بسم الله الرحمن الرحیم

درس: بررسی سیستمهای قدرت ۲
فصل:پخش بار
قسمت اول و دوم

ارائه دهنده: علی بوبه رژ

ALIBOOBEHREJ@GMAIL.COM

ALIBOUBEHREZH.BLOGFA.COM

پخش بار

پخش بار: حل مدار الکتریکی سیستم قدرت در شرایط کار پایدار را پخش بار یا Load flow می گویند. اهداف پخش بار به صورت زیر است:

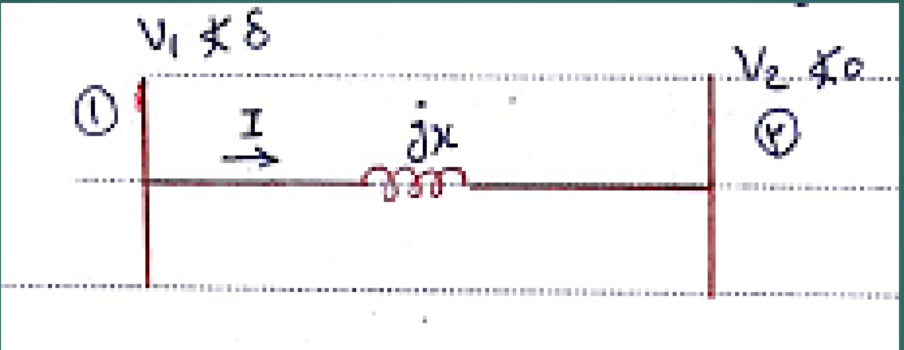
1) توان تولیدی نیروگاه ها با توان مصرفی و تلفات و تلفات سیستم در حالت پایدار برابر باشد.

2) امنیت ولتاژ در کل سیستم محدود باشد (در حالت پایدار)

3) اضافه بار نداشته باشیم تا به تجهیزات آسیب وارد نشود (در حالت پایدار)

اگر یک خط کوتاه با دو باس داشته باشیم محاسبه جریان عبوری تقریباً کاری راحت است، اما با افزایش تعداد باس ها و تبدیل شدن شبکه به شبکه حلقوی نوشتن رابطه ی جریان (و به همین ترتیب توان و ولتاژ) کار بسیار دشواری خواهد بود. در نتیجه معادلات به صورت ماتریس نوشته شود.

پخش بار



قانون اهم $\rightarrow$ $I = \dfrac{V_1 \angle \delta - V_2 \angle 0}{jx}$

$$I_{Bus} = Y_{Bus} \times V_{Bus}$$

ماتریس ماتریس ماتریس

چگونگی تشکیل YBUS

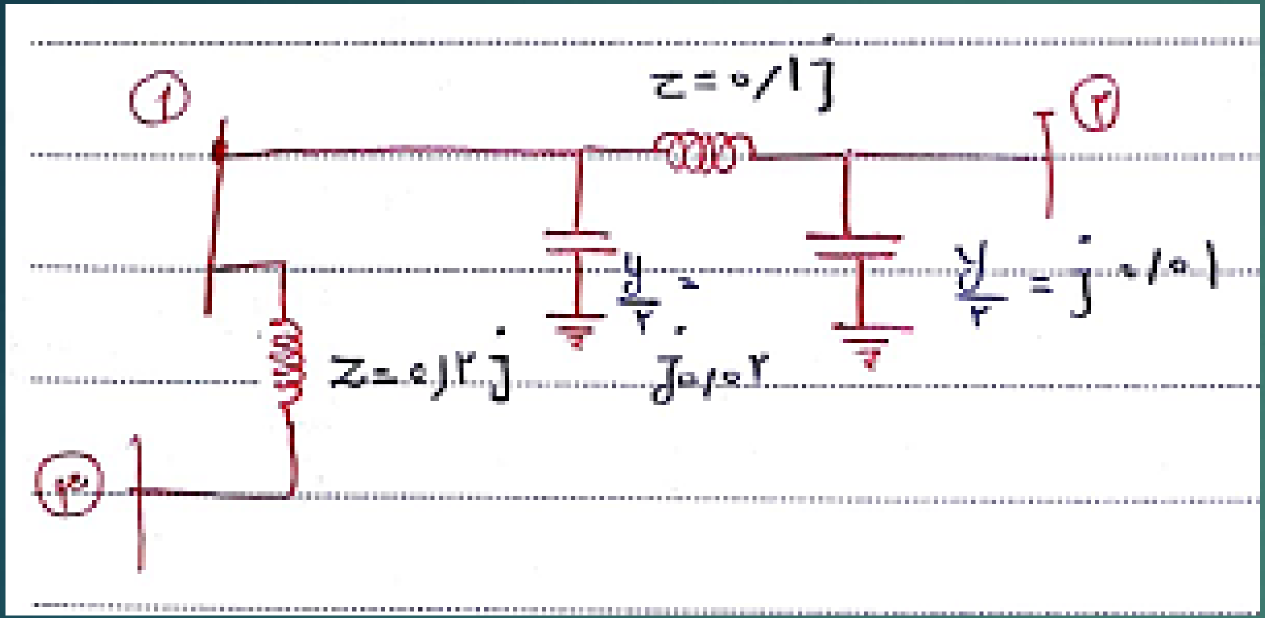
۱. چگونگی تشکیل ماتریس Y_{BUS} :

$$\begin{cases} y_{ii} = \text{مجموع ادمیتانس متصل به باس } i \\ y_{ij} = -\left(\text{ادمیتانس های بین گره } i , j\right) \end{cases}$$

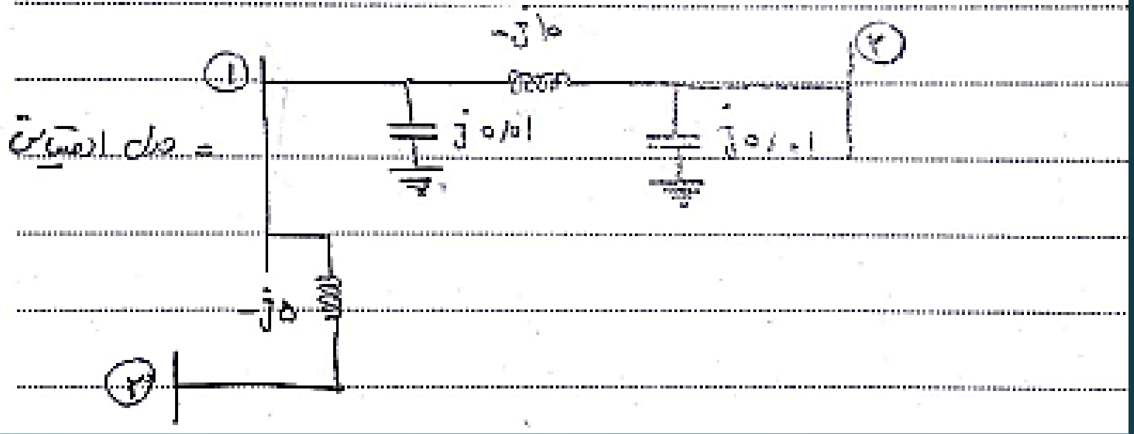
۲.

$$Y_{BUS} : \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & y_{n3} & \cdots & y_{nn} \end{bmatrix}$$

مثال



$y_1 = \frac{1}{j0/1} = -j10$ $\qquad$ $y_2 = \frac{1}{j0/2} = -5j$



$$
Y_{bus} = \begin{bmatrix} (1)\ (-j10 + j0/01 - j5) & j10 & j5 \\ (2)\ +j10 & (-j10 + j0/01) & 0 \\ (3)\ +j5 & 0 & j5 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} -j14/99 & j10 & j5 \\ j10 & -j9/99 & 0 \\ j5 & 0 & -j5 \end{bmatrix}
$$

خواص YBUS

خواص Y_{BUS} : ① ماتریس ادمیتانس «ها» ازلحاظ اندازه متقارن است (Y_{BUS} و Y_{BUS}^{T}) ولی از نظر زاویه ممکن است متقارن نباشد.

(اگر ترانس ستاره مثلث یا مثلث ستاره داشته باشیم در این حالت از نظر اندازه متقارن است. اما از نظر زاویه ممکن است متقارن نباشد)

② ماتریس Y_{BUS} در شبکه‌های بزرگ «تُنُک» است (Sparse) . یعنی تعداد صفرهای درایه‌های این ماتریس زیاد است.

③ مجموع سطر و ستون‌ها در ماتریس Y_{BUS} اگر منبع ولتاژ (ژنراتور) نداشته باشیم تقریباً صفر است.

(اگر مدل خط کوتاه به کار ببریم و ژنراتور نداشته باشیم قطعاً صفر است)

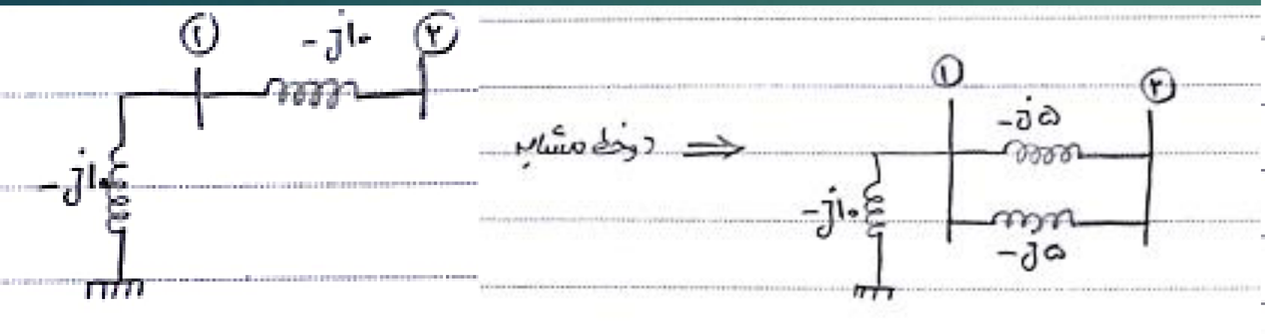
④ هیچگاه بار متصل به باس‌ها وارد محاسبه‌ی (Y_{BUS}) نمی‌شود. (چون ممکن است میزان بار تغییر کند و باید Y_{BUS} در حالت عادی همیشه ثابت باقی بماند تا بتوانیم محاسبات را انجام دهیم.

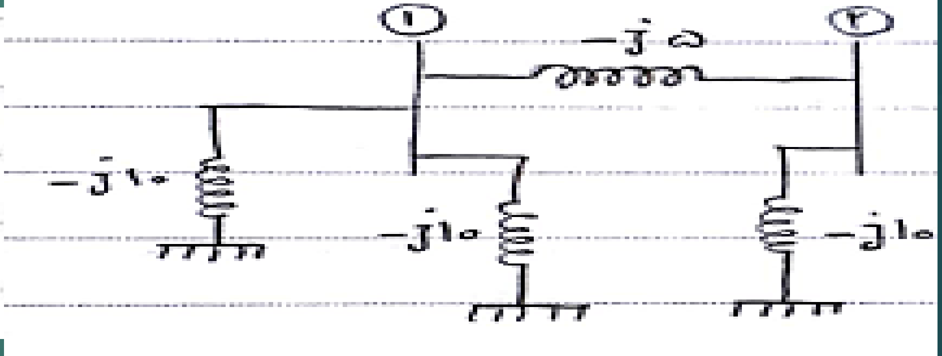
Aliboubehrezh.blogfa.com

مثال

- مثال: ماتریس Y شبکه دو شینه که بین دو باس دو خط کاملاً مشابه قرار دارند به صورت زیر است، چنانچه یکی از خطوط از وسط پاره شده و روی زمین بیافتد ماتریس Ybus چه تغییری می‌کند:

$$Y_{bus} = \begin{array}{c c} & \begin{array}{cc} ① & ② \end{array} \\ \begin{array}{c} ① \\ ② \end{array} & \begin{bmatrix} -j20 & j10 \\ j10 & -j10 \end{bmatrix} \end{array}$$



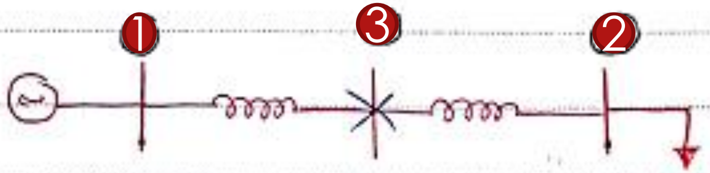


$$Y_{bus_{\text{جدید}}} = \begin{bmatrix} -j5 - j10 - j10 & +j5 \\ j5 & -j5 - j10 \end{bmatrix}$$

$$Y_{bus_{\text{جدید}}} = \begin{bmatrix} -j25 & +j5 \\ +j5 & -j15 \end{bmatrix}$$

کاهش درجه YBUS

- کاهش درجه ی Y_{Bus} : اگر باسی به ژنراتور یا مصرف کننده ای به طور مستقیم متصل نباشد می توان آن باس را از محاسبات حذف نمود ، این عمل باعث کاهش حجم محاسبات در برنامه های کامپیوتری پخش باری شود.



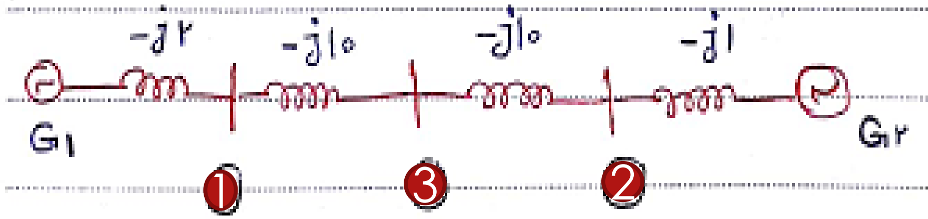
برای حذف یک باس لازم است شماره گذاری طوری باشد که باس حذفی در آخرین سطرهای ماتریس Y_{Bus} قرار گیرد. آنگاه درایه های جدید ماتریس بعد از حذف شینه ی n ام از رابطه ی زیر بدست می آید:

* در اینجا باس ۳ حذفی می باشد.

$$Y_{jk(new)} = Y_{jk(old)} - \frac{Y_{jn} \cdot Y_{nk}}{Y_{nn}}$$

مثال

مثال: در شکل روبرو مطلوبست:



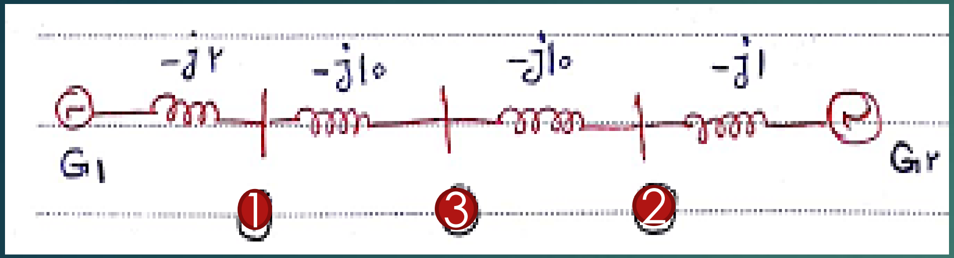
① بدست آوردن Y_{Bus}:

② با روش مستقیم Y_{Bus} را با حذف باس ۳ بدست آورید:

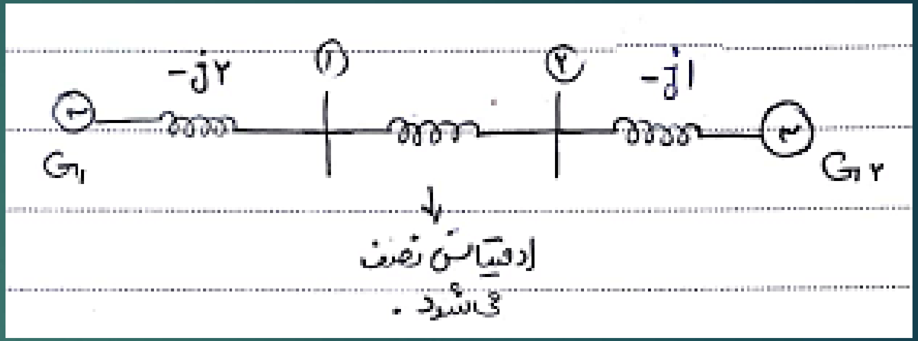
③ Y_{Bus} را با حذف باس ۳ با روش حذف باس بدست آورید: (با فرمول)

Aliboubehrezh.blogfa.com

حل مثال



$$Y_{Bus} = \begin{bmatrix} -j12 & 0 & j10 \\ 0 & -j11 & +j10 \\ +j10 & +j10 & -j20 \end{bmatrix}$$



$$Y_{Bus} = \begin{bmatrix} -j7 & +j5 \\ +j5 & -j9 \end{bmatrix}$$

ادامه حل مثال

جواب ④

$$Y_{Bus}(old) = \begin{array}{c|ccc} & ① & ② & ③ \\ \hline ① & -j12 & 0 & +j10 \\ ② & 0 & -j11 & +j10 \\ ③ & j10 & j10 & \boxed{-j20}_{\,Y_{33}} \end{array}$$

$$Y_{jk(new)} = Y_{jk(old)} - \frac{Y_{jn} \cdot Y_{nk}}{Y_{nn}}$$

$$Y_{11}(new) = Y_{11}(old) - \frac{Y_{13} \cdot Y_{31}}{Y_{33}} = -j12 - \frac{j10 \times j10}{-j20} = -j12 - \frac{j100}{20} \rightarrow$$

$$Y_{11}(new) = -j12 + j5 = \boxed{-j7}$$

$$Y_{21}(new) = Y_{12}(new) = Y_{21}(old) - \frac{Y_{23} \times Y_{31}}{Y_{33}} = 0 - \frac{j10 \times j10}{-j20} = \boxed{j5}$$

$$Y_{22}(new) = Y_{22}(old) - \frac{Y_{23} \cdot Y_{32}}{Y_{33}} = -j11 - \frac{j10 \times j10}{-j20} = -j11 + j5 = \boxed{-j6}$$

$$* \; Y_{Bus}(new) = \begin{bmatrix} -j7 & +j5 \\ +j5 & -j6 \end{bmatrix}$$

Aliboubehrezh.blogfa.com

انواع باس

① باس بار (load Bus) (PQ Bus)
$\left.\begin{matrix} P \\ Q \end{matrix}\right\}$

② باس کنترل ولتاژ (PV Bus)
$\left.\begin{matrix} P \\ V \end{matrix}\right\}$

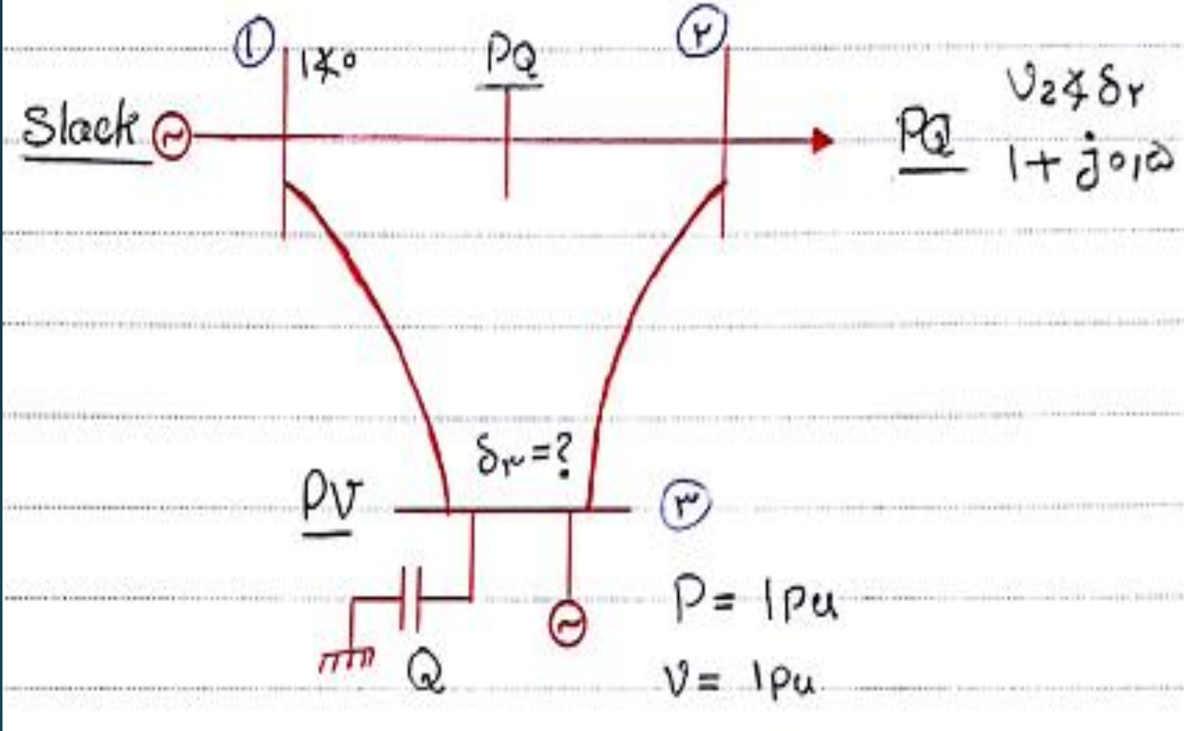
③ باس اسلک (Slack Bus) (Swing Bus) (باس مرجع)
$\left.\begin{matrix} V=1 \\ \delta=0 \end{matrix}\right\}$

① باس بار: باسی است که در آن توان اکتیو و راکتیو مشخص است ، در یک شبکه معمولاً ۷۰ تا ۸۰ درصد باس ها از این نوع است .

② باس کنترل ولتاژ: در این باس ها توان اکتیو و ولتاژ باس مشخص است . این باس ها معمولاً دارای یک ژنراتور یا یک خازن می باشند . حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد باس ها در سیستم قدرت (PV) هستند .

③ - باس اسلک: باسی است که ولتاژ و زاویه ی آن مشخص می باشد ، این باس معمولاً به بزرگترین ژنراتور شبکه متصل است .

انواع باس



NPV ← تعداد باس PV

NPQ ← تعداد باس PQ

$\boxed{2N_{PQ} + N_{PV}}$ → تعداد مجهولات

جدول جداسازی معلومات و مجهولات:

نوع باس	معلومات	مجهولات
Slack	V_1 , δ_1	P_1 و Q_1
PV	P_j و V_j	Q و δ_j
PQ	P_i و Q_i	V_i و δ_i

* اگر این مجهولات بدست آید کل مسئله حل می‌شود و از طریق آن ، سه معادله و سه مجهول بدست می‌آید.

* معلومات را نوشته و برای آن سه معادله سه مجهول می‌نویسیم

ـ برای این که تعداد معادلات با تعداد مجهولات برابر باشد (تا مسئله بتواند حل شود) باید معادله‌ی توان اکتیو باس‌های PV و همچنین معادله‌ی توان های اکتیو و راکتیو باس های P و Q را بنویسیم

معادلات اساسی پخش بار

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

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & & & \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

$$I_i = Y_{i1} V_1 + Y_{i2} V_2 + \cdots + Y_{ii} V_i + \cdots + Y_{in} V_n$$

$$I_i = \sum_{k=1}^{n} Y_{ik} V_k$$

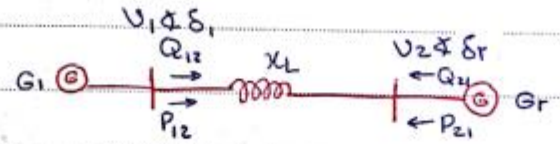
$$S_i = V_i \times I_i^* \rightarrow S_i = V_i \sum_{k=1}^{n} Y_{ik} V_k^*$$

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i$$

$$V_k = |V_k| \angle \delta_k \longrightarrow V_k^* = |V_k| \angle -\delta_k$$

$$Y_{ik} = |Y_{ik}| \angle \theta_{ik}$$

برای دو باس:



توان های وارد شده از ژنراتور اول:

$$\begin{cases} P_{12} = \dfrac{V_1 V_2}{x} \sin(\delta_1 - \delta_2) \\ Q_{12} = \dfrac{V_1^2}{x} - \dfrac{V_1 V_2}{x} \cos(\delta_1 - \delta_2) \end{cases}$$

معادلات اساسی توان ظاهری:

$$S_i = |V_i| \sum_{k=1}^{n} |Y_{ik}||V_k| \angle \delta + \theta_{ik} - \delta_k$$

معادلات اساسی توان اکتیو:

$$P_i = \sum_{k=1}^{n} |V_i||V_k||Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_i - \delta_k)$$

معادلات اساسی توان راکتیو:

$$Q_i = \sum_{k=1}^{n} |V_i||V_k||Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_i - \delta_k)$$

روشهای حل عددی

- انواع روش های حل عددی معادلات اساسی پخش بار :

۱) نیوتن رافسون ۲) گاوس سایدل

تعریف : معمولاً در سیستم های قدرت از یکی از دو روش نیوتن رافسون یا گاوس سایدل برای محاسبه شبکه قدرت استفاده می شود . نیوتن رافسون برای شبکه های بزرگ مناسب است و گاوس سایدل برای شبکه های کوچک مورد استفاده قرار می گیرد . در هر دو این روش ها حل مسئله با یک حدس اولیه شروع می شود و با تکرار مراحل به جواب نهایی نزدیک می شویم .

روش نیوتن رافسون

$$y-y_0=\overset{f'(x_0)}{m}(x-x_0) \rightarrow y-y_0=f'(x_0)(x-x_0)$$

$$\underbrace{\Delta y}_{\text{معلومات}} = f'(x_0)\,\underbrace{\Delta x}_{\text{مجهولات}} \rightarrow \boxed{\Delta x = \frac{\Delta y}{f'(x_0)}}$$

ماتریس مجهولات ← $\Delta x = \dfrac{\overset{\text{ماتریس معلومات}}{\Delta y}}{\underbrace{f'(x_0)}_{\text{ماتریس مشتقات (ژاکوبین)}}} \rightarrow \Delta x = \underbrace{J^{-1}}_{\text{معکوس}} \Delta y$

مثال ٤: معادله‌ی زیر را به روش نیوتن رافسون حل کنید:

$$x^2-2x+4=y=3$$

حدس اولیه $\rightarrow x_0=0/8$

$$f'(x_0)=2x-2=\boxed{-0/4}$$

$$\Delta x = x-0/8$$

$$\Delta y = y-y_0=3-3/04=-0/04$$

$$\Delta x=\frac{\Delta y}{f'(x_0)}=x-0/8=\frac{-0/04}{-0/4}=0/1 \qquad x=0/9$$

$$|x^{(2)}-x^{(1)}|<\varepsilon \leftrightarrow (0/01)$$

الگوریتم روش نیوتن رافسون

مرحله‌ی ۱: تشکیل جدول مجهولات و معلومات.

- مرحله‌ی ۲: تشکیل بردار مجهولات و معلومات و حدس اولیه.

- مرحله‌ی ۳: محاسبه‌ی (Y_{Bus})

- مرحله‌ی ۴: محاسبه‌ی P_i و Q_i ها با استفاده از روابط اساسی پخش بار.

- مرحله‌ی ۵: تشکیل ماتریس ژاکوبین:

$$J = \left[\begin{array}{c|c} \frac{dP_i}{d\delta_i} & \frac{dP_i}{dV_i} \\ \hline \frac{dQ_i}{d\delta_i} & \frac{dQ_i}{dV_i} \end{array}\right]$$

نکته مرحله ۵: مشتق ($\sin U \to U' \cos U$) و مشتق ($\cos U \to -U' \sin U$) است.

- مرحله‌ی ۶: تشکیل معادله‌ی روبرو:

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_i^{(k)} \\ \Delta V_i^{(k)} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix}$$

$$\Delta P_i = P_i - P_i^{cal}$$

$$\Delta Q_i = Q_i - Q_i^{cal}$$

- مرحله‌ی ۷: بدست آوردن جواب نهایی از فرمول های زیر:

نکته مرحله‌ی ۷: زاویه برحسب رادیان (rad) است.

$$\text{زاویه (درجه)} = \frac{\text{زاویه برحسب rad} \times 180}{\pi}$$

$$\begin{cases} |V_i|^{(k+1)} = |V_i|^{(k)} + \Delta V_i^{(k)} \\ \delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)} \end{cases}$$

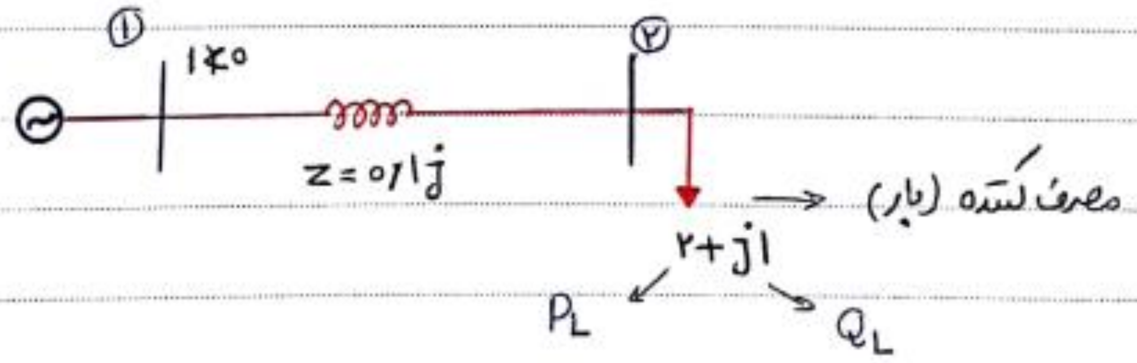
مثال

مثال: درشبکه ی ۲ باسه ی زیر پخش بار به روش نیوتن رافسون را تا دو مرحله حل نمایید :

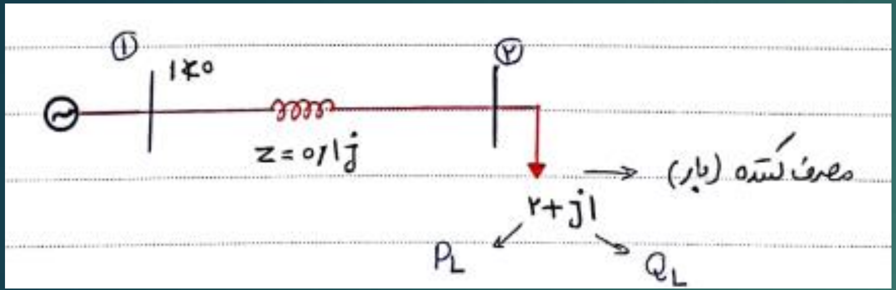
معادلات اساسی پخش بار درشبکه بدون تلف به صورت زیراست :

$$P_i = \sum |v_i||v_k| \left(B_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)\right)$$

$$Q_i = \sum |v_i||v_k| \left(-B_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k)\right)$$



حل مثال



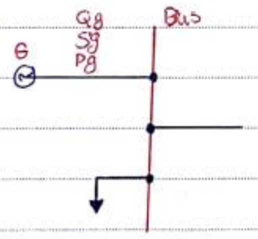
مرحله ① رسم جدول معلومات و مجهولات:

شماره باس	نوع باس	V_i	δ_i	P_i	Q_i
۱	Slack	۱	۰	؟	؟
۲	PQ	؟	؟	-۲	-۱

بردار مجهولات — بردار معلومات

$$\begin{cases} P_2 = Pg_2 - P_{L2} = -۲ \\ Q_۲ = Qg_2 - Q_{L2} = -۱ \end{cases}$$

- KCL توانی: در هر باس در سیستم قدرت بین توان ها رابطه‌ی KCL توانی برقرار است.



توان مختلط ← $S = \overset{\text{توان اکتیو}}{P} + jQ$ → توان راکتیو

$P_s = P_g - P_L$

$Q_s = Q_g - Q_L$

$S_L = P_L + jQ_L$

$S_s = S_g - S_L$

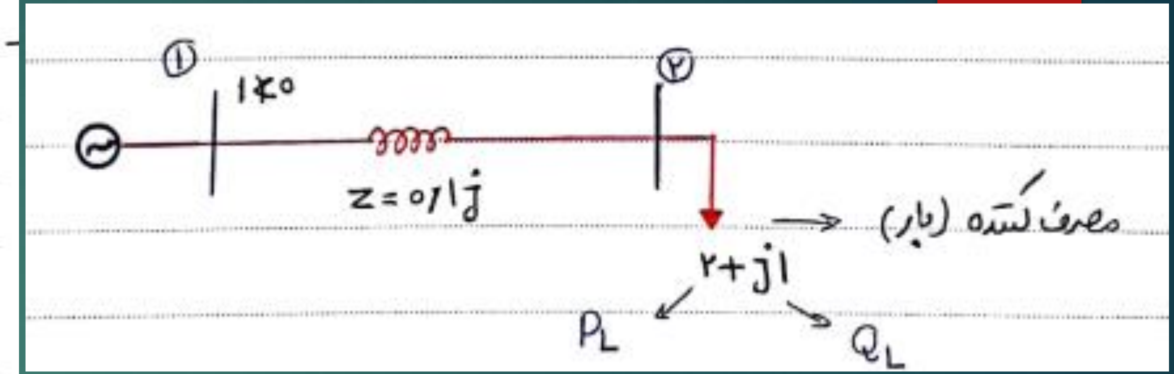
$P_g = P_s + P_L$

- مرحله‌ی ②: حدس اولیه از روی slack بدست می‌آید:

$$\text{بردار مجهولات} = \begin{bmatrix} \delta_۲ \\ \delta_۱ \end{bmatrix} \overset{\text{حدس اولیه}}{=} \begin{bmatrix} ۰ \\ ۱ \end{bmatrix} \checkmark$$

$$\text{بردار معلومات} = \begin{bmatrix} P_۲ \\ Q_۲ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -۲ \\ -۱ \end{bmatrix}$$

حل مثال



مرحله ③:

$$Y_{Bus} = \begin{array}{c|c} & \begin{array}{cc} ① & ② \end{array} \\ \begin{array}{c} ① \\ ② \end{array} & \begin{bmatrix} -j10 & j10 \\ j10 & -j10 \end{bmatrix} \end{array} \rightarrow B = \begin{bmatrix} \overset{B_{11}}{-10} & \overset{B_{12}}{10} \\ \underset{B_{21}}{10} & \underset{B_{22}}{-10} \end{bmatrix}$$

مرحله ④:

$$P_i = \sum_{k=1}^{n} |V_i||V_k| B_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)$$

$$P_2 = \sum_{k=1}^{2} |V_2||V_k| B_{2k} \sin(\delta_2 - \delta_k)$$

$$P_2 = |V_2|\overset{1}{|V_1|}\overset{10}{B_{21}} \sin(\delta_2 - 0) + \cancel{|V_2|^2 B_{22} \sin(\delta_2 - \delta_2)}^{\,0}$$

$$\Rightarrow \boxed{P_2 = 10\,|V_2| \sin \delta_2} \xrightarrow{\text{حدس اولیه}} P_2^{cal} = 10 \times |1| \times \sin(0) \Rightarrow 0$$

$$\boxed{P_2^{cal} = 0}$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^{n} |V_i||V_k| (-B_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k))$$

$$Q_2 = \sum_{k=1}^{2} |V_2||V_k| (-B_{2k} \cos(\delta_2 - \delta_k))$$

$$Q_2 = |V_2||V_1| (-B_{21} \cos(\delta_2 - \delta_1)) + |V_2|^2 (-B_{22} \cos(\delta_2 - \delta_1))$$

$$\boxed{Q_2 = \cancel{|V_2|}^{1} (-10 \cancel{\cos \delta_2}^{0}) + 10\,|V_2|^2} \xrightarrow{\text{حدس اولیه}} \boxed{Q_2^{cal} = 0}$$

حل مثال

$$J = \begin{bmatrix} \frac{dP_i}{d\delta_i} & \frac{dP_i}{dV_i} \\ \frac{dQ_i}{d\delta_i} & \frac{dQ_i}{dV_i} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{dP_2}{d\delta_2} & \frac{dP_2}{dV_2} \\ \frac{dQ_2}{d\delta_2} & \frac{dQ_2}{dV_2} \end{bmatrix}$$

$$\boxed{P_2 = 10\,|V_2|\sin\delta_2}$$

$$\boxed{Q_2 = \cancel{|V_2|}^{\,1}\,(-10\,\cancel{\cos\delta_2}^{\,0}) + 10\,|V_2|^2}$$

$$\frac{dP_2}{d\delta_2} = 10\,|V_2|\cos\delta_2 \qquad \frac{dQ_2}{d\delta_2} = 10\,|V_2|\sin\delta_2$$

$$\frac{dP_2}{dV_2} = 10\sin\delta_2 \qquad \frac{dQ_2}{dV_2} = -10\cos\delta_2 + 20\,|V_2|$$

$$\text{ماتریس ژاکوبین} = J = \begin{array}{ccc} j_{11} & & j_{12} \\ \multicolumn{3}{c}{\begin{bmatrix} 10|V_2|\cos\delta_2 & 10|V_2|\sin\delta_2 \\ 10\sin\delta_2 & -10\cos\delta_2 + 20|V_2| \end{bmatrix}} \\ j_{21} & & j_{22} \end{array}$$

$$\text{با حدس اولیه} = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$$

حل مثال

مرحله ی ۶ :

$$\begin{bmatrix}\Delta\delta_2^{(1)}\\ \Delta V_2^{(1)}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\Delta P_2\\ \Delta Q_2\end{bmatrix}$$

$$P_2 - P_2^{cal} = -2 - 0 = -2$$

$$Q_2 - Q_2^{cal} = -1 - 0 = -1$$

$$\begin{bmatrix}\Delta\delta_2^{(1)}\\ \Delta V_2^{(1)}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0/1 & 0\\ 0 & 0/1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta P_2\\ \Delta Q_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0/1 & 0\\ 0 & 0/1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-2\\ -1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-0/2\ rad\\ -0/1\ pu\end{bmatrix}$$

- مرحله ی ۷ : بدست آوردن جواب های مسئله :

$$\delta_2^{(1)} = \delta_2^{(0)} + \Delta\delta_2^{(1)} = 0 + (-0/2) = -0/2\ rad \rightarrow \frac{-0/2 \times 180}{3/14} = \boxed{-11/45^\circ}$$

$$|V_2|^{(1)} = |V_2|^{(0)} + \Delta V_2^{(1)} = 1 + (-0/1) = \boxed{0/9\ pu}$$

$$V_2 \angle \delta_2 \rightarrow \boxed{0/9\,pu \angle -11/45^\circ}$$