به نام خدا

بررسي سيستمهاي قدرت 2

1

مراجع

- 1- "نظريه سيستمهاي انرژي الكتريكي" تاليف الگرد ترجمه مهندس طباطبائي
- 2- "بررسي سيستمهاي مدرن انرژي الكتريكي" تاليف نگرس ترجمه مهرداد عابدي
- 3- "مباني سيستمهاي قدرت الكتريكي" تاليف استيونسن ترجمه هاي مختلف دارد
- 4- "تحليل سيستم قدرت" تاليف برگن
- 5- "سيستمهاي قدرت الكتريكي" تاليف احد كاظمي
- 6- "سيستمهاي قدرت الكتريكي" تاليف هادي سعادت
- ...

2

مباحث

- فصل اول : پخش بار
- فصل دوم : پخش بار اقتصادي
- فصل سوم : محاسبات اتصال كوتاه متقارن
- فصل چهارم : محاسبات اتصال كوتاه نامتقارن
- فصل پنجم : پايداري گذراي سيستم قدرت
- فصل ششم : كنترل ديناميكي سيستم قدرت

3

فصل اول: مطالعه پخش بار

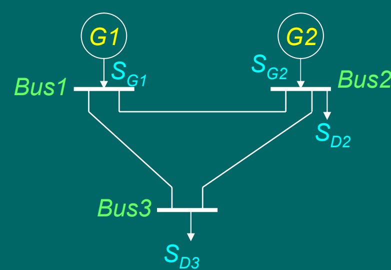
- سيستم قدرت: تعدادي باس (شين) كه توسط خطوط انتقال به هم متصل اند.
- ژنراتورها توان را به باسها وارد مي كنند.
- بارها توان را از باسها خارج مي كنند.
- پخش بار يعني حل سيستم قدرت در حالت پايدار

4

مدلسازي سيستم قدرت:

دياگرام تک خطي يک سيستم قدرت:

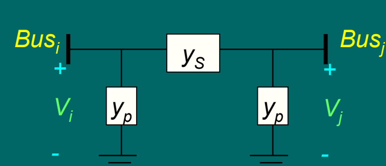
بعنوان مثال دياگرام يک سيستم قدرت سه باسه:



5

مدل خط انتقال:

- مدل خط کوتاه (فقط يک امپدانس سري) که حالت خاصي از مدل پي است
- مدل خط متوسط (مدل پي نامي)
- مدل خط طويل (مدل پي معادل)

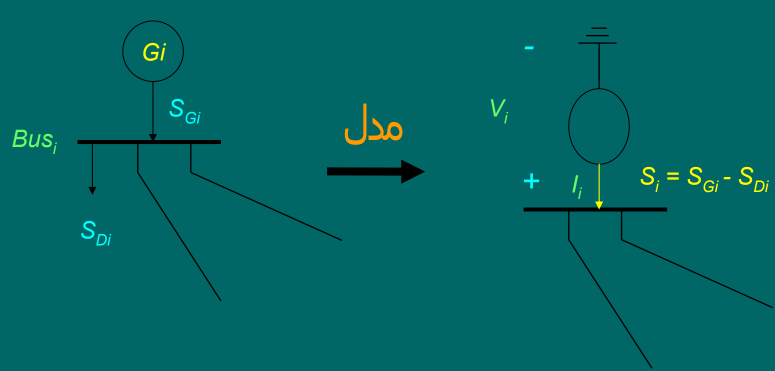


$$y_s = \frac{1}{Z_{Sij}}$$

$$y_p = \frac{y_{pij}}{2}$$

6

مدل باس:



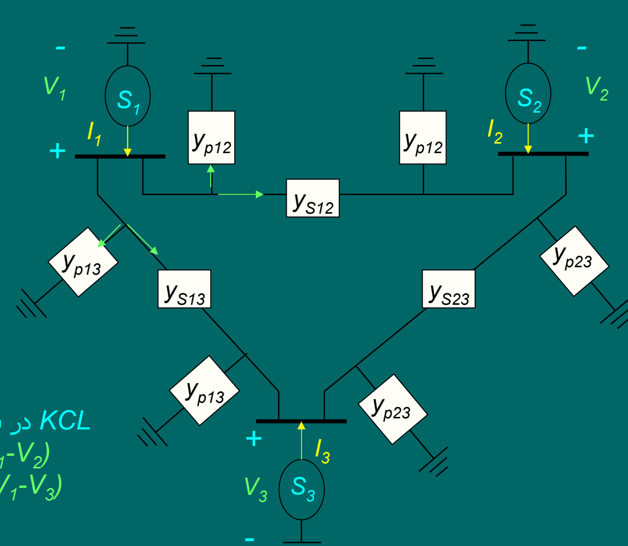
V_i ولتاژ باس *i*

I_i جريان باس *i*

S_i توان مختلط تزريقي (خالص) باس *i* (توان توليدي منهاي توان مصرفي)

7

مدل سيستم سه باسه:



KCL در باس 1:

$I_1 = y_{p12} \cdot V_1 + y_{s12} \cdot (V_1 - V_2)$
$+ y_{p13} \cdot V_1 + y_{s13} \cdot (V_1 - V_3)$

8

روابط ولتاژ وجريان سيستم سه باسه:

پس از نوشتن KCL در هر سه باس داريم:

$$I_1 = y_{p12} . V_1 + y_{s12} . (V_1 - V_2) + y_{p13} . V_1 + y_{s13} . (V_1 - V_3)$$
$$I_2 = y_{p12} . V_2 + y_{s12} . (V_2 - V_1) + y_{p23} . V_2 + y_{s23} . (V_2 - V_3)$$
$$I_3 = y_{p13} . V_3 + y_{s13} . (V_3 - V_1) + y_{p23} . V_3 + y_{s23} . (V_3 - V_2)$$

پس ازمرتب كردن بر حسب ولتاژها داريم:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

$$y_{11} = y_{p12} + y_{p13} + y_{s12} + y_{s13}$$
$$y_{22} = y_{p12} + y_{p23} + y_{s12} + y_{s23}$$
$$y_{33} = y_{p13} + y_{p23} + y_{s13} + y_{s23}$$
$$y_{12} = y_{21} = - y_{s12}$$
$$y_{13} = y_{31} = - y_{s13}$$
$$y_{23} = y_{32} = - y_{s23}$$

9

خلاصه روابط ولتاژ وجريان

شكل فشرده ماتريسي: $I_{bus} = Y_{bus} . V_{bus}$

كه:

$$I_{bus} = \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \qquad Y_{bus} = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ y_{n1} & \cdots & y_{nn} \end{bmatrix} \qquad V_{bus} = \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

عناصر قطري = y_{ii} = (مجموع ادميتانسهاي متصل به باس i)

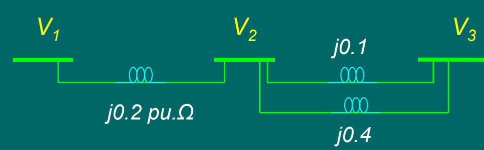
عناصر غير قطري = y_{ik} = (منهاي ادميتانس متصل به هر دو باس i,k)

جريان تزريقي باس i: $I_i = \sum_{k=1}^{n} y_{ik} . V_k$

10

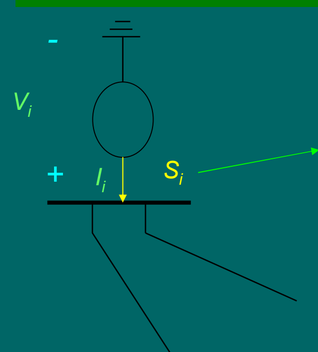
تمرين

برای سیستم قدرت شکل زیر ماتریس ادمیتانس را بدست آورید.



11

معادلات پخش بار



$$S_i = P_i + jQ_i = V_i I_i^* = V_i \left(\sum_{k=1}^{n} y_{ik}.V_k\right)^*$$

پس از مزدوج كردن دو طرف معادله فوق شكل مختلط معادلات پخش بار بدست مي آيد:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \left(\sum_{k=1}^{n} y_{ik}.V_k\right) \quad for \quad i = 1,2,\cdots,n$$

12

شكل حقيقي معادلات پخش بار

بيان متغيرها به شكل قطبي: $V_i = |V_i| e^{j\delta_i} \quad V_k = |V_k| e^{j\delta_k} \quad y_{ik} = |y_{ik}| e^{j\theta_{ik}}$

جايگذاري متغيرهاي قطبي در شكل مختلط معادلات پخش بار:

$$P_i - jQ_i = V_i^* (\sum_{k=1}^{n} y_{ik}.V_k) = (|V_i| e^{j\delta_i})^* (\sum_{k=1}^{n} |y_{ik}| e^{j\theta_{ik}}.|V_k| e^{j\delta_k})$$

پس از ساده سازي داريم :

$$P_i - jQ_i = \sum_{k=1}^{n} |V_i|.|V_k|.|y_{ik}| e^{-j(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik})}$$

شكل حقيقي معادلات پخش بار:

$$P_i = \sum_{k=1}^{n} |V_i|.|V_k|.|y_{ik}|.\cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik})$$
$$Q_i = \sum_{k=1}^{n} |V_i|.|V_k|.|y_{ik}|.\sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik})$$

$for \quad i = 1,2,\cdots,n$

مشخصات معادلات پخش بار

$$P_i = \sum_{k=1}^{n} |V_i|.|V_k|.|y_{ik}|.\cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik})$$
$$Q_i = \sum_{k=1}^{n} |V_i|.|V_k|.|y_{ik}|.\sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik})$$

$for \quad i = 1,2,\cdots,n$

- معادلات جبري غيرخطي هستند.
- $2n$ معادله داريم (n تعداد باسهاست).
- هر باس 4 متغير (توان اكتيو، توان راكتيو، اندازه و زاويه ولتاژ) دارد.
- پس $4n$ متغير وجود دارد.
- در هر باس دو متغير معلوم است.

14

انواع باسها با توجه به متغيرهاي معلوم:

نوع باس/متغير	$P_i=P_{Gi}-P_{Di}$	$Q_i=Q_{Gi}-Q_{Di}$	$\|V\|$	δ
باس مصرفي (PQ)	معلوم	معلوم	مجهول	مجهول
باس كنترل ولتاژ (PV)	معلوم	مجهول	معلوم	مجهول
باس مبنا (اسلك)	مجهول	مجهول	معلوم	معلوم

15

باس مصرفي (بار):

- كليه توانهاي اكتيو و راكتيو توليدي و مصرفي معلوم اند.
- اندازه و زاويه ولتاژ باس بايد توسط پخش بار تعيين شود.

16

باس کنترل ولتاژ (*PV*):

- اندازه ولتاژ با تزريق يا جذب توان راکتيو (Q_G) توسط يک ژنراتور و يا يک بانک خازني در يک مقدار ثابت کنترل مي شود.

$$If \quad Q_G^{\min} \le Q_G \le Q_G^{\max} \quad Then \quad |V| = |V|^{Spec}$$

17

باس مبنا (اسلک):

- باس اسلک توازن قدرت در شبکه را برقرار مي کند.
- هر سيستم قدرت تنها يک باس اسلک دارد.
- معمولا زاويه آن صفر و مبنا فرض مي شود.
- اندازه ولتاژ آن همواره در يک مقدار ثابت کنترل مي شود.

$$P_1 = -(P_2 + P_3 + \cdots + P_n)$$
$$V_1 = |V_1|^{Spec} < 0$$

18

انواع متغيرها از نظر رابطه علت و معلولي:

1- متغيرهاي اغتشاش : توانهاي اكتيو و راكتيو مصرف كنندگان (Q_D و P_D) هستند كه توسط مصرف كنندگان تغيير مي كنند و غير قابل كنترل ما هستند.

2- متغيرهاي كنترل (مستقل) : توانهاي توليدي ژنراتورهايند كه با تغيير آنها ولتاژ و توان خطوط را كنترل مي كنيم.

3- متغيرهاي حالت (وابسته) : ولتاژ باسهايند كه با تغيير متغيرهاي اغتشاش و كنترل، آنها هم تغيير مي كنند و حالت سيستم را عوض مي كنند.

19

روشهاي حل معادلات پخش بار:

- روشهاي تكرار هستند.
- 1- روش گوس سايدل (GS).
- 2- روش نيوتن-رافسون (NR).

20

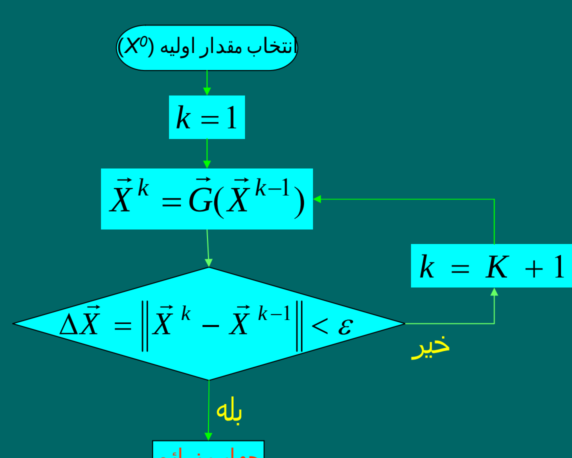
روش گوس سایدل:

شکل معادلات پخش بار:

$$\begin{cases} f_1(x_1,\cdots,x_n)=0 \\ f_2(x_1,\cdots,x_n)=0 \\ \vdots \\ f_n(x_1,\cdots,x_n)=0 \end{cases} \longrightarrow \vec{F}(\vec{X})=0 \longrightarrow \vec{X}=\vec{G}(\vec{X})$$

21

الگوریتم حل روش گوس سایدل:



22

مثال 1-1 روش گوس سايدل:

$$\begin{cases} 2x_1 + x_1x_2 - 1 = 0 \\ 2x_2 - x_1x_2 + 1 = 0 \end{cases}$$

تبديل به شكل $\vec{X} = \vec{G}(\vec{X})$

$$\begin{cases} x_1 = 0.5 - 0.5x_1x_2 = g_1(x_1, x_2) \\ x_2 = -0.5 + 0.5x_1x_2 = g_2(x_1, x_2) \end{cases}$$

فرض اوليه : $\begin{cases} x_1 = 0 \\ x_2 = 0 \end{cases}$

تكرار اول : $\begin{cases} x_1 = g_1(0,0) = 0.5 - 0.5 \times 0 \times 0 = 0.5 \\ x_2 = g_2(0.5,0) = -0.5 + 0.5 \times 0.5 \times 0 = -0.5 \end{cases}$ $\begin{cases} \Delta x_1 = 0.5 - 0 = 0.5 \\ \Delta x_2 = -0.5 - 0 = -0.5 \end{cases}$ $\|\Delta X\| = 0.5$

تكرار دوم : $\begin{cases} x_1 = g_1(0.5,-0.5) = 0.625 \\ x_2 = g_2(0.625,-0.5) = -0.65625 \end{cases}$ $\begin{cases} \Delta x_1 = 0.625 - 0.5 = 0.125 \\ \Delta x_2 = -0.65625 - (-0.5) = -0.15625 \end{cases}$ $\|\Delta X\| = 0.15625$

تكرار سي و هفتم: $\begin{cases} x_1 = 0.9629 \\ x_2 = -0.9634 \end{cases}$ $\|\Delta X\| = 0.00096$

23

معادلات پخش بار براي روش گوس سايدل:

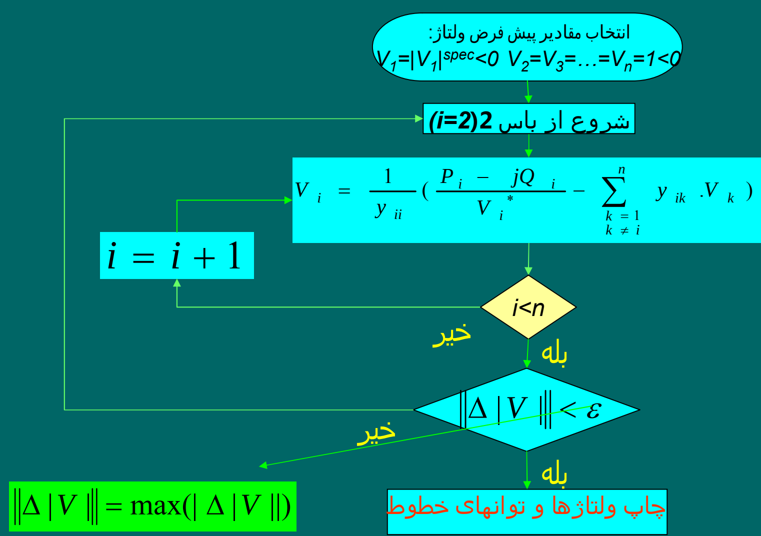
شكل مختلط معادلات پخش بار: $P_i - jQ_i = V_i^*(\sum_{k=1}^{n} y_{ik}.V_k) \quad for \quad i = 1,2,\cdots,n$

جدا كردن جمله iام از سيگما: $P_i - jQ_i = V_i^*(y_{ii}.V_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n} y_{ik}.V_k)$

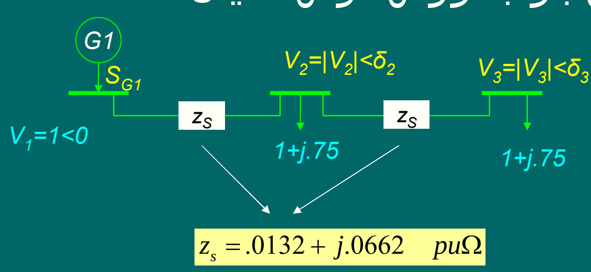
فرمول محاسبه V_i در روش GS : $V_i = \frac{1}{y_{ii}}(\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n} y_{ik}.V_k)$

24

الگوريتم روش GS براي پخش بار بدون باس PV:



مثال 1-2 : پخش بار به روش گوس سايدل



ولتاژ باسهای 2 و 3 را پس از دو مرحله تكرار به روش گوس-سايدل پيدا كنيد؟

حل:

محاسبه توانهای تزريقی باسها:

$P_2^{sch} = P_{G2} - P_{D2} = 0 - 1 = -1$

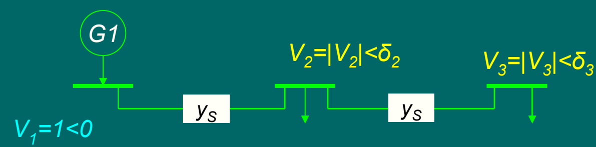
$Q_2^{sch} = Q_{G2} - Q_{D2} = 0 - .75 = -.75$

$P_3^{sch} = P_{G3} - P_{D3} = 0 - 1 = -1$

$Q_3^{sch} = Q_{G3} - Q_{D3} = 0 - .75 = -.75$

26

ادامه حل مثال 1-2(محاسبه ماتریس ادمیتانس باسها :



$y_s = 1 / z_s = 1 / (.0132+j.0662) = 14.81 < -78.7$

عناصر قطری:

$y_{11} = y_{33} = y_s = 14.81 < -78.7$

$y_{22} = 2\, y_s = 29.62 < -78.7$

عناصر غیر قطری:

$y_{12} = y_{21} = y_{23} = y_{32} = -y_s = 14.81 < (-78.7+180) = 14.81 < 101.3$

$y_{13} = y_{31} = 0$

27

ادامه حل مثال 1-2(تکرار اول :

مقادیر پیش فرض ولتاژ: $V_2=V_3=1<0$ $V_1=|V_1|^{spec}<0=1<0$

$$V_i = \frac{1}{y_{ii}}\left(\frac{P_i^{sch} - jQ_i^{sch}}{V_i^*} - \sum_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{n} y_{ik}.V_k\right)$$

$$V_2 = \frac{1}{y_{22}}\left(\frac{P_2^{sch} - jQ_2^{sch}}{V_2^*} - \sum_{\substack{k=1\\k\neq 2}}^{3} y_{2k}.V_k\right) = \frac{1}{y_{22}}\left(\frac{P_2^{sch} - jQ_2^{sch}}{V_2^*} - y_{21}.V_1 - y_{23}.V_3\right)$$

$$V_2 = \frac{1}{29.64<-78.69}\left(\frac{-1-j(-.75)}{(1<0)^*} - (14.81<101.3).(1<0) - (14.81<101.3).(1<0)\right) = 0.96897<-1.66$$

$$V_3 = \frac{1}{y_{33}}\left(\frac{P_3^{sch} - jQ_3^{sch}}{V_3^*} - \sum_{\substack{k=1\\k\neq 3}}^{3} y_{3k}.V_k\right) = \frac{1}{y_{33}}\left(\frac{P_3^{sch} - jQ_3^{sch}}{V_3^*} - y_{31}.V_1 - y_{32}.V_2\right)$$

$$V_3 = \frac{1}{14.81<-78.71}\left(\frac{-1-j(-.75)}{(1<0)^*} - (0\times(1<0) - (14.81<101.3).(0.96897<-1.66)\right) = 0.909616<-5.32$$

28

ادامه حل مثال 2-1 :

بررسی همگرائی:

$$\Delta V_2 = \left|V_2^{new}\right| - \left|V_2^{old}\right| = 0.96897 - 1 = -.03103$$

$$\Delta V_3 = \left|V_3^{new}\right| - \left|V_3^{old}\right| = 0.909616 - 1 = -.09038$$

$$\left\|\Delta V\right\| = 0.09038 > \varepsilon = 0.0005$$

تکرار دوم :

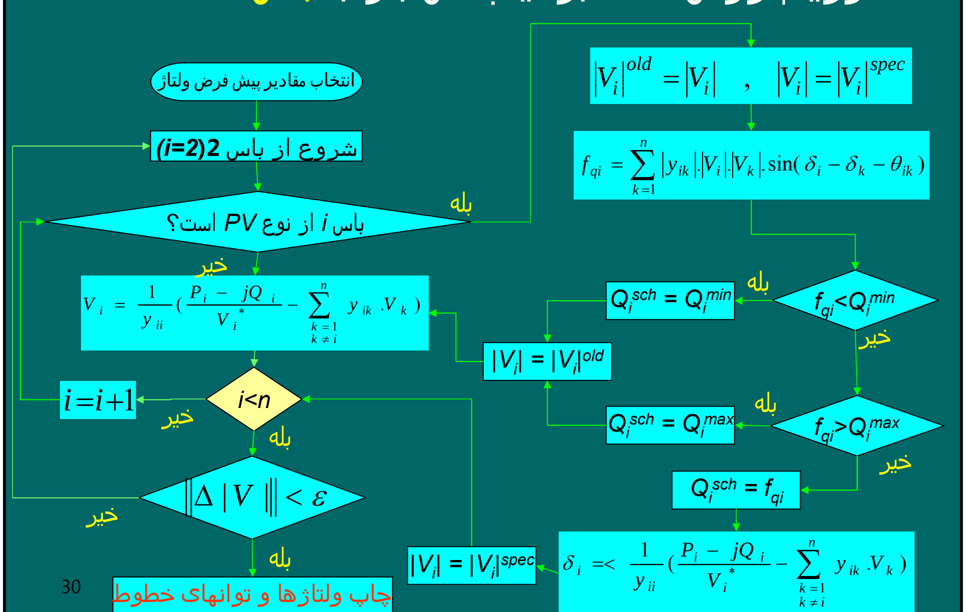
مقادیر ولتاژها: $V_1=|V_1|^{spec}<0=1<0$ $V_2=0.96897<-1.66$ $V_3=0.909616<-5.32$

جواب های نهائی بعد از 22 تکرار :

$V_1=|V_1|^{spec}<0=1<0$ $V_2=0.8214<-7.8779°$ $V_3=0.7319<-13.2509°$

29

الگوریتم روش GS براي پخش بار با باس PV:



30

نحوه انتخاب مقادیر پیش فرض اولیه ولتاژ برای هر دو روش GS و NR :

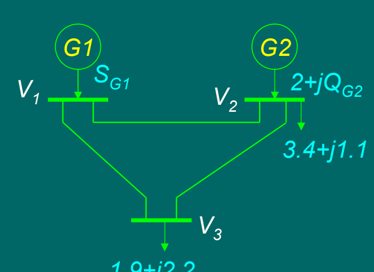
برای باس مبنا : $V_1 = |V_1|^{spec} < 0$

برای باسهای کنترل ولتاژ (PV): $V_i = |V_i|^{spec} < 0$

برای باسهای مصرفی (PQ): $V_i = 1 < 0$

31

مثال 1-3: پخش بار به روش گوس سایدل با باس PV



در سیستم قدرت فوق ادمیتانسهای مدل پی تمام خطوط عبارتند از :
$y_s = -j8.7 \quad y_p = 0$

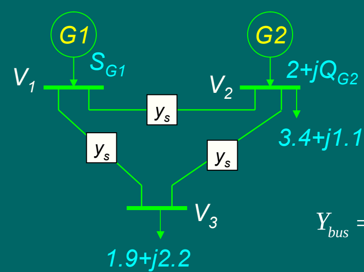
باس 1، باس مبنا با ولتاژ $V_1 = 1.02 < 0$

باس 2، از نوع PV با $|V_2|^{spec} = 1.01$ برای $1 \le Q_{G2} \le 2$

ولتاژ باسهای 2 و 3 را پس از یک مرحله تکرار به روش گوس-سایدل پیدا کنید؟

32

حل مثال 3-1 :



محاسبه ماتریس ادمیتانس باسها:

$$Y_{bus}=\begin{bmatrix} 2y_s & -y_s & -y_s \\ -y_s & 2y_s & -y_s \\ -y_s & -y_s & 2y_s \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -j17.4 & j8.7 & j8.7 \\ j8.7 & -j17.4 & j8.7 \\ j8.7 & j8.7 & -j17.4 \end{bmatrix}$$

محاسبه توانهای تزریقی باسها:

$P_2^{sch} = P_{G2} - P_{D2} = 2 - 3.4 = -1.4$

$P_3^{sch} = P_{G3} - P_{D3} = 0 - 1.9 = -1.9$

$Q_3^{sch} = Q_{G3} - Q_{D3} = 0 - 2.2 = -2.2$

$$1 \le Q_{G2} \le 2$$

$$\downarrow$$

$$1-1.1 \le Q_2^{Sch} = Q_{G2} - Q_{D2} \le 2-1.1$$

$$\downarrow$$

$$-0.1 \le Q_2^{Sch} \le 0.9$$

ادامه حل مثال 3-1 : تکرار اول:

$V_1 = 1.02 < 0$ $\quad V_2 = |V_2|^{spec} < 0 = 1.01<0$ $\quad V_3 = 1 < 0$

$$f_{q2}^{(0)} = \sum_{k=1}^{n} |y_{2k}|.|V_2|.|V_k|\sin(\delta_2-\delta_k-\theta_{2k})$$

$$=|y_{21}|.|V_2|.|V_1|.\sin(\delta_2-\delta_1-\theta_{21})+|y_{22}|.|V_2|.|V_2|.\sin(\delta_2-\delta_2-\theta_{22})+|y_{23}|.|V_2|.|V_3|.\sin(\delta_2-\delta_3-\theta_{23})$$

$$=8.7\times1.01\times1.02\times\sin(0-0-90)+17.4\times1.01\times1.01\times\sin(0-0+90)+8.7\times1.01\times1\times\sin(0-0-90)$$

$$=0$$

چون $-0.1<f_{q2}=0<0.9$ در بازه Q_2^{sch} قرار دارد بنابراین: $Q_2^{sch}=f_{q2}^{(0)} = 0$

$$V_2 = \frac{1}{y_{22}}\left(\frac{P_2^{sch} - jQ_2^{sch}}{V_2^*} - \sum_{\substack{k=1 \\ k\neq 2}}^{3} y_{2k}.V_k\right)$$

$$= \frac{1}{y_{22}}\left(\frac{P_2^{sch} - jQ_2^{sch}}{V_2^*} - y_{21}.V_1 - y_{23}.V_3\right)$$

$$= \frac{1}{-j17.4}\left(\frac{-1.4 - j0}{1.01<0} - (j8.7)(1.02<0) - (j8.7)(1<0)\right) = 1.0131 < -4.51^\circ$$

ادامه حل مثال 1-3 :

بنابراین $V_2 = |V_2|^{spec} < -4.51 = 1.01<-4.51$

$$V_3 = \frac{1}{y_{33}}\left(\frac{P_3^{sch} - jQ_3^{sch}}{V_3^*} - \sum_{\substack{k=1\\k\neq 3}}^{3} y_{3k}.V_k\right)$$
$$= \frac{1}{y_{33}}\left(\frac{P_3^{sch} - jQ_3^{sch}}{V_3^*} - y_{31}.V_1 - y_{32}.V_2\right)$$
$$= \frac{1}{-j17.4}\left(\frac{-1.9 - j(-2.2)}{1.0<0} - (j8.7)(1.02<0) - (j8.7)(1.01<-4.51)\right) = 0.8896 < -9.64^\circ$$

ولتاژ باسها پس از یک مرحله تکرار:

$V_1 = 1.02 < 0$ $\quad V_2 = 1.01<-4.51$ $\quad V_3 = 0.8896 < -9.64$

35

روش نیوتن-رافسون :

شکل معادلات پخش بار:

$$\begin{cases} f_1(x_1,\cdots,x_n) = f_1^{sch} \\ f_2(x_1,\cdots,x_n) = f_2^{sch} \\ \vdots \\ f_n(x_1,\cdots,x_n) = f_n^{sch} \end{cases}$$

تقریب معادلات با بسط تیلور:

$$\begin{cases} f_1^{(0)} + (\frac{\partial f_1}{\partial x_1})^{(0)}.\Delta x_1 + \cdots + (\frac{\partial f_1}{\partial x_n})^{(0)}.\Delta x_n \cong f_1^{sch} \\ f_2^{(0)} + (\frac{\partial f_2}{\partial x_1})^{(0)}.\Delta x_1 + \cdots + (\frac{\partial f_2}{\partial x_n})^{(0)}.\Delta x_n \cong f_2^{sch} \\ \vdots \\ f_n^{(0)} + (\frac{\partial f_n}{\partial x_1})^{(0)}.\Delta x_1 + \cdots + (\frac{\partial f_n}{\partial x_n})^{(0)}.\Delta x_n \cong f_n^{sch} \end{cases}$$

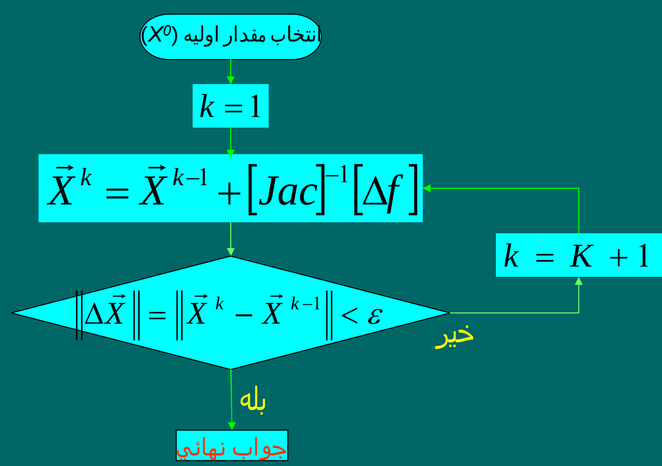
شکل ماتریسی معادلات:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}^{(0)} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}^{(0)} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1}^{(0)} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n}^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1^{sch} - f_1^{(0)} \\ \vdots \\ f_n^{sch} - f_n^{(0)} \end{bmatrix}$$

$$[Jac].[\Delta X] = [\Delta f]$$
$$[\Delta X] = [Jac]^{-1}.[\Delta f]$$

36

الگوریتم حل روش نیوتن-رافسون:



37

مثال 1-4روش نیوتن-رافسون برای معادله با یک متغیر:

$-x^2+3x-2=0$ تبدیل به شکل $f(x)=f^{sch}$ $\longrightarrow$ $f(x) = -x^2 + 3x = 2 = f^{sch}$

فرض اولیه : $x=0$

تکرار اول :

$Jac = \dfrac{\partial f}{\partial x} = -2x+3 = -2\times 0+3 = 3$

$\Delta f = f^{sch} - f^0 = 2-(-0^2+3\times 0) = 2$

$\Delta x = Jac^{-1}.\Delta f = 3^{-1}\times 2 = 0.6667 \quad \Rightarrow \quad \|\Delta x\| = 0.6667 > \varepsilon = 0.001$

$x^{new} = x^{old} + \Delta x = 0 + 0.6667 = 0.6667$

تکرار دوم :

$Jac = \dfrac{\partial f}{\partial x} = -2x+3 = -2\times 0.6667+3 = 1.6666$

$\Delta f = f^{sch} - f^0 = 2-(-0.6667^2+3\times 0.6667) = 0.4444$

$\Delta x = Jac^{-1}.\Delta f = 1.6666^{-1}\times 0.4444 = 0.2667 \quad \Rightarrow \quad \|\Delta x\| = 0.2667 > \varepsilon = 0.001$

$x^{new} = x^{old} + \Delta x = 0.6667 + 0.2667 = 0.9334$

تکرار سوم:

$Jac = \dfrac{\partial f}{\partial x} = -2x+3 = -2\times 0.9334+3 = 1.1332$

$\Delta f = f^{sch} - f^0 = 2-(-0.9334^2+3\times 0.9334) = 0.0710$

$\Delta x = Jac^{-1}.\Delta f = 1.1332^{-1}\times 0.0710 = 0.0627 \quad \Rightarrow \quad \|\Delta x\| = 0.0627 > \varepsilon = 0.001$

$x^{new} = x^{old} + \Delta x = 0.9334 + 0.0627 = 0.9961$

38

مثال 1-5روش نیوتن-رافسون برای معادله با دو متغیر:

$$\begin{cases}2x_1 + x_1x_2 - 1 = 0\\ 2x_2 - x_1x_2 + 1 = 0\end{cases}$$

تبدیل به شکل $f(x) = f^{sch}$

$$\begin{cases}f_1(x_1,x_2) = 2x_1 + x_1x_2 = 1 = f_1^{sch}\\ f_2(x_1,x_2) = 2x_2 - x_1x_2 = -1 = f_2^{sch}\end{cases}$$

: فرض اولیه $\begin{cases}x_1 = 0\\ x_2 = 0\end{cases}$

: تکرار اول

$$[Jac] = \begin{bmatrix}\frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2}\\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}2+x_2 & x_1\\ -x_2 & 2-x_1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}2+0 & 0\\ -0 & 2-0\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}2 & 0\\ 0 & 2\end{bmatrix}$$

$$\Delta \vec{f} = f^{sch} - f^{0} = \begin{bmatrix}1\\ -1\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}2\times 0 + 0\times 0\\ 2\times 0 - 0\times 0\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1\\ -1\end{bmatrix}$$

$$[\Delta X] = [Jac]^{-1}[\Delta f] = \begin{bmatrix}2 & 0\\ 0 & 2\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}1\\ -1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0.5\\ -0.5\end{bmatrix} \quad => \quad \|\Delta X\| = 0.5 > \varepsilon = 0.001$$

$$X^{new} = X^{old} + \Delta X = \begin{bmatrix}0\\ 0\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0.5\\ -0.5\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0.5\\ -0.5\end{bmatrix}$$

39

ادامه حل مثال :

: تکرار دوم

$$[Jac] = \begin{bmatrix}\frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2}\\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}2+x_2 & x_1\\ -x_2 & 2-x_1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}2+(-0.5) & 0.5\\ -(-0.5) & 2-0.5\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1.5 & 0.5\\ 0.5 & 1.5\end{bmatrix}$$

$$\Delta \vec{f} = f^{sch} - f^{0} = \begin{bmatrix}1\\ -1\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}2\times 0.5 + 0.5\times(-0.5)\\ 2\times(-0.5) - 0.5\times(-0.5)\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0.25\\ -0.25\end{bmatrix}$$

$$[\Delta X] = [Jac]^{-1}[\Delta f] = \begin{bmatrix}1.5 & 0.5\\ 0.5 & 1.5\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}0.25\\ -0.25\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0.25\\ -0.25\end{bmatrix} \quad => \quad \|\Delta X\| = 0.25 > \varepsilon = 0.001$$

$$X^{new} = X^{old} + \Delta X = \begin{bmatrix}0.5\\ -0.5\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0.25\\ -0.25\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0.75\\ -0.75\end{bmatrix}$$

40

روش نیوتن-رافسون برای حل معادلات پخش بار:

معادلات پخش بار:

$$
\begin{cases}
P_i^{sch} = f_{pi} = \sum_{k=1}^{n} |y_{ik}|.|V_i|.|V_k|\cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \\
Q_i^{sch} = f_{qi} = \sum_{k=1}^{n} |y_{ik}|.|V_i|.|V_k|\sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik})
\end{cases}
\quad for \quad i = 1,2,\cdots,n
$$

تقریب معادلات با بسط تیلور:

$$
\begin{cases}
P_i^{sch} \approx f_{pi}^{(0)} + (\frac{\partial f_{pi}}{\partial \delta_2})^{(0)} \Delta \delta_2 + \cdots + (\frac{\partial f_{pi}}{\partial \delta_n})^{(0)} \Delta \delta_n + (\frac{\partial f_{pi}}{\partial |V_2|})^{(0)} \Delta |V_2| + \cdots + (\frac{\partial f_{pi}}{\partial |V_n|})^{(0)} \Delta |V_n| \\
Q_i^{sch} \approx f_{qi}^{(0)} + (\frac{\partial f_{qi}}{\partial \delta_2})^{(0)} \Delta \delta_2 + \cdots + (\frac{\partial f_{qi}}{\partial \delta_n})^{(0)} \Delta \delta_n + (\frac{\partial f_{qi}}{\partial |V_2|})^{(0)} \Delta |V_2| + \cdots + (\frac{\partial f_{qi}}{\partial |V_n|})^{(0)} \Delta |V_n|
\end{cases}
$$

تغییر متغیر:

$$
\begin{cases}
P_i^{sch} - f_{pi}^{(0)} \approx (\frac{\partial f_{pi}}{\partial \delta_2})^{(0)} \Delta \delta_2 + \cdots + (\frac{\partial f_{pi}}{\partial \delta_n})^{(0)} \Delta \delta_n + |V_2|^{(0)} (\frac{\partial f_{pi}}{\partial |V_2|})^{(0)} \frac{\Delta |V_2|}{|V_2|^{(0)}} + \cdots + |V_n|^{(0)} (\frac{\partial f_{pi}}{\partial |V_n|})^{(0)} \frac{\Delta |V_n|}{|V_n|^{(0)}} \\
Q_i^{sch} - f_{qi}^{(0)} \approx (\frac{\partial f_{qi}}{\partial \delta_2})^{(0)} \Delta \delta_2 + \cdots + (\frac{\partial f_{qi}}{\partial \delta_n})^{(0)} \Delta \delta_n + |V_2|^{(0)} (\frac{\partial f_{qi}}{\partial |V_2|})^{(0)} \frac{\Delta |V_2|}{|V_2|^{(0)}} + \cdots + |V_n|^{(0)} (\frac{\partial f_{qi}}{\partial |V_n|})^{(0)} \frac{\Delta |V_n|}{|V_n|^{(0)}}
\end{cases}
$$

ادامه روش نیوتن-رافسون:

نام گذاری جدید ضرائب و متغیرها:

$$
\begin{cases}
\Delta P_i \approx H_{i2} \Delta \delta_2 + \cdots + H_{in} \Delta \delta_n + N_{i2} \frac{\Delta |V_2|}{|V_2|^{(0)}} + \cdots + N_{in} \frac{\Delta |V_n|}{|V_n|^{(0)}} \\
\Delta Q_i \approx J_{i2} \Delta \delta_2 + \cdots + J_{in} \Delta \delta_n + L_{i2} \frac{\Delta |V_2|}{|V_2|^{(0)}} + \cdots + L_{in} \frac{\Delta |V_n|}{|V_n|^{(0)}}
\end{cases}
\quad for \quad i = 2,\cdots,n
$$

شکل ماتریسی:

$$
\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix}
=
\left[\begin{array}{ccc:ccc}
H_{22} & \cdots & H_{2n} & N_{22} & \cdots & N_{2n} \\
\vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\
H_{n2} & \cdots & H_{nn} & N_{n2} & \cdots & N_{nn} \\
\hdashline
J_{22} & \cdots & J_{2n} & L_{22} & \cdots & L_{2n} \\
\vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\
J_{n2} & \cdots & J_{nn} & L_{n2} & \cdots & L_{nn}
\end{array}\right]
\begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \frac{\Delta |V_2|}{|V_2|^{(0)}} \\ \vdots \\ \frac{\Delta |V_n|}{|V_n|^{(0)}} \end{bmatrix}
$$

شکل فشرده ماتریسی:

$$
\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta |V|}{|V|} \end{bmatrix}
$$

عناصر ماتریس ژاکوبین:

$$H_{ii} = \left(\frac{\partial f_{pi}}{\partial \delta_i}\right)^{(0)} = -\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n} |y_{ik}|.|V_i|.|V_k| \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) = -f_{qi}^{(0)} - B_{ii}|V_i|^2$$

$$H_{ik} = \left(\frac{\partial f_{pi}}{\partial \delta_k}\right)^{(0)} = |y_{ik}|.|V_i|.|V_k| \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \quad for \quad k \neq i$$

$$J_{ii} = \left(\frac{\partial f_{qi}}{\partial \delta_i}\right)^{(0)} = -\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n} |y_{ik}|.|V_i|.|V_k| \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) = f_{pi}^{(0)} - G_{ii}|V_i|^2$$

$$J_{ik} = \left(\frac{\partial f_{qi}}{\partial \delta_k}\right)^{(0)} = -|y_{ik}|.|V_i|.|V_k| \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \quad for \quad k \neq i$$

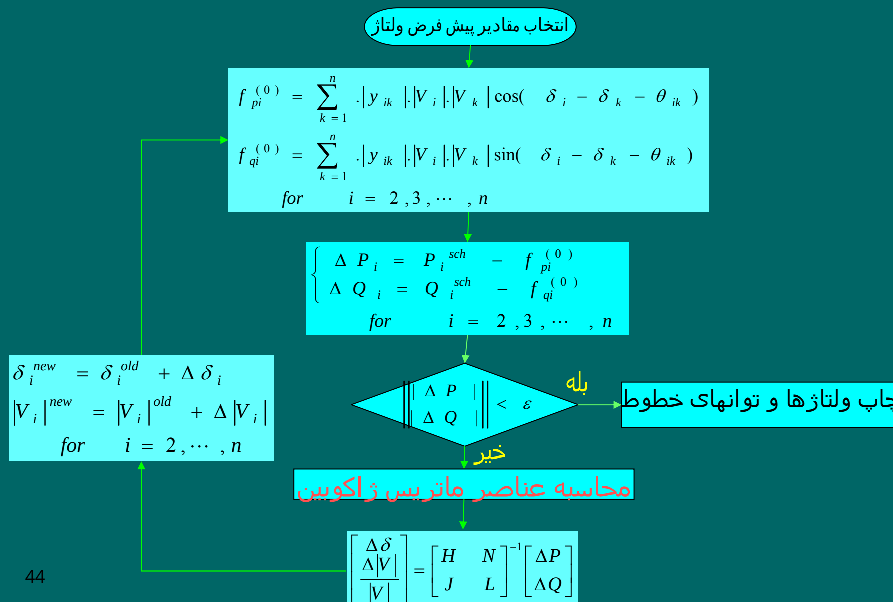
$$N_{ii} = |V_i|\left(\frac{\partial f_{pi}}{\partial |V_i|}\right)^{(0)} = f_{pi}^{(0)} + G_{ii}|V_i|^2 \qquad N_{ik} = |V_k|\left(\frac{\partial f_{pi}}{\partial |V_k|}\right)^{(0)} = -J_{ik} \quad for \quad k \neq i$$

$$L_{ii} = |V_i|\left(\frac{\partial f_{qi}}{\partial |V_i|}\right)^{(0)} = f_{qi}^{(0)} - B_{ii}|V_i|^2 \qquad L_{ik} = |V_k|\left(\frac{\partial f_{qi}}{\partial |V_k|}\right)^{(0)} = H_{ik} \quad for \quad k \neq i$$

43

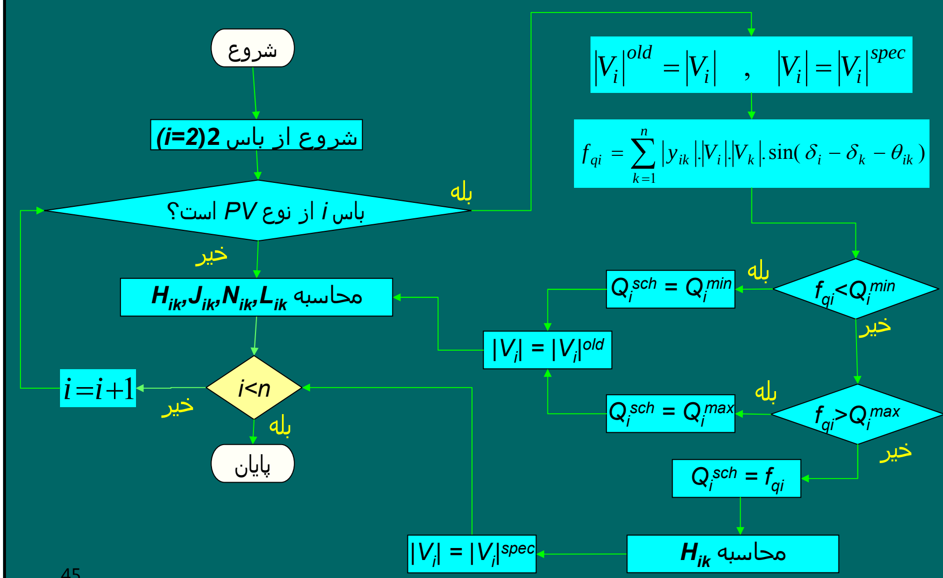
$$y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik}$$

الگوریتم روش نیوتن-رافسون براي پخش بار:



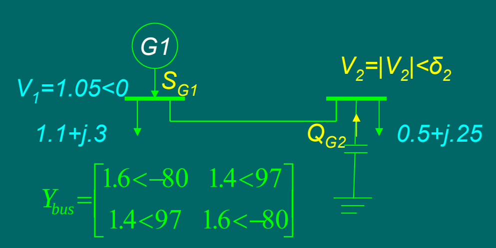
44

الگوریتم محاسبه عناصر ماتریس ژاکوبین :



45

مثال 1-6: پخش بار به روش نیوتن رافسون:



باس 1، باس مبنا است. باس 2 از نوع PV، با $|V_2|^{spec} = 1.01$ می باشد. ولتاژ باس 2 را پس از یک مرحله تکرار به روش نیوتن-رافسون پیدا کنید؟ وقتیکه :

الف) $0.05 \le Q_{G2} \le 0.37$

ب) $0.2 \le Q_{G2} \le 0.4$

حل:

46

حل الف :

محاسبه توانهای تزریقی باسها:

$$P_2^{sch} = P_{G2} - P_{D2} = 0 - 0.5 = -0.5$$

$$0.05 \le Q_{G2} \le 0.37$$

$$\downarrow$$

$$0.05 - 0.25 \le Q_2^{Sch} = Q_{G2} - Q_{D2} \le 0.37 - 0.25$$

$$\downarrow$$

$$-0.2 \le Q_2^{Sch} \le 0.12$$

تکرار اول:

$V_1 = 1.05< 0$ $\quad$ $V_2 = |V_2|^{spec} < 0 = 1.01<0$

$$f_{p2}^{(0)} = \sum_{k=1}^{n} .|y_{2k}|.|V_2|.|V_k|\cos(\delta_2 - \delta_k - \theta_{2k})$$

$$= |y_{21}|.|V_2|.|V_1|.\cos(\delta_2 - \delta_1 - \theta_{21}) + |y_{22}|.|V_2|.|V_2|.\cos(\delta_2 - \delta_2 - \theta_{22})$$

$$= 1.4 \times 1.01 \times 1.05 \times \cos(0 - 0 - 97) + 1.6 \times 1.01 \times 1.01 \times \cos(0 - 0 + 80) = 0.1025$$

47

ادامه حل :

$$f_{q2}^{(0)} = \sum_{k=1}^{n} .|y_{2k}|.|V_2|.|V_k|\sin(\delta_2 - \delta_k - \theta_{2k})$$

$$= |y_{21}|.|V_2|.|V_1|.\sin(\delta_2 - \delta_1 - \theta_{21}) + |y_{22}|.|V_2|.|V_2|.\sin(\delta_2 - \delta_2 - \theta_{22})$$

$$= 1.4 \times 1.01 \times 1.05 \times \sin(0 - 0 - 97) + 1.6 \times 1.01 \times 1.01 \times \sin(0 - 0 + 80) = 0.1337$$

چون $f_{q2}=0.1337>Q_2^{Sch}{}_{max}=0.12$ در بازه Q_2^{sch} قرار ندارد بنابراین:

$Q_2^{sch}=Q_2^{max(0)}=0.12$ و باس 2 توانائی کنترل ولتاژ را ندارد.

$$\Delta P_2 = P_2^{sch} - f_{p2}^{(0)} = -0.5 - 0.1025 = -0.6025$$

$$\Delta Q_2 = Q_2^{sch} - f_{q2}^{(0)} = 0.12 - 0.1337 = -0.0137$$

$$H_{22} = -f_{q2}^{(0)} - B_{22}|V_2|^2 = -0.1337 - 1.6\sin(-80)(1.01)^2 = 1.4737$$

$$J_{22} = f_{p2}^{(0)} - G_{22}|V_2|^2 = 0.1025 - 1.6\cos(-80)(1.01)^2 = -0.1809$$

$$N_{22} = f_{p2}^{(0)} + G_{22}|V_2|^2 = 0.1025 + 1.6\cos(-80)(1.01)^2 = 0.3859$$

$$L_{22} = f_{q2}^{(0)} - B_{22}|V_2|^2 = 0.1337 - 1.6 \times \sin(-80)(1.01)^2 = 1.7411$$

48

ادامه حل :

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_2 \\ \dfrac{\Delta|V_2|}{|V_2|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{22} & N_{22} \\ J_{22} & L_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.4737 & 0.3859 \\ -0.1809 & 1.7411 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -0.6025 \\ -0.0137 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.3960\,rad \\ -0.0490 \end{bmatrix}$$

$$\delta_2^{new} = \delta_2^{old} + \Delta\delta_2 = 0 + (-0.3960) = -0.3960\,rad = -22.69^\circ$$

$$|V_2|^{new} = |V_2|^{old} + \Delta|V_2| = 1.01 + \underbrace{1.01\times(-0.0490)}_{\Delta|V_2|} = 0.96051$$

ولتاژ باس 2 پس از یک مرحله تکرار: $V_2 = 0.96051 < -22.69^\circ$

$$P_1^{sch} = f_{p1}^{(0)} = \sum_{k=1}^{n} |y_{1k}||V_1||V_k|\cos(\delta_1 - \delta_k - \theta_{1k})$$

$$= |y_{11}||V_1||V_1|.\cos(\delta_1 - \delta_1 - \theta_{11}) + |y_{12}||V_1||V_2|.\cos(\delta_1 - \delta_2 - \theta_{12})$$

$$= 1.6\times1.05\times1.05\times\cos(0-0+80) + 1.4\times1.05\times0.96051\times\cos(0+22.69-97) = 0.69$$

$$P_1^{sch} = P_{G1} - P_{D1}$$

$$P_{G1} = P_1^{sch} + P_{D1} = 0.69 + 1.1 = 1.79$$

49

حل ب :

محاسبه توانهای تزریقی باسها:

$$P_2^{sch} = P_{G2} - P_{D2} = 0 - 0.5 = -0.5$$

$$0.2 \le Q_{G2} \le 0.4$$

$$\downarrow$$

$$0.2 - 0.25 \le Q_2^{Sch} = Q_{G2} - Q_{D2} \le 0.4 - 0.25$$

$$\downarrow$$

$$-0.05 \le Q_2^{Sch} \le 0.15$$

تکرار اول:

$V_1 = 1.05 < 0$ $\quad V_2 = |V_2|^{spec} < 0 = 1.01 < 0$

$$f_{p2}^{(0)} = 1.4\times1.01\times1.05\times\cos(0-0-97) + 1.6\times1.01\times1.01\times\cos(0-0+80) = 0.1025$$

$$f_{q2}^{(0)} = 1.4\times1.01\times1.05\times\sin(0-0-97) + 1.6\times1.01\times1.01\times\sin(0-0+80) = 0.1337$$

50

ادامه حل :

چون $f_{q2}=0.1337$ در بازه Q_2^{sch} قرار دارد بنابراین: $Q_2^{sch}=f_{q2}^{(0)}=0.1337$

و باس 2 توانائی کنترل ولتاژ را دارد. و $|V_2|=|V_2|^{spec}=1.01$ و $\Delta|V_2|=0$

$$\Delta P_2 = P_2^{sch} - f_{p2}^{(0)} = -0.5 - 0.1025 = -0.6025$$

$$\Delta Q_2 = Q_2^{sch} - f_{q2}^{(0)} = 0.1337 - 0.1337 = 0$$

$$H_{22} = -f_{q2}^{(0)} - B_{22}|V_2|^2 = -0.1337 - 1.6\sin(-80)(1.01)^2 = 1.4737$$

51

ادامه حل :

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_2 \\ \dfrac{\Delta|V_2|}{|V_2|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{22} & N_{22} \\ J_{22} & L_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix}$$

$$\Delta\delta_2 = H_{22}^{-1}\Delta P_2 = (1.4737)^{-1}(-0.6025) = -0.4088\,rad$$

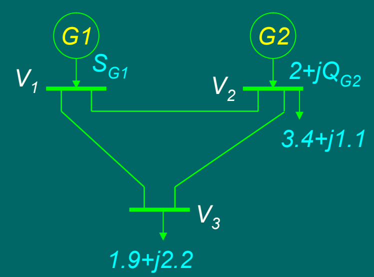
$$\delta_2^{new} = \delta_2^{old} + \Delta\delta_2 = 0 + (-0.4088) = -0.4088\,rad = -23.42^\circ$$

$$|V_2|^{new} = |V_2|^{old} + \Delta|V_2| = 1.01 + 0 = 1.01$$

ولتاژ باس 2 پس از یک مرحله تکرار:

$$V_2 = 1.01 < -23.42^\circ$$

52



تمرین:

در سیستم قدرت فوق ادمیتانسهای مدل پی تمام خطوط عبارتند از :

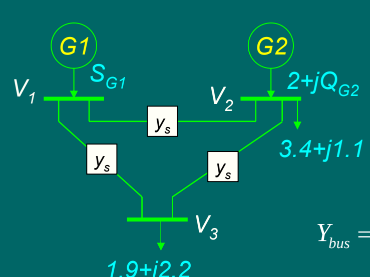
$y_s = -j8.7 \quad y_p = 0$

باس 1، باس مبنا با ولتاژ $V_1 = 1.02 < 0$

باس 2، از نوع PV با $|V_2|^{spec} = 1.01$ برای $1 \le Q_{G2} \le 2$

ولتاژ باسهای 2 و 3 را پس از یک مرحله تکرار به روش نیوتن-رافسون پیدا کنید؟

53



حل تمرین :

محاسبه ماتریس ادمیتانس باسها:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 2y_s & -y_s & -y_s \\ -y_s & 2y_s & -y_s \\ -y_s & -y_s & 2y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j17.4 & j8.7 & j8.7 \\ j8.7 & -j17.4 & j8.7 \\ j8.7 & j8.7 & -j17.4 \end{bmatrix}$$

محاسبه توانهای تزریقی باسها:

$$1 \le Q_{G2} \le 2$$

$$\downarrow$$

$$1-1.1 \le Q_2^{Sch} = Q_{G2} - Q_{D2} \le 2-1.1$$

$$\downarrow$$

$$-0.1 \le Q_2^{Sch} \le 0.9$$

$P_2^{sch} = P_{G2} - P_{D2} = 2 – 3.4 = -1.4$

$P_3^{sch} = P_{G3} – P_{D3} = 0 – 1.9 = -1.9$

$Q_3^{sch} = Q_{G3} – Q_{D3} = 0 – 2.2 = -2.2$

54

ادامه حل تمرین : تکرار اول:

$V_1 = 1.02 < 0 \qquad V_2 = |V_2|^{spec} < 0 = 1.01<0 \qquad V_3 = 1 < 0$

$$f_{q2}^{(0)} = \sum_{k=1}^{n} |y_{2k}|.|V_2|.|V_k|\sin(\delta_2 - \delta_k - \theta_{2k})$$
$$= |y_{21}|.|V_2|.|V_1|.\sin(\delta_2 - \delta_1 - \theta_{21}) + |y_{22}|.|V_2|.|V_2|.\sin(\delta_2 - \delta_2 - \theta_{22}) + |y_{23}|.|V_2|.|V_3|.\sin(\delta_2 - \delta_3 - \theta_{23})$$
$$= 8.7\times1.01\times1.02\times\sin(0-0-90) + 17.4\times1.01\times1.01\times\sin(0-0+90) + 8.7\times1.01\times1\times\sin(0-0-90)$$
$$= 0$$

چون $-0.1<f_{q2}=0<0.9$ در بازه Q_2^{sch} قرار دارد بنابراین: $Q_2^{sch}=f_{q2}^{(0)} = 0$

$$f_{p2}^{(0)} = \sum_{k=1}^{n} |y_{2k}|.|V_2|.|V_k|\cos(\delta_2 - \delta_k - \theta_{2k})$$
$$= |y_{21}|.|V_2|.|V_1|.\cos(\delta_2 - \delta_1 - \theta_{21}) + |y_{22}|.|V_2|.|V_2|.\cos(\delta_2 - \delta_2 - \theta_{22}) + |y_{23}|.|V_2|.|V_3|.\cos(\delta_2 - \delta_3 - \theta_{23})$$
$$= 8.7\times1.01\times1.02\times\cos(0-0-90) + 17.4\times1.01\times1.01\times\cos(0-0+90) + 8.7\times1.01\times1\times\cos(0-0-90)$$
$$= 0$$

$$\Delta P_2 = P_2^{sch} - f_{p2}^{(0)} = -1.4 - 0 = -1.4$$
$$\Delta Q_2 = Q_2^{sch} - f_{q2}^{(0)} = 0 - 0 = 0$$

55

ادامه حل تمرین :

$$f_{q3}^{(0)} = \sum_{k=1}^{n} |y_{3k}|.|V_3|.|V_k|\sin(\delta_3 - \delta_k - \theta_{3k})$$
$$= |y_{31}|.|V_3|.|V_1|.\sin(\delta_3 - \delta_1 - \theta_{31}) + |y_{32}|.|V_3|.|V_2|.\sin(\delta_3 - \delta_2 - \theta_{32}) + |y_{33}|.|V_3|.|V_3|.\sin(\delta_3 - \delta_3 - \theta_{33})$$
$$= 8.7\times1\times1.02\times\sin(0-0-90) + 8.7\times1\times1.01\times\sin(0-0-90) + 17.47\times1\times1\times\sin(0-0+90)$$
$$= -0.261$$

$$f_{p3}^{(0)} = \sum_{k=1}^{n} |y_{3k}|.|V_3|.|V_k|\cos(\delta_3 - \delta_k - \theta_{3k})$$
$$= |y_{31}|.|V_3|.|V_1|.\cos(\delta_3 - \delta_1 - \theta_{31}) + |y_{32}|.|V_3|.|V_2|.\cos(\delta_3 - \delta_2 - \theta_{32}) + |y_{33}|.|V_3|.|V_3|.\cos(\delta_3 - \delta_3 - \theta_{33})$$
$$= 8.7\times1\times1.02\times\cos(0-0-90) + 8.7\times1\times1.01\times\cos(0-0-90) + 17.47\times1\times1\times\cos(0-0+90)$$
$$= 0$$

$$\Delta P_3 = P_3^{sch} - f_{p3}^{(0)} = -1.9 - 0 = -1.9$$
$$\Delta Q_3 = Q_3^{sch} - f_{q3}^{(0)} = -2.2 - (-0.261) = -1.939$$

56

ادامه حل تمرین :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 = 0 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{22} & H_{23} & N_{22} & N_{23} \\ H_{32} & H_{33} & N_{32} & N_{33} \\ J_{22} & J_{23} & L_{22} & L_{23} \\ J_{32} & J_{33} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2 \\ \Delta\delta_3 \\ \frac{\Delta|V_2| = 0}{|V_2|} \\ \frac{\Delta|V_3|}{|V_3|} \end{bmatrix}$$

سطر سوم و ستون سوم را حذف می کنیم:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{22} & H_{23} & N_{23} \\ H_{32} & H_{33} & N_{33} \\ J_{32} & J_{33} & L_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2 \\ \Delta\delta_3 \\ \frac{\Delta|V_3|}{|V_3|} \end{bmatrix}$$

57

ادامه حل تمرین :

$$H_{22} = -f_{q2}^{(0)} - B_{22}|V_2|^2 = -0 - (-17.4)\times(1.01)^2 = 17.7497$$

$$H_{33} = -f_{q3}^{(0)} - B_{33}|V_3|^2 = -(-0.261) - (-17.4)\times(1)^2 = 17.661$$

$$H_{23} = |y_{23}|.|V_2|.|V_3|\sin(\delta_2 - \delta_3 - \theta_{23}) = 8.7\times1.01\times1\times\sin(0-0-90) = -8.787$$

$$H_{32} = |y_{32}|.|V_3|.|V_2|\sin(\delta_3 - \delta_2 - \theta_{32}) = 8.7\times1\times1.01\times\sin(0-0-90) = -8.787$$

$$J_{32} = -|y_{32}|.|V_3|.|V_2|\cos(\delta_3 - \delta_2 - \theta_{32}) = -8.7\times1\times1.01\times\cos(0-0-90) = 0$$

$$N_{23} = -J_{23} = -\left(|y_{23}|.|V_2|.|V_3|\cos(\delta_2 - \delta_3 - \theta_{23})\right) = -\left(8.7\times1.01\times1\times\cos(0-0-90)\right) = 0$$

$$N_{33} = f_{p3}^{(0)} + G_{33}|V_3|^2 = 0 + 0\times1^2 = 0$$

$$J_{33} = f_{p3}^{(0)} - G_{33}|V_3|^2 = 0 - 0\times1^2 = 0$$

$$L_{33} = f_{q3}^{(0)} - B_{33}|V_3|^2 = (-0.261) - (-17.4)\times(1)^2 = 17.139$$

58

ادامه حل تمرین :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{22} & H_{23} & N_{23} \\ H_{32} & H_{33} & N_{33} \\ J_{32} & J_{33} & L_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2 \\ \Delta\delta_3 \\ \dfrac{\Delta|V_3|}{|V_3|} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -1.4 \\ -1.9 \\ -1.939 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 17.7497 & -8.787 & 0 \\ -8.787 & 17.661 & 0 \\ 0 & 0 & 17.139 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2 \\ \Delta\delta_3 \\ \dfrac{\Delta|V_3|}{|V_3|} \end{bmatrix}$$

59

ادامه حل تمرین :

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_2 \\ \Delta\delta_3 \\ \dfrac{\Delta|V_3|}{|V_3|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 17.7497 & -8.787 & 0 \\ -8.787 & 17.661 & 0 \\ 0 & 0 & 17.139 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -1.4 \\ -1.9 \\ -1.939 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1753 \\ -0.1948 \\ -0.1131 \end{bmatrix}$$

$$\delta_2^{new} = \delta_2^{old} + \Delta\delta_2 = 0 + (-0.1753) = -0.1753\,rad = -10.04^\circ$$

$$\delta_3^{new} = \delta_3^{old} + \Delta\delta_3 = 0 + (-0.1948) = -0.1948\,rad = -11.16^\circ$$

$$|V_3|^{new} = |V_3|^{old} + \Delta|V_3| = 1 + (-0.1131) \times 1 = 0.8869$$

$$V_1 = 1.02 < 0 \quad V_2 = 1.01 < -10.04^\circ \quad V_3 = 0.886 < -11.16^\circ$$

60

مقایسه روشهاي گوس-سایدل و نیوتن-رافسون:

معیار مقایسه	روش گوس-سایدل	روش نیوتن-رافسون
تعداد تکرار برای حصول همگرائی	زیاد	کم (3الی 6 تکرار)
زمان لازم برای محاسبات هر تکرار	کم	زیاد
دقت جواب	کمتر	بسیار دقیق
قابلیت اطمینان برای حصول همگرائی	کمتر	بسیار زیاد
سهولت برنامه نویسی کامپیوتر	ساده	پیچیده
حافظه لازم برای ذخیره داده ها	کمتر	زیاد

61

پخش بار دکوپله (*Decoupled*) :

نتایج تجربی پخش بار نشان می دهند که P و δ بمیزان زیادی به هم وابسته بوده و تغییرات Q و |V| تاثیر زیادی روی آنها ندارند. همچنین Q و |V| نیز وابستگی زیادی به یکدیگر داشته و با تغییرات P و δ چندان تغییر نمی کنند. بنابراین تقریبهای زیر را در روابط اعمال می کنیم:

$$\begin{bmatrix}\Delta P\\ \Delta Q\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}H & N\\ J & L\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\delta\\ \dfrac{\Delta|V|}{|V|}\end{bmatrix} \longrightarrow \begin{cases}\Delta P = H.\Delta\delta + N.\dfrac{\Delta|V|}{|V|}\\ \Delta Q = J.\Delta\delta + L.\dfrac{\Delta|V|}{|V|}\end{cases} \longrightarrow \begin{cases}\Delta P \approx H.\Delta\delta\\ \Delta Q \approx L.\dfrac{\Delta|V|}{|V|}\end{cases}$$

با تقریبهای فوق سرعت محاسبات افزایش و حجم حافظه لازم برای ذخیره سازی متغیرها کاهش خواهد یافت ولی دقت جوابهای بدست آمده کمتر خواهد شد.

62

پخش بار دکوپله سریع (*Fast-Decoupled*) :

علاوه بر تقریب روش دکوپله، اختلاف زوایای ولتاژ صفر فرض می شوند. بنابراین:

$$\delta_i - \delta_k \approx 0$$

$$H_{ik} = (\frac{\partial f_{pi}}{\partial \delta_k})^{(0)} = |y_{ik}|.|V_i|.|V_k|\sin(0-\theta_{ik}) = -B_{ik}.|V_i|.|V_k| \quad for \quad k \neq i$$

$$H_{ii} = (\frac{\partial f_{pi}}{\partial \delta_i})^{(0)} = -\sum_{\substack{k=1 \\ k\neq i}}^{n} |y_{ik}|.|V_i|.|V_k|\sin(0-\theta_{ik}) = -f_{qi}^{(0)} - B_{ii}|V_i|^2$$

$$L_{ii} = |V_i|(\frac{\partial f_{qi}}{\partial |V_i|})^{(0)} = f_{qi}^{(0)} - B_{ii}|V_i|^2$$

$$L_{ik} = |V_k|(\frac{\partial f_{qi}}{\partial |V_k|})^{(0)} = H_{ik} \quad for \quad k \neq i$$

63

پخش بار مستقیم (*DC*) :

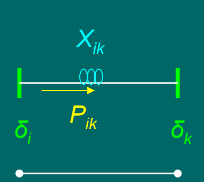
هدف : محاسبه بسیار سریع و تقریبی توان اکتیو انتقالی خطوط

فرضهای ساده سازی:

- از مولفه حقیقی امپدانس خطوط (R_{ik}) صرفنظر می شود.
- دامنه ولتاژ تمام باسها یک پریونیت فرض می شود.
- δ_i-δ_k بسیار کوچک است بنابراین $\sin(\delta_i-\delta_k)\approx \delta_i-\delta_k$ و $\cos(\delta_i-\delta_k)\approx 1$

با فرضهای فوق می توان ثابت نمود که توان انتقالی خطوط از رابطه زیر بدست می آید:

$$P_{ik} \approx \frac{\delta_i - \delta_k}{X_{ik}}$$



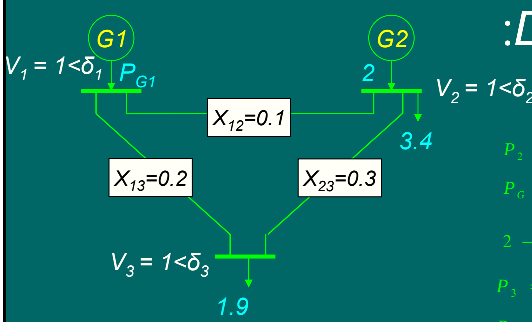
که P_{ik} توان انتقالی خط بین باسهای i و k

و X_{ik} راکتانس خط بین باسهای i و k است

δ_i و δ_k زوایای ولتاژ باسهای i و k بر حسب رادیان هستند.

64

مثال 1-7: پخش بار DC:



حل:

$$P_2 = P_{21} + P_{23}$$
$$P_{G2} - P_{D2} = \frac{\delta_2 - \delta_1}{X_{21}} + \frac{\delta_2 - \delta_3}{X_{23}}$$
$$2 - 3.4 = \frac{\delta_2 - 0}{0.1} + \frac{\delta_2 - \delta_3}{0.3}$$
$$P_3 = P_{31} + P_{32}$$
$$P_{G3} - P_{D3} = \frac{\delta_3 - \delta_1}{X_{31}} + \frac{\delta_3 - \delta_2}{X_{32}}$$
$$0 - 1.9 = \frac{\delta_3 - 0}{0.2} + \frac{\delta_3 - \delta_2}{0.3}$$

$$\begin{bmatrix} -1.4 \\ -1.9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{0.1}+\frac{1}{0.3} & \frac{-1}{0.3} \\ \frac{-1}{0.3} & \frac{1}{0.2}+\frac{1}{0.3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{0.1}+\frac{1}{0.3} & \frac{-1}{0.3} \\ \frac{-1}{0.3} & \frac{1}{0.2}+\frac{1}{0.3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -1.4 \\ -1.9 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13.333 & -3.333 \\ -3.333 & 8.333 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -1.4 \\ -1.9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.18 \\ -0.30 \end{bmatrix}$$

$$P_{21} = \frac{\delta_2 - \delta_1}{X_{21}} = \frac{-0.18-0}{0.1} = -1.8 \quad P_{13} = \frac{\delta_1 - \delta_3}{X_{13}} = \frac{0-(-0.30)}{0.2} = 1.5 \quad P_{23} = \frac{\delta_2 - \delta_3}{X_{23}} = \frac{-0.18-(-0.30)}{0.3} = 0.4$$

$$P_1 = P_{12} + P_{13} = 1.8 + 1.5 = 3.3$$

65

فصل دوم: پخش بار اقتصادی

در پخش بار اقتصادی هدف آن است که سیستم قدرت بطریقی بهره برداری شود که همه بارها با حداقل هزینه تامین شوند.

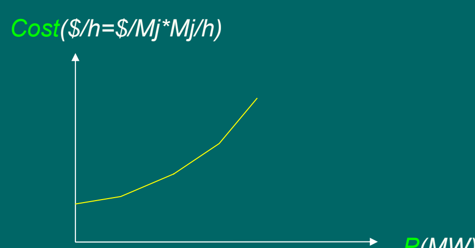
66

تابع هزینه:

هزینه متغیر (سوخت) + هزینه ثابت = هزینه کل

- در نیروگاههای آبی با تغییر توان تولیدی ژنراتورها، هزینه تولید تغییر نمی نماید.
- در نیروگاههای حرارتی، با افزایش توان تولیدی ژنراتورها، سوخت و در نتیجه هزینه افزایش می یابد.
- تابع هزینه یک واحد حرارتی معمولا بصورت یک معادله درجه 2 مدلسازی می شود:

$$C = \alpha + \beta . P + \gamma . P^2$$



67

مساله پخش بار اقتصادی:

تابع هدف :

$$Minimize \quad C = \sum_{i=1}^{n} C_i(P_{Gi})$$

قید تساوی :

$$\sum_{i=1}^{n} P_{Gi} - \sum_{i=1}^{n} P_{Di} - P_{Loss} = 0$$

قیود نامساوی :

$$P_{Gi\,\min} \le P_{Gi} \le P_{Gi\,\max} \qquad i = 1,2,\cdots,n$$

توانهای تولیدی ژنراتور (P_{Gi}) ها را باید تعیین کنیم.

68

مساله پخش بار اقتصادی با صرفنظر از تلفات و قیود نامساوی:

-اگر طول خطوط کوتاه باشند می توان از تلفات خطوط صرفنظر کرد.
- فرض می کنیم P_{Gi} هر مقداری می توانند باشند، یعنی قیود نامساوی وجود ندارند.
- بنابراین مساله پخش بار اقتصادی بصورت زیر ساده می شود.

$$Minimize \qquad C = \sum_{i=1}^{n} C_i(P_{Gi})$$

$$\sum_{i=1}^{n} P_{Gi} - \underbrace{\sum_{i=1}^{n} P_{Di}}_{P_D} = 0$$

69

حل مساله پخش بار اقتصادی با صرفنظر از تلفات و قیود نامساوی:

از روش لاگرانژ استفاده می کنیم. برطبق این روش تابع هدف هزینه تعمیم یافته را بصورت زیر تعریف می کنیم:

$$C^* = \underbrace{C}_{\sum_{k=1}^{n} C_k(P_{Gk})} - \lambda\left(\sum_{k=1}^{n} P_{Gk} - P_D\right)$$

- λ را ضریب لاگرانژ گویند.
- شرط کمینه بودن C^* آن است که مشتق جزئی آن نسبت به تمام متغیرهای آن یعنی P_{Gi} و λ صفر باشند:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial C^*}{\partial P_{Gi}} = \dfrac{\partial C_i(P_{Gi})}{\partial P_{Gi}} - \lambda = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda = \dfrac{\partial C_i(P_{Gi})}{\partial P_{Gi}} = IC_i \\ \dfrac{\partial C^*}{\partial \lambda} = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum_{i=1}^{n} P_{Gi} - P_D = 0 \end{cases}$$

IC_i را هزینه افزایشی تولید واحد i گویند.

بنابراین : شرط بهینه بودن پاسخ آن است که اولا هزینه افزایشی تمام واحدها یکسان برابر باشند ($IC_1 = IC_2 = \ldots = IC_n$). ثانیا شرط تساوی برقرار باشد.

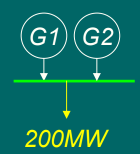
70

مثال 2-1: پخش بار اقتصادی :

توابع هزینه افزونی دو واحد در یک نیروگاه بصورت زیر است. در صورتیکه مجموع بار مصرفی نیروگاه 200 مگاوات باشد، توزیع اقتصادی بار را بین دو ژنراتور بدست آورید.

$IC_1 = 750 + 0.8\, P_{G1}$

$IC_2 = 600 + P_{G2}$



حل:

$$\begin{cases} IC_1 = \lambda \;\Rightarrow\; 750 + 0.8P_{G1} = \lambda \;\Rightarrow\; P_{G1} = \dfrac{\lambda - 750}{0.8} \\ IC_2 = \lambda \;\Rightarrow\; 600 + P_{G2} = \lambda \;\Rightarrow\; P_{G2} = \lambda - 600 \\ P_{G1} + P_{G2} - P_D = 0 \;\Rightarrow\; \dfrac{\lambda - 750}{0.8} + \lambda - 600 = 200 \;\Rightarrow\; \lambda = 772.22 \end{cases}$$

$$\lambda = 772.2$$

$$\begin{cases} P_{G2} = \lambda - 600 = 772.22 - 600 = 172.22 \\ P_{G1} = \dfrac{\lambda - 750}{0.8} = \dfrac{772.22 - 750}{0.8} = 27.78 \end{cases}$$

در نظر گرفتن قیود نامساوی در پخش بار اقتصادی :

با یک مثال توضیح می دهیم.

مثال 2-2) توابع هزینه افزونی سه نیروگاه بصورت زیر است. در صورتیکه مجموع بار مصرفی سه نیروگاه 200 مگاوات باشد، توزیع اقتصادی بار را بین سه نیروگاه بدست آورید.

$P_{G1} = 50\, IC_1 - 30 \qquad 10\ Mw \le P_{G1} \le 70\ Mw$

$P_{G2} = 40\, IC_2 - 20 \qquad 10\ Mw \le P_{G2} \le 60\ Mw$

$P_{G3} = 70\, IC_3 - 10 \qquad 30\ Mw \le P_{G3} \le 90\ Mw$

حل:

$$IC_1 = IC_2 = IC_3 = \lambda$$

$$\begin{cases} P_{G1} = 50\lambda - 30 \\ P_{G2} = 40\lambda - 20 \\ P_{G3} = 70\lambda - 10 \\ P_{G1} + P_{G2} + P_{G3} = P_D \end{cases}$$

$$\lambda = 2 \;\Rightarrow\; \begin{cases} P_{G1} = 50\times 2 - 30 = 70 \\ P_{G2} = 40\times 2 - 20 = 60 \\ P_{G3} = 70\times 2 - 10 = 130 > P_{G3}^{\max} = 90 \;\Rightarrow\; P_{G3} = P_{G3}^{\max} = 90 \end{cases}$$

$$\sum P_G = 70 + 60 + 90 = 220 > P_D = 200$$

ادامه حل:

$$\lambda=1.5 \Rightarrow \begin{cases} P_{G1}=50\times1.5-30=45 \\ P_{G2}=40\times1.5-20=40 \\ P_{G3}=70\times1.5-10=95>P_{G3}^{\max}=90 \Rightarrow P_{G3}=P_{G3}^{\max}=90 \end{cases}$$

$$\sum P_G=45+40+90=175<P_D=200$$

λ	$\sum P_G$
2	220
1.5	175
λ	200

$$\Rightarrow \frac{\lambda-1.5}{200-175}=\frac{1.5-2}{175-220} \Rightarrow \lambda=1.778$$

$$\lambda=1.778 \Rightarrow \begin{cases} P_{G1}=50\times1.778-30=58.9 \\ P_{G2}=40\times1.778-20=51.12 \\ P_{G3}=70\times1.778-10=114.46>P_{G3}^{\max}=90 \Rightarrow P_{G3}=P_{G3}^{\max}=90 \end{cases}$$

$$\sum P_G=58.9+51.12+90=200.02\cong P_D=200$$

$$P_{G1}^{opt}=58.9 \quad P_{G2}^{opt}=51.12 \quad P_{G3}^{opt}=90$$

حل مساله فوق از روش مستقیم:

$$IC_1=IC_2=IC_3=\lambda$$

$$\begin{cases} P_{G1}=50\lambda-30 \\ P_{G2}=40\lambda-20 \\ P_{G3}=70\lambda-10 \\ P_{G1}+P_{G2}+P_{G3}=P_D \end{cases}$$

$$P_{G1}+P_{G2}+P_{G3}=P_D$$

$$(50\lambda-30)+(40\lambda-20)+(70\lambda-10)=200$$

$$160\lambda=260$$

$$\lambda=1.625$$

$$\begin{cases} P_{G1}=50\lambda-30=50(1.625)-30=51.25 \\ P_{G2}=40\lambda-20=40(1.625)-20=45 \\ P_{G3}=70\lambda-10=70(1.625)-10=103.75>P_{G3}^{\max}=90 \Rightarrow P_{G3}=90 \end{cases}$$

P_{G1} در محدوده مجاز است.

P_{G2} در محدوده مجاز است.

ادامه حل مساله فوق از روش مستقیم:

$$P_{G3} = 90MW$$
$$P'_D = 200 - 90 = 110$$
$$P_{G1} + P_{G2} = P'_D$$
$$(50\lambda' - 30) + (40\lambda' - 20) = 110$$
$$90\lambda = 160$$
$$\lambda' = 1.778$$

$$\begin{cases} P_{G1} = 50\lambda' - 30 = 50(1.778) - 30 = 58.9 \\ P_{G2} = 40\lambda' - 20 = 40(1.778) - 20 = 51.12 \end{cases}$$

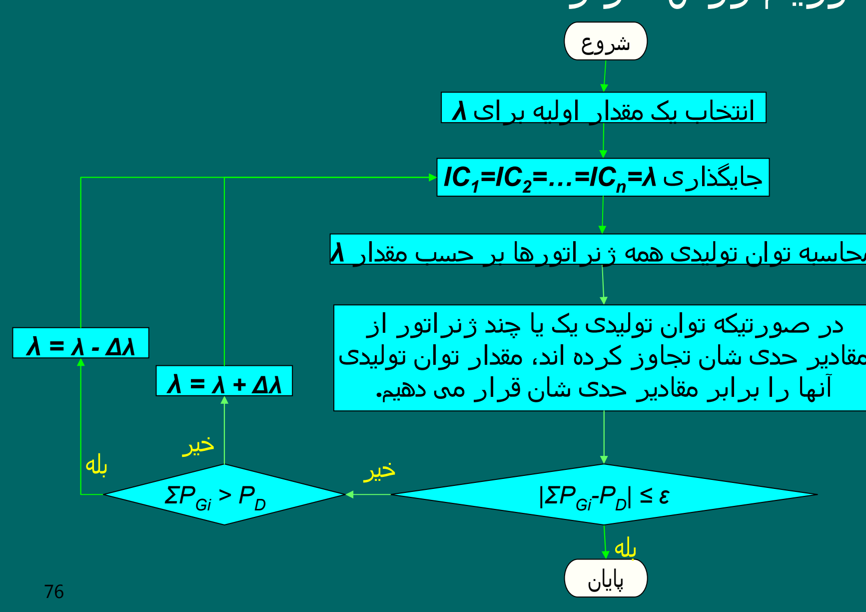
P_{G1} در محدوده مجاز است.

P_{G2} در محدوده مجاز است.

$$P_{G1}^{opt} = 58.9 \quad P_{G2}^{opt} = 51.12 \quad P_{G3}^{opt} = 90$$

75

الگوریتم روش تکرار λ :



76

مساله پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن تلفات انتقال:

تابع هدف :
$$Minimize \quad C=\sum_{k=1}^{n} C_k(P_{Gk})$$

قید تساوی :
$$\sum_{k=1}^{n} P_{Gk}-P_D-P_{loss}=0$$

قیود نامساوی :
$$P_{Gk\min}\le P_{Gk}\le P_{Gk\max} \qquad k=1,2,\cdots,n$$

توانهای تولیدی ژنراتور (P_{Gi}) ها را باید تعیین کنیم.

77

حل مساله پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن تلفات:

از روش لاگرانژ استفاده می کنیم. برطبق این روش تابع هدف هزینه تعمیم یافته را بصورت زیر تعریف می کنیم:

$$C^*=C-\lambda(\sum_{k=1}^{n} P_{Gk}-P_D-P_{Loss})=\sum_{k=1}^{n} C_k(P_{Gk})-\lambda(\sum_{k=1}^{n} P_{Gk}-P_D-P_{Loss})$$

- λ را ضریب لاگرانژ گویند.

- شرط کمینه بودن C^* آن است که مشتق جزئی آن نسبت به تمام متغیر های آن یعنی P_{Gi}، P_{loss} و λ صفر باشند:

$$\begin{cases}\dfrac{\partial C^*}{\partial P_{Gi}}=\dfrac{\partial C_i(P_{Gi})}{\partial P_{Gi}}-\lambda(1-\dfrac{\partial P_{loss}}{\partial P_{Gi}})=0 \quad \Rightarrow \quad \lambda=\dfrac{1}{1-\dfrac{\partial P_{loss}}{\partial P_{Gi}}}\cdot\dfrac{\partial C_i(P_{Gi})}{\partial P_{Gi}}=(\dfrac{1}{1-ITL_i}).IC_i=L_i.IC_i \\ \dfrac{\partial C^*}{\partial \lambda}=0 \quad \Rightarrow \quad \sum_{k=1}^{n} P_{Gk}-P_D-P_{loss}=0\end{cases}$$

IC_i را هزینه افزایشی تولید، ITL_i را تلفات نموی انتقال و L_i را ضریب جبران واحد i ام گویند و با روابط زیر تعریف می شوند:

$$IC_i=\frac{\partial C_i}{\partial P_{Gi}} \qquad ITL_i=\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_{Gi}} \qquad L_i=(\frac{1}{1-ITL_i})$$

78

شروط بهینه بودن یک پاسخ در مساله پخش بار اقتصادی:

بنابراین : شرط بهینه بودن پاسخ آن است که

- اولا حاصلضرب هزینه افزایشی در ضریب جبران کلیه واحدها یکسان باشند ($IC_1.L_1=IC_2.L_2=\ldots=IC_n.L_n=\lambda$).
- ثانیا شرط تساوی توازن توان برقرار باشد ($\Sigma P_{Gi}-P_D-P_{loss}=0$).

79

رابطه تقریبی تلفات انتقال و توانهای تولیدی:

می توان نشان داد که در حالت کلی در سیستم قدرتی با n ژنراتور، معادله تلفات را می توان بصورت رابطه تقریبی زیر بیان کرد:

$$P_{loss}=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}P_{Gi}B_{ij}P_{Gj}$$

شکل ماتریسی رابطه فوق:

$$P_{loss}=P^{\tau}.B.P \quad ; \quad P=\begin{bmatrix}P_{G1}\\ \vdots\\ P_{Gn}\end{bmatrix} \quad , \quad B=\begin{bmatrix}B_{11} & \cdots & B_{1n}\\ \vdots & \vdots & \vdots\\ B_{n1} & \cdots & B_{nn}\end{bmatrix}$$

با استفاده از رابطه فوق می توان ITL_i و سپس L_i را بدست آورد.

80

رابطه P_{loss} بر حسب P_G ها برای دو واحد:

$$P=\begin{bmatrix} P_{G1} \\ P_{G2} \end{bmatrix} \qquad B=\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}$$

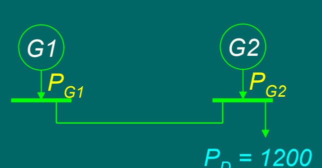
$$P_{loss}=P^{\tau}.B.P=\begin{bmatrix} P_{G1} \\ P_{G2} \end{bmatrix}^{\tau}.\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}.\begin{bmatrix} P_{G1} \\ P_{G2} \end{bmatrix}$$

$$P_{loss}=\begin{bmatrix} P_{G1} & P_{G2} \end{bmatrix}.\begin{bmatrix} B_{11}P_{G1}+B_{12}P_{G2} \\ B_{21}P_{G1}+B_{22}P_{G2} \end{bmatrix}$$

$$P_{loss}=B_{11}P_{G1}^2+B_{12}P_{G1}P_{G2}+B_{21}P_{G1}P_{G2}+B_{22}P_{G2}^2=\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}B_{ij}P_{Gi}P_{Gj}$$

81 $$P_{loss}=B_{11}P_{G1}^2+\left(B_{12}+B_{21}\right)P_{G1}P_{G2}+B_{22}P_{G2}^2$$

مثال 2-3: پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن تلفات



برای سیستم شکل مقابل، روابط زیر داده شده اند. توانهای تولیدی اقتصادی ژنراتورها را بیابید.

$IC_1 = 800 + P_{G1}$
$IC_2 = 900 + 1.5\,P_{G2}$
$P_{loss} = 0.0002\,P_{G1}^2$

حل:

$$\begin{cases} ITL_1=\dfrac{\partial P_{loss}}{\partial P_{G1}}=0.0004P_{G1} \quad \Rightarrow \quad L_1=\dfrac{1}{1-ITL_1}=\dfrac{1}{1-0.0004P_{G1}} \\ ITL_2=\dfrac{\partial P_{loss}}{\partial P_{G2}}=0 \quad \Rightarrow \quad L_2=\dfrac{1}{1-ITL_2}=1 \end{cases}$$

82

ادامه حل مثال 2-3:

$$\begin{cases} L_1.IC_1 = \lambda \;\Rightarrow\; \left(\dfrac{1}{1-0.0004\,P_{G1}}\right)(800+P_{G1}) = \lambda \;\Rightarrow\; P_{G1} = \dfrac{\lambda - 800}{1+0.0004\,\lambda} \\ L_2.IC_2 = \lambda \;\Rightarrow\; (1)(900+1.5P_{G2}) = \lambda \;\Rightarrow\; P_{G2} = \dfrac{\lambda - 900}{1.5} \end{cases}$$

انتخاب λ اولیه:

$$P_{G2} = \frac{P_D}{2} = \frac{1200}{2} = 600 \;\Rightarrow\; \frac{\lambda - 900}{1.5} = 600 \;\Rightarrow\; \lambda = 1800$$

تکرار اول روش تکرار λ:

$$\lambda = 1800 \;\Rightarrow\; \begin{cases} P_{G1} = \dfrac{1800-800}{1+0.0004\times 1800} = 581.40 \\ P_{G2} = \dfrac{1800-900}{1.5} = 600 \\ P_{loss} = 0.0002P_{G1}^2 = 0.0002(581.40)^2 = 67.60 \end{cases}$$

$$\sum_{i=1}^{2} P_{Gi} - P_{loss} = (581.40+600) - 67.60 = 1113.8 < P_D = 1200$$

λ باید افزایش یابد.

ادامه حل مثال 2-3:   تکرار دوم روش تکرار λ:

$$\lambda = 1900 \;\Rightarrow\; \begin{cases} P_{G1} = \dfrac{1900-800}{1+0.0004\times 1900} = 625 \\ P_{G2} = \dfrac{1900-900}{1.5} = 666.67 \\ P_{loss} = 0.0002\,P_{G1}^2 = 0.0002\,(625)^2 = 78.13 \end{cases}$$

$$\sum_{i=1}^{2} P_{Gi} - P_{loss} = (625+666.67) - 78.13 = 1213.54 > P_D = 1200$$

λ باید کاهش یابد.

λ	$\sum_{i=1}^{2} P_{Gi} - P_{loss}$
1800	1113.8
1900	1213.54
λ	1200

$$\Rightarrow\; \frac{\lambda - 1900}{1200 - 1213.54} = \frac{1900-1800}{1213.54-1113.8} \;\Rightarrow\; \lambda = 1886.42$$

ادامه حل مثال 2-3:

تکرار سوم روش تکرار λ:

$$\lambda = 1886.42 \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} P_{G1} = \dfrac{1886.42 - 800}{1 + 0.0004 \times 1886.42} = 619.20 \\ P_{G2} = \dfrac{1886.42 - 900}{1.5} = 657.61 \\ P_{loss} = 0.0002 P_{G1}^2 = 0.0002(619.20)^2 = 76.68 \end{cases}$$

$$\sum_{i=1}^{2} P_{Gi} - P_{loss} = (619.20 + 657.61) - 76.68 = 1200.13 \approx P_D = 1200$$

جواب بهینه :

$$P_{G1}^{opt} = 619.20 \quad P_{G2}^{opt} = 657.61 \quad P_{loss} = 76.68$$

محاسبه ITL ها برای یک سیستم:

در حالت کلی تلفات تابعی از توانهای باسها و توانهای باسها تابعی از دامنه و زوایای ولتاژ باسها هستند. در پخش بار اقتصادی، دامنه ولتاژ ها را ثابت فرض می کنیم و بنابراین تلفات تابعی از زوایای ولتاژ باسها است.

$$P_i = \sum_{k=1}^{n} |y_{ik}||V_i||V_k| \cos(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \quad for \quad i = 1,2,\dots,n$$

$$\begin{cases} dP_2 = \dfrac{\partial P_2}{\partial \delta_2} d\delta_2 + \dots + \dfrac{\partial P_2}{\partial \delta_n} d\delta_n \\ \vdots \\ dP_n = \dfrac{\partial P_n}{\partial \delta_2} d\delta_2 + \dots + \dfrac{\partial P_n}{\partial \delta_n} d\delta_n \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} dP_2 \\ \vdots \\ dP_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \cdots & \dfrac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \dfrac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \cdots & \dfrac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\delta_2 \\ \vdots \\ d\delta_n \end{bmatrix}$$

$$d\vec{P} = \left[\frac{\partial P}{\partial \delta}\right] d\vec{\delta} \quad \Rightarrow \quad d\vec{\delta} = \left[\frac{\partial P}{\partial \delta}\right]^{-1} d\vec{P}$$

ادامه محاسبه ITL ها برای یک سیستم:

$$dP_1=\frac{\partial P_1}{\partial \delta_2}d\delta_2+\dots+\frac{\partial P_1}{\partial \delta_n}d\delta_n=\begin{bmatrix}\frac{\partial P_1}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}d\delta_2\\ \vdots \\ d\delta_n\end{bmatrix}$$

$$=\left[\frac{\partial P_1}{\partial \delta}\right]^{\tau}d\vec{\delta}=\left[\frac{\partial P_1}{\partial \delta}\right]^{\tau}\left(\left[\frac{\partial P}{\partial \delta}\right]^{-1}d\vec{P}\right)=\left(\left[\frac{\partial P_1}{\partial \delta}\right]^{\tau}\left[\frac{\partial P}{\partial \delta}\right]^{-1}\right)d\vec{P}=[\alpha_2 \quad \cdots \quad \alpha_n]\begin{bmatrix}dP_2\\ \vdots \\ dP_n\end{bmatrix}$$

$$dP_1=\alpha_2 dP_2+\cdots+\alpha_n dP_n$$

$$P_{loss}=P_1+P_2+\dots+P_n \quad \Rightarrow \quad dP_{loss}=dP_1+dP_2+\dots+dP_n$$

$$dP_{loss}=(\alpha_2 dP_2+\cdots+\alpha_n dP_n)+dP_2+\dots+dP_n$$

$$dP_{loss}=(1+\alpha_2)dP_2+\cdots+(1+\alpha_n)dP_n$$

$$dP_{loss}=\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_2}dP_2+\cdots+\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_n}dP_n$$

87

ادامه محاسبه ITL ها برای یک سیستم:

$$\begin{cases} ITL_1=\dfrac{\partial P_{loss}}{\partial P_{G1}}=\dfrac{\partial P_{loss}}{\partial P_1}=0 \\ ITL_2=\dfrac{\partial P_{loss}}{\partial P_{G2}}=\dfrac{\partial P_{loss}}{\partial P_2}=1+\alpha_2 \\ \vdots \\ ITL_n=\dfrac{\partial P_{loss}}{\partial P_{Gn}}=\dfrac{\partial P_{loss}}{\partial P_n}=1+\alpha_n \end{cases}$$

$$[\alpha_2 \quad \cdots \quad \alpha_n]=\left[\frac{\partial P_1}{\partial \delta}\right]^{\tau}\left[\frac{\partial P}{\partial \delta}\right]^{-1}=\begin{bmatrix}\frac{\partial P_1}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}\\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\end{bmatrix}^{-1}$$

88

فصل سوم : اتصال کوتاه متقارن

حالتهای بررسی عملکرد سیستم قدرت:

1- حالت پایدار (ایستا): اختلال در سیستم نداریم و بارها نسبت به زمان ثابت اند. معادلات سیستم جبری غیرخطی اند. توسط پخش بار می توان سیستم را تحلیل نمود.

2- حالت دینامیک (پویا) : اختلالات کوچک داریم. اختلالات شامل تغییرات جزئی بار حول نقطه کار سیستم هستند. معادلات سیستم دیفرانسیل خطی هستند که می توان توسط تبدیل لاپلاس آنها را حل نمود.

3- حالت گذرا : اختلالات بزرگ سیستم قدرت را شامل می شوند و به سه گروه تقسیم می شوند:

الف) حالتهای گذرای فوق سریع

ب) حالتهای گذاری نیمه سریع

ج) حالتهای گذرای کند

89

حالتهای گذرای فوق سریع :

- ناشی از تخلیه الکتریکی صاعقه بر روی خط انتقال و کلید زنی هستند و به آنها *surge* گویند.
- فقط در خطوط انتقال اتفاق می افتند و منجر به یک موج الکترومغناتیس می شوند که با سرعتی نزدیک به سرعت نور منتشر می شوند.
- اثرات این امواج:
  - در طول خط رفت و برگشت می کنند و بر اثر مقاومت خطوط به سرعت مستهلک شده و پس از چند رفت و برگشت از بین می روند.
  - اندوکتانس بزرگ ترانسفورماتورها مانع از ورود آنها به سیم پیچهای ژنراتورها می شوند و سبب برگشت آنها می شوند ولی دامنه ولتاژهای برگشتی آنها بزرگ است.
  - برقگیرها این ولتاژهای زیاد را زمین می کنند ولی در صورت عمل نکردن برقگیرها، عایقهای خطوط تحمل این ولتاژهای بالا را ندارند و لذا در خط اتصال کوتاه بوجود می آورند.
- هدف از مطالعه حالتهای گذرای فوق سریع، یافتن سطح عایق بندی تجهیزات خط است.

90

حالتهای گذرای نیمه سریع (اتصال کوتاه ها):

- ناشی از تغییرات ساختاری سریع و غیرعادی سیستم هستند که به آنها خطا (*Fault*) یا اتصال کوتاه می گوئیم.

- علل پیدایش خطاها عبارتند از:

- صاعقه
- سالم نبودن تجهیزات و لوازم سیستم
- شرایط جوی مانند باد و برف و یخبندان شدید و غیره
- برخورد وسائل نقلیه زمینی با دکلها و برخورد وسائل نقلیه هوائی با هادیهای خطوط انتقال
- برخورد پرندگان با هادیهای خطوط انتقال و یا ورود حیوانات به پستها و کلید خانه ها
- سقوط درختان بر روی هادیهای خطوط انتقال
- عوامل تصادفی و اتفاقات غیرقابل پیش بینی

91

حالتهای گذرای کند :

- اتصال کوتاهها باعث کاهش ولتاژ ژنراتورها و کاهش سریع توان خروجی آنها می شوند ولی گاورنر توان مکانیکی ورودی به ژنراتور را کاهش نداده است. بنابراین ژنراتورها تحت گشتاور شتاب دهنده واقع می شوند که در صورت تداوم، سبب نوسانات مکانیکی رتور ماشین سنکرون می شوند.

92

انواع اتصال کوتاه ها بترتیب شدت خطرناکی:

1- اتصال کوتاه سه فاز متقارن

2- اتصال کوتاه دوفاز

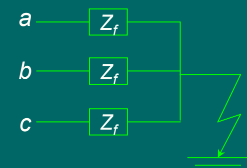
3- اتصال کوتاه تکفاز به زمین (*SLG*)

4- از هم گسیختگی و یا پاره شدن هادیهای خطوط انتقال

93

اتصال کوتاه سه فاز متقارن :

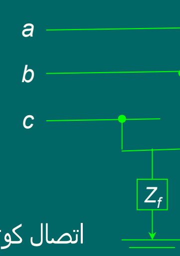
- احتمال وقوع آن کم است (حدود 5 درصد) ولی بسیار خطرناک است زیرا انتقال قدرت بکلی قطع می شود و بالاترین جریانهای اتصالی را بوجود می آورد.
- محل اتصالی باید سریعا از سیستم قدرت جدا شود.
- کاربرد مطالعه این اتصال کوتاه :
  - در حفاظت سیستم و تعیین مقادیر نامی کلیدهای قدرت و رله ها می باشد.
  - بررسی پایداری گذرای سیستم قدرت



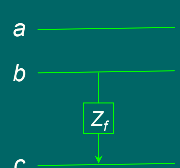
94

اتصال کوتاه دوفاز :

- دو نوع است:
  - دوفاز به هم (LL)
  - دوفاز به هم و به زمین (DLG)
- توان انتقالی از خط کم می شود.
- باعث نامتقارنی سیستم قدرت می شود.



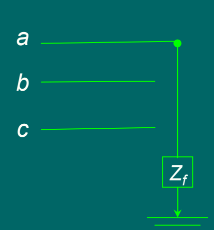
اتصال کوتاه DLG



اتصال کوتاه LL

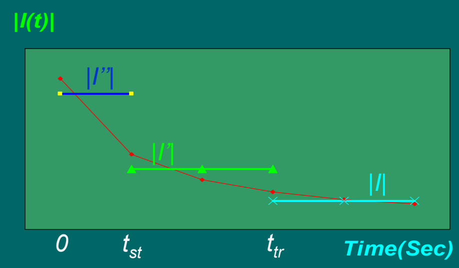
اتصال یکفاز به زمین (SLG):

- معمولا بر اثر شکست الکتریکی و ایجاد جرقه روی مقره ها پدید می آید.
- احتمال وقوع آن حدود 75 درصد است.



- تذکر : تعداد زیادی از اتصال کوتاه ها خود به خود برطرف می شوند. یعنی با کاهش جریان خطا، یونیزاسیون مسیر اتصالی از بین می رود و عایق وضعیت عادی خود را باز می یابد. لذا از ریکلوزرها استفاده می شود.

تغییرات مقدار موثر جریان اتصال کوتاه ژنراتور سنکرون و تقریبهای پله ای آن :

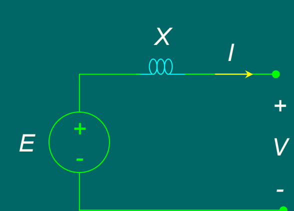


- $|I''|$ تقریب پله ای جریان اتصال کوتاه زیر گذرا
- $|I'|$ تقریب پله ای جریان اتصال کوتاه گذرا
- $|I|$ تقریب پله ای جریان اتصال کوتاه پایدار

- t_{st} زمان دوره زیر گذرا که حدود 2 سیکل (0.04 ثانیه) است.
- t_{tr} زمان دوره گذرا که حدود 25 سیکل (0.5 ثانیه) است.

97

مدل ژنراتور سنکرون در اتصال کوتاه :



$$E = V + jX \,.I$$

- مدل ژنراتور سنکرون در حالتهای زیرگذرا، گذرا و پایدار به شکل بالا است. فقط

در حالت گذرا به جای X باید X' و به جای E باید E' را قرار داد. و
در حالت زیرگذرا به جای X باید X'' و به جای E باید E'' را قرار داد.

98

روشهای محاسبه اتصال کوتاه متقارن سه فاز در سیستم قدرت :

دو روش وجود دارد:

1- روش مستقیم

2- روش استفاده از قضیه تونن

99

روش مستقیم محاسبه اتصال کوتاه متقارن سه فاز:

مراحل روش:

1- محاسبه ولتاژهای ترمینالها و جریانهای ژنراتورها و موتورهای سنکرون با استفاده از پخش بار در قبل اتصال کوتاه

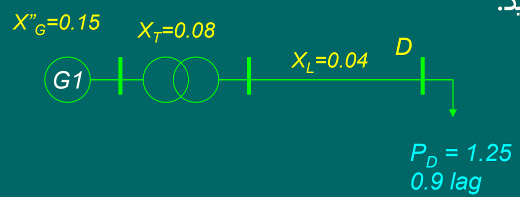
2- محاسبه ولتاژهای داخلی ژنراتورها (E، E'، E'') با استفاده از مدل ژنراتور سنکرون و فرمول آن

3- اتصال نقطه مورد نظر به نقطه صفر سیستم و محاسبه جریانهای لازم با ثابت نگه داشتن E، E'، E''

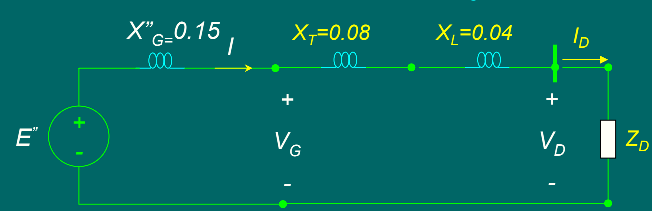
100

مثال 3-1: روش مستقیم اتصال کوتاه

در سیستم قدرت شکل زیر، ولتاژ بار در لحظه اتصال کوتاه $1.02 < 0$ بوده است. اتصال کوتاه سه فاز در نقطه D اتفاق می افتد. جریان اتصال کوتاه را به روش مستقیم بیابید.



حل:



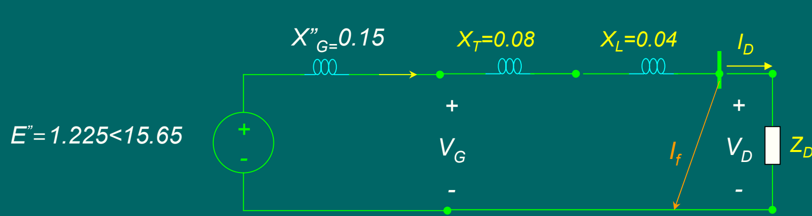
101

ادامه حل مثال 3-1

$$|I_D| = \frac{P_D}{|V_D|\cos\varphi} = \frac{1.25}{1.02\times 0.9} = 1.361$$

$$I_D = 1.361 < -\cos^{-1} 0.9 = 1.361 < -25.84^{\circ}$$

$$E''_G = V_D + j(X''_G + X_T + X_L) I_D = 1.02 < 0 + j(0.15+0.08+0.04)\times(1.361 < -25.84) = 1.225 < 15.65^{\circ}$$



$$I_f = \frac{E''_G}{j(X''_G + X_T + X_L)} = \frac{1.225 < 15.65^{\circ}}{j(0.15+0.08+0.04)} = 4.537 < -74.32^{\circ}$$

102

روش قضیه تونن برای محاسبه اتصال کوتاه متقارن سه فاز :

مراحل روش:

1- محاسبه کلیه ولتاژها و جریانها در قبل از اتصال کوتاه با استفاده از پخش بار در قبل اتصال کوتاه

2- پیدا کردن مدار معادل تونن از دید نقطه اتصال کوتاه

3- اعمال اتصال کوتاه به مدار معادل تونن و محاسبه جریان اتصال کوتاه I_f

4- قرار دادن منبع جریان I_f در مدار اولیه و محاسبه اثر اتصال کوتاه در کلیه جریانها و ولتاژها

5- محاسبه جریانها و ولتاژها در بعد از اتصال کوتاه:

$$V^f = V^0 + \Delta V$$

V^f ولتاژ بعد از اتصال کوتاه

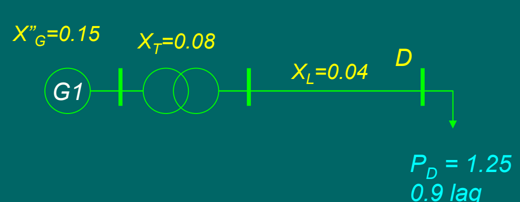
V^0 ولتاژ قبل از اتصال کوتاه

ΔV تغییرات ولتاژ ناشی از اتصال کوتاه

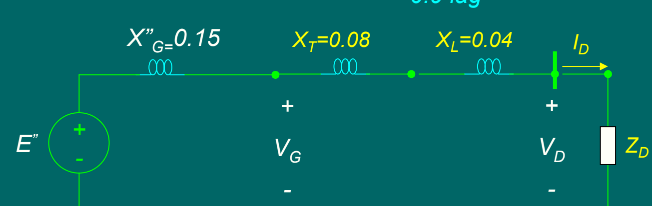
103

مثال 3-2: روش تونن اتصال کوتاه

در سیستم قدرت شکل زیر، ولتاژ بار در لحظه اتصال کوتاه $1.02 < 0$ بوده است. اتصال کوتاه سه فاز در نقطه D اتفاق می افتد. جریان اتصال کوتاه را به روش تونن بیابید.



حل:

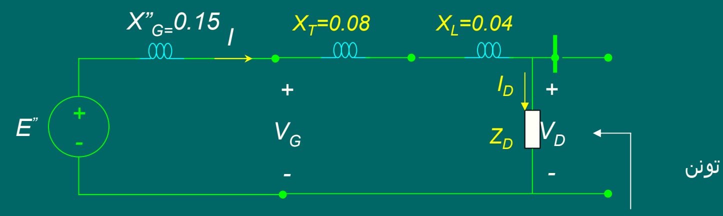


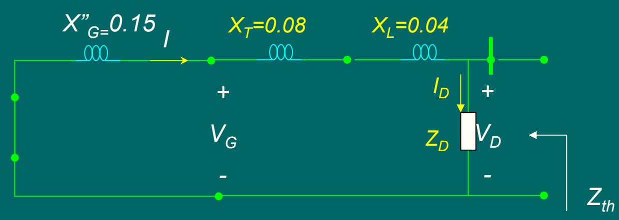
104

ادامه حل مثال 3-2

$$|I_D| = \frac{P_D}{|V_D|\cos\varphi} = \frac{1.25}{1.02 \times 0.9} = 1.361$$

$$I_D = 1.361 < -\cos^{-1} 0.9 = 1.361 < -25.84^\circ$$





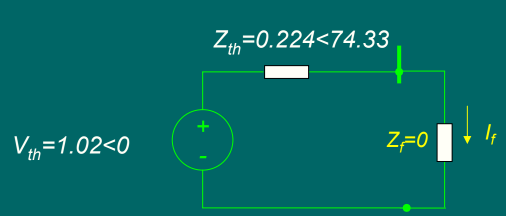
$$Z_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{1.02 < 0}{1.361 < -25.84} = 0.749 < 25.84^\circ$$

$$Z_{th} = j(X''_G + X_T + X_L) \| Z_D = (j0.27) \| (0.749 < 25.84^\circ) = 0.224 < 74.33^\circ$$

$$V_{th} = V_D = 1.02 < 0$$

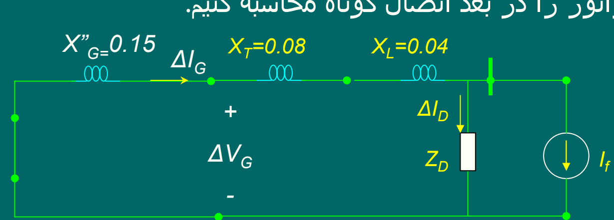
105

ادامه حل مثال 3-2



$$I_f = \frac{V_{th}}{(Z_{th} + Z_f)} = \frac{1.02 < 0}{(0.224 < 74.33 + 0)} = 4.55 < -74.33^\circ$$

می خواهیم جریان ژنراتور را در بعد اتصال کوتاه محاسبه کنیم:



$$\Delta I_G = \frac{Z_D}{Z_D + j(X_G + X_T + X_L)} I_f = \frac{0.749 < 25.84}{0.749 < 25.84 + j0.27} \times (4.55 < -74.33) = 3.786 < -89.99$$

$$I_G = I_G^0 + \Delta I_G = 1.361 < -25.84^\circ + 3.786 < -89.99 = 3.419 < 69.02^\circ$$

106

محاسبات قانونمند اتصال کوتاه متقارن

یک شبکه قدرت با n باس درنظر می گیریم و فرض می کنیم در باس q یک اتصال کوتاه متقارن سه فاز با امپدانس Z_f رخ داده است. می خواهیم ولتاژ باسها و جریانهای خطوط را در بعد از اتصال کوتاه بدست آوریم. مراحل زیر را انجام می دهیم:

1- فرض می کنیم ولتاژ باسها در قبل از اتصال کوتاه مشخص باشند. ولتاژ باسها در قبل از اتصال کوتاه یا بوسیله پخش بار بدست می آیند و یا با تقریب ولتاژ تمام باسها در قبل از اتصال کوتاه را $1 < 0$ فرض می کنیم. درصورت اخیر جریان کلیه خطوط هم در قبل از اتصال کوتاه صفر خواهند بود.

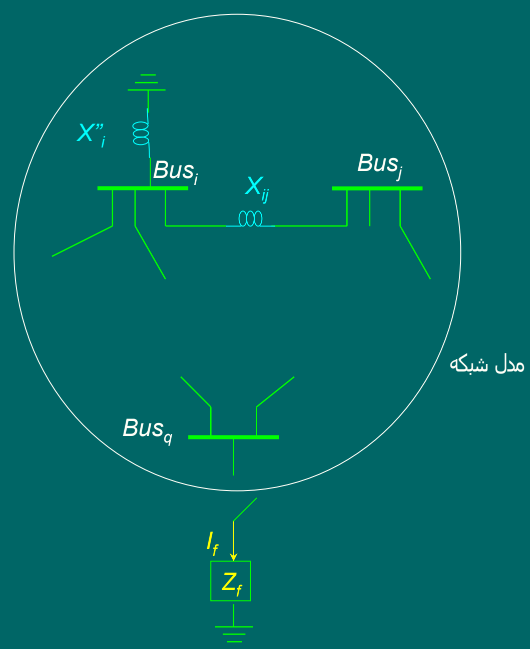
$$V^0 = \begin{bmatrix} V_1^0 \\ \vdots \\ V_i^0 \\ \vdots \\ V_n^0 \end{bmatrix}$$

107

2- مدار معادل تمام ژنراتورها، خطوط و بارها را با امپدانسهای معادل جایگذاری می کنیم. معمولا ساده سازیهای زیر را اعمال می کنیم:

- معمولا از ادمیتانس خازنی خطوط و همچنین مقاومتهای اهمی ژنراتورها، خطوط و بارها صرفنظر می کنیم.
- چون جریانهای اتصال کوتاه نسبت به جریانهای بارها بسیار بزرگتر هستند، عموما از جریانهای بارها صرفنظر می کنیم یعنی امپدانس بارها را اتصال باز درنظر می گیریم.
- ولتاژ داخلی ژنراتورها را صفر می کنیم و بسته به اینکه جریانهای زیرگذرا، گذرا و یا پایدار اتصال کوتاه را بخواهیم از X''_g ، X'_g و یا X_g برای مدل امپدانس ژنراتور استفاده می کنیم.
- نمونه مدل در شکل زیر :

108

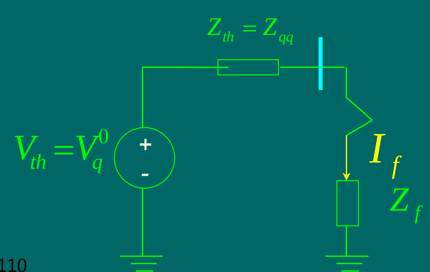


109

3- ماتریس امپدانس Z_{bus} را برای سیستم مدل شده به طریق فوق بدست می آوریم.

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix}$$

4- مدار معادل تونن را از دید باس q تشکیل می دهیم. ولتاژ تونن برابر V^0_q و امپدانس تونن برابر Z_{qq} خواهد بود. سپس جریان اتصال کوتاه I_f را از روی مدل تونن بطریق زیر محاسبه می کنیم :



$$I_f = \frac{V_q^0}{Z_f + Z_{qq}}$$

110

5- با توجه به قضیه تونن تغییرات ولتاژ ناشی از اتصال کوتاه را بصورت زیر محاسبه می کنیم:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_i \\ \vdots \\ \Delta V_q \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1q} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{i1} & \cdots & Z_{iq} & \cdots & Z_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{q1} & \cdots & Z_{qq} & & Z_{qn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{nq} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ -I_f \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \longrightarrow \Delta V_i = Z_{iq}(-I_f) = -\frac{Z_{iq}.V_q^0}{Z_f + Z_{qq}}$$

6- ولتاژ تمام باسها در بعد از اتصال کوتاه را از جمع ولتاژهای قبل از اتصال کوتاه و تغییرات ولتاژ ناشی از اتصال کوتاه بدست می آوریم :

$$V_i^f = V_i^0 + \Delta V_i = V_i^0 - \frac{Z_{iq}.V_q^0}{Z_f + Z_{qq}}$$

111

7- جریانهای خطوط در بعد از اتصال کوتاه با استفاده از ولتاژ باسهای دو انتهای آن محاسبه می شوند. مثلا برای خط L_{ik} داریم :

$$I_{ik}^f = \frac{V_i^f - V_k^f}{jX_{ik}}$$

8- ظرفیت اتصال کوتاه (قدرت قطع) باس q را با توجه به تعریف آن بدست می آوریم.

طبق تعریف ظرفیت اتصال کوتاه (SCC) یک باس برابر حاصلضرب ولتاژ باس در قبل از اتصال کوتاه در جریان اتصال کوتاه ان باس می باشد.

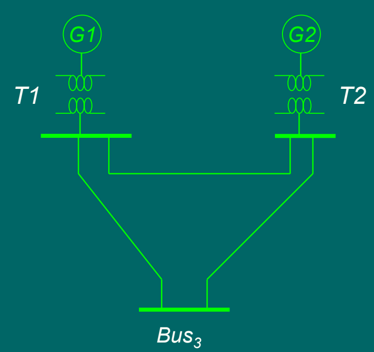
چون معمولا حداکثر ظرفیت اتصال کوتاه مد نظر است بایست حداکثر جریان اتصال کوتاه را در نظر گرفت یعنی باید $z_f = 0$ و برای ژنراتورها از مدل X_g'' استفاده نمود. ضمنا دامنه ولتاژ باس در قبل از اتصال کوتاه یک پریونیت فرض می شود.

$$SCC_q = |V_q^0|.|I_q^f| = |V_q^0| \frac{|V_q^0|}{|Z_{th}|} \approx 1\frac{1}{X_{th}} = \frac{1}{X_{th}}$$

112

مثال 3-2: روش قضیه تونن اتصال کوتاه

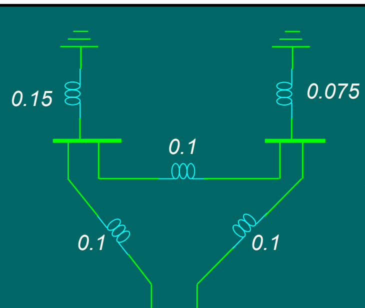
در سیستم قدرت شکل زیر، درباس 3 یک اتصال کوتاه سه فاز متقارن بی واسطه رخ می دهد. ولتاژ کلیه باسها و جریان خطوط در بعد از اتصال کوتاه و ظرفیت اتصال کوتاه باس 3 رابیابید. ولتاژ باسها درقبل از اتصال کوتاه را $1<0$ فرض نموده و از جریان بارها صرفنظر کنید.

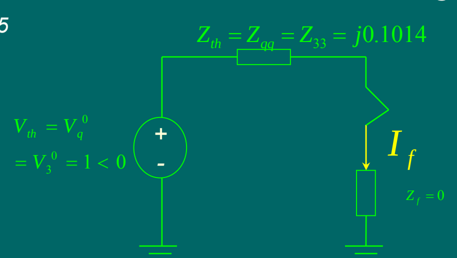


$$X_{g1} + X_{T1} = 0.15\ pu$$
$$X_{g2} + X_{T2} = 0.075\ pu$$
$$X_{L12} = X_{L13} = X_{L23} = 0.1\,pu$$

113

حل مثال 3-2 :





$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} \frac{1}{j0.15}+\frac{1}{j0.1}+\frac{1}{j0.1} & \frac{-1}{j0.1} & \frac{-1}{j0.1} \\ \frac{-1}{j0.1} & \frac{1}{j0.075}+\frac{1}{j0.1}+\frac{1}{j0.1} & \frac{-1}{j0.1} \\ \frac{-1}{j0.1} & \frac{-1}{j0.1} & \frac{1}{j0.1}+\frac{1}{j0.1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j2667 & j10 & j10 \\ j10 & -j3333 & j10 \\ j10 & j10 & -j20 \end{bmatrix}$$

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} = \begin{bmatrix} j0.073 & j0.0386 & j0.0558 \\ j0.0386 & j0.0558 & j0.0472 \\ j0.0558 & j0.0472 & j0.1014 \end{bmatrix}$$

114

$$I_f = \frac{V_q^0}{Z_f + Z_{qq}} = \frac{V_3^0}{Z_f + Z_{33}} = \frac{1<0}{0 + j0.1014} = -j9.862 = 9.862 < -90^o$$

ادامه حل مثال 3-2 :

$$\Delta V_i = Z_{iq}(-I_f)$$
$$\Delta V_1 = Z_{13}(-I_f) = (j0.0558)(j9.862) = -0.5368$$
$$\Delta V_2 = Z_{23}(-I_f) = (j0.0472)(j9.862) = -0.4541$$
$$\Delta V_3 = Z_{33}(-I_f) = (j0.1014)(j9.862) = -1$$

$$V_i^f = V_i^0 + \Delta V_i$$
$$V_1^f = V_1^0 + \Delta V_1 = 1 < 0 + (-0.5368) = 0.4632$$
$$V_2^f = V_2^0 + \Delta V_2 = 1 < 0 + (-0.4541) = 0.5459$$
$$V_3^f = V_3^0 + \Delta V_3 = 1 < 0 + (-1) = 0$$

$$I_{ij}^f = \frac{V_i^f - V_j^f}{jX_{ij}}$$

$$I_{12}^f = \frac{V_1^f - V_2^f}{jX_{12}} = \frac{0.4632 - 0.5459}{j0.1} = j0.8270$$

$$SCC_q = |V_q^0|.|I_q^f| = |V_q^0|\frac{|V_q^0|}{|Z_{th}|} \approx 1\frac{1}{X_{th}} = \frac{1}{X_{th}}$$

$$SCC_3 = |V_3^0|.|I_3^f| = \frac{1}{X_{33}} = \frac{1}{0.1014} = 9.8616$$

115

$$SCC_3 = |V_3^0|.|I_3^f| = 1 \times 9.862 = 9.862$$

فصل چهارم : اتصال کوتاه نامتقارن

مشخصات سیستم دارای تقارن فاز:

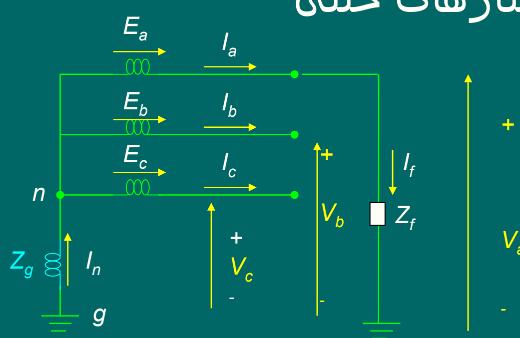
- امپدانس بارها در هر سه فاز برابرند.
-امپدانس خطا در هر سه فاز برابر است.
- ولتاژها، جریانها و نیرومحرکه دارای تقارن سه فاز بودند.
- مجموع جبری جریانهای سه فاز صفر بودند درنتیجه بین نقاط خنثی ژنراتور و یا ترانسفورماتور جریان نداریم و افت ولتاژ نداریم. بنابراین تمام نقاط خنثی در سیستم متعادل با زمین هم پتانسیل هستند.

نتایج :

- سیستم یک فاز تحلیل می شود.
- جریانها و ولتاژهای فازهای دیگر از روی فاز اول دست می آیند.
- توان سه فاز از سه برابر کردن توان یکفاز بدست می آید.
- سیستم نامتعادل: یا بار نامتعادل داریم و یا اتصال کوتاه نامتقارن رخ داده است.

116

معرفی جریانها و ولتاژهای خنثی



در سیستم نامتقارن نقطه مبنا، زمین (نقطه g) فرض می شود. بنابراین منظور از ولتاژ هر فاز، ولتاژ آن فاز نسبت به زمین است.

$$I_n = I_a + I_b + I_c$$
$$V_n = V_{ng} = -Z_g I_n = -Z_g (I_a + I_b + I_c)$$
$$I_a = I_f \quad I_b = 0 \quad I_c = 0$$
$$V_a = V_{ag} = Z_f I_f$$
$$V_{an} = V_{ag} - V_{ng} = V_a - V_n = V_a + Z_g (I_a + I_b + I_c)$$

117

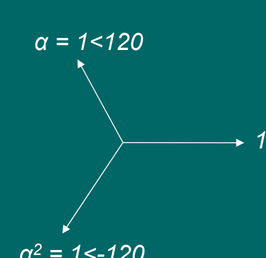
تعریف α

تعریف می کنیم : $\alpha = e^{j120} = 1 < 120^o$

اگر α در یک فازور ضرب شود فقط فاز آنرا به اندازه 120درجه اضافه می کند (در جهت مثلثاتی می چرخاند).

می توان نشان داد:

$$\alpha^2 = \alpha^* = 1 < -120^\circ$$
$$\alpha^3 = 1$$
$$(\alpha^2)^* = \alpha$$
$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0$$

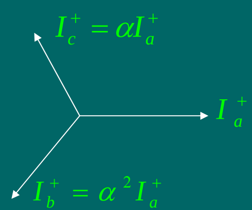


118

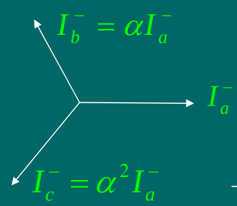
مولفه های متقارن

می توان نشان داد که هر مجموعه فازور سه فاز نامتقارن را می توان به سه مجموعه مولفه متقارن زیر تجزیه نمود:

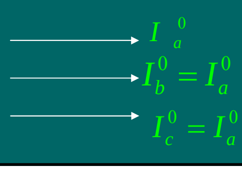
الف) مجموعه توالی مثبت (abc): فاز a از فاز b 120 جلوتر است و فاز b از فاز c 120 درجه جلوتر است.



ب) مجموعه توالی منفی (acb): فاز a از فاز b 120 عقب تر است و فاز b از فاز c 120 درجه عقب تر است.



ج) مجموعه توالی صفر : هر سه فاز هم فاز و مساویند.



119

تجزیه به مولفه های متقارن

$$\begin{cases} I_a = I_a^+ + I_a^- + I_a^0 \\ I_b = I_b^+ + I_b^- + I_b^0 = \alpha^2 I_a^+ + \alpha I_a^- + I_a^0 \\ I_c = I_c^+ + I_c^- + I_c^0 = \alpha I_a^+ + \alpha^2 I_a^- + I_a^0 \end{cases}$$

شکل ماتریسی :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^+ \\ I_a^- \\ I_a^0 \end{bmatrix} \longrightarrow \vec{I}_p = T.\vec{I}_s \longrightarrow I_s = T^{-1} I_p$$

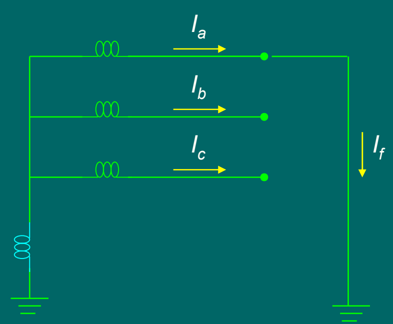
I_p جریانهای فازی و I_s مولفه های متقارن جریانها هستند.

ماتریس تبدیل فورتسکیو و معکوس آن :

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \qquad T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

120

مثال 4-1



در ژنراتور بی بار شکل مقابل، یکفاز به زمین اتصال کوتاه شده است. مولفه های متقارن جریان را بر حسب جریان اتصال کوتاه I_f بیابید.

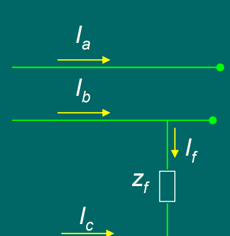
حل:

$$I_s = T^{-1} I_p \longrightarrow \begin{bmatrix} I_a^+ \\ I_a^- \\ I_a^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_a = I_f \\ I_b = 0 \\ I_c = 0 \end{bmatrix} \longrightarrow I_a^+ = I_a^- = I_a^0 = \frac{1}{3} I_f$$

نتیجه : اگر یکی از خطوط سه فاز به زمین اتصال کند، دامنه مجموعه مولفه های مثبت، منفی و صفر مساوی خواهند بود.

121

مثال 4-2



در شبکه شکل مقابل، دو فاز به هم توسط امپدانس z_f اتصال کوتاه شده اند. مولفه های متقارن جریان را بر حسب جریان اتصال کوتاه I_f بیابید.

حل:

$$I_s = T^{-1} I_p \longrightarrow \begin{bmatrix} I_a^+ \\ I_a^- \\ I_a^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_a = 0 \\ I_b = I_f \\ I_c = -I_f \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{cases} I_a^+ = \dfrac{j}{\sqrt{3}} I_f \\ I_a^- = \dfrac{-j}{\sqrt{3}} I_f \\ I_a^0 = 0 \end{cases}$$

نتیجه : در اتصال کوتاه خط به خط، دامنه مولفه های مثبت و منفی جریان مساویند و جریان مولفه صفر ندارد.

122

مثال 3-4

ثابت کنید ولتاژهای خط به خط هیچگاه مولفه توالی صفر ندارند.

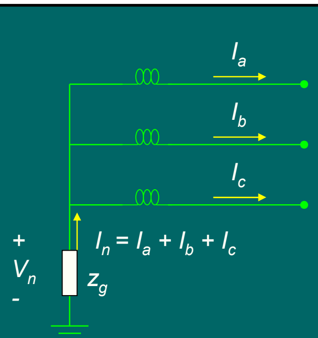
حل:

$$V_s = T^{-1}V_p \longrightarrow \begin{bmatrix} V_{ab}^{+} \\ V_{ab}^{-} \\ V_{ab}^{0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix}$$

$$\longrightarrow V_{ab}^{0} = \frac{1}{3}(V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}) = \frac{1}{3}(V_a - V_b + V_b - V_c + V_c - V_a) = 0$$

123

مثال 4-4



نشان دهید سیم نول فقط وقتی جریان دارد که جریانها مولفه صفر داشته باشند.

حل:

$$I_s = T^{-1}I_p \longrightarrow \begin{bmatrix} I_a^{+} \\ I_a^{-} \\ I_a^{0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

$$\longrightarrow I_a^0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3}I_n \longrightarrow If \;\; I_a^0 = 0 \Rightarrow \begin{cases} I_n = 0 \\ V_n = -Z_g I_n = 0 \end{cases}$$

نتیجه : تنها جریان توالی صفر، جریان و ولتاژ نول را پدید می آورد.

124

مثال 5-4

نشان دهید توان کل در یک سیستم نامتعادل برابر با مجموع مولفه های متقارن توان می باشد.

حل:

$$S = P + jQ = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* = [V_a \quad V_b \quad V_c]\begin{bmatrix} I_a^* \\ I_b^* \\ I_c^* \end{bmatrix} =$$

$$V_p^{\tau} I_p^* = (TV_s)^{\tau}(TI_s)^* = V_s^{\tau} T^{\tau} T^* I_s^* = V_s^{\tau}(3U) I_s^* = 3V_s^{\tau} I_s^*$$

$$= 3[V_a^+ \quad V_a^- \quad V_a^0]\begin{bmatrix} I_a^+ \\ I_a^- \\ I_a^0 \end{bmatrix}^* = 3V_a^+ I_a^{+*} + 3V_a^- I_a^{-*} + 3V_a^0 I_a^{0*}$$

$$= S^+ + S^- + S^0$$

125

ادامه مثال 5-4

$$T^{\tau} T^* = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix}^{\tau} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix}^* = \begin{bmatrix} 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1+\alpha^3+\alpha^3 & 1+\alpha^4+\alpha^2 & 1+\alpha^2+\alpha \\ 1+\alpha^4+\alpha^2 & 1+\alpha^3+\alpha^3 & 1+\alpha^2+\alpha \\ 1+\alpha^2+\alpha & 1+\alpha^2+\alpha & 1+1+1 \end{bmatrix} = 3\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = 3U$$

126

معادلات کار ژنراتور سنکرون در بار نامتقارن

شکل کلی معادلات کار ژنراتور سنکرون :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

چون هر سه فاز شبیه هم هستند و بعلت تقارن دوره ای فازها عناصر ماتریس امپدانس ژنراتور عبارتند از:

$$Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc} = Z_1$$
$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z_2$$
$$Z_{ac} = Z_{cb} = Z_{ba} = Z_3$$

$$Zp = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 & Z_3 \\ Z_3 & Z_1 & Z_2 \\ Z_2 & Z_3 & Z_1 \end{bmatrix}$$

شکل ماتریسی معادلات کار ژنراتور :

$$V_p = E_p - Z_p I_P$$

127

بیان معادلات کار ژنراتور بر حسب مولفه ها

$$V_P = E_P - Z_p I_p$$
$$TV_s = E_P - Z_p (TI_s)$$
$$V_s = \underbrace{T^{-1} E_P}_{E_s} - (\underbrace{T^{-1} Z_p T}_{Z_s}) I_s$$
$$V_s = E_s - Z_s I_s$$

$$E_s = T^{-1} E_p = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ \alpha^2 E_a \\ \alpha E_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$Z_s = T^{-1} Z_p T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 & Z_3 \\ Z_3 & Z_1 & Z_2 \\ Z_2 & Z_3 & Z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^+ & 0 & 0 \\ 0 & Z^- & 0 \\ 0 & 0 & Z^0 \end{bmatrix}$$

$$Z^+ = Z_1 + \alpha^2 Z_2 + \alpha Z_3 \quad Z^- = Z_1 + \alpha Z_2 + \alpha^2 Z_3 \quad Z^0 = Z_1 + Z_2 + Z_3$$

128

نتیجه معادلات کار ژنراتور بر حسب مولفه ها

$$V_s = E_s - Z_s I_s \quad \Rightarrow \quad \begin{bmatrix} V_{an}^{+} \\ V_{an}^{-} \\ V_{an}^{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z^{+} & 0 & 0 \\ 0 & Z^{-} & 0 \\ 0 & 0 & Z^{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^{+} \\ I_a^{-} \\ I_a^{0} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} V_{an}^{+} = E_a - Z^{+} I_a^{+} \\ V_{an}^{-} = -Z^{-} I_a^{-} \\ V_{an}^{0} = -Z^{0} I_a^{0} \end{cases}$$

نتایج :

1- چون Z_s قطری است بین سه مولفه متقارن هیچ گونه تزویجی وجود ندارد یعنی ولتاژ هر مولفه فقط به جریان همان مولفه بستگی دارد.

2- تنها مولفه توالی مثبت دارای نیرومحرکه القائی E_a است.

3- مولفه توالی Z^+، Z^- و Z^0 با هم مساوی نیستند. بنابراین نمی توان فقط یک مولفه را بدست آورد و سایر مولفه ها را از روی آن محاسبه کرد.

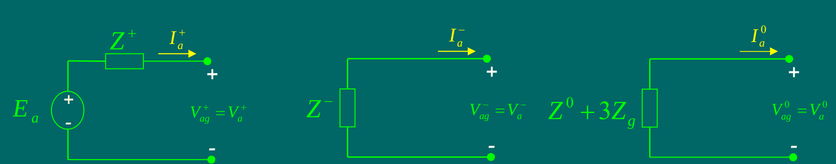
129

شبکه های توالی معادل ژنراتور سنکرون

زمین (g) مبنا می باشد:

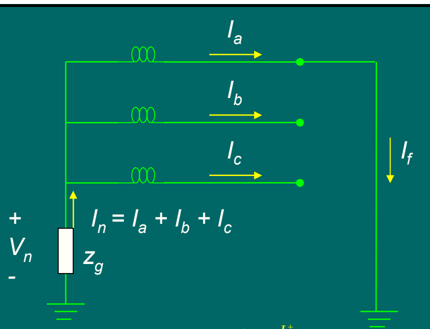
$$V_{ag} = V_{an} + V_{ng} = V_{an} - Z_g (I_a + I_b + I_c)$$

$$\begin{cases} V_{ag}^{+} = V_{an}^{+} - Z_g (I_a^{+} + I_b^{+} + I_c^{+}) = V_{an}^{+} - Z_g \times 0 = V_{an}^{+} = E_a - Z^{+} I_a^{+} \\ V_{ag}^{-} = V_{an}^{-} - Z_g (I_a^{-} + I_b^{-} + I_c^{-}) = V_{an}^{-} - Z_g \times 0 = V_{an}^{-} = -Z^{-} I_a^{-} \\ V_{ag}^{0} = V_{an}^{0} - Z_g (I_a^{0} + I_b^{0} + I_c^{0}) = V_{an}^{0} - 3Z_g I_a^{0} = -(Z^{0} + 3Z_g) I_a^{0} \end{cases}$$

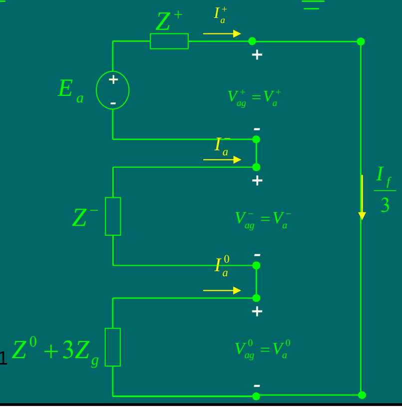


130

مثال 6-4



یک اتصال کوتاه تکفاز به زمین در فاز a یک ژنراتور سنکرون بی بار رخ داده است.
جریان اتصال کوتاه و ولتاژ فاز b را بدست آورید. درصورتیکه $z_g=\infty$ شود، دامنه ولتاژ فاز b را تعیین کنید.



حل: قبلا در اتصال یکفاز به زمین مشاهده شد که $I^+=I^-=I^0=I_f/3$ و از طرفی $V_a=V^++V^-+V^0=0$ بنابراین شبکه های توالی با یکدیگر سری بوده و دو سر آن به هم متصل است.

131

ادامه حل مثال 6-4

$$I_a^+ = I_a^- = I_a^0 = \frac{I_f}{3} = \frac{E_a}{(Z^+ + Z^- + Z^0 + 3Z_g)} \Rightarrow I_f = \frac{3E_a}{(Z^+ + Z^- + Z^0 + 3Z_g)}$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^+ \\ V_a^- \\ V_a^0 \end{bmatrix} \Rightarrow V_b = \alpha^2 V_a^+ + \alpha V_a^- + V_a^0$$

$$V_b = \alpha^2(E_a - Z^+ I_a^+) + \alpha(-Z^- I_a^-) + (-Z^0 - 3Z_g) I_a^0$$

$$V_b = \alpha^2(E_a - Z^+ I_a^+) + \alpha(-Z^- I_a^+) + (-Z^0 - 3Z_g) I_a^+$$

$$V_b = \alpha^2 E_a - (\alpha^2 Z^+ + \alpha Z^- + Z^0 + 3Z_g) I_a^+$$

$$V_b = \alpha^2 E_a - (\alpha^2 Z^+ + \alpha Z^- + Z^0 + 3Z_g) \frac{E_a}{(Z^+ + Z^- + Z^0 + 3Z_g)}$$

$$\lim_{zg \to \infty} |V_b| = |\alpha^2 - 1||E_a| = \sqrt{3}|E_a|$$

نتیجه: در اتصال کوتاه یک فاز ژنراتور به زمین، وقتی نقطه نول به زمین اتصال باز باشد، دامنه ولتاژ فازهای سالم برابر ولتاژ خط می شود.

132

امپدانسهای توالی خطوط

می توان نشان داد که شکل کلی معادلات افت ولتاژ خطوط در حالت نامتقارن بصورت زیر است :

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{ag} \\ \Delta V_{bg} \\ \Delta V_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 & Z_2 \\ Z_2 & Z_1 & Z_2 \\ Z_2 & Z_2 & Z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

شکل ماتریسی و تبدیل به مولفه های متقارن :

$$\Delta V_P = Z_p I_p \quad \Rightarrow \quad T\Delta V_s = Z_p (TI_s) \quad \Rightarrow \quad \Delta V_s = (\underbrace{T^{-1} Z_p T}_{Z_s}) I_s \quad \Rightarrow \quad \Delta V_s = Z_s I_s$$

$$Z_s = T^{-1} Z_p T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 & Z_2 \\ Z_2 & Z_1 & Z_2 \\ Z_2 & Z_2 & Z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^+ & 0 & 0 \\ 0 & Z^- & 0 \\ 0 & 0 & Z^0 \end{bmatrix}$$

$$Z^+ = Z^- = Z_1 - Z_2 = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln(\frac{D}{R'_a}) \qquad Z^0 = Z_1 + 2Z_2 = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln(\frac{D_n^6}{R'_a R'^3_n D^2})$$

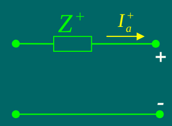
نتایج:

1- ماتریس Z_s قطری است.

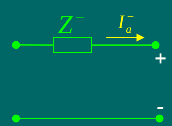
2- $Z^+=Z^-$ زیرا خط انتقال عنصر پسیو (غیرفعال) است.

133

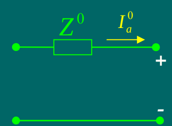
مدل توالی خط انتقال



مدل توالی مثبت خط انتقال:



مدل توالی منفی خط انتقال:



مدل توالی صفر خط انتقال:

134

امپدانسهای توالی مثبت و منفی ترانسفورماتورها

چون ترانس عنصر پسیو و ایستا است درصورت تغییر توالی ولتاژها، امپدانس نشتی آن تغییر نخواهد کرد یعنی :

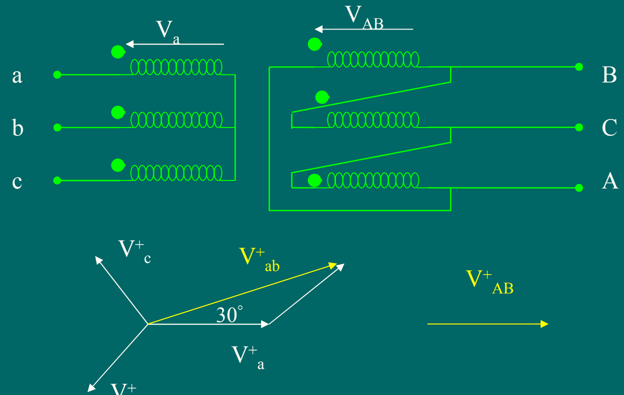
$$Z^{+} = Z^{-} = Z_{Leakage}$$

تذکر: اگر یک ترانسفورماتور سه فاز مولفه های توالی مثبت ولتاژ و جریان را به اندازه α درجه جابجا کند، مولفه های توالی منفی ولتاژ و جریان را به اندازه $-\alpha$ درجه جابجا خواهد کرد.

135

تحقیق جهت جابجائی فاز درترانسفورماتورها

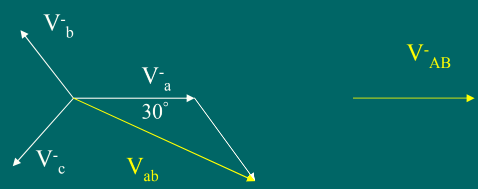
به یک ترانس $Y\Delta$ یکبار ولتاژ توالی مثبت و بار دیگر ولتاژ توالی منفی اعمال کنید و مقدار و جهت جابجائی فاز بین اولیه و ثانویه را بدست آورید و با هم مقایسه کنید.



- مشاهده می شود که با اعمال ولتاژ توالی مثبت به ترانس، به اندازه $+30$ درجه جابجائی فاز داریم.

136

ادامه تحقیق جهت جابجائی فاز درترانسفورماتورها

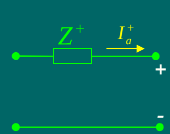


- مشاهده می شود که با اعمال ولتاژ توالی منفی به ترانس، به اندازه *30*- درجه جابجائی فاز داریم.

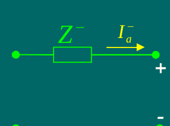
137

مدل توالی مثبت و منفی ترانسفورماتور

مدل توالی مثبت ترانسفورماتور:



مدل توالی منفی ترانسفورماتور :



$$Z^+ = Z^- = Z_{Leakage}$$

138

نکاتی در مورد توالی صفر ترانسها

1- امپدانس مغناتیس کنندگی یک ترانس بسیار بزرگ است. بنابراین در عمل آن را اتصال باز می گیرند یعنی از جریان مغناتیس کنندگی صرفنظر می شود:

2- چون از جریان مغناتیس کنندگی صرفنظر می شود، هر گاه از یک طرف جریان نگذرد از دیگر نیز جریان نمی گذرد.

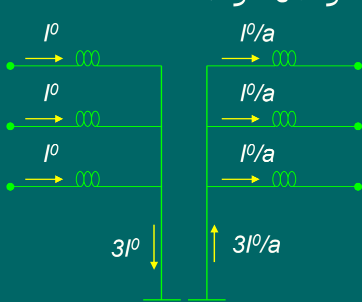
3- در اتصال Y ، وقتی جریانهای هم فاز I^0 می توانند جاری شوند که نقطه خنثی زمین شده باشد.

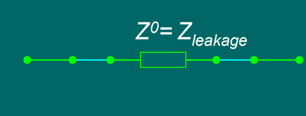
4- در اتصال Δ، جریانهای توالی صفر I^0 بصورت گردشی هستند و در خطوط خروجی، این جریانها وجود ندارند زیرا مسیر برگشت ندارند.

139

مدل توالی صفر ترانس ستاره زمین شده-ستاره زمین شده

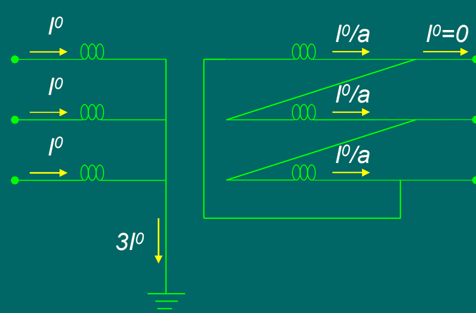
جریانهای I^0 تنها بوسیله امپدانس نشتی آنها محدود می شوند.



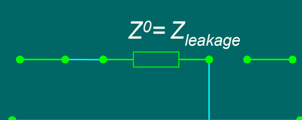


140

مدل توالی صفر ترانس ستاره زمین شده - مثلث

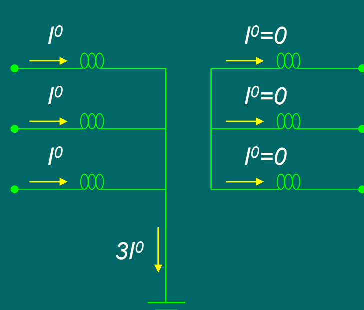


امکان عبور جریان در هر دو طرف وجود دارد ولی در طرف مثلث جریانها گردشی اند و در خط جریان توالی صفر وجود ندارد.

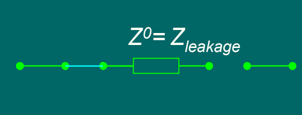


141

مدل توالی صفر ترانس ستاره زمین شده - ستاره



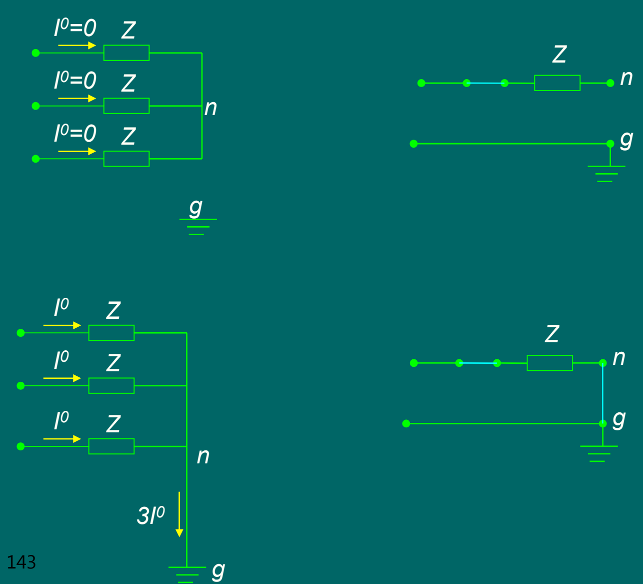
چون در طرف ستاره جریان توالی صفر نمی توانند جریان یابند، در طرف ستاره زمین شده هم جریان نداریم.



142

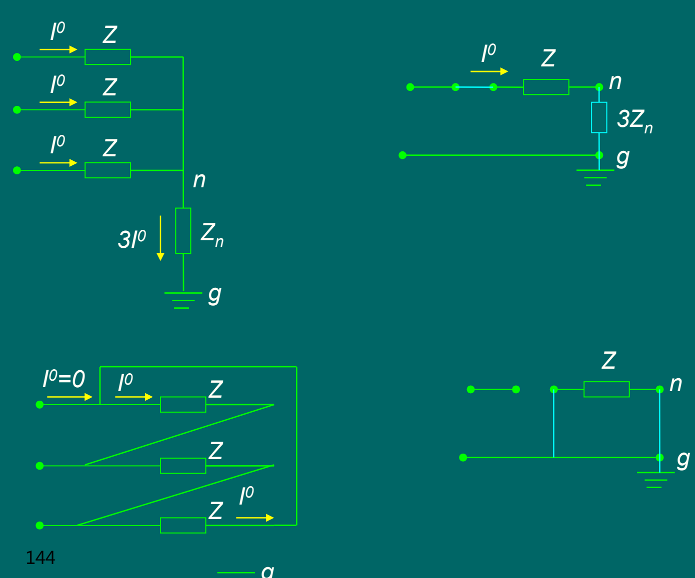
شبکه های توالی صفر در مدارها

مبنا زمین است.



143

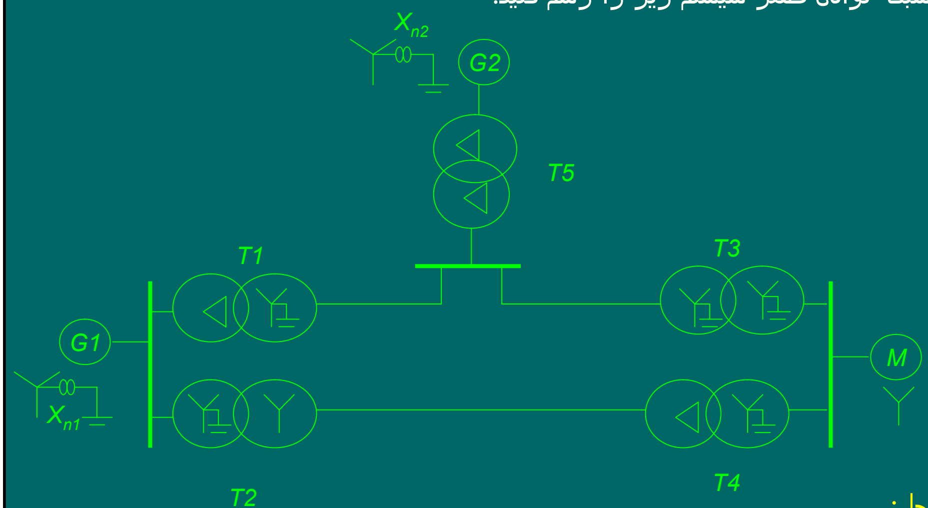
ادامه شبکه های توالی صفر در مدارها



144

مثال 7-4

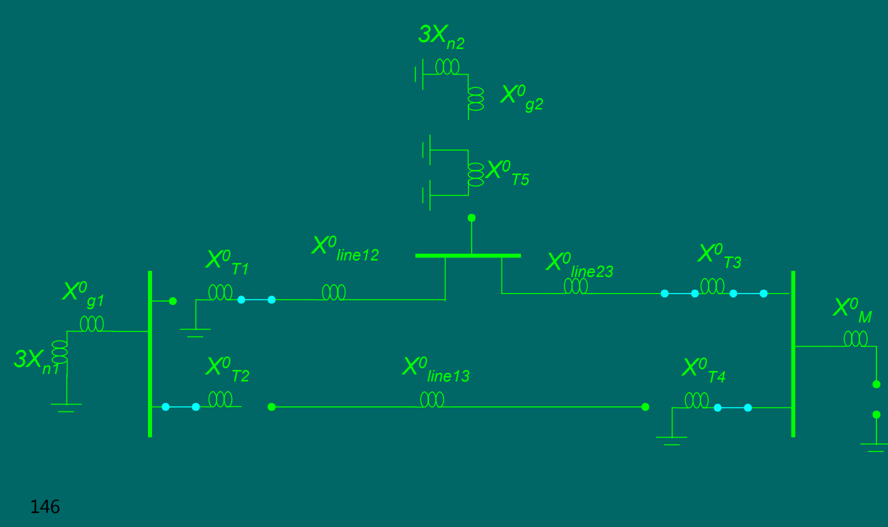
شبکه توالی صفر سیستم زیر را رسم کنید.



حل:.

145

حل مثال 7-4



146

روشهای حل اتصال کوتاه نامتقارن

1- روش حل با استفاده از مدار معادل تونن شبکه های توالی و اتصال آنها برای فالتهای متداول

2- روش حل با استفاده از فرمولهای کلی برای فالتهای غیرمتداول و سیستمهای بزرگ

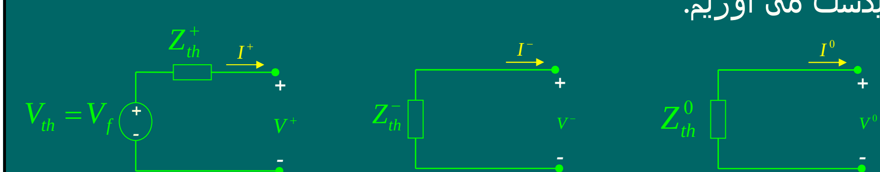
مراحل روش اتصال شبکه های توالی

1- جریانهای عناصر سیستم و ولتاژ محل اتصال کوتاه (V_f) را در قبل از اتصال کوتاه محاسبه می کنیم.

2- V_f را بعنوان ولتاژ تونن شبکه از دیدگاه نقطه اتصال کوتاه شده درنظر می گیریم که فقط در مدار معادل مثبت ظاهر می شود.

3- شبکه های توالی مثبت، منفی و صفر سیستم را رسم می کنیم.

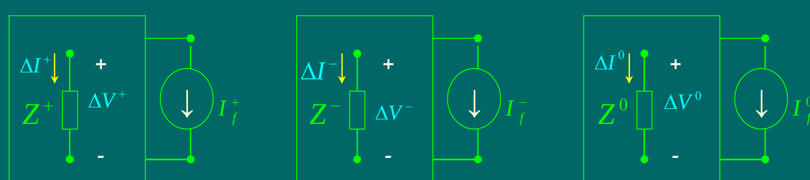
4- امپدانس معادل تونن هر یک از شبکه های توالی را ازدیدگاه نقطه اتصال کوتاه شده تعیین می کنیم و مدارهای معادل تونن شبکه های توالی را بدست می آوریم.



ادامه مراحل روش اتصال شبکه های توالی

5- با توجه به نوع اتصال کوتاه، شبکه های تونن توالی را بصورت مناسب به هم وصل می کنیم و از اتصال آنها مولفه های جریان اتصال کوتاه یعنی I_f^+، I_f^- و I_f^0 را بدست می آوریم.

6- منابع جریان با اندازه های I_f^+، I_f^- و I_f^0 را به شبکه های توالی سیستم با منابع داخلی صفرشده اعمال نموده و مولفه های تغییرات ولتاژها و جریانهای عناصر مورد نیاز سیستم را محاسبه می کنیم.



ادامه مراحل روش اتصال شبکه های توالی

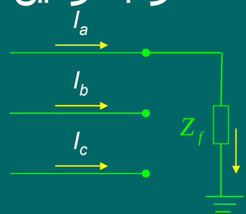
7- تغییرات ولتاژ و جریانهای فازها را در عناصر مورد نیاز از تبدیل فورتسکیو بدست می آوریم:

$$\Delta V_p = T.\Delta V_s = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V^+ \\ \Delta V^- \\ \Delta V^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} \qquad \Delta I_p = T.\Delta I_s = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I^+ \\ \Delta I^- \\ \Delta I^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta I_a \\ \Delta I_b \\ \Delta I_c \end{bmatrix}$$

8- با جمع ولتاژ و جریانهای فازها در قبل از اتصال کوتاه و تغییرات ولتاژ و جریانهای ناشی از اتصال کوتاه، ولتاژ و جریانهای بعد از اتصال کوتاه را بدست می آوریم:

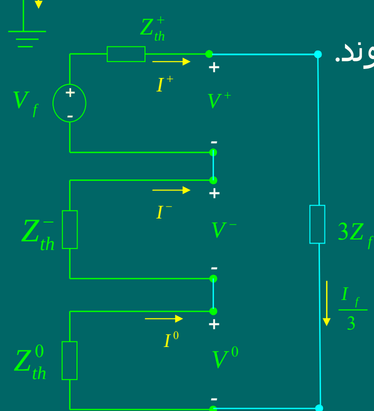
$$V_p^f = V_p^0 + \Delta V_p = \begin{bmatrix} V_a^o \\ V_b^o \\ V_c^o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a^f \\ V_b^f \\ V_c^f \end{bmatrix} \qquad I_p^f = I_p^0 + \Delta I_p = \begin{bmatrix} I_a^o \\ I_b^o \\ I_c^o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta I_a \\ \Delta I_b \\ \Delta I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a^f \\ I_b^f \\ I_c^f \end{bmatrix}$$

نحوه اتصال شبکه های توالی در اتصال تکفاز به زمین



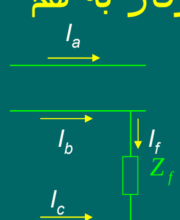
$$\begin{cases} I_a = I_f \\ I_b = I_c = 0 \\ V_a = Z_f I_f \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} I^+ = I^- = I^0 = \dfrac{I_f}{3} \\ V^+ + V^- + V^0 = Z_f I_f \end{cases}$$

هر سه شبکه سری می شوند.



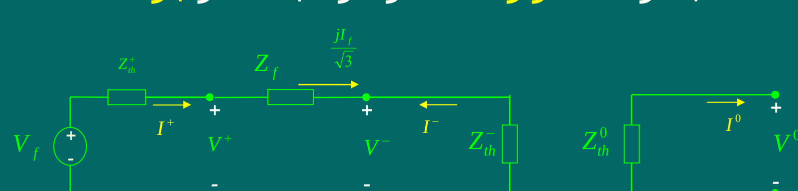
151

نحوه اتصال شبکه های توالی در اتصال دوفاز به هم



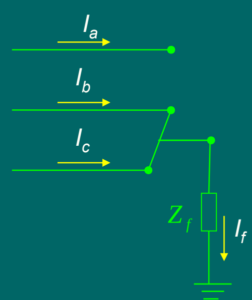
$$\begin{cases} I_a = 0 \\ I_b = I_f \\ I_c = -I_f \\ V_b - V_c = Z_f I_f \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} I^0 = 0 \\ I^+ = -I^- = \dfrac{jI_f}{\sqrt{3}} \\ V^+ - V^- = Z_f I^+ \end{cases}$$

شبکه های مثبت و منفی موازی می شوند و شبکه صفر باز است.



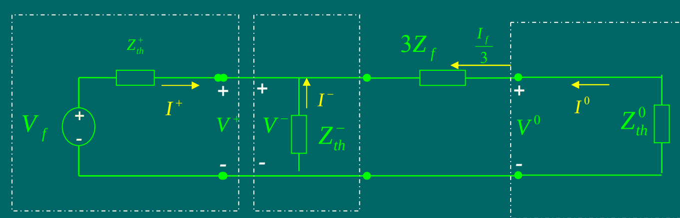
152

نحوه اتصال شبکه های توالی در اتصال دوفاز به هم و به زمین:



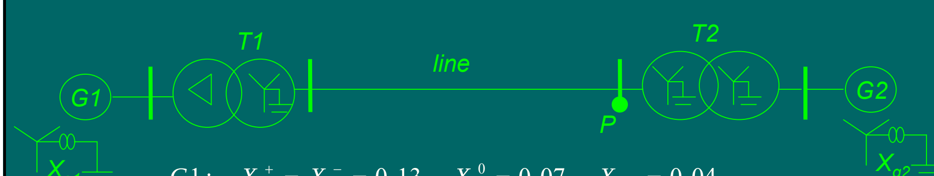
$$\begin{cases} I_a = 0 \\ I_b + I_c = I_f \\ V_b = V_c = Z_f I_f \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} I^0 = \dfrac{I_f}{3} \\ I^+ + I^- = -I^0 \\ V^+ = V^- \\ V^0 - V^+ = Z_f I_f \end{cases}$$

هر سه شبکه توالی موازی می شوند.



مثال 4-8

-در سیستم قدرت شکل فوق، در نقطه *P* یک اتصال کوتاه دوفاز به هم و به زمین با امپدانس $Z_f=j0.02$ رخ می دهد. شبکه در قبل از اتصال کوتاه بی بار و ولتاژ تمامی باسها $1<0$ فرض می شود. جریان خط انتقال را در بعد از اتصال کوتاه برای هر فاز محاسبه کنید.



$G1: \quad X^+ = X^- = 0.13 \quad X^0 = 0.07 \quad X_{g1} = 0.04$

$G2: \quad X^+ = X^- = 0.2 \quad X^0 = 0.06 \quad X_{g2} = 0.03$

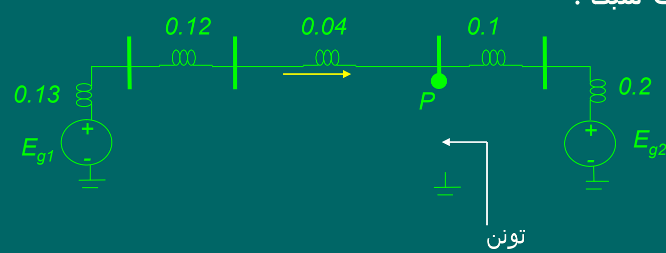
$T1: \quad X^+ = X^- = X^0 = 0.12$

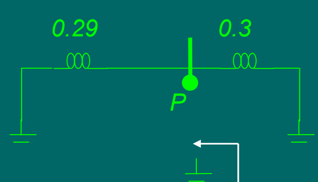
$T2: \quad X^+ = X^- = X^0 = 0.1$

$Line: \quad X^+ = X^- = 0.04 \quad X^0 = 0.12$

حل مثال 8-4

مدل توالی مثبت شبکه:



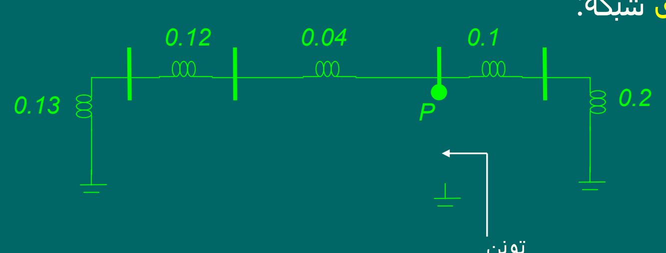


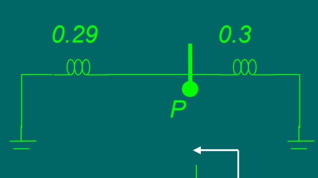
$$X_{th}^{+} = 0.29 \parallel 0.3 = 0.147$$

155

ادامه حل مثال 8-4

مدل توالی منفی شبکه:



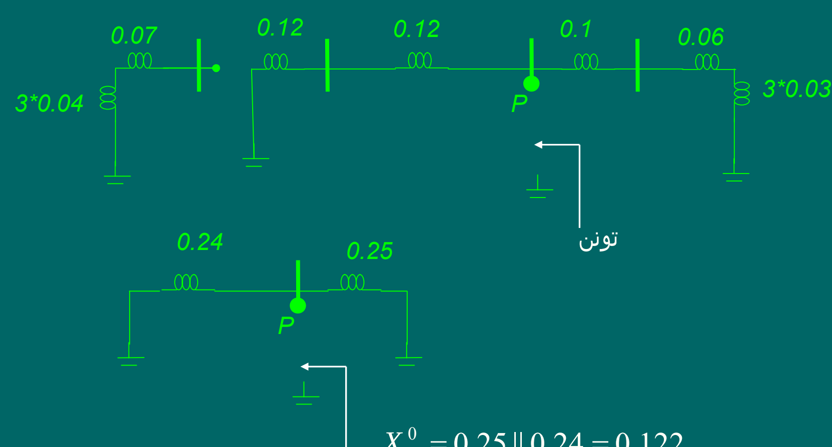


$$X_{th}^{-} = 0.29 \parallel 0.3 = 0.147$$

156

ادامه حل مثال 8-4

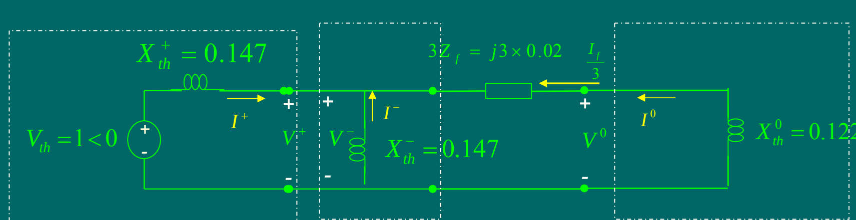
مدل توالی صفر شبکه:



$$X_{th}^{0} = 0.25 \| 0.24 = 0.122$$

157

ادامه حل مثال 8-4



$$I^{+} = \frac{V_{th}}{j[X_{th}^{+} + (X_{th}^{-} \| (3Z_f + X_{th}^{0}))} = \frac{1<0}{j[0.147 + (0.147 \| (3\times0.02 + 0.122))} = -j4.38$$

$$I^{-} = -\frac{(3Z_f + X_{th}^{0})}{j[X_{th}^{-} + (3Z_f + X_{th}^{0})]} I^{+} = -\frac{j(3\times0.02+0.122)}{j[0.147 + (3\times0.02+0.122)]}(-j4.38) = j2.423$$

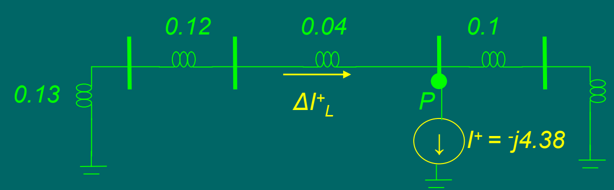
$$I^{0} = -(I^{+} + I^{-}) = -(-j4.38 + j2.423) = j1.957$$

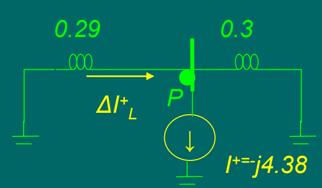
$$I_f = 3I^{0} = 3\times j1.957 = j5.871$$

158

ادامه حل مثال 8-4

محاسبه مولفه مثبت جریان خط :



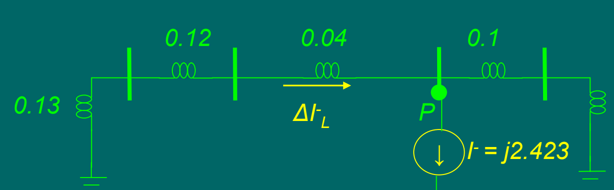


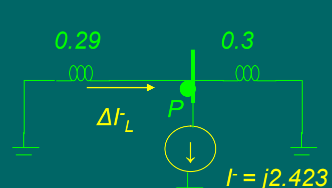
$$\Delta I_L^+ = \frac{0.3}{0.3+0.29} I^+ = \frac{0.3}{0.3+0.29}(-j4.38) = -j2.23$$

159

ادامه حل مثال 8-4

محاسبه مولفه منفی جریان خط :

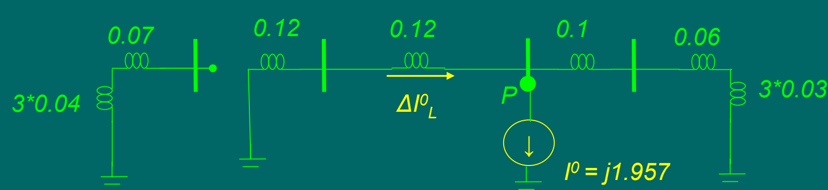


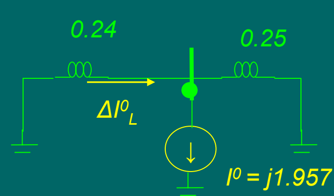


$$\Delta I_L^- = \frac{0.3}{0.3+0.29} I^- = \frac{0.3}{0.3+0.29}(j2.423) = j1.23$$

160

ادامه حل مثال 4-8 : محاسبه مولفه صفر جریان خط





$$\Delta I_L^0 = \frac{0.25}{0.25+0.24}(j1.957) = j0.999$$

161

ادامه حل مثال 4-8 : محاسبه جریان فازی خط

تغییرات جریان فازهای خط ناشی از اتصال کوتاه:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{La} \\ \Delta I_{Lb} \\ \Delta I_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_L^+ = -j2.23 \\ \Delta I_L^- = j1.23 \\ \Delta I_L^0 = j0.999 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0.001 \\ -2.996 + j1.499 \\ 2.996 + j1.499 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.001 < -90 \\ 3.35 < 153.4 \\ 3.35 < 26.58^\circ \end{bmatrix}$$

جریان فازهای خط در بعد از اتصال کوتاه:

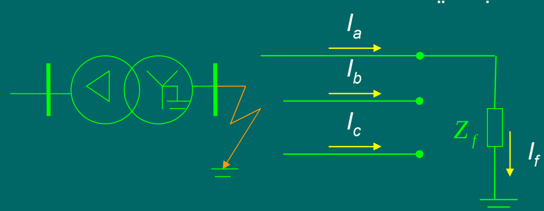
$$\begin{bmatrix} I_a^f \\ I_b^f \\ I_c^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a^o \\ I_b^o \\ I_c^o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta I_a \\ \Delta I_b \\ \Delta I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.001 < -90 \\ 3.35 < 153.4 \\ 3.35 < 26.58^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.001 < -90 \\ 3.35 < 153.4 \\ 3.35 < 26.58^\circ \end{bmatrix}$$

162

مثال 9-4

در ثانویه یک ترانسفورماتور مثلث-ستاره زمین شده یک اتصال کوتاه تکفاز به زمین رخ داده است و جریان اتصال کوتاه $-j0.9Pu$ برقرار است. جریانهای خط در هر فاز اولیه ترانسفورماتور را حساب کنید؟

حل:



محاسبه مولفه های جریان اتصال کوتاه در ثانویه:

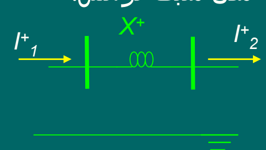
$$I_s = T^{-1} I_p \longrightarrow \begin{bmatrix} I_2^+ \\ I_2^- \\ I_2^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_{a2} = I_f = -j0.9 \\ I_{b2} = 0 \\ I_{c2} = 0 \end{bmatrix}$$

$$I_2^+ = I_2^- = I_2^0 = \frac{1}{3}(-j0.9) = -j0.3$$

163

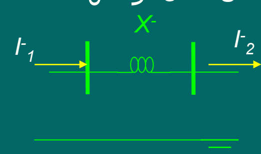
ادامه حل:

مدل مثبت ترانس:



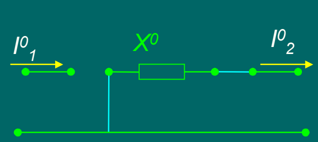
$$I_1^+ = I_2^+ = -j0.3$$

مدل منفی ترانس:



$$I_1^- = I_2^- = -j0.3$$

مدل صفر ترانس:

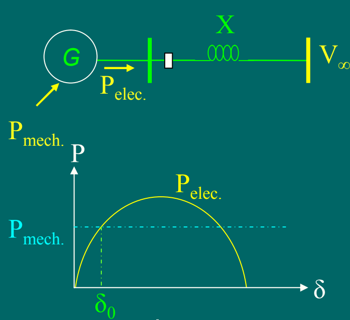


$$I_1^0 = 0$$

$$\begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_1^+ = -j0.3 \\ I_1^- = -j0.3 \\ I_1^0 = 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} I_{a1} = -j0.6 \\ I_{b1} = 0.3 < (-120-90) + 0.3 < (120-90) = j0.3 \\ I_{c1} = 0.3 < (120-90) + 0.3 < (-120-90) = j0.3 \end{cases}$$

164

فصل پنجم : پایداری گذرای سیستم قدرت



- اتصال یک ژنراتور به یک باس بی نهایت ازطریق یک خط به راکتانس X (سیستم دومنطقه ای):

- در حالت عادی : توان الکتریکی و توان مکانیکی در یک زاویه قدرت مشخص δ_0 برابراند:

- چون اکثر خطا (اتصال کوتاه)ها گذرا هستند و خود به خود از بین می روند اگرخطائی در خط رخ دهد، ریکلوزر (رله های) خط، خطا را تشخیص داده و فرمان به قطع خط می دهند و مجددا پس از چند سیکل فرمان به وصل خط می دهند.
- درحین خطا چون توان الکتریکی خروجی کمتر از توان مکانیکی ورودی است، ژنراتور سرعت می گیرد.

165

سنکرونیزم

- اگر فرمان وصل مجدد ریکلوزرها خیلی زود باشد ممکن است اتصال کوتاه از بین نرفته باشد (زیرا مثلا عایق هوای بین خطوط که یونیزه شده، هنوز ترمیم نیافته باشد).
- اگر فرمان وصل مجدد دیر باشد، ژنراتور آنقدر سرعت گرفته که دیگر حتی با وصل به شبکه و قرار گرفتن بار بر روی آن، سرعت آن کم نشده و اصطلاحا نمی تواند سنکرونیزم خود را با شبکه حفظ کند و ناپایدار می شود.
- مدت زمان قطع خط چقدر باشد تا ژنراتور پس از وصل پایدار بماند؟

166

تعریف زاویه قدرت

-اگر ω سرعت زاویه ای ژنراتور
- θ موقعیت زاویه ای رتور
- ω_0 سرعت زاویه ای سنکرون ژنراتور و
- $\Delta\omega$ اختلاف سرعت سرعت روتور نسبت به سرعت سنکرون باشد.

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \Rightarrow d\theta = \omega.dt \Rightarrow \int_{\theta_0}^{\theta} d\theta = \int_0^t \omega.dt$$

$$\theta = \int_0^t \omega.dt + \theta_0 = \int_0^t (\omega_0 + \Delta\omega).dt + \theta_0 = \omega_0 t + \underbrace{\int_0^t \Delta\omega.dt + \theta_0}_{\delta} = \omega_0 t + \delta$$

$$\delta = \theta - \omega_0 t = \int_0^t \Delta\omega.dt + \theta_0$$

- بنابراین δ انتگرال سرعت نسبی روتور نسبت به سرعت سنکرون است.

167

مشتق اول زاویه قدرت

$$\delta = \theta - \omega_0 t = \int_0^t \Delta\omega.dt + \theta_0$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \dot{\delta} = \Delta\omega$$

168

بحث در مورد زاویه قدرت

- درحالت کارعادی ژنراتور:

$$P_{elec}=P_{mech} \Rightarrow \omega=\omega_0 \Rightarrow \Delta\omega=0 \Rightarrow \delta=\int_0^t \Delta\omega.dt+\theta_0=\theta_0=constant$$

- اگر سرعت ژنراتور بیشتر از سرعت سنکرون باشد:

$$\omega>\omega_0 \Rightarrow \Delta\omega>0 \Rightarrow \delta\uparrow=\int_0^t \Delta\omega.dt+\theta_0$$

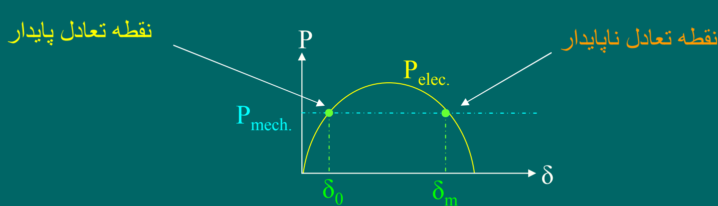
- اگر سرعت ژنراتور کمتر از سرعت سنکرون باشد:

$$\omega<\omega_0 \Rightarrow \Delta\omega<0 \Rightarrow \delta\downarrow=\int_0^t \Delta\omega.dt+\theta_0$$

169

نقاط تعادل پایدار و ناپایدار

- درحالت کارعادی ژنراتور:



- اگر $\delta>\delta_m$ شود، توان مکانیکی از توان الکتریکی بیشتر شده و ژنراتور ناپایدار می شود.

-اگر $\delta<\delta m$ شود، توان مکانیکی از توان الکتریکی کمتر شده و ژنراتور به نقطه تعادل پایدارش برمی گردد.

170

تعریف ثابت اینرسی

ثابت اینرسی به صورت نسبت انرژی جنبشی در فرکانس سنکرون به توان ظاهری ژنراتور تعریف می شود. بنابراین:

$$H=\frac{W_{Kin}^{0}}{S}\quad\Rightarrow\quad W_{Kin}^{0}=H.S$$

دیمانسیون ثابت اینرسی ثانیه است.

171

انرژی جنبشی در یک ژنراتور :

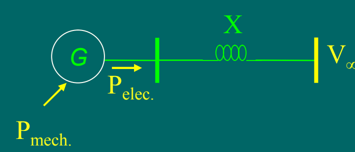
$$\frac{W_{kin}}{W_{Kin}^{0}}=\frac{\frac{1}{2}I\omega^{2}}{\frac{1}{2}I\omega_{0}^{2}}=\left(\frac{\omega}{\omega_{0}}\right)^{2}=\left(\frac{\omega_{0}+\Delta\omega}{\omega_{0}}\right)^{2}=\left(1+\frac{\Delta\omega}{\omega_{0}}\right)^{2}=1+2\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_{0}}\right)+\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_{0}}\right)^{2}\approx1+2\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_{0}}\right)$$

$$W_{kin}=W_{Kin}^{0}\left(1+2\frac{\overbrace{\Delta\omega}^{\dot{\delta}}}{\omega_{0}}\right)=W_{Kin}^{0}\left(1+2\frac{\dot{\delta}}{\omega_{0}}\right)$$

$$\frac{dW_{kin}}{dt}=\frac{d\left[W_{Kin}^{0}\left(1+2\frac{\dot{\delta}}{\omega_{0}}\right)\right]}{dt}=\frac{2\overbrace{W_{Kin}^{0}}^{H.S}}{\underbrace{\omega_{0}}_{2\pi f_{0}}}\frac{d\dot{\delta}}{dt}=\frac{W_{Kin}^{0}}{\pi f_{0}}\frac{d\dot{\delta}}{dt}=\frac{H.S}{\pi f_{0}}\ddot{\delta}$$

172

معادله نوسان :



$$P_m - P_e = \frac{dW_{kin}}{dt} = \frac{H.S}{\pi f_0}\ddot{\delta}$$

معادله نوسان را پریونیت می کنیم:

$$P_m - P_e = \frac{H}{\pi f_0}\ddot{\delta}$$

$$\ddot{\delta} = \frac{\pi f_0}{H}(P_m - P_e)$$

173

شرط پایدار شدن ژنراتور

-اگر بر اثر یک خطا، با گذشت چندین ثانیه زمان δ همواره افزایش یابد، ژنراتور ناپایدار خواهد شد ولی اگر δ پس از یک دوره افزایش، شروع به کاهش نماید، ژنراتور پایدار خواهد شد.

- تغییرات δ نسبت به زمان را می توان با حل معادله نوسان مشاهده نمود.

- اگر ژنراتور پایدار شود در یک نقطه مشتق δ صفر خواهد بود.

174

معیار سطوح مساوی

$$\ddot{\delta} = \frac{\pi f_0}{H}(P_m - P_e)$$

$$\ddot{\delta} = \frac{d\dot{\delta}}{dt} = \frac{d\dot{\delta}}{d\delta}\frac{d\delta}{dt} = \dot{\delta}\frac{d\dot{\delta}}{d\delta} = \frac{\pi f_0}{H}(P_m - P_e)$$

$$\dot{\delta}\, d\dot{\delta} = \frac{\pi f_0}{H}(P_m - P_e)d\delta$$

$$\int_{\dot{\delta}(0)=0}^{\dot{\delta}(t)} \dot{\delta}\, d\dot{\delta} = \int_{\delta_0}^{\delta(t)} \frac{\pi f_0}{H}(P_m - P_e)d\delta$$

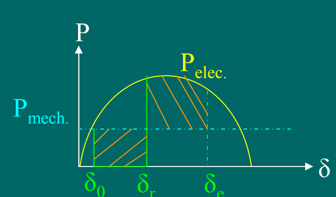
$$\frac{1}{2}\dot{\delta}^2 = \int_{\delta_0}^{\delta(t)} \frac{\pi f_0}{H}(P_m - P_e)d\delta$$

$$\dot{\delta} = \sqrt{2\frac{\pi f_0}{H}\int_{\delta_0}^{\delta(t)}(P_m - P_e)d\delta}$$

$$if \quad \dot{\delta} = 0 \quad \Rightarrow \quad \int_{\delta_0}^{\delta(t)}(P_m - P_e)d\delta = 0$$

175

ادامه معیار سطوح مساوی



$$\int_{\delta_0}^{\delta_e}(P_m - P_e)d\delta = 0$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_r}(P_m - P_e)d\delta + \int_{\delta_r}^{\delta_e}(P_m - P_e)d\delta = 0$$

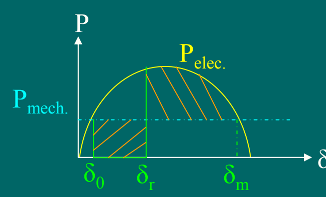
$$\underbrace{\int_{\delta_0}^{\delta_r}(P_m - P_e)d\delta}_{A_{acc}} = \underbrace{\int_{\delta_r}^{\delta_e}(P_e - P_m)d\delta}_{A_{dec}}$$

$$A_{acc} = A_{dec}$$

نتیجه : اگر سطح شتاب دهنده مساوی سطح شتاب گیرنده باشد، ژنراتور پایدار می ماند.

176

بررسی پایداری بوسیله معیار سطوح مساوی



δ_r زاویه وصل است.

$$A_{acc} = \int_{\delta_0}^{\delta_r} (P_m - P_e) d\delta \qquad A_{dec}^{max} = \int_{\delta_r}^{\delta_m} (P_e - P_m) d\delta$$

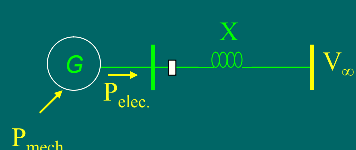
$$if \quad A_{acc} < A_{dec}^{max} \quad \Rightarrow \quad Stable$$

$$if \quad A_{acc} > A_{dec}^{max} \quad \Rightarrow \quad Unstable$$

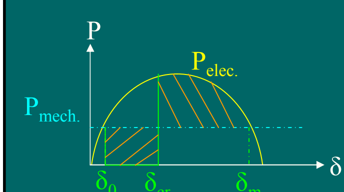
$$if \quad A_{acc} = A_{dec}^{max} \quad \Rightarrow \quad Critical$$

177

مثال 5-1



یک ژنراتور با P_{max}=2.4 از طریق یک خط انتقال توان 0.67 پریونیت را به یک باس بی نهایت تحویل می دهد. اگر در خط انتقال یک اتصال کوتاه سه فاز رخ دهد و ریکلوزر خط را برای لحظاتی قطع کند. زاویه بحرانی رفع اتصال کوتاه را بیابید.



$$P_e(\delta_0) = P_{\max} \sin \delta_0 = P_m$$

$$2.4 \sin \delta_0 = 0.67$$

$$\delta_0 = 16.21^\circ = 0.283^{rad}$$

$$\delta_m = \pi - \delta_0 = \pi - 0.283^{rad} = 2.859^{rad} = 163.79^\circ$$

$$A_{acc} = \int_{\delta_0}^{\delta_r} (P_m - P_e) d\delta$$

$$= \int_{0.283^{rad}}^{\delta_{cr}} (0.67 - 0) d\delta = 0.67(\delta_{cr} - 0.283^{rad})$$

$$A_{acc} = 0.67\delta_{cr} - 0.19$$

178

ادامه حل مثال 6-1

$$A_{dec}^{\max} = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_m} (P_e - P_m) d\delta$$

$$= \int_{\delta_{cr}}^{2.859^{rad}} (2.4 \sin \delta - 0.67) d\delta =$$

$$= -2.4 \cos(2.859^{rad}) + 2.4 \cos \delta_{cr} - 0.67(2.859^{rad} - \delta_{cr})$$

$$A_{dec}^{\max} = 0.389 + 2.4 \cos \delta_{cr} + 0.67 \delta_{cr}$$

$$A_{acc} = A_{dec}^{\max}$$

$$0.67 \delta_{cr} - 0.19 = 0.389 + 2.4 \cos \delta_{cr} + 0.67 \delta_{cr}$$

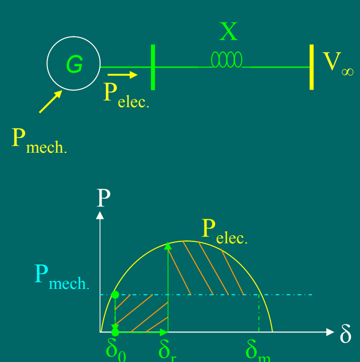
$$2.4 \cos \delta_{cr} = -0.19 - 0.389$$

$$\delta_{cr} = 1.814^{rad} = 104^{\circ}$$

179

مثال 5-2

یک ژنراتور با حداکثر قدرت 2 و ثابت اینرسی 5 ثانیه و فرکانس 50 هرتز توسط یک خط انتقال به یک باس بی نهات متصل است و توان یک پریونیت را به آن تحویل می دهد. اگر خط انتقال به مدت 0.2 ثانیه قطع شده و دوباره وصل شود. آیا ژنراتور پایدار خواهد ماند یا خیر؟



حل: ابتدا شکل را رسم می کنیم:

180

ادامه حل مثال 5-2

زاویه معادل 0.2 ثانیه را محاسبه می کنیم

$$for \quad 0 \le t \le 0.2 \sec \quad :$$

$$\ddot{\delta} = \frac{\pi f_0}{H}(P_m - P_e) = \frac{50\pi}{5}(1-0) = 10\pi$$

$$\ddot{\delta} = \frac{d\dot{\delta}}{dt} = 10\pi \quad \Rightarrow \quad d\dot{\delta} = 10\pi dt$$

$$\int_{\dot{\delta}(0)=0}^{\dot{\delta}(t)} d\dot{\delta} = \int_{t=0}^{t} 10\pi dt$$

$$\dot{\delta} - 0 = 10\pi(t-0)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = 10\pi t \quad \Rightarrow \quad d\delta = 10\pi t dt$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta(t)} d\delta = \int_{t=0}^{t} 10\pi t dt$$

$$\delta(t) - \delta_0 = \frac{10\pi}{2}(t^2 - 0^2)$$

$$\delta(t) = \frac{10\pi}{2}t^2 + \delta_0$$

181

ادامه حل مثال 5-2

محاسبه δ_0:

$$P_e(\delta_0) = P_{\max}\sin\delta_0 = P_m$$

$$2\sin\delta_0 = 1$$

$$\delta_0 = 30^\circ = 0.524^{rad}$$

$$\delta_m = \pi - \delta_0 = \pi - 0.524^{rad} = 2.618^{rad} = 150^\circ$$

محاسبه δ_r:

$$\delta(t) = \frac{10\pi}{2}t^2 + \delta_0$$

$$\delta_r = \delta(0.2) = \frac{10\pi}{2}0.2^2 + 0.524 = 1.152rad = 66.0^\circ$$

182

ادامه حل مثال 2-5

محاسبه سطح شتاب دهنده:

$$A_{acc} = \int_{\delta_0}^{\delta_r} (P_m - P_e)\, d\delta$$

$$= \int_{0.524^{rad}}^{1.152} (1-0)\, d\delta = (1.152 - 0.524) = 0.628$$

محاسبه حداکثر سطح شتاب گیرنده:

$$A_{dec}^{max} = \int_{\delta_r}^{\delta_m} (P_e - P_m)\, d\delta$$

$$= \int_{1.152}^{2.618^{rad}} (2\sin\delta - 1)\, d\delta =$$

$$= -2\left(\cos(2.618^{rad}) - \cos(1.152^{rad})\right) - \left(2.618^{rad} - 1.152^{rad}\right)$$

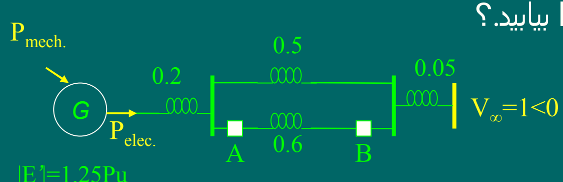
$$A_{dec}^{max} = 1.08$$

$$A_{acc} = 0.628 < A_{dec}^{max} = 1.08 \quad \Rightarrow \quad Stable$$

183

مثال 3-5

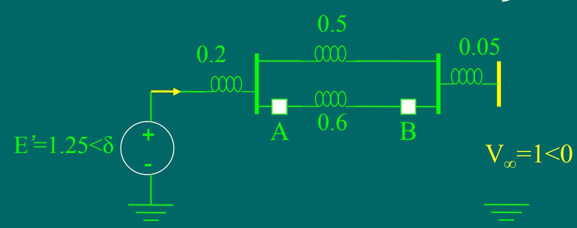
در سیستم قدرت شکل زیر هنگامیکه ژنراتور توان یک پریونیت را به سیستم تحویل می دهد، یک اتصال کوتاه سه فاز متقارن دقیقا در وسط خط AB رخ می دهد. سپس کلیدهای A و B بطور همزمان عمل نموده و اتصال کوتاه را برطرف می کنند. زاویه بحرانی رفع اتصال کوتاه را بیابید؟



حل: ابتدا شکل را رسم می کنیم:

184

حل: شکل در حالت قبل از اتصال کوتاه:



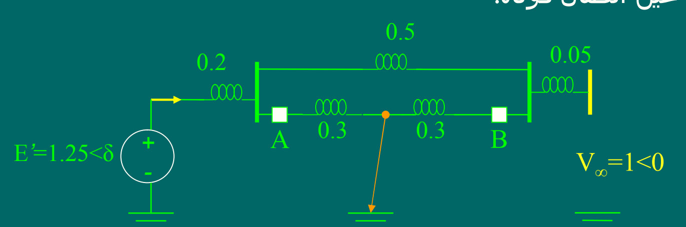
$$X_{e1}=0.2+(0.5\|0.6)+0.05=0.523$$

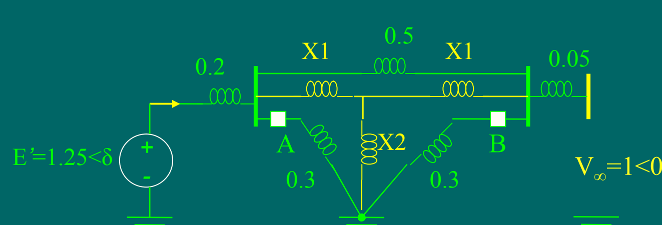
$$P_{el}=\frac{1.25\times 1}{0.523}\sin(\delta-0)=2.39\sin\delta$$

$$P_{el}=P_m \quad\Rightarrow\quad 2.39\sin\delta_0=1 \quad\Rightarrow\quad \delta_0=24.72^{\circ}=0.431^{rad}$$

185

حل: شکل در حالت حین اتصال کوتاه:



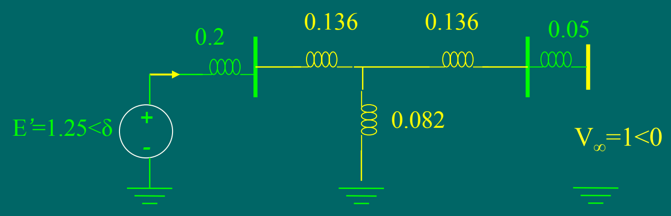


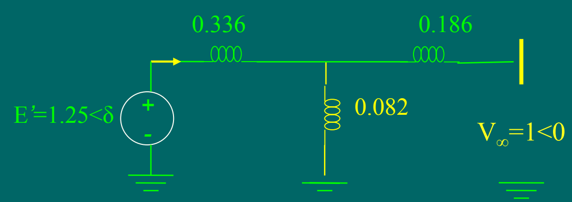
$$X_1=\frac{0.5\times 0.3}{0.5+0.3+0.3}=0.136$$

$$X_2=\frac{0.3\times 0.3}{0.5+0.3+0.3}=0.082$$

186

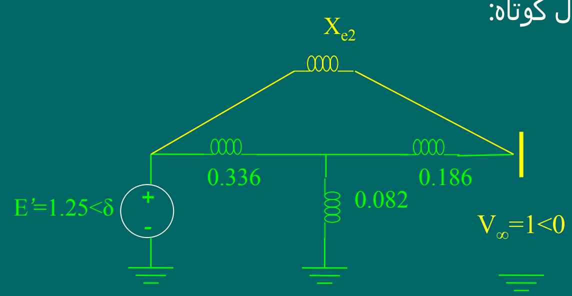
حل: ادامه حالت حین اتصال کوتاه:





187

حل: ادامه حالت حین اتصال کوتاه:

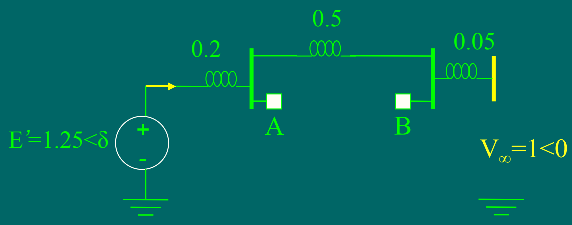


$$X_{e2}=\frac{0.336\times 0.186+0.336\times 0.082+0.186\times 0.082}{0.082}=1.284$$

$$P_{e2}=\frac{1.25\times 1}{1.284}\sin(\delta-0)=0.97\sin\delta$$

188

حل: شکل در حالت بعد از رفع اتصال کوتاه (قطع خط *AB*):

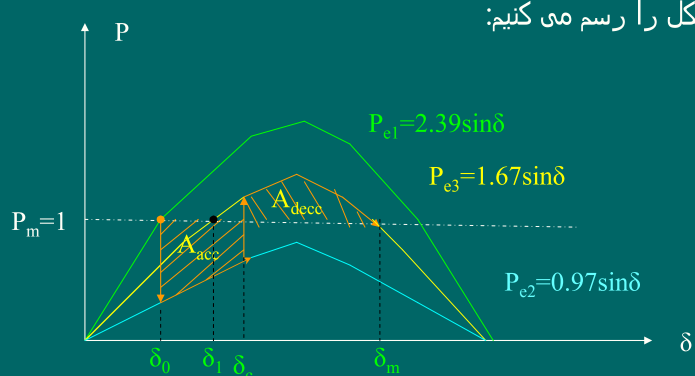


$$X_{e3} = 0.2 + 0.5 + 0.05 = 0.75$$

$$P_{e3} = \frac{1.25 \times 1}{0.75} \sin(\delta - 0) = 1.67 \sin \delta$$

189

ادامه حل: شکل را رسم می کنیم:



$$P_{e3} = P_m \quad \Rightarrow \quad 1.67 \sin \delta_1 = 1 \quad \Rightarrow \quad \delta_1 = 36.78^\circ = 0.64^{rad}$$

$$\delta_m = \pi - \delta_1 = \pi - 0.64^{rad} = 2.45^{rad} = 57.30^\circ$$

190

ادامه حل مثال 3-5

محاسبه سطح شتاب دهنده:

$$A_{acc}=\int_{\delta_0}^{\delta_c}(P_m-P_e)d\delta=\int_{0.431^{rad}}^{\delta_c}(1-0.97\sin\delta)d\delta$$
$$=(\delta_c-0.431)+0.97\left(\cos\delta_c-\cos 0.431^{rad}\right)=$$
$$=\delta_c+0.97\cos\delta_c-1.312$$

محاسبه سطح شتاب گیرنده:

$$A_{dec}^{\max}=\int_{\delta_c}^{\delta_m}(P_e-P_m)d\delta=\int_{\delta_c}^{2.45^{rad}}(1.67\sin\delta-1)d\delta=$$
$$=-1.67\left(\cos 2.45^{rad}-\cos\delta_c\right)-\left(2.45^{rad}-\delta_c\right)$$
$$A_{dec}^{\max}=\delta_c+1.67\cos\delta_c-1.164$$

$$A_{acc}=A_{dec}^{\max}$$
$$\delta_c+0.97\cos\delta_c-1.312=\delta_c+1.67\cos\delta_c-1.164$$
$$0.7\cos\delta_c=-0.148$$
$$\delta_c=102.2^{\circ}$$

191

مثال 3-6

در سیستم قدرت شکل زیر هنگامیکه ژنراتور توان یک پریونیت را به سیستم تحویل می دهد، یک اتصال کوتاه سه فاز متقارن در نقطه *P* رخ می دهد. سپس کلیدهای *A* و *B* بطور همزمان عمل نموده و اتصال کوتاه را برطرف می کنند. زاویه بحرانی برطرف نمودن اتصال کوتاه را محاسبه کنید.

solu

192

فصل ششم : کنترل دینامیکی سیستم قدرت

- هدف این فصل : چگونگی نگهداشتن سیستم قدرت در حالت کار نرمال در هنگام تغییرات کم بار
- این کار توسط کنترل پیوسته و خودکار سیستم قدرت انجام می گیرد.
- در ژنراتورهای بزرگ دو حلقه کنترل اصلی داریم:
  1- حلقه کنترل خودکار ولتاژ (*AVR*) برای تنظیم ولتاژ
  2- حلقه کنترل خودکار بار-فرکانس (*ALFC*) برای تنظیم توان حقیقی خروجی و فرکانس که خود از دو حلقه تشکیل شده است:
    - حلقه *ALFC* اولیه که سریع به تغییر فرکانس پاسخ می دهد ولی فرکانس را بطور غیردقیق کنترل می کند.
    - حلقه *ALFC* ثانویه که کندتر به تغییر فرکانس پاسخ می دهد ولی فرکانس را بطور دقیق تنظیم می کند.

193

تابع انتقال یک سیستم خطی

- تابع انتقال نسبت خروجی به ورودی است.

- سیستم بدون تاخیر

$$u(s) \longrightarrow \boxed{K} \longrightarrow \quad y(s) = k \,.\, u(s)$$

تابع انتقال : $\quad G(s) = \dfrac{y(s)}{u(s)} = k$

194

تابع انتقال یک سیستم خطی با تاخیر

u(s) $\rightarrow \boxed{\dfrac{K}{1+ST}} \rightarrow$ y(s)

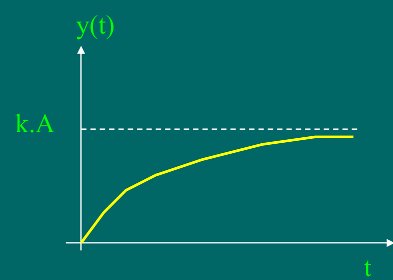
تابع انتقال : $G(s) = \dfrac{y(s)}{u(s)} = \dfrac{K}{1+ST}$

K: گین (بهره)
T: ثابت زمانی تاخیر

$$if \quad u(s) = \frac{A}{s}$$

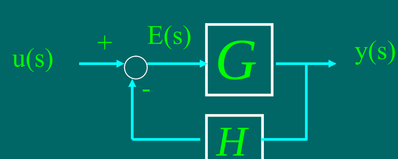
$$y(s) = G(s)u(s) = \frac{K}{1+sT} \cdot \frac{A}{s} = KA\left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s+\frac{1}{T}}\right)$$

$$y(t) = KA\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad for \quad t \geq 0$$



195

تابع انتقال یک سیستم مدار بسته



$$y = G.E = G(u - Hy) = Gu - GHy$$

$$y = \frac{G.u}{1+G.H}$$

تابع انتقال : $G'(s) = \dfrac{y(s)}{u(s)} = \dfrac{G}{1+GH}$

u(s) $\rightarrow \boxed{G' = \dfrac{G}{1+GH}} \rightarrow$ y(s)

196

ادامه تابع انتقال یک سیستم مدار بسته

$$if \quad \begin{cases} u(s) = \dfrac{A}{s} \\ G = \dfrac{K}{1+sT} \\ H = 1 \end{cases}$$

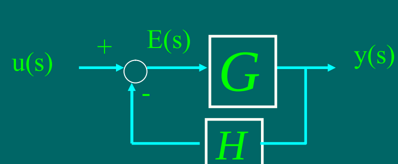
$$G' = \frac{G}{1+GH} = \frac{\dfrac{K}{1+sT}}{1+\left(\dfrac{K}{1+sT}\right)\times 1} = \frac{\left(\dfrac{K}{K+1}\right)}{1+s\left(\dfrac{T}{K+1}\right)} = \frac{K'}{1+sT'}$$

$$K' = \frac{K}{K+1} \qquad T' = \frac{T}{K+1}$$

$$y(t) = K'A\left(1 - e^{-\frac{t}{T'}}\right) = \left(\frac{K}{K+1}\right)A\left(1 - e^{-\frac{t}{\left(\frac{T}{K+1}\right)}}\right) \qquad for \quad t \geq 0$$

197

خطا در یک سیستم مدار بسته



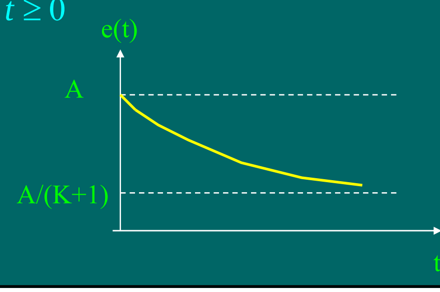
$$\text{خطا}: \quad E = u - Hy = u - H\left(\frac{G.u}{1+G.H}\right) = \frac{u}{1+G.H}$$

198

رسم تابع زمانی خطا در سیستم مدار بسته

$$if\quad \begin{cases} u(s)=\dfrac{A}{s} \\ G=\dfrac{K}{1+sT} \\ H=1 \end{cases}\qquad E=\frac{u}{1+GH}=\frac{\left(\frac{A}{s}\right)}{1+\left(\frac{K}{1+sT}\right)\times 1}=\frac{A(1+ST)}{s(ST+1+K)}=\frac{A}{K+1}\left(\frac{1}{S}-\frac{k}{s+\frac{K+1}{T}}\right)$$

$$e(t)=\left(\frac{A}{K+1}\right)\left(1+ke^{\frac{-kt}{k+1}}\right)\qquad for\quad t\geq 0$$



199

تابع انتقال برای یک سیستم پیچیده

- تابع انتقال سیستمهای پیچیده را از قاعده میسون بدست می آوریم:
- قاعده میسون برای یک سیستم تک حلقه ای با یک ورودی:

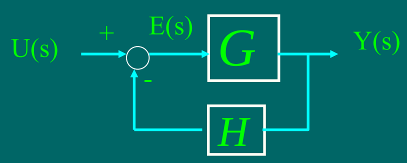
$$Y=\frac{PU}{1-L}$$

Y: خروجی
U : ورودی
L : حلقه
P: مسیر ورودی U تا خروجی

200

مثال 6-1

- بدست آوردن خروجی و خطا برای یک سیستم مدار بسته با استفاده از قاعده میسون:



- بدست آوردن خروجی :

$$P = G \qquad L = -GH$$

تابع انتقال خروجی : $Y = \frac{P.U}{1-L} = \frac{G.U}{1-(-GH)} = \frac{G.U}{1+GH}$

- بدست آوردن خطا :

$$P = 1 \qquad L = -GH$$

تابع انتقال خطا : $E = \frac{P.U}{1-L} = \frac{1.U}{1-(-GH)} = \frac{U}{1+GH}$

201

قاعده میسون برای یک سیستم دو حلقه ای

- قاعده میسون برای یک سیستم دو حلقه ای با دو ورودی:

$$Y = \frac{P_1U_1 + P_2U_2}{1-(L_1+L_2)+L_1L_2}$$

Y: خروجی

U_1 و U_2: ورودیها

L_1 و L_2 : حلقه ها $L_1.L_2$ موقعی است که اشتراک نداشته باشند.

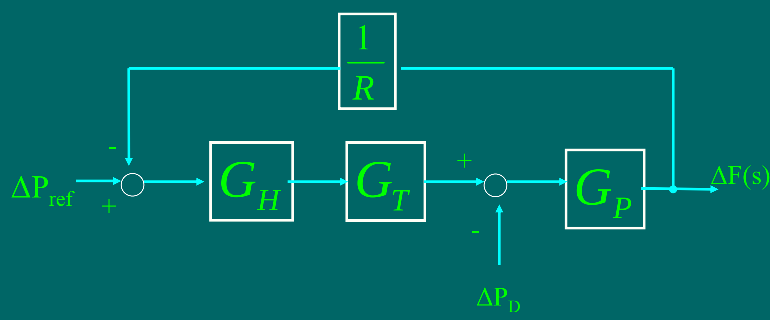
P_1: مسیر ورودی U_1 تا خروجی

P_2: مسیر ورودی U_2 تا خروجی

202

مثال 2-6

- قاعده میسون برای یک سیستم تک حلقه ای با دو ورودی:



203

حل مثال 2-6

- خروجی ΔF:

$$L_1 = -G_H G_T G_P \left(\frac{1}{R}\right) \qquad L_2 = 0$$

$$U_1 = \Delta P_{ref} \qquad U_2 = \Delta P_D$$

$$P_1 = G_H G_T G_P \qquad P_2 = -G_P$$

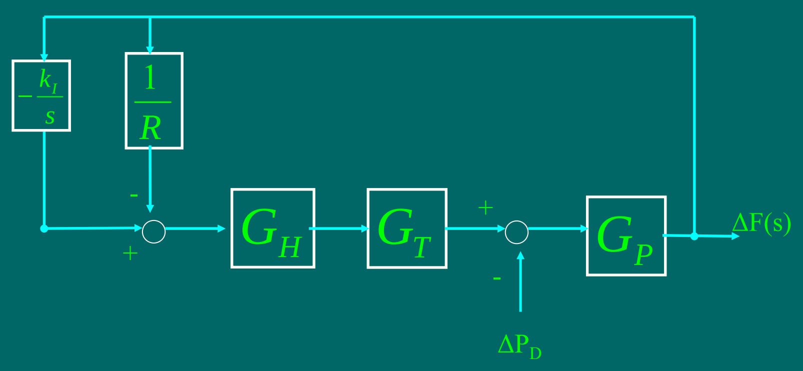
$$\Delta F = \frac{P_1 U_1 + P_2 U_2}{1 - (L_1 + L_2) + L_1 L_2} = \frac{(G_H G_T G_P)\Delta P_{ref} + (-G_P)\Delta P_D}{1 - \left(-G_H G_T G_P \left(\frac{1}{R}\right) + 0\right) + 0}$$

$$\Delta F = \frac{(G_H G_T G_P)\Delta P_{ref} + (-G_P)\Delta P_D}{1 + G_H G_T G_P \left(\frac{1}{R}\right)}$$

204

مثال 3-6

- قاعده میسون برای یک سیستم دو حلقه ای با یک ورودی:



205

حل مثال 3-6

- خروجی *ΔF*:

$$L_1 = -G_H G_T G_P \left(\frac{1}{R}\right) \qquad L_2 = G_H G_T G_P \left(\frac{-K_I}{s}\right)$$

$$U = \Delta P_D \qquad P = -G_P$$

$$\Delta F = \frac{PU}{1-(L_1+L_2)+L_1L_2} = \frac{(-G_P)\Delta P_D}{1-\left(-G_H G_T G_P\left(\frac{1}{R}\right)+G_H G_T G_P\left(\frac{-K_I}{s}\right)\right)+0}$$

$$\Delta F = \frac{(-G_P)\Delta P_D}{1+G_H G_T G_P\left(\frac{1}{R}+\frac{K_I}{s}\right)}$$

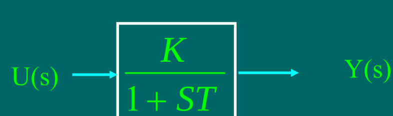
206

محاسبه مقدار نهائی (*steady state*)

$$y_{ss} = \lim_{t \to \infty} y(t) = \lim_{s \to 0} sY(s)$$

207

مثال 6-4: محاسبه مقدار نهائی سیستم با تاخیر

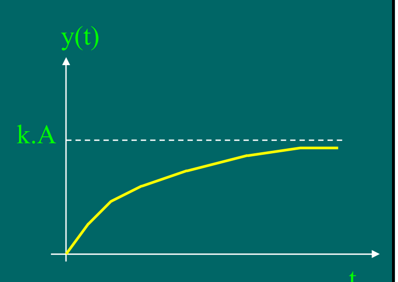


$$Y(s) = \frac{K}{1+ST} U(s)$$

$$if \quad U(s) = \frac{A}{s}$$

$$Y(s) = G(s)u(s) = \frac{K}{1+sT} \cdot \frac{A}{s} = KA\left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s+\frac{1}{T}}\right)$$

$$y(t) = KA\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad for \quad t \geq 0$$



208

حل مثال با استفاده از قضیه مقدار نهائی

$$y_{ss} = \lim_{t\to\infty} y(t) = \lim_{t\to\infty} KA\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) = KA$$

$$y_{ss} = \lim_{s\to 0} sY(s) = \lim_{s\to 0} s\left(\frac{K}{1+sT}.\frac{A}{s}\right) = \lim_{s\to 0}\left(\frac{K.A}{1+sT}\right) = KA$$

209

پایداری

$$if \quad \lim_{t\to\infty} |y(t)| < \infty \quad \Rightarrow \quad y\_is\_stable$$

$$Y(S) = K\frac{s^m + \alpha_{m-1}s^{m-1} + \cdots + \alpha_1 s + \alpha_0}{s^n + \beta_{n-1}s^{n-1} + \cdots + \beta_1 s + \beta_0}U(s)$$

$$Y(S) = K\frac{(s-z_1)(s-z_2)\cdots(s-z_m)}{(s-p_1)(s-p_2)\cdots(s-p_n)}U(s)$$

- z_1، z_2، ....، z_m صفرهای سیستم اند.
- p_1، p_2، ....، p_n قطبهای سیستم اند.
- شرط پایداری آن است که همه قطبهای سیستم سمت چپ محور $j\omega$ باشند.

210

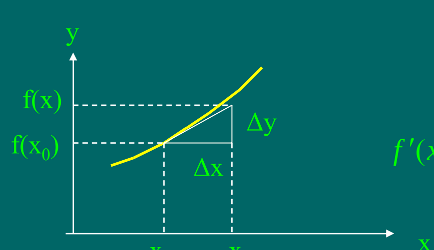
تغییرات سیگنال کوچک

- در این فصل چون فقط کنترل اغتشاشات کوچک (مثلا تغییرات کوچک بار) مدنظر است، بنابراین همه متغیرها فقط تغییرات کوچکی حول نقطه کار خود دارند. لذا با وجود اینکه بیشتر عناصر سیستم غیر خطی هستند، ولی می توان آنها را در محدوده این تغییرات کوچک خطی فرض کرد. به همین دلیل :
  - اولا همه متغیرها را با گذاردن علامت Δ در قبل از آن متغیر نمایش می دهیم، به معنی اینکه فقط تغییرات کوچک آنها مد نظر است.
  - ثانیا همه عناصر حول نقطه کار خطی می شوند. یعنی معادلات دیفرانسیل خطی با ضرائب ثابت داریم که می توان با تبدیل لاپلاس حل نمود.

211

تقریب خطی در سیگنال کوچک

- تابع غیرخطی $y=f(x)$ را در نظر می گیریم. اگر x تغییرات کوچک حول $x0$ داشته باشد. با توجه به شکل می توان نوشت:



$$f'(x_0) \approx \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad \Rightarrow \quad \Delta y = f'(x_0)\Delta x$$

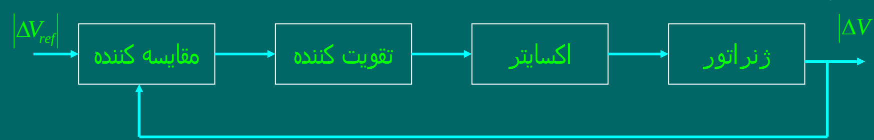
- بنابراین رابطه Δy با Δx تقریبا یک خط با شیب $f'(x_0)$ است.
- رابطه y با x غیر خطی است ولی رابطه تغییرات آنها حول نقطه کار خطی است.

212

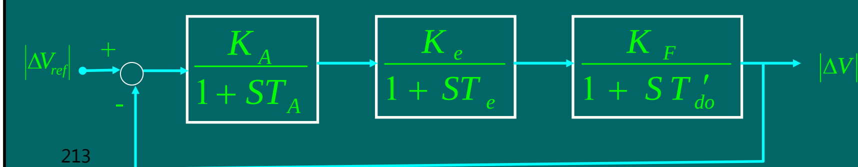
حلقه کنترل اتوماتیک ولتاژ (*AVR*)

- ولتاژ ژنراتور سنکرون توسط حلقه *AVR* در یک مقدار مبنا کنترل می شود.

- اجزای حلقه *AVR* :

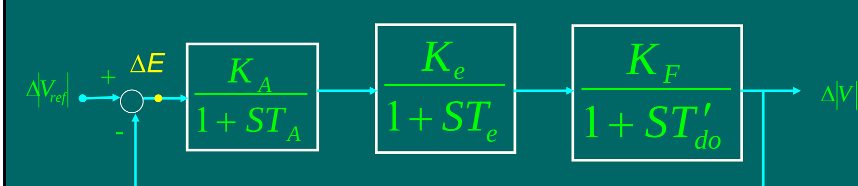


- مدل کنترلی حلقه *AVR* :



بررسی استاتیکی حلقه کنترل *AVR*

- محاسبه خطای حالت ماندگار:



$$\Delta E = \frac{P.U}{1-L} = \frac{1.\Delta|V_{ref}|}{1-\left(-\frac{K_A K_e K_F}{(1+ST_A)(1+ST_e)(1+ST'_{do})}\right)} = \frac{\Delta|V_{ref}|}{1+\frac{K_A K_e K_F}{(1+ST_A)(1+ST_e)(1+ST'_{do})}}$$

ادامه محاسبه خطای حالت ماندگار کنترل *AVR*

$$if \quad \Delta\left|V_{ref}\right| = \frac{A}{s} \quad :$$

$$\Delta E(s) = \frac{\frac{A}{s}}{1 + \frac{K_A K_e K_F}{(1+ST_A)(1+ST_e)(1+ST'_{do})}}$$

$$\Delta e_{ss} = \lim_{s\to 0} \quad s\Delta E(s) = \lim_{s\to 0} \quad s\left(\frac{\frac{A}{s}}{1 + \frac{K_A K_e K_F}{(1+ST_A)(1+ST_e)(1+ST'_{do})}}\right) = \frac{A}{1 + \underbrace{K_A K_e K_F}_{K}} = \frac{A}{1+K}$$

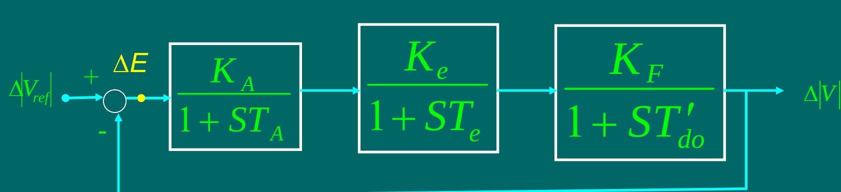
$$\Delta e_{ss} = \frac{A}{1+K} \le 0.01A \quad \Rightarrow \quad K \ge 99$$

- ملاحظه می شود که خطای حالت ماندگار صفر نیست و اگر بخواهیم خطا کوچک (کمتر از یک درصد ورودی) باشد باید *K* یک عدد بزرگتر از 99 باشد.

215

بررسی دینامیکی حلقه کنترل *AVR*

- بررسی پایداری حلقه کنترل *AVR*:



$$\Delta\left|V\right| = \frac{P.U}{1-L} = \frac{\frac{K_A K_e K_F}{(1+ST_A)(1+ST_e)(1+ST'_{do})}.\Delta\left|V_{ref}\right|}{1-\left(-\frac{K_A K_e K_F}{(1+ST_A)(1+ST_e)(1+ST'_{do})}\right)} = \frac{K_A K_e K_F \Delta\left|V_{ref}\right|}{(1+ST_A)(1+ST_e)(1+ST'_{do}) + K_A K_e K_F}$$

$$\Delta\left|V\right| = \frac{K\Delta\left|V_{ref}\right|}{(1+ST_A)(1+ST_e)(1+ST'_{do}) + K}$$

$$(1+ST_A)(1+ST_e)(1+ST'_{do}) + K = 0$$

216

مکان هندسی ریشه های مخرج تابع انتقال

- بررسی پایداری حلقه کنترل AVR:

$$(1+ST_A)(1+ST_e)(1+ST'_{do})+K=0$$

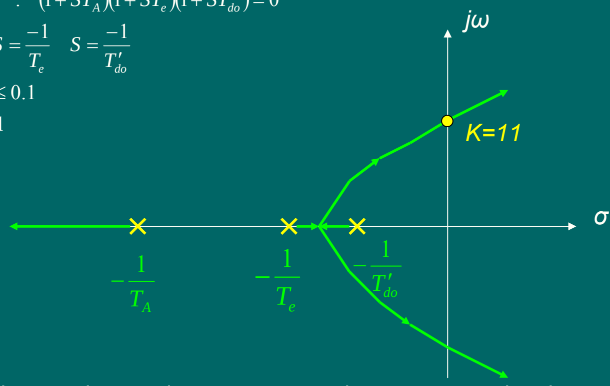
$$if \quad K=0 \quad : \quad (1+ST_A)(1+ST_e)(1+ST'_{do})=0$$

$$S=\frac{-1}{T_A} \quad S=\frac{-1}{T_e} \quad S=\frac{-1}{T'_{do}}$$

$$0.02 \le T_A \le 0.1$$

$$0.5 \le T_e \le 1$$

$$T'_{do} \approx 10$$

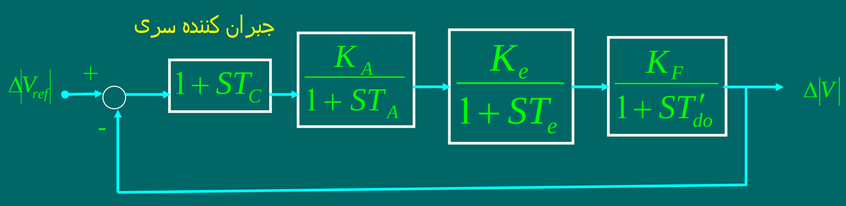


مکان هندسی ریشه ها نشان می دهد که تا حدود $K=11$ حلقه کنترل فوق پایدار است اما درصورت داشتن K کوچک خطای حالت دائم بزرگ است بنابراین نیاز به کنترل کننده می باشد.

217

جبران کننده سری برای حلقه AVR

- بررسی پایداری حلقه کنترل AVR با جبران کننده سری:



$$\Delta|V|=\frac{P.U}{1-L}=\frac{\frac{K_AK_eK_F(1+ST_C)}{(1+ST_A)(1+ST_e)(1+ST'_{do})}.\Delta|V_{ref}|}{1-\left(-\frac{K_AK_eK_F(1+ST_C)}{(1+ST_A)(1+ST_e)(1+ST'_{do})}\right)}=\frac{K_AK_eK_F(1+ST_C)\Delta|V_{ref}|}{(1+ST_A)(1+ST_e)(1+ST'_{do})+K_AK_eK_F(1+ST_C)}$$

$$\frac{\Delta|V|}{\Delta|V_{ref}|}=\frac{K(1+ST_C)}{(1+ST_A)(1+ST_e)(1+ST'_{do})+K(1+ST_C)}$$

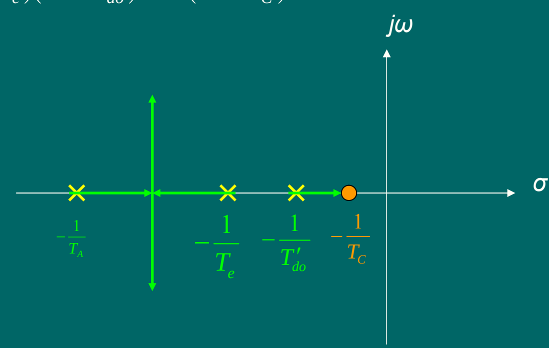
$$(1+ST_A)(1+ST_e)(1+ST'_{do})+K(1+ST_C)=0$$

218

مکان هندسی ریشه های مخرج تابع انتقال جدید

- بررسی پایداری حلقه کنترل AVR با وجود جبران کننده سری:

$$(1+ST_A)(1+ST_e)(1+ST'_{do})+K(1+ST_C)=0$$



ملاحظه می شود که مکان هندسی ریشه ها به ازای همه مقادیر K در سمت چپ محور $j\omega$ قرار دارد بنابراین سیستم کنترل فوق همواره پایدار است.

219

حلقه کنترل بار-فرکانس ($ALFC$)

- سیستم کنترل بار-فرکانس با کنترل فرکانس توازن توان تولیدی و مصرفی را برقرار می کند.

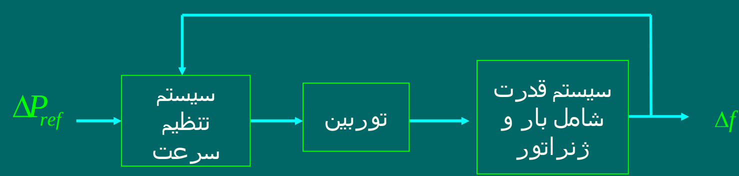
-مناطق کنترل:

- سیستم قدرت تک منطقه ای
  الف) با یک ژنراتور
  ب) با چند ژنراتور
- سیستم قدرت دو منطقه ای
- سیستم قدرت چند منطقه ای

220

سیستم قدرت تک منطقه ای با یک ژنراتور

- اجزاء حلقه کنترل بار-فرکانس:

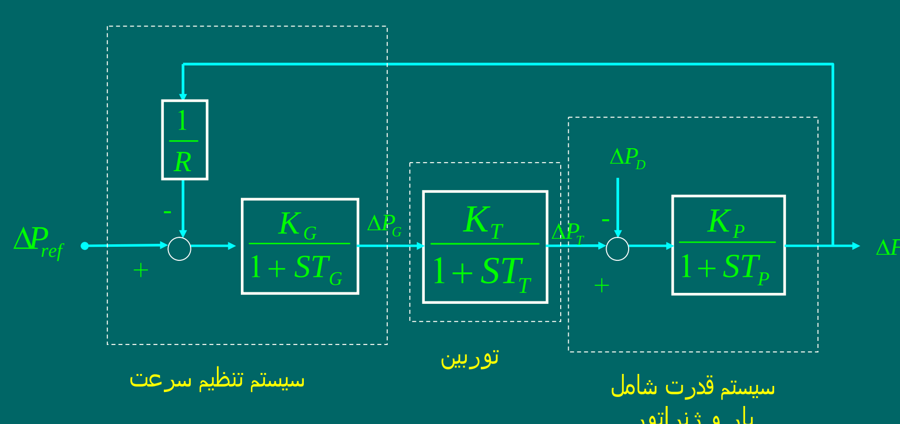


- سیستم تنظیم سرعت (*Speed Governing System*) شامل:
  - تغییر دهنده سرعت (*speed Changer*)
  - تنظیم کننده سرعت (*Speed Governor*)
  - تقویت کننده هیدرولیکی (*hydraulic Amplifier*)
  - شیر کنترل بخار (*Control Valve*)
- حلقه فوق را کنترل بار-فرکانس اولیه (*Primary ALFC*) می نامند.

221

حلقه کنترل بار-فرکانس اولیه

- اجزاء حلقه کنترل بار-فرکانس:



R : ضریب تنظیم گاورنر بر حسب *Hz / Pu. Mw*

222

مدلسازی سیستم قدرت

-

$$\Delta P_T - \Delta P_D = \frac{dW_{kin}}{dt} + D'.\Delta f$$

تغییرات تولیدی توان توربین

تغییرات بار

تغییرات انرژی جنبشی ژنراتور

تغییرات بار بعلت تغییر فرکانس

223

محاسبه مشتق انرژی جنبشی

$$\frac{W_{kin}}{W^0_{Kin}} = \frac{\frac{1}{2}I\omega^2}{\frac{1}{2}I\omega_0^2} = \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = \left(\frac{2\pi f}{2\pi f_0}\right)^2 = \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 = \left(\frac{f_0+\Delta f}{f_0}\right)^2 =$$

$$= \left(1+\frac{\Delta f}{f_0}\right)^2 = 1 + 2\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right) + \left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)^2 \approx 1 + 2\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)$$

$$W_{kin} = \underbrace{W^0_{Kin}}_{H.S_n}\left(1+2\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)\right) = H.S_n\left(1+2\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)\right)$$

$$\frac{dW_{kin}}{dt} = \frac{2H.S_n}{f_0}\frac{d\Delta f}{dt}$$

224

ادامه مدلسازی سیستم قدرت

$$\Delta P_T - \Delta P_D = \frac{dW_{kin}}{dt} + D'.\Delta f$$

$$\Delta P_T - \Delta P_D = \frac{2H.S_n}{f_0}\frac{d\Delta f}{dt} + D'.\Delta f$$

- معادله فوق را پریونیت می کنیم:

$$\frac{\Delta P_T}{S_n} - \frac{\Delta P_D}{S_n} = \frac{2H.S_n}{f_0 S_n}\frac{d\Delta f}{dt} + \underbrace{\left(\frac{D'}{S_n}\right)}_{D}.\Delta f$$

$$\Delta P_T - \Delta P_D = \frac{2H}{f_0}\frac{d\Delta f}{dt} + D.\Delta f$$

- از معادله فوق تبدیل لاپلاس می گیریم:

225

ادامه مدلسازی سیستم قدرت

$$\Delta P_T - \Delta P_D = \frac{2H}{f_0}\frac{d\Delta f}{dt} + D.\Delta f$$

$$\Delta P_T(s) - \Delta P_D(s) = \frac{2H}{f_0} s\Delta F(s) + D.\Delta F(s)$$

$$\Delta F(s) = \frac{\Delta P_T(s) - \Delta P_D(s)}{\frac{2H}{f_0}s + D}$$

$$\Delta F(s) = \left(\frac{1}{D}\right)\frac{\Delta P_T(s) - \Delta P_D(s)}{1 + \left(\frac{2H}{Df_0}\right)s} = K_P \frac{\Delta P_T(s) - \Delta P_D(s)}{1 + sT_P}$$

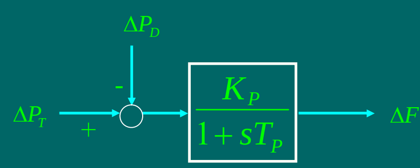
$$K_P = \frac{1}{D} \qquad T_P = \frac{2H}{Df_0}$$

- K_p: بهره سیستم قدرت
- T_P: ثابت زمانی تاخیر سیستم قدرت
- D: دروپ برحسب $Pu.MW / Hz$

226

مدل نهائی سیستم قدرت

$$\Delta F(s) = \left(\frac{K_P}{1+sT_P}\right)\left(\Delta P_T(s) - \Delta P_D(s)\right)$$



227

محاسبه دروپ

- دروپ به بار بستگی دارد و با محاسبه تغییرات بار به تغییرات فرکانس بدست می آید که معمولا این تغییرات خطی فرض می شوند. بنابراین:

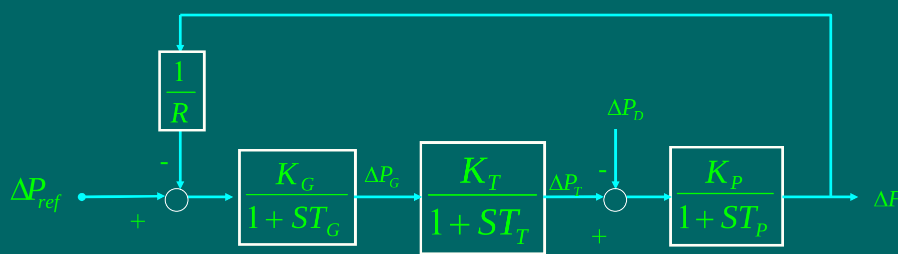
$$D = \frac{P_D^0}{f^0}$$

- یعنی دروپ برابر نسبت بار در فرکانس سنکرون به فرکانس سنکرون است.

228

بررسی استاتیکی حلقه *ALFC* اولیه

- محاسبه پاسخ حالت ماندگار سیستم کنترل *ALFC* اولیه:



$$\Delta F = \frac{P_1U_1 + P_2U_2}{1-L} = \frac{\left(\frac{K_G}{1+sT_G}\right)\left(\frac{K_T}{1+sT_T}\right)\left(\frac{K_P}{1+sT_P}\right)\Delta P_{ref} - \left(\frac{K_P}{1+sT_P}\right)\Delta P_D}{1-\left(-\frac{1}{R}\left(\frac{K_G}{1+sT_G}\right)\left(\frac{K_T}{1+sT_T}\right)\left(\frac{K_P}{1+sT_P}\right)\right)}$$

229

پاسخ حالت ماندگار کنترل نشده

- محاسبه پاسخ حالت ماندگار سیستم کنترل *ALFC* اولیه در حالت بدون کنترل:

$$\Delta F = \left(\frac{K_P}{1+sT_P}\right)\frac{\left(\frac{K_G}{1+sT_G}\right)\left(\frac{K_T}{1+sT_T}\right)\Delta P_{ref} - \Delta P_D}{1+\frac{1}{R}\left(\frac{K_G}{1+sT_G}\right)\left(\frac{K_T}{1+sT_T}\right)\left(\frac{K_P}{1+sT_P}\right)}$$

$$if \quad \Delta P_{ref} = 0 \quad , \quad \Delta P_D = \frac{\Delta P_D}{S}$$

$$\Delta F = \frac{\left(\frac{K_P}{1+sT_P}\right)\left(-\frac{\Delta P_D}{S}\right)}{1+\frac{1}{R}\left(\frac{K_G}{1+sT_G}\right)\left(\frac{K_T}{1+sT_T}\right)\left(\frac{K_P}{1+sT_P}\right)}$$

230

ادامه پاسخ حالت ماندگار کنترل نشده

$$\Delta f_{ss} = \lim_{s\to 0} s\Delta F(s) = \lim_{s\to 0} s \frac{\left(\frac{K_P}{1+sT_P}\right)\left(-\frac{\Delta P_D}{S}\right)}{1+\frac{1}{R}\left(\frac{K_G}{1+sT_G}\right)\left(\frac{K_T}{1+sT_T}\right)\left(\frac{K_P}{1+sT_P}\right)}$$

$$\Delta f_{ss} = \frac{\left(\frac{K_P}{1+0}\right)\left(-\Delta P_D\right)}{1+\frac{1}{R}\left(\frac{K_G}{1+0}\right)\left(\frac{K_T}{1+0}\right)\left(\frac{K_P}{1+0}\right)} = \frac{-K_P\Delta P_D}{1+\frac{K_G K_T K_P}{R}}$$

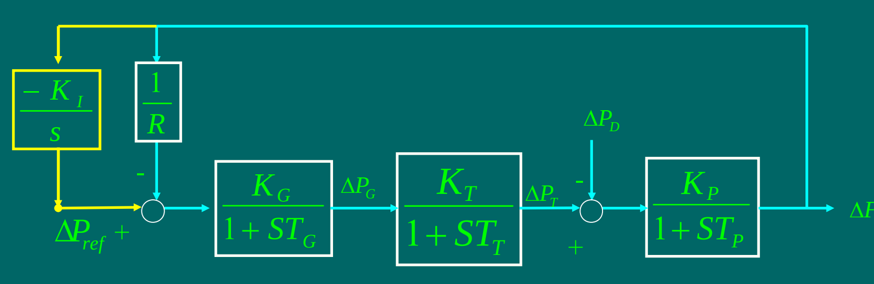
$$K_G K_T \approx 1$$

$$\Delta f_{ss} = \frac{-K_P\Delta P_D}{1+\frac{K_P}{R}} = \frac{-\Delta P_D}{\frac{1}{K_P}+\frac{1}{R}} = \frac{-\Delta P_D}{D+\frac{1}{R}} = \frac{-\Delta P_D}{\beta}$$

- ملاحظه می شود که در حالت بدون کنترل، فرکانس خطای حالت دائم دارد. بنابراین از کنترل کننده استفاده می کنیم.

231

حلقه ALFC با کنترل انتگرالگیر



$$\Delta F = \left(\frac{K_P}{1+sT_P}\right)\frac{-\Delta P_D}{1+\left(\frac{1}{R}+\frac{K_I}{s}\right)\left(\frac{K_G}{1+sT_G}\right)\left(\frac{K_T}{1+sT_T}\right)\left(\frac{K_P}{1+sT_P}\right)}$$

حلقه کنترل دربرگیرنده انتگرالگیر را حلقه ثانویه کنترل-بار فرکانس می گویند.

232

محاسبه مقدار نهائی تغییرات فرکانس در حالت کنترل شده

$$\Delta F=\left(\frac{K_P}{1+sT_P}\right)\frac{-\Delta P_D}{1+\left(\frac{1}{R}+\frac{K_I}{s}\right)\left(\frac{K_G}{1+sT_G}\right)\left(\frac{K_T}{1+sT_T}\right)\left(\frac{K_P}{1+sT_P}\right)}$$

$$if \quad \Delta P_D(s)=\frac{\Delta P_D}{s} \quad , \quad K_G K_T \approx 1$$

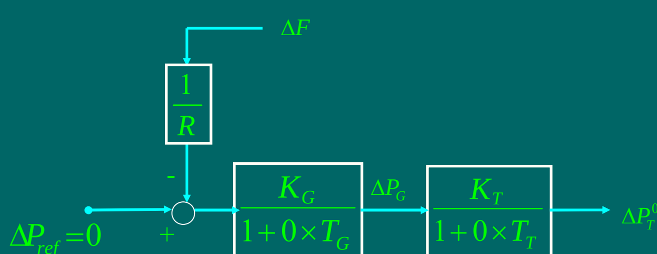
$$\Delta f_{ss}=\lim_{s\to 0} \quad s\Delta F(s)=\lim_{s\to 0} \quad s\left(\frac{K_P}{1+sT_P}\right)\frac{-\frac{\Delta P_D}{s}}{1+\left(\frac{1}{R}+\frac{K_I}{s}\right)\left(\frac{K_G}{(1+sT_G)(1+sT_T)(1+sT_P)}\right)}=0$$

- ملاحظه می شود که این در حالت کنترل شده، مقدار دائم تغییرات فرکانس صفر می شود. بنابراین حلقه ثانویه تنظیم دقیق فرکانس را انجام می دهد.

233

محاسبه ضریب تنظیم گاورنر

- برای تعیین ضریب تنظیم گاورنر (R) توان توربین را مقدار کمی افزایش داده و مقدار دائم تغییر فرکانس ژنراتور را در حالت بی بار و بدون کنترل اندازه می گیرند.

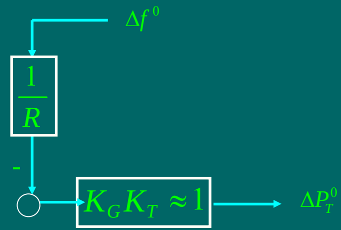


$$\Delta F=\left(\frac{K_P}{1+sT_P}\right)\frac{-\Delta P_D}{1+\left(\frac{1}{R}+\frac{K_I}{s}\right)\left(\frac{K_G}{1+sT_G}\right)\left(\frac{K_T}{1+sT_T}\right)\left(\frac{K_P}{1+sT_P}\right)}$$

234

ادامه محاسبه ضریب تنظیم گاورنر

- پس از ساده سازی دیاگرام کنترل فوق:



$$\Delta P_T^0 = \frac{-1}{R}\Delta f_T^0$$

$$R = -\frac{\Delta f_T^0}{\Delta P_T^0}$$

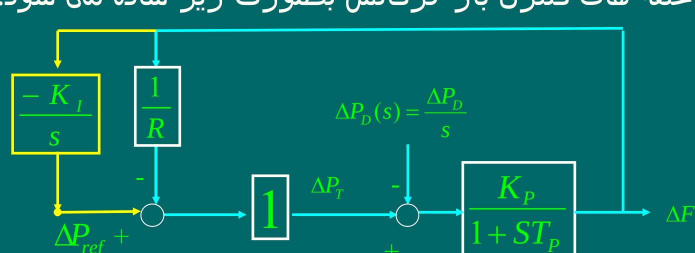
235

بررسی دینامیکی حلقه کنترل ALFC

- در حلقه های کنترل بار فرکانس از T_G و T_T در مقابل T_P صرفنظر می کنیم در اینصورت :

$$\left(\frac{K_G}{1+sT_G}\right)\left(\frac{K_T}{1+sT_T}\right) = \left(\frac{K_G}{1+s\times 0}\right)\left(\frac{K_T}{1+s\times 0}\right) = K_G K_T \approx 1$$

- بنابراین حلقه های کنترل بار-فرکانس بصورت زیر ساده می شود:



- از دیاگرام فوق ΔF را محاسبه می کنیم:

236

ادامه بررسی دینامیکی حلقه کنترل ALFC

$$\Delta F=\frac{PU}{1-L}=\frac{\left(\frac{K_P}{1+sT_P}\right)\Delta P_D(s)}{1+\left(\frac{K_P}{1+sT_P}\right)\left(\frac{1}{R}+\frac{K_I}{s}\right)}=\frac{K_P}{T_P}\frac{s\left(\frac{\Delta P_D}{s}\right)}{s^2+\frac{1}{T_P}\left(1+\frac{K_P}{R}\right)s+\frac{K_PK_I}{T_P}}$$

$$\Delta F=\frac{K_P}{T_P}\frac{\Delta P_D}{s^2+\frac{1}{T_P}\left(1+\frac{K_P}{R}\right)s+\frac{K_PK_I}{T_P}}$$

- مخرج کسر دو ریشه دارد. اگر مبین معادله درجه دوم مخرج صفر باشد دو ریشه مضاعف (یک ریشه) داریم :

$$\Delta=\frac{1}{T_P^{\,2}}\left(1+\frac{K_P}{R}\right)^2-4\times1\times\frac{K_PK_I}{T_P}=0\quad\Rightarrow\quad K_I=\frac{1}{4K_PT_P}\left(1+\frac{K_P}{R}\right)^2=K_{Icrit}$$

237

بحث در مورد مقادیر K_I

$$\begin{array}{llll} if & K_I=K_{Icrit} & : & \Delta=0 \quad Critical\_state \\ if & K_I>K_{Icrit} & : & \Delta<0 \quad Under\_damped\_state \\ if & K_I<K_{Icrit} & : & \Delta>0 \quad Over\_damped\_state \end{array}$$

- شکل خروجی :

238

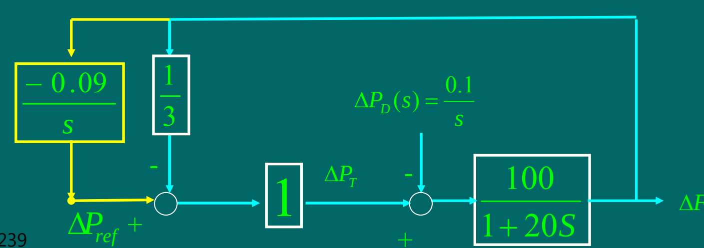
مثال

- برای سیستم کنترل بار-فرکانس زیر مطلوبست محاسبه

الف) خروجی $\Delta F(s)$ و خطای حالت دائم فرکانس وقتی حلقه ثانویه وجود نداشته باشد.

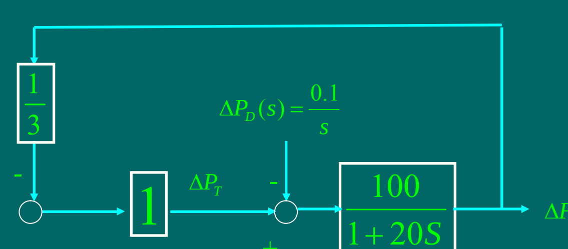
ب) خروجی $\Delta F(s)$ و خطای حالت دائم فرکانس وقتی حلقه ثانویه وجود داشته باشد.

ج) $\Delta f(t)$



239

- حل الف) شکل بدون حلقه ثانویه

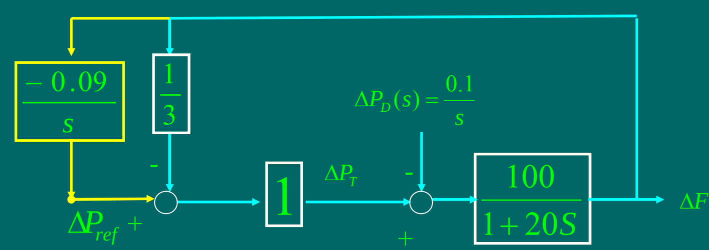


$$\Delta F(s) = \frac{PU}{1-L} = \frac{\left(\frac{-100}{1+20s}\right)\left(\frac{0.1}{s}\right)}{1-\left(\frac{100}{1+20s}\right)\left(\frac{-1}{3}\right)} = \frac{-10}{s\left(1+20s+\frac{100}{3}\right)} = \frac{-0.5}{s(s+1.717)}$$

$$\Delta f^{0} = \Delta f_{ss} = \lim_{s\to 0} \; s\Delta F(s) = \lim_{s\to 0} \; s\left(\frac{-0.5}{s(s+1.717)}\right) = -0.291 Hz$$

240

- حل ب) شکل با حلقه ثانویه



$$\Delta F(s) = \frac{PU}{1-L} = \frac{\left(\frac{-100}{1+20s}\right)\left(\frac{0.1}{s}\right)}{1-\left(\frac{100}{1+20s}\right)\left(\frac{-1}{3}+\frac{-0.09}{s}\right)} = \frac{-10}{s\left(1+20s+\frac{100}{3}+\frac{9}{s}\right)} = \frac{-10}{\left(20s^2+34.333s+9\right)}$$

$$= \frac{-0.5}{s^2+1.717s+0.45}$$

$$\Delta f^0 = \Delta f_{ss} = \lim_{s\to 0} \; s\Delta F(s) = \lim_{s\to 0} \; s\left(\frac{-0.5}{s^2+1.717s+0.45}\right) = 0$$

241

- حل ج) حلقه ثانویه وجود دارد

$$\Delta F(s) = \frac{-0.5}{s^2+1.717s+0.45} = \frac{-0.5}{(s+0.323)(s+1.395)}$$

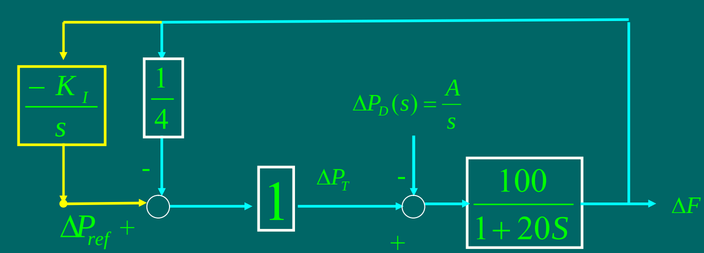
$$\Delta F(s) = \frac{0.466}{s+1.395} - \frac{0.466}{s+0.323}$$

$$\Delta f(t) = 0.466\left(e^{-1.395t} - e^{-0.323t}\right) \quad for \quad t \geq 0$$

242

مثال

- برای سیستم کنترل بار-فرکانس زیر حدود K_I را چنان تعیین کنید تا پاسخ فوق میرا (غیر نوسانی) داشته باشیم.



243

- حل)

$$F(s)=\frac{PU}{1-L}=\frac{\left(\frac{-100}{1+20s}\right)\left(\frac{A}{s}\right)}{1-\left(\frac{100}{1+20s}\right)\left(\frac{-1}{4}+\frac{-K_I}{s}\right)}=$$

$$=\frac{-100A}{s\left(1+20s+\frac{100}{4}+\frac{100K_I}{s}\right)}=\frac{-100A}{\left(20s^2+26s+100K_I\right)}=\frac{-5A}{\left(s^2+1.3s+5K_I\right)}$$

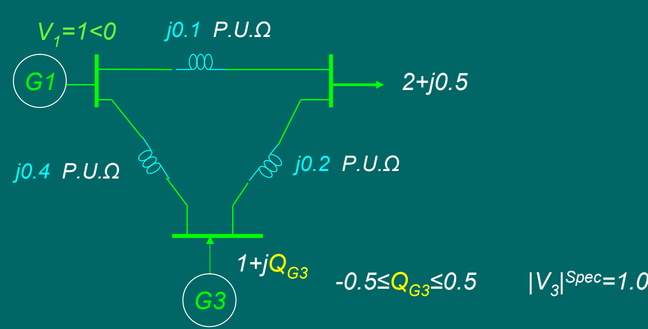
$$\Delta=1.3^2-4\times 5K_I>0$$

$$K_I<0.0845$$

244

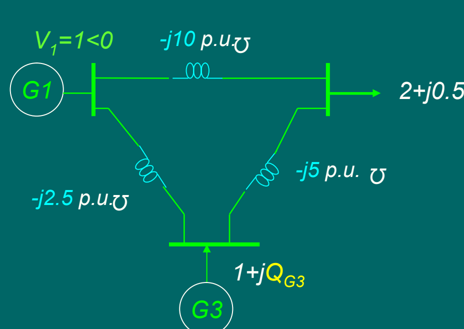
تمرین

در شکل زیر باس 3 از نوع کنترل ولتاژ است. ولتاژ باسها را با استفاده از پخش بار نیوتن-رافسون و پس از یک مرحله تکرار بدست آورید.



245

حل: ابتدا محاسبه ماتریس ادمیتانس:



$$Y_{bus}=\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -j12.5 & j10 & j2.5 \\ j10 & -j15 & j5 \\ j2.5 & j5 & -j7.5 \end{bmatrix}$$

246

تمرین

هزینه افزونی تولید انرژی دو نیروگاه یک سیستم قدرت عبارتست از:

$IC_1 = 800 + P_1 \quad for \quad 300 \le P_1 \le 600$

$IC_2 = 600 + P_2 \quad for \quad 500 \le P_2 \le 800$

اگر بار کل سیستم 1000 مگاوات باشد،

الف) توزیع اقتصادی بار بین دو نیروگاه را محاسبه کنید.

ب) اگر بار بطور مساوی بین دو نیروگاه تقسیم شود، در هر ساعت چقدر زیان خواهیم داشت؟

حل:

247

حل الف)

$$IC_1 = 800 + P_1 = \lambda \quad \Rightarrow \quad P_1 = \lambda - 800$$

$$IC_2 = 600 + P_2 = \lambda \quad \Rightarrow \quad P_2 = \lambda - 600$$

$$P_1 + P_2 = P_D \quad \Rightarrow \quad (\lambda - 800) + (\lambda - 600) = 1000 \quad \Rightarrow \quad \lambda = 1200$$

$$\begin{cases} P_1 = \lambda - 800 = 1200 - 800 = 400 \quad Mw \\ P_2 = \lambda - 600 = 1200 - 600 = 600 \quad Mw \end{cases}$$

چون هر دو توان در محدوده های مجازشان هستند، جوابهای بهینه قابل قبول اند.

248

حل ب)

$$C_1 = \int IC_1 dP_1 = \int (800 + P_1) dP_1 = 800P_1 + 0.5P_1^{\,2} + k_1$$

$$C_2 = \int IC_2 dP_2 = \int (600 + P_2) dP_2 = 600P_2 + 0.5P_2^{\,2} + k_2$$

$$C = C_1(P_1) + C_2(P_2)$$

$$\Delta C = [C_1(500) + C_2(500)] - [C_1(400) + C_2(600)] =$$

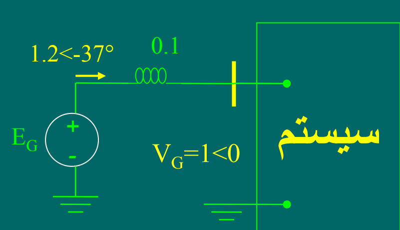
$$\Delta C = [(800 \times 500 + 0.5(500)^2 + k_1) + (600 \times 500 + 0.5(500)^2 + k_2)] -$$
$$[(800 \times 400 + 0.5(400)^2 + k_1) + (600 \times 600 + 0.5(600)^2 + k_2)] =$$
$$= [525000 + 425000] - [400000 + 540000] = 10000$$

249

تمرین

یک ژنراتور با راکتانس $0.1^{P.u.}$ در ولتاژ ترمینال $1^{pu}<0$ و جریان $1.2<-37°$ یک سیستم را تغذیه می‌کند. در این هنگام یک اتصال کوتاه سه فاز متقارن بی واسطه در ترمینالهای ژنراتور رخ می دهد. جریان اتصال کوتاه چقدر است؟

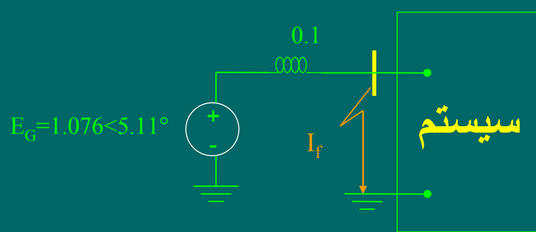
حل: در قبل از اتصال کوتاه:



$$E_G = 1 < 0 + j0.1(1.2 < -37^\circ) = 1.076 < 5.11^\circ$$

250

در بعد از اتصال کوتاه:



$$I_f = \frac{1.076 < 5.11^\circ}{j0.1} = 10.76 < 84.89$$

251

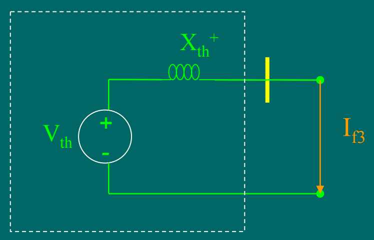
تمرین

یک ژنراتور با راکتانس $0.1^{P.u.}$ در ولتاژ ترمینال $1^{pu}<0$ و جریان $1.2<-37^\circ$ یک سیستم را تغذیه می‌کند. در این هنگام یک اتصال کوتاه سه فاز متقارن با امپدانس اتصال کوتاه $Z_f=j0.05^{Pu}$ در ترمینالهای ژنراتور رخ می دهد. جریان اتصال کوتاه چقدر است؟

252

تمرین

یک سیستم قدرت بی بار مفروض است. در یکی از باسهای این سیستم، یک اتصال کوتاه سه فاز متقارن بی واسطه رخ می دهد و جریان اتصال کوتاه *5A* برقرار میشود. اگر در همان باس و در همان شرایط به جای اتصال کوتاه متقارن، اتصال کوتاه بی واسطه دو فاز به هم رخ دهد؛ جریان اتصال کوتاه چقدر خواهد شد؟ امپدانس مولفه های مثبت و منفی همه عناصر سیستم با هم مساوی هستند.



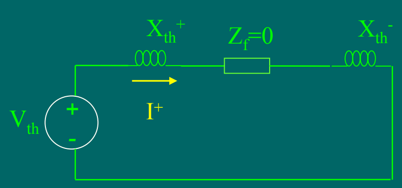
حل: مدار معادل در اتصال کوتاه سه فاز:

$$\left|I_{f3}\right| = \left|\frac{V_{th}}{jX_{th}^{+}}\right| = 5 \quad \Rightarrow \quad \left|\frac{V_{th}}{X_{th}^{+}}\right| = 5$$

253

ادامه حل:

مدار معادل در اتصال کوتاه دو فاز به هم:



$$\left|I^{+}\right| = \left|\frac{V_{th}}{jX_{th}^{+} + jX_{th}^{-}}\right| = \left|\frac{V_{th}}{jX_{th}^{+} + jX_{th}^{+}}\right| = \frac{1}{2}\left|\frac{V_{th}}{X_{th}^{+}}\right| = \frac{1}{2}\times 5$$

$$I^{+} = \frac{jI_{f2}}{\sqrt{3}} \quad \Rightarrow \quad I_{f2} = -j\sqrt{3}I^{+}$$

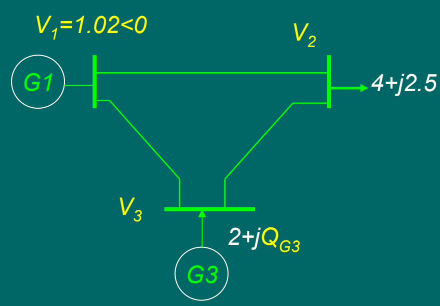
$$\left|I_{f2}\right| = \left|-j\sqrt{3}I^{+}\right| = \sqrt{3}\left|I^{+}\right| = \sqrt{3}\left(\frac{1}{2}\times 5\right)$$

$$\left|I_{f2}\right| = \frac{\sqrt{3}}{2}\left|I_{f3}\right|$$

نتیجه : در شرایطی شبیه مساله فوق، جریان اتصال کوتاه دو فاز *√3/2* برابر جریان اتصال کوتاه سه فاز است.

254

تمرین



در سیستم قدرت شکل مقابل باس 1، باس مبنا است. با استفاده از روش نیوتن رافسون و پس از یک مرحله تکرار تعیین کنید که ژنراتور 3 چقدر توان راکتیو باید تولید کند تا ولتاژ باس 3 در مقدار 1.01^{pu} کنترل شود؟ ماتریس ادمیتانس سیستم عبارت است از:

$$Y_{bus}=\begin{bmatrix} -j50 & j20 & j30 \\ j20 & -j52 & j32 \\ j30 & j32 & -j62 \end{bmatrix}$$

255

حل:

محاسبه توانهای تزریقی باسها:

$P_2^{sch} = P_{G2} - P_{D2} = 0 - 4 = -4$

$P_3^{sch} = P_{G3} - P_{D3} = 2 - 0 = 2$

$Q_2^{sch} = Q_{G2} - Q_{D2} = 0 - 2.5 = -2.5$

$Q_3^{sch} = Q_{G3} - Q_{D3} = Q_{G3} - 0 = Q_{G3}$

تکرار اول:

$V_1 = 1.02 < 0$ $\quad V_2 = 1 < 0$ $\quad V_3 = |V_3|^{spec} = 1.01 < 0$

$$f_{p2}^{(0)} = \sum_{k=1}^{n} |y_{2k}|.|V_2|.|V_k|\cos(\delta_2-\delta_k-\theta_{2k})$$
$$= |y_{21}|.|V_2|.|V_1|.\cos(\delta_2-\delta_1-\theta_{21}) + |y_{22}|.|V_2|.|V_2|.\cos(\delta_2-\delta_2-\theta_{22}) + |y_{23}|.|V_2|.|V_3|.\cos(\delta_2-\delta_3-\theta_{23})$$
$$= 20\times1\times1.02\times\cos(0-0-90) + 52\times1\times1\times\cos(0-0+90) + 32\times1\times1.01\times\cos(0-0-90)$$
$$= 0$$

$$f_{q2}^{(0)} = \sum_{k=1}^{n} |y_{2k}|.|V_2|.|V_k|\sin(\delta_2-\delta_k-\theta_{2k})$$
$$= 20\times1\times1.02\times\sin(0-0-90) + 52\times1\times1\times\sin(0-0+90) + 32\times1\times1.01\times\sin(0-0-90)$$
$$= -0.4$$

256

ادامه حل:

$$f_{p3}^{(0)}=\sum_{k=1}^{n}|y_{3k}|.|V_3|.|V_k|\cos(\delta_3-\delta_k-\theta_{3k})$$
$$=|y_{31}|.|V_3|.|V_1|.\cos(\delta_3-\delta_1-\theta_{31})+|y_{32}|.|V_3|.|V_2|.\cos(\delta_3-\delta_2-\theta_{32})+|y_{33}|.|V_3|.|V_3|.\cos(\delta_3-\delta_3-\theta_{33})$$
$$=30\times1.01\times1.02\times\cos(0-0-90)+32\times1.01\times1\times\cos(0-0-90)+62\times1.01\times1.01\times\cos(0-0+90)$$
$$=0$$

$$f_{q3}^{(0)}=\sum_{k=1}^{n}|y_{3k}|.|V_3|.|V_k|\sin(\delta_3-\delta_k-\theta_{3k})$$
$$=|y_{31}|.|V_3|.|V_1|.\sin(\delta_3-\delta_1-\theta_{31})+|y_{32}|.|V_3|.|V_2|.\sin(\delta_3-\delta_2-\theta_{32})+|y_{33}|.|V_3|.|V_3|.\sin(\delta_3-\delta_3-\theta_{33})$$
$$=30\times1.01\times1.02\times\sin(0-0-90)+32\times1.01\times1\times\sin(0-0-90)+62\times1.01\times1.01\times\sin(0-0+90)$$
$$=0.020$$

$Q_3^{sch} = f_{q3}^{(0)} = 0.02 = Q_{G3}$

$$\Delta P_2 = P_2^{sch} - f_{p2}^{(0)} = -4-0=-4$$
$$\Delta P_3 = P_3^{sch} - f_{p3}^{(0)} = 2-0=2$$
$$\Delta Q_2 = Q_2^{sch} - f_{q2}^{(0)} = -2.5-(-0.4)=-2.1$$
$$\Delta Q_3 = Q_3^{sch} - f_{q3}^{(0)} = 0.02-0.02=0$$

257

ادامه حل:

$$\begin{bmatrix}\Delta P_2\\ \Delta P_3\\ \Delta Q_2\\ \Delta Q_3=0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}H_{22} & H_{23} & N_{22} & N_{23}\\ H_{32} & H_{33} & N_{32} & N_{33}\\ J_{22} & J_{23} & L_{22} & L_{23}\\ J_{32} & J_{33} & L_{32} & L_{33}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\delta_2\\ \Delta\delta_3\\ \dfrac{\Delta|V_2|}{|V_2|^{(0)}}\\ \dfrac{\Delta|V_3|}{|V_3|^{(0)}}=0\end{bmatrix}$$

$$H_{22}=-f_{q2}^{(0)}-B_{22}|V_2|^2=-0.4-(-52)\times(1)^2=51.6$$
$$H_{33}=-f_{q3}^{(0)}-B_{33}|V_3|^2=-(0.02)-(-62)\times(1.01)^2=63.2262$$
$$H_{23}=|y_{23}|.|V_2|.|V_3|\sin(\delta_2-\delta_3-\theta_{23})=32\times1\times1.01\times\sin(0-0-90)=-32.32$$
$$H_{32}=|y_{32}|.|V_3|.|V_2|\sin(\delta_3-\delta_2-\theta_{32})=32\times1.01\times1\times\sin(0-0-90)=-32.32$$
$$N_{22}=f_{p2}^{(0)}+G_{22}|V_2|^2=0+0\times1^2=0$$
$$N_{32}=|y_{32}|.|V_3|.|V_2|\cos(\delta_3-\delta_2-\theta_{32})=32\times1.01\times1\times\cos(0-0-90)=0$$
$$J_{22}=f_{p2}^{(0)}-G_{22}|V_2|^2=0-0\times1^2=0$$
$$J_{23}=-|y_{23}|.|V_2|.|V_3|\cos(\delta_2-\delta_3-\theta_{23})=32\times1\times1.01\times\cos(0-0-90)=0$$
$$L_{22}=f_{q2}^{(0)}-B_{22}|V_2|^2=(-0.4)-(-52)\times(1)^2=51.6$$

258

ادامه حل:

$$\begin{bmatrix}\Delta P_2\\ \Delta P_3\\ \Delta Q_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}H_{22} & H_{23} & N_{22}\\ H_{32} & H_{33} & N_{32}\\ J_{22} & J_{23} & L_{22}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta\delta_2\\ \Delta\delta_3\\ \dfrac{\Delta|V_2|}{|V_2|^{(0)}}\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}-4\\ 2\\ -2.1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}51.6 & -32.32 & 0\\ -32.32 & 63.2262 & 0\\ 0 & 0 & 51.6\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\Delta\delta_2\\ \Delta\delta_3\\ \dfrac{\Delta|V_2|}{|V_2|^{(0)}}\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\Delta\delta_2\\ \Delta\delta_3\\ \dfrac{\Delta|V_2|}{|V_2|^{(0)}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}51.6 & -32.32 & 0\\ -32.32 & 63.2262 & 0\\ 0 & 0 & 51.6\end{bmatrix}^{-1}\cdot\begin{bmatrix}-4\\ 2\\ -2.1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-0.0849\\ -0.0118\\ -0.0407\end{bmatrix}$$

$$\delta_2^{new}=\delta_2^{old}+\Delta\delta_2=0+(-0.0849)=-0.0849rad=4.864^\circ$$
$$\delta_3^{new}=\delta_3^{old}+\Delta\delta_3=0+(-0.0118)=-0.0118rad=0.676^\circ$$
$$|V_2|^{new}=|V_2|^{old}+\Delta|V_2|=1+(-0.0407)\times 1=0.9593$$
$$|V_3|^{new}=|V_3|^{spec}=1.01$$
$$V_2=0.9593<4.864^\circ \qquad V_3=1.01<0.676^\circ$$

259

ادامه حل:

$$\delta_2^{new}=\delta_2^{old}+\Delta\delta_2=0+(-0.0849)=-0.0849rad=4.864^\circ$$
$$\delta_3^{new}=\delta_3^{old}+\Delta\delta_3=0+(-0.0118)=-0.0118rad=0.676^\circ$$
$$|V_2|^{new}=|V_2|^{old}+\Delta|V_2|=1+(-0.0407)\times 1=0.9593$$
$$|V_3|^{new}=|V_3|^{spec}=1.01$$
$$V_2=0.9593<4.864^\circ \qquad V_3=1.01<0.676^\circ$$

$$Q_3^{sch}=\sum_{k=1}^{n}|y_{3k}|.|V_3|.|V_k|\sin(\delta_3-\delta_k-\theta_{3k})$$
$$=|y_{31}|.|V_3|.|V_1|.\sin(\delta_3-\delta_1-\theta_{31})+|y_{32}|.|V_3|.|V_2|.\sin(\delta_3-\delta_2-\theta_{32})+|y_{33}|.|V_3|.|V_3|.\sin(\delta_3-\delta_3-\theta_{33})$$
$$=30\times1.01\times1.02\times\sin(0.676-0-90)+32\times1.01\times0.9593\times\sin(0.676-4.864-90)+62\times1.01\times1.01\times\sin(0.676-0.676+90)$$
$$=1.4206$$
$$Q_3^{sch}=Q_{G3}-Q_{D3} \quad\Rightarrow\quad Q_{G3}=Q_3^{sch}+Q_{D3}=1.4206+0=1.4206$$

260

تمرین

توابع هزینه افزونی سه نیروگاه بصورت زیر است. در صورتیکه مجموع بار مصرفی سه نیروگاه 1500 مگاوات باشد، توزیع اقتصادی بار بین سه نیروگاه را به روش مستقیم بدست آورید.

$IC_1 = 800 + P_1 \qquad 200 \le P_1 \le 600\ Mw$

$IC_2 = 600 + P_2 \qquad 300 \le P_2 \le 700\ Mw$

$IC_3 = 700 + P_3 \qquad 100 \le P_3 \le 400\ Mw$

حل:

$$IC_1 = IC_2 = IC_3 = \lambda \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} P_1 = \lambda - 800 \\ P_2 = \lambda - 600 \\ P_3 = \lambda - 700 \end{cases}$$

$$P_1 + P_2 + P_3 = P_D$$

$$(\lambda - 800) + (\lambda - 600) + (\lambda - 700) = 1500$$

$$\lambda = 1200$$

$$\begin{cases} P_1 = \lambda - 800 = 1200 - 800 = 400 \\ P_2 = \lambda - 600 = 1200 - 600 = 600 \\ P_3 = \lambda - 700 = 1200 - 700 = 500 > P_3^{\max} = 400 \quad \Rightarrow \quad P_3 = P_3^{\max} = 400 \end{cases}$$

در محدوده مجاز قرار دارد.

در محدوده مجاز قرار دارد.

261

ادامه حل:

$$P'_D = P_D - P_3 = 1500 - 400 = 1100$$

$$P_1 + P_2 = P'_D$$

$$(\lambda' - 800) + (\lambda' - 600) = 1100$$

$$\lambda' = 1250$$

$$\begin{cases} P_1 = \lambda' - 800 = 1250 - 800 = 450 \\ P_2 = \lambda' - 600 = 1250 - 600 = 650 \end{cases}$$

در محدوده مجاز قرار دارد.

در محدوده مجاز قرار دارد.

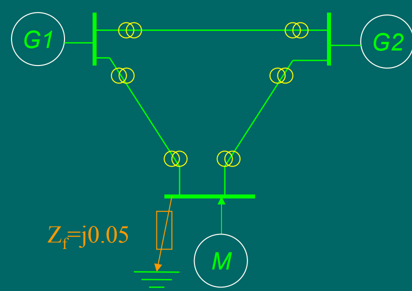
جوابهای بهینه:

$P_1^{opt} = 450 \qquad P_2^{opt} = 650 \qquad P_3^{opt} = 400$

262

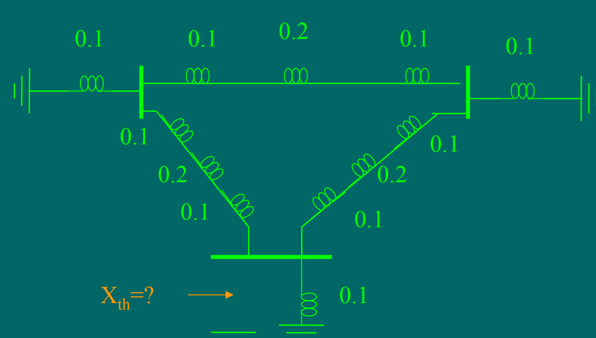
تمرین

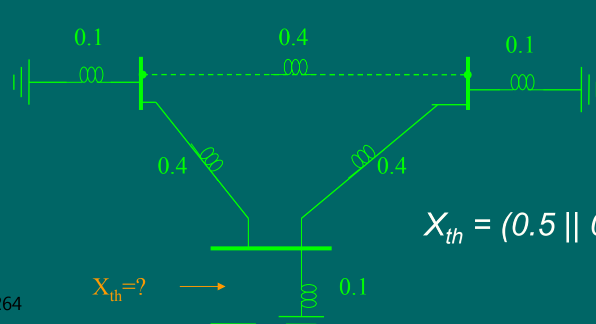
در سیستم قدرت شکل راکتانس همه خطوط 0.2 و راکتانس ژنراتورها و موتور M و راکتانس همه ترانسها 0.1 پریونیت است. یک اتصال کوتاه سه فاز متقارن با امپدانس $z_f=j0.05$ در باس متصل به موتور رخ می دهد. شبکه در قبل از اتصال کوتاه بی بار و ولتاژ همه باسها $1^{pu}<0$ فرض می‌شوند. مطوبست محاسبه جریان اتصال کوتاه I_f ؟



263

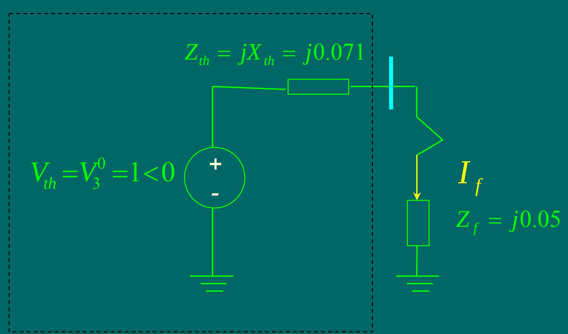
حل:





$X_{th} = (0.5 \,||\, 0.5) \,||\, 0.1 = 0.071$

264



$$I_f = \frac{V_{th}}{Z_{th} + Z_f} = \frac{1<0}{j0.071 + j0.05} = -j8.264$$

265

تمرین

توابع هزینه و محدودیتهای تولید دو نیروگاه یک سیستم قدرت عبارتست از:

$C_1 = 1 + P_1 \quad \text{for} \quad 1 \le P_1 \le 3$

$C_2 = 1 + 2P_2 \quad \text{for} \quad 0.5 \le P_2 \le 2$

اگر بار کل سیستم 3 واحد باشد و تلفات صرفنظر شود، توزیع اقتصادی بار بین دو نیروگاه را محاسبه کنید. حل:

$$IC_1 = \frac{\partial C_1}{\partial P_1} = 1 \qquad IC_2 = \frac{\partial C_2}{\partial P_2} = 2$$

$$IC_1 < IC_2 \quad \Rightarrow \quad P_1 = P_1^{max} = 3$$

$$P_2 = P_D - P_1 = 3 - 3 = 0 < P_2^{min} \quad \Rightarrow \quad P_2 = P_2^{min} = 0.5$$

$$P_1 = P_D - P_2 = 3 - 0.5 = 2.5$$

$$P_1^{opt} = 2.5 \qquad P_2^{opt} = 0.5$$

266

تمرین

- یک ژنراتور 50 درصد توان ماکزیمم خود را توسط یک خط انتقال به باس بی نهایت می دهد. اتصال کوتاهی در سیستم رخ می دهد بطوریکه راکتانس بین ژنراتور و باس بی نهایت به 4 برابر مقدار آن در قبل از اتصال کوتاه می رسد. هنگامیکه اتصال کوتاه با قطع کلید مربوطه برطرف می شود، حداکثر توان انتقالی به 0.75 برابر توان ماکزیمم اصلی می رسد. زاویه بحرانی رفع اتصال کوتاه را محاسبه کنید.

حل:

$$p_m = 0.50 P_{\max}$$

$$\Pr efault: \quad P_{e1} = P_{\max}\sin\delta$$

$$during\_fault: \quad P_{e2} = \frac{P_{\max}}{4}\sin\delta = 0.25 P_{\max}\sin\delta$$

$$Post\_fault: \quad P_{e3} = 0.75 P_{\max}\sin\delta$$

267

تمرین

در یک سیستم قدرت با سه ژنراتور داریم:

$P_{G1} = 60\ IC_1 - 100$ for $50 \le P_{G1} \le 150$

$P_{G2} = 40\ IC_2 - 150$ for $50 \le P_{G2} \le 150$

$P_{G3} = 40\ IC_3 - 80$ for $50 \le P_{G3} \le 150$

اگر بار کل سیستم 400 مگاوات باشد، توزیع اقتصادی بار بین سه ژنراتور را با روش تکرار λ و با شروع از $\lambda=5$ بیابید.

حل:

$$IC_1 = IC_2 = IC_3 = \lambda$$

$$\begin{cases} P_{G1} = 60 IC_1 - 100 = 60\lambda - 100 \\ P_{G2} = 40 IC_2 - 150 = 40\lambda - 150 \\ P_{G3} = 50 IC_1 - 80 = 50\lambda - 80 \end{cases}$$

268

ادامه حل:

$$\lambda=5 \Rightarrow \begin{cases} P_{G1}=60\times 5-100=200>P_{G1}^{\max}=150 \Rightarrow P_{G1}=P_{G1}^{\max}=150 \\ P_{G2}=40\times 5-150=50 \\ P_{G3}=50\times 5-80=170>P_{G2}^{\max}=150 \Rightarrow P_{G3}=P_{G3}^{\max}=150 \end{cases}$$

$$\sum P_G=150+50+150=350<P_D=400 \Rightarrow increase\_\lambda$$

$$\lambda=6 \Rightarrow \begin{cases} P_{G1}=60\times 6-100=260>P_{G1}^{\max}=150 \Rightarrow P_{G1}=P_{G1}^{\max}=150 \\ P_{G2}=40\times 6-150=90 \\ P_{G3}=50\times 6-80=220>P_{G2}^{\max}=150 \Rightarrow P_{G3}=P_{G3}^{\max}=150 \end{cases}$$

$$\sum P_G=150+90+150=390<P_D=400 \Rightarrow increase\_\lambda$$

$$\begin{array}{ll} \lambda & \sum P_G \\ 5 & 350 \\ 6 & 390 \\ \lambda & 400 \end{array} \Rightarrow \lambda=6.25$$

$$\lambda=6.25 \Rightarrow \begin{cases} P_{G1}=60\times 6.25-100=275>P_{G1}^{\max}=150 \Rightarrow P_{G1}=P_{G1}^{\max}=150 \\ P_{G2}=40\times 6.25-150=100 \\ P_{G3}=50\times 6.25-80=232.5>P_{G2}^{\max}=150 \Rightarrow P_{G3}=P_{G3}^{\max}=150 \end{cases}$$

$$\sum P_G=150+100+150=400=P_D=400 \Rightarrow \begin{cases} P_{G1}^{opt}=150 \\ P_{G2}^{opt}=100 \\ P_{G3}^{opt}=150 \end{cases}$$

269