

# بررسی سیستم های قدرت و حافظت

سید محمد رضوانی  
دانشگاه فنی و مهندسی اسفراین  
مهر ۹۷

# مراجع

## بررسی سیستم های قدرت - احد کاظمی

- Modern Power System Analysis, Nagrath,  
ترجمه دکتر عابدی
- Power Seystem Analysis , H.Saadat

- بارم بندی
- میان ترم ۶ نمره ۲۸ آبان ۹۷
- پایان ترم ۱۲ نمره
- نظم و کار کلاسی ۲ نمره
- نمره اضافه برای مقاله حداکثر ۳ نمره
- راه های ارتباطی
- پیام رسان سروش : @smr2010
- پست الکترونیکی : [smr2010@gmail.com](mailto:smr2010@gmail.com)
- وب سایت : <http://rezvani.professora.ir>

# فهرست مطالب

- (1) مروری بر کلیات ساختار سیستم قدرت
- (2) مفاهیم مقدماتی و یاد آوری کمیت های الکتریکی
- (3) محاسبه پارامترهای خطوط انتقال و توزیع
- (4) مدلسازی و عملکرد خطوط انتقال و توزیع
- (5) مدل سازی ژنراتور، ترانس و بارهای مصرفی
- (6) ماتریس های امپدانس و ادمیتانس شبکه
- (7) پخش بار
- (8) شبکه های توزیع انرژی
- (9) حفظاًت در سیستم های قدرت
- (10) توزيع اقتصادی بار

# فصل اول

## مروری بر ساختار سیستم قدرت

# فصل اول: مروری بر ساختار سیستم قدرت

- مقدمه
- تعریف سیستم قدرت
- اجزای سیستم قدرت
- هدف از تجزیه سیستم قدرت
- ساختار صنعت برق
- حفاظت و کنترل سیستم قدرت
- سیستم ها قدرت آینده

# مقدمه

- اهمیت انرژی الکتریکی
  - کنترل آسان
  - سهولت در انتقال
  - سهولت در تبدیل به انواع دیگر انرژی
  - آلودگی محیط زیست کمتر
- تاریخ پیدایش سیستم قدرت

در سال ۱۸۸۲ با ساخت اولین زنراتور DC توسط توماس ادیسون شبکه DC ایجاد و انرژی تولیدی این ژنراتورها از طریق کابل های زمینی به بارهای روشنایی انتقال داده شد.

با اختراع موتور القایی و ترانسفورماتور در اواخر دهه ۱۸۸۰، سیستم AC جایگزین سیستم DC گردید.

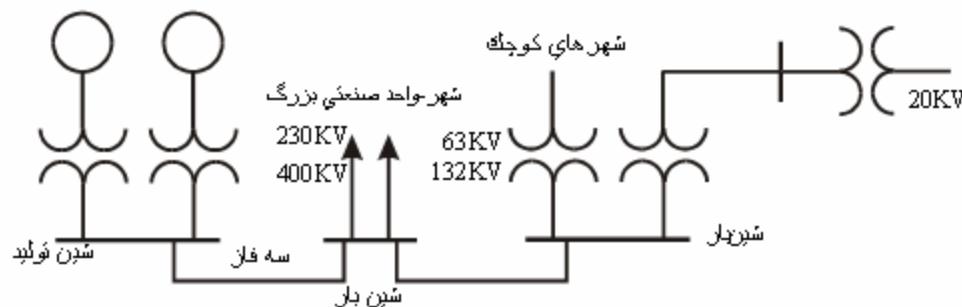
# سیستم قدرت

- به مجموعه اجزایی که وظیفه تولید، انتقال و توزیع انرژی را در بین مصرف کننده ها بر عهده دارند سیستم قدرت الکتریکی گفته می شود.
- با توجه به اینکه سیستم قدرت سیستمی هزینه بردار می باشد و در این سیستم امکان ریسک کمتری وجود دارد لذا باید این سیستم را با استفاده از نرم افزارهای مختلف شبیه سازی نموده و آنرا تجزیه و تحلیل کرد.
- هدف از بررسی سیستم قدرت در واقع مشخص نمودن و بدست اوردن مقادیری برای یکسری از کمیت های الکتریکی می باشد تا عملکرد سیستم قدرت در شرایط کاری مختلف بهینه گردد.
- ولتاژ و جریان دو نمونه از کمیت های الکتریکی هستند که باید تعیین شوند.
- به منظور تحلیل سیستم قدرت، آن را به یک مدار الکتریکی تبدیل کرده و سیس مدار حاصله را تحلیل خواهیم نمود.

# سیستم قدرت

- بخش های اصلی یک سیستم قدرت
  - تولید
  - انتقال و توزیع
  - پست ها و ترانسفورماتورها
  - بارها و مصرف کننده ها

نفرانور سنکرون



# سیستم قدرت - تولید

- اولین و اصلی ترین بخش یک سیستم قدرت بخش تولید و یا نیروگاه ها هستند.
- از نیروگاه ها برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می شود.
- انرژی الکتریکی را می توان به روش های مختلف و در نیروگاه های مختلف تولید نمود
  - نیروگاه های آبی
  - نیروگاه های بخار یا حرارتی
  - نیروگاه گازی
  - نیروگاه های سیکل ترکیبی
  - نیرو گاه هسته ای
  - نیرو گاه های خورشیدی
  - نیروگاه های بادی
  - و ....

## سیستم قدرت - تولید

- نیروگاه های متداول معمولاً دارای بخش های مختلف ذیل هستند :
  - توربین : محرک اولیه
  - گاورنر : وظیفه کنترل فرکانس و توان اکتیو
  - زنراتور سنکرون : وظیفه تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی را بر عهده دارد.
  - سیستم تحریک : برای کنترل ولتاژ و توان راکتیو ژنراتور

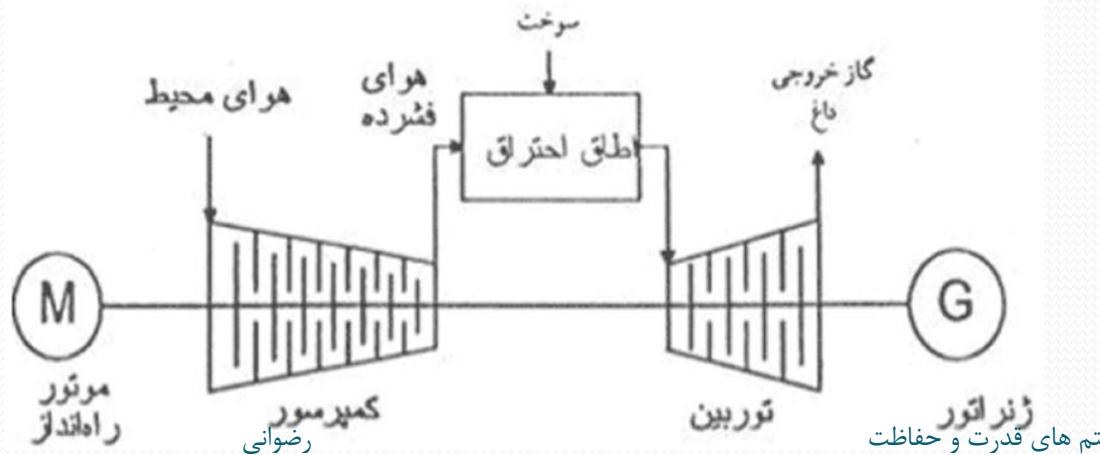
# سیستم قدرت - تولید

- نیروگاه آبی
  - یکی از مزایای این نیروگاه‌ها این است که هیچ سوخت مصرفی جهت تولید برق استفاده نمی‌کنند و در نتیجه آلودگی زیست محیطی ندارند. در ایران دو نیروگاه کارون با ظرفیت تولید ۱۰۰۰ مگاوات و نیروگاه دز با ظرفیت ۵۰۰ مگاوات از نیروگاه‌های مهم می‌باشند.
- نیروگاه بخار
  - این نیروگاه به عنوان نیروگاه پایه بوده و از انرژی فسیلی مانند مازوت، نفت و .. به عنوان سوخت استفاده می‌شود.
  - با استفاده از حرارت حاصل از سوزاندن سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های بخار، آب به بخار شده و بخار داغ وارد توربین شده و با حرکت توربین، زنراتور متصل به توربین انرژی الکتریکی را تولید می‌کند.
  - نیروگاه بخار نکا ۴ واحد بخار ۴۴۰ مگاواتی دارد. نیروگاه‌های رامین اهواز و شهریبد رجایی قزوین نیز از بزرگ‌ترین نیروگاه‌های بخار کشور می‌باشند.

# سیستم قدرت - تولید

## • نیروگاه گازی

- در این نیروگاه ها هوای اطراف از طریق کمپرسورها مکیده شده و با استفاده از سوخت های فسیلی حرارت داده شده و این هوای داغ و پرفشار با سرعت بالا وارد توربین گازی شده و باعث حرکت توربین شده و در نتیجه ژنراتور انرژی الکتریکی تولد خواهد نمود.
- نیروگاه گازی شیروان در حال حاضر ۶ واحد گازی ۱۵۹ مگاواتی دارد.



بررسی سیستم های قدرت و حفاظت

# سیستم قدرت - تولید

- مقایسه نیروگاه های مختلف

آودگی هوا	سمه در تولید	سرعت وورد بهمدار	هزینه احداث	هزینه سوخت	وابستگی به شرایط جفرافیایی	نوع نیروگاه
-	کم	سریع	بالا	-	دارد	آبی
زیاد	زیاد	کم	متوسط	بالا	-	حرارتی
کم	کم	سریع	بالا	بالا	-	گازی

## سیستم قدرت - ترانسفورماتورها

- برای تبدیل سطح ولتاژ در سیستم های الکتریکی AC استفاده می شود
- قدرت انتقالی ثانویه تقریبا برابر با قدرت اولیه می باشد (به جز تلفات ترانس)
- در نیروگاه ها برای افزایش سطح ولتاژ و در شهرها و نزدیک بارها برای کاهش سطح ولتاژ استفاده می شود.

# سیستم قدرت – خطوط انتقال و توزیع

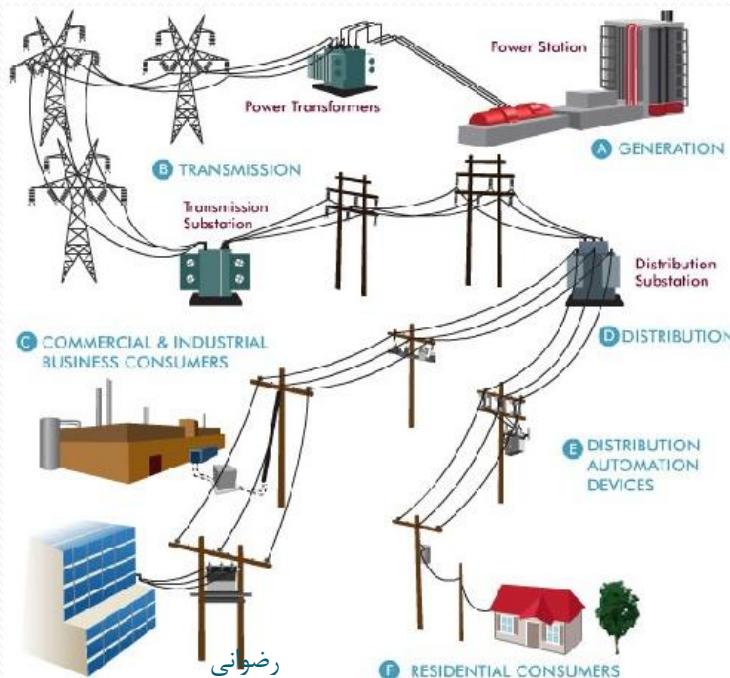
- با هدف کاهش تلفات انرژی و انتقال توان های بالا از خطوط انتقال با سطوح ولتاژ بالا استفاده می شود.
- شبکه فشار ضعیف ۲۲۰ ولت تکفار یا ۳۸۰ ولت سه فاز LV
- شبکه فشار متوسط : خطوط ۲۰ کیلوولت MV
- شبکه فشار قوی : ۱۳۲ کیلوولت ، ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت HV
- HVDC: از خطوط انتقال ولتاژ بالای DC در مسافت های طولانیف و یا اتصال دو کشور با فرکانس مختلف استفاده می شود.

## سیستم قدرت - بارها

- مصرف کننده ها و یا بارها انرژی الکتریکی را گرفته و آنرا به انرژی مورد نظر خودشان تغییر می دهند.
- بارهای خانگی - مسکونی
- بارها یا مصرف کننده های عمومی
- بارهای تجاری
- بارهای صنعتی یا تولید
- بارهای کشاورزی

# ساختار صنعت برق

- سیستم قدرت اولیه : نیروگاه مستقل
- در این سیستم هر نیروگاه وظیفه تأمین برق منطقه ای خاص را بر عهده داشته است. در نتیجه قابلیت اطمینان ان پایین می باشد.



- سیستم قدرت کنونی : شبکه برق سراسری
- امروزه نیروگاه ها و خطوط انتقال به هم متصل شده و یک شبکه سراسری را به وجود آورده اند. و باعث افزایش ضربی اطمینان، کاهش سطح رزرو نیروگاه ها و تبادیل انرژی الکتریکی بین نیروگاهها و یا کشورها شده اند.

# ساختار صنعت برق

- سیستم قدرت آینده :
- ریز شبکه ها و شبکه های هوشمند و انرژی های تجدید پذیر



# حفظه و کنترل سیستم قدرت

- برای کنترل و حفاظت سیستم قدرت از تجهیزات ذیل استفاده می شود :
- کلیدهای قطع سکسیونرها
- مدار شکن ها – دزنکتورها
- فیوزها
- برقگیرها



## فصل دوم

### مفاهیم مقدماتی و یاد آوری کمیت های الکتریکی

## فصل دوم: یادآوری کمیت های الکتریکی

- یادآوری نمایش فازوری
- مفهوم توان در مدار های تکفاز
- سیستم سه فاز
- اتصال ستاره و مثلث
- توان در سیستم سه فاز
- پریونیت کردن

# نمایش فازوری

$$A(t) = A_{\max} \cos(\omega t + \varphi)$$

$$A_{\text{rms}} = \frac{A_{\max}}{\sqrt{2}}$$

که  $A_{\max}$  مقدار ماکزیمم،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای و  $\varphi$  فاز اولیه موج می‌باشد.

مثال: اگر معادلات ولتاژ و جریان یک المان مدار به صورت  $V = 141.4 \cos(\omega t + 30^\circ)$  و  $I = 7.07 \cos \omega t$  باشند، مقادیر ماکزیمم و مؤثر ولتاژ و جریان را به دست آورید.

$$V_{\max} = 141.4 \Rightarrow V_{\text{rms}} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{141.4}{\sqrt{2}} = 100V$$

$$I_{\max} = 7.07 \Rightarrow I_{\text{rms}} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{7.07}{\sqrt{2}} = 5A$$

برای راحتی در محاسبات و نوشتن، هر عبارت سینوسی و کسینوسی را با یک عدد و یک زاویه نشان می‌دهیم، که به این صورت نمایش، نمایش فازوری می‌گوییم.

$$V = V_{\max} \cos(\omega t + \theta_V)$$

نمایش فازوری

$$V = V_{\text{rms}} \angle \theta_V$$

$$V = 220\sqrt{2} \cos(120t + 60^\circ)$$

نمایش فازوری

$$V = 220 \angle 60^\circ$$

# فازورهای الکتریکی

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

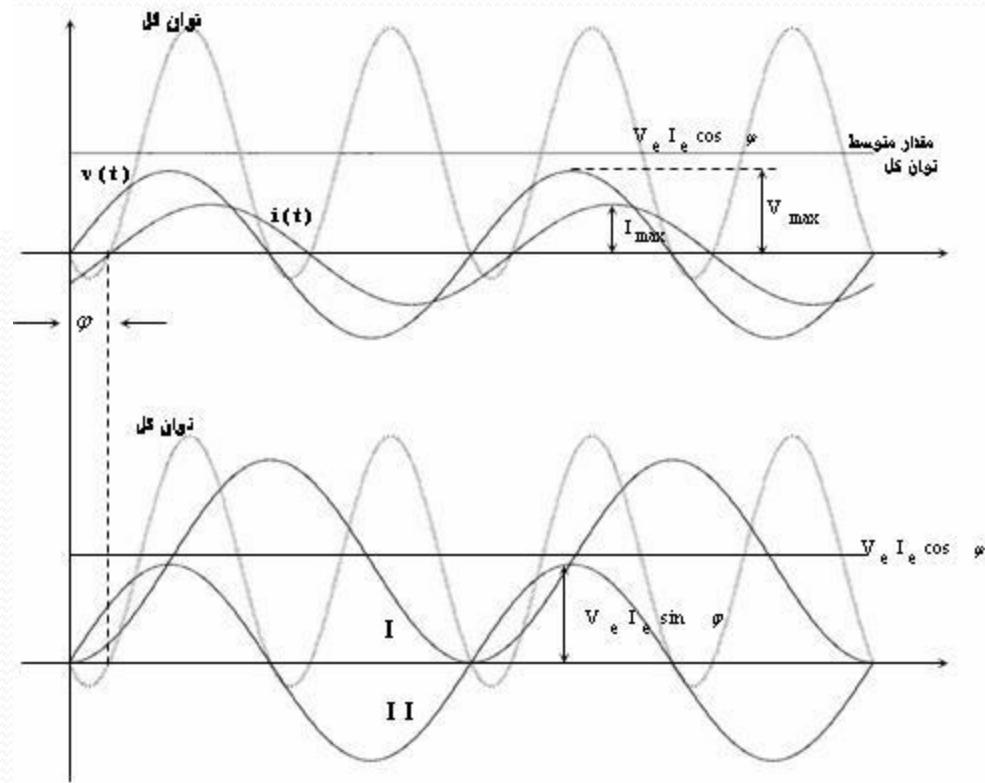
$$i(t) = I_{\max} \sin(\omega t - \varphi)$$

$\varphi \leftarrow$  زاویه اختلاف فاز

$\leftarrow$  فرکانس زاویه ای  $\omega = 2\pi f$

$$\text{توان کل} = p(t) = v(t).i(t)$$

- شبکه تکفاز



بررسی سیستم های قدرت و حفاظت

# مروری بر روابط ولتاژ، جریان، امپدانس و ادمیتانس

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_v) = \sqrt{2} V_{rms} \cos(\omega t + \theta_v) \quad v = V_{rms} \prec \theta_v = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \prec \theta_v = V_{rms} e^{j\theta_v}$$

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_I) = \sqrt{2} I_{rms} \cos(\omega t + \theta_I) \quad i = I_{rms} \prec \theta_I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \prec \theta_I = I_{rms} e^{j\theta_I}$$

$Z = \frac{V}{I} = \frac{V_{rms} \prec \theta_v}{I_{rms} \prec \theta_I} =  Z  \prec \theta_Z$	$Z =  Z  \prec \theta_Z =  Z  \cos \theta_Z + j  Z  \sin \theta_Z$	$= Z$ $= Y$ $= R$ $= X$ $= G$ $= B$
$\theta_Z = \theta_v - \theta_I$	$Z = R + jX$	$ Z  = \sqrt{R^2 + X^2}$

$$Y = \frac{1}{Z} = |Y| \prec \theta_Y$$

$$Y = |Y| \cos \theta_Y + j |Y| \sin \theta_Y$$

رضوانی

$$Y = G + jB$$

بررسی سیستم های قدرت و حفاظت

$$|Y| = \sqrt{G^2 + B^2}$$

# مفهوم توان در سیستم تکفاز

$$p(t) = v(t)i(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_V) \times I_m \cos(\omega t + \theta_I)$$

$$\text{Cos}A \times \text{Cos}B = \frac{1}{2} [\text{Cos}(A - B) + \text{Cos}(A + B)]$$

با توجه به رابطه می توان نوشت :

$$p(t) = \frac{1}{2} V_m I_m [\text{Cos}(\theta_V - \theta_I) + \text{Cos}(2\omega t + \theta_V + \theta_I)]$$

از روابط ذیل برای ساده سازی استفاده می کنیم

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Cos}(2\omega t + \theta_V + \theta_I) = \text{Cos}[2(\omega t + \theta_V) - (\theta_V - \theta_I)]$$

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$\theta = \theta_V - \theta_I$$

$$p(t) = V_{rms} I_{rms} \cos \theta [1 + \cos 2(\omega t + \theta_V)] + V_{rms} I_{rms} \sin \theta \cos 2(\omega t + \theta_V)$$

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos \theta$$

**P:** توان اکتیو متوسط

متوسط توانی که توسط مولفه اهمی بار جذب می شود و واحد آن وات W می باشد.

$$Q = V_{rms} I_{rms} \sin \theta$$

**Q:** توان راکتیو متوسط

مولفه ای از توان که در سیستم AC به اجبار همراه توان اکتیو عبور می کند و واحد آن ولت-آمپر راکتیو و یا وار VAR می باشد.

$$S = V_{rms} I_{rms}$$

**S:** توان ظاهری

حاصلضرب مقدار موثر جریان در مقدار موثر ولتاژ را گویند و واحد آن ولت امپر (VA) می باشد.

## PF: ضریب قدرت یا ضریب توان

به نسبت توان واقعی (اکتیو) به توان ظاهری گویند و مقداری بین صفر تا یک دارد توان واقعی توانایی یک مصرف کننده در تبدیل انرژی الکتریکی به دیگر شکل های انرژی را نشان می دهد ولی توان ظاهری در اثر وجود اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان پدید می آید.

مقدار آن برابر با  $\cos \theta$  اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان می باشد.

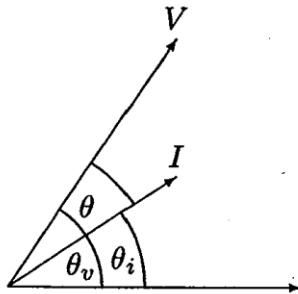
$$PF = \cos \theta$$

اگر  $0 < \theta$  باشد ضریب توان پسفاز بوده و اگر  $0 < \theta$  باشد ضریب توان پیشفاز می باشد.

### چند نکته در مورد ضریب قدرت

- ۱- اگر جریان از ولتاژ عقب تر باشد آنگاه مصرف کننده سلفی بوده و توان راکتیو مصرف می کند و ضریب توان پسفاز می باشد.  $Q$  مثت خواهد بود.
- ۲- اگر جریان از ولتاژ جلوتر باشد مصرف کننده یا بار خازنی بوده و توان راکتیو تولید می کند و ضریب توان پیشفاز می باشد.  $Q$  منفی خواهد بود.
- ۳- اگر جریان با ولتاژ همفاز باشد بار مقاومتی و بوده و توان راکتیو صفر خواهد بود.

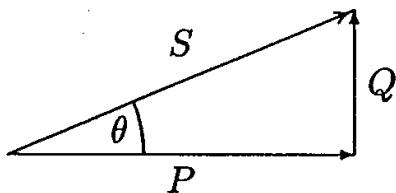
# توان ظاهری یا مختلط



- جریان و ولتاژ در شکل مقابل نمایش داده شده اند.

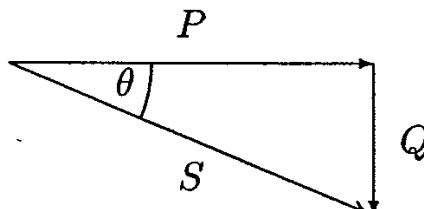
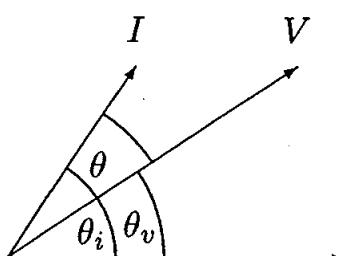
$$V = |V| \angle \theta_v \text{ and } I = |I| \angle \theta_i$$

- توان ظاهری و دیاگرام توان در این بار سلفی (پس فاز) به صورت مقابل می باشد.



$$\begin{aligned} VI^* &= |V||I| \angle \theta_v - \theta_i = |V||I| \angle \theta \\ &= |V||I| \cos \theta + j|V||I| \sin \theta \\ S &= VI^* = P + jQ \quad |S| = \sqrt{P^2 + Q^2}, \end{aligned}$$

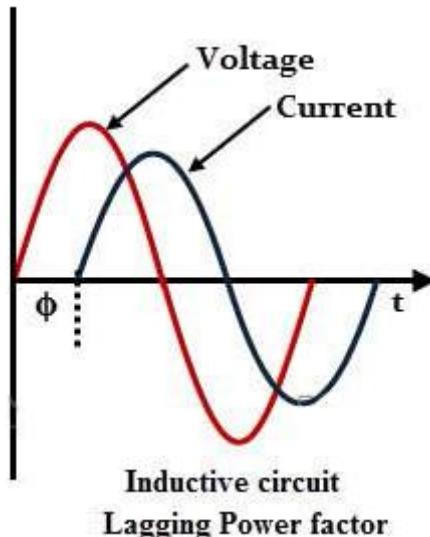
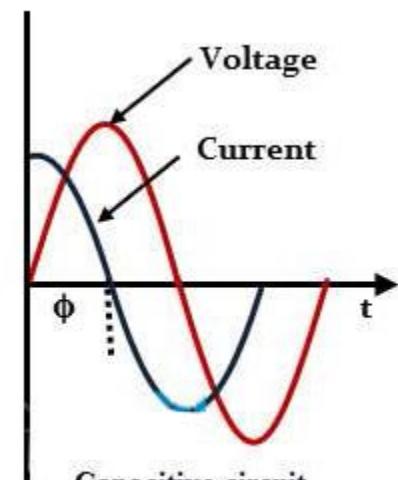
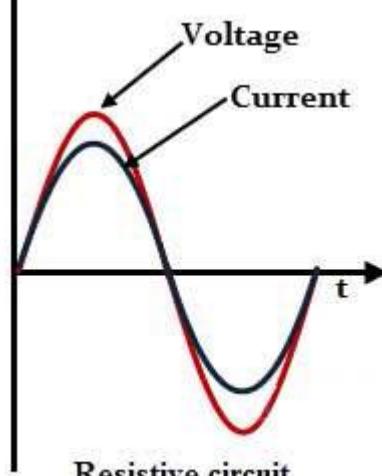
- در صورتیکه بار خازنی یا پیش فاز باشد نمودار توان به شکل ذیل می باشد



$$S = VI^* = ZII^* = R|I|^2 + jX|I|^2$$

$$S = VI^* = \frac{VV^*}{Z^*} = \frac{|V|^2}{Z^*}$$

# مفهوم پیش فاز و پس فاز



- ضریب قدرت واحد – بار مقاومتی

**Lag** فاز

- بار سلفی

● ولتاژ از جریان جلوتر

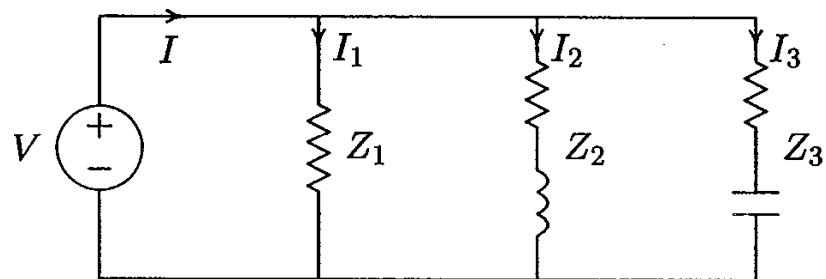
**Lead** فاز

- بار خازنی

● ولتاژ از جریان عقب تر

# بالانس توان مختلط

- توان ظاهری در مداری با شکل مقابل برابر با توان ظاهری تک تک بار ها می باشد.



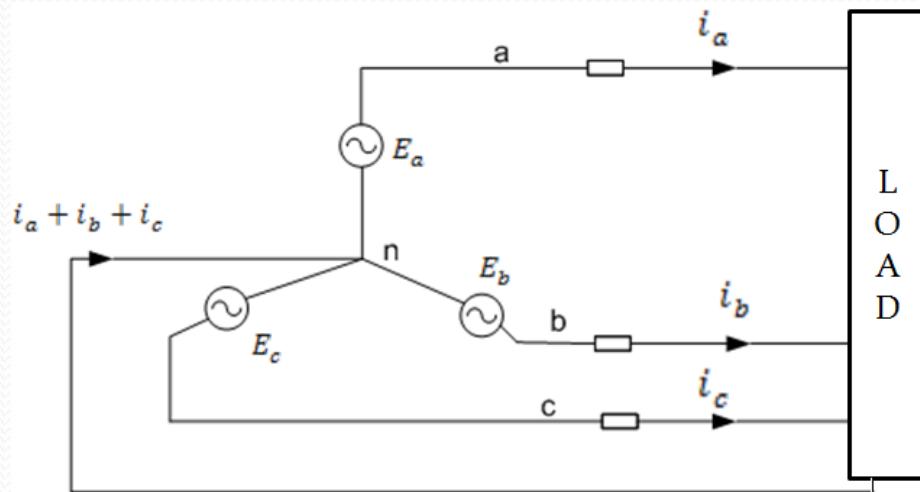
$$S = VI^* = V[I_1 + I_2 + I_3]^* = VI_1^* + VI_2^* + VI_3^*$$

توان کل برای یک سیستم سه‌فاز در حالت کلی برابر مجموع توان‌های سه‌فاز می‌باشد. رابطه توان برای یک سیستم سه‌فاز برابر است با

$$P_{3\phi} = 3V_\phi I_\phi \cos \theta = \sqrt{3}V_L I_L \cos \theta$$

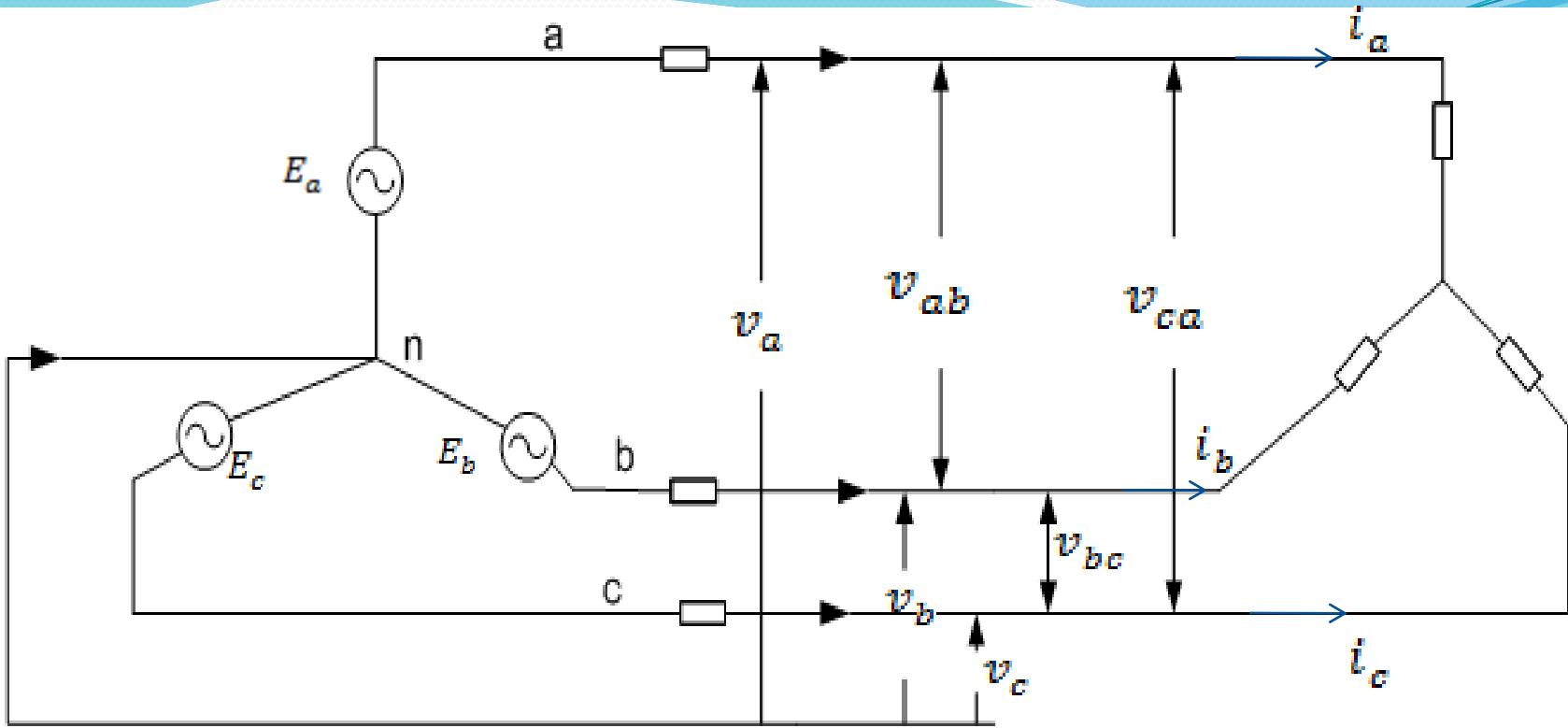
در رابطه بالا  $\theta$  اختلاف فاز ولتاژ و جریان یک فاز می‌باشد.

مدار سه‌فاز متعادل یعنی مداری که مجموع ولتاژها و مجموع جریان‌های سه‌فاز صفر است.



$$i_a + i_b + i_c = 0$$

$$v_a + v_b + v_c = 0$$

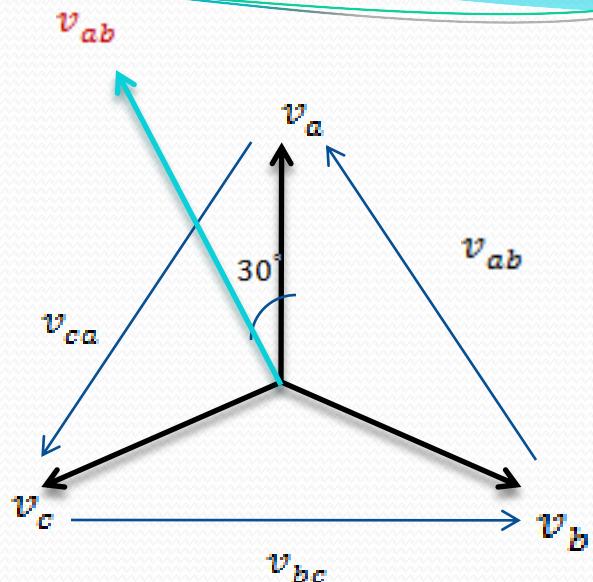
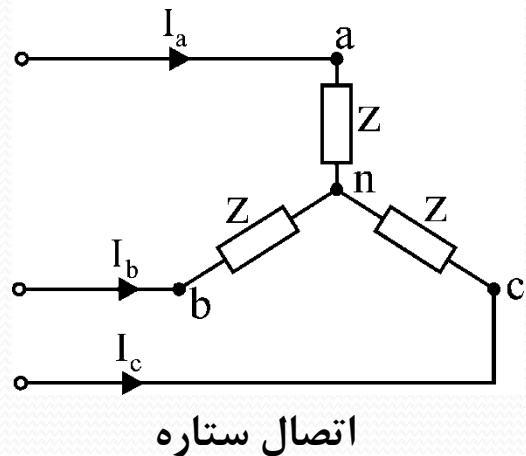


$v_a, v_b, v_c \rightarrow$  phase voltages

$v_{ab}, v_{bc}, v_{ca} \rightarrow$  line voltages

$i_a, i_b, i_c \rightarrow$  line currents

## اتصال ستاره



$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn}$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn}$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an}$$

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

$$V_{bc} = \sqrt{3}V_b \angle 30^\circ$$

$$V_{ca} = \sqrt{3}V_c \angle 30^\circ$$

مثال: برای یک بار سه‌فاز متعادل با اتصال ستاره روابط ولتاژ و جریان به قرار زیر است. امپدانس بار کدام است؟

$$V_{ab} = 24\sqrt{6} \sin(100t + 60^\circ)$$

$$I_{an} = 3\sqrt{2} \cos(100t)$$

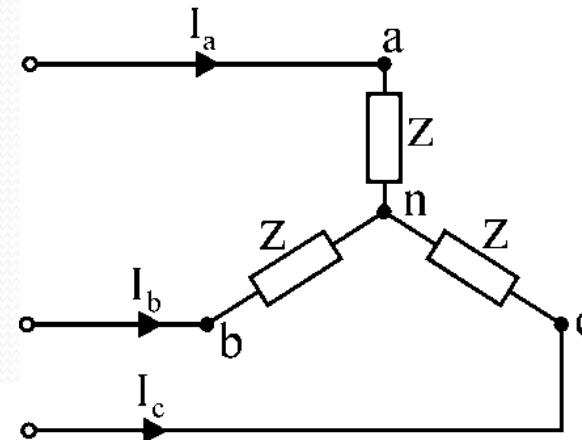
$$Z_Y = \frac{V_{an}}{I_{an}}$$

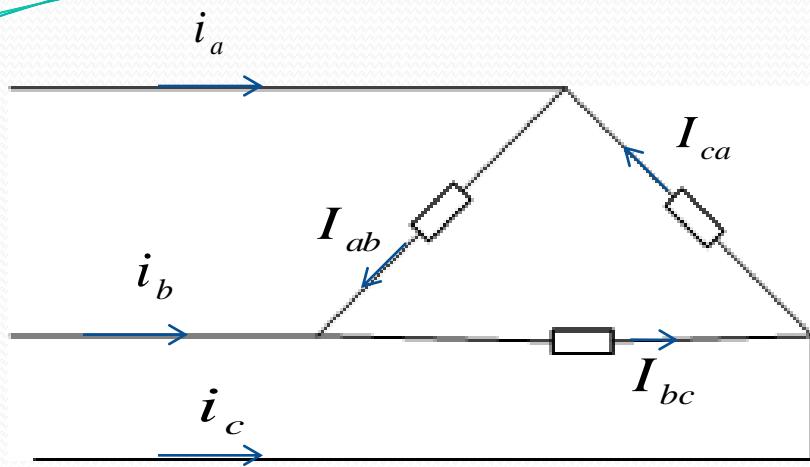
$$V_{ab} = 24\sqrt{6} \sin(100t + 60^\circ) = 24\sqrt{6} \cos(100t - 30^\circ) = 24\sqrt{3} \angle -30^\circ$$

$$\Rightarrow V_{an} = \frac{|V_{ab}|}{\sqrt{3}} \angle (\angle V_{ab} - 30^\circ) = \frac{24\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \angle (-30 - 30) = 24 \angle -60^\circ$$

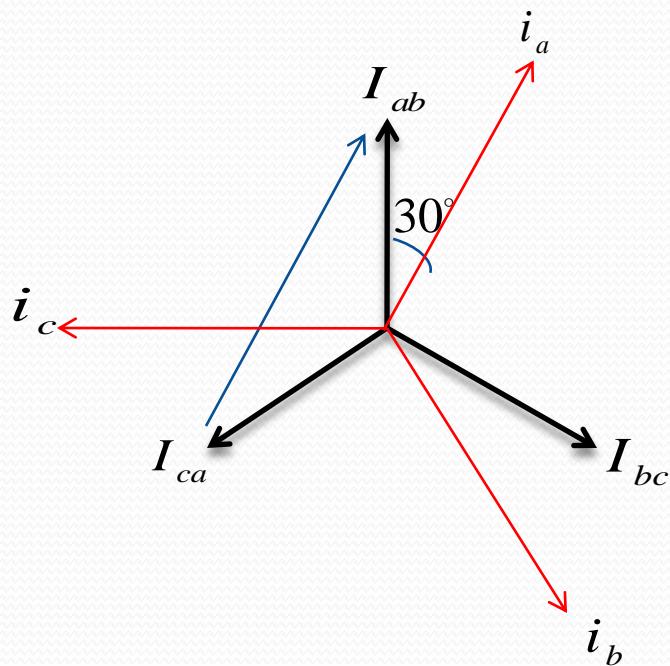
$$I_{an} = 3\sqrt{2} \cos 100t = 3 \angle 0^\circ$$

$$Z_Y = \frac{V_{an}}{I_{an}} = \frac{24 \angle -60^\circ}{3 \angle 0^\circ} = 8 \angle -60^\circ$$





$$\begin{aligned}i_a &= I_{ab} - I_{ca} \\i_b &= I_{bc} - I_{ab} \\i_c &= I_{ca} - I_{bc}\end{aligned}$$

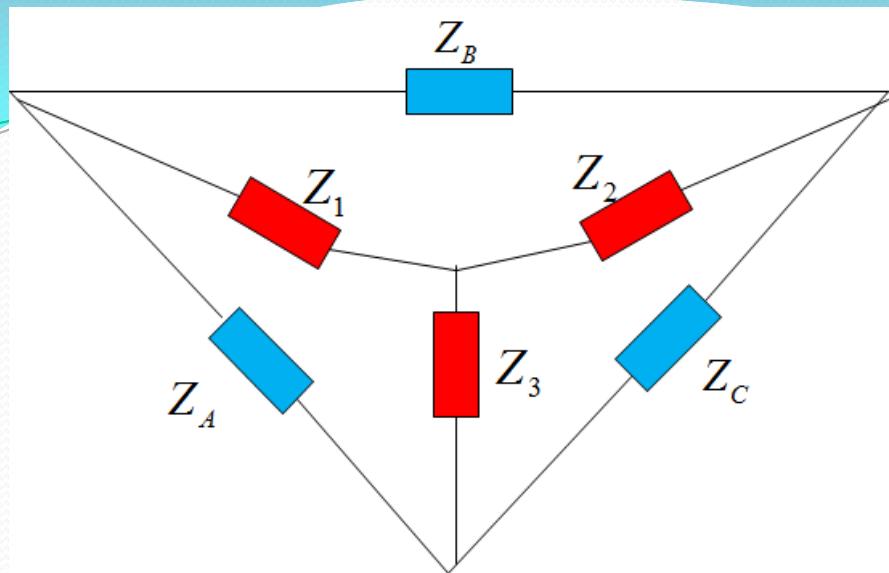


$$|i_a| = \sqrt{3}|I_{ab}| \quad R i_a = R I_{ab} - 30^\circ$$

$$|i_b| = \sqrt{3}|I_{bc}| \quad R i_b = R I_{bc} - 30^\circ$$

$$|i_c| = \sqrt{3}|I_{ca}| \quad R i_c = R I_{ca} - 30^\circ$$

تبديل امپدانس مثلث به ستاره و بالعکس



$$Z_1 = \frac{Z_A Z_B}{Z_A + Z_B + Z_C}$$

$$Z_2 = \frac{Z_B Z_C}{Z_A + Z_B + Z_C}$$

$$Z_3 = \frac{Z_A Z_C}{Z_A + Z_B + Z_C}$$

$$Z_A = \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3}{Z_2}$$

$$Z_B = \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3}{Z_3}$$

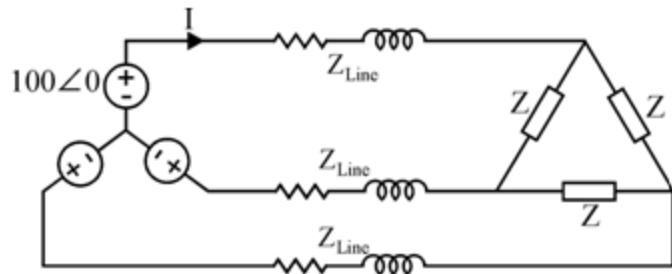
$$Z_C = \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3}{Z_1}$$

فاز متعادل بار سه

$\longrightarrow$

$$Z_Y = \frac{Z_\Delta}{3}$$

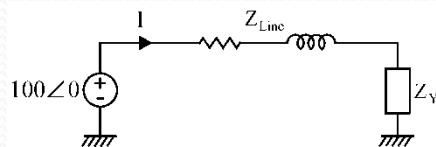
مثال: در مدار شکل زیر جریان  $I$  کدام است؟ (ولتاژها متعادل می‌باشند)



$$Z_{\text{Line}} = 2 + j4, \quad Z = 12 + j12$$

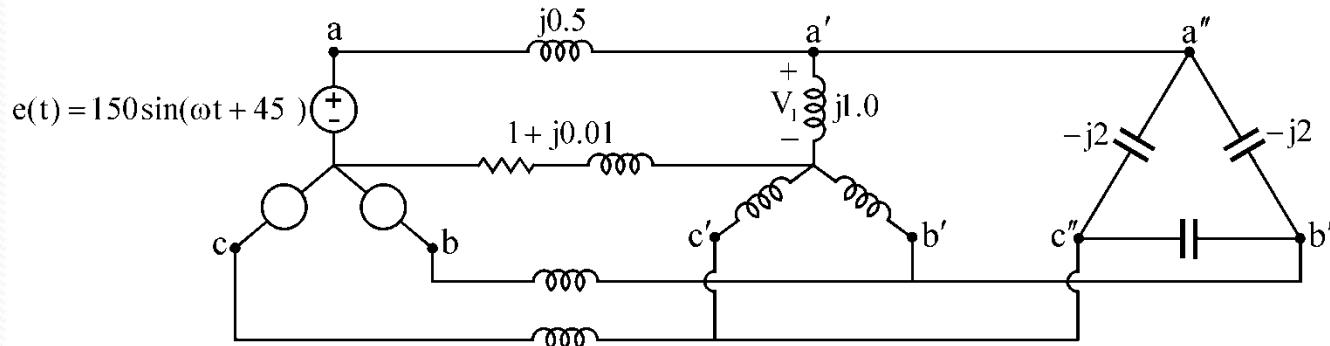
ابتدا بار مثلث را به بار ستاره تبدیل می‌کنیم و دیاگرام تکفاز مدار را رسم می‌کنیم

$$Z_Y = \frac{Z_\Delta}{3} = \frac{12 + j12}{3} = 4 + j4$$

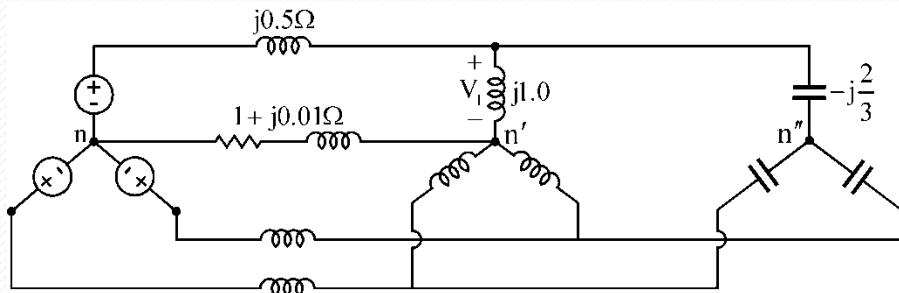


$$I = \frac{100\angle 0^\circ}{(2 + j4) + (4 + j4)} = \frac{100\angle 0^\circ}{6 + 8j} = \frac{100\angle 0^\circ}{10\angle 53^\circ} = 10\angle -53^\circ$$

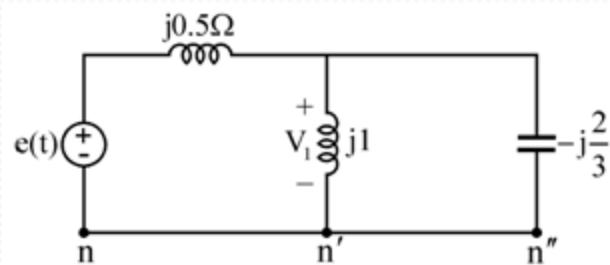
مثال: در شبکه سه‌فاز متعادل شکل زیر مقدار موثر ولتاژ  $V_1$  چقدر است؟



ابتدا بار مثلث را به ستاره تبدیل می‌کنیم



چون در صورت سؤال مدار متعادل فرض شده است سیم نول هیچ تأثیری در محاسبات ندارد.  
بنابراین مدار تک‌فاز سیستم به صورت زیر است



$$V_1 = \frac{\left(j \parallel -j\frac{2}{3}\right)}{\left(j \parallel -j\frac{2}{3}\right) + j0.5} e(t)$$

$$V_1 = \frac{-j2}{-j2 + j0.5} \times \frac{150}{\sqrt{2}} \angle -45^\circ = 100\sqrt{2} \angle -45^\circ$$

بررسی سیستم‌های قدرت و حفاظت

رضوانی

# نسبت به واحد (سیستم پریونیت)

- برای اینکه در سیستم های قدرت به راحتی بتوان مساله ها را حل کرد و از اعداد بزرگ راحت شوند از سیستم پریونیت استفاده می شود.
- در این سیستم مبنایی برای کمیته هایی مختلف در نظر گرفته می شود و با تقسیم مقدار واقعی بر انها مقدار پریونیت کمیت به دست می آید.
- مقادیر مبنا فقط دارای اندازه می باشند و زاویه ندارند.
- چون کمیت ها با هم در ارتباطند بنابراین لازم نیست برای همه کمیت ها مبنا تعریف کرد. یعنی با داشتن مبنا برای یک کمیت سایر کمیت ها را نیز می توانیم پریونیت کنیم.
- در سیستم سه فاز ولتاژ داده شده خطی است.
- در سیستم سه فاز توان سه فاز و ولتاژ خط را به عنوان مبنا در نظر می گیریم

$$\begin{cases} S_b \\ V_b \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}V_b} \\ Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} \\ Y_b = \frac{1}{Z_b} \end{cases} \quad S_{pu} = \frac{P + jQ}{S_b} = \frac{P}{S_b} + j \frac{Q}{S_b} = P_{pu} + jQ_{pu}$$

# نسبت به واحد (سیستم پریونیت)

- دلایل استفاده از پریونیت:

- کوچکتر شدن اعداد و بالا رفتن محاسبات

- اطلاعاتی می توانیم بگیریم که شاید خود کمیت ان را ندهد.

- در ترانس از اولیه و ثانویه راحت می شویم

$$Z_{pu} = \frac{R + jX}{Z_b} = \frac{R}{Z_b} + j \frac{X}{Z_b} = R_{pu} + jX_{pu}$$

- تغییر مبنا

- این وضعیت معمولا برای امپدانس ها اتفاق می افتد. یعنی می خواهیم یک امپدانس پریونیت شده در یک مبنای خاص را به مبنای دیگر ببریم.

$$\begin{cases} S_{b1} \\ V_{b1} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} S_{b2} \\ V_{b2} \end{cases}$$

$$Z_2^{pu} = Z_1^{pu} \left( \frac{V_{b1}}{V_{b2}} \right)^2 \frac{S_{B2}}{S_{B1}}$$

# فصل سوم

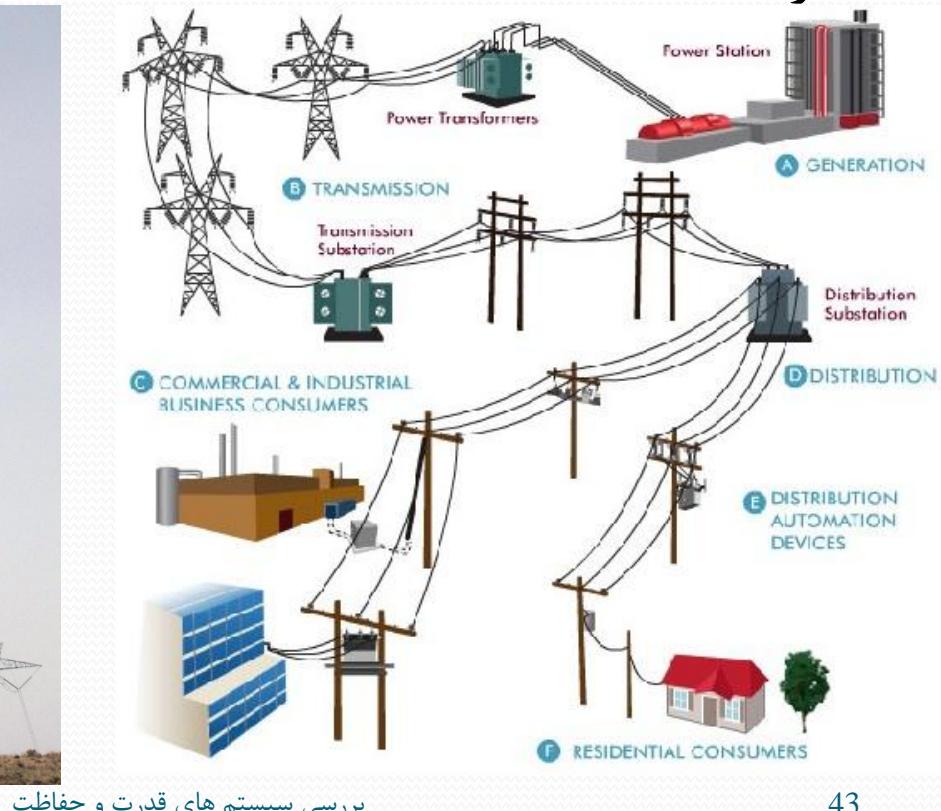
## محاسبه پارامترهای خطوط انتقال و توزیع

# شبکه های انتقال انرژی

- خطوط انتقال و توزیع وظیفه انتقال انرژی از نیروگاه ها به مراکز پخش بار را دارند.

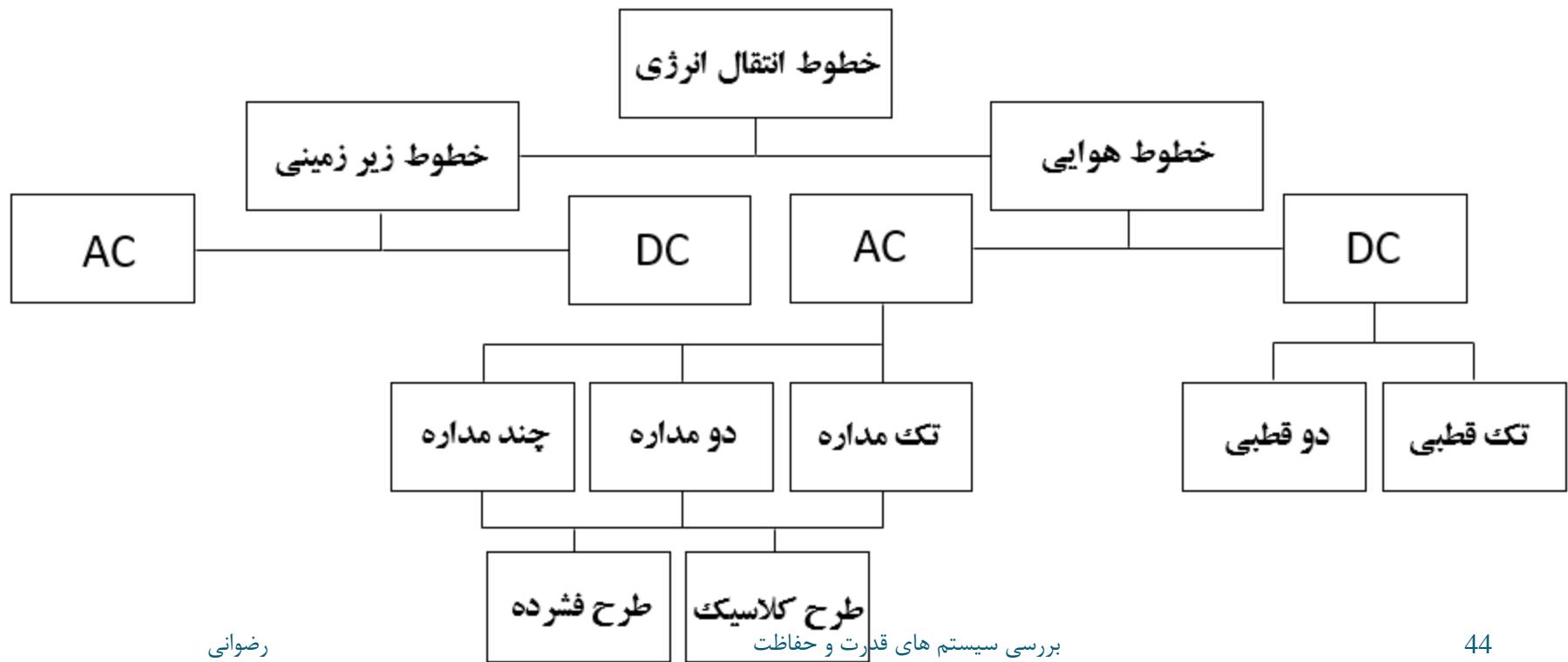


رضوانی



# انواع خطوط

- هوایی
- زمینی



## خطوط انتقال زمینی

هشدار

هنگام انجام عملیات حفاری

## مراقب کانال ها و کابل های زمینی برق باشید



- اولین خطوط انتقال سیستم قدرت، خطوط زمینی بوده است.
  - دارای هزینه های فراوان حفاری و ایجاد کاناهای زمینی هستند.
  - دسترسی برای تعمیرات و توسعه خطوط سخت و هزینه بر می باشد.
  - به زیبایی محیط آسیب نزدیک و خطرات کمتری دارند.
  - کمتر آسیب دیده و خاموشی انها به مراتب کمتر می باشد.



رضوانی



## بررسی سیستم های قدرت و حفاظت

# خطوط انتقال هوایی

- از دکل ها و تیرها برای نگه داشتن هادی ها بالای سطح زمین استفاده می شود.
- از هوا به عنوان عایق استفاده می شود.
- این روش انتقال یکی از کم هزینه ترین و رایج ترین روش های انتقال می باشد.
- دسترسی به این خطوط برای تعمیرات و ایجاد تغییرات بسیار ساده است
- هادی مورد استفاده در این نوع خطوط معمولاً از جنس مس، آلومینیوم و یا آلیاژی از آن هستند.



# انواع هادیهای

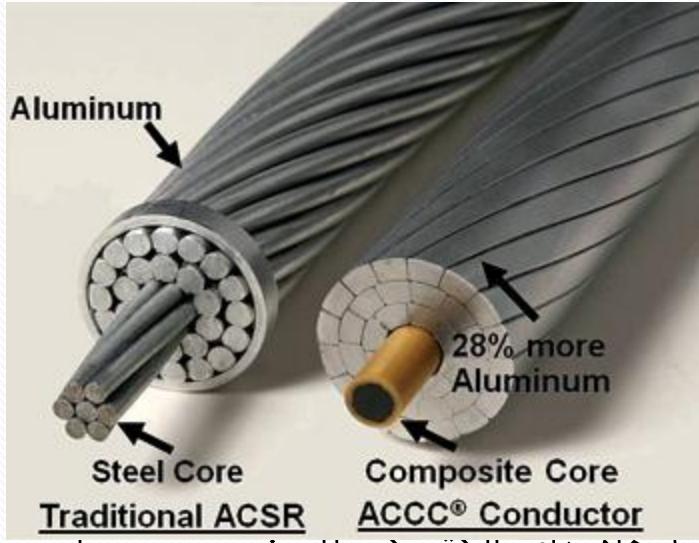
- در انتقال قدرت الکتریکی در آغاز از هادیهای مسی استفاده می شد اما امروزه هادیهای آلومینیومی به علت ارزانتر و سبکتر بودن نسبت به هادیهای مسی با همان مقاومت در خطوط هوایی به طور کامل جای آنها را گرفته اند.
- یکی دیگر از مزیتهای هادی آلومینیومی این است که در یک مقاومت مشخص قطر آن از هادی مسی بیشتر است. در حالت با قطر بزرگتر به ازای ولتاژیکسان خطوط فوران الکتریکی گرادیان ولتاژ در سطح هادی پائین آمده امکان یونیزه شدن هوا اطراف هادی (پدیده کرونا) کاهش یابد.
- تخلیه الکتریکی ۲ مشکل به وجود می آورد :
- مقداری انرژی به فضا منتقل می شود (تلفات کرونا)
- با عث تداخل مخابراتی می شود.

# انواع هادی ها

- راه حل دیگر برای کمتر کردن شدت میدان الکتریک و کاهش پدیده کرونا، استفاده از خطوط سه فاز به صورت هادی های گروهی یا باندل می باشد. یعنی به جای استفاده از یک هادی با سطح مقطع A از دو هادی با سطح مقطع A/2 در کنار هم استفاده می کنیم.
- هادی های خطوط انتقال باید دو ویژگی داشته باشند :
  - استحکام
  - انعطاف
- چون آلومینیوم دارای استحکام کمتری می باشد لذا به جای آلومینیوم از آلیاژ آلومینیوم استفاده می شود.
- برای افزایش انعطاف بیشتر هادی ها به صورت رشته ای ساخته می شوند.



# انواع هادیهای



- هادیهای آلیاژآلومینیومی دارای قدرت کششی بیشتری نسبت به هادیهای التریدی الومنیومی معمولی هستند.
- آلیاژ های آلومینیوم دارای هدایت کمتری بوده و مقاومت بیشتری نسبت به آلومینویم خالص دارند
- برای اینکه هم استحکام داشته باشیم و هم مقاومت خیلی زیاد نشود ، تعدادی از رشته ها از آلومینیوم و تعدادی از رشته ها هم از آلیاژ آلومینیوم استفاده می کنند.
- برای بالاتر بردن استحکام، در رشته های وسط به جای آلیاژ آلومینیوم از فولاد استفاده می کنند.
- رشته هایی که هدایت کمتری داشته باشند را در مرکز که چگالی جریان کمتری داریم استفاده می کنیم.

# پارامترهای خطوط انتقال

- مقاومت
- اندوکتانس
- ظرفیت خازنی

# محاسبه مقاومت اهمی

$$R_{dc} = \rho \frac{l}{A}$$

طول  
سطح مقطع  
مقاومت ویژه

$$\frac{R_{t2}}{R_{t1}} = \frac{T + t_2}{T + t_1}$$

- مقاومت dc
- اثر دما
- ثابت دما

مثال : اگر مقاومت هادی در دمای ۱۵ درجه برابر با ۱۵ اهم باشد و ثابت حرارتی ان ۲۲۸ باشد انگاه مقاومت هادی در دماهای ۵۰ و ۶۰ درجه چند اهم خواهد بود؟

$$\frac{R_{50}}{R_{15}} = \frac{228+50}{228+15} = \frac{278}{243} = 1.144 \quad R_{50} = 1.144 \times 15 = 17.6\Omega$$

تاباندن هادی

با تاباندن رشته های هادی طول واقعی هر رشته بیشتر از طول هادی می باشد لذا مقاومت ان از مقدار  $R_{dc}$  بیشتر است.

ثابت حرارتی آلومینیوم ۲۲۸ می باشد.

$$\rho_{AL} = 2.83 \times 10^{-8}$$

مقاومت ویژه آلومینیوم

# محاسبه مقاومت اهمی

## • مقاومت ac

- اثر پوستی : با عبور جریان ac از هادی توزیع جریان در سطح مقطع هادی یکسان نبوده و چگالی جریان در سطح هادی بیشترین مقدار را دارد. این اثر موجب می شود تا Rac از Rdc بیشتر باشد.
- مثلا در فرکانس ۶۰ هرتز، Rac تقریبا ۲٪ از Rdc بیشتر است.
- تمرین : مقاومت یک هادی ACSR با سطح مقطع ۳۰۰ میلی متر مربع را در دمای ۵۰ درجه بر حسب اهم محاسبه کنید. اثر پوستی و اثر رشتہ ای بودن را هریک ۲٪ در نظر بگیرید.

# محاسبه اندوکتانس خطوط انتقال

- عبور جریان از هادی باعث ایجاد میدان مغناطیسی شده و درنتیجه شار مغناطیسی در اطراف سیم یا هادی ایجاد می‌گردد. با تغییر مقدار جریان شار تغییر کرده و باعث القای ولتاژ در هادی دیگر می‌شود.
- اندوکتانس به صورت نسبت کل شار پیوندی مغناطیسی به جریان عبوری از هادی تعریف می‌شود.

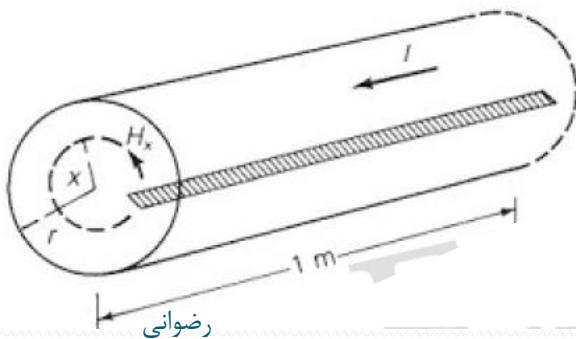
$$L = \frac{\lambda}{I}$$

$$\int_0^{2\pi x} H_x \cdot dl = I_x$$

قانون آمپر

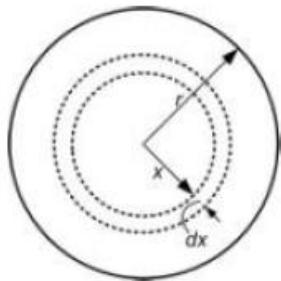
$H_x$ : شدت مغناطیسی اطراف هادی

$$H_x = \frac{I_x}{2\pi x}$$



بررسی سیستم‌های قدرت و حفاظت

# اندوكتانس داخلی



- با صرفنظر کردن از اثر پوستی و با فرض چگالی یکسان جریان در سطح مقطع هادی :

$$\frac{I}{\pi r^2} = \frac{I_x}{\pi x^2} \quad H_x = \frac{I_x}{2\pi x} = \frac{I}{2\pi r^2} x$$

$$B_x = \mu_0 H_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^2} x \quad : Bx \text{ چگالی شار مغناطیسی}$$

$$B_x = \frac{d\varphi_x}{dA}, dA = 1 \times dx \quad d\varphi_x = B_x dx \quad d\varphi_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^2} x dx$$

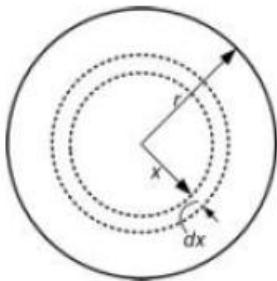
$$d\lambda_x = \left( \frac{x}{r} \right)^2 d\varphi_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^4} x^3 dx \quad \text{قسمتی از شار در برگیرنده داخلی } d\varphi_x \text{ می باشد.} \quad d\lambda_x$$

$$\lambda_{int} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^4} \int_0^r x^3 dx = \frac{\mu_0 I}{8\pi} = 0.5 \times 10^{-7} I$$

$$L_{int} = \frac{\lambda_{int}}{I} = 0.5 \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

بررسی سیستم های قدرت و حفاظت

# اندوکتانس خارجی



- با صرفنظر کردن از اثر پوستی و با فرض چگالی یکسان جریان در سطح مقطع هادی :

$$H_{ex} = \frac{I}{2\pi x}$$

$$B_{ex} = \mu_0 H_{ex} = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} : Bx$$

$$d\varphi_{ex} = B_{ex} dA = \mu_0 H_{ex} dx = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} dx \quad \varphi_{ex} = \int_r^{D_{ax}} \frac{\mu_0 I}{2\pi x} dx$$

- شار محصور در بین سیم و نقطه‌ای به فاصله  $D_{ax}$

$$\varphi_{ex} = 2 \times 10^{-7} ILn \frac{D_{ax}}{r}$$

$$L_{ext} = 2 \times 10^{-7} Ln \frac{D}{r} [H/m]$$

# محاسبه اندوکتانس سیستم سه فاز

اندوکتانس خودی

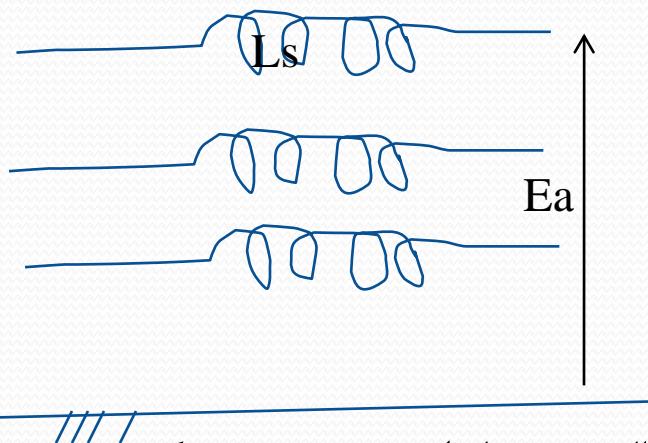
$$\begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} = 2 \times 10^{-7} \begin{bmatrix} Ln \frac{1}{D_s} & Ln \frac{1}{D_{ab}} & Ln \frac{1}{D_{ac}} \\ Ln \frac{1}{D_{ab}} & Ln \frac{1}{D_s} & Ln \frac{1}{D_{bc}} \\ Ln \frac{1}{D_{ac}} & Ln \frac{1}{D_{bc}} & Ln \frac{1}{D_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

اندوکتانس متقابل Lac

## ماتریس اندوکتانس

# محاسبه اندوکتانس سیستم سه فاز

- اگر فاصله سیم‌ها یکسان نباشد اندوکتانس‌های متقابل متفاوت بوده و لذا در محل مصرف نامتعادلی خواهیم داشت :

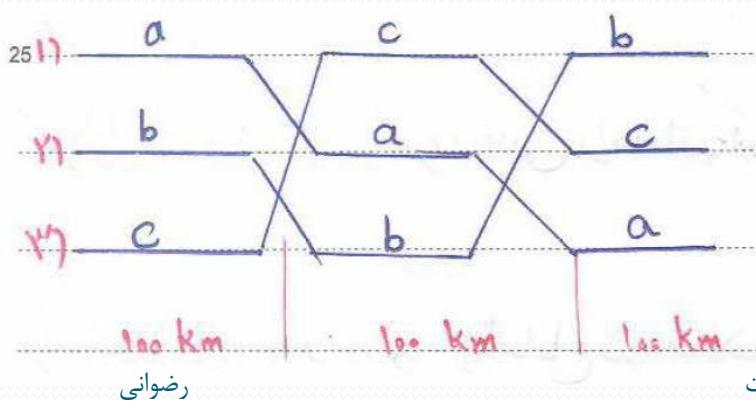


$$V_a = E_a + j\omega L_s I_a + j\omega L_{ab} I_b + j\omega L_{ac} I_c$$

برای جبران این اثر هنگام اویزان کردن، سیم‌ها را در سه راس متساوی الاضلاع قرار می‌دهند و اندوکتانس متقابل حذف خواهد شد.

$$V_a = E_a + j\omega L_s I_a$$

- البته چون همیشه نمی‌توان اینکار را کرد لذا برای ولتاژ‌های بالاتر معمولاً از روش ترانسپوز کردن استفاده می‌شود.



برای اینکار طول مسیر را به سه قسمت تقسیم کرده و سیم‌ها را روی مقره‌ها جابجا می‌کنیم.

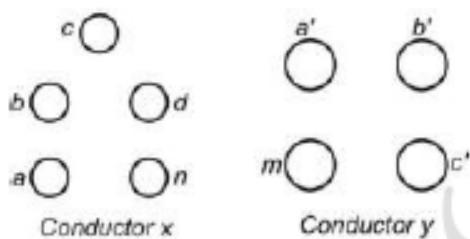
# اندوکتانس کل شبکه

$$\varphi_a = 2 \times 10^{-7} \times I_a \times \ln \frac{GMD}{GMR} [wb/m]$$

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR} [H/m]$$

- GMR : Geometric Mean Radius شعاع متوسط هندسی
- GMD : Geometric Mean Distance فاصله متوسط هندسی
- برای سیم های توپر  $D_s = 0.7788r$  و برای سیم های رشته ای DS را از روی جدول ارائه شده استفاده می کنیم.

# اندوکتانس کل شبکه



## اندوکتانس هادی مركب

- هادی x دارای n رشته
- هادی y دارای m رشته

$$GMD_x = \sqrt[mn]{(D_{aa'} D_{ab'} \dots D_{am})(D_{ba'} D_{bb'} \dots D_{bm}) \dots (D_{na'} D_{nb'} \dots D_{nm})}$$

$$GMR_x = \sqrt[n^2]{(D_{aa} D_{ab} \dots D_{an})(D_{ba} D_{bb} \dots D_{bn}) \dots (D_{na} D_{nb} \dots D_{nn})}$$

$$L_x = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR} [H/m]$$

# اندوکتانس کل شبکه

$$L_a = L_b = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{D_s} [H/m]$$

$$L_a = L_b = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{D_s} [H/m]$$

$$L_a = L_b = L_c = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{\sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ac}}}{D_s} [H/m]$$

$$L_a = L_b = L_c = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{\sqrt[12]{D_{a1b1} D_{b1c1} D_{a1c1} \dots}}{\sqrt[12]{D_s^{16} D_{a1a2}^2 D_{b1b2}^2 D_{c1c2}^2}} [H/m]$$

- تکفار دو سیمه

- سه فاز تکمداره

- فواصل مساوی

- فواصل نامساوی

- سه فار دو مداره

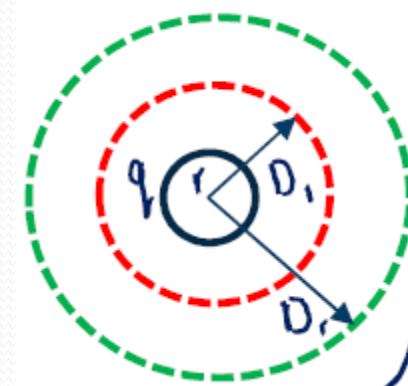
# اندوکتانس کل شبکه

- باندل کردن
- استفاده بیش از یک هادی در هر فاز را گویند و در ولتاژهای بالا مشاهده می گردد.
- شعاع موثر هادی را افزایش داده و باعث کاهش اندوکتانس خط می گردد.
- سطح مقطع موثر هادی افزایش یافته و در نتیجه شدت میدان اثرش روی سطح هادی کم می شود.
- برای سیستم های باندل فرمول ها همان فرمول قبل می باشد فقط به جای  $D_s$  موارد ذیل را جایگزین می کنیم
  - $D_s \Leftrightarrow \sqrt{D_s d}$  دو تایی :
  - $D_s \Leftrightarrow \sqrt[3]{D_s d^2}$  سه تایی
  - $D_s \Leftrightarrow 1.09\sqrt[4]{D_s d^3}$  چهارتایی

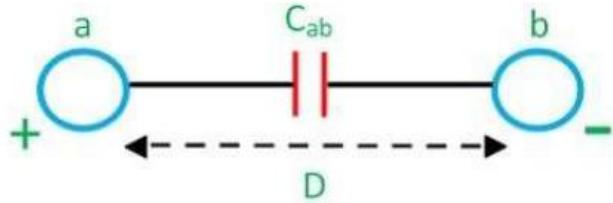
# ادمیتانس موازی

- هر باری در اطراف خود میدان الکتریکی ایجاد می کند.
- سیمی که دارای بار  $q$  می باشد نیز در اطراف خود میدان الکتریکی ایجاد خواهد کرد.
- این میدان بین دو نقطه اختلاف پناسیل ایجاد خواهد نمود.
- لذا بین دو نقطه اثر خازنی خواهیم داشت

$$V_{12} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_2}{D_1}$$



# ادمیتانس موازی



Line-to-line Capacitance

$$V_{ab} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D^2}{r_a r_b}$$

$$V_{ab} = \frac{q}{\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r}$$

$$C_{ab} = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}}$$

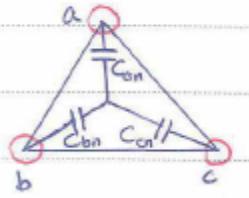
$$C_{an} = \frac{0.0242}{\log \frac{D}{r}}; \mu F/km$$

- تکفاز
- دو هادی با شعاع  $r_{a,b}$  و به فاصله  $D$  از یکدیگر
- دو هادی با شعاع برابر  $r$
- برای تمایز اندوکتانس با ادمیتانس در رابطه  $\ln$  را به  $\log$  تبدیل می کنیم :

$$C_{ab} = \frac{0.0121}{\log \frac{D}{r}}$$

$$\epsilon_0 = 8.89 \times 10^{-19}$$

# ادمیتانس موازی



$$C_{an} = \frac{2\pi\epsilon_0}{Ln} \frac{D}{r}$$



$$C_{an} = \frac{2\pi\epsilon_0}{Ln} \frac{GMD}{GMR}$$

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

- سه فاز با فواصل متفاوت و باندل شده

$$GMR = \sqrt{dD_s} = \sqrt{dr}$$

## حل چند مثال

- مثال ۱: یک هادی آلومینومی از ۳۷ رشته هریک به قطر ۳۳۳ . ۰ سانتی منتر تشکیل شده است. مقاومت این هادی بر حسب اهم بر کیلومتر را در ۷۵ درجه حساب کنید. میزان افزایش مقاومت در اثر رشته ای بودن را ۲٪ فرض کنید.

$$\rho = 2.83 \times 10^{-8}, T = 228$$

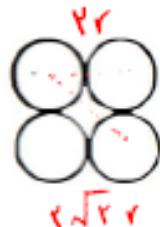
$$A = 37 \times \pi r^2 = 37 \times 3.14 \times \left( \frac{0.333 \times 10^{-2}}{2} \right)^2 = 3.222 \times 10^{-4}, m^2$$

$$R_{dc} = \rho \frac{l}{A} = 2.83 \times 10^{-8} \frac{1000}{3.222 \times 10^{-4}} = 0.0878, \Omega/km$$

$$R(t_2) = R(t_1) \frac{T + t_2}{T + t_1} \times 1.02 = 1.1094, \Omega/Km$$

مثال ۲: شعاع متوسط هندسی هریک از هادی های زیر را با فرض شعاع  $r$  برای هر رشته محاسبه کنید.

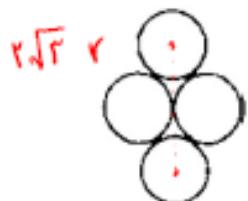
$$GMR_x = \sqrt[n^2]{(D_{aa}D_{ab}\dots D_{an})(D_{ba}D_{bb}\dots D_{bn})\dots(D_{na}D_{nb}\dots D_{nn})}$$



$$D_{aa} = D_s = 0.7788r$$

$$GMR = \sqrt[4^2]{(D_s \times 2r \times 2r \times 2\sqrt{2}r)(D_s \times 2r \times 2r \times 2\sqrt{2}r)(D_s \times 2r \times 2r \times 2\sqrt{2}r)(D_s \times 2r \times 2r \times 2\sqrt{2}r)}$$

$$GMR = \sqrt[4^2]{(0.7788r)^4 \times (2 \times 2 \times 2\sqrt{2}r^3)^4} = 1.723r$$

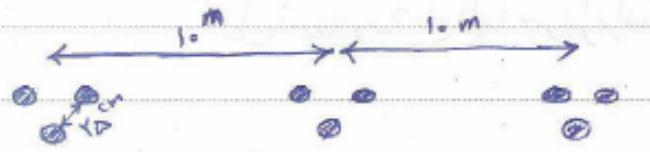


$$GMR = \sqrt[4^2]{(D_s \times 2r \times 2r \times 2\sqrt{3}r)(D_s \times 2r \times 2r \times 2\sqrt{3}r)(D_s \times 2r \times 2r \times 2r)(D_s \times 2r \times 2r \times 2r)}$$

$$GMR = \sqrt[4^2]{(0.7788r)^4 \times (2 \times 2 \times r^2)^4 \times (2 \times \sqrt{3}r^2)^2} = 1.552r$$

مثال ۳: راکتانس خازنی خط سه فاز با آرایش زیر را بر حسب اهم-کیلومتر و اهم-مایل حساب کنید.

اگر طول خط ۱۵ کیلومتر باشد راکتانس چند اهم خواهد بود؟



$$GMR = \sqrt{d^2 r} = \sqrt{25 \times 25 \times 5} = 55.9 \times 10^{-3}$$

$$GMD = \sqrt[3]{D_{ab} D_{ac} D_{bc}} = \sqrt[3]{10 \times 10 \times 20} = 12.599$$

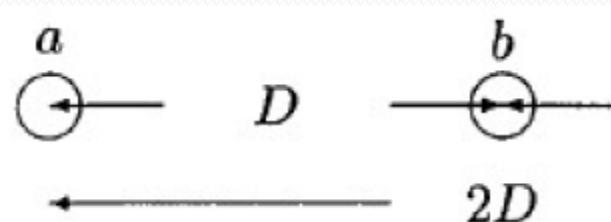
$$C_{an} = \frac{2\pi\epsilon_0}{Ln \frac{GMD}{GMR}}$$

$$C_{an} = \frac{0.0242}{\log \frac{GMD}{GMR}} = \frac{0.0242}{\log \frac{12.599}{55.9 \times 10^{-3}}} = \frac{0.0242}{2.353} = 0.0242, \mu F/km$$

نکته: اگر واحد  $D$  و  $r$  یکسان باشد انگاه اگر از رابطه  $\log$  استفاده کنیم واحد خازن میکرو فاراد بر کیلومتر خواهد بود. و اگر از رابطه  $\ln$  استفاده کنیم واحد عدد به دست آمده فاراد بر متر خواهد بود.

$$X_c = \frac{1}{0.10285 \left( \frac{\mu F}{km} \right) \times 10^{-6} \times 2\pi \times 50(Hz)} = 30964(\Omega/Km)$$

مثال ۴: یک خط انتقال سه فاز جابجا شده  $60\text{HZ}$ , با آرایش افقی مانند شکل زیر را در نظر بگیرید.  
راکتانس خط  $486\text{.}0$  اهم در هر کیلومتر بوده و شعاع متوسط هندسی هادی  $2$  سانتی متر می باشد  
فاصله بین هادی ها را بر حسب متر تعیین کنید.



$$X = 0.0486\Omega$$

$$L = \frac{x}{2\pi f} = \frac{0.0486}{2\pi \times 60} = 1.2892, mH/Km$$

$$L = 0.2 \times \ln \frac{GMD}{GMR} = 0.2 \ln \frac{GMD}{0.02}, mH/Km$$

$$GMD = \sqrt[3]{D \times D \times 2D}$$

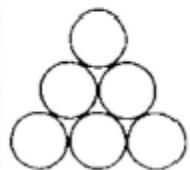
$$D = 10, m$$

# تمرین



$$GMR = 1.704r$$

- شعاع متوسط هندسی هریک از هادی های زیر را با فرض شعاع  $r$  برای هر رشته محاسبه کنید.



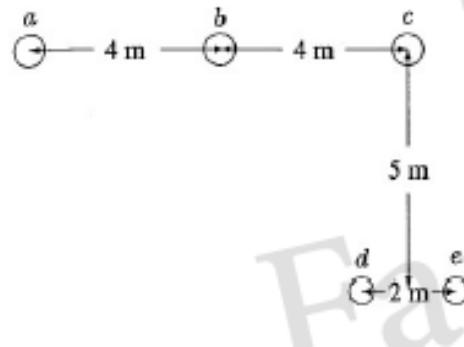
$$GMR = 2.1r$$

- میدان های مغناطیسی خط انتقال بر بروی اشیا و خطوط مجاور از جمله خطوط انتقال تأثیر می گذارند و ولتاژ القایی کنند. در شکل ذیل رابطه ای برای ولتاژ القایی روی خطوط تلفن  $t_1, t_2$  را بدست آورید



مثال ۵ : یک خط انتقال سه فاز جابجا نشده ۶۰ هرتز در مسافت ۲۰ کیلومتر با یک خط تلفن موازی شده است جریان عبوری از خطوط به صورت ذیل می باشد. با فرض اینکه جریان عبوری از سیم های زمین نشده تلفن صفر باشد مقدار ولتاژ القا شده را خط تلفن محاسبه نمایید

$$I_a = 320 \angle 0^\circ A; I_b = 320 \angle -120^\circ A; I_c = 320 \angle -240^\circ A$$



$$D_{ad} = \sqrt{7^2 + 5^2} = 8.6023m$$

$$D_{ae} = \sqrt{9^2 + 5^2} = 10.2956m$$

$$D_{be} = \sqrt{5^2 + 5^2} = 7.0711m$$

$$D_{be} = \sqrt{3^2 + 5^2} = 5.8309m$$

$$D_{ce} = D_{cd} \quad \rightarrow \quad \lambda_{de}(I_C) = 0$$

$$\lambda_{de}(I_a) = 2 \times 10^{-7} \times I_a \ln \frac{D_{ae}}{D_{ed}} = 0.03594 I_a$$

$$\lambda_{de}(I_a) = 2 \times 10^{-7} \times I_b \ln \frac{D_{be}}{D_{cd}} = 0.03856 I_b$$

$$\lambda = \lambda(I_a) + \lambda(I_b) + \lambda(I_c)$$

$$\lambda = 0.03594 \times (320 \prec 0) + 0.03856 \times (320 \prec -120) + 0$$

$$\lambda = 11.943 \prec -63.48, \text{mwb} / \text{Km}$$

$$V = j\omega\lambda = j2\pi \times 60 \times (11.943 \prec -63.48)$$

• ولتاژ القا شده در ۲۰ کیلومتر خط تلفن

$$V = 90 \prec 26.52, V$$

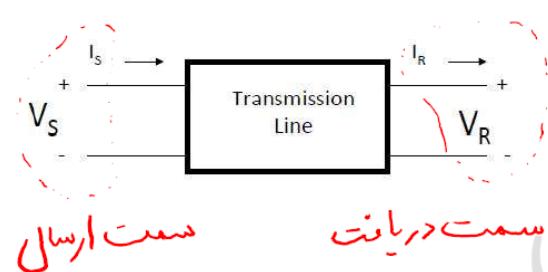
# فصل چهارم

## مدلسازی خطوط انتقال و توزیع

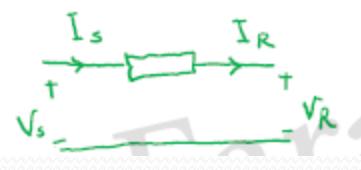
# مدل‌سازی خطوط انتقال

- خطوط انتقال هوایی و هادی‌ها بدون روکش و سیستم متعادل در نظر گرفته می‌شود.
- مدل را در یک فاز بررسی می‌کنیم.
- دسته بندی خطوط انتقال
- خطوط کوتاه : طول خطوط کمتر از ۵۰ مایل یا ۸۰ کیلومتر
- خطوط متوسط : طول خطوط بین ۲۵۰ تا ۸۰۰ کیلومتر
- خطوط بلند : طول خطوط بیشتر از ۲۵۰ کیلومتر

# مدل‌سازی خطوط انتقال



$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$



$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

$$V_s = AV_R + BI_R$$

$$I_s = CV_R + DI_R$$

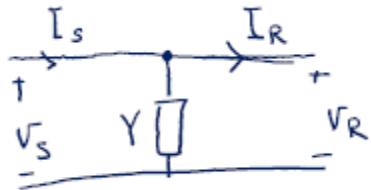
- ماتریس انتقال عنصر سری

$$T = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$V_s = V_R + ZI_R$$

$$I_s = I_R$$

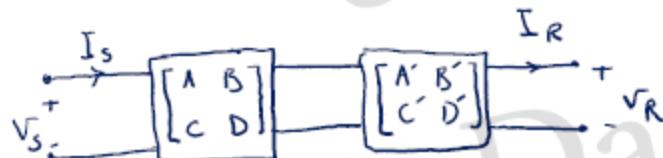
# مدل‌سازی خطوط انتقال



- ماتریس انتقال عنصر موازی

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{bmatrix}$$

- ماتریس انتقال دو شبکه سری



$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix}$$

# مدل‌سازی خطوط انتقال

$$V_R = 0, Z_{SC} = \frac{V_S}{I_S} \Big|_{V_R=0} = \frac{B}{D}$$

- تعریف‌های مختلف در خطوط انتقال

## • امپدانس اتصال کوتاه

امپدانس ابتدای خط زمانی که انتهای خط اتصال کوتاه باشد

$$I_R = 0, Z_{OC} = \frac{V_S}{I_S} \Big|_{I_R=0} = \frac{A}{D}$$

## • امپدانس مدار باز

امپدانس ابتدای خط زمانی که انتخای خط مدار باز باشد.

$$I_R = 0$$

$$V_S = AV_R + BI_R = AV_R$$

$$\left| V_R^{NL} \right| = \frac{|V_S|}{|A|}$$

## • ولتاژ بی باری

ولتاژ انتهای خط زمانی که انتهای خط مدار باز باشد.

# مدل‌سازی خطوط انتقال

$$\text{Re } g \% = \% VR = \frac{|V_R^{NL}| - |V_R^{FL}|}{|V_R^{FL}|} \times 100\%$$

$$\% VR = \frac{V_S - V_R}{V_R} \times 100$$

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{3V_R I_R \cos(\theta_{V_R} - \theta_{I_R})}{3V_S I_S \cos(\theta_{V_S} - \theta_{I_S})}$$

$$I_s^{ch} = I_S \Big|_{I_R=0} = \frac{C}{A} V_S$$

$$\begin{cases} V_S = AV_R + BI_R \\ I_S = CV_R + DI_R \end{cases} \xrightarrow{I_R=0} \begin{cases} V_S = AV_R \\ I_S = CV_R \end{cases} \Rightarrow \frac{I_S}{V_S} = \frac{C}{A}$$

- تعريف های مختلف در خطوط انتقال

- تنظیم ولتاژ %VR

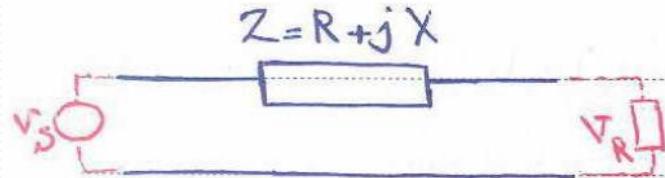
- میزان تغییرات ولتاژ انتهای خط از بی باری تا بار کامل را گویند.

- راندمان خط انتقال

- جريان شارژ خط

- جريانی که از منبع اندای خط زمانی که انتهای خط مدار باز باشد کشیده می شود.

# مدل‌سازی خطوط انتقال



$$Z = (r + j\omega L)l$$

$$Z = R + jX$$

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- مدل خط انتقال کوتاه

- در این خطوط از اثر خازنی صرف‌نظر می‌کنیم

- $l$ : طول خط

- $r$ : مقاومت در واحد طول

- $L$ : اندوکتانس در واحد طول

$$V_s = V_R + ZI_R$$

$$I_s = I_R$$

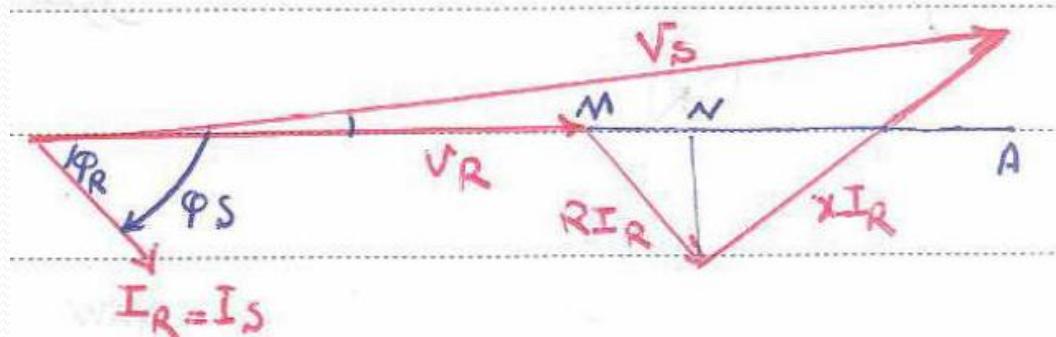
- برای حل از سیستم پریونیت استفاده می‌کنیم. و پایه‌ها در طرف فرستنده و گیرنده یکسان هستند.

## • تنظیم ولتاژ یا رگولاسیون

- معیاری از تغییرات ولتاژ انتهای خط از بی باری تا بار کامل می باشد.

$$\text{Re } g \% = \% VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\%$$

$$\% VR = \frac{V_s - V_R}{V_R} \times 100$$



- مقادیر پریونیت هستند.

$$P_s = V_s I_s \cos \varphi_s$$

• ضریب قدرت انتهای خط یا بار  $\cos \varphi_R$

$$P_R = V_R I_R \cos \varphi_R$$

• ضریب قدرت ابتدای خط یا مولد  $\cos \varphi_s$

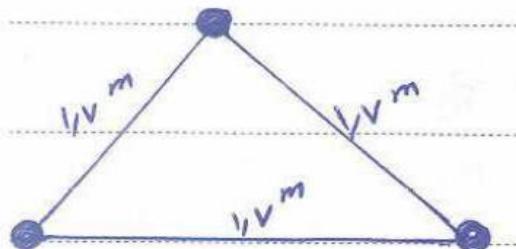
$$P_{Loss} = RI_R^2$$

$$\eta = \frac{P_R}{P_s} \times 100\%$$

$$\% VR = \frac{RP_R + XQ_R}{V_R^2} \times 100$$

$$P_s = P_R + P_{Loss}$$

مثال : یک خط سه فاز ۱۱ کیلوووت، به طول ۱۵ کیلومتر، توان ۳ مگاوات را تحويل مصرف کننده می دهد. تلفات خط ۱۰٪ توان مصرفی است. ضریب قدرت با ۰.۸. پس فاز خط انتقال دارای آرایش مثلث و فاصله هادی ها از یکدیگر ۱.۷ متر می باشد. ولتاژ ابتدای خط و رگرسیون را بدست اورید. شعاع هادی ها ۵ میلی متر و فرکانس ۵۰ هرتز می باشد.



$$l = 15Km, V_R = 11KV$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{D_s} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1.7}{0.7788 \times 5 \times 10^{-3}} = 2 \times 10^{-7} \ln 436.57$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \times 6.078949 = 12.16 \times 10^{-7}$$

$$X = 2\pi f L = 2\pi \times 50 \times (12.16 \times 10^{-7}) \times 15000$$

$$X = 5.72\Omega$$

$$P_{Loss} = 0.1 \times P_R = 0.1 \times 3MW = 300KW$$

$$P_R = 3RI_R^2$$

$$P_R = \sqrt{\mu} V_R I_R \cos \varphi_R \Rightarrow 14 \times 1^2 = \sqrt{\mu} \times 11 \times 1 \times |I_R| \times 1 \rightarrow |I_R| = 19V^A \rightarrow I_R = 19V \angle -14.9^\circ$$

$$14 \times 10^0 = R I^2 \Rightarrow R = 1.01 \Omega$$

$$Z = 1.01 + j 0.1 \Omega$$

حال باید رکو لسیون خط را بدست اوریم، می باید  $\sqrt{\mu}$  را حساب نماید

$$V_S = A V_R + B I_R \rightarrow V_S = V_R + Z I_R \rightarrow V_S = \frac{11000}{\sqrt{\mu}} + (1.01 + j 0.1 \Omega)(19V \angle -14.9^\circ)$$

$$\Rightarrow V_S = 14.91 + j 0.191 = 14.91 \angle 0.19^\circ \quad \text{فازی است زیرا } V_R = \frac{11000}{\sqrt{\mu}}$$

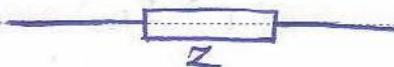
$$V_S = \sqrt{\mu} \times 14.91 \times 1^2 = 14.91 \text{ kV}$$

$$I_S = I_R = 19V \angle -14.9^\circ$$



$$14.91$$

$$11000$$



25

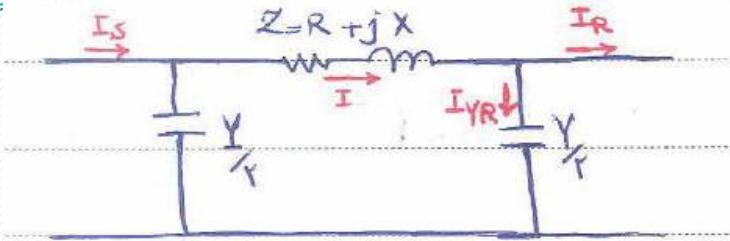
$$\left\{ \begin{array}{l} V_R = \frac{11000}{\sqrt{\mu}} = 41.50 \text{ V} \\ I_R = 19V \angle -14.9^\circ \end{array} \right.$$

$$I_R = 19V \angle -14.9^\circ$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_S = 14.91 \angle 0.19^\circ \\ I_S = 19V \angle -14.9^\circ \end{array} \right.$$

$$/ \text{Reg} = \frac{14.91 - 41.50}{41.50} \times 100 = 10\%$$

# مدل‌سازی خطوط انتقال



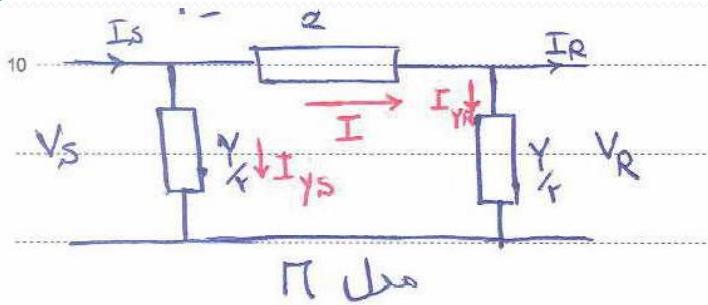
## خط متوسط

- با توجه به افزایش باردهی خطوط، خاصیت خازنی را در نظر می‌گیریم.
- نصف ظرفیت خازنی موازی به صورت متمرکز در دو طرف خط در نظر گرفته می‌شود.
- به مدل خط متوسط مدل اسمی  $\pi$ -گفته می‌شود.
- معمولًا ولتاژ و جریان بار معلوم هستند
- شاخه‌های خازنی توان راکتیو تولید و اندوکتانس خط راکتیو مصرف می‌کند.
- $g=0$
- $C$ : ظرفیت خازنی

$$Z = (r + j\omega L)l = R + jX$$

$$Y = (g + j\omega C)l$$

# مدل‌سازی خطوط انتقال



$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A = 1 + \frac{ZY}{2} \\ B = Z \\ C = Y(1 + \frac{ZY}{4}) \\ D = 1 + \frac{ZY}{2} \end{array} \right. \quad \left[ \begin{array}{c} V_s \\ I_s \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{cc} A & B \\ C & D \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} V_R \\ I_R \end{array} \right]$$

$$\left[ \begin{array}{c} V_R \\ I_R \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{cc} D & -B \\ -C & A \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} V_s \\ I_s \end{array} \right]$$

- خط متوسط

- معمولًا ولتاژ و جریان بار معلوم هستند
- اگر در روابط فوق به جای Y، صفر قرار دهیم پارامترهای خط کوتاه به دست می‌آید.

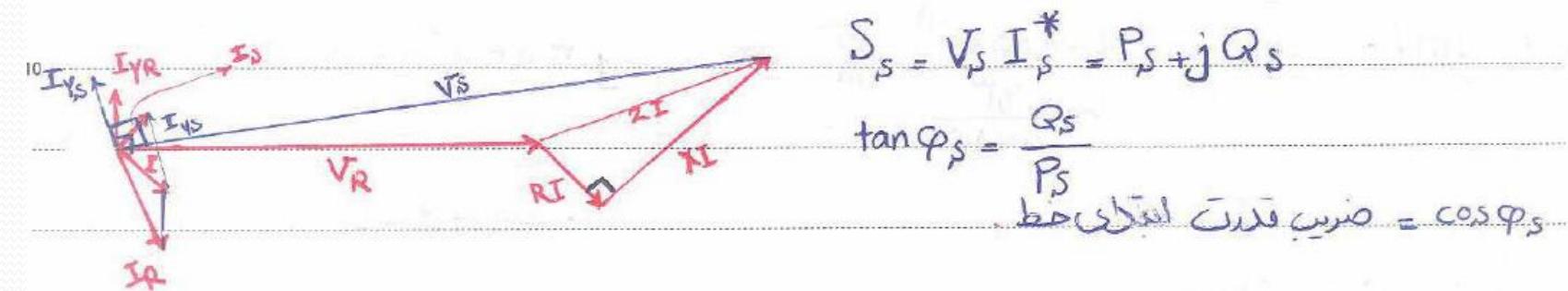
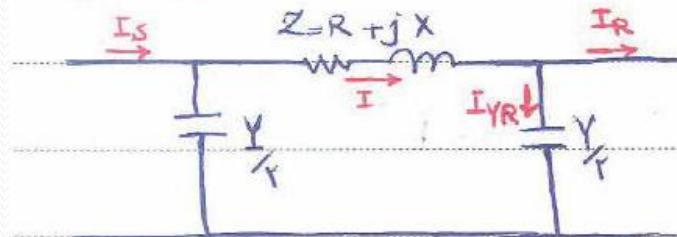
25  $\% \text{ Reg} = \frac{|V_s| - |V_R|}{|V_s|} \times 100$

$$A = 1 + \frac{ZY}{r}$$

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A = D = 1 + \frac{ZY}{r} \\ B = Z \\ C = Y(1 + \frac{ZY}{r}) \end{array} \right.$$

برای پریویس کردن چون  $D, A$  و  $C$ ,  $Z_b$  و  $C$ ,  $Z_b$  باشد،  $I_s$  بالا با  $V_s$  تغیری نمایند،  $I_R$  بالا با  $V_R$  تغیری نمایند.



برای محاسبه ضریب قدرت ایندکسی خط بهتر است، ابتدا  $S_s$  را حساب کرده و از روی آن  $\cos \varphi_s$  را بدست

# بررسی اثر فرانتی

$$I_R = 0$$

- فرض می شود که خط بدون تلفات ( $r=0$ ) و انتهای خط بی بار باشد.

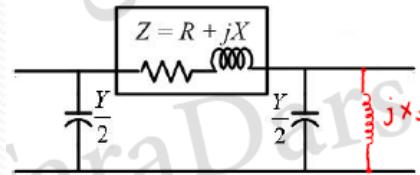
$$A = 1 + \frac{ZY}{2} = 1 - \frac{LC\omega^2}{2}$$

- پس  $|A| \leq 1$  خواهد بود.

$$\text{بنابراین ولتاژ بی باری طبق رابطه } |V_R^{NL}| = \frac{|V_s|}{|A|} \text{ از ولتاژ ابتدای خط بزرگتر می شود.}$$

- یعنی در خطوط متوسط اگر بار خط کم شود (در زمان کم باری و یا نیمه های شب) به دلیل مشخصات ذاتی خطوط و یا احیاناً به دلیل خازن های متصل به شبکه ممکن است ولتاژ انتهای خط از ولتاژ ابتدای خط بیشتر باشد. و این ممکن است باعث خرابی تجهیزات متصل به شبکه شود.

- به منظور جبران اثر فرانتی و کاهش اندازه ولتاژ در سمت مصرف کننده، از عنصر مصرف کننده توان راکتیو که راکتور شنت یا کندانسور سنکرون باشد استفاده می شود.



# مثال:

نیم خط انتقال بسیار فاز  $23^\circ$  کیلومتری با کد پایه تریج تسلیل سده است  
خط انتقال دارای آرایش انعکس و مفاصل هم‌حرانی  $5$  است مقامت هر متر  $0.2$  است آردنگی  
خط رله ای  $23^\circ$  و توان مصرفی  $200 \text{ MW}$  با ضریب تدریج  $85$  و بیس فازیا سر محاسبه شد

20

الف) لیزر آبران خط

ب) رکو لاسیون خط

ج) ضربت توان اسکی خط

د) راندمان خط

و) بررسی تعداد توان الکترو رالنسیون خط

$$Z = R + jX_{tf}L$$

$$R = 0.2 \frac{\Omega}{\text{km}} \times 10.0 \text{ km} = 2.0 \Omega$$

$$X = 2\pi f L = \pi \times 50 \times 2 \times 10^{-3} \ln \frac{4.3}{0.1044} \frac{\Omega}{m} \times 100.000 \text{ m} = 45.40 \Omega \quad R > X$$

$$D_{eq} = \sqrt{R^2 + X^2} = 45.4 \text{ m}$$

$$P_S = 0.21 V' \times 0.14 f L = 0.100.44 \text{ m}$$

$$Z = 2.0 + 45.40 j \quad Z = 47.40 \angle 40.1^\circ$$

رضوانی

حل اول: محلابس امیراپن خط

\* در سلکتور انتقال  $X > R$

سلکتور توزیع  $R > X$

مرحله دوم: محاسبه لامپ

$$r = \frac{0.14\pi^2}{2 \times 11} \times 0.12048 = 0.100110 \text{ m}$$

تبیان با فوت تبدیل با ساعت

$$Y = j\pi f C = j\pi r \omega \cdot \frac{\gamma_0 \times 1000 \times 1^{-12}}{\ln \frac{q_0}{q_1}} \frac{25}{m} \times 1000000 = j 3.94 \times 10^{-4} \times 25 = 3.94 \times 10^{-4} \angle 90^\circ$$

$$V_s = A V_R + B I_R$$

$$I_s = C V_R + D I_R$$

$$A - D = 1 + \frac{ZY}{r} = 1 + \frac{(V_1, 2V \angle 45^\circ)(3.94 \times 10^{-4} \angle 90^\circ)}{r} = 0.9AV + j 0.10059 = 0.9AV \angle 0.135^\circ$$

محصل از اندای A حیلی کوچک است.

$$B - Z = V_1, 2V \angle 45, 1^\circ$$

$$C = Y(1 + \frac{ZY}{r}) = (3.94 \times 10^{-4} \angle 90^\circ) \left( 1 + \frac{(V_1, 2V \angle 45^\circ)(3.94 \times 10^{-4} \angle 90^\circ)}{r} \right) = 3.94 \times 10^{-4} \angle 90, 1V$$

مرحله سوم: محاسبه خط ABCD

$$V_R = \frac{220 \times 1}{\sqrt{3}} = 122 \angle 0^\circ$$

$$P_R = \sqrt{3} |V_R| |I_R| \cos \phi_R$$

$$\Rightarrow V_{\infty} \times 1 = \sqrt{3} \times 220 \times 10^3 |I_R| \times 180 \Rightarrow |I_R| = 29.014 \text{ A} \Rightarrow I_R = 29.014 \angle -31.8^\circ$$

محله چهارم: تعیین  $I_R, V_R$   
 (اگری خواستیم بیو دست حل کنیم  $V_b = 220 \text{ kV}$ )

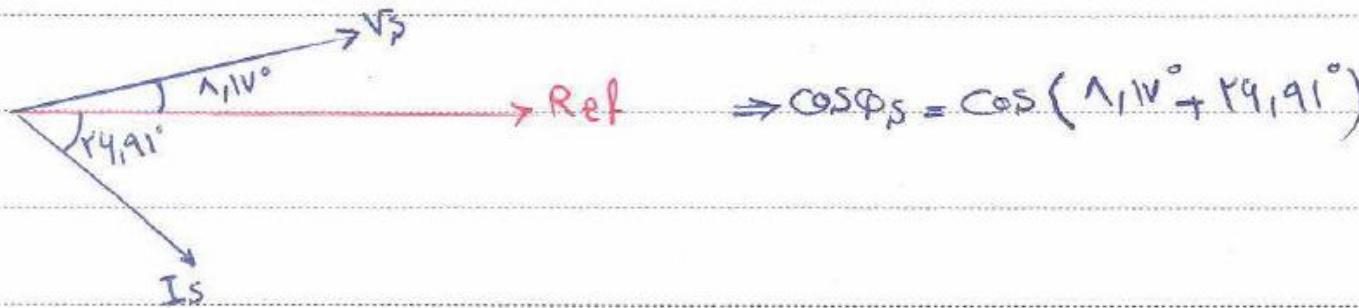
$$V_S = (19.8 \angle 4.134^\circ) (122 \angle 0^\circ) + (61.1 \angle 90.1^\circ) (29.014 \angle -31.8^\circ)$$

$$\Rightarrow V_S = 14 \angle 94.4^\circ \text{ kV} \Rightarrow (V_S)_L = 29.014 \text{ kV}$$

$$I_S = C V_R + D I_R = (3.91 \times 1 \angle 90.1^\circ) (122 \angle 0^\circ) + (-19.8 \angle 4.134^\circ) (29.014 \angle -31.8^\circ)$$

$$\Rightarrow I_S = 0.051.4 \angle -24.91^\circ \text{ A}$$

$$\eta_{Reg} = \frac{\frac{V_S \cdot I_S}{R_{load}} - V_S}{V_S} \times 100\% = 18.1\%$$



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

$$P_S = \sqrt{3} \frac{V_S}{\underline{\text{خط}}} I_S \cos \varphi \rightarrow$$

جون دی جمی رالدزسیم می توان سیفراز است.

$$S_S = V_S I_S^* = (14V9V_0 \angle 11V) (20V_4 \angle 24.91^\circ) = 14V9V_0 \times 20V_4 \angle (11V + 24.91)^\circ$$

$$S_S = 14V9V_0 \times 20V_4 \cos(11V + 24.91) + j 14V9V_0 \times 20V_4 \sin(11V + 24.91)$$

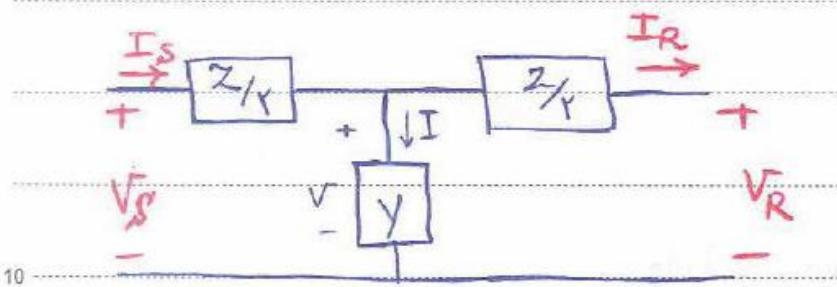
**تعادل توان:**

**العا اکتو:** تفاوت  $P_R, P_S$  باید بالدزای باشد که روی  $R$  مصنوعی سردد.

**بی ار اکتو:** تفاوت  $Q_R, Q_S$  باید در حازنها و سلف باشد.

15

# مدل T برای خط متوسط



$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A = 1 + \frac{ZY}{2} \\ B = Z(1 + \frac{ZY}{4}) \\ C = Y \\ D = 1 + \frac{ZY}{2} \end{array} \right. \quad \left[ \begin{array}{c} V_s \\ I_s \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{cc} A & B \\ C & D \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} V_R \\ I_R \end{array} \right]$$

# مثال

- یک خط انتقال سه فاز 230KV شامل امپدانس سری  $z=0.05+j0.45$  اهم بر کیلومتر در هر فاز و ادمیتانس موازی  $y=j3.4$  میکروزیمنس در هر کیلومتر در هر فاز می باشد. اگر طول خط ۸۰ کیلومتر باشد، با استفاده از مدل نامی  $\Pi$
- الف - ثابت های ABCD خط انتقال را بدست آورید.

- ب - زمانی که خط توان 200MVA در ضریب قدرت ۰.۸ پس فاز و ۲۲۰ کیلوولت را تحويل می دهد، ولتاژ و جریان سمت دریافت ، تنظیم ولتاژ، توان سمت انتقال و بازده انتقال را محاسبه نمایید.

الف :

$$Z = zl = (0.05 + j0.45) \times 80 = 4 + j36\Omega$$

$$Y = yl = (j3.4 \times 10^{-6}) \times 80 = j0.272 \times 10^{-3}$$

$$A = D = 1 + \frac{ZY}{2} = 0.9951 + j0.000544$$
$$B = Z = 4 + j36$$

$$C = Y(1 + \frac{ZY}{4}) = j0.0002713$$

ب

$$V_R = \frac{220 \angle 0}{\sqrt{3}} = 127 \angle 0$$

$$S_R = 200 \angle (\cos^{-1} 0.8) = 200 \angle (36.87^\circ) = 160 + j120 MVA$$

$$I_R = \frac{S_R^*}{3V_R^*} = \frac{200 \angle (-36.87^\circ)}{3 \times 127 \angle 0} = 524.864 \angle (-36.87^\circ)$$

$$V_S = AV_R + BI_R \Rightarrow V_S = 140.1051 \angle (5.704^\circ)$$

$$|V_{SL}| = \sqrt{3}|V_S| \Rightarrow |V_{SL}| = 242.6, KV$$

ولتاژ خط ارسال

$$I_S = CV_R + DI_R \Rightarrow IS = 502.38 \angle (-33.69^\circ), A$$

$$S_S = 3V_S I_S^* = 3(140.1051 \angle (5.704^\circ))(502.38 \angle (33.69^\circ)) = 163.179 MW + j134.018 MVar$$

تنظیم ولتاژ

$$\%VR = \frac{|V_R^{NL}| - |V_R^{FL}|}{|V_R^{FL}|} \times 100\%$$

$$|V_R^{NL}| = \frac{|V_S|}{|A|} = \frac{242.67}{0.9951}$$

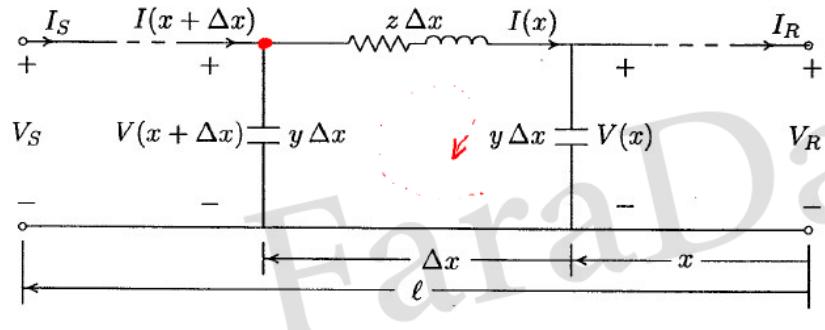
$$\%VR = 10.847\%$$

$$|V_R^{FL}| = 220$$

بازده

$$\eta = \frac{P_{R(3\phi)}}{P_{S(3\phi)}} \times 100 = \frac{160}{163.179} \times 100 = 98.052\%$$

# مدل‌سازی خطوط انتقال



- خط طویل یا بلند

- در مدل‌سازی خطوط انتقال بلند، نمی‌توان خواص مقاومتی یا اندوکتانس و یا خازن را به صورت متمرکز در یک نقطه در نظر گرفت و باید این خواص را به صورت یکنواخت در طول خط توزیع کرد به همین دلیل به مدل خط انتقال بلند مدل توزیع شده گویند.
- این خطوط دارای طولی بیشتر از ۲۴۰ کیلومتر می‌باشد.

$$\gamma = \sqrt{zy} = \alpha + j\beta = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)}$$

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

- $\alpha$  ضریب تضعیف دامنه در واحد طول
- $\beta$  ضریب تأخیر فاز در واحد طول
- $Z_c$  امپدانس مشخصه

# مدل‌سازی خط بلند

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

$$A = D = \text{Cosh} \gamma l$$

$$B = Z_c \text{Sinh} \gamma l$$

$$C = (\cancel{\frac{1}{Z_c}}) \text{Sinh} \gamma l$$

$$V_s = A V_R + B I_R$$

$$I_s = C V_R + D I_R$$

$$\begin{cases} Z' = Z_c \text{Sinh} \gamma l \\ Y' \cancel{\frac{1}{2}} = \frac{1}{Z_c} \text{tgh} \frac{\gamma l}{2} \end{cases} \Rightarrow T = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z' Y'}{2} & Z' \\ Y' (1 + \frac{Z' Y'}{4}) & 1 + \frac{Z' Y'}{2} \end{bmatrix}$$

نیم خط سه فاز با طول ۲۲۵ مایل دارای ولتاژ ناچی ۱۳۸ kV، فرکانس ۴۰ Hz است بارامتر های خط

$$R = 0.149 \frac{\Omega}{\text{mile}}$$

$$L = 2.1093 \frac{\text{mH}}{\text{mile}}$$

$$C = 0.0142 \text{F} \frac{\mu\text{F}}{\text{mile}}$$

$$G = \infty$$

عبارت در:

خط انتقال توان ۴۰ MW را در ولتاژ ۱۳۲ kV، فرکانس توان پس فاز ۵۰ Hz. تحویل باری دهد. ولتاژ و جریان در اندکی خط، را لذعاً

خط و رگولاسیون خط را محاسبه نماید.

$$Z = 0.149 + j 2\pi 40 \times 2.1093 \times 10^{-4} = 0.1807 \angle 70.9^\circ \frac{\Omega}{\text{mile}}$$

$$Y = j 2\pi f C = j 2\pi \times 40 \times 0.0142 \text{F} \times 10^{-4} = 0.38 \times 10^{-4} \angle 90^\circ \frac{\Omega}{\text{mile}}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{0.1807 \angle 70.9^\circ}{0.38 \times 10^{-4} \angle 90^\circ}} = 31V, 2^\circ \angle -49.5^\circ$$

$$Y_L = \sqrt{Z} \angle 90^\circ = \sqrt{(0.1807 \angle 70.9^\circ) \times (0.38 \times 10^{-4} \angle 90^\circ)} \times 225 = 0.493 + j 0.494 = 0.7488 \angle 48.95^\circ$$

$$Y \sinh \gamma L = e^{j \gamma L} - e^{-j \gamma L} = e^{j \gamma L} \left( 1 - e^{-j \gamma L} \right) : \quad \begin{array}{l} \text{رادیو} \\ \text{رادیو} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{رادیو} \\ \text{رادیو} \end{array} \quad \text{محاسبه} \quad \cosh \gamma L, \sinh \gamma L$$

$$\Rightarrow \sinh \gamma L = 0.502 \angle 48.95^\circ$$

$$\cosh \gamma L = 1.190 \angle 11.75^\circ$$

رضوانی

$$A = D = \cosh \gamma L = 1.190 \angle 11.4^\circ$$

محاسبه بر این روش

$$C = \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma L = \frac{1}{4\pi V_0 \angle -4.0} \times 1.190 \angle 11.4 =$$

$$B = Z_c \sinh \gamma L = (4\pi V_0 \angle -4.0) (1.190 \angle 11.4)$$

$$V_R = \frac{1^4 V_{000}}{\sqrt{\mu}} = V_{000} \angle 0 \rightarrow \text{مجرد مجموع}$$

$$I_R = \frac{P_R}{\sqrt{\mu} |V_R| \cos \phi} = \frac{10 \times 1^4}{\sqrt{\mu} \times 1^4 V_{000} \times 0.95} = 1.1^A \angle -11.4^\circ$$

$$V_S = A V_R + B I_R = 1.1 V_{000} \angle 19.4^\circ$$

$$V_S \text{ خطی} = \sqrt{\mu} \times 1.1 V_{000} = 1.05 \text{ kV}$$

$$I_S = C V_R + D I_R = 1.4 V_{000} \angle 11.4^\circ \quad S_S = \sqrt{\mu} V_S I_S^* = [\sqrt{\mu} \times 1.05 V_{000} \times 1.4 V_{000} \angle -11.4^\circ] \times 1^4 \angle 19.4^\circ$$

$$\therefore \text{Reg} = \frac{\frac{V_S}{A} - V_R}{\frac{V_S}{A}} \times 100 \quad P_R = \text{فام} \Rightarrow \frac{P_S}{P_R} \times 100 \Rightarrow S_S = 1.05 + j 1.05 \text{ MVA}$$

PAFCO

$$P_S = ?$$

$$= \frac{1.05}{1.05} \times 100 = 100\%$$

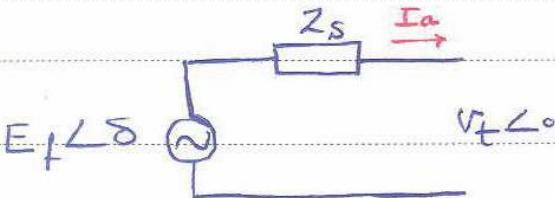
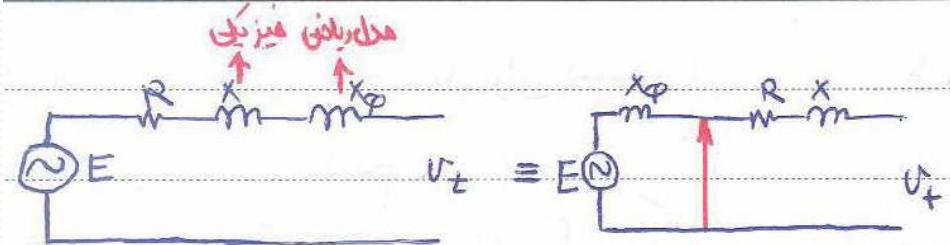
# فصل پنجم

مدل‌سازی ژنراتور سنکرون

مدل‌سازی ترانسفورماتورهای قدرت

مدل‌سازی بار

# ژنراتور سنکرون



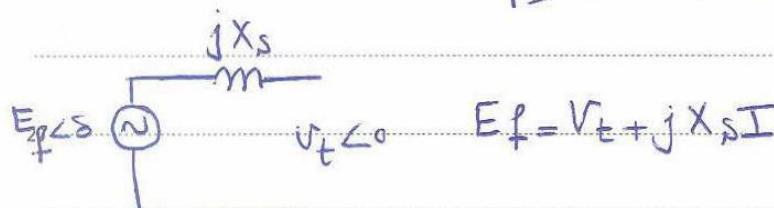
$$P = \frac{|E_f| |V_t|}{X_s} \sin \delta$$

$$15 \quad E_f = V_t + Z_s I = |V_t| \angle \theta + |Z_s| \angle \theta \quad |I_a| \angle \varphi \quad Q = \frac{|E_f|}{X_s} [|E_f| \cos \delta - |V_t|]$$

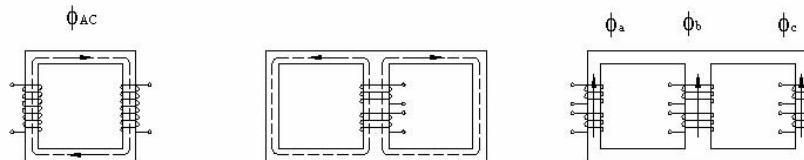
$$E_f = |E_f| \angle \delta$$

$$Z_s = X_s$$

آرگیوایت قبل صفر تغیر کردن باشد آنکه مدل ساده تر سکه رو داریم :



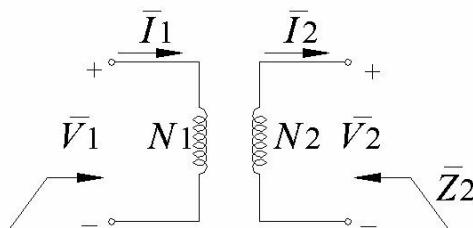
# ترانسفورماتورهای قدرت



هسته آهنی از لایه هایی از آلیاژ آهن و سلیکان  
به ضخامت 0.3mm برای کاهش تلفات آهنی

- تجهیزاتی برای تغییر ولتاژ هستند.
- ترانسفورماتور ایده آل:

- قابلیت نفوذ مغناطیسی هسته بی نهایت است.
- شار در برگیرنده یک سیم پیچ تمام حلقه های سیم پیچ دیگر را قطع می کند.

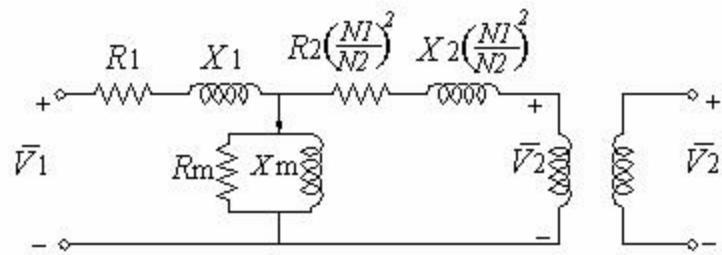
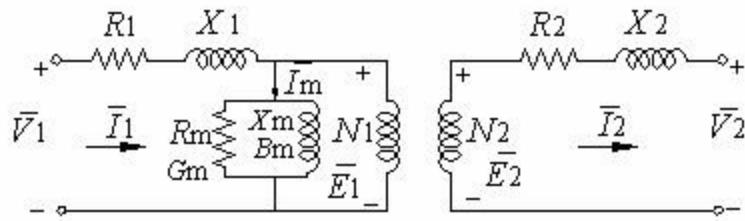


$$\frac{\bar{V}_1}{\bar{V}_2} = \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$$

$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2'$ :  $\bar{Z}_2$  امپدانسی است که از طرف ۱ دیده شود

$\bar{Z}_2 = \bar{Z}_1'$ :  $\bar{Z}_1$  امپدانسی است که از طرف ۲ دیده می شود

# ترانسفورماتور واقعی



- ترانسفورماتور واقعی

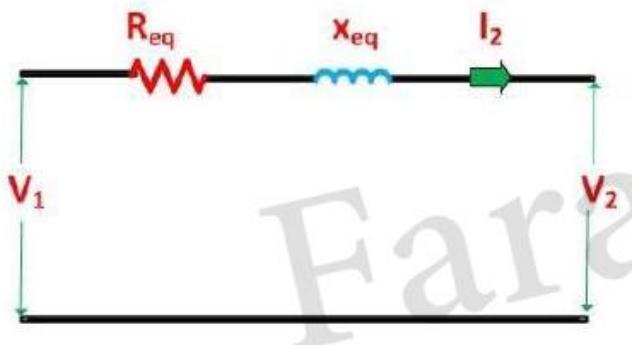
$$\frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_2'} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2' + \bar{I}_m$$

- مدل ساده شده

$$R_{eq} = R_1 + R_2' = R_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_2$$

$$X_{eq} = X_1 + X_2' = X_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_2$$



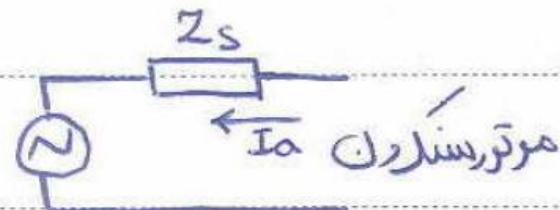
# مدل‌سازی بارهای الکتریکی

$$Z = \frac{V}{I} = |Z| \angle \theta = R + jX$$

- مدل امپدانس بار
- اگر ولتاژ و جریان را داشته باشیم انگاه از رابطه مقابله امپدانس را بدست می‌وریم

$$S_D = P_D + jQ_D$$

$$I = |I| \angle \theta$$



- مدل توانی بار
- در این مدل بار یا مصرف کننده را با توان مدل می‌کنیم

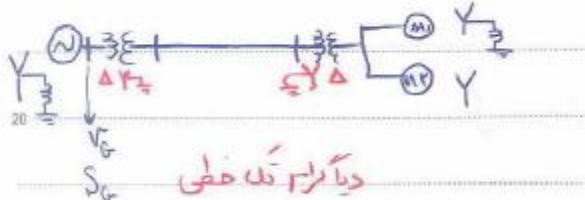
## • مدل منبع جریانی

- در این مدل بار را با یک منبع جریان مدل می‌کنیم

## • مدل منبع ولتاژی

- از این مدل برای نشان دادن یک موتور سینکورن استفاده می‌شود

# مدل سازی یک سیستم قدرت جهت مطالعه پخش بار



- شکل مقابل دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت ساده می باشد.
- یکی از اهداف پخش بار تعیین ولتاژ در باس ها می باشد.
- برای حل شبکه به جای اجزاء از مدل های انها استفاده می کنیم
- اطلاعات شبکه داده می شود (معمولاً به صورت پریونیت و در پایه خودشان)

$$\text{Gen: } E_{\text{gen}} \text{ MVA } V_0 \text{ kV } X_g = j \cdot 1 \text{ pu}$$

$$T_0 = 350 \text{ MVA } \frac{13.8 \text{ kV}}{V_0 \text{ kV}} \quad X_{T_0} = j \cdot 1$$

$$T_L = 7 \text{ miles} \quad X_L = j \cdot 0.5 \text{ miles} \quad R_L = *$$

$T_{T_0}$ : ارسه ترانس بکار رفته در نظر گرفته شده است.

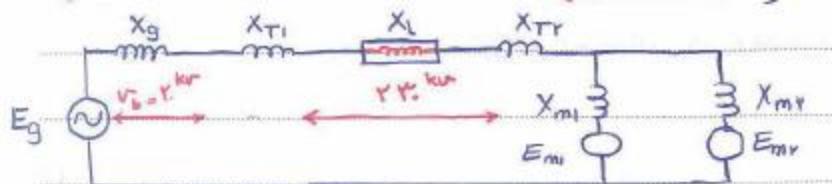
$$T_{T_0} = 100 \text{ MVA} \quad \frac{13.8 \text{ kV}}{13.2 \text{ kV}} \quad X_{T_{T_0}} = j \cdot 1$$

$$M_1: \quad V_0 \text{ MVA} \quad 13.2 \text{ kV} \quad X_{m_1} = j \cdot 1/2 \quad \left. \begin{array}{l} \text{مرنر} \\ \text{سندرو} \end{array} \right\}$$

$$M_2: \quad 100 \text{ MVA} \quad 13.2 \text{ kV} \quad X_{m_2} = j \cdot 1/2$$

$$P_{m_1} = 120 \text{ MW} \quad V = 13.2 \text{ kV} \quad \cos \phi_1 = 1$$

$$P_{m_2} = 40 \text{ MW} \quad V = 13.2 \text{ kV} \quad \cos \phi_2 = 1$$

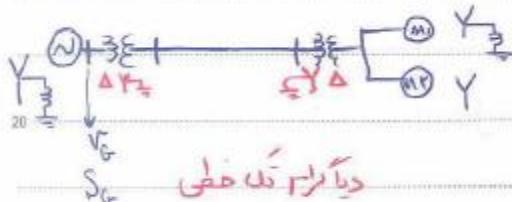


- با توجه به اطلاعات داده شده دیاگرام امپدانسی را در یک فاز رسم و در محیط پریونیت مساله را حل می کنیم.

- باید دقت کرد که مقادیر سمت ژنراتور را به عنوان مقادیر پایه در نظر می گیریم و بقیمه قسمت ها را بر اساس مبنای جدید تغییر مبنا می دهیم.

# تمرین

- شکل مقابل دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت ساده می باشد.  
با توجه به اطلاعات داده شده مقابل، مقادیر دیاگرام امپدانس را بدست اورید.



Gen.  $R_g = 34 \text{ ohm}$   $X_g = j34 \text{ pu}$

$T_1 = 34 \text{ MVA}$   $110 \text{ kV} / 11 \text{ kV}$   $X_{T1} = j34 \text{ ohm}$

$T_L = 1 \text{ mile}$   $X_L = j\frac{2}{\text{mile}}$   $R_L = 0$

$T_F = 1 \text{ mile}$   $X_{TF} = j\frac{2}{\text{mile}}$   $R_{TF} = 0$

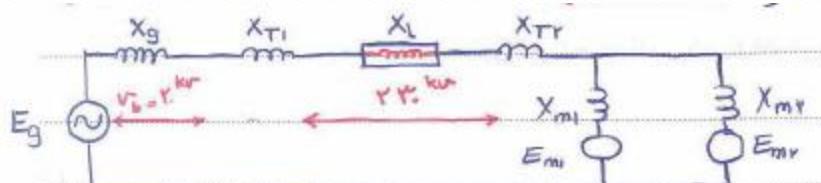
نک ناز: ۱۰۰ MVA  $11 \text{ kV} / 11 \text{ kV}$   $X_{TF} = j34 \text{ ohm}$

$M_1: R_m = 10 \text{ ohm}$   $X_m = j10 \text{ ohm}$  } مرتبه

$M_2: R_m = 10 \text{ ohm}$   $X_m = j10 \text{ ohm}$  } سرمه

$P_{m1} = 10 \text{ MW}$   $V = 11 \text{ kV}$   $\cos \phi_1 = 1$

$P_{m2} = 4 \text{ MW}$   $V = 11 \text{ kV}$   $\cos \phi_2 = 1$   $\text{kr}$



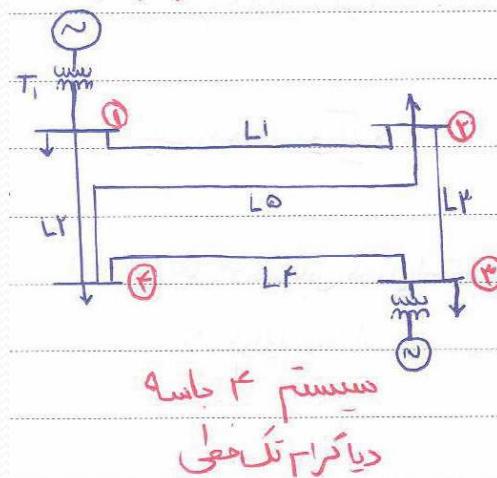
# فصل ششم

## ماتریس امپدانس و ادمیتانس شبکه

# ماتریس ادمیتانس شبکه

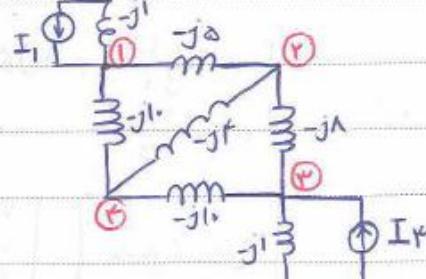
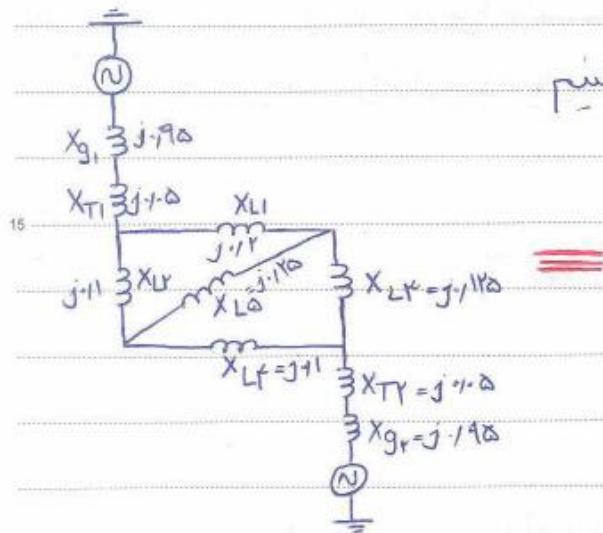
## • اصلاحات شبکه

- شاخه: شامل مجموعه‌ای از اجزای الکتریکی است که به صورت سری یا موازی بین دو ترمینال متصل باشند
- گره (شین): هر نقطه ایاز شبکه که محل اتصال بین دو یا چند شاخه باشد
- حلقه (مش): هر مسیر ایجاد شده بین دو یا چند شاخه تشکیل یک حلقه یا مش می‌دهد.
- ماتریس ادمیتانس شبکه برای حل مدار به روش انالیز گره مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- هدف ما از محاسبه ماتریس ادمیتانس شبکه بدست اوردن ولتاژ گره‌های شبکه می‌باشد.



# ماتریس ادمیتانس شبکه

در اینجا معرف نشده‌ها را با استفاده از مجموعه مدلی سینم



حال در گز عددگزاری مدار KCL می‌زیم

$$1- I_1 = V_1 (-j1) + (V_1 - V_2)(-j5) + (V_1 - V_4)(-j10)$$

$$2- 0 = (V_2 - V_1)(-j5) + (V_2 - V_4)(-j8) + (V_2 - V_3)(-j4)$$

$$3- I_4 = V_4 (-j1) + (V_4 - V_2)(-j10) + (V_4 - V_3)(-j8)$$

$$4- 0 = (V_3 - V_4)(-j10) + (V_3 - V_2)(-j4) + (V_3 - V_1)(-j10)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} I_1 = -j14V_1 + j5V_2 + j10V_4 \\ 0 = j5V_1 - j17V_2 + j8V_3 + j4V_4 \\ I_4 = j8V_2 - j19V_3 + j10V_4 \\ 0 = j10V_1 + j4V_2 + j10V_3 - j14V_4 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \\ I_4 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j14 & j5 & 0 & j10 \\ j5 & -j17 & j8 & j4 \\ 0 & j8 & -j19 & j10 \\ j10 & j4 & j10 & -j14 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

PAPCO

رضوانی

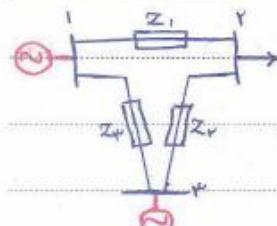
بررسی سیستم‌های قدرت و حفاظت

# ماتریس ادمیتانس شبکه

$$Y_{bus} * V_{bus} = I_{bus}$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_1 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix}$$

- در ماتریس  $I_{bus}$  اگر جهت جریان منبع به سمت شین باشد جریان مثبت و اگر جهت جریان از منبع دور شود جریان منفی است.
  - در ماتریس ادمیتانس عنصر قطری هر گره مجموع ادمیتانس های متصل به گره است که ادمیتانس خودی یا ادمیتانس نقطه تحریک نام دارد.
  - هریک از عناصر غیر قطری برابر است با ادمیتانس بین دو گروه با علامت منفی که ادمیتانس متقابل یا انتقالی نام دارد.
- $$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij}$$



$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix}$$

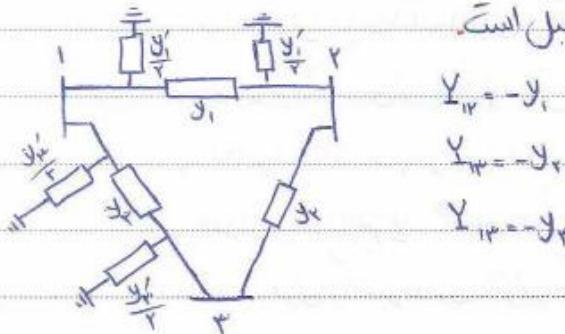
$$Z_1 = R_1 + jX_1 \Rightarrow Y_1 = \frac{1}{R_1 + jX_1}$$

$$Y_{11} = Y_1 + Y_x \quad Y_{12} = -Y_1$$

$$Y_{21} = Y_1 + Y_v \quad Y_{13} = -jY_1$$

$$Y_{31} = Y_v + Y_x \quad Y_{23} = -Y_v$$

در این حالت عناصر غیرضروری بسیار بزرگ هستند و مقدارهای بدل است.



$$Y_{11} = -Y_1$$

$$Y_{22} = -Y_2$$

$$Y_{33} = -Y_3$$

اما عنصر غیرضروری تکمیری نیست و داریم:

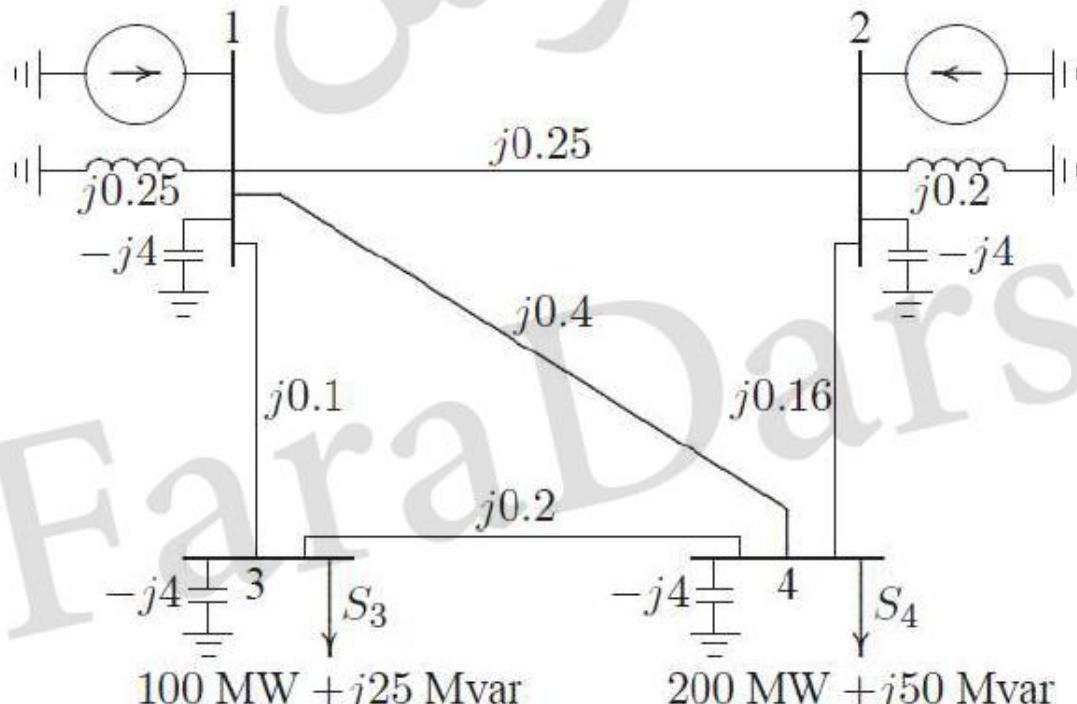
$$Y_{11} = Y_1 + Y_x + \frac{Y_2}{Z_2} + \frac{Y_3}{Z_3}$$

$$Y_{22} = Y_2 + Y_x + \frac{Y_1}{Z_1} + \frac{Y_3}{Z_3}$$

$$Y_{33} = Y_3 + Y_x + \frac{Y_1}{Z_1} + \frac{Y_2}{Z_2}$$

# مثال

- در سیستم قدرت شکل زیر ژنراتورها به وسیله منبع جریان معادل و راکتانس انها بر حسب پریونیت در مبنای ۱۰۰ مگاولت آمپر نشان داده شده است. اندازه ولتاژ شین های ۳ و ۴ را یک پریونیت فرض کرده و ماتریس ادمیتانس شبکه را بدست آورید.



- باید بارهای داده شده را نیز بر حسب پریونیت و بر حسب امپدانس نوشت

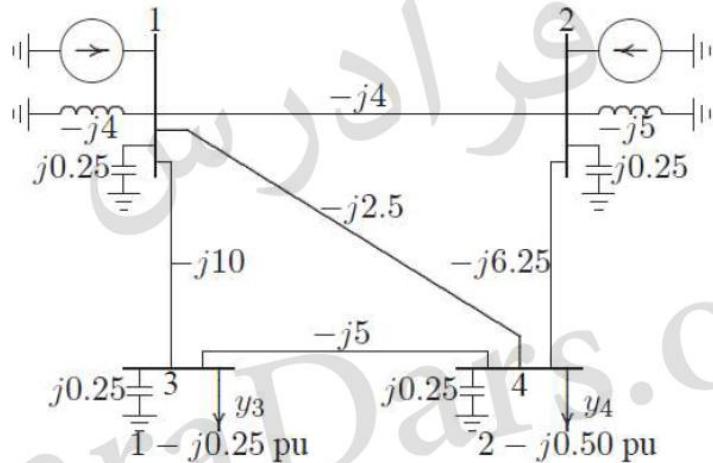
$$S_{3pu} = \frac{100}{100} + j \frac{25}{100} = 1 + j0.25pu$$

$$S_{4pu} = \frac{200}{100} + j \frac{50}{100} = 2 + j0.5pu$$

$$Z_{3pu} = \frac{V_{pu}^2}{S_{3pu}^*} = \frac{1}{1 - j0.25pu}$$

$$Z_{4pu} = \frac{V_{pu}^2}{S_{4pu}^*} = \frac{1}{2 - j0.5pu}$$

- با توجه به اطلاعات داده شده، بادی ادمیتانس خطوط را بدست آوریم که عکس امپدانس خواهد بود.
- سپس عناصر مختلف ماتریس ادمیتان را محاسبه می کنیم.



$$Y_{11} = -j4 - j2.5 - j4 - j10 + j.25 = -j20.25$$

$$Y_{22} = -j4 - j5 + j.25 - j6.25 = -j15$$

$$Y_{33} = (1 - j.25) - j10 - j5 + j.25 = 1 - j15$$

$$Y_{44} = (2 - j0.5) - j6.25 - j2.5 - j5 + j.25 = 2 - j14$$

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} -j20.25 & +j & j10 & j2.5 \\ j4 & -j15 & 0 & j6.25 \\ j10 & 0 & 1 - j15 & j5 \\ j2.5 & j6.25 & j5 & 2 - j14 \end{bmatrix}$$

# ماتریس ادمیتانس شبکه در حضور ترانسفورماتور

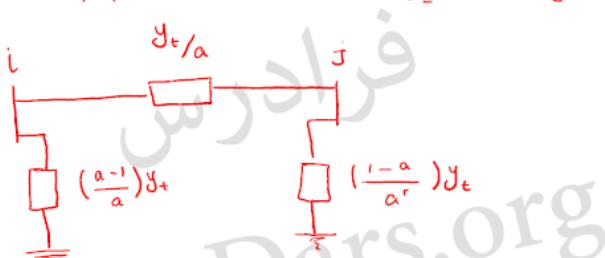
- در ترانسفورماتورهای سه فاز نسبت تبدیل یک عدد مختلط می باشد پس می توان تیجه گرفت که ولتاژ های سمت اولیه و ثانویه هم فاز نیستند.

$$\frac{V_1}{V_r} = \alpha \quad \text{نسبت تبدیل}$$

$$\frac{I_1}{I_r} = \frac{1}{\alpha^*} \Rightarrow I_1 = \frac{I_r}{\alpha^*}$$

- برای راحتی کار با تغییر مدل ترانس به صورت ذیل فرض می شود که نسبت تبدیل حقیقی باشد.

$\alpha$  نسبت تبدیل یک عدد حقیقی است.



- حال با توجه به مدل مقابله می توان ماتریس ادمیتانس را بدست اورد

# مثال :

یک سیستم قدرت ۴ شینه در شکل مقابل نشان داده شده است. ماتریس ادمیتانس شبکه را بدست آورید.

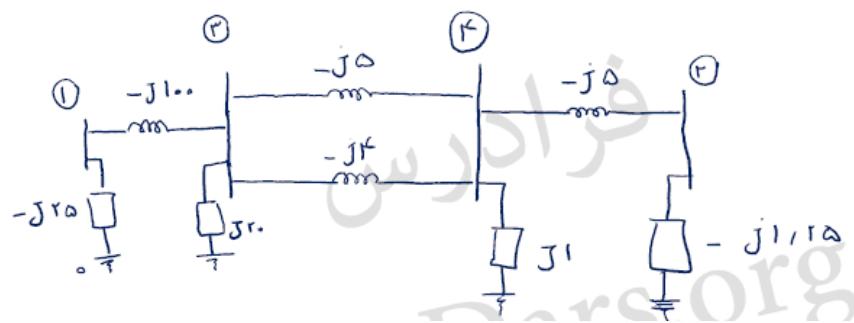
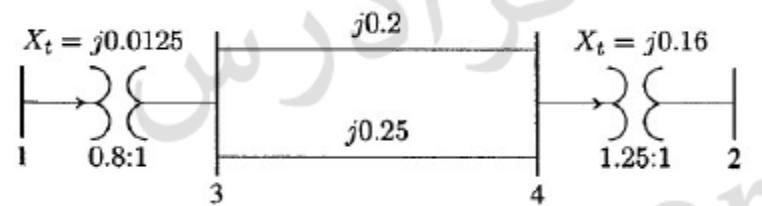
حل :

ابتدا ترانس ها را باید مدل کرد

$$T1 \begin{cases} y_{13} = \frac{y_t}{a} = \frac{-j80}{0.8} = -j100 \\ y_{10} = \left(\frac{1-a}{a^2}\right) y_t = \frac{1-0.8}{0.8^2} \times (-j80) = -j25 \\ y_{30} = \left(\frac{a-1}{a}\right) y_t = \frac{0.8-1}{0.8} \times (-j80) = -j20 \end{cases}$$

$$T2 \begin{cases} y_{42} = -j5 \\ y_{40} = -j \\ y_{30} = -j1.25 \end{cases}$$

سپس ماتریس ادمیتانس را بدست می آوریم



$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} -j125 & 0 & j100 & 0 \\ 0 & -j6.25 & 0 & j5 \\ j100 & 0 & -j89 & j9 \\ 0 & j5 & j9 & -j13 \end{bmatrix}$$

# فصل هفتم

## پخش بار

# پخش بار

- هدف از انجام پخش بار مشخص کردن اندازه و زاویه ولتاژ در تمام شین های سیستم و توان های اکتیو و راکتیو عبوری از هر خط می باشد.
- بخش اساسی و اولیه در تجزیه و تحلیل سیستم های قدرت مطالعه پخش بار است.
- معمولا از پخش بار برای موارد زیر استفاده می کنند:
  - طراحی سیستم های قدرت
  - برنامه ریزی اقتصادی
  - کنترل سیستم قدرت
  - برنامه ریزی توسعه آینده
- اگر اندازه و ولتاژ تمام شین های شبکه معلوم باشد در واقع آن شبکه حل شده است. چرا که می توان با استفاده از انها سایر کمیت های دیگر شبکه را به دست آورد.
- در مسئله پخش بار فرض می کنیم سیستم در حالت کار دائم می باشد و لذا مدل تکفار سیستم را استفاده می کنیم

# پختش بار

- در هر باس یا شین، ۴ کمیت وجود دارند که اهمیت ویژه‌ای دارند و با هم در ارتباط هستند. توان اکتیو، توان راکتیو، زاویه ولتاژ و اندازه ولتاژ
- معمولاً در هر باس دو تا از این کمیت‌ها مشخص می‌باشند و با توجه به همین اطلاعات باس‌های سیستم به سه دسته تقسیم می‌شوند:
- شین مرجع یا اسلک :
  - در شین مرجع اندازه و زاویه ولتاژ معلوم هستند و توان اکتیو و راکتیو مجھول هستند
  - شین تنظیک شده یا PV باس
  - به این شین‌ها ژنراتور یا یانک خازنی یا سایر ابزار کنترلی ولتاژ متصل است. در این باس‌ها کمیت‌ها اندازه ولتاژ و توان اکتیو مشخص می‌باشند
  - شین بار PQ باس :
  - باس‌هایی که غالباً به انها بار متصل باشد شین بار نامیده می‌شود و در این باس‌ها توان‌های اکتیو و راکتیو معلوم می‌باشند.

# معادلات پخش بار

- P1 توان خالص تزریقی به باس یک می باشد می باشد.

$$\begin{bmatrix} \frac{P_1 - jQ_1}{V_1^*} \\ .. \\ \frac{P_n - jQ_n}{V_n^*} \end{bmatrix} = Y_{bus} \times \begin{bmatrix} V_1 \\ .. \\ V_n \end{bmatrix}$$
$$P_1 = P_{g1} - P_{d1}$$
$$Q_1 = Q_{g1} - Q_{d1}$$

- این معادلات برای یک فاز بوده و برای هر فاز تکرار می شود.
- معمولا هر ۱۵ دقیقه این معادلات را حل کرده و پارامترها را محاسبه می نمایند.

# حل معادلات غیر خطی به روش گاوس سایدل

- فرض می شود  $n$  معادله با  $n$  مجھول داریم.
- در هر معادله یکی از پارامترها را بر حسب پارامترهای دیگر بدست می اوریم
- در مرحله اول برای هر پارامتر یک حدس اولیه میزنیم و با توجه به آنها پارامترها را محاسبه می کنیم.
- با پاسخ های بدست امده دوباره در معادلات جایگذاری کرده و مقادیر جدید پارامترها را محاسبه می کنیم.
- این کار را انقدر تکرار می کنیم که اختلاف دو پاسخ پشت سر هم از میزان خطای مدنظر کمتر گردد.

$$\begin{array}{ll}
 x_1^1 = g_m(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) & x_1^k = g_m(x_1^{k-1}, x_2^{k-1}, \dots, x_n^{k-1}) \\
 \cdots & \cdots \\
 x_i^0, x_2^0, \dots, x_n^0 & x_i^1 = g_z(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \quad x_i^k = g_z(x_1^{k-1}, x_2^{k-1}, \dots, x_n^{k-1}) \quad x_i^{k+1} - x_i^{k+1} \leq \varepsilon \\
 \cdots & \cdots \\
 x_n^1 = g_n(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) & x_n^k = g_n(x_1^{k-1}, x_2^{k-1}, \dots, x_n^{k-1})
 \end{array}$$

# حل معادلات شبکه به روش گاوس سایدل

- روش شماره گذاری باس ها

- شماره یک باس اسلک

- شماره ۲ تا  $m$  باس های PV

- شماره  $m+1$  تا  $n$  باس های PQ

- حل معادلات شبکه بدون PV باس

- $V_i$  ها بر اساس متغیر های دیگر مرتب می کنیم.

- عناصری که صفر هستند را خط می زنیم

- مقادیر ماتریس ادمیتانس  $X$  و  $Y$  و  $Q$  ها را جایگذاری می کنیم

- برای هر ولتاژ باس (به جز باس اسلک که مقدارش معلوم است) حدس اولیه یک با زاویه صفر را

- وارد می کنیم. (تمام مقادیر پریونیت هستند).

- با جایگذاری مقایر اولیه ولتاژ باس ها،  $V_i^k$  را بدست آورده و دوباره در معادلات قرار می دهیم

- زمانی که اختلاف دو تکرار از میزان خطای مد نظر کمتر بود پاسخ ها به دست امده است.  $\epsilon \leq$

- با قرار دادن مقادیر نهایی در معادله باس اسلک ،  $P, Q$  باس شماره یک را بدست می آوریم.

- برای محاسبه توان خطوط از رابطه زیر استفاده می کنیم :

$$P_{ij} + jQ_{ij} = V_i I_{jj} = V_i \times \left( \frac{V_i - V_j}{Z_{ij}} + V_i \frac{y}{2} \right)$$

# حل معادلات شبکه به روش گاوس سایدل

- حل معادلات شبکه دارای PV باس
- روش شماره گذاری باس ها
- شماره یک باس اسلک
- شماره ۲ تا m باس های PV
- شماره ۱ تا n باس های PQ
- معادله یک باس اسلک را جدا می گذاریم.

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left( \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - Y_{i1}V_1 - \dots - Y_{in}V_n \right)$$

$$Q_o = -\operatorname{Im} g(V_o^* \sum_{q=1}^n Y_{oq} V_q)$$

- $V_i$  ها را بر اساس متغیر های دیگر مرتب می کنیم. (معادلات ۲ تا m)
- $Q_o$  ها را بر اساس متغیرهای دیگر مرتب می کنیم (معادلات ۱ تا n+1)
- عناصری که صفر هستند را خط می زنیم

- مقادیر ماتریس ادمیتانس  $\mathbf{Y}$  و  $Q$  ها را جایگذاری می کنیم

- برای هر ولتاژ PV باس  $i,j$  چون اندازه معلوم است لذا فقط زاویه را صفر با اندازه داده شده می گذاریم. و
- برای باس های PQ برای ولتاژ ها یک با زوایه صفر می گذاریم.
- با جایگذاری مقایر اولیه ولتاژ باس ها،  $Q_i^k$  را بدست آورده و در معادلات ولتاژ قرار داده و  $V_i^k$  بدست می اوریم.

- زمانی که اختلاف دو تکرار از میزان خطای مد نظر کمتر بود پاسخ ها به دست امده اس $\leq$
- با قرار دادن مقادیر نهایی در معادله باس اسلک،  $P,Q$  باس شماره یک را بدست می آوریم.

$$P_{ij} + jQ_{ij} = V_i I_{jj} = V_i \times \left( \frac{V_i - V_j}{Z_{ij}} + V_i \frac{y}{2} \right)$$

برای محاسبه توان خطوط از رابطه زیر استفاده می کنیم :

# فصل هشتم

## شبکه های توزیع

# سطح استاندارد نامی ولتاژ در شبکه برق ایران

نوع شبکه	علامت اتصال	حداکثر ولتاژ سیستم (کیلوولت)	سطح نامی ولتاژ (کیلوولت)
فشار ضعیف (توزیع)	LV	—	0.4
فشار متوسط (توزیع)	MV	24, 12*, 36*	20, 11*, 33*
فشار قوی (فوق توزیع)	HV	72.5	63
فشار قوی (فوق توزیع)	HV	145	132
فشار قوی (انتقال)	HV	245	230
فوق فشار قوی (انتقال)	EHV	420	400

# شبکه های توزیع

- وظیفه شبکه توزیع رساندن انرژی الکتریکی از پست های فوق توزیع به مصرف کننده ها می باشد.
- تعریف
  - ردیف یا سطح ولتاژ : سطح ولتاژ نامی خطوط توزیع نیروی برق می باشد.
  - خطوط برق فشار ضعیف: به خطوط توزیع برق با ولتاژ های خط به خط کمتر از یک کیلوولت گفته می شود.
  - خطوط برق فشار متوسط : به خطوط توزیع برق با ولتاژ های خط به خط بین یک تا سی و سه کیلوولت گفته می شود. در کشور ما سطوح ۱۱، ۲۰ و ۳۳ کیلوولت وجود دارند. در استان خراسان شمالی سطح ۲۰ کیلوولت داریم.

# شبکه های توزیع

- بخش های اصلی شبکه توزیع

- پست فوق توزیع

- فیدرها فشار متوسط (هوایی یا زمینی)

- پست های توزیع (هوایی یا زمینی)

- فیدرها فشار ضعیف (هوایی یا زمینی)

- لوازم اندازه گیری

- آینده شبکه های توزیع :

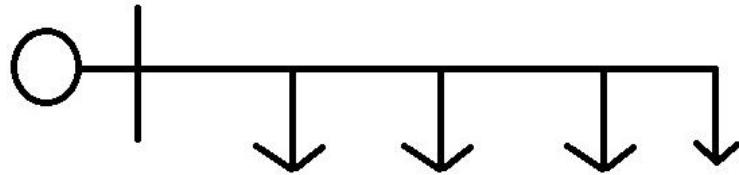
- شبکه های توزیع هوشمند Smart Grid



# شبکه های توزیع

- حریم خطوط هوائی برق با توجه به ردیف ولتاژهای مختلف به شرح زیر تعیین می شود:
  - ۱- حریم خطوط هوائی فشار ضعیف: حریم خطوط نیروی برق کمتر از یک هزار ولت، به صورت زمینی بوده که حداقل آن  $\frac{3}{1}$  متر می باشد.
  - ۲- حریم خطوط هوائی فشار متوسط:
    - الف . حریم خطوط نیروی برق ردیف ولتاژ یکهزار تا بیست هزار ولت به صورت زمینی بوده که حداقل آن  $\frac{10}{2}$  متر می باشد.
    - ب . حریم خطوط نیروی برق ردیف ولتاژ سی و سه هزار ولت به صورت زمینی بوده که حداقل آن  $\frac{5}{3}$  متر می باشد.

# انواع شبکه های توزیع

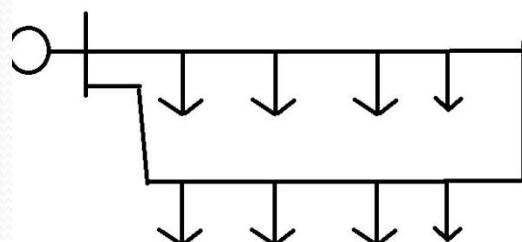
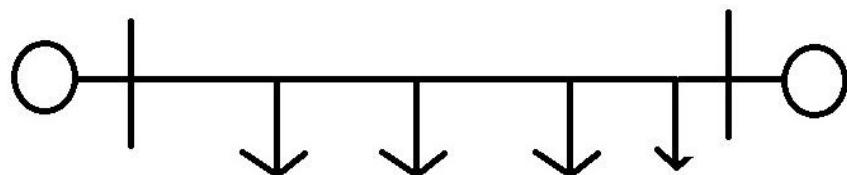


- شبکه های شعاعی یا از یکسو تغذیه  
در این نوع شبکه ها هر مصرف کننده صرفا از طریق یک مسیر به شبکه توزیع متصل است.

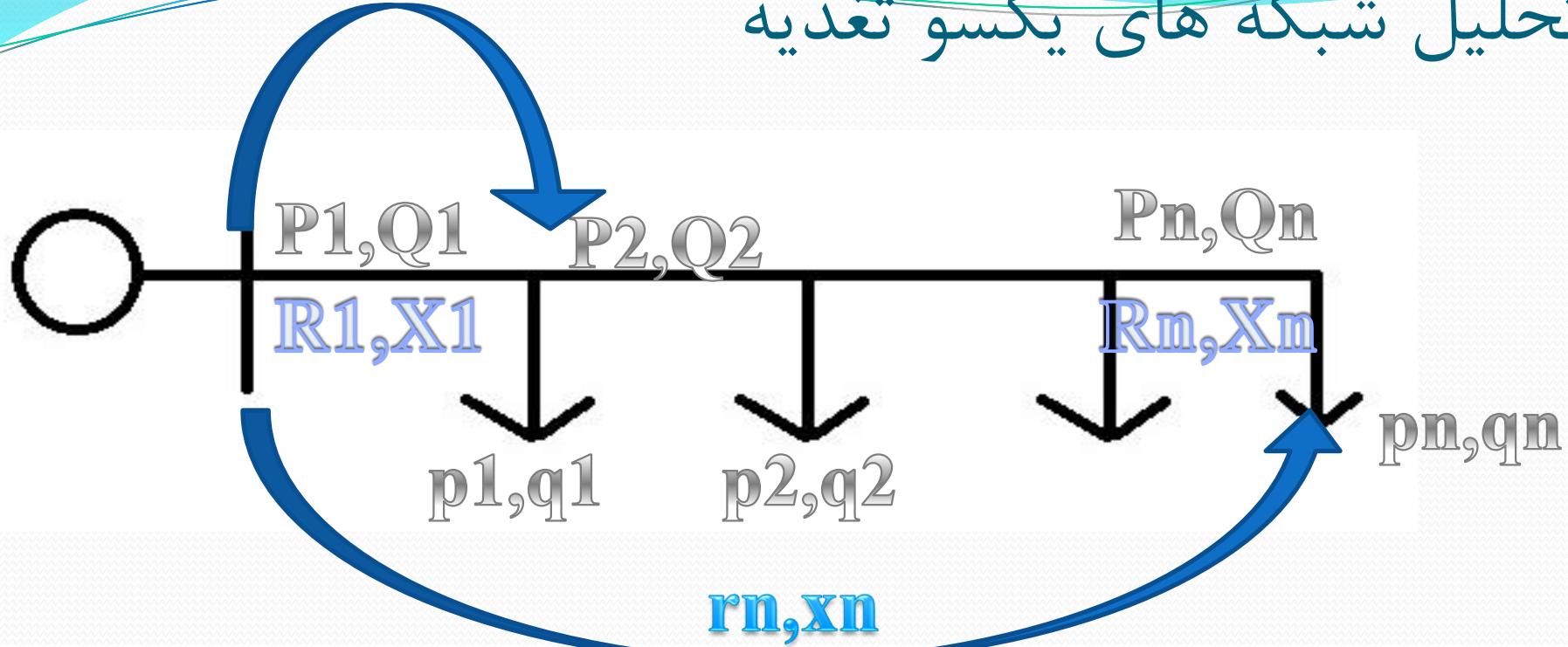
در شبکه شعاعی از کلیدها برای قطع و از فیوز برای موقع اتصال کوتاه استفاده می گردد.

- مزایای شبکه شعاعی
  - بهره برداری آسان
  - سادگی محاسبات
  - کنترل و حفاظت راحت
- معایب شبکه شعاعی
  - ضریب اطمینان پایین
  - افت ولتاژ زیاد
  - تلفات بالا

- شبکه های دو سو تغذیه
- شبکه های رینگ و غربالی



# تحلیل شبکه های یکسو تغذیه



$$r_i = \sum_1^n R_n, r_3 = R_1 + R_2 + R_3, \dots, x_i = \sum_1^n X_n, x_3 = X_1 + X_2 + X_3$$

$R_i$ : مقاومت  $i$ -ام فیدر یا خط و  $X_i$ : راکتانس  $i$ -ام فیدر یا خط  
 $r_i$ : مقاومت خط از ابتدای فیدر تا ابتدای بار یا شاخه  $i$ -ام و  $x_i$ : مقاومت خط از ابتدای بار یا شاخه  $i$ -ام  
 $p_i, q_i$ : توان بار  $i$ -ام و  $P_i, Q_i$ : توان عبوری از شاخه  $i$ -ام فیدر

$$P_n = p_n, \quad P_i = p_n + \dots + p_i, \quad P_1 = p_n + \dots + p_3 + p_2 + p_1$$

# تحلیل شبکه های یکسو تغذیه

$$\Delta V = \frac{1}{V} (p1r1 + p2r2 + \dots + pn rn + x1q1 + \dots + xnqn)$$

$$\Delta V = \frac{1}{V} (P1R1 + P2R2 + \dots + PnRn + X1Q1 + \dots + XnQn)$$

درصد افت ولتاژ در فیدر:

$$e = \frac{\Delta V}{V} \times 100$$

# فصل نهم

## مقدمه ای بر حفاظت شبکه های توزیع

# اهمیت سیستم قدرت و ساختار آن

- سیستم قدرت شامل تولید توسط ژنراتورها، انتقال و توزیع توسط خطوط انتقال یا توزیع، مصرف انرژی در بارهای الکتریکی می باشد. در واقعه انرژی الکتریکی باید به صورت مطمئن و پایدار به مصرف کننده برسد.
- انرژی الکتریکی دریافتی در سمت مصرف کننده باید موارد زیر را داشته باشد:
  - اقتصادی و مقرر به صرفه بوده
  - دارای کیفیت لازم (ولتاژ و فرکانس)
  - دارای ایمنی بالا
- ساختار سیستم قدرت
  - لايه اول: تجهيزات مربوط به تولید، انتقال، توزیع و مصرف
  - لايه دوم: تجهيزات کنترلی مانند کنترل کننده ولتاژ و فرکانس، کنترل کننده توان
  - لايه سوم : تجهيزات حفاظتی نظير کلیدها و رله ها

# سیستم حفاظتی

- خطا : به بروز هرگونه وضعیت غیرعادی در یک سیستم قدرت خطا گفته می شود.
- پیامدهای وقوع خطا :
  - افزایش غیر عادی جریان و در نتیجه افزایش حرارت سیستم
  - ایجاد جرقه که ممکن است موجب اتش سوزی شود
  - افزایش یا کاهش غیر قابل قبول ولتاژ سیستم
  - به وجود آمدن حالت نامتقارن در سیستم و آسیب رساندن به تجهیزات سه فاز
  - سیستمی که بعد از ایجاد اغتشاش یا خطا باعث شود تا کمترین قطعی در سیستم قدرت وجود داشته باشد و حداقل خسارت به شبکه وارد شود را سیستم حفاظت گویند.

# سیستم حفاظتی

- هدف از نصب سیستم حفاظتی
  - حذف قسمت خطا دیده از سیستم اصلی
  - کم کردن خسارت واردہ به سیستم قدرت
- اجزای سیستم حفاظتی:
  - باتری ها یا منابع DC
  - ترانسفورماتورهای ولتاژ PT و یا ترانس های جریان CT
  - کلیدهای قدرت
    - کلیدهای قابل قطع زیر بار LBS - دزنگتور
    - کلیدهای غیر قابل قطع زیر بار - سکسیونر
  - رله ها

# پارامترهای یک سیستم حفاظت

- قدرت انتخاب کنندگی :
- یک سیستم حفاظتی باید بتواند حالت غیر نرمال را از حالت نرمال به وسیله رله تشخیص دهد. به عنوان نمونه جریان راه اندازی یک موتور حدود ۷ برابر جریان نامی موتور بوده و حالت نرمال می باشد ولی جریان اتصال کوتاه قابل تحمل برای موتور حدود ۲ برابر جریان نامی است و این جریان باید قطع شود.
- سرعت عملکرد سیستم حفاظتی :
- سیستم حفاظتی باید با بالاترین سرعت، قسمت های سالم شبکه را از قسمت آسیب دیده جدا کند تا خسارت کمی به شبکه وارد شود.
- حفاظت اصلی و پشتیبان
- هنگام بروز خطا، حفاظت اصلی باید در سریعترین زمان عمل کند و اگر سیستم اصلی عمل نکرد باید حفاظت پشتیبان وارد عمل شده و کار حفاظت را انجام دهد.

# حفظ خطوط انتقال یا توزیع

- عمدۀ خطاهایی که در یک سیستم قدرت اتفاق می‌افتد خطای اتصال کوتاه می‌باشد. و بیشترین سهم را برای خطای اتصال کوتاه خطوط انتقال دارند لذا حفاظت خطوط انتقال از اهمیت بالایی برخوردار است.
- وسایل حفاظتی مورد استفاده در خط انتقال:
  - فیوزها
  - ریکلوزرها و سکشن لایزرها
  - رله‌های جریان زیاد لحظه‌ای
  - رله جهت یاب
  - رله دیستانس

# فیوزها

قدیمی ترین و ساده ترین وسیله حفاظتی بوده و بیشتر در اماکن مسکونی و تجاری مورد استفاده قرار می گیرد. فیوزها با داشتن سیم های باریکی که در ابتدا به صورت سربی بوده اند هم به عنوان سنسور عمل می کند و هم به عنوان قطع کننده عمل می کنند. فیوز به صورت سری در مدار قرار می گیرد.



## مزایای فیوز

- قیمت ارزان

- به تنها یابی عمل می کند و به باتری نیازی ندارد

- هزینه نصب پایین

- اشغال فضای کم

- عدم نیاز به نگهداری

- سرعت عملکرد بالا

## معایب فیوز :

- آسیب پذیری از عوامل محیطی(باران برف)

- عدم فرمان گرفتن از رله ها و در نتیجه خارج از کنترل بودن

- هماهنگی سخت با سایر وسائل حفاظتی

# ریکلوزر و سکشن لایزر

## • ریکلوزر

• وسیله است که چند بار عمل قطع و وصل را انجام می دهد. در واقع خطاهای گذرا همچون برخورد دو سیم بر اثر طوفان و .. را که به سرعت به اتمام رسیده و پایدار نیستند را از خطاهایی همچون افتادن شاخه درخت روی خطوط و پاره شدن سیم ها و .. که پایدار بوده و جریان خطا برای زمان بیشتر در خط عبور میکند را شناسایی می کنند. در صورتی که خطا دائم باشد این وسیله شبکه را به طور کامل قطع نموده و دستور وصل را تا زمان رفع خطا صادر نمی کند.

## • سکشن لایزر

• این وسیله با شمردن تعداد قطعی های شبکه (عملکرد ریکلوزر) قسمت سالم را از قسمت آسیب دیده جدا می کند. باعث می شود که قسمتی از شبکه دچار خطا شده از شبکه جدا شود و قسمت های سالم همچنان به کار خود ادامه دهند.

- رله ابزاری است که با صدور فرمان باز و بست شدن قطع کننده ها سبب می شود تا عملکرد تجهیزات و وسایل در سیستم قدرت تحت نظارت و کنترل قرار بگیرند.
- رله گذاری عبارت است از طراحی و کاربرد رله که شرایط غیر عادی را در سیستم قدرت تشخیص دهد و به سرعت دستور حذف قسمت معیوب از شبکه اقدام نماید.
- رله ها با توجه به وظیفه انها به دسته های مختلفی تقسیم می شوند:
- رله های جریان
- رله های جریان زیاد و رله های جریان کم
- رله های ولتاژ
- رله های فرکانسی
- رله های توان
- رله های جهت دار
- رله های دیستانس

# منابع

- جزوه آموزش بررسی سیستم های قدرت ۱، رحمت الله خضری، موسسه فرادرس
- جزوه درس بررسی سیستم های قدرت ۱، دکتر رضا قاضی

