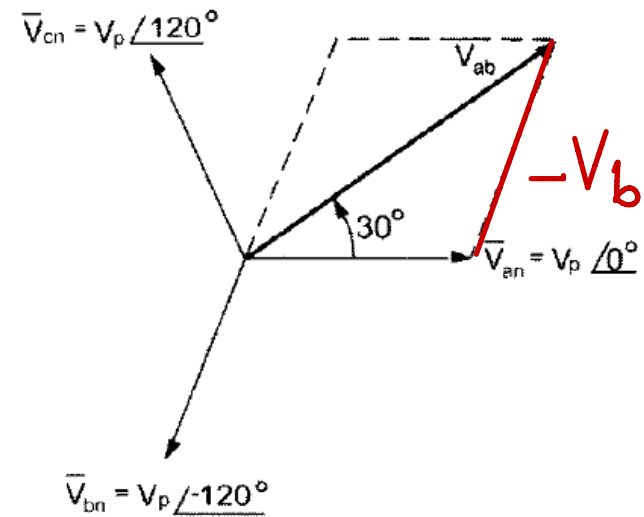


$$I_{a0} = \frac{E_{a0}}{Z_d + Z_R}$$

اگر اتصال بارشمت باشد ابتدا به ترتیب تبدیل کرد و پس مقادیر ولتاژ و جریان را برآورد
 کنیم ناز می آید که برای فازهای دیگر اندازه ها یک نسبت زاویه 120° با هم افتد
 فاز خواهد بود راست. فقط این روش در تیم های متعادل قابل انجام است.



$$|V_{an}| = |V_{bn}| = |V_{cn}| = V_p$$



$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = |V_p|(1 \angle 0^\circ - 1 \angle -120^\circ) = \sqrt{3}|V_p| \angle 30^\circ$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = |V_p|(1 \angle -120^\circ - 1 \angle -240^\circ) = \sqrt{3}|V_p| \angle -90^\circ$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an} = |V_p|(1 \angle -240^\circ - 1 \angle 0^\circ) = \sqrt{3}|V_p| \angle 150^\circ$$

$$V_L = \sqrt{3}V_p$$

$$I_L = I_p$$

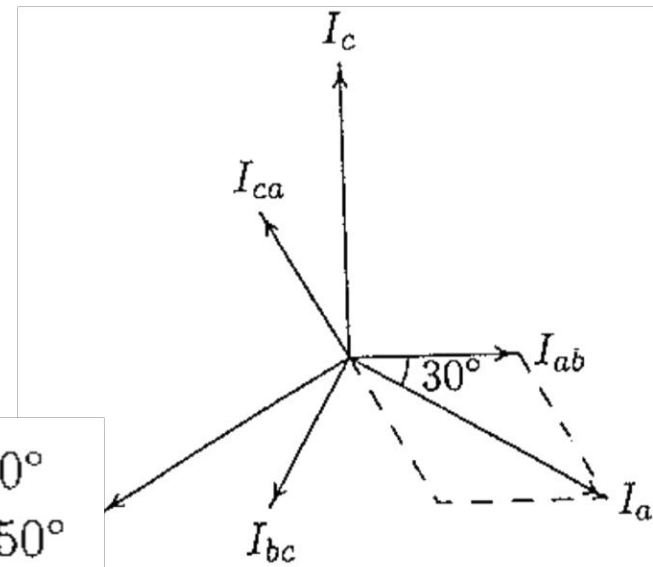
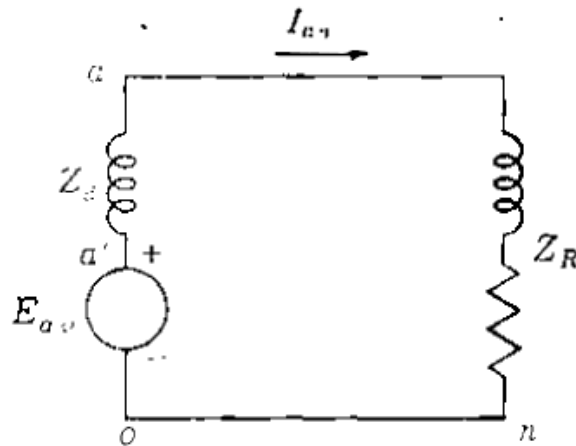
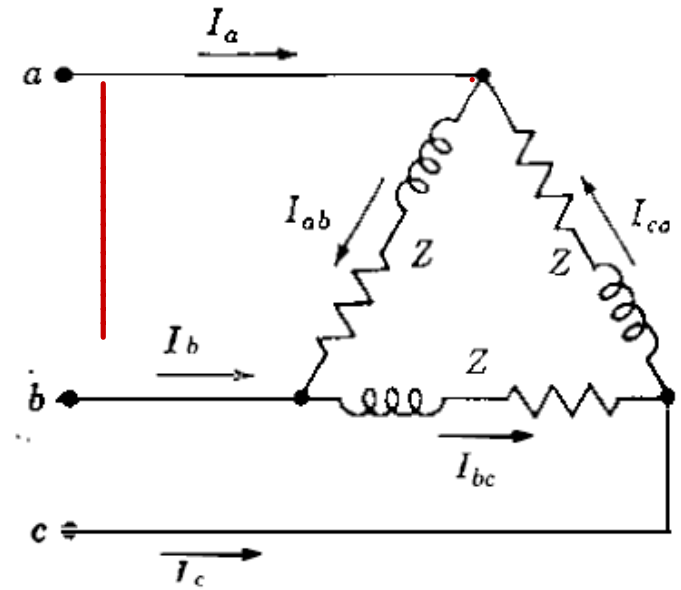
مدارهای سه فاز با اتصال بار به صورت مثلث

$$|V_L| = |V_P|$$

$$I_{ab} = |I_p| \angle 0^\circ$$

$$I_{bc} = |I_p| \angle -120^\circ$$

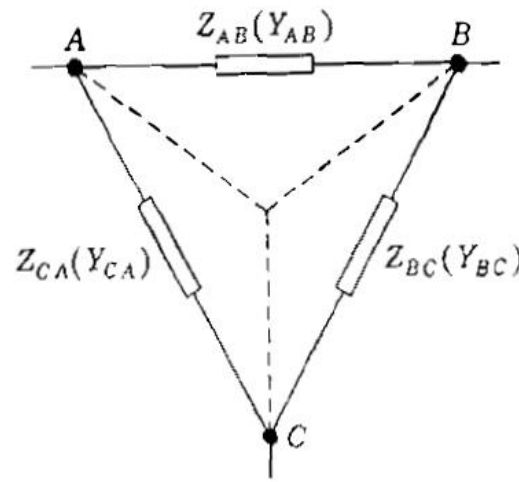
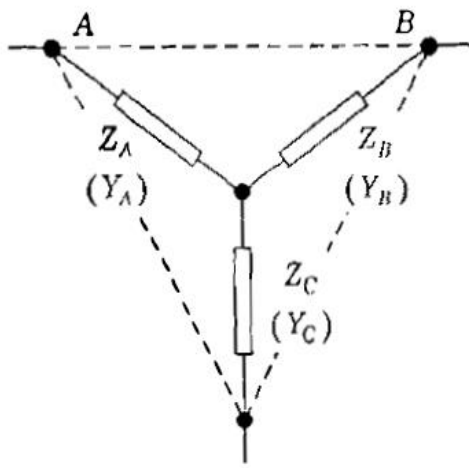
$$I_{ca} = |I_p| \angle -240^\circ$$



$$I_a = I_{ab} - I_{ca} = |I_p|(1 \angle 0^\circ - 1 \angle -240^\circ) = \sqrt{3}|I_p| \angle -30^\circ$$

$$I_b = I_{bc} - I_{ab} = |I_p|(1 \angle -120^\circ - 1 \angle 0^\circ) = \sqrt{3}|I_p| \angle -150^\circ$$

$$I_c = I_{ca} - I_{bc} = |I_p|(1 \angle -240^\circ - 1 \angle -120^\circ) = \sqrt{3}|I_p| \angle 90^\circ$$



$$Z_Y = \frac{\text{product of adjacent } Z_{\Delta}'\text{'s}}{\text{sum of } Z_{\Delta}'\text{'s}}$$

$\Delta \rightarrow Y$

$$Z_A = \frac{Z_{AB}Z_{CA}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}}$$

$$Z_B = \frac{Z_{BC}Z_{AB}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}}$$

$$Z_C = \frac{Z_{CA}Z_{BC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}}$$

$Y \rightarrow \Delta$

$$Z_{AB} = \frac{Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_C Z_A}{Z_C}$$

$$Z_{BC} = \frac{Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_C Z_A}{Z_A}$$

$$Z_{CA} = \frac{Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_C Z_A}{Z_B}$$

$$Z_{\Delta} = \frac{\text{sum of pairwise products of } Z_Y'\text{'s}}{\text{the opposite } Z_Y}$$

$\Delta \rightarrow Y$

$$Y_A = \frac{Y_{AB}Y_{CA} + Y_{BC}Y_{AB} + Y_{CA}Y_{BC}}{Y_{BC}}$$

$$Y_B = \frac{Y_{AB}Y_{CA} + Y_{BC}Y_{AB} + Y_{CA}Y_{BC}}{Y_{CA}}$$

$$Y_C = \frac{Y_{AB}Y_{CA} + Y_{BC}Y_{AB} + Y_{CA}Y_{BC}}{Y_{AB}}$$

$Y \rightarrow \Delta$

$$Y_{AB} = \frac{Y_A Y_B}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

$$Y_{BC} = \frac{Y_B Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

$$Y_{CA} = \frac{Y_C Y_A}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

قدرت در مدارهای سه فاز

❖ اتصال بار از نوع ستاره باشد

$$|V_p| = |V_{an}| = |V_{bn}| = |V_{cn}|$$

$$|I_p| = |I_{an}| = |I_{bn}| = |I_{cn}|$$

$$P = 3 |V_p| |I_p| \cos \theta_p$$

$$|V_p| = \frac{|V_L|}{\sqrt{3}} \quad \text{and} \quad |I_p| = |I_L|$$

$$P = \sqrt{3} |V_L| |I_L| \cos \theta_p$$

$$Q = 3 |V_p| |I_p| \sin \theta_p$$

$$Q = \sqrt{3} |V_L| |I_L| \sin \theta_p$$

Example 1

A Y-connected, balanced three-phase load consisting of three impedances of $20\angle 30^\circ$ ohms each as shown in Figure 2.10 is supplied with the balanced line to-

$$1) V_{an} = 220\angle 0^\circ \text{ V}$$

$$V_{bn} = 220\angle 240^\circ \text{ V}$$

$$V_{cn} = 220\angle 120^\circ \text{ V}$$

- Calculate the phase currents in each line.
- Calculate the line-to-line phasor voltages.
- Calculate the total active and reactive power supplied to the load.

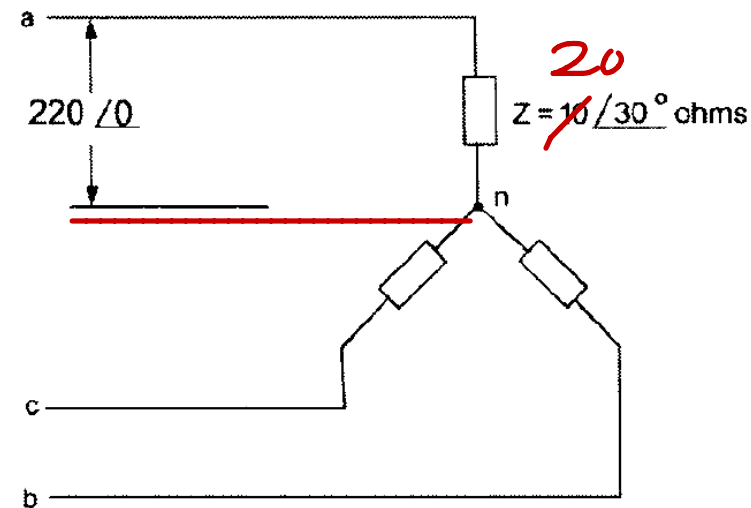


Figure 2.10 Load Connection for Example 2.2.

Solution

A. The phase currents are obtained as

$$I_{an} = \frac{220}{20\angle 30} = 11\angle -30^\circ \text{ A}$$

$$I_{bn} = \frac{220\angle 240}{20\angle 30} = 11\angle 210^\circ \text{ A}$$

$$I_{cn} = \frac{220\angle 120}{20\angle 30} = 11\angle 90^\circ \text{ A}$$

B. The line-to-line voltages are obtained as

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{an} - V_{bn} \\ &= 220\angle 0 - 220\angle 240^\circ \\ &= 220\sqrt{3}\angle 30^\circ \end{aligned}$$

$$V_{bc} = 220\sqrt{3}\angle 30 - 120 = 220\sqrt{3}\angle -90^\circ$$

$$V_{ca} = 220\sqrt{3}\angle -210^\circ$$

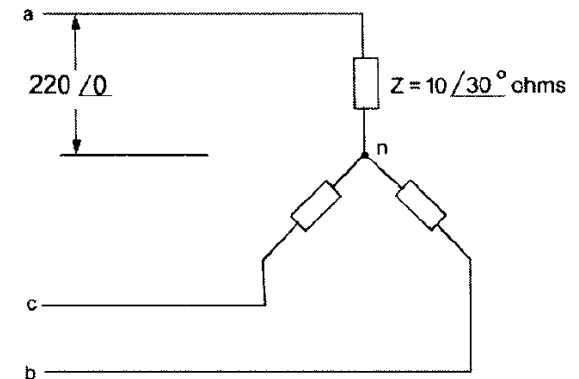


Figure 2.10 Load Connection for Example 2.2.

C. The apparent power into phase a is given by

$$\begin{aligned} S_a &= V_{an} I_{an}^* \\ &= (220)(11)\angle 30^\circ \\ &= 2420\angle 30^\circ \text{ VA} \end{aligned}$$

The total apparent power is three times the phase value:

$$\begin{aligned} S_T &= 2420 \times 3\angle 30^\circ = 7260.00\angle 30^\circ \text{ VA} \\ &= 6287.35 + j3630.00 \end{aligned}$$

Thus

$$\begin{aligned} P_T &= 6287.35 \text{ W} \\ Q_T &= 3630.00 \text{ var} \end{aligned}$$

Example 2

Repeat Example 1 as if the same three impedances were connected in a Δ connection.

Solution

From Example 2.2 we have

$$V_{ab} = 220\sqrt{3}\angle 30^\circ$$

$$V_{bc} = 220\sqrt{3}\angle -90^\circ$$

$$V_{ca} = 220\sqrt{3}\angle -210^\circ$$

$$I_a = I_{ab} - I_{ca}$$

$$= 11\sqrt{3}\angle 0 - 11\sqrt{3}\angle -120^\circ$$

$$= 33\angle 30^\circ$$

The currents in each of the impedances are

$$I_{ab} = \frac{220\sqrt{3}\angle 30^\circ}{20\angle 30} = 11\sqrt{3}\angle 0^\circ$$

$$I_{bc} = 11\sqrt{3}\angle -120^\circ$$

$$I_{ca} = 11\sqrt{3}\angle 120^\circ$$

$$I_b = I_{bc} - I_{ab}$$

$$= 33\angle -90^\circ$$

$$I_c = I_{ca} - I_{bc}$$

$$= 33\angle -210^\circ$$

The apparent power in the impedance between a and b is

$$\begin{aligned} S_{ab} &= V_{ab} I_{ab}^* \\ &= (220\sqrt{3}\angle 30^\circ)(22\sqrt{3}\angle 0) \\ &= 7260\angle 30^\circ \end{aligned}$$

The total three-phase power is then

$$\begin{aligned} S_T &= 21780\angle 30^\circ \\ &= 18,862.02 + j10890.00 \end{aligned}$$

As a result,

$$\begin{aligned} P_T &= \cancel{37724.04} \text{ W} \\ Q_T &= \cancel{21780.00} \text{ var} \end{aligned}$$

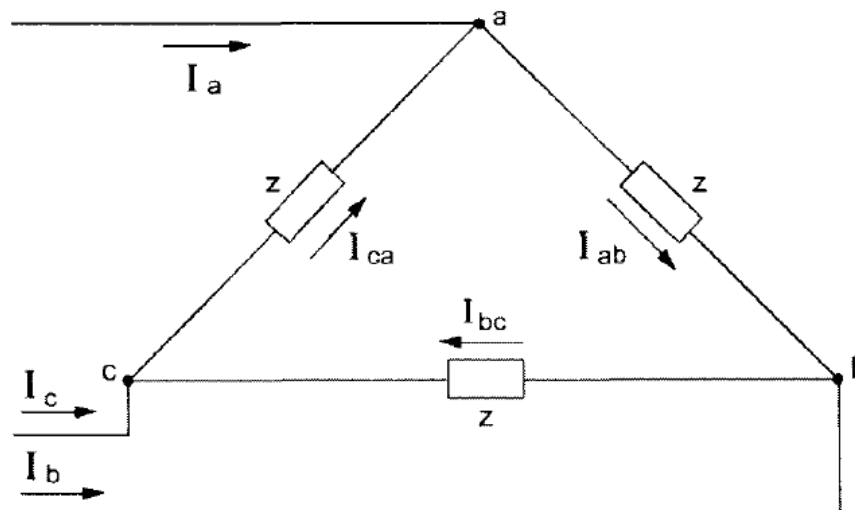


Figure 2.11 Load Connection for Example 2.3.

Example

single-phase load is supplied with a sinusoidal voltage

$$v(t) = 200 \cos(377t)$$

The resulting instantaneous power is

$$p(t) = 800 + 1000 \cos(754 t - 36.87^\circ)$$

- (a) Find the complex power supplied to the load.
- (b) Find the instantaneous current $i(t)$ and the rms value of the current supplied to the load.
- (c) Find the load impedance.

$$\begin{aligned}
p(t) &= 800 + 1000 \cos(754t - 36.87^\circ) \\
&= 800 + 1000 (\cos 36.87^\circ \cos 754t + \sin 36.87^\circ \sin 754t) \\
&= 800 + 800 \cos 754t + 600 \sin 754t \\
&= 800 [1 + \cos 2(377)t] + 600 \sin 2(377)t
\end{aligned}$$

$$S = 800 + j600 = 1000 \angle 36.87^\circ \text{ VA}$$

(b) Using $S = \frac{1}{2} V_m I_m^*$, we have

$$1000 \angle 36.87^\circ = \frac{1}{2} 200 \angle 0^\circ I_m^*$$

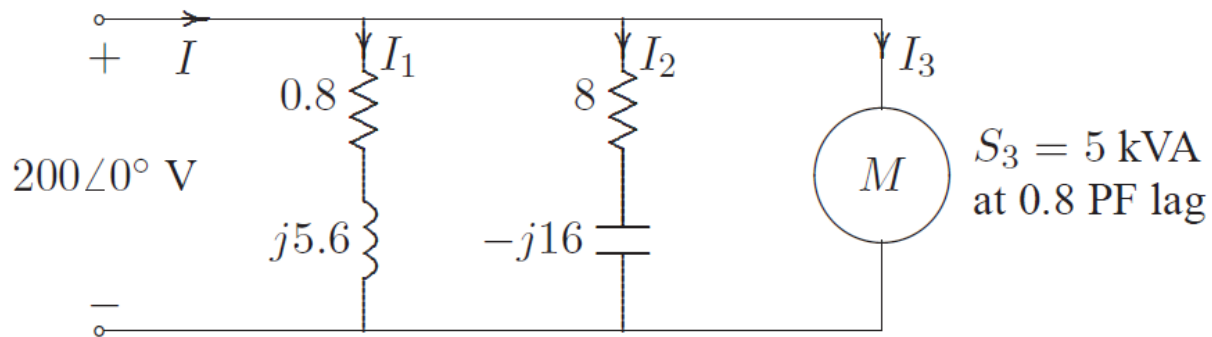
$$I_m = 10 \angle -36.87^\circ \text{ A}$$

$$i(t) = 10 \cos(377t - 36.87^\circ) \text{ A}$$

$$Z_L = \frac{V}{I} = \frac{200 \angle 0^\circ}{10 \angle -36.87^\circ} = 20 \angle 36.87^\circ \Omega$$

Example

Two impedances, $Z_1 = 0.8 + j5.6 \Omega$ and $Z_2 = 8 - j16 \Omega$, and a single phase motor are connected in parallel across a 200-V rms, 60-Hz supply as shown in Figure 8. The motor draws 5 kVA at 0.8 power factor lagging.



- Find the complex powers S_1 , S_2 for the two impedances, and S_3 for the motor.
- Determine the total power taken from the supply, the supply current, and the overall power factor.
- A capacitor is connected in parallel with the loads. Find the kvar and the capacitance in μF to improve the overall power factor to unity. What is the new line current?

solution

(a) The load complex power are

$$S_1 = \frac{|V|^2}{Z_1^*} = \frac{(200)^2}{0.8 - j5.6} = 1000 + j7000 \text{ VA}$$

$$S_2 = \frac{|V|^2}{Z_2^*} = \frac{(200)^2}{8 + j16} = 1000 - j2000 \text{ VA}$$

$$S_3 = 5000 \angle 36.87^\circ = 4000 + j3000 \text{ VA}$$

Therefore, the total complex power is

$$S_t = 6 + j8 = 10 \angle 53.13^\circ \text{ kVA}$$

(b) From $S = V I^*$, the current is

$$I = \frac{10000 \angle -53.13^\circ}{200 \angle 0^\circ} = 50 \angle -53.13 \text{ A}$$

and the power factor is $\cos 53.13 = 0.6$ lagging.

(c) For overall unity power factor, $Q_C = 8000 \text{ Var}$, and the capacitive impedance is

$$Z_C = \frac{|V|^2}{S_C^*} = \frac{(200)^2}{j8000} = -j5 \ \Omega$$

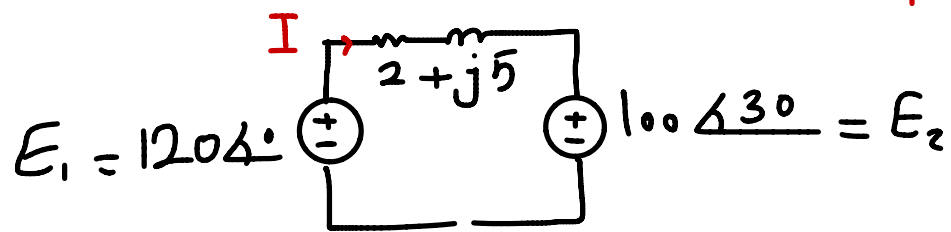
and the capacitance is

$$C = \frac{10^6}{(2\pi)(60)(5)} = 530.5 \ \mu\text{F}$$

The new current is

$$I = \frac{6000 \angle 0^\circ}{200 \angle 0^\circ} = 30 \angle 0 \ \text{A}$$

$$I = \frac{E_1 - E_2}{Z} = \frac{120 \angle 30^\circ - 100 \angle 30^\circ}{2 + j5}$$



تمرین 1:

$$I = -11.65 \angle 55.5^\circ$$

$$S_1 = E_1 \cdot I^* = -120 \times 11.65 \angle -55.5^\circ = -1398 \angle -55^\circ$$

$$S_1 = \underbrace{-801.85}_{P_1} + j \underbrace{1145.17}_{Q_1}$$

اگر جریان از هر سمتی منبع خارج شود +
در غیر این صورت منفی -

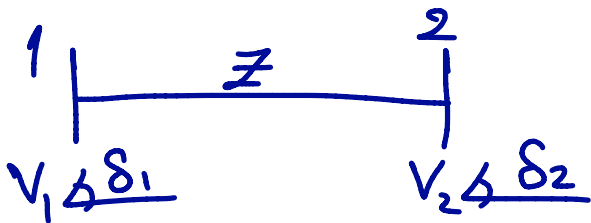
$P_1 < 0$ ← موتور /
 $Q_1 > 0$ ← توان القیه تولید می کند

$$S_2 = -E_2 \cdot I^* = +100 \angle 30^\circ \times 11.65 \angle -55.5^\circ = 1165 \angle -25.5^\circ = \underbrace{1055.84}_{P_2} - j \underbrace{501.54}_{Q_2}$$

$$S_Z = Z \cdot |I|^2 = R|I|^2 + jX|I|^2$$

$P_2 > 0$ ← توان القیه
 $Q_2 < 0$ ← توان القیه موزون می کند

$$S_Z = 2 \times 11.65^2 + j5 \times 11.65^2 = 271.445 + j678.61$$



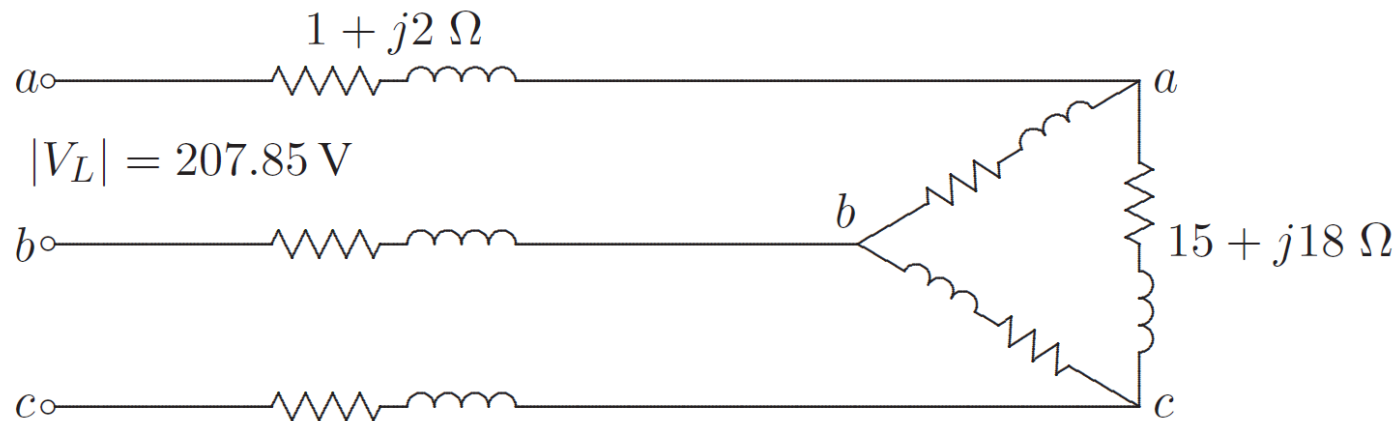
نکته ۳: جهت توان القیه از زاویه بیشتر بزرگتر است و جهت توان القیه از اندازه ولتاژ بیشتر به سمت اندازه ولتاژ بزرگتر است.

$$\text{if } \delta_1 < \delta_2 \Rightarrow P_2 \rightarrow 1$$

$$\text{if } |V_1| > |V_2| \Rightarrow Q_1 \rightarrow 2$$

Example

A balanced delta connected load of $15 + j18 \Omega$ per phase is connected at the end of a three-phase line as shown in Figure 12. The line impedance is $1 + j2 \Omega$ per phase. The line is supplied from a three-phase source with a line-to-line voltage of 207.85 V rms . Taking V_{an} as reference, determine the following:



- Current in phase a.
- Total complex power supplied from the source.
- Magnitude of the line-to-line voltage at the load terminal

solution

$$V_{an} = \frac{207.85}{\sqrt{3}} = 120 \text{ V}$$

Transforming the delta connected load to an equivalent Y-connected load, result in the phase 'a' equivalent circuit, shown in Figure 13.

$$I_a = \frac{120 \angle 0^\circ}{6 + j8} = 12 \angle -53.13^\circ \text{ A}$$

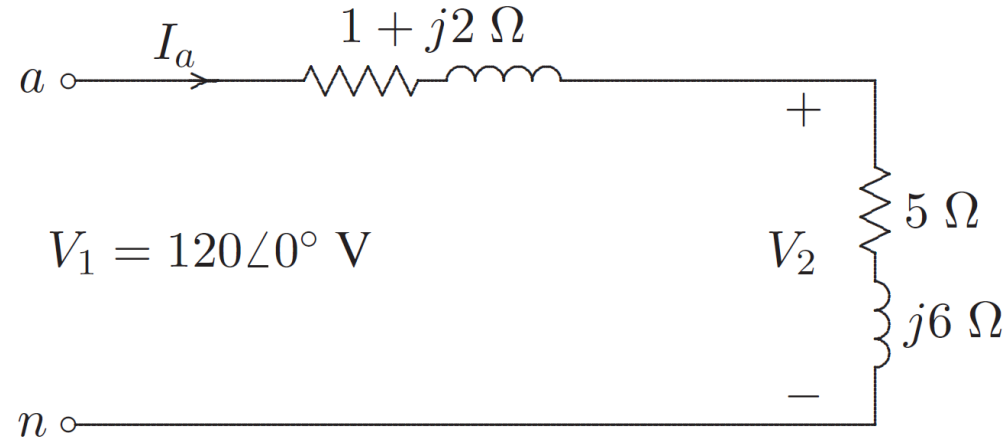


FIGURE 13

$$\begin{aligned} S &= 3V_{an}I_a^* = (3)(120 \angle 0^\circ)(12 \angle 53.13^\circ) = 4320 \angle 53.13^\circ \text{ VA} \\ &= 2592 \text{ W} + j3456 \text{ Var} \end{aligned}$$

Thus, the magnitude of the line-to-line voltage at the load terminal is

$$\begin{aligned} V_2 &= V_1 - (1 + j2)I_a \\ V_2 &= (5 + j6)I_a \end{aligned}$$
$$V_L = \sqrt{3} (93.72) = 162.3 \text{ v}$$

فصل سوم

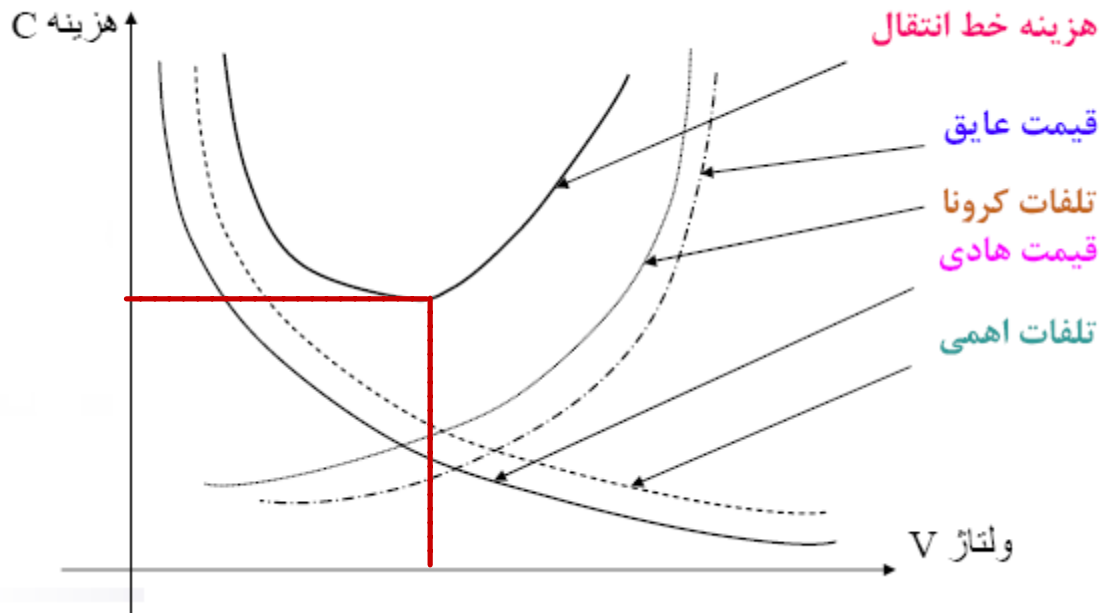
پارامترهای خطوط انتقال



دلایل افزایش ولتاژ

با زیاد شدن ولتاژ و کاهش جریان:

- ۱- سطح مقطع هادی یا تعداد خطوط لازم برای انتقال انرژی کم می شود.
- ۲- تلفات اهمی کاهش می یابد.
- ۳- سطح عایقی خطوط انتقال افزایش یافته و زنجیره مقرر بزرگتر نیاز است.
- ۴- تلفات کرونا زیاد می شود.



معادله تجربی هزینه خط انتقال

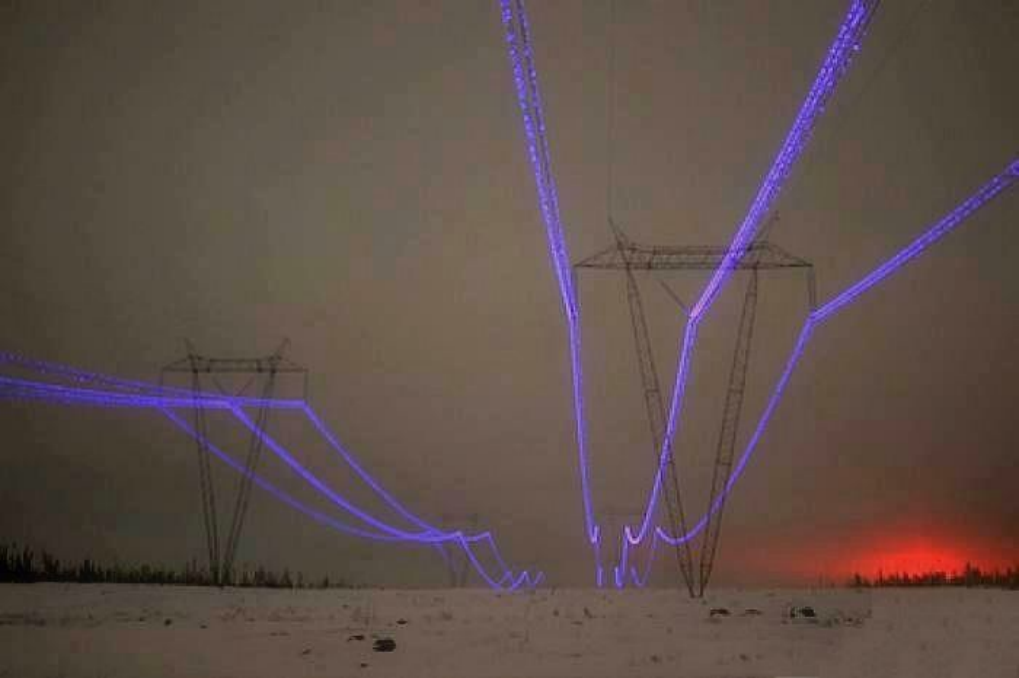
$$C = k + mv + nsL$$

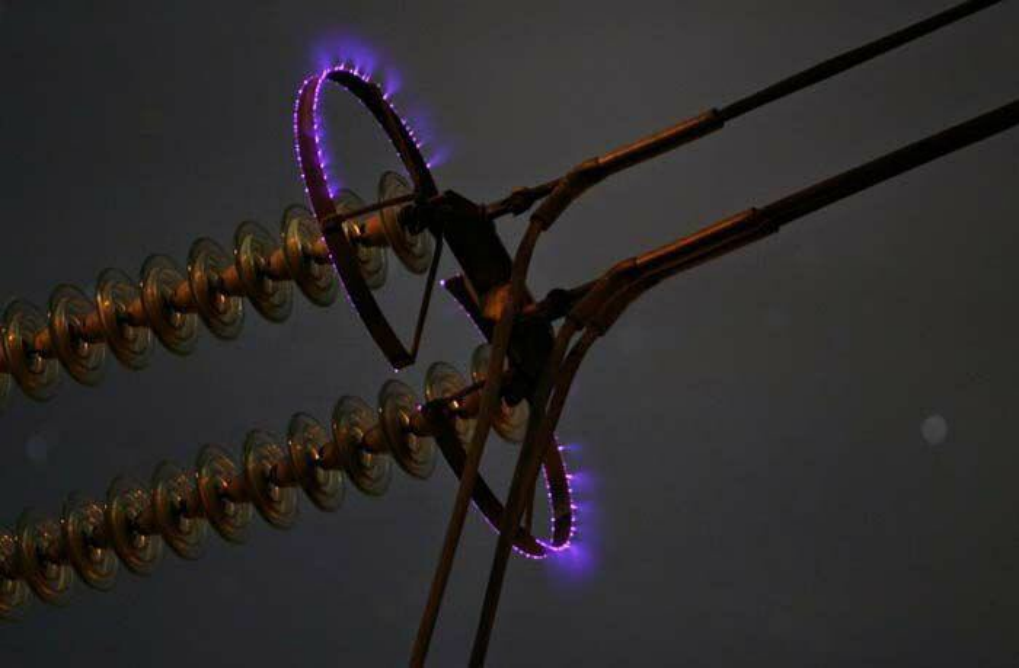
n, m, k متناسب با توان انتقالی هر خط تغییر می کند

L : طول هادی

S : سطح مقطع

V : ولتاژ نامی





انواع هادی‌های خطوط انتقال:

در سیم‌های قدرت بطور کلی جنس هادی Δ یا از مس می‌باشد یا از آلومینیوم

مزایای سیم‌های مس } ۱- استحکام مکانیکی بیشتر
نبت به سیم‌های آلومینیوم } ۲- قابلیت هدایت الکتریکی بیشتر

معایب آن } ۱- قیمت بیشتر
} ۲- وزن سنگین‌تر

نمای این هادی‌ها در خطوط توزیع استاندارد و لوله در خطوط انتقال از هادی‌های آلومینیومی استفاده می‌شود.

All Aluminium Conductor

۱- هادی تمام آلومینیوم AAC

Al با خلوص ۹۹.۵٪

انواع هادی‌های خطوط انتقال

۲- آلومینیوم-آلیاژ آلومینیوم-آلیاژ AAAC Alloy

Al با خلوص ۹۸.۳٪ و بقیه آن منیزیم و سیلیسیم

۳- آلومینیوم با هسته فولادی Aluminium Conductor steel Reinforced
ACSR

۴- با هسته آلومینیوم ACAR

در خطوط انتقال فشار قوی از هادی‌های ACSR استفاده می‌شود.

نامگذاری این هادی‌ها بر اساس استاندارد آکریکایی به نام حیوانات است مثل Lynx - Dog - Fox

پارامترهای خطوط انتقال

- ۱- مقاومت Resistance R
- ۲- اندوختانس Inductance L
- ۳- نندوختانس Conductance G
- ۴- کاپاسیتانس Capacitance C
- پارامترهای سری خط
- پارامترهای موازی خط

Resistance

- ❖ Resistance causes power loss in the T.L.
- ❖ For uniform resistance ,

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

DC مقاربت ← R ← مقاربت كفرص
 L → طول (m)
 A → سطح مقطع mm^2

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad R_{AC} = \frac{\text{تلفات}}{\text{كهور جريان}} = \frac{P_{\text{Loss}}}{|I|^2}$$

Relation between resistance and temperature rise .

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T + t_2}{T + t_1}$$

$$T = 228 \text{ AL}$$

$$T = 234.4 \text{ CU}$$

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)] \quad \alpha = \frac{1}{T + t_1}$$

مقاومت در برابر t_2

مقاومت AC چند درصد از مقاومت DC بیشتر است:

۱- هادی های انتقال به صورت رشته‌ای و مارپیچ روی هم قرار دارند ← طول رشته ها از طول هادی بیشتر.

۲- اثر پوستی ← کاهش سطح مقطع موثر ← افزایش مقاومت هادی

تعریف اندرکانس: L ← ناشی از میدان مغناطیسی

linkage flux

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = N \frac{d\phi}{dt}$$

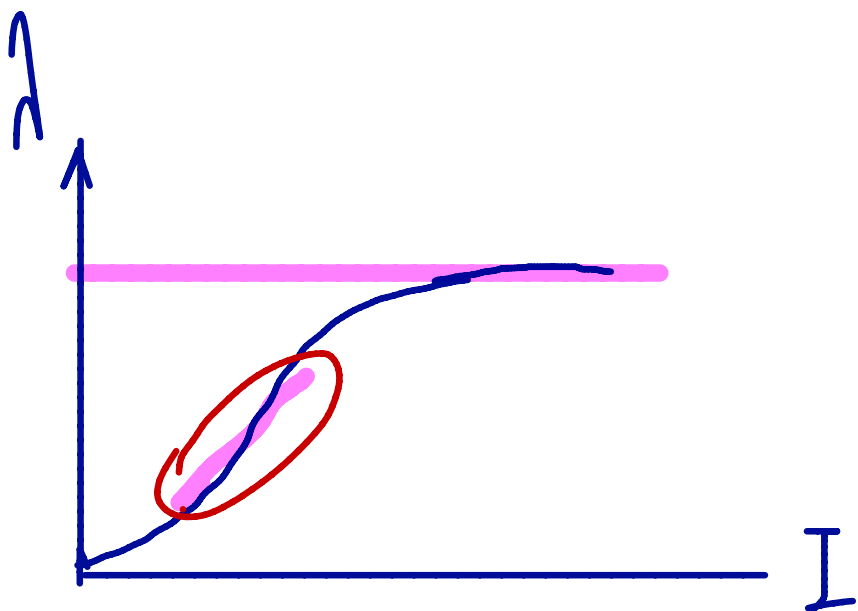
$$\text{(1)} \Rightarrow \frac{d\lambda}{dt} = L \frac{di}{dt} \Rightarrow L = \frac{d\lambda}{dI}$$

$$e = L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

$$V = j\omega L I \Rightarrow L = \frac{V}{j\omega I}$$

اگر جریان سینوسی باشد:

$$L = \frac{\lambda}{I} \leftarrow \lambda = L \cdot I$$



سطح مقطع فرض به شعاع $x \leftarrow \lambda_x \leftarrow L_{int}$ اندوکتانس داخلی هادی

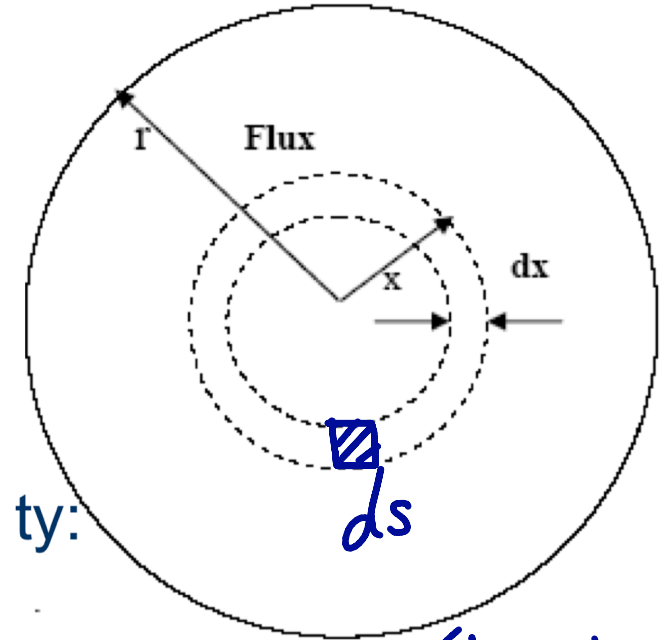
$$L_{int} = \frac{\lambda_{int}}{I}, \quad I_x = \frac{\pi x^2}{\pi r^2} I = \frac{x^2}{r^2} \cdot I$$

قانون آمپر $I_x = \oint H_x \cdot dx = H_x \cdot 2\pi x \cdot l \Rightarrow H_x = \frac{I_x}{2\pi x \cdot l}$

$l = 1m$

جغانت،

$$\Rightarrow H_x = \frac{xI}{2\pi r^2}, \quad B_x = \mu H_x = \frac{\mu_0 \mu_r x I}{2\pi r^2}$$



ty:

سطح مقطع یک هادی استوانه‌ای بلند حامل جریان I

سپردشت به اندازه‌ای دور رفته شده است که تا تیری بر میزان مغناطیسی هادی ندارد - خطوط تار همگن با هادی هستند.

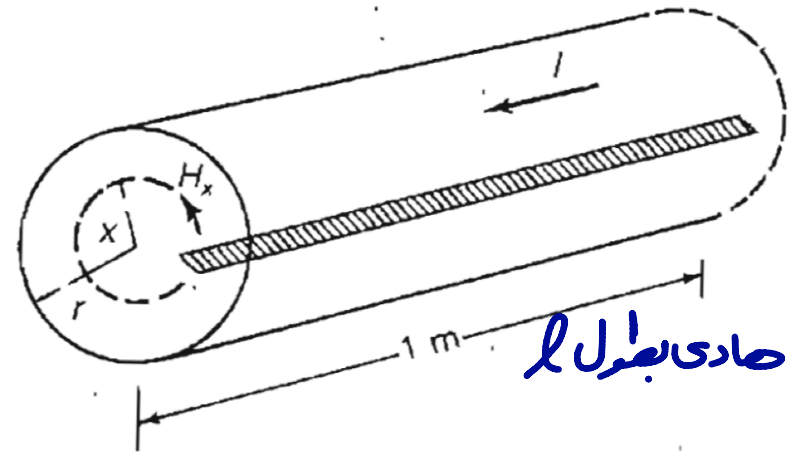
$$\mu_r = 1 \Rightarrow B_x = \frac{\mu_0 I x}{2\pi r^2}$$

$\Phi = B \cdot A \Rightarrow ds$ اگر برای سطح مقطع

$$d\Phi = B_x \cdot ds = B_x \cdot dx \cdot l = B_x dx$$

$$d\Phi = \frac{\mu_0 I x}{2\pi r^2} dx$$

$$d\lambda_x = \frac{\pi x^2}{\pi r^2} d\Phi = \frac{\mu_0 I x^3}{2\pi r^4} dx \Rightarrow \lambda_{int} = \int_{x=0}^{x=r} d\lambda$$



حادی بطول l

$$\lambda_{int} = \int_0^r \frac{\mu_0 I x^3}{2\pi r^4} dx = \frac{\mu_0 I}{8\pi} \Rightarrow L_{int} = \frac{\lambda_{int}}{I} = \frac{\mu_0}{8\pi} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} \frac{H}{m}$$

اندوکتانس داخلی

$$I_x = I \Rightarrow \oint H_x \cdot dx = I_x = I \Rightarrow H_x \cdot 2\pi x \cdot l = I$$

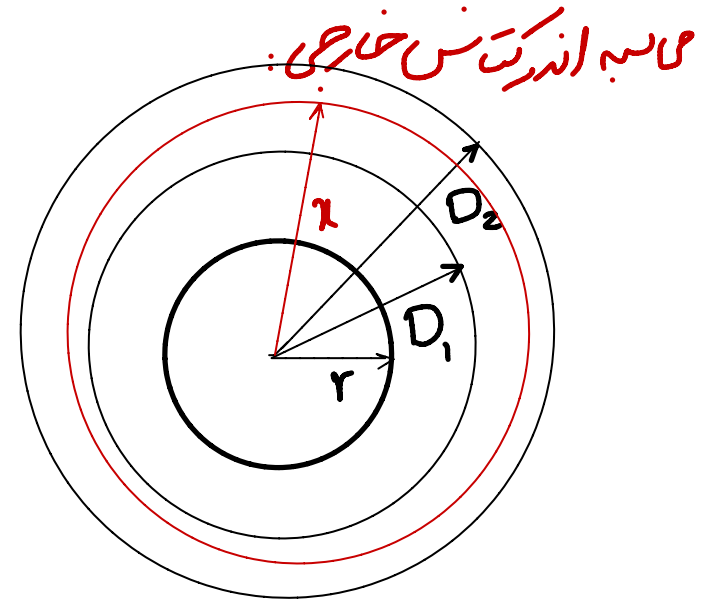
$$H_x = \frac{I}{2\pi x} \quad (l=1m) \quad B_x = \mu H_x = \mu_0 H_x$$

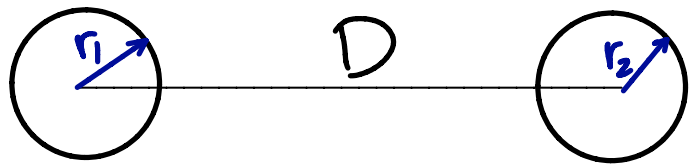
$$d\phi = B \cdot ds = \mu_0 H \cdot dx \cdot l = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} \cdot dx$$

$$d\lambda = d\phi = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} dx$$

$$\lambda_{ext} = \int_{x=D_1}^{D_2} d\lambda = \int_{D_1}^{D_2} \frac{\mu_0 I}{2\pi x} dx = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{D_2}{D_1} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{D_2}{D_1}$$

$$L_{ext} = \frac{\lambda_{ext}}{I} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_2}{D_1} \frac{H}{m} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_2}{D_1} \frac{H}{m}$$





هادی رفت
I

هادی برکت
-I

میان اندونش خط تک فاز لوسیه:

$$L_1 = L_{1int} + L_{1ext} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} + 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_1}$$

$$D_2 = D$$

$$D_1 = r_1$$

$$L_1 = 2 \times 10^{-7} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D}{r_1} \right) = 2 \times 10^{-7} \left[\ln e^{\frac{1}{4}} + \ln \frac{D}{r_1} \right] = 2 \times 10^{-7} \left[\ln \frac{D}{e^{-\frac{1}{4}} \cdot r_1} \right]$$

$r_1' \triangleq e^{-\frac{1}{4}} \cdot r_1 = 0.7788 \cdot r_1$ شعاع متوسط هادی

$$L_1 = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_1'} \frac{H}{m}$$

اندونش هادی رفت

$$L_2 = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_2'} \frac{H}{m}$$

$$L_t = L_1 + L_2 = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D^2}{r_1' r_2'} = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{\sqrt{r_1' r_2'}}$$

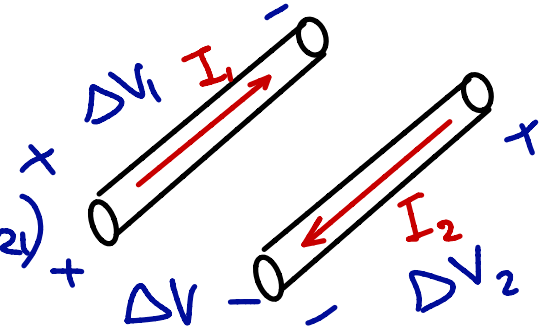
اندونش کل

$$r_1 = r_2 = r \Rightarrow L_1 = L_2 = L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'} \Rightarrow L_t = L_1 + L_2 = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'}$$

اندوکتانس خود القایی و القایی متقابل:

$$\Delta V_1 = j\omega(L_{11}I_1 + L_{12}I_2) \quad I_1 = I, I_2 = -I \quad \Delta V_1 = j\omega I(L_{11} - L_{12})$$

$$\Delta V_2 = j\omega(L_{21}I_1 + L_{22}I_2) \quad I_2 = I, I_1 = -I \quad \Delta V_2 = j\omega I(L_{22} - L_{21})$$



L_{11} : اندوکتانس خود القایی سیم 1

L_{22} : " " " سیم 2

$M = L_{12} = L_{21}$: اندوکتانس القایی متقابل

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 = j\omega I(L_{11} + L_{22} - 2M)$$

$$L_t = \frac{\Delta V}{j\omega I} = L_{11} + L_{22} - 2M$$

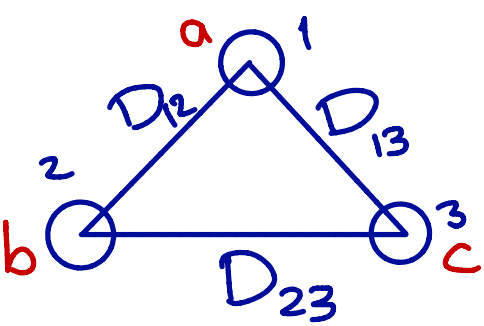
$$L_t = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{\sqrt{r_1' r_2'}} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{r_1'} + 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{r_2'} - 2 \times 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{D}$$

$$L_{11} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{r_1'} \quad \text{H/m}$$

$$L_{22} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{r_2'} \quad \text{H/m}$$

$$M = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{D} \quad \text{H/m}$$

اندوکنش خط انتقال سه فاز:



$$\lambda = L \cdot I$$

$$\lambda_a = L_{aa} I_a + L_{ab} I_b + L_{ac} I_c$$

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D_{12}} + I_c \ln \frac{1}{D_{13}} \right)$$

$$L_a = \frac{\lambda_a}{I_a}$$

$$\lambda_b = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_{12}} + I_b \ln \frac{1}{r'} + I_c \ln \frac{1}{D_{23}} \right)$$

$$\lambda_c = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_{13}} + I_b \ln \frac{1}{D_{23}} + I_c \ln \frac{1}{r'} \right)$$

$$I_a = I_a \angle 0^\circ$$

$$I_b = I_a \angle 240^\circ = a^2 I_a$$

$$I_c = I_a \angle 120^\circ = a I_a$$

$$a \triangleq \angle 120^\circ$$

$$L_a = \frac{\lambda_a}{I_a} = 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{1}{r'} + a^2 \ln \frac{1}{D_{12}} + a \ln \frac{1}{D_{13}} \right)$$

$$L_b = \frac{\lambda_b}{I_b} = 2 \times 10^{-7} \left(a \ln \frac{1}{D_{12}} + \ln \frac{1}{r'} + a^2 \ln \frac{1}{D_{23}} \right)$$

$$L_c = \frac{\lambda_c}{I_c} = 2 \times 10^{-7} \left(a^2 \ln \frac{1}{D_{13}} + a \ln \frac{1}{D_{23}} + \ln \frac{1}{r'} \right)$$

$$D_{12} = D_{13} = D_{23} = D$$

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

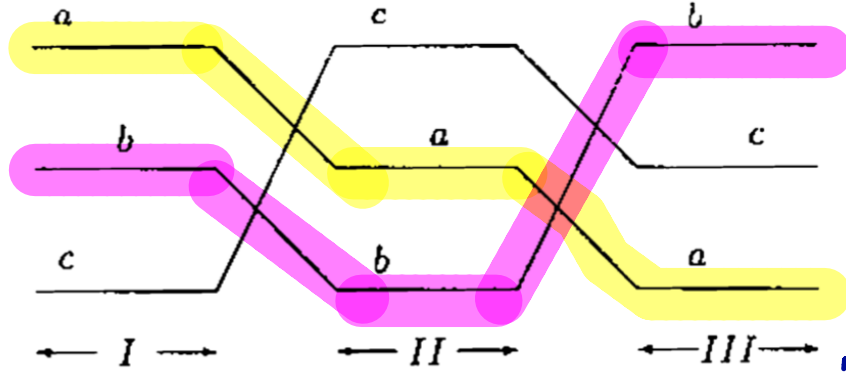
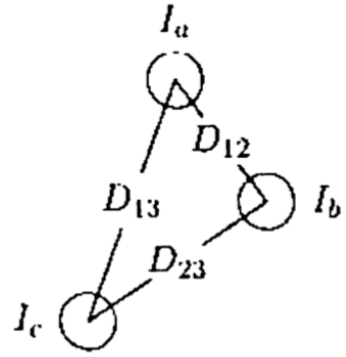
$$I_a = -(I_b + I_c)$$

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} + (I_b + I_c) \ln \frac{1}{D} \right) = 2 \times 10^{-7} I_a \left(\ln \frac{1}{r'} - \ln \frac{1}{D} \right) = 2 \times 10^{-7} I_a \ln \frac{D}{r'}$$

$$L_a = L_b = L_c = \frac{\lambda_a}{I_a} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'}$$

جابجایی فاز

اگر حاصله بین هادی برابر نباشد مثل آرایش عمودی و آرایش انفعی از جابجایی فاز استفاده می‌کنند.



$$\lambda_{aI} = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D_{12}} + I_c \ln \frac{1}{D_{13}} \right)$$

$$\lambda_{aII} = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D_{23}} + I_c \ln \frac{1}{D_{12}} \right)$$

$$\lambda_{aIII} = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D_{13}} + I_c \ln \frac{1}{D_{23}} \right)$$

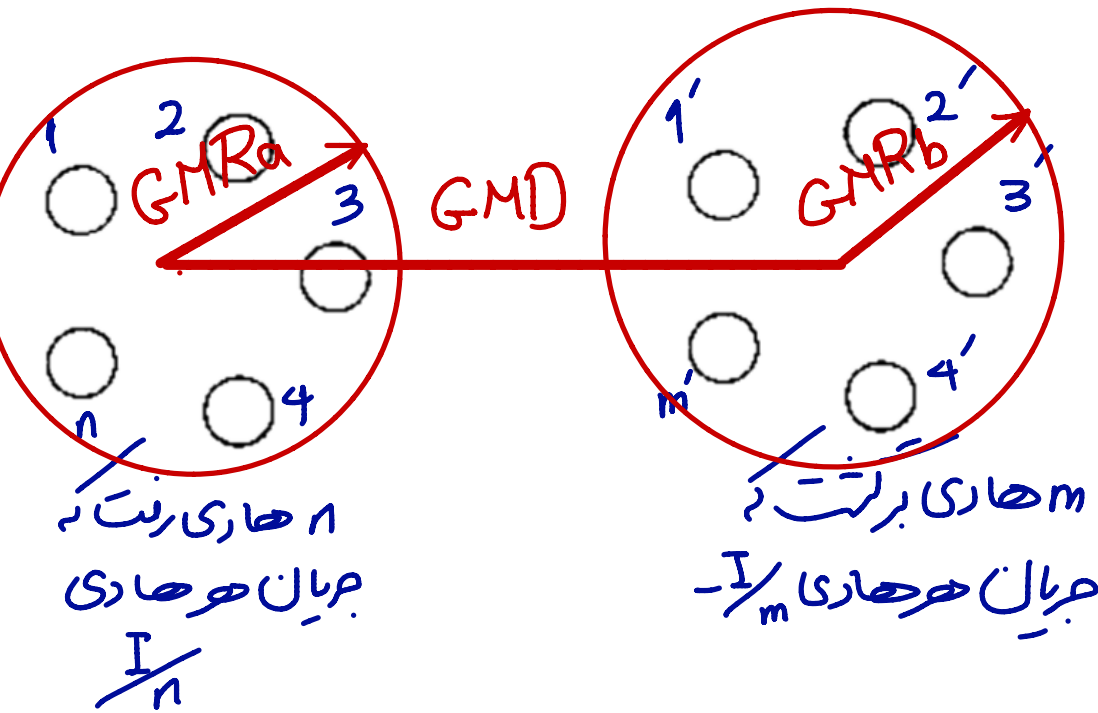
$$L_a = \frac{\lambda_a}{I_a} = \frac{\lambda_{aI} + \lambda_{aII} + \lambda_{aIII}}{3 I_a}$$

$$L_a = \frac{1}{3 I_a} \left[2 \times 10^{-7} \left(3 I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{13}} + I_c \ln \frac{1}{D_{13} \cdot D_{12} \cdot D_{23}} \right) \right] I_a = -(I_b + I_c)$$

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{1}{r'} - \ln \frac{1}{\sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}}} \right) = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}}}{r'}$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}} \quad L_a = L_b = L_c = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{r'} \quad \frac{H}{m}$$

اندوكتانس خطوط انتقال مركب



$$L_a = 2 \times 10^{-7} L_n \frac{GMD}{GMR_a} \frac{H}{m}$$

$$L_b = 2 \times 10^{-7} L_n \frac{GMD}{GMR_b}$$

$$GMD = [(D_{11'} D_{12'} D_{13'} \dots D_{1n'}) \dots (D_{n1'} D_{n2'} D_{n3'} \dots D_{nm'})]^{1/nm}$$

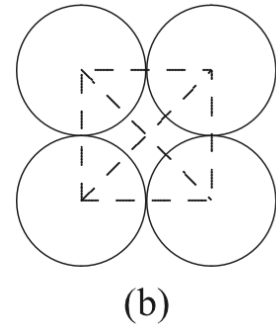
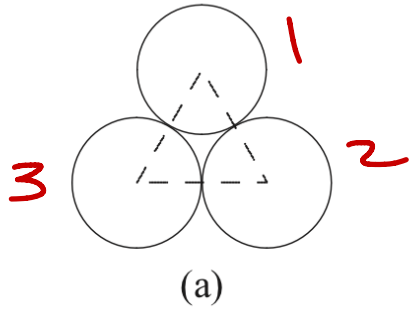
Geometric Mean Distance
 فاصه متوسط هندسي

$$GMR_a = [(D_{11} D_{12} D_{13} \dots D_{1n}) \dots (D_{n1} D_{n2} D_{n3} \dots D_{nn})]^{1/n^2}$$

Geometric Mean Radius
 شعاع متوسط هندسي

$$GMR_b = [(D_{11'} D_{12'} D_{13'} \dots D_{1m'}) \dots (D_{m1'} D_{m2'} D_{m3'} \dots D_{mm'})]^{1/m^2}$$

مسال: مخلوط کالیبر GMR



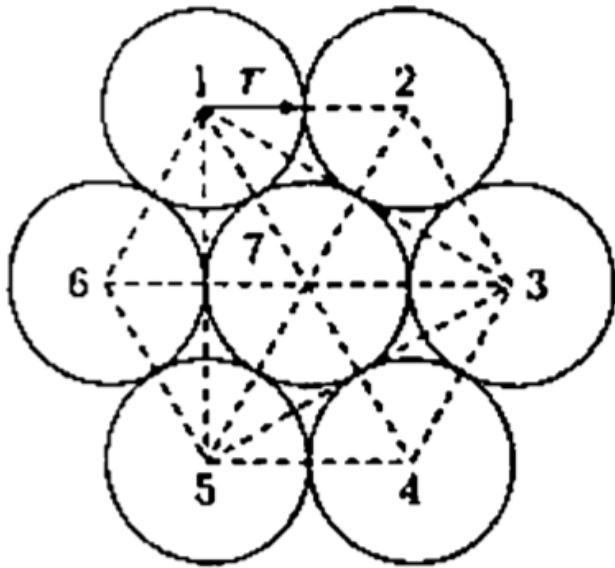
(a)

$$\begin{aligned} GMR &= \sqrt[9]{(r' 2r \times 2r)^3} \\ &= \sqrt[3]{e^{-\frac{1}{4}} r \times 2r \times 2r} = 1.46r \end{aligned}$$

(b)

$$\begin{aligned} GMR &= \sqrt[16]{(r' \times 2r \times 2r \times \sqrt{2} 2r)^4} \\ &= \sqrt[4]{e^{-\frac{1}{4}} 8\sqrt{2} r^4} = 1.723r \end{aligned}$$

مثال: مطلوبیت محاسبه GMR



$$D_{12} = D_{16} = D_{17} = 2r$$

$$D_{14} = 4r$$

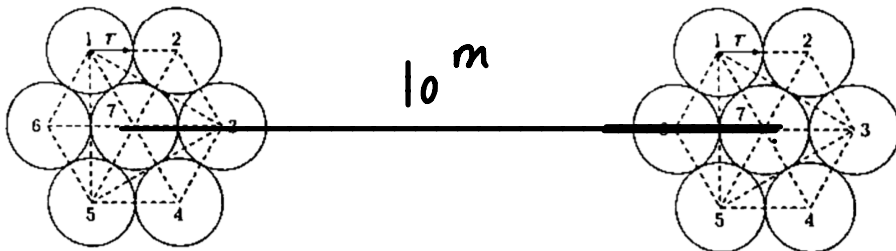
$$D_{13} = D_{15} = \sqrt{D_{14}^2 - D_{45}^2} = 2\sqrt{3}r$$

$$\begin{aligned} GMR &= \sqrt[49]{(r' \cdot 2r \cdot 2\sqrt{3}r \cdot 4r \cdot 2\sqrt{3}r \cdot 2r \cdot 2r)^6 \cdot r'(2r)^6} \\ &= r \sqrt[7]{(e)^{-\frac{1}{4}} (2)^6 (3)^{\frac{6}{7}} (2)^{\frac{6}{7}}} \\ &= 2.1767r \end{aligned}$$

49

$$r'^7 \cdot (2r)^{24} \cdot (4r)^6 \cdot (2\sqrt{3}r)^{12}$$

درصدی رفت و برگشت به صورت نوسانی، البته مطابق شکل زیر باشد. مقدار اندرگانس پیچیده است.



$$GMR = 2.1767r$$

$$GMD = 10^m \Rightarrow$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{10}{2.1767r} =$$

مثال: مطلوبست محاسبه اندوکتانس



$$D_m = \sqrt[6]{(20)(25)(15)(20)(10)(15)} = 16.802 \text{ m}$$

$$D_{SX} = \sqrt[9]{(e^{-\frac{1}{4}} \times 0.005 \times 5 \times 10)(e^{-\frac{1}{4}} \times 0.005 \times 5 \times 5)(e^{-\frac{1}{4}} \times 0.005 \times 5 \times 10)} \\ = 0.5366 \text{ m}$$

$$D_{SY} = \sqrt[4]{\left(e^{-\frac{1}{4}} \times 0.025 \times 5\right)^2} = 0.312 \text{ m}$$

Therefore

$$L_X = 0.2 \ln \frac{16.802}{0.5366} = 0.6888 \text{ mH/Km}$$

and

$$L_Y = 0.2 \ln \frac{16.802}{0.312} = 0.79725 \text{ mH/Km}$$

The loop inductance is

$$L = L_X + L_Y = 0.6888 + 0.79725 = 1.48605 \text{ mH/Km}$$

اندوکتانس خطوط انتقال باندل

در خطوط با ولتاژ نشرتهی (مخصوص بالاتر از ۲۳۰ kv) تأثیر کرونا در مدار بسیار زیاد است.

فراپای باندل کردن } ۱- کاهش تلفات کرونا
 ۲- افزایش GMR ← کاهش اندوکتانس

نکته: رویه، تراپن و کانار در خطوط ولتاژ خیلی زیاد ۴ تایی بیشتر نیز استفاده می شود.

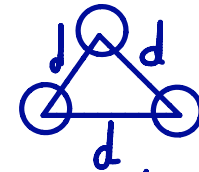
در ایران: $d = 30-45 \text{ cm}$ معمولاً

$$D_s^b = \sqrt[4]{r'^2 d^2} = \sqrt{r' d}$$



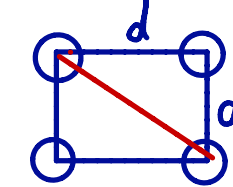
- دوباندل:

$$D_s^b = \sqrt[9]{r'^3 \cdot d^6} = \sqrt[3]{r' d^2}$$



- سه باندل:

$$D_s^b = \sqrt[16]{r'^4 \cdot d^8 \cdot (\sqrt{2} d)^4} = 1.09 \sqrt[4]{r' \cdot d^3}$$



- چهار باندل:

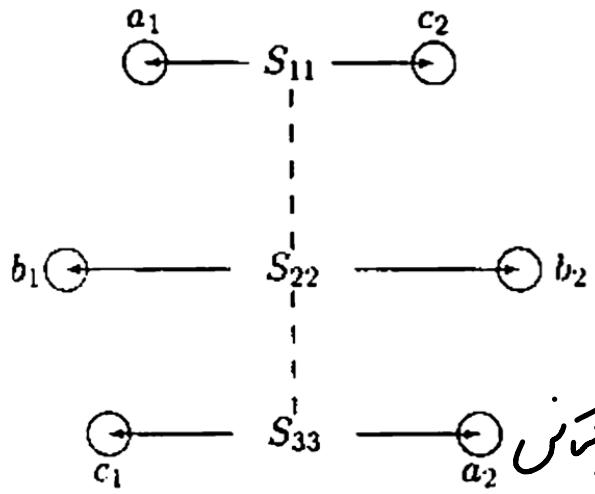
$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR}$$

۲ باندل
۳ تا ۴ باندل

در ایران:
 ۱- خطوط ۱۳۲ kv و ۲۳۰ kv یک مدار در مدار
 ۲- خطوط ۴۰۰ kv یک مدار و دو مدار

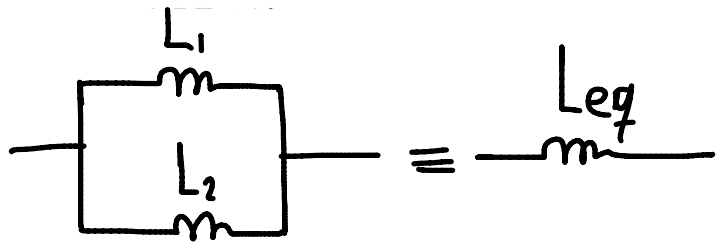
اندوکتانس خطوط انتقال سه فاز دو مداره

از دو خط سه فاز جدا از هم که با هم موازی هستند.



اگر مدارها با هم موازی باشند، اندوکتانس هر فاز برابر نصف اندوکتانس

هر یک از مدارها می باشد. چنانچه مدارهای خط انتقال روی یک کابل باشند نمی توان اندوکتانس



$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR}$$

انضداد

$$D_{ab\text{eq}} = \sqrt[4]{D_{ab} \cdot D_{ab'} \cdot D_{a'b} \cdot D_{a'b'}}$$

$$D_{ac\text{eq}} = \sqrt[4]{D_{ac} \cdot D_{ac'} \cdot D_{a'c} \cdot D_{a'c'}}$$

$$D_{bc\text{eq}} = \sqrt[4]{D_{bc} \cdot D_{bc'} \cdot D_{b'c} \cdot D_{b'c'}}$$

$$GMD = \sqrt[3]{D_{ab\text{eq}} \cdot D_{ac\text{eq}} \cdot D_{bc\text{eq}}}$$

$$GMR = \sqrt[3]{GMR_a \cdot GMR_b \cdot GMR_c}$$

$$GMR_a = \sqrt{r' \cdot D_{aa'}}$$

$$GMR_b = \sqrt{r' \cdot D_{bb'}}$$

$$GMR_c = \sqrt{r' \cdot D_{cc'}}$$

نکته: اگر مدارها با هم موازی باشند، در حساب GMR به جای r از D_S^b استفاده می شود.

کاپاسیتانس یا ظرفیت خازنی

$$C = \frac{q}{V}$$

صفت قانون کوس

$$D = \frac{q}{A} = \frac{q}{2\pi r \cdot l} = \frac{q}{2\pi r}$$

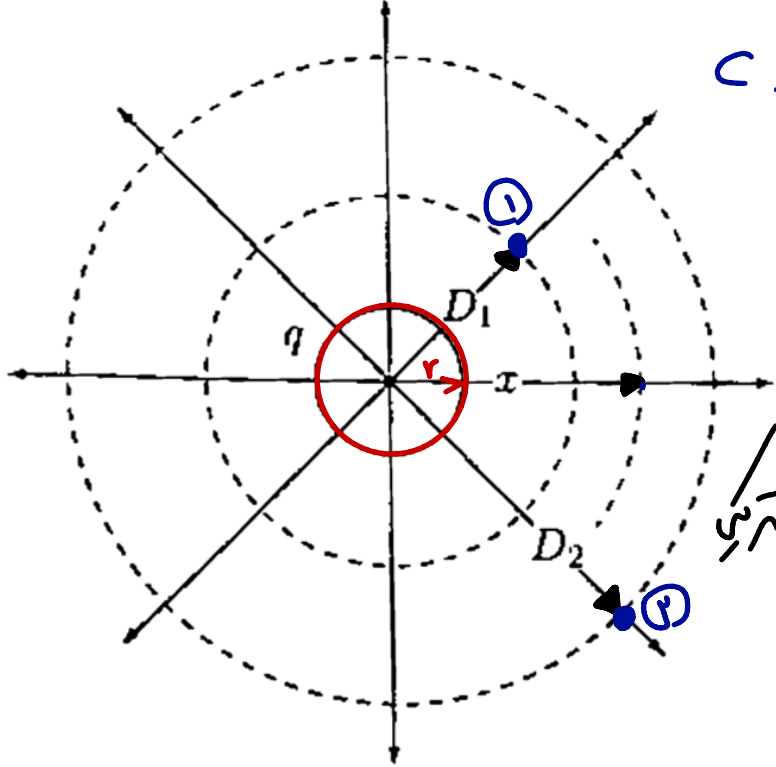
جغالت الکتریکی

شدت میدان الکتریکی

$$E = \frac{D}{\epsilon} = \frac{q}{2\pi \epsilon \cdot r}$$

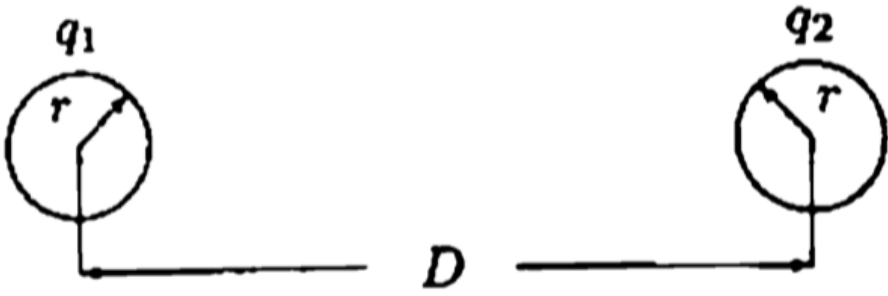
صفا $\epsilon_r = 1$

$$V_{12} = \int_{D_1}^{D_2} E \cdot dl = \int_{D_1}^{D_2} \frac{q}{2\pi \epsilon \cdot r} dr = \frac{q}{2\pi \epsilon} \ln \frac{D_2}{D_1}$$



هادی به شعاع r بقول l حاصل بار،
 q ← l

کاپاسیتانس یا ظرفیت خازنی خط انتقال تکفاز



$$V_{12} = V_{12}(q_1) + V_{12}(q_2)$$

$$V_{12}(q_1) = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r}$$

$$V_{12} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r} + \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r} = \frac{q}{\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r}$$

$$V_{21}(q_2) = \frac{q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r}$$

$$C_{12} = \frac{q}{V_{12}} = \frac{q}{\frac{q}{\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r}} = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} \text{ F/m}$$

$$V_{12}(q_2) = -V_{21}(q_2)$$



$$q_1 + q_2 = 0 \Rightarrow q_2 = -q_1$$

$$q_1 = q \Rightarrow q_2 = -q$$

$$C_{12} = \frac{1}{2} C \Rightarrow C = 2C_{12} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} \text{ F/m}$$

ظرفیت خازنی هواری

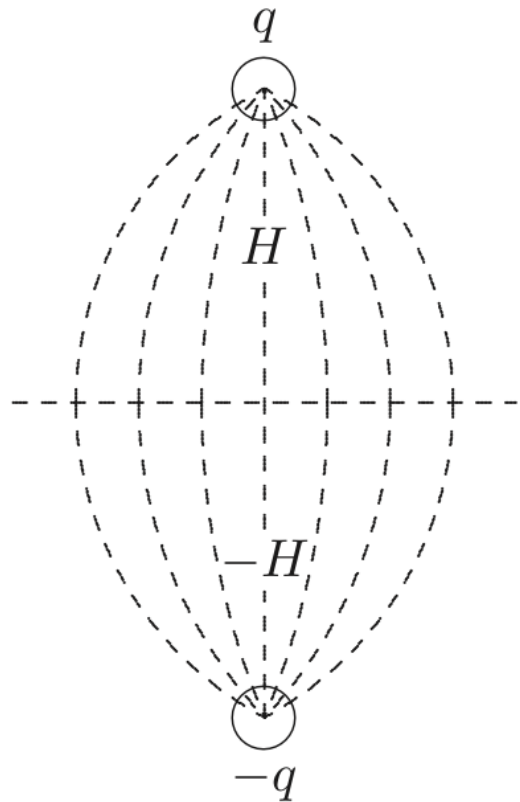
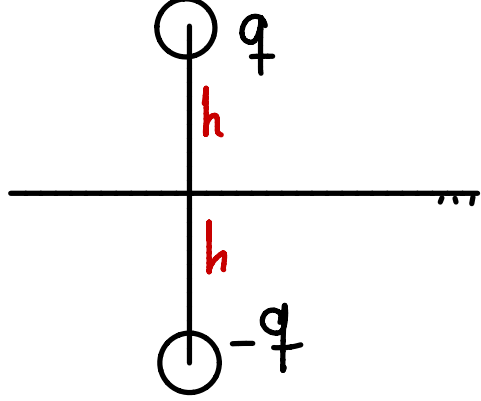
اثر زمین بر کاپاستانس خطوط

در صورتیکه ارتفاع هادی‌ها از سطح زمین خیلی زیاد نباشد باید اثر زمین تاثر داده نشود.

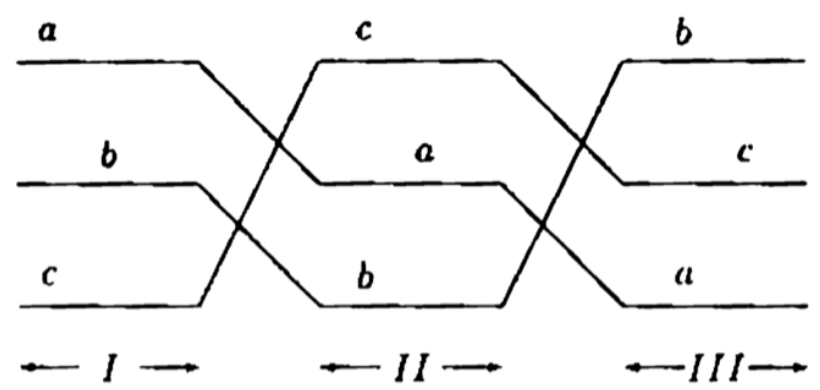
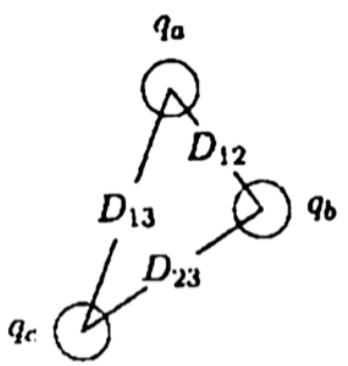
عضو زمین موجب افزایش ضریب خازن می‌گردد. اما معمولاً ارتفاع هادی‌ها در مقایسه با فاصله

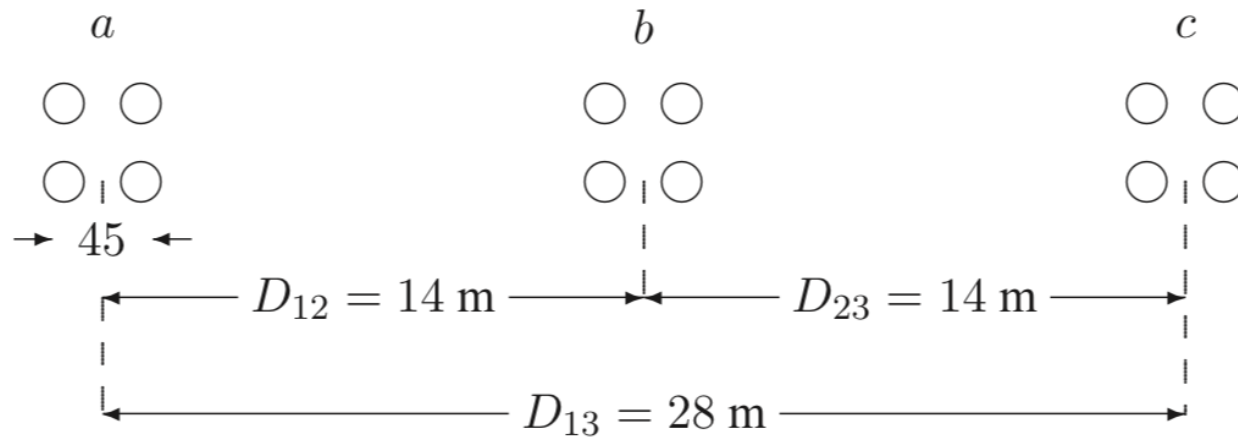
بین هادی‌ها زیاد بوده و اثر زمین قابل صرف نظر کردن است. بنابراین در لایه مدل‌های خط که در گذشته

و تحلیل حالت مانند کار استفاده می‌گردد. اثر زمین روی ظرفیت خازن صرف نظر از لایه و فقط در بزرگی خط‌های نامتوازن لحاظ می‌گردد.



کاپاستانس خطوط انتقال سه فاز





$$GMD = \sqrt[3]{(14)(14)(28)} = 17.63889 \text{ m}$$

$$GMR_L = 1.09 \sqrt[4]{(1.4173)(45)^3} = 20.66 \text{ cm}$$

$$GMR_C = 1.09 \sqrt[4]{(3.5103/2)(45)^3} = 21.8 \text{ cm}$$

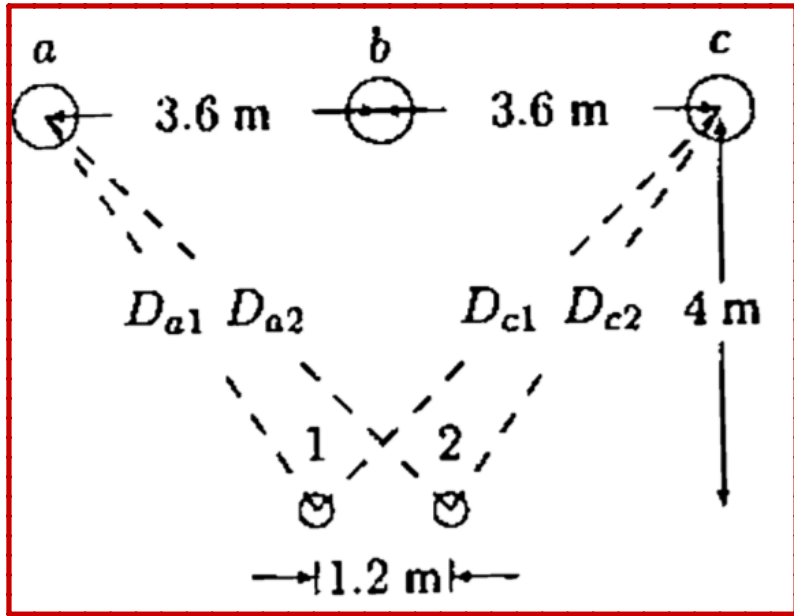
$$L = 0.2 \ln \frac{GMD}{GMR_L} = 0.2 \ln \frac{17.63889}{0.2066} = 0.889 \text{ mH/Km}$$

$$C = \frac{0.0556}{\ln \frac{GMD}{GMR_C}} = \frac{0.0556}{\ln \frac{17.63889}{0.218}} = 0.0127 \text{ } \mu\text{F/Km}$$

القای میدان مغناطیسی

میدان مغناطیسی خط انتقال بر روی اشیاء نزدیک خط اثر میگذارد. میدان مغناطیسی به جریان خط مربوطه شود و به اشیاء نزدیک و موازی با خط حتمه مانده حصارهای فیزیکی، لوله‌های سیم‌های تلنن و تاثیر القای می‌کنند.

میدان مغناطیسی بر روی ترکیب خون، رشته، رفتار، سیستم دفاعی و محرک زردن‌های عصبی بدن تاثیر می‌گذارد.



مثال: یک خط انتقال سه فاز جابجاشده و یک خط تلنن بر روی یک برج قرار دارند. خط قدرت دارای جریان معادل 200^A ، 60^{Hz} در هر فاز بوده و خط تلنن مستقیم در زیر فاز b قرار دارد. بانرض معادل بودن جریان‌های سه فاز در خط قدرت و تاثیر القای شده در هر کیلومتر خط تلنن را محاسبه کنید.

$$V_{12} = \frac{d\lambda_{12}}{dt} \Rightarrow V_{12} = j\omega \lambda_{12}$$

$$\lambda_{12} = \left(I_a \ln \frac{D_{a2}}{D_{a1}} + I_b \ln \frac{D_{b2}}{D_{b1}} + I_c \ln \frac{D_{c2}}{D_{c1}} \right) 2 \times 10^{-7} \quad D_{b1} = D_{b2}$$

$$D_{a2} = D_{c1} = \sqrt{4.2^2 + 4^2} = 5.8$$

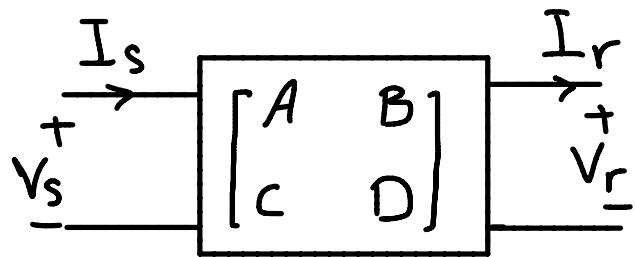
$$D_{a1} = D_{c2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5$$

$$\lambda_{12} = L_a \cdot I_a + L_b \cdot I_b + L_c \cdot I_c$$

$$d_{12} = 2 \times 10^{-7} \cdot 200 \left(\ln \frac{5.8}{5} + 1 \angle +120 \ln \frac{5}{5.8} \right) = 10.283 \angle -30 \text{ mwb/km}$$

$$V_{12} = j\omega d_{12} = j2\pi \times 60 \times 10.283 \angle -30 = 3.88 \angle 60^\circ \text{ V/km}$$

فصل سوم: ولتاژ و جریان در خطوط انتقال



$$V_s = A V_r + B I_r \quad \text{ضرایب } A, B, C, D, \text{ را ضرایب}$$

$$I_s = C V_r + D I_r \quad \text{عمومی خط انتقال را گویند.}$$

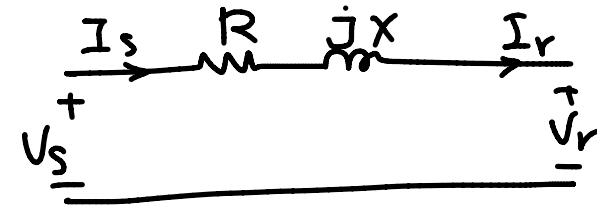
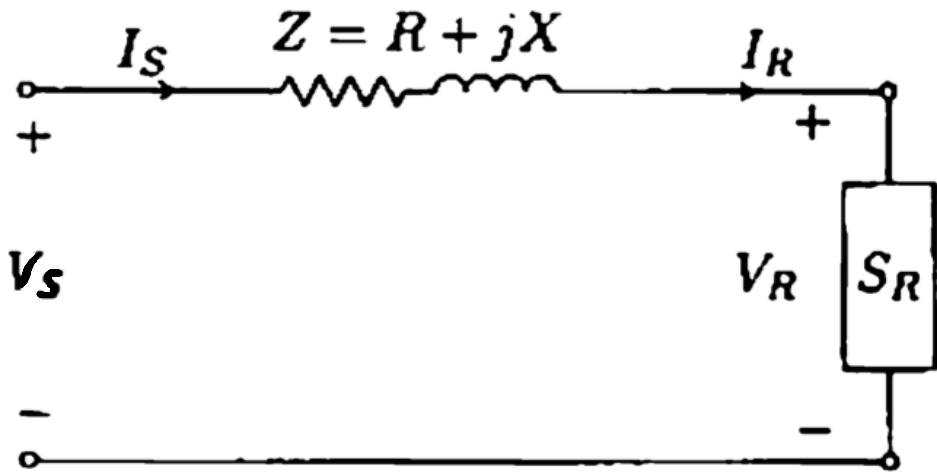
تعریف: تعیین ضرایب عمومی خط انتقال، منظور تعیین ولتاژ و جریان انته‌ا خط بر اساس ولتاژ و جریان انته‌ای خط

۱- خط کوتاه: $l < 80 \text{ km}$ short line

۲- خط متوسط، $80 < l < 240 \text{ km}$ Medium

۳- خط بلند $l > 240 \text{ km}$ long line

خط انتقال کوتاه short line



$$I_s = I_r$$

$$V_s = V_r + (R + jX) I_r = V_r + Z I_r$$

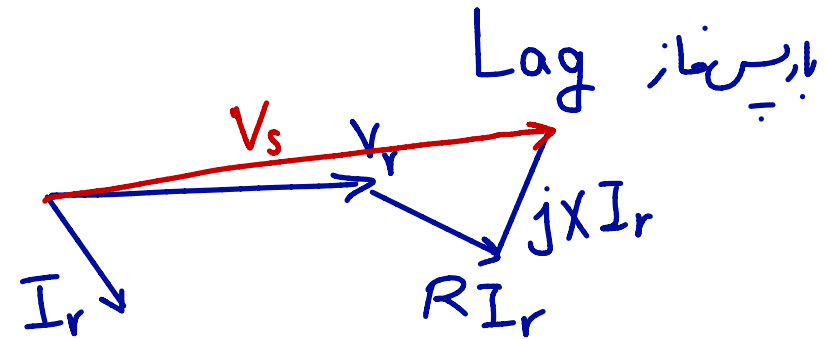
$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix}$$

درصد تنظیم ولتاژ یا رگولاسیون ولتاژ

$$\%VR = \frac{|V_{N-L}| - |V_{P-L}|}{|V_{P-L}|} \times 100$$

$$V_{N-L} = V_s \Rightarrow \%VR = \frac{|V_s| - |V_r|}{|V_r|} \times 100$$

$$V_s = V_r + R I_r + jX I_r$$



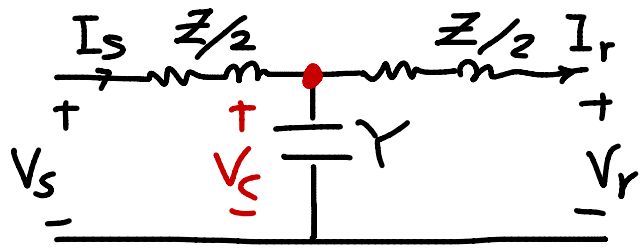
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$$

$$P_{out} = 3V_r I_r \cos \phi_r$$

$$P_{in} = 3V_s I_s \cos \phi_s$$

بازده خط: η

خط انتقال متوسط. $80 < l < 240$ km
 مدار معادل اسمی T خط انتقال
 مدار معادل اسمی π خط انتقال



$$\bar{Z} = \bar{z} \cdot l = (r + jx) \cdot l \quad \Omega$$

$$Y = y \cdot l = jcw \cdot l \rightarrow$$

ایمانس سری خط
 ایمانس موازی خط

$$V_s = A V_r + B I_r$$

$$I_s = C V_r + D I_r$$

$$V_s = \frac{1}{2} \bar{z} \cdot I_s + V_c$$

$$V_c = \frac{1}{2} \bar{z} \cdot I_r + V_r$$

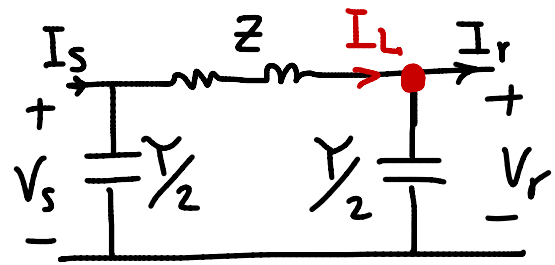
$$I_s = I_r + Y V_c = I_r + \frac{1}{2} \bar{z} Y I_r + Y V_r = Y V_r + \left(1 + \frac{\bar{z} Y}{2}\right) I_r$$

$$V_s = \frac{1}{2} \bar{z} Y V_r + \frac{1}{2} \bar{z} \left(1 + \frac{\bar{z} Y}{2}\right) I_r + \frac{1}{2} \bar{z} I_r + V_r$$

$$V_s = \left(1 + \frac{\bar{z} Y}{2}\right) V_r + \bar{z} \left(1 + \frac{\bar{z} Y}{4}\right) I_r$$

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\bar{z} Y}{2} & \bar{z} \left(1 + \frac{\bar{z} Y}{4}\right) \\ Y & 1 + \frac{\bar{z} Y}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix}$$

مدل انتقال انتقال متوسط



$$\left. \begin{aligned} V_s &= Z \cdot I_L + V_r \\ I_L &= I_r + Y/2 V_r \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_s = Z I_r + \frac{ZY}{2} V_r + V_r$$

$$V_s = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) V_r + Z I_r$$

$$I_s = I_L + V_s \cdot \frac{Y}{2} = I_r + \frac{Y}{2} V_r + \frac{Y}{2} \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) V_r + \frac{ZY}{2} I_r$$

$$I_s = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) V_r + \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) I_r$$

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{ZY}{2} & Z \\ Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) & 1 + \frac{ZY}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix}$$

$$\%VR = \frac{|V_{N-L}| - |V_{P-L}|}{|V_{P-L}|} \times 100 = \frac{\frac{|V_s|}{|A|} - |V_r|}{|V_r|} \times 100$$

درصد تنظیم ولت

یک خط انتقال سه فاز 345 kV به طول 130 km مفروض است. مقاومت هر فاز 0.36Ω در هر کیلومتر و اندوکتانس هر فاز آن 0.8 mH در هر کیلومتر است. ظرفیت خازنی موازی $0.112 \mu\text{F}$ در هر کیلومتر و بار انتهای خط 270 MVA با ضریب قدرت 0.8 پس فاز در ولتاژ 325 kV می باشد. با

استفاده از مدل خطوط متوسط، ولتاژ و توان در ابتدای خط و تنظیم ولتاژ را محاسبه نمایید.

مسئله 1: در یک خط انتقال 230 kv بطول 200 km از هادی ها Hawk استفاده شود. هادی

بطور افقی قرار داشته و فاصله هر دو هادی 4 m باشد. معادلت هر فاز $\frac{0.132 \text{ } \Omega}{\text{km}}$ است. اگر بار انتهای خط
 نزدیک قدرت 0.85 پس فاز و ولت 230 kv قدرت 150 Mw را جذب نماید. ولتاژ انتهای خط و ریزش تنظیم ولتاژ را می بیند؟

$$f = 50 \text{ Hz} \quad r = 0.010725 \text{ m} \quad r' = 0.0088 \text{ m}$$

$$\text{---} \text{---} \text{---} \quad L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{\text{GMD}}{\text{GMR}} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{5.04}{0.0088} = 12.7 \times 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

$$\text{GMD} = \sqrt[3]{4 \times 4 \times 8} = 5.04 \text{ m}$$

$$X = \omega \cdot l = L \cdot \omega \cdot l = 12.7 \times 10^{-7} \cdot 100 \pi \times 200$$

$$C = \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln \frac{5.04}{0.010725}} = 9.04 \times 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

$$X = 79.8 \text{ } \Omega$$

$$Y = y \cdot l = j\omega \cdot l = j \times 9.04 \times 10^{-12} \times 100 \pi \times 200 = j 5.68 \times 10^{-4} \text{ S}$$

$$R = r \cdot l = 0.132 \times 200 = 26.4 \text{ } \Omega$$

$$I_r = \frac{P}{\sqrt{3} V_r \cos \phi} \angle -\cos^{-1} 0.85 = \frac{150 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 230 \times 0.85} \angle -31.8^\circ = 443 \angle -31.8^\circ$$

$$V_S = (1 + Z \frac{Y}{2}) V_r + Z I_r = 0.977 \angle 0.44^\circ \cdot \frac{230 \text{ kv}}{\sqrt{3}} + 84 \angle 71.7^\circ \cdot 443 \angle -31.8^\circ$$

$$Z = R + jX = 26.4 + j79.8 = 84 \angle 71.7^\circ$$

$$A = 1 + Z \frac{Y}{2} = 0.977 \angle 0.44^\circ$$

$$V_S = 160.23 \angle 8.92^\circ \Rightarrow |V_{SL}| = \sqrt{3} |V_S| = 277.5 \text{ kv}$$

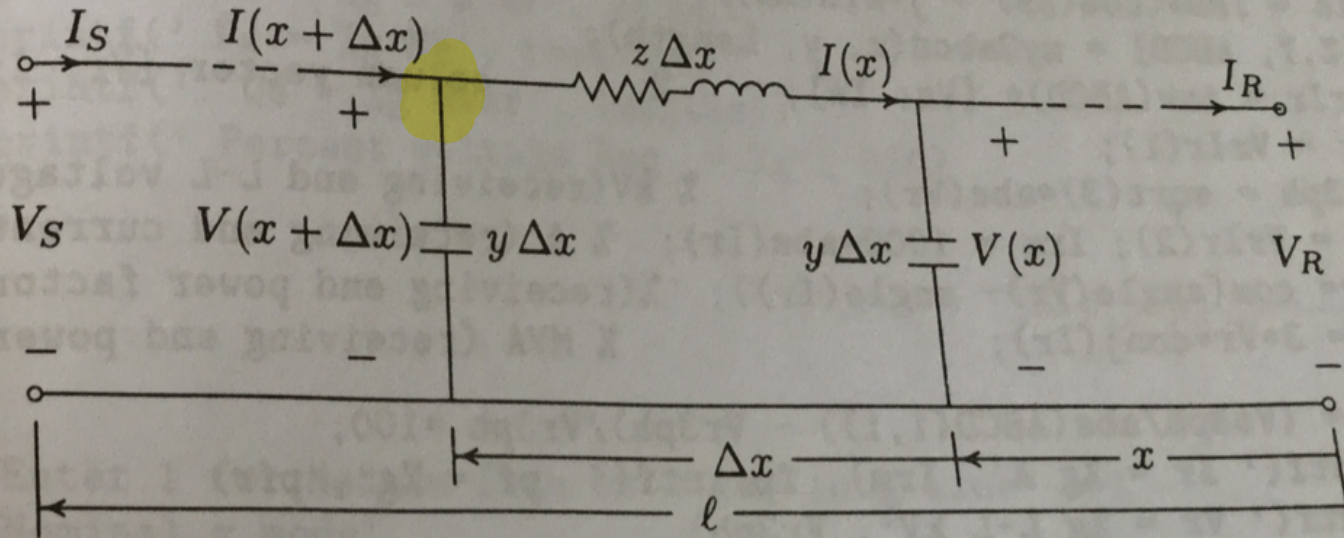
$$\%VR = \frac{\frac{277.5}{0.977} - 230}{230} \times 100 = 23.4\%$$

مدل خط انتقال بلند $l > 290 \text{ km}$

در یک خط انتقال بلند نمی توان پارامترهای را بطور متمرکز در نظر گرفت و از مدارهای ایسی II یا T خط انتقال استفاده نمود. در چنین خطی پارامترها بصورت

تکینواخت در طول خط پخش شده اند.

z امپدانس واحد طول Ω/km
 y ادیتانس " " S/km



$$V(x + \Delta x) = V(x) + z \Delta x \cdot I(x)$$

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{V(x + \Delta x) - V(x)}{\Delta x} = z I(x) \Rightarrow \frac{dV(x)}{dx} = z I(x) \quad \text{(I)}$$

$$I(x + \Delta x) = I(x) + y \Delta x \cdot V(x + \Delta x) \Rightarrow \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{I(x + \Delta x) - I(x)}{\Delta x} = y \cdot V(x + \Delta x)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = y V(x) \quad \text{(II)}$$

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = z y V(x) \Rightarrow V'' - z y V = 0 \Rightarrow t^2 - z y = 0$$

$$t = \pm \sqrt{z y} \Rightarrow V(x) = c_1 e^{\sqrt{z y} x} + c_2 e^{-\sqrt{z y} x}$$

جواب عمومی معادله تفاضلی

$$\delta = \sqrt{zy} = \alpha + j\beta$$

α : ثابت تضعیف
 β : " فاز

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}}$$

$$\frac{1}{z} \cdot \sqrt{zy} = \sqrt{\frac{zy}{z^2}} = \sqrt{\frac{y}{z}} = \frac{1}{Z_c}$$

$$V(x) = c_1 e^{\delta x} + c_2 e^{-\delta x}$$

$$\textcircled{\text{II}} \rightarrow I(x) = \frac{1}{z} \frac{dV}{dx} = \frac{1}{z} (\delta c_1 e^{\delta x} - \delta c_2 e^{-\delta x}) = \frac{1}{Z_c} (c_1 e^{\delta x} - c_2 e^{-\delta x})$$

$$x=0 \Rightarrow \left. \begin{aligned} V(0) = V_r &= c_1 + c_2 \\ I(0) = I_r &= \frac{1}{Z_c} (c_1 - c_2) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} V_r &= c_1 + c_2 \\ Z_c I_r &= c_1 - c_2 \end{aligned}$$

برای تعیین c_1, c_2

$$c_1 = \frac{V_r + Z_c I_r}{2}, \quad c_2 = V_r - c_1 = \frac{V_r - Z_c I_r}{2}$$

$$V(x) = \frac{V_r + Z_c I_r}{2} e^{\delta x} + \frac{V_r - Z_c I_r}{2} e^{-\delta x} = V_r \left(\frac{e^{\delta x} + e^{-\delta x}}{2} \right) + Z_c \left(\frac{e^{\delta x} - e^{-\delta x}}{2} \right) I_r$$

$$V(x) = \cosh \delta x \cdot V_r + Z_c \sinh \delta x \cdot I_r$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c} \left[\frac{V_r + Z_c I_r}{2} e^{\delta x} - \frac{V_r - Z_c I_r}{2} e^{-\delta x} \right] = \frac{1}{Z_c} \left(\frac{e^{\delta x} - e^{-\delta x}}{2} \right) V_r + I_r \left(\frac{e^{\delta x} + e^{-\delta x}}{2} \right)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma x V_r + \cosh \gamma x \cdot I_r$$

$$x=l \Rightarrow V(l) = V_s = \cosh \gamma l V_r + Z_c \sinh \gamma l I_r$$

$$I(l) = I_s = \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma l \cdot V_r + \cosh \gamma l \cdot I_r$$

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_c \sinh \gamma l \\ \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix}$$

$$\%VR = \frac{\frac{|V_s|}{|A|} - |V_r|}{|V_r|} \times 100$$

مثال: در یک خط انتقال 230 kV بطول 400 km ، راتانس سری خط $0.61 \frac{\Omega}{\text{km}}$ و مقادیر آن $0.113 \frac{\Omega}{\text{km}}$ و وارتنانس موازی $3.2 \times 10^{-6} \frac{\text{S}}{\text{km}}$ است. بار انتهای خط قدرت 200 MW ، ولتاژ 230 kV و ضریب قدرت 0.9 است.

جذب توانی و ولتاژ جریان و قدرت در ابتدا خط را محاسبه کنید.

$$z = r + jx = 0.113 + j0.61 = 0.6204 \angle 79.5$$

$$z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{0.6204}{3.2 \times 10^{-6}} \angle \frac{79.5 - 90}{2}}$$

$$y = j3.2 \times 10^{-6} = 3.2 \times 10^{-6} \angle 90$$

$$I_r = \frac{P}{\sqrt{3} V_r \cos \phi} = \frac{200 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 230} = 502 \angle 0$$

$$z_c = 440.3 \angle -5.25^\circ \Omega$$

$$\theta = \sqrt{z y} = \sqrt{0.6204 \times 3.2 \times 10^{-6}} \angle \frac{79.5 + 90}{2} = 0.00141 \angle 84.75 = 0.00129 + j0.0014$$

$$\theta l = 0.0516 + j0.56$$

$$\cosh(0.0516 + j0.56) = \cosh 0.0516 \cdot \cos 0.56 + j \sinh 0.0516 \cdot \sin 0.56 = 0.8485 \angle 1.85$$

$$\sinh(0.0516 + j0.56) = \sinh 0.0516 \cdot \cos 0.56 + j \cosh 0.0516 \cdot \sin 0.56 = 0.5335 \angle 85.3$$

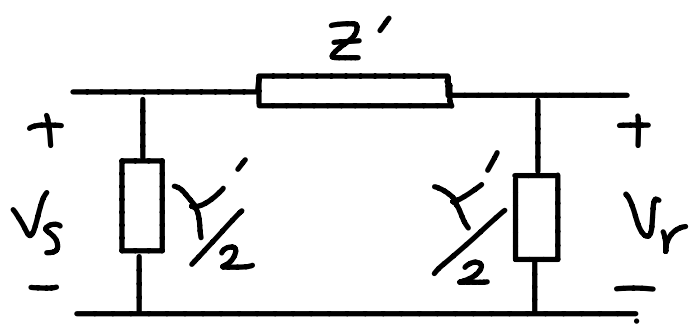
$$V_s = 0.8485 \angle 1.85 \cdot 132.8 \times 10^3 + 440.3 \angle -5.25 \cdot 0.5335 \angle 85.3 \cdot 502 = 179 \angle 42 \text{ kV}$$

$$I_S = 502 \times 0.8485 \angle 1.85 + \frac{1}{440.3 \angle -5.25} \cdot 132.8 \times 10^3 \times 0.5335 \angle 85.3$$

$$I_S = 461.6 \angle 22.2$$

$$|V_{SL}| = \sqrt{3} \cdot |V_S| = \sqrt{3} \times 179 = 310 \text{ kV}$$

$$P_S = \sqrt{3} V_{SL} \cdot I_S \cdot \cos \phi_S = \sqrt{3} \times 310 \times 461.6 \times \cos(42 - 22.2) = 233 \text{ MW}$$



مدار متبادل II خط انتقال بلنه:

$$V_s = \left(1 + Z' \frac{Y'}{2}\right) V_r + Z' I_r$$

$$V_s = \cosh \gamma l \cdot V_r + Z_c \sinh \gamma l I_r$$

$$Z' = Z_c \sinh \gamma l$$

$$1 + \frac{Z' Y'}{2} = \cosh \gamma l \Rightarrow \frac{Y'}{2} = \frac{\cosh \gamma l - 1}{Z_c \sinh \gamma l} = \frac{1}{Z_c} \operatorname{tgh} \left(\frac{\gamma l}{2}\right)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_c} \operatorname{tgh} \frac{\gamma l}{2}$$

تشکل موج لیا رفت و برگشت:

$$v(x) = C_1 e^{\alpha x} + C_2 e^{-\alpha x} = \underbrace{C_1 e^{\alpha x} \cdot e^{j\beta x}}_{V_1} + \underbrace{C_2 e^{-\alpha x} \cdot e^{-j\beta x}}_{V_2}$$

موج لیا رفت $V_1 = C_1 e^{\alpha x} \cdot e^{j\beta x}$

موج برگشت $V_2 = C_2 e^{-\alpha x} \cdot e^{-j\beta x}$

$$v(x) = V_1 + V_2$$

امپدانس موجی Surge Impedance (Z_0)

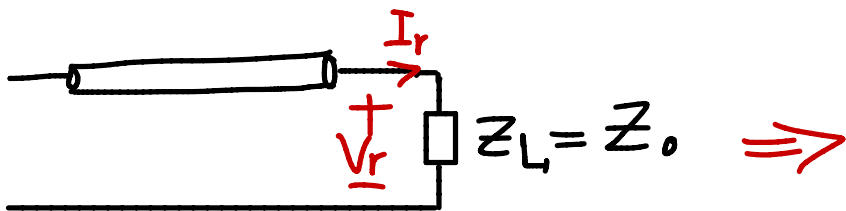
حالت خاصی از امپدانس مشخصه است که $r=g=0$

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{y}} = \sqrt{\frac{r+ja}{g+jb}} = \sqrt{\frac{a}{b}} = \sqrt{\frac{L\omega}{C\omega}} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

در خطوط انتقال امپدانس موجی از ۹۰۰ برای خطوط ۶۹ kv تا ۲۵۰ برای خطوط انتقال دهنه ۷۶۵ kv تغییر کند.

بار امپدانس موجی Surge Impedance Loading

قدرت است که توسط خط به مقاومتی معادل امپدانس موجی راد را شود.



$$SIL = \frac{|V|^2}{Z_0} \text{ W}$$

$$\gamma = \sqrt{zy} = \sqrt{j\omega L \cdot j\omega C} = j\omega\sqrt{LC} \Rightarrow \begin{cases} \alpha = 0 \\ \beta = \omega\sqrt{LC} \end{cases} \quad \text{ثابت انت، خط بدون تلفات:}$$

$$V(x) = V_r \Delta \underline{\beta x}$$

در یک خط بدون تلفات و بار SIL

سکین کامل و لشار همگامی کامل می شود که βx به اندازه 360° یا 2π رادیان تغییر کند.

طول موج (λ) wavelength

$$\beta\lambda = 2\pi \Rightarrow \lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad \text{مافی بین دو نقطه از موج در طول خط انتقال است که یک سکین کامل را در برگیرد.}$$

$$\beta = \omega\sqrt{LC} = 2\pi f \sqrt{\frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{r'} \cdot \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}}} \stackrel{r \approx r'}{=} 2\pi f \sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0} \quad \frac{\text{rad}}{\text{m}}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{2\pi f \sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} = \frac{1}{f \sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} \quad \text{m}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$v = f \cdot \lambda \quad \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{سرعت انتشار موج}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{4\pi \times 10^{-7} \cdot 8.85 \times 10^{-12}}} = 2.998 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

مسئله: یک خط انتقال سه فاز به طول 300 km و ولتاژ 500 kV و فرکانس 60 Hz مفروض است. اندکس خط 0.97 mH/km در

هر فاز ولت‌ریخت خازنی هر فاز آن 0.0115 MP/km می‌باشد. با فرض اینکه خط بدون تلفات باشد:

الف) ثابت فاز (β) ، امپدانس مشخصه Z_c ، سرعت انتشار v ، طول موج (λ) خط را تعیین کنید؟

ب) بار نامی در سمت دریافت خط 800 MW با ضریب قدرت 0.8 پس فاز و ولتاژ 500 kV می‌باشد. گت‌های ولت ارسال و تنظیم ولتاژ را به دست آورید؟

$$\Gamma = 0 \Rightarrow \alpha = 0, \delta = j\beta = j\omega\sqrt{LC}$$

حل:

$$\beta = 2\pi \cdot f \cdot \sqrt{0.97 \times 0.0115 \times 10^{-9}} = 0.001259 \text{ rad/km}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{0.97}{0.0115 \times 10^{-3}}} = 290.43 \Omega$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{0.97 \times 0.0115 \times 10^{-9}}}$$

$$v = 2.999 \times 10^5 \frac{\text{km}}{\text{s}} = 2.999 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1}{60} \times 2.999 \times 10^5 = 4998 \text{ km}$$

$$\theta = \beta \cdot l = 0.001259 \times 300 = 0.3777 \text{ rad} = 21.641^\circ$$

(ب)

$$V_r = \frac{V_{r2}}{\sqrt{3}} = \frac{500 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 288.675 \angle 0^\circ \text{ kv}$$

$$I_r = \frac{P_{r(3\phi)} \angle -\cos^{-1} 0.8}{\sqrt{3} V_{r2} \cos \phi} = \frac{800 \times 10^3 \angle -36.87^\circ}{\sqrt{3} \times 500 \times 0.8} = 1154 \angle -36.87^\circ$$

$$V_s = V_r \cos \theta + j z_c \sin \theta \cdot I_r = 356.53 \angle 16.1^\circ \text{ kv}$$

$$|V_{SL}| = \sqrt{3} \cdot V_s = 617.53 \text{ kv}$$

$$I_s = \frac{j}{z_c} \sin \theta \cdot V_r + \cos \theta \cdot I_r = 902.3 \angle -17.9^\circ$$

$$S_{s(3\phi)} = 3 V_s \cdot I_s^* = 3 \times 356.53 \angle 16.1^\circ \times 902.3 \angle 17.9^\circ \times 10^{-3} = 800 \text{ MW} + j 539.7 \text{ MVar}$$

$$\%VR = \frac{\frac{|V_s|}{|A|} - |V_r|}{|V_r|} \times 100 = \frac{\frac{356.53}{\cos \theta} - 288.675}{288.675} \times 100 = 32.87\%$$

فصل چهارم

مدار معادل سیستم های قدرت

مقادیر نسبت به واحد (pu) Per-unit.

محاسن پریونیت:

۱- از آنجایی که ولتاژها و جریان‌ها و قدرت در سیستم‌های قدرت اعداد بزرگی هستند، کاربرد مقادیر پریونیت با اعداد کوچکتر و مقادیری ملموس باعث تسلط بیشتر مهندسین روی کیت‌آمرگردد.

۲- مقادیر پریونیت امپدانس، ولتاژ و جریان ترانسفورماتور بدون رعایت تبدیل، اولیه یا ثانویه مساوی هستند.

۳- توانین مدار در سیستم‌های پریونیت نیز صادق بوده و معادلات توان و ولتاژ ساده شده زیرا ضرایب 3، 3 و 3 در سیستم پریونیت حذف می‌شود.

$$\text{Per. unit} = \frac{\text{مقدار واقعی}}{\text{مبنای}} \text{ مقدار پریونیت}$$

به عنوان مثال

$$V_b = 400 \text{ kv} \Rightarrow \begin{cases} V_1 = 420 \angle 30^\circ \Rightarrow V_1^{\text{P.u}} = \frac{420 \angle 30^\circ}{400} = 1.05 \angle 30^\circ \\ V_2 = 380 \angle -60^\circ \Rightarrow V_2^{\text{P.u}} = \frac{380 \angle -60^\circ}{400} = 0.95 \angle -60^\circ \end{cases}$$

$$I_{\text{P.u}} = \frac{I}{I_b}$$

$$S_{\text{P.u}} = \frac{S}{S_b}$$

$$V_{\text{P.u}} = \frac{V}{V_b}$$

$$Z_{\text{P.u}} = \frac{Z}{Z_b}$$

$$S_{p.u} = \frac{S}{S_b} = \frac{P + jQ}{S_b} = \frac{P}{S_b} + j \frac{Q}{S_b} = P_{p.u} + jQ_{p.u} \quad P_{p.u} = \frac{P}{S_b}, Q_{p.u} = \frac{Q}{S_b}$$

$$S_{p.u} = \frac{S}{S_b} = \frac{V \cdot I^*}{V_b \cdot I_b} = \frac{V}{V_b} \cdot \left(\frac{I}{I_b}\right)^* = V_{p.u} \cdot I_{p.u}^*$$

$$V = Z \cdot I \Rightarrow V_{p.u} = \frac{V}{V_b} = \frac{Z \cdot I}{Z_b \cdot I_b} = \frac{Z}{Z_b} \cdot \frac{I}{I_b} = Z_{p.u} I_{p.u}$$

$\left. \begin{matrix} V_b \\ S_b \end{matrix} \right\} \text{انتخاب} \Rightarrow \begin{cases} I_b = \frac{S_b}{V_b} \\ Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} \end{cases}$

$Z_{b^2} \frac{V_b}{I_b} = \frac{V_b}{\frac{S_b}{V_b}} = \frac{V_b^2}{S_b}$

چارگت اصل Z, S, I, V

$$S_{p.u} = \frac{S}{S_b} = \frac{\sqrt{3} V I^*}{\sqrt{3} V_b I_b} = \frac{V}{V_b} \cdot \left(\frac{I}{I_b}\right)^* = V_{p.u} \cdot I_{p.u}^*$$

مقادیر پیرونیت در سمت های سه فاز:

$$P_{p.u} = V_{p.u} \cdot I_{p.u} \cos \varphi, \quad Q_{p.u} = V_{p.u} \cdot I_{p.u} \sin \varphi$$

تغییر مبای متادیر بیونیت:

$$\left. \begin{matrix} V_b^{\text{old}} \\ S_b^{\text{old}} \end{matrix} \right\} \Rightarrow Z_{p.u}^{\text{old}}$$

$$\Rightarrow Z_{p.u}^{\text{new}} = ? \leftarrow$$

$$\left\{ \begin{matrix} V_b^{\text{new}} \\ S_b^{\text{new}} \end{matrix} \right.$$

$$Z_{p.u}^{\text{old}} = \frac{Z}{Z_b^{\text{old}}}$$

$$Z_{p.u}^{\text{new}} = \frac{Z}{Z_b^{\text{new}}} = \frac{Z_{p.u}^{\text{old}} \cdot Z_b^{\text{old}}}{Z_b^{\text{new}}} = Z_{p.u}^{\text{old}} \frac{V_b^{\text{old}^2} / S_b^{\text{old}}}{V_b^{\text{new}^2} / S_b^{\text{new}}}$$

$$Z_{p.u}^{\text{old}} \cdot \left(\frac{S_b^{\text{new}}}{S_b^{\text{old}}} \right) \cdot \left(\frac{V_b^{\text{old}}}{V_b^{\text{new}}} \right)^2$$

مثال: راکتانس یک ژنراتور مشهور در $S_b = 250 \text{ MVA}$ برابر 0.2 p.u می باشد. مبای کابسات 100 MVA ، 20 KV است.
 $V_b = 21 \text{ KV}$

راکتانس این ژنراتور را در مبای جدید کابسه کنید.

$$X_{p.u}^{\text{new}} = 0.2 \cdot \left(\frac{100}{250} \right) \cdot \left(\frac{21}{20} \right)^2 = 0.0882 \text{ p.u}$$

مدار معادل سیستم های قدرت

سیستم قدرت از اجزای مختلف نظیر ژنراتور، ترانس، خط انتقال و بار و... تشکیل شده است که برای رسم مدار معادل بدین سیستم قدرت باید مدار معادل تک تک همان را راسته باشیم.

دیباچه اول (مبدانی): از بهم پیوستن مدار معادل اجزای سیستم های قدرت به یکدیگر بدست می آید.

ماشین سynchronous Machine

قدرت نامی ریزاتور؟ از چند صد مگاوات سیرتا 1000 MVA

سynchronous ماشین تحت سگراف ماندگار در سرعت و فرکانس ثابتی کار میکنند.

فرکانس $n = \frac{120 F}{P} \rightarrow$
 P تعداد قطب

- بسیار گزراتور
- ۱- اتاتور - نیم بیج آر بیج - سه فاز
 - ۲- رتور - همگام - منبع جریوتقیم تغذیه شود.

$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m$ زاویه الکتریکی مربوط به ولتاژ القادسه
 زاویه مکانی مربوط به موقعیت رتور

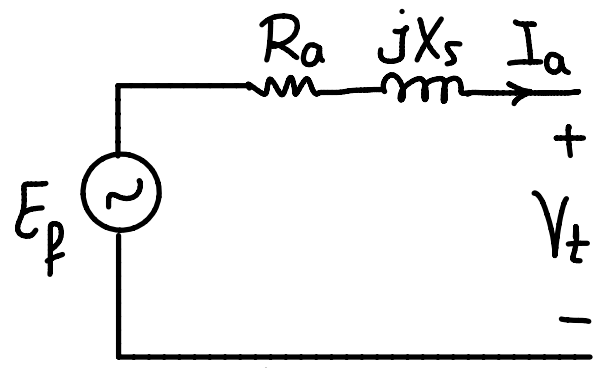
ماشین سynchronous

- ۱- ماشین کی با قطب صاف یا التوانای cylindrical Rotor (Nonsalient-Pole) در توربو ژنراتور (توربین ها جاروگاز) که سرعت کی بسیار زیاد دارند استفاده می شود.

- ۲- ماشین کی با قطب برجسته: در هیدرو ژنراتور (انسیردکاه ها آب) چون سرعت توربین ها این بسیار کم بوده و تعداد زیادی قطب برای تولید ولتاژ با فرکانس 50 Hz مورد نیاز است.

salient Pole

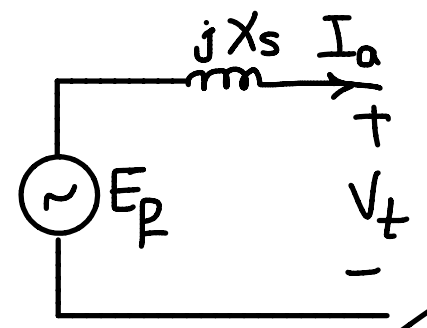
مدار معادل ژنراتور سنکرون :



مدار معادل ژنراتور سنکرون

\Rightarrow

$R_a \ll X_s$



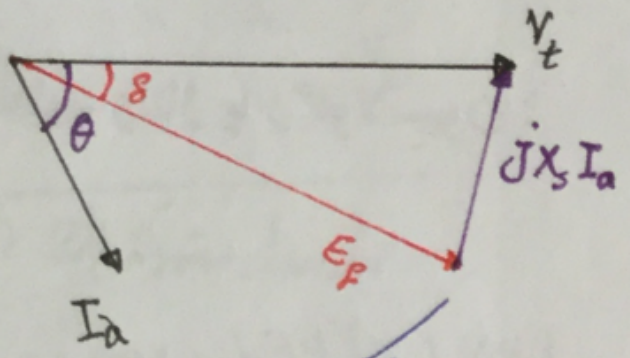
مدار معادل ژنراتور سنکرون

$$X_s = X_L + X_\phi$$

\downarrow \downarrow
 راکتانس پراکنده راکتانس القایی

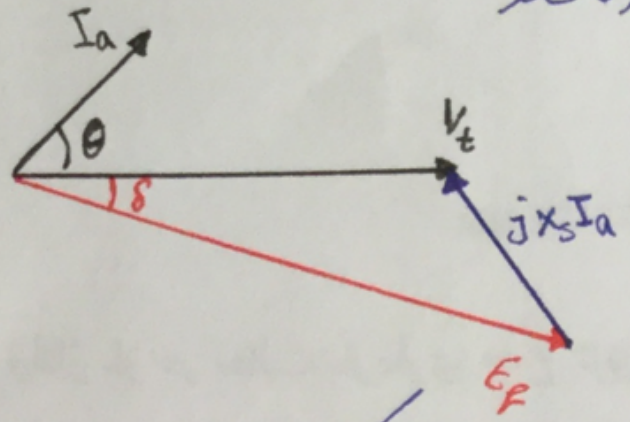
$$V_t = E_p - (R_a + jX_s) I_a \approx E_p - jX_s I_a$$

دیگرام برداری موتور بدون درجته است



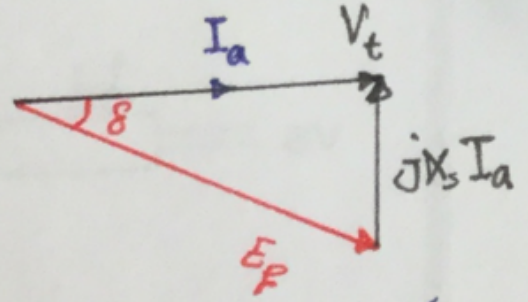
زیر تحریک

قدرت را نیز مصرف می کند.



فوق تحریک

قدرت را نیز تولید می کند.



تحریک عادی

قدرت را نیز تولید می کند.

زیر δ در حالت موتور بدون درجته است.

بدین جهت آوردن در رابطه قدرت القوی و القوی منتقله برشین به نهایت:

$$V_t = |V_t| \angle 0 \quad E_f = |E_f| \angle \delta$$

$$I = \frac{|E_f| \angle \delta - |V_t|}{X_s \angle 90} \quad \Rightarrow \text{قدرت منتقله از ژنراتور به شین به نهایت} \quad S_1 = P_1 + jQ_1 = E_f I^*$$

$$\text{قدرت تلفات در اینت لینه توسط شین به نهایت} \quad S_2 = P_2 + jQ_2$$

$$S_1 = |E_f| \angle \delta \frac{E_f \angle -\delta - |V_t|}{X_s \angle -90}$$

$$\Rightarrow P = P_1 = P_2 = \frac{|V_t| |E_f|}{X_s} \sin \delta$$

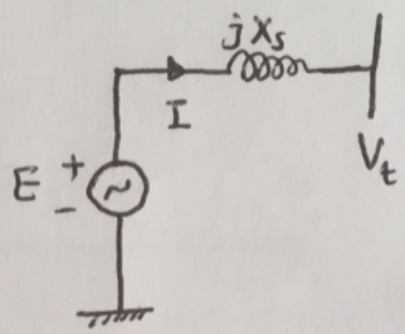
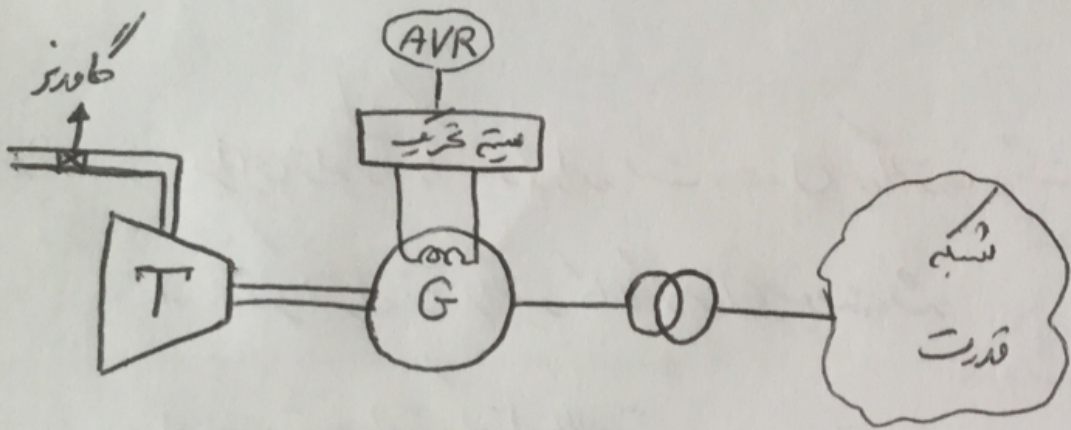
$$Q_1 = \frac{|E_f|}{X_s} (|E_f| - |V_t| \cos \delta)$$

$$Q_2 = \frac{|V_t|}{X_s} (|E_f| \cos \delta - |V_t|)$$

- ۱- همبسته $|E_f| \cos \delta = |V_t| \Rightarrow Q_2 = 0$
- ۲- فوق همبسته $|E_f| \cos \delta > |V_t| \Rightarrow Q_2 > 0$ / توان القوی گیرنده
- ۳- زیر همبسته $|E_f| \cos \delta < |V_t| \Rightarrow Q_2 < 0$ / توان القوی دهنده

با کاهش جوی تحریک زاویه δ افزایش می یابد. این روند تا $\delta = 90^\circ$ ادامه می یابد. اما در جوی تحریک با هم کم می شود و در δ افزایش می یابد زیرا که

نیاید به ژنراتور شدن خارج شود.



سیستم تحریک از اتورنبردن

$$P_e = \frac{E \cdot V_t}{X_s} \sin \delta$$

$$Q_e = \frac{E \cdot V_t}{X_s} \cos \delta - \frac{V_t^2}{X_s}$$

$$E = V_t + jX_s I$$

$$Q_e = \frac{E \cdot V_t \cos \delta - V_t^2}{X_s}$$

$$P_e = \frac{E \cdot V_t}{X_s} \sin \delta$$

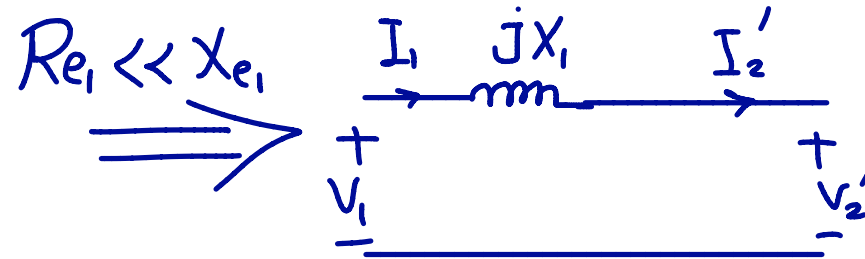
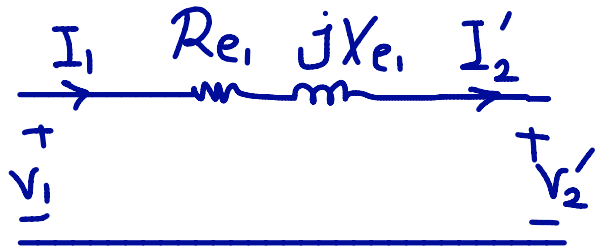
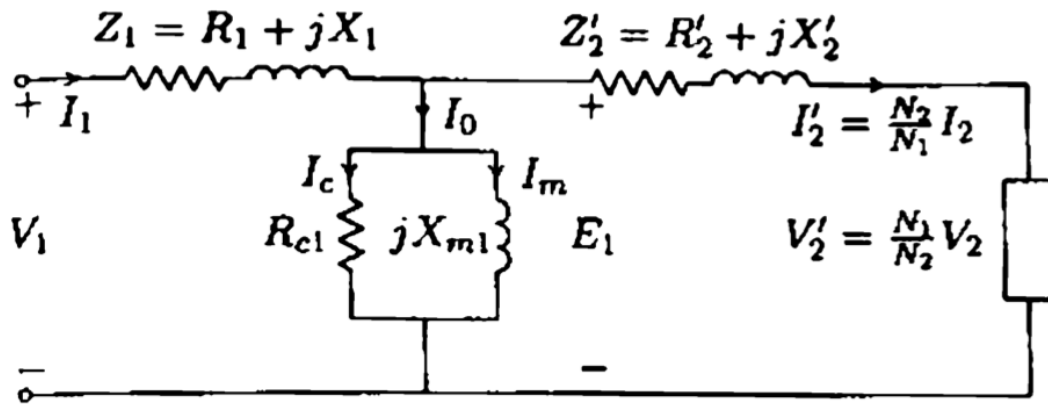
$$\Rightarrow \begin{cases} E V_t \cos \delta = X_s Q_e + V_t^2 \\ E V_t \sin \delta = P_e X_s \end{cases}$$

$$\Rightarrow E^2 V_t^2 = P_e^2 X_s^2 + (X_s Q_e + V_t^2)^2$$

$$\Rightarrow E = \frac{1}{V_t} \sqrt{X_s^2 P_e^2 + (X_s Q_e + V_t^2)^2}$$

$$\Rightarrow Q_e = \frac{[\sqrt{E^2 V_t^2 - X_s^2 P_e^2} - V_t^2]}{X_s}$$

مدار معادل ترانسفورماتور



مدار معادل ساده شده ترانس

$$Z_1^{P.U} = Z_2^{P.U}$$

مدل کلاسیک وابستگی بارها به ولتاژ و فرکانس:

مدل کلاسیک وابستگی بارها به ولتاژ

$$S = \frac{V^2}{Z_{Load}^*}$$

۱- مدل امپدانس: بار به صورت یک امپدانس ثابت مدل می شود.

$$S = V \cdot I_{Load}^*$$

۲- مدل جریان ثابت: جریان بار ثابت در نظر گرفته می شود. مثل بارهای الکترونیکی

$$P_{Load} = \text{constant}$$

۳- مدل توان ثابت: توان های اکتیو و راکتیو مصرفی ثابت می شود.

$$Q_{Load} = \text{constant}$$

$$(ZIP) P = P_P + P_I \cdot V + P_Z \cdot V^2$$

مدل کلاسیک بارهای مرکب:

P_P ← مولفه توان ثابت
 $P_I \cdot V$ ← مولفه جریان ثابت
 $P_Z \cdot V^2$ ← مولفه امپدانس

مدل کلاسیک وابستگی بار اکتیو به فرکانس

با استفاده از ضریب میرایی نرژان وابستگی بار به فرکانس را مدل سازی می کنیم. ضریب میرایی اکتیو کل می ترم $D = \frac{\Delta P_{Load}}{\Delta F_{sys}} \frac{\mu W}{Hz}$

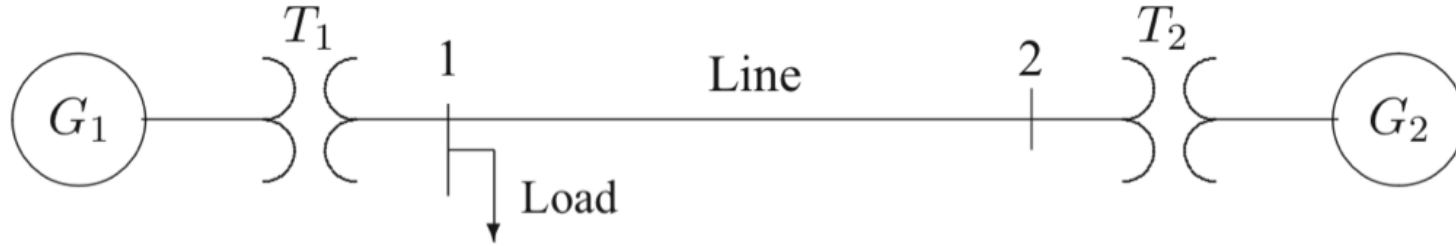
برای شبکه ایران $\Delta F = F - F_0$

$$P_{Load} = P_{Load0} + D \cdot \Delta F \quad D = 600 - 800 \frac{\mu W}{Hz}$$

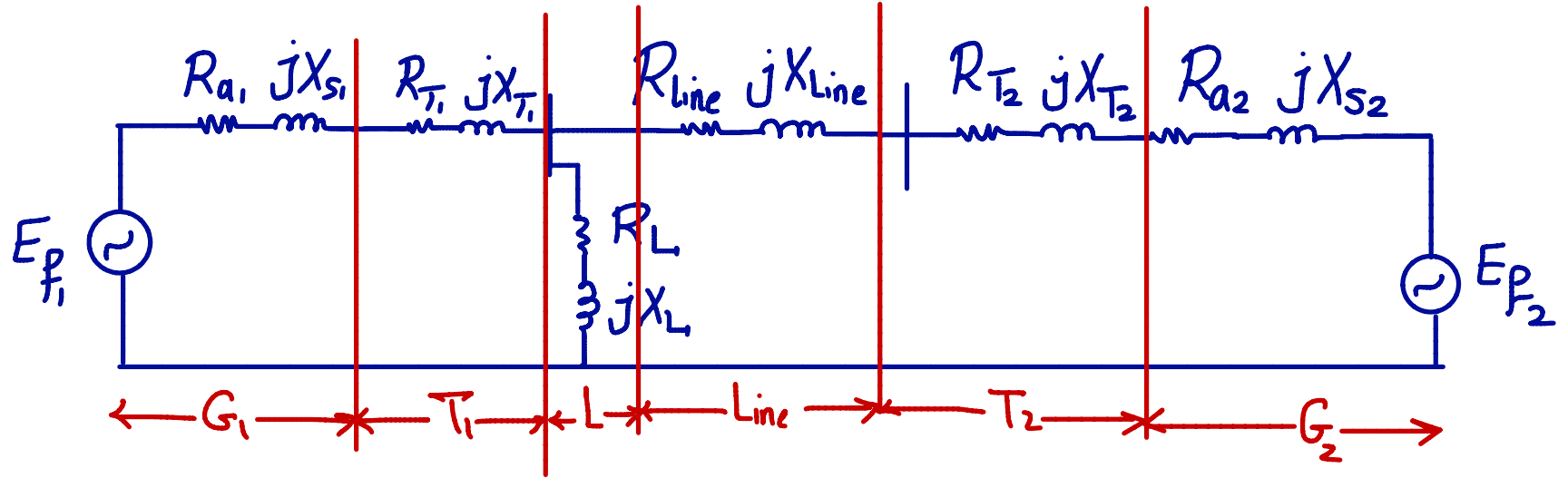
بارهای القایی جنبه بارهای حساس به فرکانس و بهائنه که با افزایش فرکانس توان مصرفی آنها افزایش می یابد و با کاهش فرکانس، توان مصرفی کاهش می یابد.

دیاگرام امپدانس سیستم های قدرت. Impedance diagram.

دیاگرام تک خطی



دیاگرام امپدانس

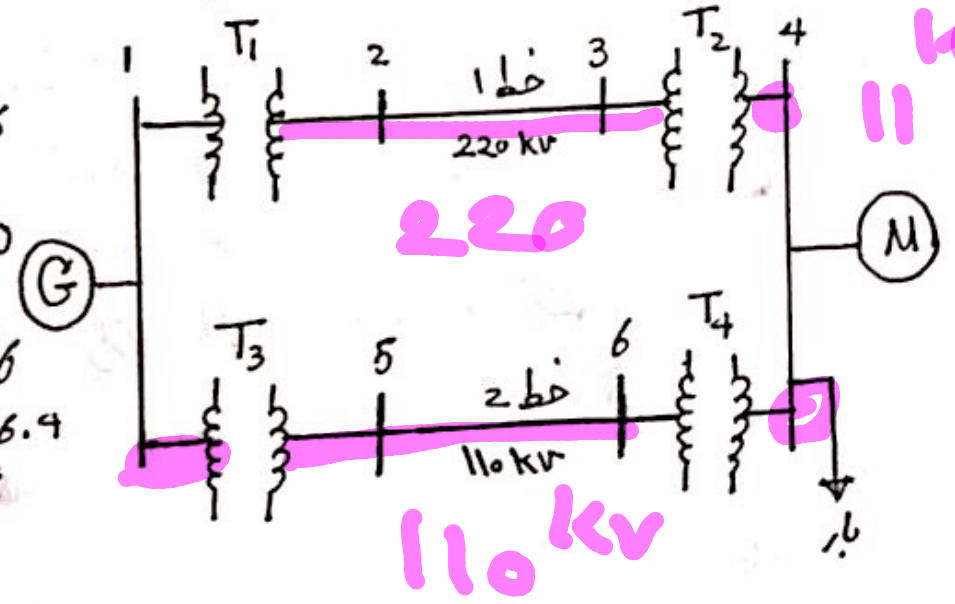


$$Z_{pu}^{new} = Z_{pu}^{old} \frac{S_B^{new}}{S_B^{old}} \left(\frac{V_B^{old}}{V_B^{new}} \right)^2$$

کل: $S_b = 1000 \text{ MVA}$

$V_b = 22 \text{ kV}$ درت ریزاقر. نامس امپانس اربا با تهای امپانس کت من امپانس بار بر حسب پروفیت رسم کنند.

- G: 90 MVA 22 kV $X = 1.18$
- T₁: 50 MVA 22/220 kV $X = 1.10$
- T₂: 40 MVA 220/110 kV $X = 1.6$
- T₃: 40 MVA 22/110 $X = 1.64$
- T₄: 40 MVA 110/11 kV $X = 1.8$



M: 66.5 MVA 10,45 kV $X = 1.18.5$

بار سه فاز در شین 4 قدرت 57 MVA، ادر ضریب قدرت 0.6 پس فاز و بار نشانه 10.45 kV در اینت رسم کنند. خطوط ادر 2 مترتیب دارای

رانتس 48.4Ω ، 65.43Ω رسم کنند.

$$\frac{V_{B1}}{V_{B2}} = a \Rightarrow T_1: V_{B2} = 22 \times \frac{220}{22} = 220 \text{ kV}$$

G_1 :	90 MVA	20 kV	$X = 9\%$
T_1 :	80 MVA	20/200 kV	$X = 16\%$
T_2 :	80 MVA	200/20 kV	$X = 20\%$
G_2 :	90 MVA	18 kV	$X = 9\%$
Line:		200 kV	$X = 120 \Omega$
Load:		200 kV	$S = 48 \text{ MW} + j64 \text{ Mvar}$

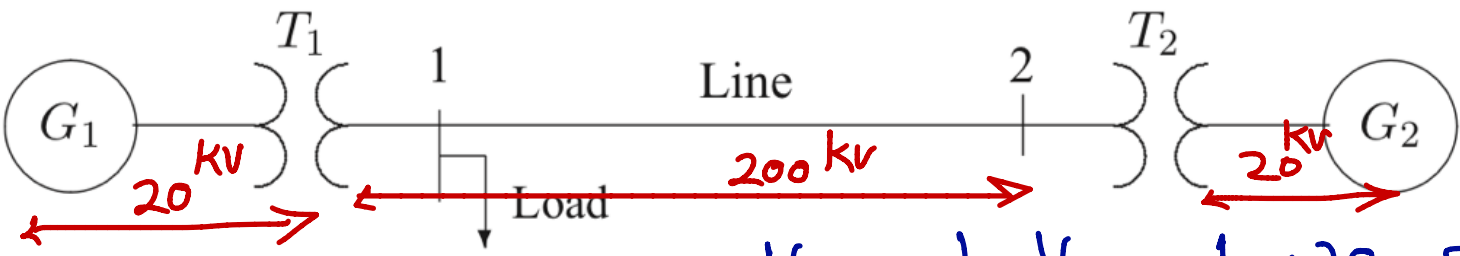
مثال نمایش امپدانس سیم قدرت نشان داده شده که نامی

امپدانس خارج بر حسب P.u در مبنای 100 MVA است

رسم نمائید. ولتاژ 200 kV را به عنوان ولتاژ پایه

انتخاب نمائید. توان به فاز و معادری نامی

ولتاژ خط به خط در زیر داده شده است.



ت پایه 1 $V_{b1} = 20 \text{ kV} \Rightarrow V_{b2} = \frac{1}{a_{T1}} V_{b1} = 10 \times 20 = 200 \text{ kV}$

ت پایه 2 : $V_{b1} = 200 \text{ kV} \Rightarrow V_{b2} = \frac{1}{a_{T2}} V_{b1} = 0.1 \times 200 = 20 \text{ kV}$

$$X_{G1}^{P.u} = 0.09 \cdot \left(\frac{20}{20}\right)^2 \cdot \left(\frac{100}{90}\right) = 0.1 \text{ p.u}$$

$$X_{T2}^{P.u} = 0.2 \cdot \left(\frac{100}{80}\right) = 0.25 \text{ p.u}$$

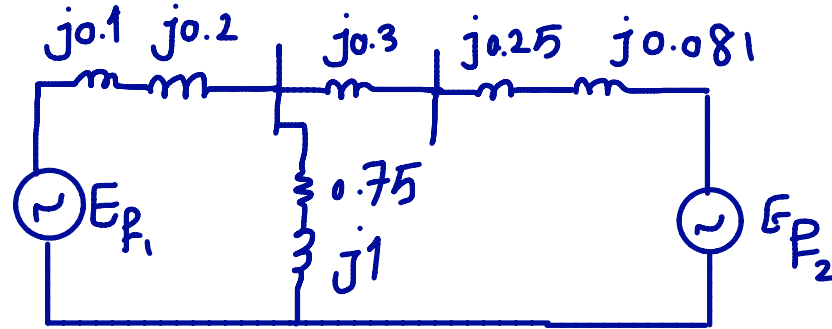
$$X_{G2}^{P.u} = 0.09 \cdot \left(\frac{18}{20}\right)^2 \cdot \left(\frac{100}{90}\right) = 0.08$$

برای خط $Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{200^2}{100} = 400 \Omega$

$$X_{T1} = 0.16 \cdot \left(\frac{100}{80}\right) = 0.2 \text{ p.u}$$

$$X_{p.u} = \frac{120}{400} = 0.3 \text{ p.u}$$

$$Z = \frac{|V|^2}{P - jQ} = \frac{200^2}{48 - j64} = 300 + j400 \quad Z_{p.u} = \frac{300 + j400}{400} = 0.75 + j1$$



$T_3, T_4 : V_{B2} = 22 \times \frac{110}{22} = 110 \text{ kV} \Rightarrow V_{B5} = V_{B6} = 110 \text{ kV}$

$G : X = 0.18 \left(\frac{100}{90} \right) = 0.2 \text{ pu}$

$T_3 : X = 0.064 \left(\frac{100}{70} \right) = 0.16 \text{ pu}$

$T_1 : X = 0.1 \left(\frac{100}{50} \right) = 0.2 \text{ pu}$

$T_4 : X = 0.08 \left(\frac{100}{40} \right) = 0.2 \text{ pu}$

$T_2 : X = 0.06 \times \left(\frac{100}{4} \right) = 0.15 \text{ pu}$

$M : X = 0.185 \left(\frac{100}{66.5} \right) \times \left(\frac{10.45}{11} \right)^2 = 0.25 \text{ pu}$

$Z_{b1} = \frac{(220)^2}{100} = 484 \Omega$

$Z_{b5} = \frac{(110)^2}{100} = 121 \Omega$

1 $X = \frac{48.4}{484} = 0.1 \text{ pu}$

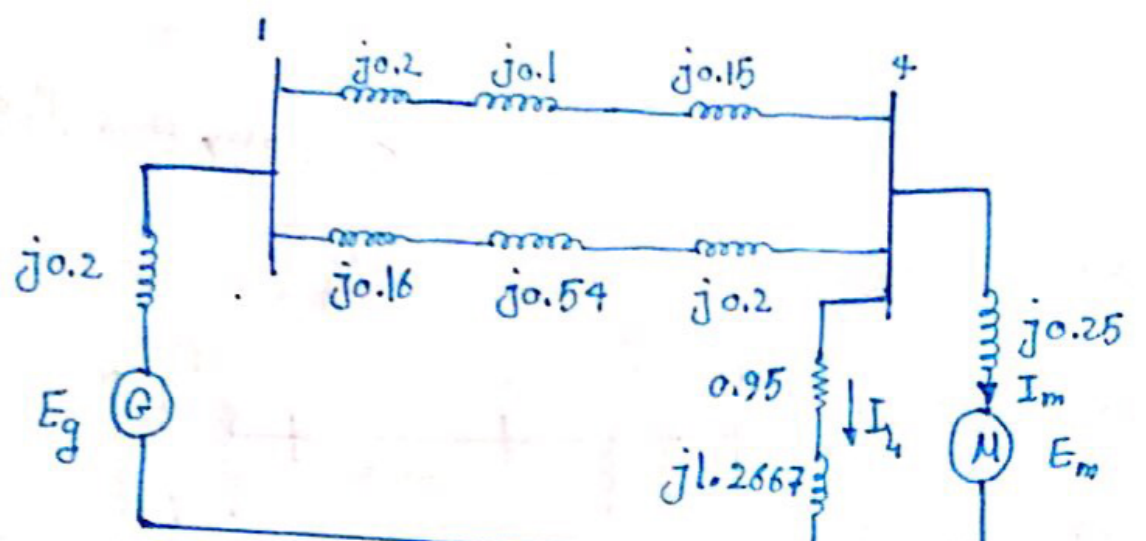
2 $X = \left(\frac{65.43}{121} \right) = 0.54 \text{ pu}$

$\cos \phi = 0.6$ $\angle 53.13^\circ$

$S_{L(3\phi)} = 57 \angle 53.13^\circ \text{ MVA} \Rightarrow Z_L = \frac{V_L^2}{S_{L(3\phi)}^*} = \frac{10.75^2}{57 \angle -53.13^\circ} = 1.1495 + j1.5326$

$Z_{b4} = \frac{11^2}{100} = 1.21 \Omega$

$Z_{L(pu)} = \frac{1.1495 + j1.53267}{1.21} = 0.95 + j1.2667 \text{ pu}$



شال ۴: در شال ۳ موتور مدار کامل با فرض قدرت ۰.۸ مین فاز و ولتاژ پایانه ۱۰.۴۵ kV کار کند

الف) ولتاژ مین ریزاتور (سین ۱) را تعیین نماید.
ب) مقادیر emf داخلی ریزاتور و موتور را بدست آورید.

$$V_4 = \frac{10.45}{11} = 0.95 \angle 0^\circ \text{ pu}, \quad S_m = \frac{66.5}{100} \angle -36.87^\circ \text{ pu}$$

$$I_m = \frac{S_m^*}{V_4^*} = \frac{0.665 \angle 36.87^\circ}{0.95 \angle 0^\circ} = 0.56 + j0.42 \text{ pu}$$

$$I_L = \frac{V_4}{Z_L} = \frac{0.95}{0.95 + j1.2667} = 0.36 - j0.48 \text{ pu}$$

$$I = I_m + I_L = (0.56 + j0.42) + (0.36 - j0.48) = 0.92 - j0.06 \text{ pu}$$

$$X_{11} = \frac{0.45 \times 0.9}{0.45 + 0.9} = 0.3 \text{ pu}$$

$$V_1 = V_4 + Z_{11} I = 0.95 \angle 0^\circ + j0.3(0.92 - j0.06) = 0.968 + j0.276 = 1.015 \angle 15.91^\circ \text{ pu} = 22 \angle 15.91^\circ \text{ kV}$$

ولتاژ پایانه ریزاتور

مقادیر emf داخلی ریزاتور

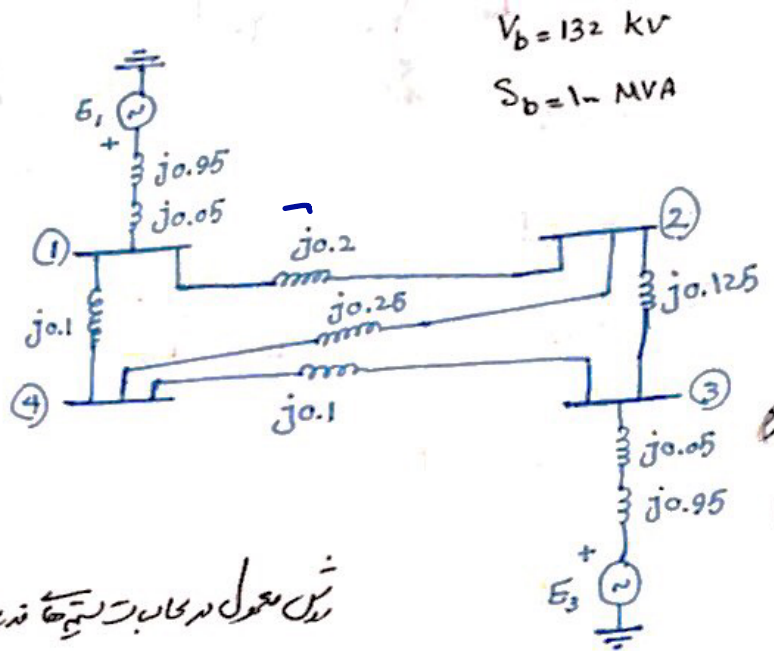
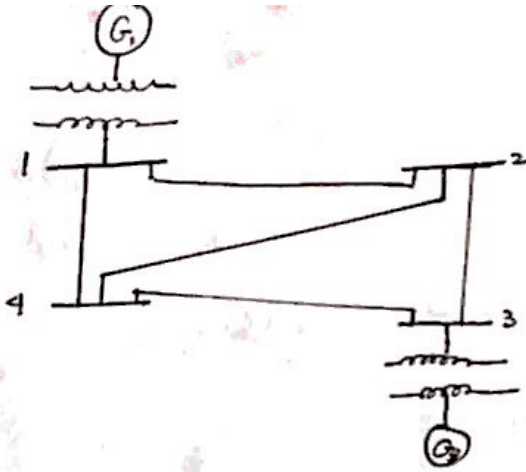
$$E_g = V_1 + Z_g I = 0.968 + j0.276 + j0.2(0.92 - j0.06) = 1.0826 \angle 25.14^\circ \text{ pu}$$

$$E_m = V_4 - Z_m I_m = 0.95 + j0 - j0.25(0.56 + j0.42) = 1.064 \angle -7.56^\circ \text{ pu} = 23.82 \angle 25.14^\circ \text{ pu}$$

فصل پنجم :

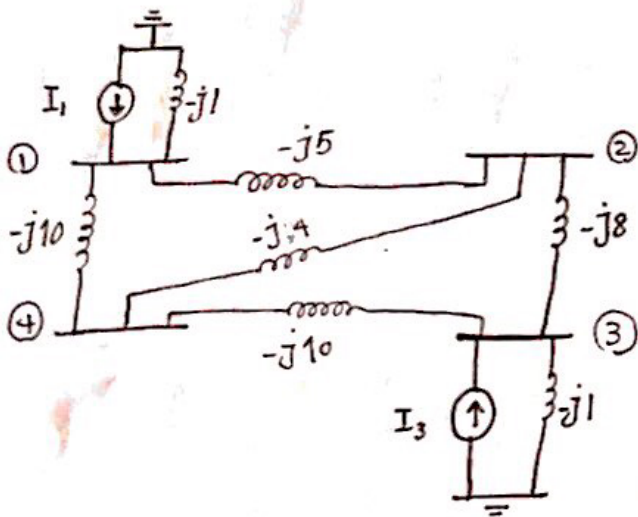
مطالعه بخش بار

ماتریس های امدانسی و ادمیتانس شین



$V_b = 132 \text{ kV}$
 $S_b = 1 \text{ MVA}$

روش معمول در محاسبه پهنای قدرت روش نود Node Analysis است.



$$I_1 = \frac{E_1}{j(0.95+0.05)}, \quad I_3 = \frac{E_3}{j(0.95+0.05)}$$

$$I_1 = V_1(-j1) + (V_1 - V_2)(j5) + (V_1 - V_4)(-j10)$$

$$0 = (V_2 - V_1)(-j5) + (V_2 - V_3)(-j8) + (V_2 - V_4)(-j8)$$

$$I_3 = V_3(-j) + (V_3 - V_2)(-j8) + (V_3 - V_4)(-j10)$$

$$0 = (V_4 - V_1)(-j10) + (V_4 - V_2)(-j4) + (V_4 - V_3)(-j10)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \\ I_3 \\ 0 \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} -16 & 5 & 0 & 10 \\ 5 & -17 & 8 & 4 \\ 0 & 8 & -19 & 10 \\ 10 & 4 & 10 & -24 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

$$I = Y_{bus} V$$

$$I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix}$$

بردار جریان شین (مجموعه ترانسفورماتورها و شینها)
 بردار ولتاژ شین
 بردار توان شین

ماتریس ادمیتانس شین
 Bus Admittance Matrix

ماتریس های ادمیتانس و ادمیتانس شین

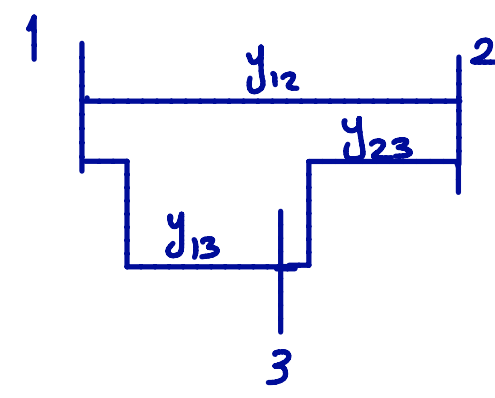
$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

↓
ماتریس ادمیتانس
شین ها

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1}$$

↓
ماتریس ادمیتانس شین ها

Y_{ij} : جمع مقادیر ادمیتانس های عناصری که مستقیماً بین i و j متصل است.
 Y_{ji} : منفی جمع ادمیتانس های که مستقیماً بین i و j قرار دارند.



$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} (Y_{12} + Y_{13}) & -Y_{12} & -Y_{13} \\ -Y_{12} & Y_{12} + Y_{23} & -Y_{23} \\ -Y_{13} & -Y_{23} & Y_{23} + Y_{13} \end{bmatrix}$$

ماتریس Y_{bus} متعارف است.

انواع شین از دید مساله پخش بار

۱- شین اصلی (شین اسک) $\text{Main Bus - slack Bus - Swing Bus}$

شین تناری است برای برقراری تعادل تولیه و مصرف در پیمان کالبات با توجه به کبود تولیه و تلفات انتقالی و راکتور

۲- شین مرجع Reference Bus

شین بازاریه و تناژ همروانرازه و تناژ تک. چون بقیه و تناژها فزایه هانبت بر آن منجیده می شود.

۳- شین های کنترل شده $\text{Regulated buses - Controlled Bus (PV)}$

شین های اندازه و تناژ آن ثابت است معمولاً شین های ژنراتوری بجز شین اول از این نوع هستند.

۴- شین مصرفی یا بار: Load Bus (PQ)

این شین دارای شین های PQ هم مصرف هستند و دارای ژنراتور نمی باشند.

معمولاً شین اسک مرجع را در شبه یک شین در نظر می گیرند.

باس slack در ایران به ذرات که نیروگاه کاردن نینر با آن استفاده می شود.

معادلات پخش بار Load flow equations

درجه‌تین چهارگانه اصل داریم ← P, Q, V, δ

درجه‌تین دوگانه معلوم، دوگانه مجهول است. اگر n تین باشه ←

$\left. \begin{array}{l} 1- \text{ } 2n \text{ معلوم} \\ 2- \text{ } 2n \text{ مجهول} \end{array} \right\} \Rightarrow 2n \text{ معادله نیاز داریم.}$

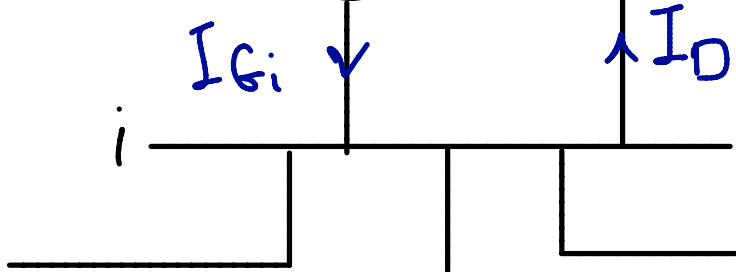
نوع تین	V	δ	P	Q
اسک	معلوم	معلوم	مجهول	مجهول
PV	معلوم	مجهول	معلوم	مجهول
PQ	مجهول	مجهول	مجهول	معلوم

معادله مجهول درجه‌تین را با استفاده از پخش بار به دست می‌آوریم.

معادله بیخس بار:

$$S_{G_i} = P_{G_i} + jQ_{G_i} \text{ (G}_i\text{)}$$

$$S_{D_i} = P_{D_i} + jQ_{D_i}$$



توان لحظه‌ای تزریق $S_i = S_{G_i} - S_{D_i}$

$$S_i = (P_{G_i} - P_{D_i}) + j(Q_{G_i} - Q_{D_i}) = P_i + jQ_i$$

توان الکتریکی تزریق $I_i = I_{G_i} - I_{D_i}$ $P_i = P_{G_i} - P_{D_i}$, $Q_i = Q_{G_i} - Q_{D_i}$

$$S_i = V_i \cdot I_i^* \Rightarrow I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \text{ (I)}$$

(II)

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V_{bus}$$

$$\Rightarrow I_i = Y_{i1} V_1 + Y_{i2} V_2 + \dots + Y_{in} V_n = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

(I)(II) $\Rightarrow \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} V_j + Y_{ii} V_i$

نرم لحظه معادله بیخس بار $V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} V_j \right]$

تسریع کهرایی در الگوریتم گوس سایدل:

تعداد گسرها را برآ حصول کهرایی در روش GS نسبتاً زیاد بوده و با افزایش تعداد گسرها، تعداد گسرها هم افزایش می‌یابد. استفاده از ضریب تسریع کهرایی (α) (Accelerating Factor) باعث افزایش سرعت کهرایی

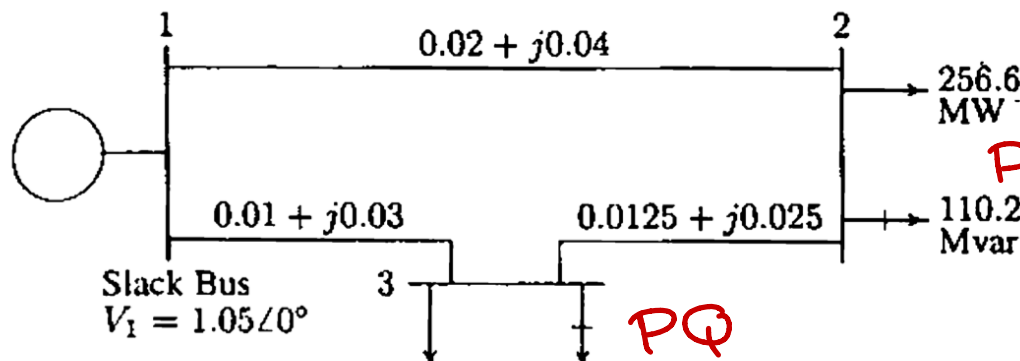
$$\Delta V_i^{(k+1)} = V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)} \quad \text{در الگوریتم}$$

$$V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} + \alpha \Delta V_i^{(k+1)}$$

$$1.4 < \alpha < 1.7$$

خصوصیات روش گوس سایدل GS:

- ۱- کندانس و ضریب جواب کهرایی باشد.
- ۲- با افزایش ابعاد شبکه روش کند و کندتر می‌شود.
- ۳- کهرایی آن به طرف جواب مستقل از نقطه شروع و تفسیر است.



سؤال 1: پخش بار باروش گوس-سایرل
 $S_{base} = 100 \text{ MVA}$
 امپدانس خطوط بر حسب p.u در مبای متحد داده شده است.

$$y_{12} = \frac{1}{0.02 + j0.04} = 10 - j20$$

به همین ترتیب $y_{13} = 10 - j30$, $y_{23} = 16 - j32$

$$S_i = S_{G_i} - S_{D_i}$$

$$S_2^{sch} = -\frac{(256.6 + j110.2)}{100} = -2.566 - j1.102 \text{ pu}$$

$$S_3^{sch} = -\frac{(138.6 + j45.2)}{100} = -1.386 - j0.452 \text{ pu}$$

$$V_2^{(0)} = V_3^{(0)} = 1.4 \angle 0^\circ$$

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 20 - j50 & -10 + j20 & -10 + j30 \\ -10 + j20 & 26 - j52 & -16 + j32 \\ -10 + j30 & -16 + j32 & 26 - j62 \end{bmatrix}$$

$$V_2^{(1)} = \frac{1}{26 - j52} \left[\frac{-2.566 + j1.102}{1.4 \angle 0^\circ} - \left((-10 + j20) \cdot 1.05 + (-16 + j32) \cdot 1.4 \angle 0^\circ \right) \right] = 0.9834 \angle -1.8^\circ$$

$$V_3^{(1)} = \frac{1}{26 - j62} \left[\frac{-1.386 + j0.452}{1.4 \angle 0^\circ} - \left((-10 + j30) \cdot 1.05 + (-16 + j32) \cdot 0.9834 \angle -1.8^\circ \right) \right] =$$

$$V_3^{(1)} = 1.0024 \angle -2.02^\circ$$

$$V_2^{(2)} = \frac{1}{26 - j52} \left[\frac{-2.566 + j1.102}{0.983 \angle 1.81} - \left((-10 + j20) \cdot 1.05 + (-16 + j32) \cdot 1.002 \angle -2.02 \right) \right] = 0.9816 - j0.052$$

$$V_2^{(3)} = 0.9808 - j0.0578$$

$$V_3^{(3)} = 1.0004 - j0.0488$$

$$V_2^{(4)} = 0.9803 - j0.0594$$

$$V_3^{(4)} = 1.0002 - j0.0497$$

$$V_2^{(5)} = 0.9801 - j0.0598$$

$$V_3^{(5)} = 1.0001 - j0.0499$$

$$V_2^{(6)} = 0.9801 - j0.0599$$

$$V_3^{(6)} = 1.0000 - j0.0500$$

$$V_2^{(7)} = 0.9800 - j0.0600$$

$$V_3^{(7)} = 1.0000 - j0.0500$$

The final solution is

$$V_2 = 0.9800 - j0.0600 = 0.98183 \angle -3.5035^\circ \text{ pu}$$

$$V_3 = 1.0000 - j0.0500 = 1.00125 \angle -2.8624^\circ \text{ pu}$$

مطلوبست محاسبه توان های اکتیو و راکتیو شین اسلک

$$P_1 - jQ_1 = V_1^* \cdot \sum_{j=1}^3 Y_{ij} \cdot V_j = 1.05 \cdot [Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2 + Y_{13} V_3] =$$

$$P_1 - jQ_1 = 1.05 \left[(20 - j50) 1.05 + (-10 + j20) \cdot (0.98 - j0.06) + (-10 + j30) \cdot (1 - j0.05) \right]$$

$$P_1 - jQ_1 = 4.095 - j1.89$$

$$P_1 = 4.095 \text{ p.u.} = 409.5 \text{ MW}$$

$$Q_1 = 1.89 \text{ p.u.} = 189 \text{ MVar}$$

مطلوبست محاسبه جریان خطوط و تلفات آنها

$$I_{12} = y_{12}(V_1 - V_2) = (10 - j20)[(1.05 + j0) - (0.98 - j0.06)] = 1.9 - j0.8$$

$$I_{21} = -I_{12} = -1.9 + j0.8$$

$$I_{13} = y_{13}(V_1 - V_3) = (10 - j30)[(1.05 + j0) - (1.0 - j0.05)] = 2.0 - j1.0$$

$$I_{31} = -I_{13} = -2.0 + j1.0$$

$$I_{23} = y_{23}(V_2 - V_3) = (16 - j32)[(0.98 - j0.06) - (1 - j0.05)] = -.64 + j.48$$

$$I_{32} = -I_{23} = 0.64 - j0.48$$

$$\begin{aligned} S_{12} &= V_1 I_{12}^* = (1.05 + j0.0)(1.9 + j0.8) = 1.995 + j0.84 \text{ pu} \\ &= 199.5 \text{ MW} + j84.0 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{21} &= V_2 I_{21}^* = (0.98 - j0.06)(-1.9 - j0.8) = -1.91 - j0.67 \text{ pu} \\ &= -191.0 \text{ MW} - j67.0 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{13} &= V_1 I_{13}^* = (1.05 + j0.0)(2.0 + j1.0) = 2.1 + j1.05 \text{ pu} \\ &= 210.0 \text{ MW} + j105.0 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{31} &= V_3 I_{31}^* = (1.0 - j0.05)(-2.0 - j1.0) = -2.05 - j0.90 \text{ pu} \\ &= -205.0 \text{ MW} - j90.0 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

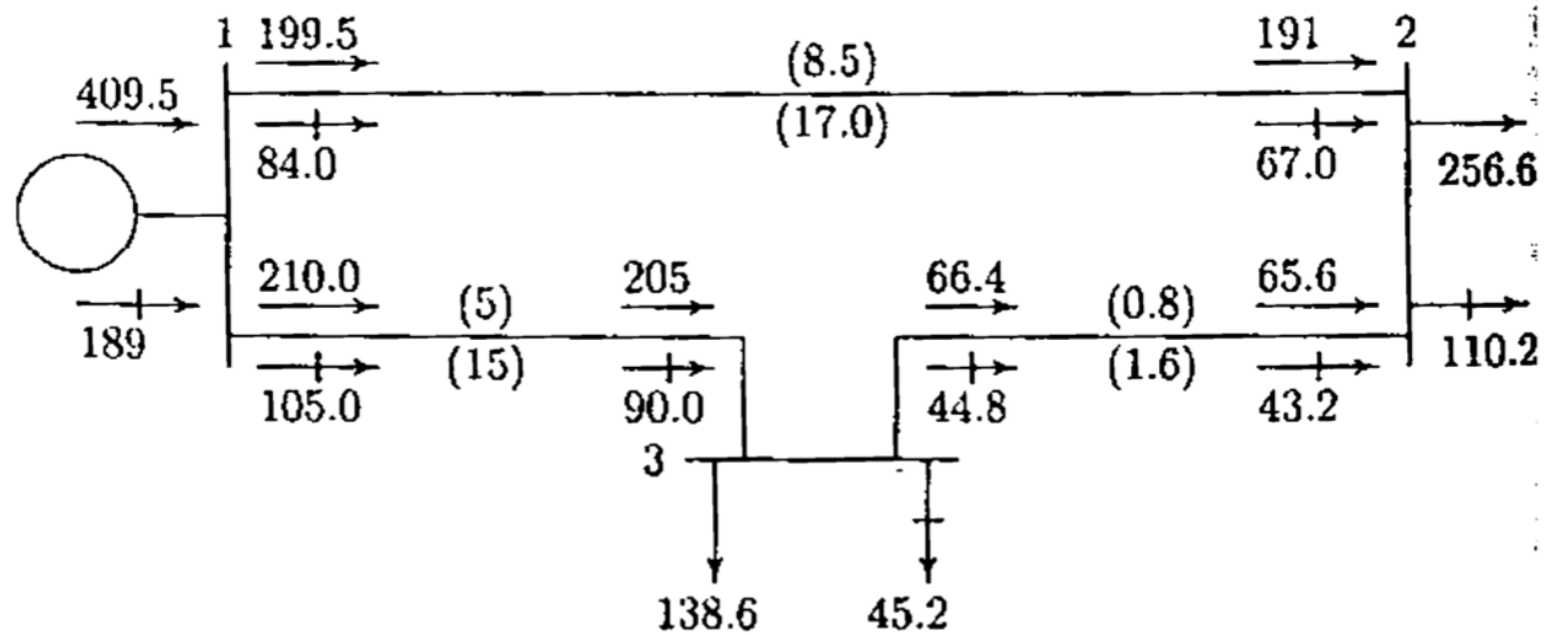
$$\begin{aligned} S_{23} &= V_2 I_{23}^* = (0.98 - j0.06)(-0.656 + j0.48) = -0.656 - j0.432 \text{ pu} \\ &= -65.6 \text{ MW} - j43.2 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{32} &= V_3 I_{32}^* = (1.0 - j0.05)(0.64 + j0.48) = 0.664 + j0.448 \text{ pu} \\ &= 66.4 \text{ MW} + j44.8 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

$$S_{L\ 12} = S_{12} + S_{21} = 8.5 \text{ MW} + j17.0 \text{ Mvar}$$

$$S_{L\ 13} = S_{13} + S_{31} = 5.0 \text{ MW} + j15.0 \text{ Mvar}$$

$$S_{L\ 23} = S_{23} + S_{32} = 0.8 \text{ MW} + j1.60 \text{ Mvar}$$



$$y_{12} = \frac{1}{0.02 + j0.04} = 10 - j29$$

The per unit load at bus 2 is

$$S_2 = -\frac{280 + j60}{100} = -2.8 - j0.60$$

Starting with an initial estimate of $V_2^{(0)} = 1.0 + j0.0$, the voltage at bus 2 computed from (6.28) for three iterations are

$$V_2^{(1)} = \frac{\frac{-2.8 + j0.60}{1.00000 - j0.00000} + (10 - j20)(1)}{10 - j20} = 0.92000 - j0.10000$$

$$V_2^{(2)} = \frac{\frac{-2.8 + j0.60}{0.92000 + j0.10000} + (10 - j20)(1)}{10 - j20} = 0.90238 - j0.09808$$

$$V_2^{(3)} = \frac{\frac{-2.8 + j0.60}{0.90238 - j0.09808} + (10 - j20)(1)}{10 - j20} = 0.90050 - j0.10000$$

(b) Assuming voltage at bus 2 converges to $V_2 = 0.9 - j0.1$, the line flows are computed as follows

$$I_{12} = y_{12}(V_1 - V_2) = (10 - j20)[(1 + j0) - (0.9 - j0.10)] = 3.0 - j1.0$$

$$I_{21} = -I_{12} = -3.0 + j1.0$$

$$\begin{aligned} S_{12} &= V_1 I_{12}^* = (1.0 + j0.0)(3.0 + j1.0) = 3 + j1 \text{ pu} \\ &= 300 \text{ MW} + j100 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{21} &= V_2 I_{21}^* = (0.9 - j0.1)(-3.0 - j1.0) = -2.8 - j0.6 \text{ pu} \\ &= -280 \text{ MW} - j60 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

