



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
مجمع آموزش عالی گناباد



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
مجمع آموزش عالی گناباد

« به نام خدا »

تحلیل سیستم های قدرت ۲

دکتر امین رنجبران

عضویت علمی مجتمع آموزش عالی گناباد



بررسی سیستم های قدرت ۲

دکتر امین رنجبران

به نام خدا

به فصل دوم:

۱- تجزیه و تحلیل پخش بار Load Flow study ← پخش بار نیون لئون و روش کبراشه روش کبرا وسیع شده

۲- اتصال کوتاه متقارن symmetrical fault or balance fault ← اتصال سه فاز هم

۳- اتصال کوتاه نامتقارن unsymmetrical or unbalance ← } ۱- تک فاز زمین L-G
۲- دو فاز هم L-L
۳- سه فاز زمین L-L-G

۴- پایداری گذرا transient stability

۵- کنترل سیم های قدرت (کنترل ولتاژ و فرکانس)

منابع:

۱- بزرگی سیم های قدرت: جلد اول دوم تألیف Hadi Saadat ترجمه: احمد کاظمی شهرام حبیبی - حمید علی شایانز

۲- سیم های قدرت الکتریکی تألیف: احمد کاظمی

3- Electrical Power system

by: D. Das

4- Power system Analysis

by: Grainger & Stevenson

Y_{ii} : جمع مقادیر ادسیانس‌های عناصری که مستقیماً بهش متصل است.

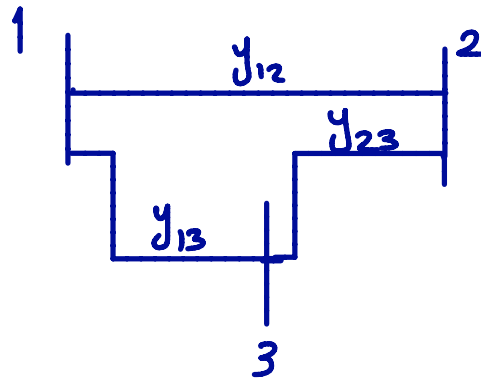
Y_{ij} : منفی جمع ادسیانس‌های که مستقیماً بینشین ازج قرار دارند.

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

↓
ماتریس ادسیانس
شین‌ها

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

↓
ماتریس امپدانس
شین‌ها



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

ماتریس Y_{bus} متقارن است. $\leftarrow Y_{ij} = Y_{ji}$

انواع шин از دید مساله پخش بار

۱- شين اصلي (شين اسك) Main Bus - slack Bus - Swing Bus

شين شادري است براي برقراري تعادل توليد و مصرف در پايان كالبات با توجه به كسود توليد و تلفات انتقال الكترو

۲- شين مرجع Reference Bus

شين با زاويه ولتاژ همروانرازه ولتاژ نك. چون بقيه ولتاژها فزيه هانبت بر آن منجديه ميگردد.

۳- شين هاي كنترل شده Regulated buses - Controlled Bus (PV)

شين هاي كه اندازه ولتاژ آن ثابت است معمولاً شين هاي ژنراتوري بزرگ شين اول از اين نوع هستند.

۴- شين مصرفي يا بار: Load Bus (PQ)

اين شين در شين هاي PQ هم دردم هستند و داراي ژنراتور نمي باشند.

معمولاً شين اسك مرجع را در شين يك شين در نظر مي گيرند.

باس slack در ايران به درزا است كه نيررگاه كاردين نير با آن استفاده ميگردد.

↓
6 x 65 MW

معادلات پخش بار Load flow equations

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

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

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



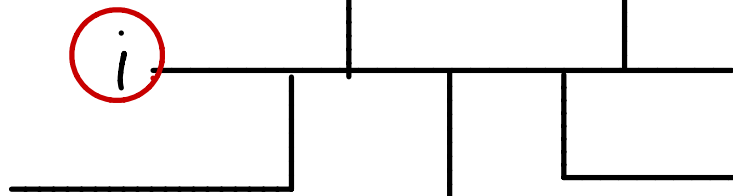
$2n$ معادله نیاز داریم

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

معادله بیخس بار:

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

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



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

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

$$I_i = I_{G_i} - I_{D_i}$$

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

توان الکتریکی

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

(II)

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

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

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

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

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij}V_j \right]$$

نرم لحظه معادله بیخس بار \rightarrow روش گوس

$$P_{i-j} Q_i = V_i^* \cdot \sum_{j=1}^n Y_{ij} \cdot V_j = \sum_{j=1}^n V_i^* Y_{ij} V_j$$

$$V_i \triangleq |V_i| \angle \delta_i, \quad V_j \triangleq |V_j| \angle \delta_j$$

$$Y_{ij} \triangleq |Y_{ij}| \angle \theta_{ij}$$

$$P_{i-j} Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \angle (-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) =$$

$$P_{i-j} Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \cos(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) + j \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij})$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \cos(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij})$$

$$\cos(-\alpha) = \cos \alpha$$

$$\sin(-\alpha) = -\sin \alpha$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij})$$

مجهولات $|V_i|, \delta_i$

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

$j = 2, \dots, n$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

فرم قطبی معادلات بخش بار

نکته: در روش نیوتن-رافسون $N-R$ از فرم قطبی معادلات استفاده می‌شود.

روش نیوتن - رافسون $N-R$:

روش برای حل معادلات جبری و غیر خطی است. این روش مبتنی بر تکرار است یعنی از یک نقطه شروع شده و با چندین تکرار به جواب می رسد. فریت این روش سرعت در رسیدن به جواب و همگرایی است. عمده آن وابستگی به نقطه شروع است یعنی اگر نقطه شروع بدی انتخاب نشود ممکن است رگورتم و اگر شود.

$$f(x) = c$$

موضوع اصلی ریشه معادله فوق را با روش $N-R$ بدست می آوریم

$$f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)}) = c$$

$x^{(0)}$ تخمین اولیه یا مقدار اولیه است.

$$x^{(0)} \Rightarrow f(x^{(0)}) + \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x=x^{(0)}} \Delta x^{(0)} + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \Big|_{x=x^{(0)}} \Delta x^{(0)^2} + \dots = c$$

چون Δx مقدار کمی است ← از Δx^2 به بعد صرف نظر می شود.

$$\Delta x^{(0)} = \frac{c - f(x^{(0)})}{\frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x=x^{(0)}}} = \frac{\Delta c^{(0)}}{j^{(0)}}$$

ژاکوبین \rightarrow

$$j^{(k)} = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x=x^{(k)}}$$

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \Delta x^{(0)}$$

$$\Rightarrow \Delta x^{(k)} = \frac{\Delta c^{(k)}}{j^{(k)}} \Rightarrow$$

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

سوال: ریشه معادله زیر را با روش نیوتن - رافسون بدست آورید؟ فرض کنید $x^{(0)} = 6$

$$f(x) = x^3 - 6x^2 + 9x - 4$$

$$f(x) = c = 0$$

$$f(6) = 6^3 - 6 \times 6^2 + 9 \times 6 - 4 = 50$$

$$\Delta c^{(0)} = c - f(x^{(0)}) = -50$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = 3x^2 - 12x + 9 \Rightarrow j^{(0)} = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x^{(0)}} = 45 =$$

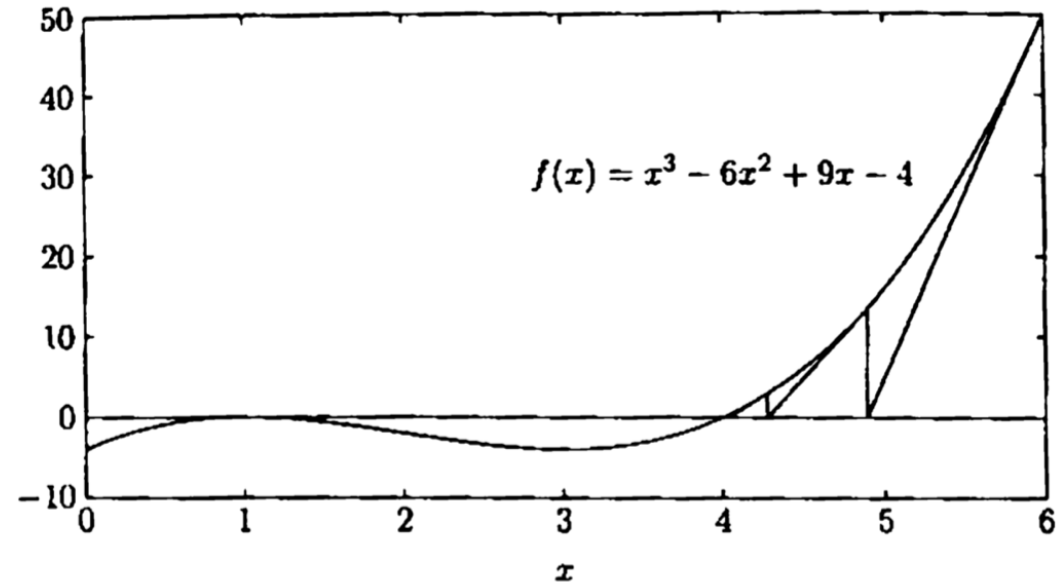
$$\Delta x^{(0)} = \frac{\Delta c^{(0)}}{j^{(0)}} = \frac{-50}{45} = -1.111 \Rightarrow x^{(1)} = x^{(0)} + \Delta x^{(0)} = 6 - 1.111 = 4.889$$

$$x^{(2)} = x^{(1)} + \Delta x^{(1)} = 4.8889 - \frac{13.4431}{22.037} = 4.2789$$

$$x^{(3)} = x^{(2)} + \Delta x^{(2)} = 4.2789 - \frac{2.9981}{12.5797} = 4.0405$$

$$x^{(4)} = x^{(3)} + \Delta x^{(3)} = 4.0405 - \frac{0.3748}{9.4914} = 4.0011$$

$$x^{(5)} = x^{(4)} + \Delta x^{(4)} = 4.0011 - \frac{0.0095}{9.0126} = 4.0000$$



روش $N-R$ برای حل n معادله با n مجهول:

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1$$

$$f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_2$$

\vdots

$$f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_n$$

$$(f_1)^{(0)} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} = c_1$$

$$(f_2)^{(0)} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} = c_2$$

$$(f_n)^{(0)} + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} = c_n$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} c_1 - (f_1)^{(0)} \\ c_2 - (f_2)^{(0)} \\ \vdots \\ c_n - (f_n)^{(0)} \end{bmatrix}}_{\Delta C} = \underbrace{\begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^{(0)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(0)} \end{bmatrix}}_{J^{(0)}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix}}_{\Delta X^{(k)}}$$

$$\Delta C^{(k)} = J^{(k)} \Delta X^{(k)} \implies \Delta X^{(k)} = (J^{(k)})^{-1} \cdot \Delta C^{(k)}$$

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

سؤال: با استفاده از روش نیوتن

$$\begin{aligned} f_1 &= x_1^2 - x_2^2 + x_3^2 = 11 \\ f_2 &= x_1 x_2 + x_2^2 - 3x_3 = 3 \\ f_3 &= x_1 - x_1 x_3 + x_2 x_3 = 6 \end{aligned}$$

$$x_1^{(0)} = x_2^{(0)} = x_3^{(0)} = 1$$

$$J = \begin{bmatrix} 2x_1 & -2x_2 & 2x_3 \\ x_2 & x_1 + 2x_2 & -3 \\ 1 - x_3 & x_3 & -x_1 + x_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} f_1^{(0)} &= 1 \\ f_2^{(0)} &= -1 \\ f_3^{(0)} &= 1 \end{aligned} \quad \Delta C^{(0)} = \begin{bmatrix} 10 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix}$$

$$j^{(0)} = \begin{bmatrix} 2 & -2 & 2 \\ 1 & 3 & -3 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1^{(1)} \\ \Delta x_2^{(1)} \\ \Delta x_3^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -2 & 2 \\ 1 & 3 & -3 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 10 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.75 \\ 6 \\ 6.25 \end{bmatrix}$$

$$x_1^{(1)} = 1 + 5.75 = 6.75$$

$$x_2^{(1)} = 1 + 6 = 7$$

$$x_3^{(1)} = 1 + 6.25 = 7.25$$

حل معادلات پخش بار به روش N-R

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

مرحله اول: تعیین مقادیر اولیه ولتاژ pu

$V_i^{(0)} = 1 \angle 0^\circ$

مرحله دوم: با استفاده از مقادیر مرحله قبل $\Delta P_i^{(k)}$ و $\Delta Q_i^{(k)}$ محاسبه می‌کنیم

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{Sch} - P_i^{Cal(k)} \quad , \quad \Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{Sch} - Q_i^{Cal(k)}$$

مرحله سوم: محاسبه ماتریس ژاکوبین $J^{(k)}$

مرحله چهارم: محاسبه مقادیر $\Delta \delta^{(k)}$ از رابطه $\Delta V_i^{(k)}$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(k)} \\ \Delta |V|^{(k)} \end{bmatrix} = [J^{(k)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix}$$

مرحله پنجم: محاسبه مقادیر جدید ولتاژ

$$\delta^{(k+1)} = \delta^{(k)} + \Delta \delta^{(k)} \quad , \quad |V|^{(k+1)} = |V|^{(k)} + \Delta |V|^{(k)}$$

مرحله ششم: بررسی شرط همگرایی

- ابعاد ماتریس ژاکوبین فرض کنید n باشد.

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}$$

اگر نقطه‌ها PQ داشته باشیم ابعاد ماتریس $(n-1)(n-1)$ است. ژاکوبین مشابه J است.

حال اگر در شبکه n باشد، m باشد PV کنترل ولتاژ داشته باشیم، مثلاً بخش بار به روش $R-N$ و مجزائاً چه تغییری خواهد کرد.

در باس PV چون اندازه ولتاژ V معلوم است، Q مجهول است پس در ماتریس ژاکوبین متغیرهای متناظر با Q ها باس های PV حذف شوند همچنین متغیر با متغیر ولتاژ نیز حذف می‌گردد.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} \dots \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial V_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} \dots \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} \dots \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial V_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} \dots \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix}$$

ابعاد ماتریس ژاکوبین $(2n-m-2)(2n-m-1)$
 $[J_1]_{(n-1)(n-1)}$ $[J_2]_{(n-1)(n-m-1)}$
 $[J_3]_{(n-m-1)(n-1)}$ $[J_4]_{(n-m-1)(n-m-1)}$

اگر از n باس، m باس را کن از نوع PV باشند:

در این صورت، چون در باس‌ها PV، اندازه ولتاژ معلوم است بنابراین نتونیم هایی که نسبت به اندازه ولتاژ باس های PV مشتق گرفته شود در ماتریس ژاکوبین حذف می‌گردند.

همچنین در باس‌ها PV، توان را کنترل نمی‌کنیم، بنابراین سطرهای متناظر با باس‌ها PV که از Q نسبت به V مشتق گرفته می‌شود حذف می‌شود.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial V_n} \\ \vdots & & & & & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial V_n} \\ \vdots & & & & & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix}$$

۱-۲- بخش باربروش نبراشه

$$\begin{bmatrix} \Delta S \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial S} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial S} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

Decouple

درستیم های قدرت حسابت P به S زیاد رزبت به V کم است $\leftarrow \frac{\partial P}{\partial V}$
 و حسابت توان را لیتو Q به V زیاد و به S کم است $\leftarrow \frac{\partial Q}{\partial S}$
 بنابراین در توان ماتریس های V_2 و V_3 را در ماتریس تراکوبین صفر در نظر گرفت.

$$\begin{bmatrix} \Delta S \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial S} & 0 \\ 0 & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial S} & 0 \\ 0 & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta S \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow [\Delta P] = \left[\frac{\partial P}{\partial S} \right] [\Delta S] \Rightarrow [\Delta S] = \left[\frac{\partial P}{\partial S} \right]^{-1} [\Delta P]$$

$$\Rightarrow [\Delta Q] = \left[\frac{\partial Q}{\partial V} \right] [\Delta V] \Rightarrow [\Delta V] = \left[\frac{\partial Q}{\partial V} \right]^{-1} [\Delta Q]$$

مراحل روش جزائیه:

۱- تخمین مقادیر اولیه ولتاژ $V_i^{(0)} = 1 \text{ pu}$

۲- محاسبه مقادیر $\Delta P_i^{(k)}$ ، $\Delta Q_i^{(k)}$ (مابقی $N-R$)

۳- محاسبه ماتریس ژاکوبین J_1, J_4

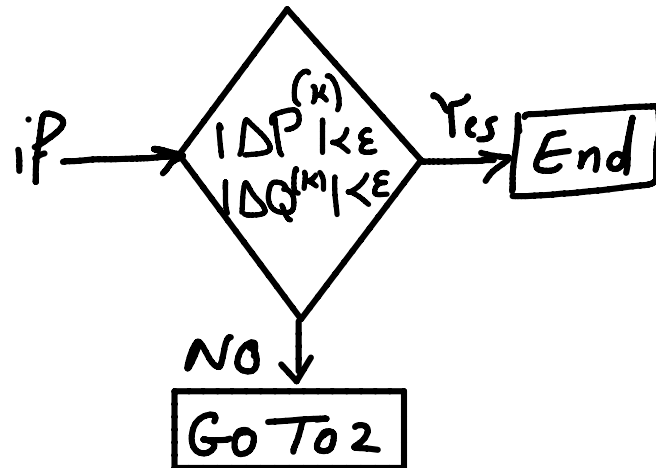
$$[\Delta \delta^{(k)}] = \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right]^{-1} [\Delta P^{(k)}]$$

$$[\Delta |V|^{(k)}] = \left[\frac{\partial Q}{\partial |V|} \right]^{-1} [\Delta Q^{(k)}]$$

۴- محاسبه مقادیر جدید ولتاژ

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)}, \quad |V_i|^{(k+1)} = |V_i|^{(k)} + \Delta |V_i|^{(k)}$$

۵- بررسی شرط همگرایی



روش پخش بار برای سریع شده: Fast Decouple

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_1 & 0 \\ 0 & j_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad j_1 = \frac{\partial P}{\partial \delta}, \quad j_4 = \frac{\partial Q}{\partial |V|}$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n -|V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = \sum_{j=1}^n -|V_i| |Y_{ij}| \sin(-\theta_{ij})$$

فرضیات ساده سازی:
 $|V_j| \approx 1 \text{ pu}$
 $\delta_i - \delta_j \ll \theta_{ij}$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = |V_i| |Y_{ij}| \sin(-\theta_{ij})$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + j B_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + j |Y_{ij}| \sin \theta_{ij}$$

$$\theta_{ij} = \tan^{-1} \frac{B_{ij}}{G_{ij}}$$

$$X \gg R \Rightarrow \theta_{ij} \gg 1$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n B_{ij} |V_i| = |V_i| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n B_{ij} = -|V_i| B_{ii}$$

$$B_{bus} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \dots & B_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{i1} & B_{i2} & \dots & B_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{n1} & B_{n2} & \dots & B_{nn} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| B_{ij}$$

$$Y_{bus} = G_{bus} + j B_{bus} \uparrow$$

ماتریس B همان ماتریس B_{bus} است که در این لحاظ اول بستن لود کن حذف نمود. B' $-|V_i|$ $[j_i] = \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right]$

تحت موهومی ماتریس B_{bus}

$$[\Delta \delta] = [B']^{-1} \left[\frac{\Delta P}{|V|} \right]$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |Y_{ij}| |V_j| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) + 2|Y_{ii}| |V_i| \sin(-\theta_{ii}) = \frac{1}{|V_i|} \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j|$$

$$\sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) - |Y_{ii}| |V_i| \sin(-\theta_{ii}) + 2|V_i| |Y_{ii}| \sin(-\theta_{ii}) = \frac{1}{|V_i|} Q_i + |V_i| |Y_{ii}| \sin(-\theta_{ii})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = \frac{1}{|V_i|} Q_i - |V_i| B_{ii} = -|V_i| B_{ii} \Rightarrow \boxed{\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i| B_{ii}}$$

فرضیات ساده سازی:
 $Q_i \ll B_{ii}$ -
 $\delta_i - \delta_j \ll \theta_{ij}$ -

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = |V_i| |Y_{ij}| \sin(-\theta_{ij}) = -|V_i| B_{ij} \Rightarrow \boxed{\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| B_{ij}}$$

$$[j_4] = \left[\frac{\partial Q}{\partial |V|} \right] = -|V_i| B''$$

ماتریس B'' :
 ۱- اگر دو باس ها جز باس ۱ از نوع PQ باشند $B'' = B'$

۲- اگر m باس PV داشته باشند. به عنوان مثال باس ها PV از ماتریس B_{bus} حذف می شوند تا B'' بدست آید.

مراحل الگوریتم پخش بار به روش کج برای سریع شده:

۱- تعیین مقادیر اولیه ولتاژ $V_i^{(0)} = 1 \angle 0^\circ$

۲- محاسبه مقادیر ΔP و ΔQ

۳- محاسبه ماتریس B' و B'' با استفاده از ماتریس B_{bus}

۴- محاسبه مقادیر زاویه ولتاژ و اندازه گن با استفاده از رابطه فوق

۵- محاسبه مقادیر جدید اندازه ولتاژ و زاویه آن

۶- بررسی شرط همگرایی

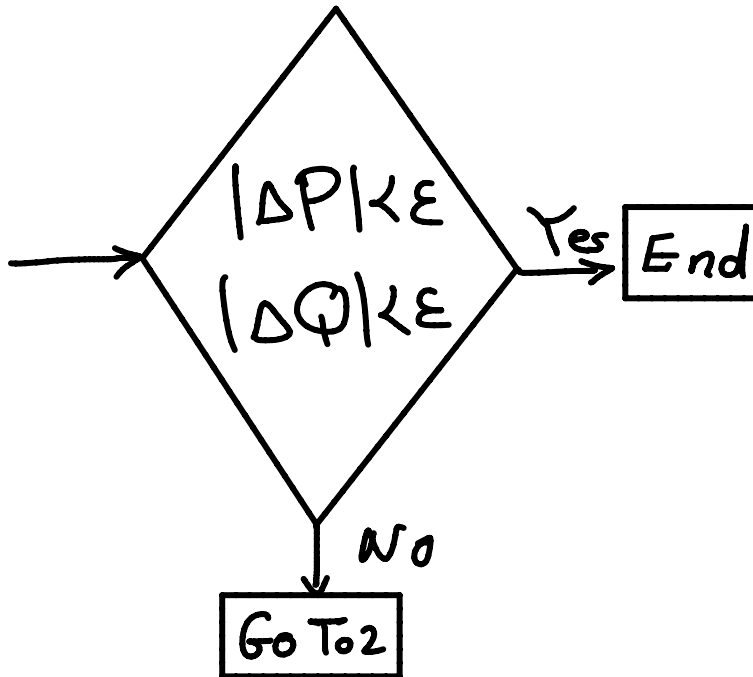
$$[\Delta \delta] = -[B']^{-1} \left[\frac{\Delta P}{|V|} \right]$$

$$[\Delta |V|] = -[B'']^{-1} \left[\frac{\Delta Q}{|V|} \right]$$

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

$$|V|^{(k+1)} = |V|^{(k)} + \Delta |V|^{(k)}$$

iP



6.12. Figure 60 shows the one-line diagram of a simple three-bus power system with generation at buses 1 and 2. The voltage at bus 1 is $V = 1.0 \angle 0^\circ$ per unit. Voltage magnitude at bus 2 is fixed at 1.05 pu with a real power generation of 400 MW. A load consisting of 500 MW and 400 Mvar is taken from bus 3. Line admittances are marked in per unit on a 100 MVA base. For the purpose of hand calculations, line resistances and line charging susceptances are neglected.

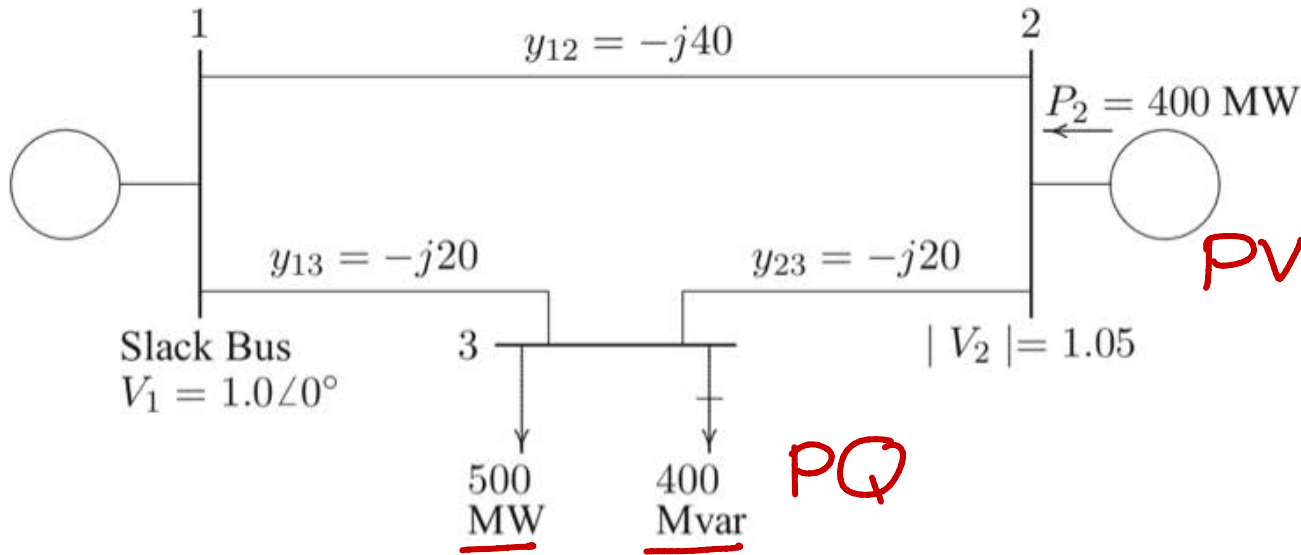


FIGURE 60
One-line diagram for problem 6.12.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} -j60 & j40 & j20 \\ j40 & -j60 & j20 \\ j20 & j20 & -j40 \end{bmatrix}$$

$$V_2^{(0)} = 1.05 \angle 0^\circ$$

$$V_3^{(0)} = 1 \angle 0^\circ$$

مرحله اول: تخمین معادله ولتاژ

$$P_2 = \sum_{j=1}^3 |V_2| |Y_{2j}| |V_j| \cos(\delta_2 - \delta_j - \theta_{2j})$$

$$Q_3 = \sum_{j=1}^3 |V_3| |Y_{3j}| |V_j| \sin(\delta_3 - \delta_j - \theta_{3j})$$

$$P_3 = \sum_{j=1}^3 |V_3| |Y_{3j}| |V_j| \cos(\delta_3 - \delta_j - \theta_{3j})$$

مرحله دوم: محاسبه ΔP_2 , ΔP_3 , ΔQ_3

$$P_2^{(0)} = 40 |V_2| |V_1| \cos(\delta_2 - \delta_1 - 90) + 60 |V_2|^2 \cos(90) + 20 |V_2| |V_3| \cos(\delta_2 - \delta_3 - 90)$$
$$P_3^{(0)} = 20 |V_3| |V_1| \cos(\delta_3 - \delta_1 - 90) + 20 |V_3| |V_2| \cos(\delta_3 - \delta_2 - 90) + 40 |V_3|^2 \cos(90)$$
$$Q_3^{(0)} = 20 |V_3| |V_1| \sin(\delta_3 - \delta_1 - 90) + 20 |V_3| |V_2| \sin(\delta_3 - \delta_2 - 90) + 40 |V_3|^2 \sin(90)$$
$$P_2^{(0)} = 0, \quad P_3^{(0)} = 0, \quad Q_3^{(0)} = -1$$

$$P_2^{sch} = \frac{400}{100} = 4.0 \text{ pu}$$

$$S_3^{sch} = -\frac{(500 + j400)}{100} = -5.0 - j4.0 \text{ pu}$$

$$\Delta P_2^{(0)} = P_2^{sch} - P_2^{(0)} = 4.0 - (0) = 4.0$$

$$\Delta P_3^{(0)} = P_3^{sch} - P_3^{(0)} = -5.0 - (0) = -5.0$$

$$\Delta Q_3^{(0)} = Q_3^{sch} - Q_3^{(0)} = -4.0 - (-1.0) = -3.0$$

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

مرحله سوم: محاسبه ماتریس ژاکوبین:

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = 40 |V_2| |V_1| \sin(\delta_2 - \delta_1 - 90) - 20 |V_2| |V_3| \sin(\delta_2 - \delta_3 - 90) = 63$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} = 20 |V_2| |V_3| \sin(\delta_2 - \delta_3 - 90) = -21$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial |V_3|} = 20 |V_2| \cos(\delta_2 - \delta_3 - 90) = 0$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} = |V_3| |Y_{32}| |V_2| \sin(\delta_3 - \delta_2 - \theta_{32}) = 1 \times 20 \times 1.05 \sin(0 - 0 - 90^\circ) = -21$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} = -|V_3| |Y_{31}| |V_1| \sin(\delta_3 - \delta_1 - \theta_{31}) - |V_3| |Y_{32}| |V_2| \sin(\delta_3 - \delta_2 - \theta_{32}) = 1 \times 20 \times 1 \sin(0 - 0 - 90^\circ) + 1 \times 20 \times 1.05 \sin(0 - 0 - 90^\circ) = -41$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_3}{\partial |V_3|} &= |Y_{31}| |V_1| \sin(\delta_3 - \delta_1 - \theta_{31}) + |Y_{32}| |V_2| \sin(\delta_3 - \delta_2 - \theta_{32}) + 2 |V_3| |Y_{33}| \sin(-\theta_{33}) \\ &= 20 \times 1 \times \sin(-90^\circ) + 20 \times 1.05 \times \sin(-90^\circ) + 2 \times 1 \times 40 \times \sin(90^\circ) = 39 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_3}{\partial |V_3|} &= |Y_{31}| |V_1| \cos(\delta_3 - \delta_1 - \theta_{31}) + |Y_{32}| |V_2| \cos(\delta_3 - \delta_2 - \theta_{32}) + 2 |V_3| |Y_{33}| \cos(-\theta_{33}) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} = -|V_3| |Y_{32}| |V_2| \cos(\delta_3 - \delta_2 - \theta_{32}) = 0$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} = -|V_3| |Y_{31}| |V_1| \cos(\delta_3 - \delta_1 - \theta_{31}) - |V_3| |Y_{32}| |V_2| \cos(\delta_3 - \delta_2 - \theta_{32}) = 0$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta \delta_3^{(0)} \\ \Delta |V_3|^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial |V_3|} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \Delta P_3^{(0)} \\ \Delta Q_3^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 63 & -21 & 0 \\ -21 & 41 & 0 \\ 0 & 0 & 39 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 4 \\ -5 \\ -3 \end{bmatrix} =$$

$$\Delta \delta_2^{(0)} = 0.0275 \text{ rad} \times \frac{180}{\pi} = 1.5782^\circ \Rightarrow \delta_2^{(1)} = \delta_2^{(0)} + \Delta \delta_2^{(0)} = 1.5782$$

$$\Delta \delta_3^{(0)} = -0.1078 \times \frac{180}{\pi} = -6.179^\circ \Rightarrow \delta_3^{(1)} = \delta_3^{(0)} + \Delta \delta_3^{(0)} = -6.179^\circ$$

$$\Delta |V_3|^{(0)} = -0.0769 \Rightarrow |V_3|^{(1)} = |V_3|^{(0)} + \Delta |V_3|^{(0)} = 1 - 0.0769 = 0.9231 \text{ pu}$$

$$V_2^{(1)} = 1.05 \angle 1.5782^\circ$$

$$V_3^{(1)} = 0.9231 \angle -6.179^\circ$$

تبرین: سگاردوم را انجام دهید.

ب) روش کجراشته:

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(0)} \\ \Delta\delta_3^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 63 & -21 \\ -21 & 41 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 4 \\ -5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0275 \\ -0.1078 \end{bmatrix}$$

$$|\Delta V_3|^{(0)} = [39]^{-1} [-3] = -0.0769$$

$$V_2^{(1)} = 1.05 \angle 1.5782^\circ$$

$$V_3^{(1)} = 0.9231 \angle -6.179^\circ$$

$$\delta_2^{(1)} = \delta_2^{(0)} + \Delta\delta_2^{(0)} = 1.5782$$

$$\delta_3^{(1)} = \delta_3^{(0)} + \Delta\delta_3^{(0)} = -6.179^\circ$$

$$|V_3|^{(1)} = |V_3|^{(0)} + \Delta|V_3|^{(0)} = 1 - 0.0769 = 0.9231 \text{ pu}$$

$$Y_{bus} = G_{bus} + jB_{bus}$$

ج) روش کجرای سریع شده:

$$B_{bus} = \begin{bmatrix} -60 & 40 & 20 \\ 40 & -60 & 20 \\ 20 & 20 & -40 \end{bmatrix}$$

$$B' = \begin{bmatrix} -60 & 20 \\ 20 & -40 \end{bmatrix}$$

$$B'' = [-40]$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(0)} \\ \Delta\delta_3^{(0)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} -60 & 20 \\ 20 & -40 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{4}{1.05} \\ \frac{-5}{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0262 \\ -0.1119 \end{bmatrix}$$

$$|\Delta V_3|^{(0)} = -[-40]^{-1} \left[\frac{-3}{1} \right] = -0.075$$

$$\delta_2^{(1)} = 0 + 0.0262 = 0.0262 \text{ rad}$$

$$\delta_3^{(1)} = 0 - 0.1119 = -0.1119 \text{ rad}$$

$$|V_3|^{(1)} = 1 - 0.075 = 0.925 \text{ pu}$$

فصل دوم

اتصال کوتاه متقارن

نصل دم: خطاهای متقارن: symmetrical faults or balance faults

مطالعات خطا تعیین و تاثیراتین ها و جریان خطوط در حین انواع خطاها

خطاها

- ۱- خطاهای متقارن یا متعادل balance or symmetrical ← اتصال کوتاه، سه فاز به هم
- ۲- نامتقارن یا نامتعادل unbalanced or unsymmetrical ←

- ۱- تک فاز به زمین LLG
- ۲- دو فاز بهم LL
- ۳- سه فاز به زمین LLLG

اطلاعات بدست آمده از مطالعات خطا تنظیم و محاسبات مناسب برها

به منظور تعیین ظرفیت قدرت قطع کلبه ها

عوامل سه اثرش اتصال کوتاه:

- ۱- عوامل مکانیکی: فوش باد - پارگی سیم ها - ضربه به کابل
- ۲- عوامل حرارتی: گرمای بیش از حد باعث خرابی عایق بین دو نقطه می گردد.
- ۳- الکتریکی: چنانچه ولتاژ اعمال به عایق بیش از اندازه گردد، باعث شکست عایق می گردد. شکست عایق توسط میدان الکتریکی انجام می شود. $E = -\nabla V$

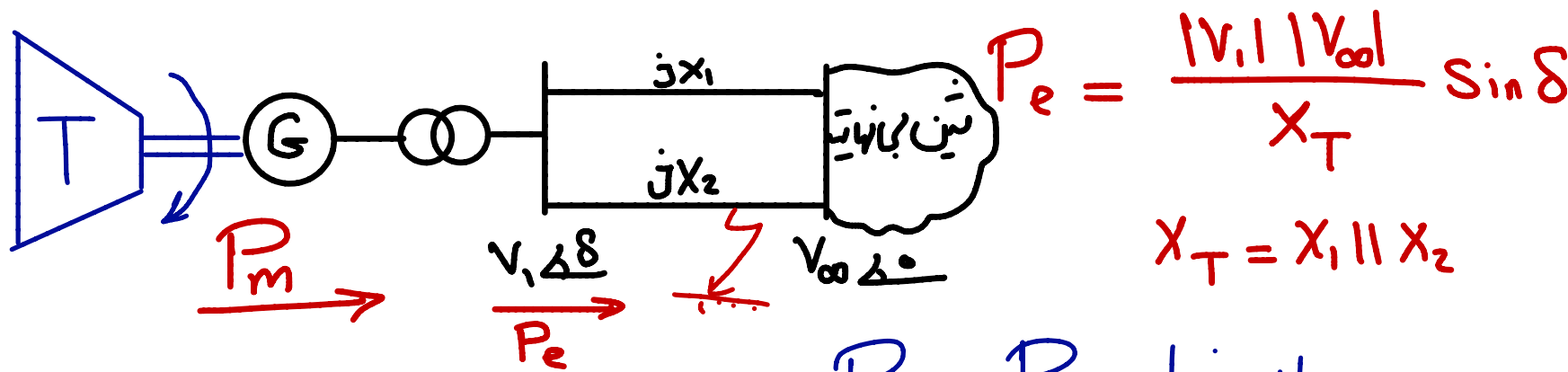
آثار سوء اتصال کوتاه :

۱- ایجاد گرمای بیش از حد به واسطه جریان زیاد و صد زدن به تجهیزات

۲- نیروهای الکتریکی و مغناطیسی در اثر جریان زیاد و ...

۳- عدم انتقال توان و انرژی به مصرف کنندگان به واسطه افت ولتاژ شبکه

۴- انباشت انرژی در ریزاتورها به واسطه عدم انتقال توان به مرکز مصرف و در نتیجه ناپایداری آنها ← پایداری کمتر



در حالت بدون خطا $P_m = P_e$ در صورت وقوع خطا به دلیل افت ولتاژ P_e کاهش می یابد در حالی که توان مکانیکی به دلیل انرژی آل

توان آن تغییری نمی کند بنابراین

می شود و سبب ناپایداری گذار ریزاتورها می شود

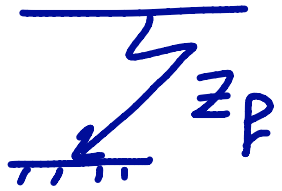
$$P_{acc} = P_m - P_e \quad (\text{توان اشتاب رهنده}) \quad \text{در ریزاتورها نجات می دهد}$$

رفتار زلزله تورنتون در مطالعات خطا:

- ۱- دوره زیر گذر: چند سیکل اول جریان اتصال کوتاه. راکتانس زیر گذر X_d'' ← برآیند ظرفیت تقاع کلیدها
- ۲- دوره گذر: حدود ۳ سیکل بعدی. راکتانس گذر X_d' ← مطالعات خطا تنظیم رها نمی رها و یا به لاری گذر
- ۳- حالت ماندگار: زمان بعد از گذر X_d (راکتانس تورنتون)

انواع خطا:

- ۱- خطای امپدانس: $Z_f = R_f + jX_f$
- ۲- خطای مستقیم: Bolted or Solid Faults: $Z_f = 0$



دلایل و ضرورت انجام مابا اتصال کوتاه:

- ۱- محاسبه حداکثر جریان عبوری از تجهیزات به منظور طراحی مناسب آنها در مقابل نیروها حرارت ایجاد شده.
- ۲- محاسبه جریان های نقاط مختلف شبکه به منظور طراحی سیستم های حفاظتی
- ۳- لزوم ایمنی یا به لاری زلزله تورنتون
- ۴- محاسبه سطح اتصال کوتاه. شناسایی و قدرت تقاع کلیدها

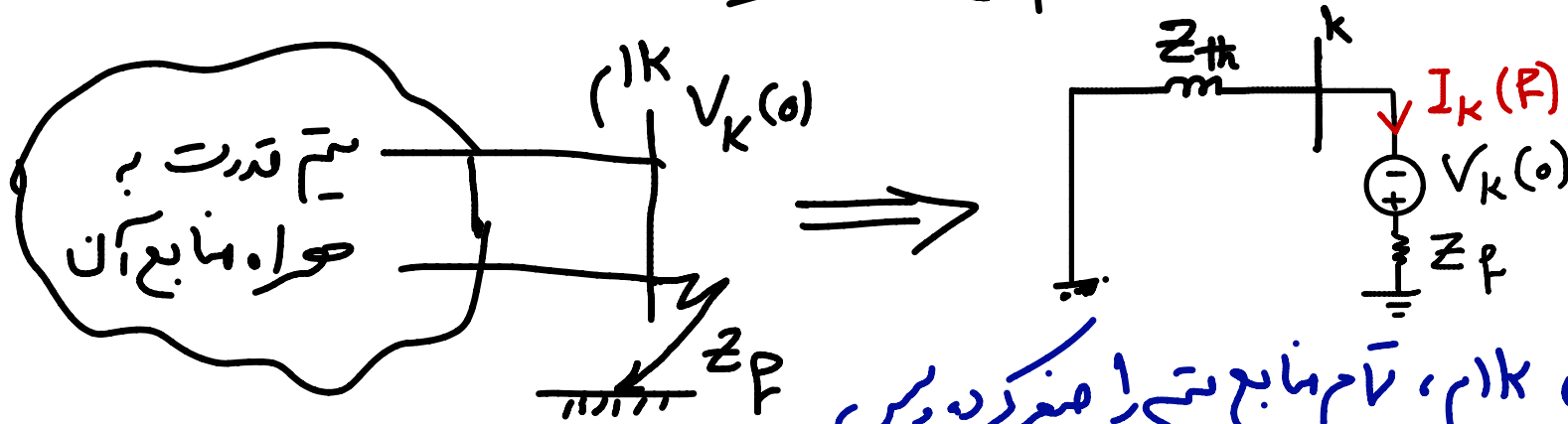
روش محاسبات اتصال کوتاه:

۱- روش تونین

۲- استفاده از ماتریس امپدانس تونین ها Z_{bus}^{Fault}

۱- روش تونین:

هرگاه در نقطه‌ای از سیستم اتصال کوتاه رخ دهد، برای محاسبه آن می‌توان در نقطه اتصال کوتاه، منبع ولتاژها را با اندازه و ولتاژ اولیه (قبل از اتصال کوتاه) اما با پلارته مستقیم قرار داد و تمام منابع ولتاژ و جریان شبکه را حذف نمود.



$$I_k(F) = \frac{V_k(0)}{Z_f + Z_{mk}}$$

برای محاسبه Z_{mk} از تونین k ام، تمام منابع ولتاژ را صفر کرده و پس امپدانس تونین را از تونین k ام محاسبه می‌کنیم.

$$Z_{mk} = Z_{kk}$$

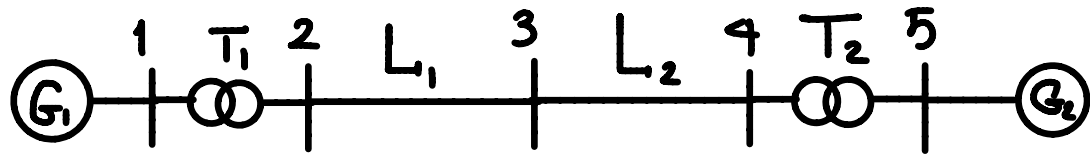
برای محاسبه اتصال کوتاه با استفاده از روش تونن می‌توانیم فرضیات ساده زیر را در نظر بگیریم:

۱- از مقاومت اهمی کلیه عناصر شبکه صرف نظر می‌شود.

$$Z_{th} = \cancel{R_{th}} + jX_{th} = jX_{th}$$

پس از شرایط بار زلزله‌ای قبل از وقوع خطا صرف نظر می‌شود. در نتیجه ولتاژ اولیه قبل از خطا را 1 pu در نظر می‌گیریم.

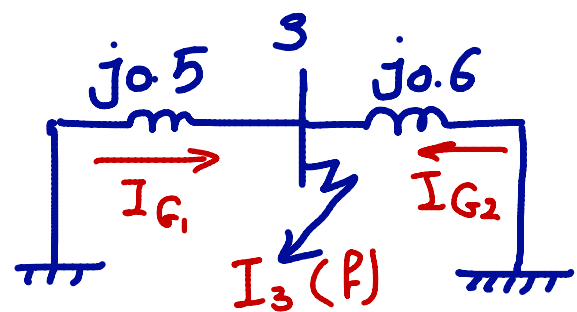
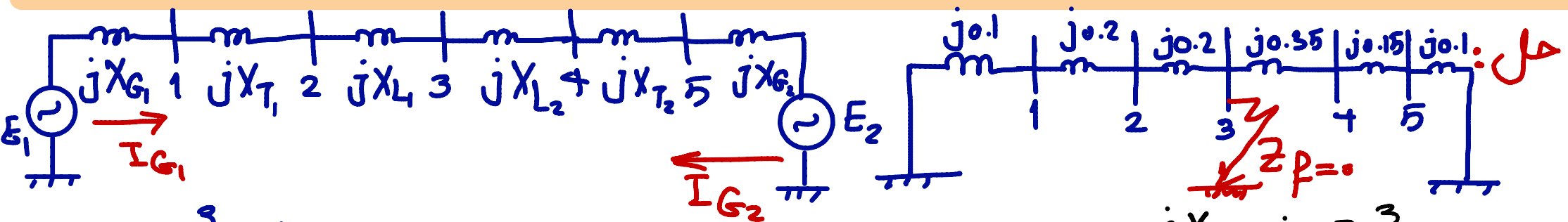
$$V_k(t) = 1 \text{ pu} \Rightarrow I_k(p) = \frac{V_k(t)}{j(X_p + X_{th})} = -j \frac{1}{X_p + X_{th}}$$



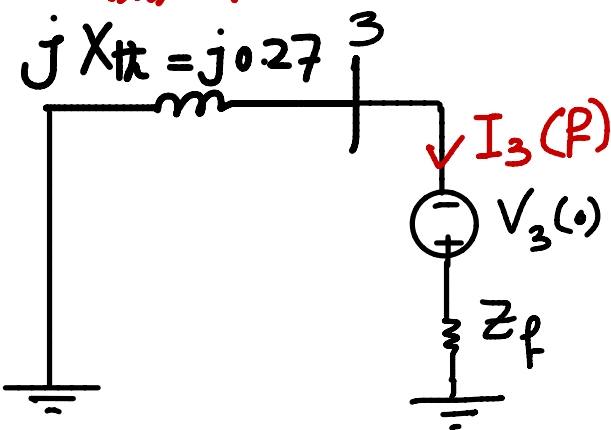
مثال: $X_{G_1} = X_{G_2} = 0.1, X_{T_1} = 0.2$

$X_{L_1} = 0.2, X_{L_2} = 0.35, X_{T_2} = 0.15$

چنانچه خطای اتصال کوتاه مستقیم در بین ۳ رخ دهد، جریان خطا، ولتاژ بین ها و جریان عبوری از خطوط را حین خطا محاسبه نماید.



$$X_{33} = X_{th} = \frac{0.5 \times 0.6}{0.5 + 0.6} = 0.27$$



$$I_3(p) = \frac{1}{j0.27} = -j3.7 \text{ pu}$$

$$V_3(p) = Z_p \cdot I_3(p) = 0$$

$$I_{G_1} = \frac{0.6}{1.1} - j3.7 = -j2.02$$

$$V_2(p) = j0.2 I_{G_1} + V_3 = 0.404 \text{ pu}$$

$$V_1(p) = j0.2 I_{G_1} + V_2 = 0.808 \text{ pu}$$

$$I_{G_2} = \frac{0.5}{1.1} - j3.7 = -j1.68$$

$$V_4(p) = j0.35 I_{G_2} + V_3 = 0.588 \text{ pu}$$

$$V_5(p) = j0.15 I_{G_2} + V_4 = 0.84 \text{ pu}$$

روش دوم: محاسبات اتصال کوتاه با استفاده از ماتریس $Z_{bus \text{ fault}}$

$$Z_{bus}^F = [Y_{bus}^F]^{-1}$$

$$Z_{bus}^F = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{k1} & \dots & Z_{kk} & \dots & Z_{kn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & \dots & Z_{nk} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix}$$

Z_{ii} این ترمینال در
شین نام

اگر خط در شین k ام رخ دهد:

$$\begin{bmatrix} V_1(f) \\ \vdots \\ V_k(f) \\ \vdots \\ V_n(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1(0) \\ \vdots \\ V_k(0) \\ \vdots \\ V_n(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{k1} & \dots & Z_{kk} & \dots & Z_{kn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & \dots & Z_{nk} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_k(f) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

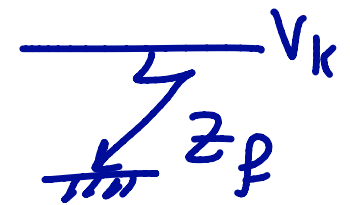
$$V_i(0) = 1 \text{ pu} \quad i=1, \dots, n$$

ولتاژ شین ها قبل از خطا

ولتاژ شین ها
پسین خطا

$$\Rightarrow V_k(f) = V_k(0) - Z_{kk} I_k(f) \quad (1)$$

$$V_k(f) = Z_f \cdot I_k(f) \quad (2)$$



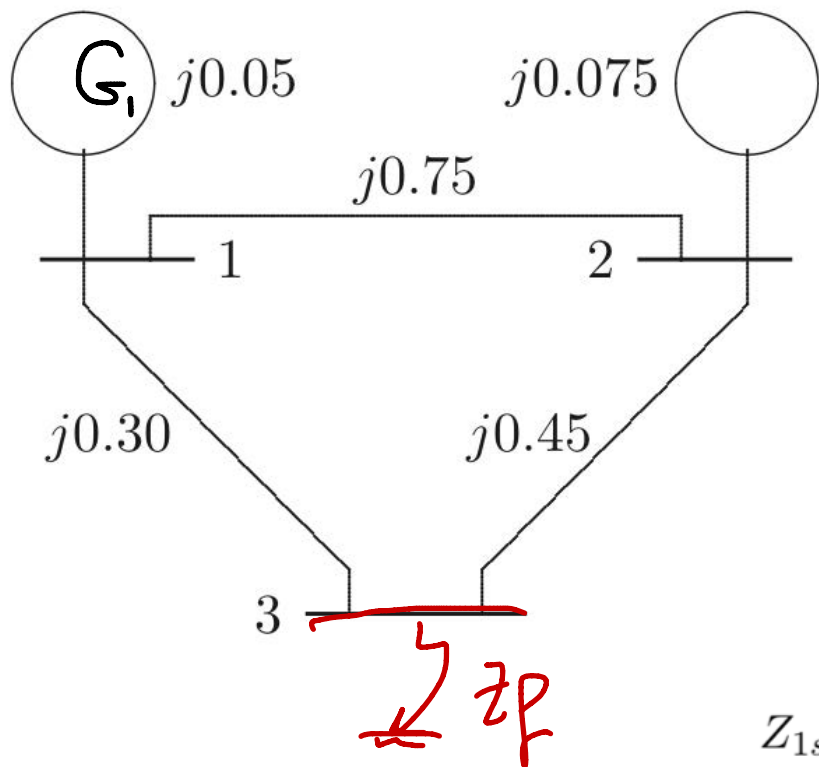
$$(1), (2) \Rightarrow Z_f \cdot I_k(f) = V_k(0) - Z_{kk} I_k(f) \Rightarrow$$

$$I_k(f) = \frac{V_k(0)}{Z_f + Z_{kk}}$$

$$V_i(f) = V_i(0) - Z_{ik} I_k(f), \quad i=1, 2, \dots, n$$

میان خطا در شین k ام

ولتاژ شین ها پسین خطا



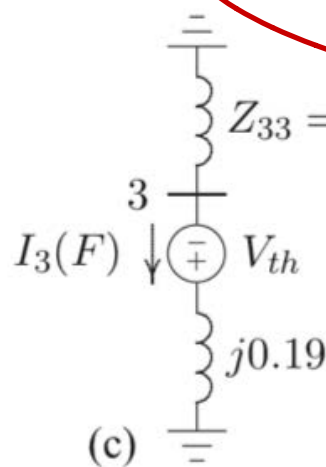
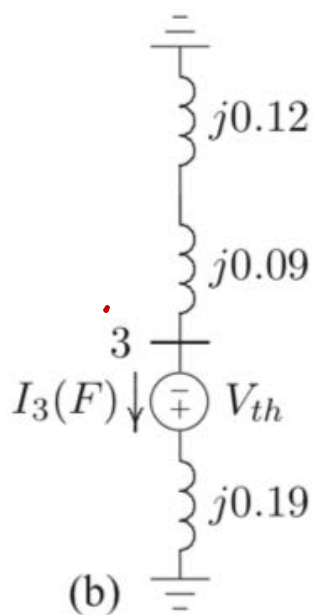
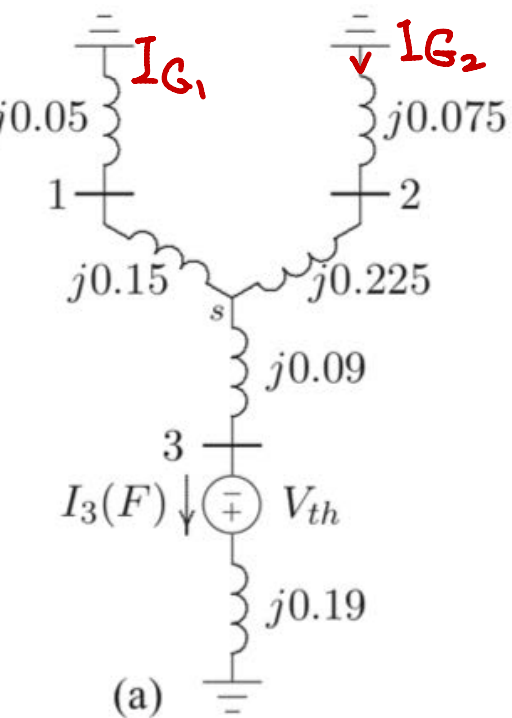
مثال: خطا در شین ۳ با امپدانس $Z_f = 0.19j$ رخ داده است. مطلوب است:
 الف) با استفاده از قضیه تونن مقدار جریان خطا را بدست آورید؟
 ب) با استفاده از امپدانس خطا جریان خطا و ولتاژ شین ها و جریان عبوری از خطوط را بدست آورید؟

$$Z_{1s} = \frac{(j0.3)(j0.75)}{j1.5} = j0.15 \quad Z_{2s} = \frac{(j0.75)(j0.45)}{j1.5} = j0.225$$

$$Z_{3s} = \frac{(j0.3)(j0.45)}{j1.5} = j0.09$$

$$Z_{th} = Z_{33} = \frac{(j0.2)(j0.3)}{j0.2 + j0.3} + j0.09$$

$$= j0.12 + j0.09 = j0.21$$



$$I_3(F) = \frac{V_3(\theta)}{Z_{33} + Z_f} = \frac{1.0}{j0.21 + j0.19} = -j2.5 \text{ pu}$$

$$I_{G1} = \frac{j0.3}{j0.2 + j0.3} I_3(F) = -j1.5 \text{ pu}$$

$$I_{G2} = \frac{j0.2}{j0.2 + j0.3} I_3(F) = -j1.0 \text{ pu}$$

$$\Delta V_1 = 0 - (j0.05)(-j1.5) = -0.075 \text{ pu}$$

$$\Delta V_2 = 0 - (j0.075)(-j1) = -0.075 \text{ pu}$$

$$\Delta V_3 = (j0.19)(-j2.5) - 1.0 = -0.525 \text{ pu}$$

$$V_1(F) = V_1(0) + \Delta V_1 = 1.0 - 0.075 = 0.925 \text{ pu}$$

$$V_2(F) = V_2(0) + \Delta V_2 = 1.0 - 0.075 = 0.925 \text{ pu}$$

$$V_3(F) = V_3(0) + \Delta V_3 = 1.0 - 0.525 = 0.475 \text{ pu}$$

$$V_3(F) = Z_{33} \cdot I_3(F) = 0.475 \text{ pu}$$

$$V_1(F) = Z_{1s} \cdot I_{G1} + Z_{3s} I_3(F) + V_3(F) = 0.925 \text{ pu}$$

$$V_2(F) = Z_{2s} I_{G2} + Z_{3s} I_3(F) + V_3(F) = 0.925 \text{ pu}$$

$$I_{12}(F) = \frac{V_1(F) - V_2(F)}{z_{12}} = \frac{0.925 - 0.925}{j0.75} = 0 \text{ pu}$$

$$I_{13}(F) = \frac{V_1(F) - V_3(F)}{z_{13}} = \frac{0.925 - 0.475}{j0.3} = -j1.5 \text{ pu}$$

$$I_{23}(F) = \frac{V_2(F) - V_3(F)}{z_{23}} = \frac{0.925 - 0.475}{j0.45} = -j1.0 \text{ pu}$$

محاسبات اتصال کوتاه متقارن با روش ماتریس Zbus

$$Y_{bus}^{-1} = Z_{bus} = j \begin{bmatrix} 0.0450 & 0.0075 & 0.0300 \\ 0.0075 & 0.06375 & 0.0300 \\ 0.0300 & 0.0300 & 0.2100 \end{bmatrix}$$

$$I_3(F) = \frac{V_3(0)}{Z_{33} + Z_f} = \frac{1.0}{j0.21 + j0.19} = -j2.5 \text{ pu}$$

$$V_i(F) = V_i(0) - Z_{ik} I_k(F)$$

$$V_1(F) = V_1(0) - Z_{13} I_3(F) = 1.0 - (j0.03)(-j2.5) = 0.925 \text{ pu}$$

$$V_2(F) = V_2(0) - Z_{23} I_3(F) = 1.0 - (j0.03)(-j2.5) = 0.925 \text{ pu}$$

$$V_3(F) = V_3(0) - Z_{33} I_3(F) = 1.0 - (j0.21)(-j2.5) = 0.475 \text{ pu}$$

$$I_{12}(F) = \frac{V_1(F) - V_2(F)}{z_{12}} = \frac{0.925 - 0.925}{j0.75} = 0 \text{ pu}$$

$$I_{13}(F) = \frac{V_1(F) - V_3(F)}{z_{13}} = \frac{0.925 - 0.475}{j0.3} = -j1.5 \text{ pu}$$

$$I_{23}(F) = \frac{V_2(F) - V_3(F)}{z_{23}} = \frac{0.925 - 0.475}{j0.45} = -j1.0 \text{ pu}$$

S.C.C (short circuit capacity) سطح اتصال کوتاه

یک معیار رسم برای استعکام شدن ها میباشد. (توانایی آن تین برای مقابله با تخریجات)
 سطح اتصال کوتاه،
 ۱. ساختمان تین ها ← الجار تین
 ۲. ظرفیت قطع کننده ها

سطح اتصال کوتاه در تین

$$S.C.C = \sqrt{3} \cdot V_{LK} \cdot I_K (F) \times 10^{-3} \text{ MVA}$$

برای آن خط تین کوم →
 لواتر خط تین کوم قبل از خط
 (kv)

$$I_K (F) = \frac{V_{K(0)}}{Z_{KK}} \Rightarrow R=0 \Rightarrow I_K (F) = \frac{V_{K(0)}}{X_{KK}} \text{ pu}$$

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} V_b} \Rightarrow I_K = I_K (p.u) \cdot I_b = \frac{V_{K(0)}}{X_{KK}} \cdot \frac{S_b \times 10^3}{\sqrt{3} V_b} \text{ A}$$

$$S.C.C = \sqrt{3} V_{LK} \cdot \frac{V_{K(0)}}{X_{KK}} \cdot \frac{S_b \times 10^3}{\sqrt{3} V_b}$$

$$V_b = V_{LK}$$

$$V_{K(0)} = 1 \text{ pu}$$

نکته: هر چه نیرال راکتانس معادل

یا تونین در تین کوم بیشتر باشد

سطح اتصال کوتاه S.C.C کمتر است و بالعکس

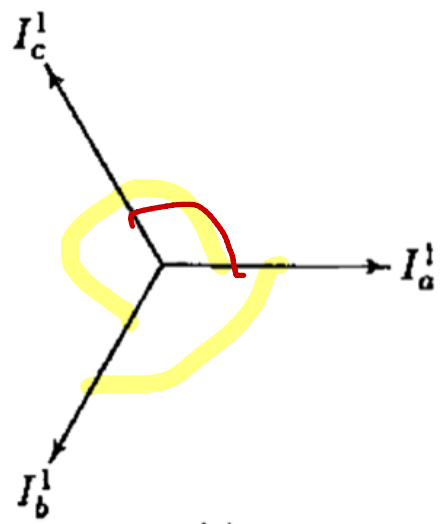
$$S.C.C = \frac{S_b}{X_{KK}} \text{ MVA}$$

$$S.C.C = \frac{1}{X_{KK}} \text{ pu}$$

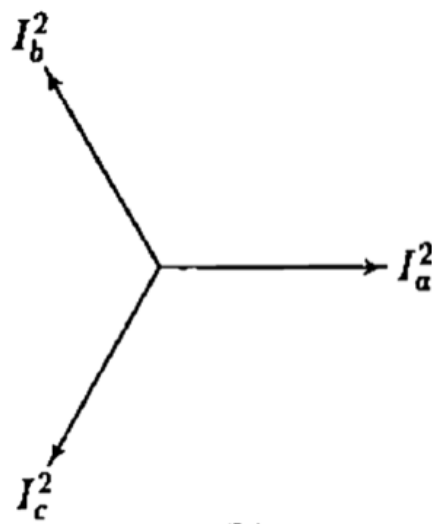
فصل سوم:

مؤلفه های متقارن و

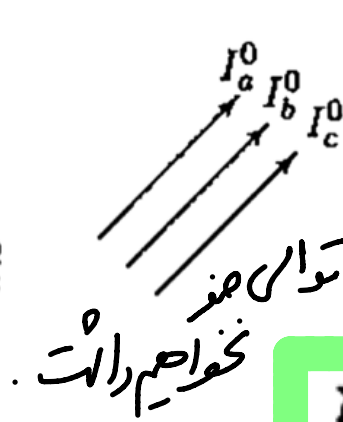
اتصال کوتاه نامتقارن



(a)



(b)



(c)

اگر سه متقارن یا متعادل باشد
نقطه مولفه توانی مثبت دارد
اگر سه بزرگن ارتباط نداشته باشد ← توانی منفی
خواص راات

$$I_a^0 = I_b^0 = I_c^0$$

توانی صفر
توانی منفی یا abc یا بار ساعتگرد
توانی مثبت یا abc یا بار معکوس

$$\begin{aligned} I_a^1 &= I_a^1 \angle 0^\circ = I_a^1 \\ I_b^1 &= I_a^1 \angle 240^\circ = a^2 I_a^1 \\ I_c^1 &= I_a^1 \angle 120^\circ = a I_a^1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a &= 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j0.866 \\ a^2 &= 1 \angle 240^\circ = -0.5 - j0.866 \\ a^3 &= 1 \angle 360^\circ = 1 + j0 \end{aligned}$$

توانی منفی

$$\begin{cases} I_a^2 = I_a^2 \angle 0^\circ = I_a^2 \\ I_b^2 = I_a^2 \angle 120^\circ = a I_a^2 \\ I_c^2 = I_a^2 \angle 240^\circ = a^2 I_a^2 \end{cases}$$

$$1 + a + a^2 = 0$$

$$I_a = I_a^0 + I_a^1 + I_a^2$$

$$I_b = I_b^0 + I_b^1 + I_b^2 = I_a^0 + a^2 I_a^1 + a I_a^2$$

$$I_c = I_c^0 + I_c^1 + I_c^2 = I_a^0 + a I_a^1 + a^2 I_a^2$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow I^{abc} = A I_a^{012}$$



$$I_a^{012} = A^{-1} I^{abc}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

ماتریس A یا S.C.M.T (ماتریس انتقال مولفه‌های متقارن)

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

خصوصیات ماتریس A

$$a_{ij} = a_{ji} \implies A^T = A \quad 1- \text{مستقلان است.}$$

$$a^* = a^2 \implies A^{-1} = \frac{1}{3} A^* \quad 2-$$

$$I_a^0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c)$$

$$I_a^1 = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c)$$

$$I_a^2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c)$$

$$V_a = V_a^0 + V_a^1 + V_a^2$$

$$V_b = V_a^0 + a^2V_a^1 + aV_a^2$$

$$V_c = V_a^0 + aV_a^1 + a^2V_a^2$$

$$V^{abc} = A V_a^{012}$$

$$V_a^0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c)$$

$$V_a^1 = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c)$$

$$V_a^2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c)$$

$$V_a^{012} = A^{-1} V^{abc}$$

توان مختلط:

$$S_{3\phi} = V_{abc}^T \cdot I_{abc}^* = (A V_a^{012})^T \cdot (A I_a^{012})^* = V_a^{012 T} \cdot A^T \cdot A^* I_a^{012*}$$

$$S_{3\phi} = V_a^{012 T} \cdot A \cdot 3 A^{-1} \cdot I_a^{*012}$$

$(AB)^T = B^T \cdot A^T$ یادآوری
 $A \cdot A^{-1} = I$ یکجا
هانی

$$S_{3\phi} = 3 V_a^{012 T} \cdot I_a^{*012} = 3 [V_a^0 \ V_a^1 \ V_a^2] \begin{bmatrix} I_a^{0*} \\ I_a^{1*} \\ I_a^{2*} \end{bmatrix}$$

$$S_{3\phi} = 3 V_a^0 I_a^{0*} + 3 V_a^1 I_a^{1*} + 3 V_a^2 I_a^{2*}$$

مثال 1: مطلوبت کاتب مولدهای متقارن از جریان های نامتقارن:

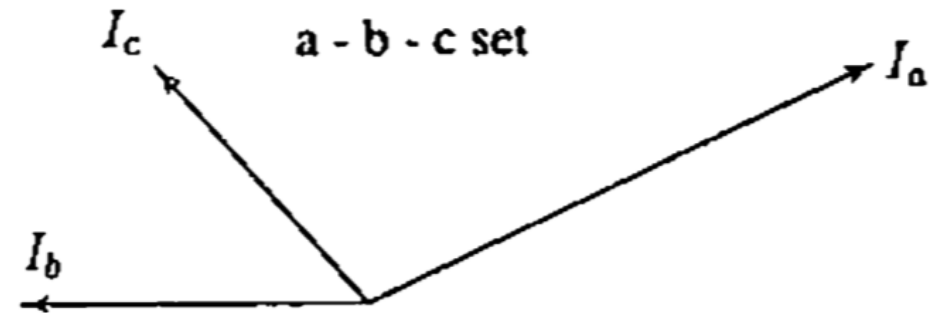
$$I_a = 1.6 \angle 25^\circ, I_b = 1 \angle 180^\circ, I_c = 0.9 \angle 132^\circ$$

$$I_a^{0/2} = A^{-1} I^{abc}$$

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.6 \angle 25^\circ \\ 1 \angle 180^\circ \\ 0.9 \angle 132^\circ \end{bmatrix}$$

$I_{012P} =$

0.4512	96.4529
0.9435	-0.0550
0.6024	22.3157



مثال ۲: مولفه‌های متقارن جریان‌های سه فاز به ترتیب زیر است. فازورهای نامتقارن اصل را به دست آورید؟

$$I_a^0 = 3 \angle -30^\circ$$

$$I_a^1 = 5 \angle 90^\circ$$

$$I_a^2 = 4 \angle 30^\circ$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} \quad I^{abc} = A I_a^{012}$$

$$I_a = 3 \angle -30^\circ + 5 \angle 90^\circ + 4 \angle 30^\circ = 8.185 \angle 42.216^\circ$$

$$I_b = 3 \angle -30^\circ + 1 \angle 290^\circ \cdot 5 \angle 90^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 4 \angle 30^\circ = 4 \angle -30^\circ$$

$$I_c = 3 \angle -30^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 5 \angle 90^\circ + 1 \angle 290^\circ \cdot 4 \angle 30^\circ = 8.185 \angle -102.216^\circ$$

امپدانس های توالی

برای بدست آوردن امپدانس توالی های مثبت، منفی و صفر کافایت آجریان های توالی را از این المان ها عبور دهیم
اگر جریان توالی مثبت عبور کند، امپدانس توالی مثبت بدست آید و اگر جریان توالی منفی عبور کند، امپدانس توالی منفی
و برای توالی صفر هم به همین صورت.

چهار المان اصلی:

۱- بار

۲- خط انتقال

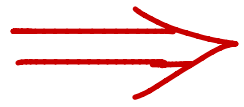
۳- ترانسفورماتور

۴- ریزانور

$$I^{abc} = A \underbrace{I_a^{012}}$$

برای کابله جریان نامستقارن

مدار معادل توالی ها مثبت،
منفی و صفر تک المان ها

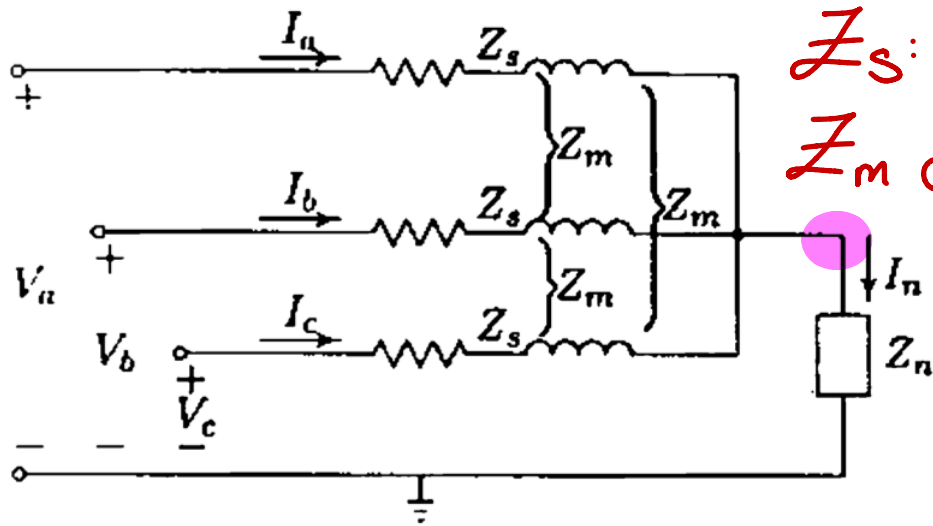


مدار معادل توالی ها
مثبت، منفی و صفر سهیم

امپدانس های توالی بار با اتصال ستاره

امپدانس خودتالی: Z_s

العاء متقابل: Z_m



$$V_a = Z_s I_a + Z_m I_b + Z_m I_c + Z_n I_n$$

$$V_b = Z_m I_a + Z_s I_b + Z_m I_c + Z_n I_n$$

$$V_c = Z_m I_a + Z_m I_b + Z_s I_c + Z_n I_n$$

$$I_n = I_a + I_b + I_c$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_m + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_s + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_m + Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

$$Z^{abc} = \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_m + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_s + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_m + Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix}$$

$$V^{abc} = Z^{abc} I^{abc} \implies A V_a^{012} = Z^{abc} A I_a^{012} \xrightarrow{\times A^{-1}} V_a^{012} = A^{-1} Z^{abc} A I_a^{012} = Z^{012} I_a^{012}$$

$$Z^{012} = A^{-1} Z^{abc} A$$

$$Z^{012} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_m + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_s + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_m + Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{matrix} V_{a^0} \\ V_{a^1} \\ V_{a^2} \end{matrix} Z^{012} = \begin{bmatrix} Z_s + 3Z_n + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_s - Z_m \end{bmatrix} Z^{012} = \begin{bmatrix} Z_s + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z_s & 0 \\ 0 & 0 & Z_s \end{bmatrix}$$

if $Z_m = 0$

$$Z^{012} = \begin{bmatrix} Z_s + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z_s & 0 \\ 0 & 0 & Z_s \end{bmatrix}$$

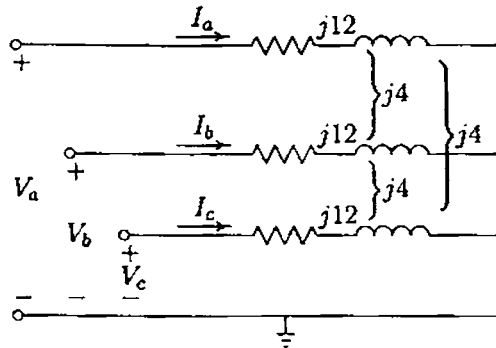
امیدانی توالی صفر $Z^0 = Z_s + 2Z_m + 3Z_n$

مثبت " " $Z^1 = Z_s - Z_m$

منفی " " $Z^2 = Z_s - Z_m$

Example 10.3

A balanced three-phase voltage of 100-V line-to-neutral is applied to a balanced Y-connected load with ungrounded neutral as shown in Figure 10.7. The three-phase load consists of three mutually-coupled reactances. Each phase has a series reactance of $Z_s = j12 \Omega$, and the mutual coupling between phases is $Z_m = j4 \Omega$.

**FIGURE 10.7**

Circuit for Example 10.3.

- (a) Determine the line currents by mesh analysis without using symmetrical components.
 (b) Determine the line currents using symmetrical components.

(a) Applying KVL to the two independent mesh equations yields

$$\begin{aligned} Z_s I_a + Z_m I_b - Z_s I_b - Z_m I_a &= V_a - V_b = |V_L| \angle \pi/6 \\ Z_s I_b + Z_m I_c - Z_s I_c - Z_m I_b &= V_b - V_c = |V_L| \angle -\pi/2 \end{aligned}$$

Also from KCL, we have

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

Writing above equations in matrix form, results in

$$\begin{bmatrix} (Z_s - Z_m) & -(Z_s - Z_m) & 0 \\ 0 & (Z_s - Z_m) & -(Z_s - Z_m) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |V_L| \angle \pi/6 \\ |V_L| \angle -\pi/2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

or in compact form

$$\mathbf{Z}_{mesh} \mathbf{I}^{abc} = \mathbf{V}_{mesh}$$

Solving the above equations results in the line currents

$$\mathbf{I}^{abc} = \mathbf{Z}_{mesh}^{-1} \mathbf{V}_{mesh}$$

The following commands

```
% (a) Solution by mesh analysis
Zs=j*12; Zm=j*4; Va = 100; VL=Va*sqrt(3);
Z= [(Zs-Zm) -(Zs-Zm) 0
    0 (Zs-Zm) -(Zs-Zm)
    1 1 1 ];
V=[VL*cos(pi/6)+j*VL*sin(pi/6)
   VL*cos(-pi/2)+j*VL*sin(-pi/2)
   0 ];
Y=inv(Z)
Iabc=Y*V; % Line currents (Rectangular form)
Iabcp=[abs(Iabc), angle(Iabc)*180/pi] % Line currents (Polar)
```

result in

Iabcp =		
	12.5	-90.0
	12.5	150.0
	12.5	30.0

(b) Using the symmetrical components method, we have

$$\mathbf{V}^{012} = \mathbf{Z}^{012} \mathbf{I}^{012}$$

where

$$\mathbf{V}^{012} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_o \\ 0 \end{bmatrix}$$

and from (10.32)

$$\mathbf{Z}^{012} = \begin{bmatrix} Z_s + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_s - Z_m \end{bmatrix}$$

for the sequence components of currents, we get

$$\mathbf{I}^{012} = [\mathbf{Z}^{012}]^{-1} \mathbf{V}^{012}$$

We write the following commands

```

% (b) Solution by symmetrical components method
Z012=[Zs+2*Zm  0  0  % Symmetrical components matrix
      0  Zs-Zm  0
      0  0  Zs-Zm];
V012=[0; Va ; 0]; %Symmetrical components of phase voltages
I012=inv(Z012)*V012; %Symmetrical components of line currents
a=cos(2*pi/3)+j*sin(2*pi/3);
A=[ 1  1  1; 1 a^2 a; 1 a a^2]; % Transformation matrix
Iabc=A*I012; % Line currents (Rectangular form)
Iabcp=[abs(Iabc), angle(Iabc)*180/pi] % Line currents (Polar)

```

which result in

Iabcp =		
	12.5	-90.0
	12.5	150.0
	12.5	30.0

This is the same result as in part (a).

Example 10.4

A three-phase unbalanced source with the following phase-to-neutral voltages

$$\mathbf{V}^{abc} = \begin{bmatrix} 200 \angle 25^\circ \\ 100 \angle -155^\circ \\ 80 \angle 100^\circ \end{bmatrix}$$

is applied to the circuit in Figure 10.4 (page 407). The load series impedance per phase is $Z_s = 8 + j24$ and the mutual impedance between phases is $Z_m = j4$. The load and source neutrals are solidly grounded. Determine

- The load sequence impedance matrix $\mathbf{Z}^{012} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{Z}^{abc}\mathbf{A}$.
- The symmetrical components of voltage.
- The symmetrical components of current.
- The load phase currents.
- The complex power delivered to the load in terms of symmetrical components, $S_{3\phi} = 3(V_a^0 I_a^{0*} + V_a^1 I_a^{1*} + V_a^2 I_a^{2*})$.
- The complex power delivered to the load by summing up the power in each phase, $S_{3\phi} = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^*$.

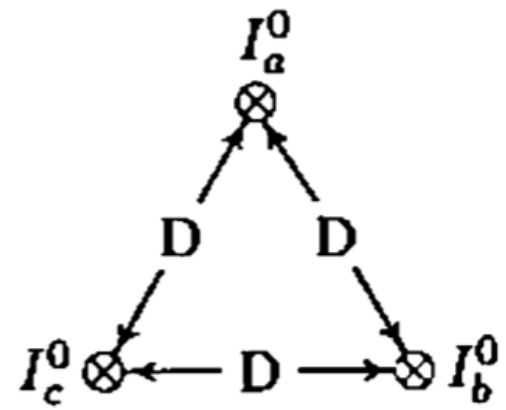
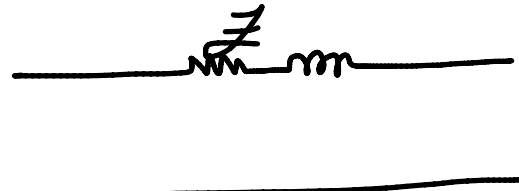
We write the following commands

امپدانس های توالی خط انتقال

چون خط انتقال یک ایوان سکن بالی است ←

مدار معادل ساده خط انتقال

$$Z^1 = Z^2$$



امپدانس توالی صفر: Z^0

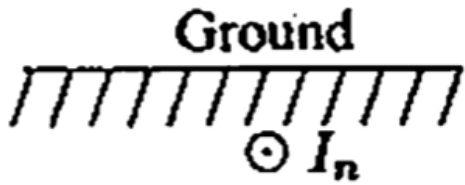
$$I_a^0 + I_b^0 + I_c^0 + I_n = 0 \Rightarrow I_n = -3I_a^0$$

D_n :

$$L_a = \frac{\lambda_a}{I_a} \Rightarrow \lambda_{a0} = L_{aa}I_a^0 + L_{ab}I_b^0 + L_{ac}I_c^0 + L_{an}I_n$$

$$L_{aa} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{r'}$$

$$L_{ab} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{D_{ab}}$$



$$\lambda_{a0} = 2 \times 10^{-7} \left[I_a^0 \ln \frac{1}{r'} + I_b^0 \ln \frac{1}{D} + I_c^0 \ln \frac{1}{D} + I_n \ln \frac{1}{D_n} \right]$$

$$\lambda_{a0} = 2 \times 10^{-7} I_a^0 \left[\ln \frac{1}{r'} + 2 \ln \frac{1}{D} - 3 \ln \frac{1}{D_n} \right] = 2 \times 10^{-7} I_a^0 \left[\ln \frac{D}{r'} + 3 \ln \frac{D_n}{D} \right]$$

$$\ln \frac{1}{r'} + 3 \ln \frac{1}{D} - \ln \frac{1}{D} - 3 \ln \frac{1}{D_n} = \ln \frac{D}{r'} + 3 \ln \frac{D_n}{D}$$

$$\lambda_{a0} = \left(2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'} + 3 \times (2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_n}{D}) \right) I_a^0 = (L_a + 3L_n) I_a^0$$

$$L_{a0} = \frac{\lambda_{a0}}{I_a^0} = L_a + 3L_n$$

$$X_{a0} = L_{a0} \cdot \omega = X_a + 3X_n$$

$$X_a = \omega \cdot 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'}$$

$$X_n = \omega \times 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_n}{D}$$

امپدانس های توالی ماشین سنکرون

طراحی ریزاتور سنکرون با سه پیچ های متقارن انجام شده است و emf ها (نبره کرده مغناطیسی) فقط با توالی مثبت

را تولید می کند.

$$\left. \begin{array}{l} 1- \text{ریکتیسیل اول} \\ 2- \text{بین سیکل اول و چهارم} \\ 3- \text{در جهات مانده} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \leftarrow 1- \text{مثبت} \\ \leftarrow 2- \text{منفی} \\ \leftarrow 3- \text{صفر} \end{array}$$

$$Z_2 = jX_d''$$

$$Z_0 = jX_L$$

راکتانس نشی سه پیچ راتور

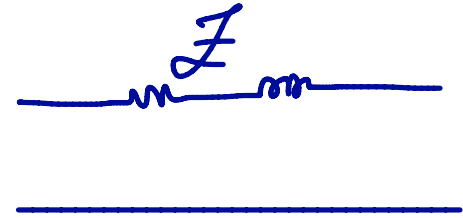
امپدانس حقا توالی ریزاتور

امپدانس های توالی ترانسفورماتور

چون ترانس تبدیل ولت را انجام می دهد در صورت تغییر توان باز

امپدانس برابر می ماند

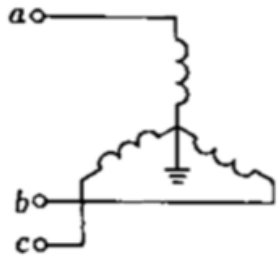
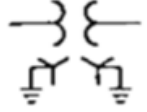
$$Z^1 = Z^2$$



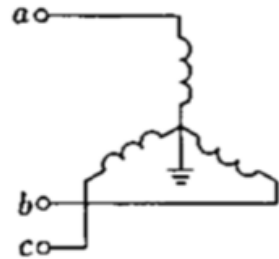
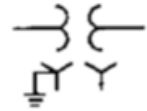
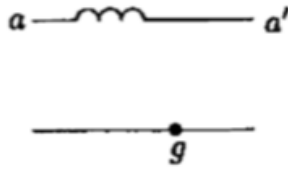
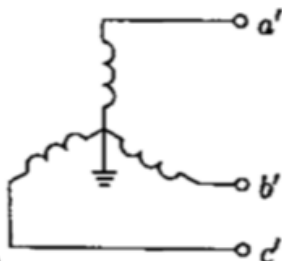
Symbol

Connection diagram

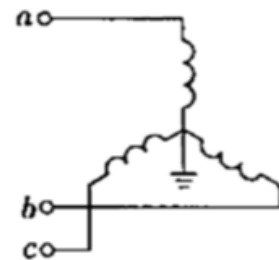
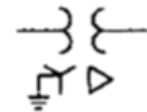
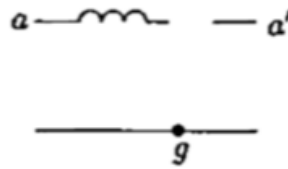
Zero-sequence circuit



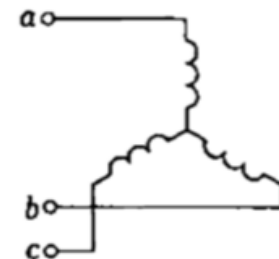
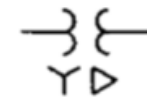
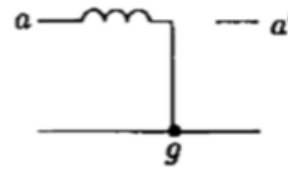
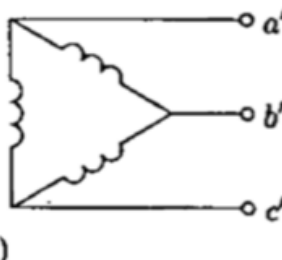
(a)



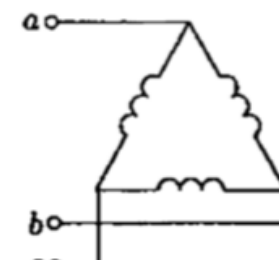
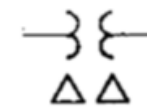
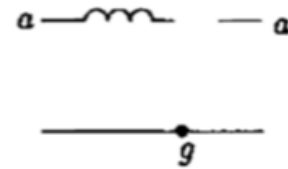
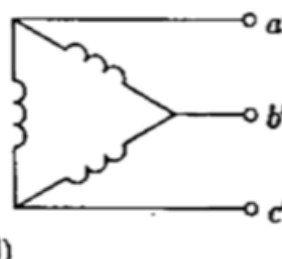
(b)



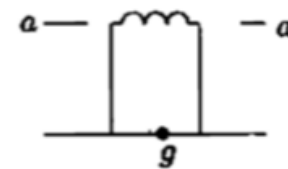
(c)



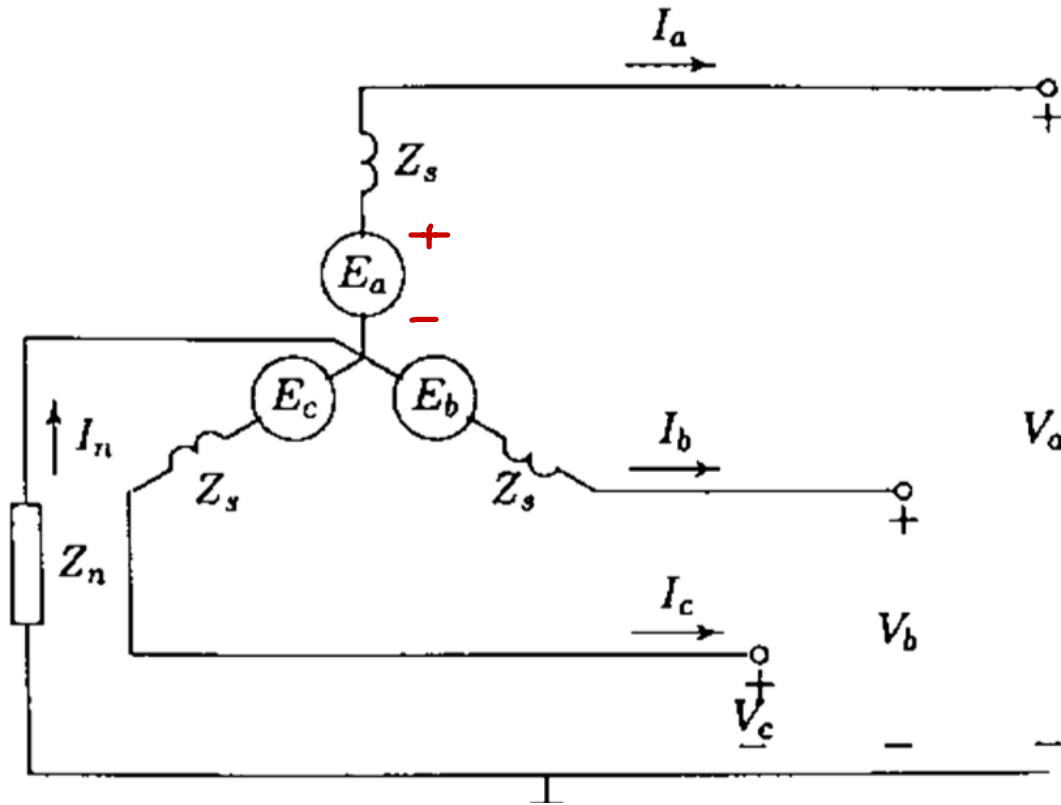
(d)



(e)



شبکه های توالی ژنراتور بارگذاری شده



$$V_a = E_a - Z_s I_a - Z_n I_n$$

$$V_b = E_b - Z_s I_b - Z_n I_n$$

$$V_c = E_c - Z_s I_c - Z_n I_n$$

$$I_n = I_a + I_b + I_c$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_s + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

$$V^{abc} = E^{abc} - Z^{abc} \cdot I^{abc} \Rightarrow A V_a^{012} = E^{abc} - Z^{abc} \cdot A I_a^{012}$$

$$V_a^{012} = \underbrace{A^{-1} E^{abc}}_{E_a^{012}} - \underbrace{(A^{-1} Z^{abc} A)}_{Z^{012}} I_a^{012} = E_a^{012} - Z^{012} \cdot I_a^{012}$$

$$Z^{012} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_s + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$E_a^{012} = A^{-1} E^{abc} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$Z^{012} = \begin{bmatrix} Z_s + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z_s & 0 \\ 0 & 0 & Z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix}$$

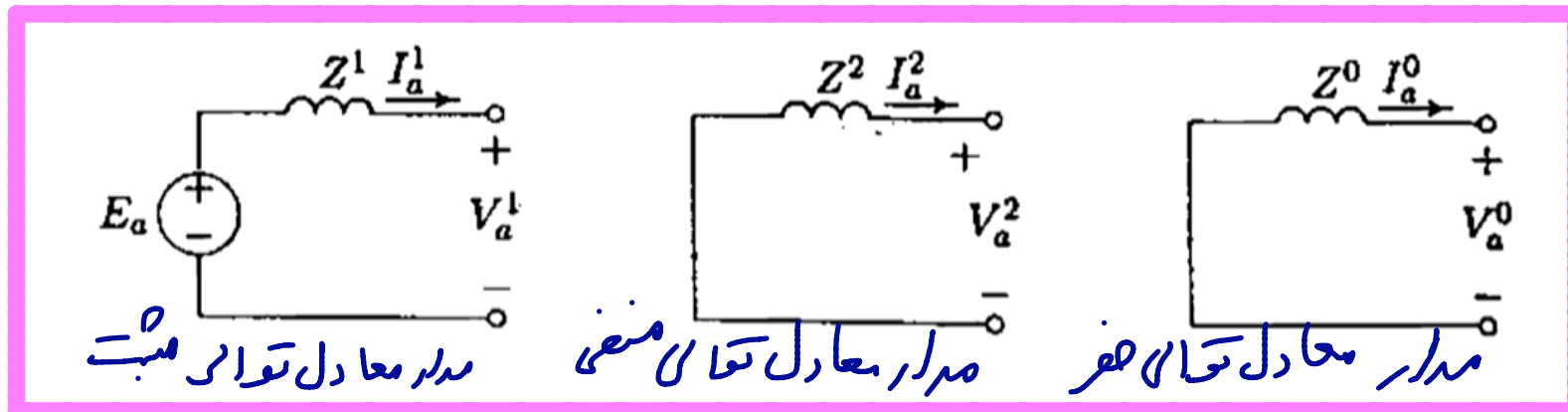
E_a^{012} فقط توان مثبت دارد چون نبره کرده
مخاطبی متقارن است.

$$\begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix}$$

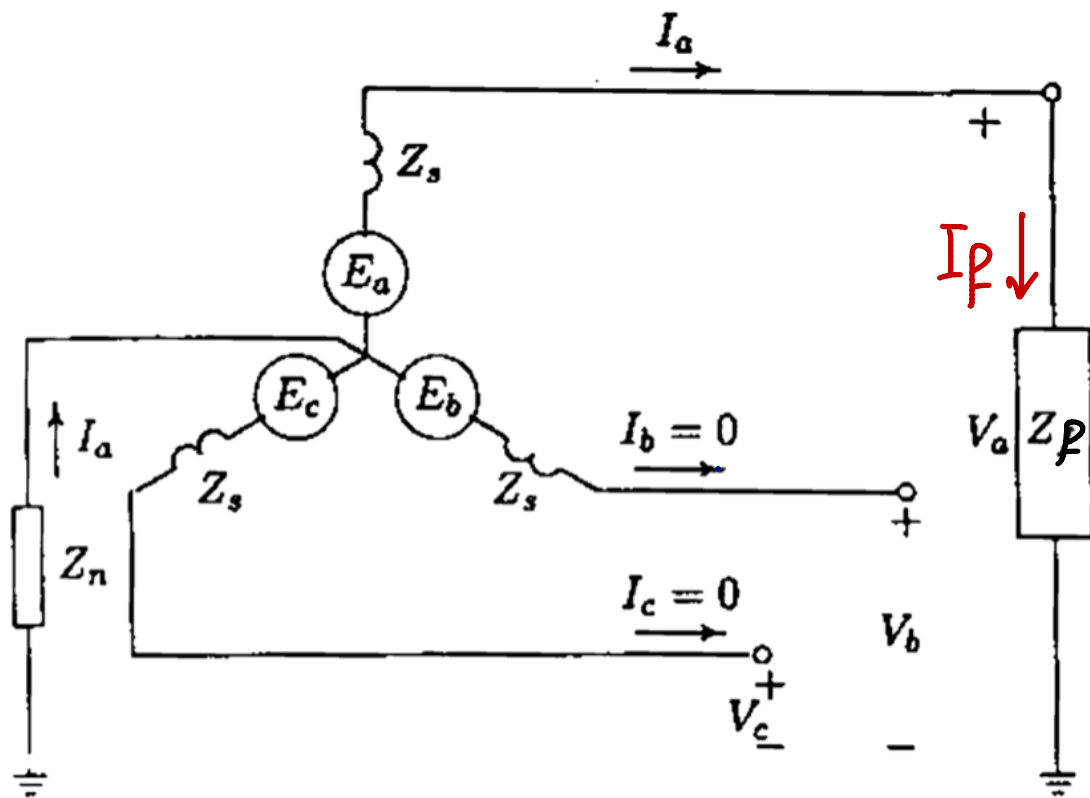
$$V_a^0 = -Z^0 I_a^0$$

$$V_a^1 = E_a - Z^1 I_a^1$$

$$V_a^2 = -Z^2 I_a^2$$



خطای تکفاز به زمین LG



$$I_b = I_c = 0$$

$$V_a = Z_f \cdot I_a = Z_f I_f$$

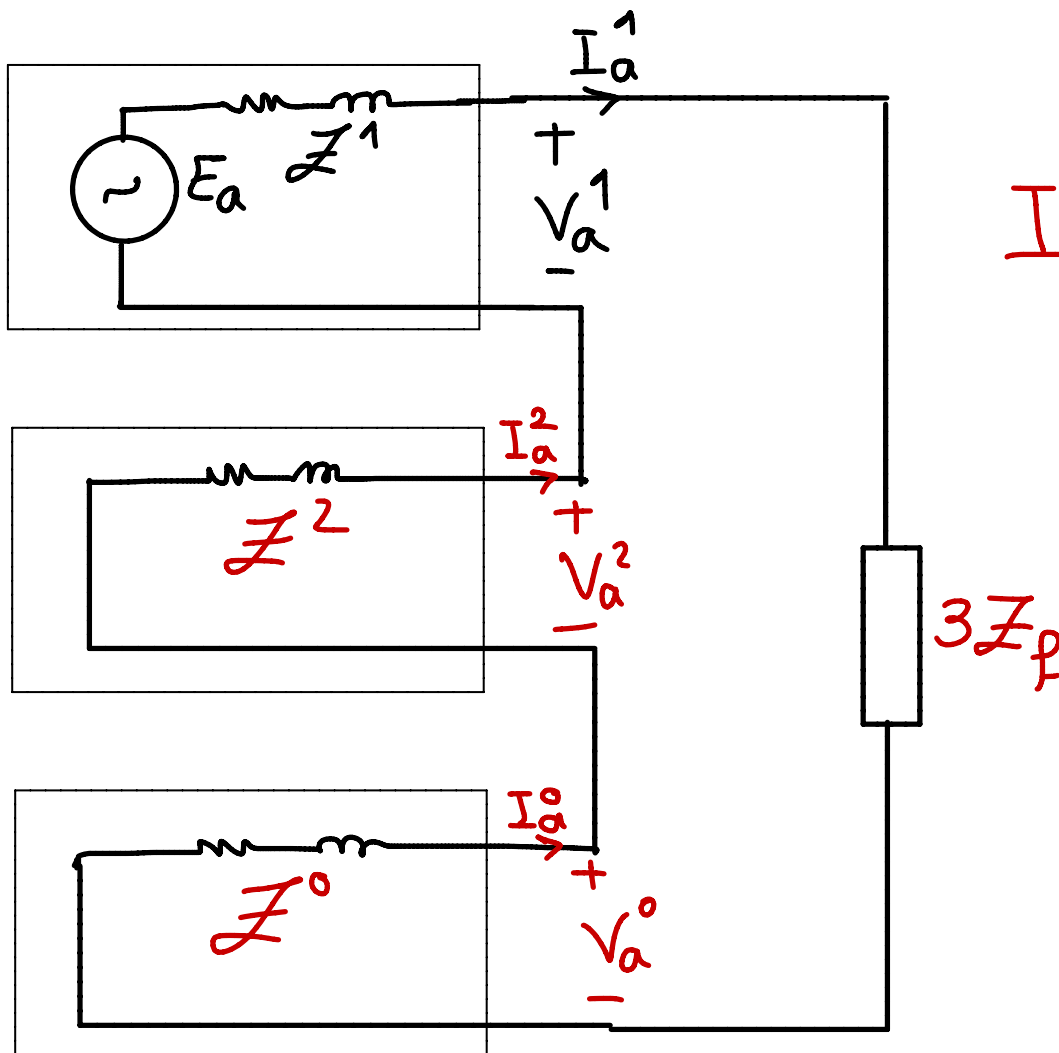
$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$I_a^0 = \frac{1}{3} I_a = I_a^1 = I_a^2$$

$$V_a = Z_f \cdot I_a \Rightarrow V_a^0 + V_a^1 + V_a^2 = Z_f \cdot I_a$$

$$-Z^0 I_a^0 + E_a - Z^1 I_a^1 - Z^2 I_a^2 = Z_f \cdot (3 I_a^0) \Rightarrow I_a^0 = \frac{E_a}{Z^0 + Z^1 + Z^2 + 3Z_f}$$

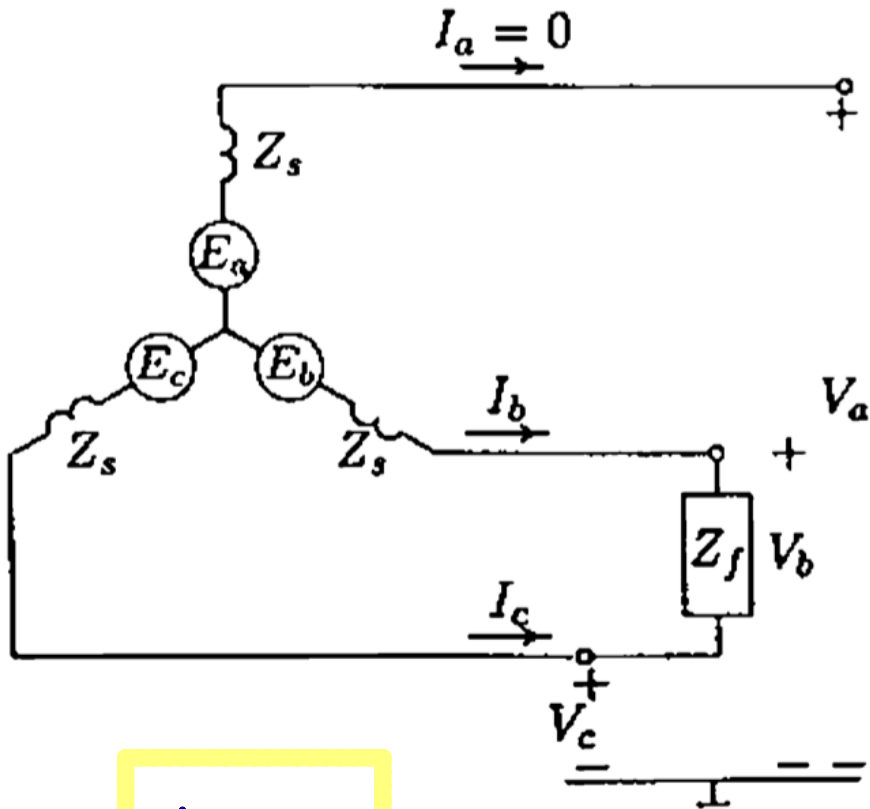
$$I_f = I_a = \frac{3 E_a}{Z^0 + Z^1 + Z^2 + 3Z_f}$$



$$I_a^1 = I_a^2 = I_a^0 = \frac{E_a}{Z^0 + Z^1 + Z^2 + 3Z_f}$$

$$I_f = I_a = 3 I_a^1$$

خطای دو فاز بهم LL Line to Line



$$I_a = 0$$

$$V_b - V_c = Z_f \cdot I_f = Z_f \cdot I_b$$

$$I_b + I_c = 0 \Rightarrow I_c = -I_b$$

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{3}(a - a^2)I_b \\ \frac{1}{3}(a^2 - a)I_b \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow I_a^1 = -I_a^2 = \frac{1}{3}(a - a^2)I_b \Rightarrow I_b = \frac{3}{a - a^2}I_a^1$$

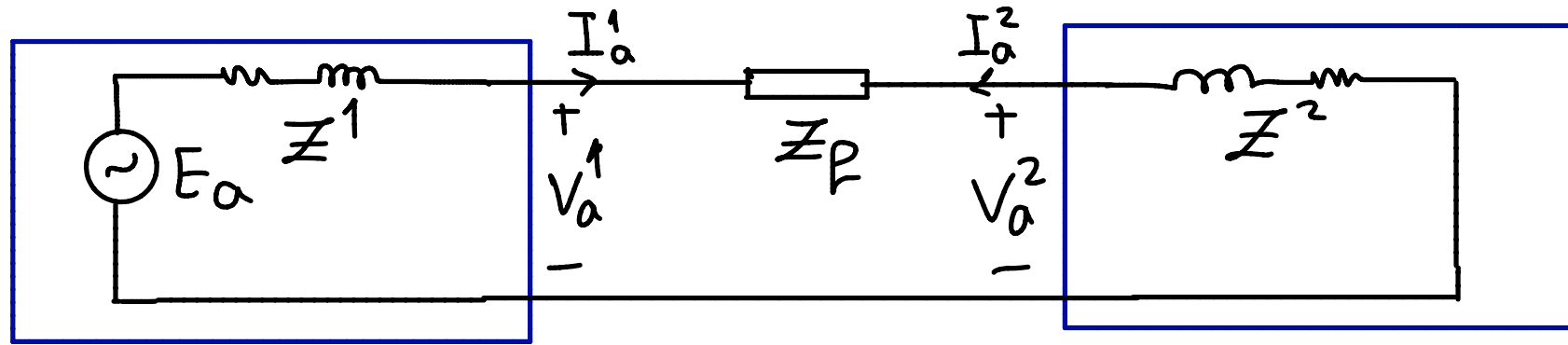
$$V_b - V_c = Z_f \cdot I_b \Rightarrow (V_a^0 + a^2 V_a^1 + a V_a^2) - (V_a^0 + a V_a^1 + a^2 V_a^2) = Z_f \cdot \frac{3}{a - a^2} I_a^1$$

$$(a^2 - a)(V_a^1 - V_a^2) = \frac{3Z_f}{(a - a^2)} I_a^1 \Rightarrow V_a^1 - V_a^2 = \frac{3Z_f}{(a^2 - a)(a - a^2)} I_a^1 = Z_f I_a^1$$

$$a - a^2 = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) - \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = j\sqrt{3}$$

$$V_a^1 - V_a^2 = Z_f \cdot I_a^1 \Rightarrow E_a - Z^1 I_a^1 - Z^2 I_a^1 = Z_f I_a^1 \Rightarrow I_a^1 = \frac{E_a}{Z^1 + Z^2 + Z_f}$$

$$I_f = I_b = \frac{3}{a - a^2} I_a^1 = -j\sqrt{3} I_a^1$$

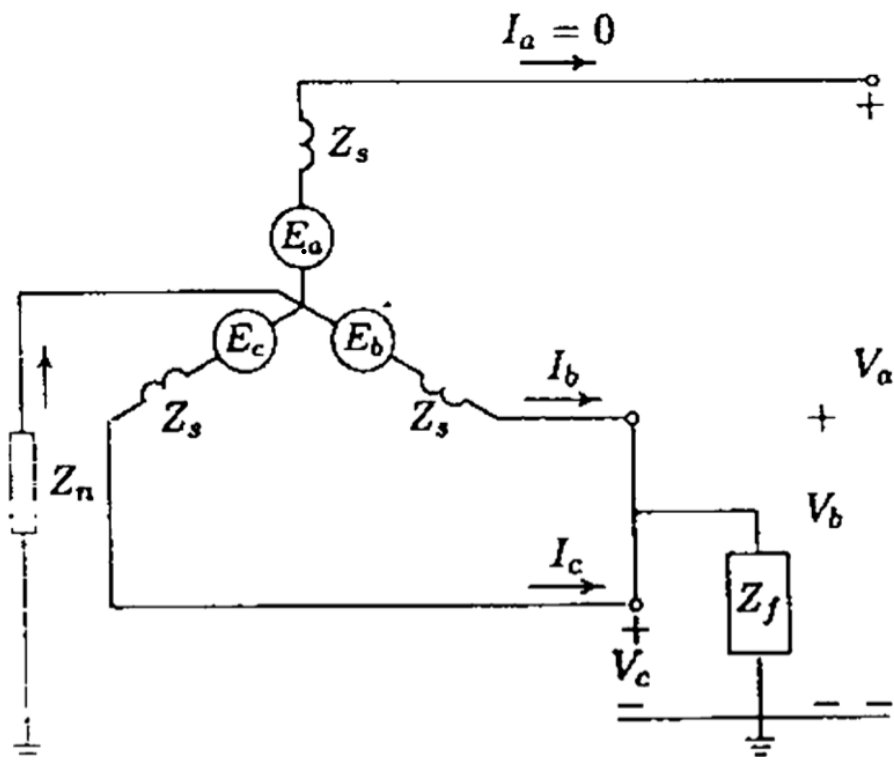


توالی مثبت

توالی منفی

$$I_a^1 = \frac{E_a}{Z^1 + Z^2 + Z_p} \Rightarrow I_f = I_b = -j\sqrt{3} I_a^1$$

خطای دو فاز بهم و به زمین LLG



$$I_a = 0 \Rightarrow I_a^0 + I_a^1 + I_a^2 = 0 \Rightarrow I_a^0 = -(I_a^1 + I_a^2)$$

$$V_b = V_c = Z_f \cdot I_f = Z_f (I_b + I_c)$$

$$V_b = V_c \Rightarrow \cancel{V_a^0} + a^2 V_a^1 + a V_a^2 =$$

$$\cancel{V_a^0} + a V_a^1 + a^2 V_a^2 \Rightarrow (\cancel{a^2/a}) V_a^1 = (\cancel{a^2/a}) V_a^2$$

$$V_a^1 = V_a^2$$

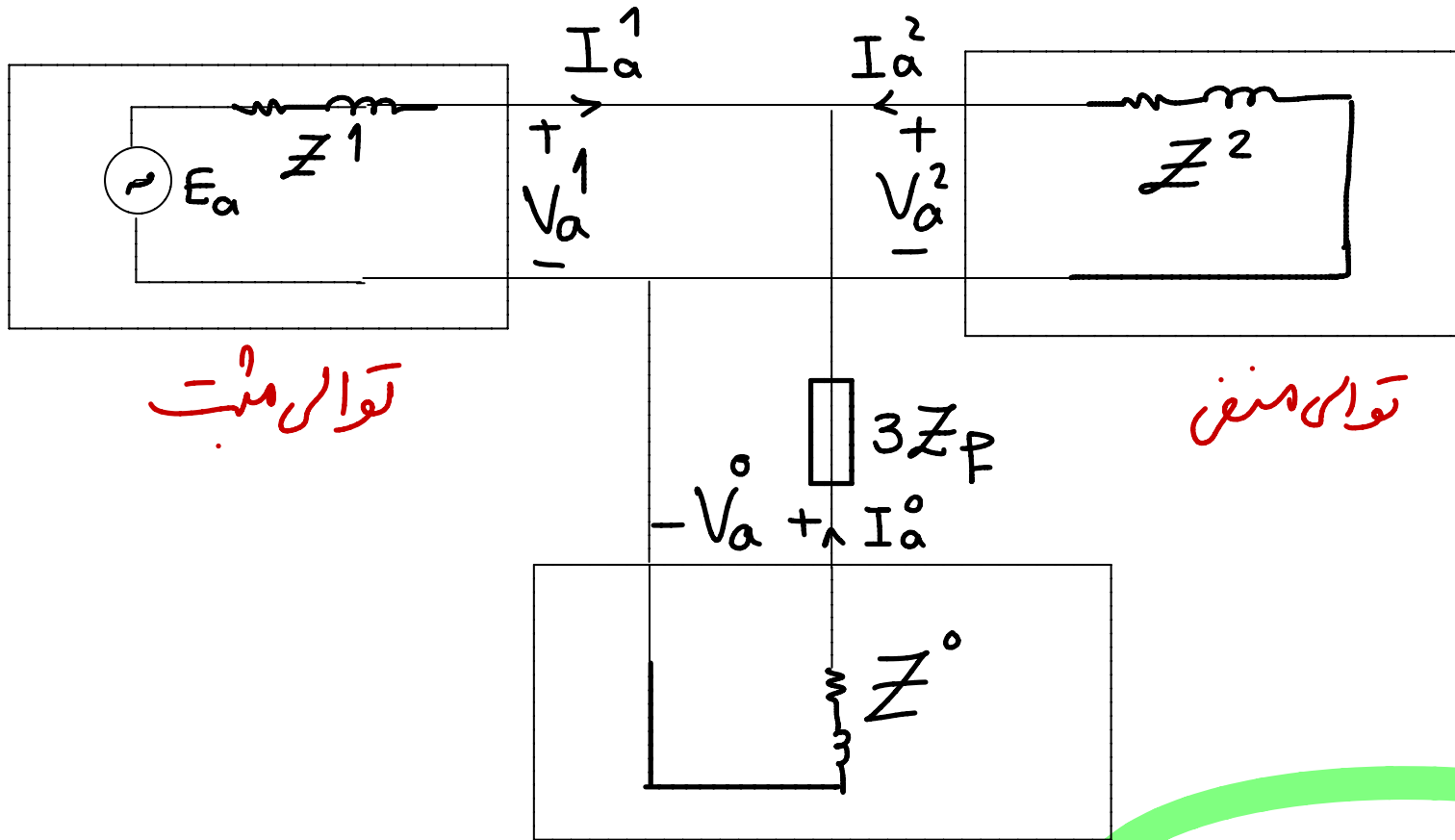
$$I_b + I_c = I_a^0 + a^2 I_a^1 + a I_a^2 + I_a^0 + a I_a^1 + a^2 I_a^2 = 2I_a^0 + (a^2 + a)(I_a^1 + I_a^2)$$

$$1 + a + a^2 = 0 \Rightarrow a + a^2 = -1$$

$$I_b + I_c = 3 I_a^0$$

$$V_b = V_c = 3 Z_f \cdot I_a^0 \Rightarrow V_a^0 + a^2 V_a^1 + a V_a^1 = V_a^0 - V_a^1 = 3 Z_f I_a^0$$

$$-Z^0 I_a^0 - (E_a - Z^1 I_a^1) = 3 Z_f I_a^0 \Rightarrow I_a^0 = - \frac{E_a - Z^1 I_a^1}{Z^0 + 3 Z_f}$$



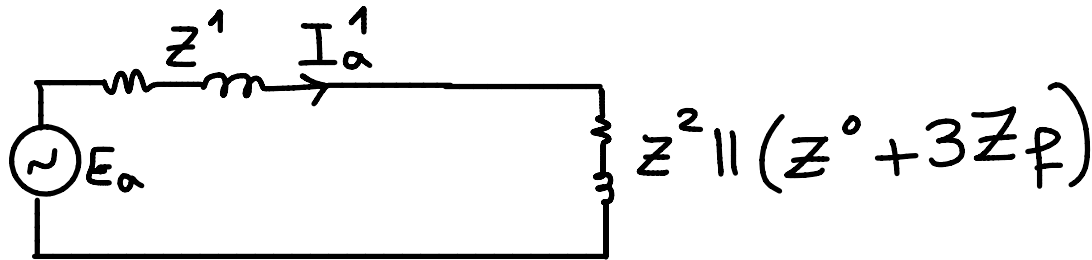
توالی مثبت

توالی منفی

توالی صفر

$$I_f = I_b + I_c = 3 I_a^0$$

$$I_a^0 = - \frac{E_a - Z^1 I_a^1}{Z^0 + 3 Z_f}$$



①

$$I_a^1 = \frac{E_a}{Z^1 + Z^2 \parallel (Z^0 + 3 Z_f)}$$

②

مثال :

دیagram تک خطی یک سیستم قدرت ساده در شکل زیر نشان داده شده است -

اگر نقطه خنثی ژنراتور از طریق راکتور که در کنته جریان خطا با

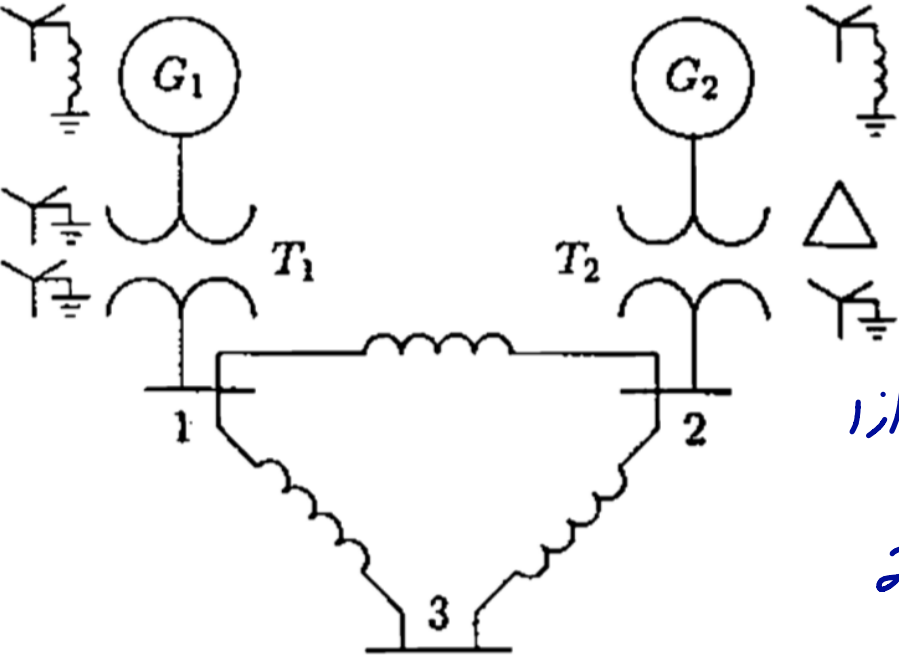
راندانس $\frac{0.25}{3} p.u$ زمین شده باشد، مطلوب است محاسبه جریان خطا به ازای

(الف) خطای سه فاز متعادل در بوس ۳ با امپدانس خطا $Z_f = j0.1 p.u$

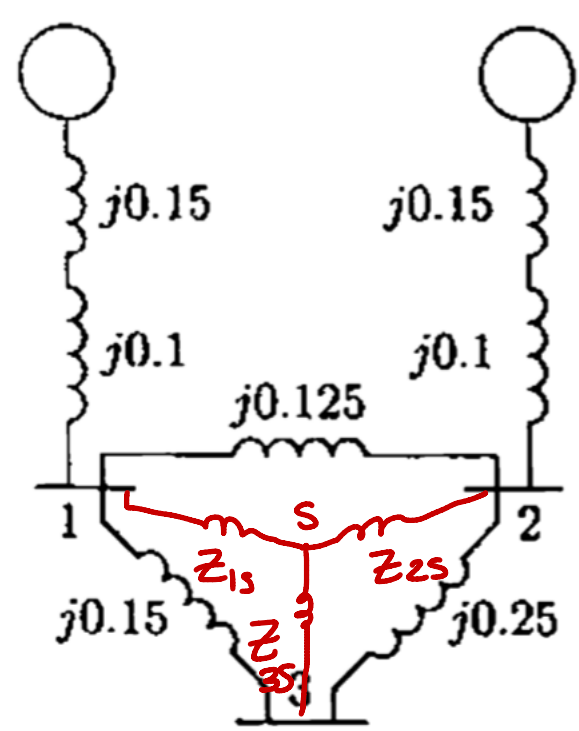
(ب) خطای تک فاز زمین " " " " " " " " " " " "

(ج) خطای دو فاز به هم " " " " " " " " " " " "

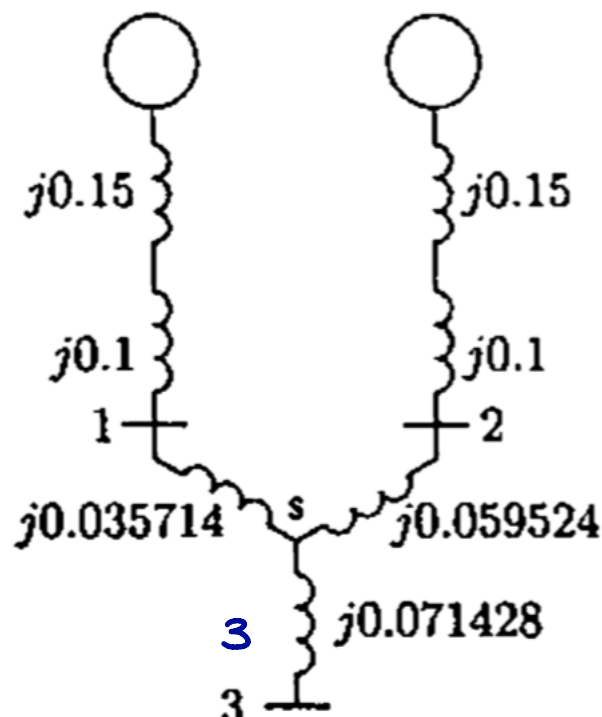
(د) خطای دو فاز به هم و زمین " " " " " " " " " " " "



Item	Base MVA	Voltage Rating	X^1	X^2	X^0
G_1	100	20 kV	0.15	0.15	0.05
G_2	100	20 kV	0.15	0.15	0.05
T_1	100	20/220 kV	0.10	0.10	0.10
T_2	100	20/220 kV	0.10	0.10	0.10
L_{12}	100	220 kV	0.125	0.125	0.30
L_{13}	100	220 kV	0.15	0.15	0.35
L_{23}	100	220 kV	0.25	0.25	0.7125



(a)



(b)

$$Z_{1s} = \frac{(j0.125)(j0.15)}{j0.525} = j0.0357143$$

$$Z_{2s} = \frac{(j0.125)(j0.25)}{j0.525} = j0.0595238$$

$$Z_{3s} = \frac{(j0.15)(j0.25)}{j0.525} = j0.0714286$$

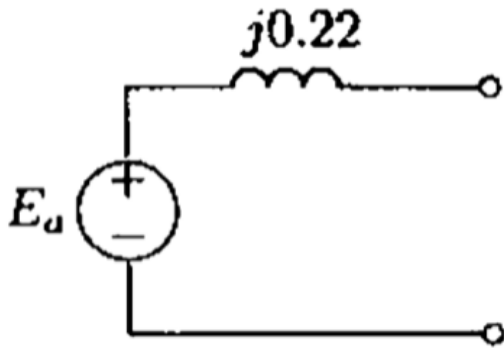
$$Z_{33}^1 = \frac{(j0.2857143)(j0.3095238)}{j0.5952381} + j0.0714286$$

$$= j0.1485714 + j0.0714286 = j0.22$$

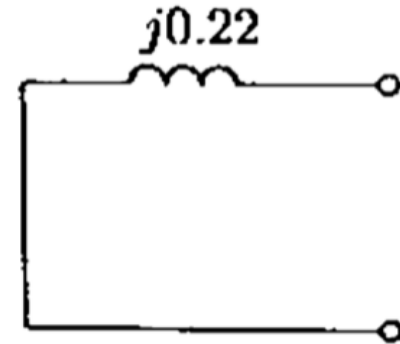
امپدانس توپن توالی مثبت

مدار معادل توالی مثبت

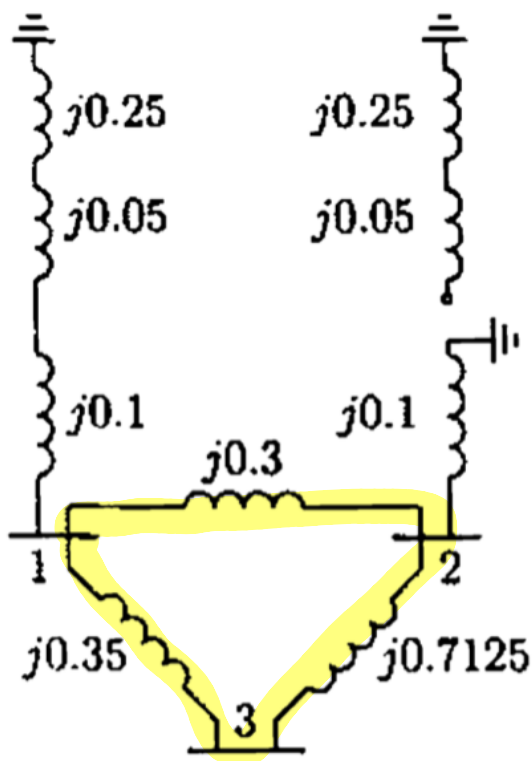
چون مقادیر راکتانس الاها در توالی مثبت و منفی با هم برابر است بنابراین $Z_{33}^1 = Z_{33}^2$



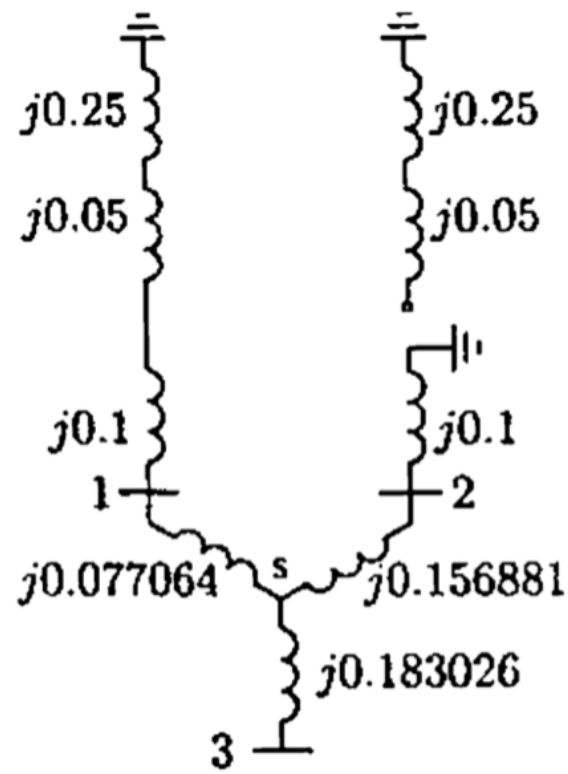
مدار معادل توالی مثبت



مدار معادل توالی منفی



(a)



(b)

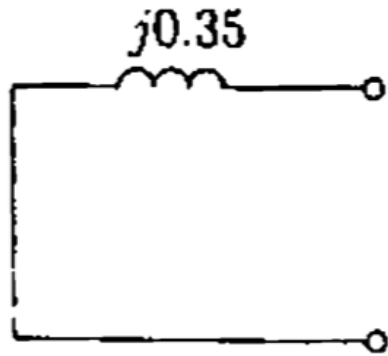
$$Z_{1s} = \frac{(j0.30)(j0.35)}{j1.3625} = j0.0770642$$

$$Z_{2s} = \frac{(j0.30)(j0.7125)}{j1.3625} = j0.1568807$$

$$Z_{3s} = \frac{(j0.35)(j0.7125)}{j1.3625} = j0.1830257$$

$$Z_{33}^0 = \frac{(j0.4770642)(j0.2568807)}{j0.7339449} + j0.1830275$$

$$= j0.1669725 + j0.1830275 = j0.35$$



مدار معادل توانی صفر

الف) اتصال کوتاه متقارن

$$I_3^a(f) = \frac{V_3(0)}{Z_{33}^1 + Z_f} = \frac{1}{j0.22 + j0.1} = -j3.125 \text{ p.u} = 820.1 \angle -90^\circ \text{ A}$$

ب) اتصال کوتاه LLG

$$I_3(f) = \frac{3 V_3(0)}{Z_{33}^0 + Z_{33}^1 + Z_{33}^2 + 3Z_f} = \frac{3}{j0.35 + j0.22 + j0.22 + j0.3} = -j2.7523$$

$$I_3(f) = -j\sqrt{3} I_3^1 = -3.2075$$

ج) اتصال کوتاه دو فاز بهم LL

$$I_3^1 = \frac{V_3(0)}{Z_{33}^1 + Z_{33}^2 + Z_f} = \frac{1}{2 \times j0.22 + j0.1} = -j1.8519$$

د) اتصال کوتاه دو فاز بهم ریزین LLG

$$I_3^1 = \frac{V_3(0)}{Z_{33}^1 + Z_{33}^2 \parallel (Z_{33}^0 + 3Z_f)} = \frac{1}{j0.22 + \frac{j0.22 \times (j0.35 + j0.3)}{j0.22 + j0.35 + j0.3}} = -j2.6017$$

$$I_3^0 = -\frac{V_3(0) - Z_{33}^1 I_3^1}{Z_{33}^0 + 3Z_f} = -\frac{1 - j0.22 \times (-j2.6017)}{j0.35 + j0.3} = j0.6579 \Rightarrow I_3(f) = j1.97$$

تحلیل خطای نامتقارن با استفاده از ماتریس امیدانس

همانطور که در اتصال کوتاه متقارن ماتریس Z_{bus} را برای توان مثبت محاسبه کردیم، می‌توانیم این ماتریس را برای توان‌ها منفی و منفی هم محاسبه کنیم. برای این منظور مدار معادل‌های توان‌های مثبت، منفی و صفر را رسم کرده، سپس ماتریس امیدانس را برای این توان‌ها

محاسبه می‌کنیم. در این‌ها قطر اصلی برابر خواهد بود با معادله امیدانس توپون در آن بوس یعنی Z_{kk}^0 ، Z_{kk}^1 ، Z_{kk}^2

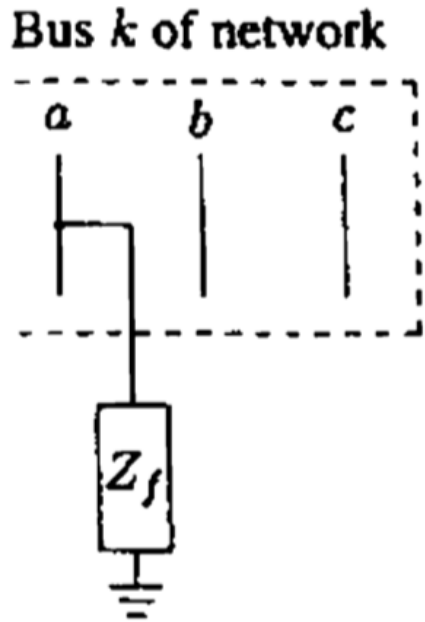
معادله امیدانس توپون توان صفر، مثبت و منفی در این بوس‌هاست که در این‌ها k ام از ماتریس Z_{bus}^0 ، Z_{bus}^1 ، Z_{bus}^2

است.

محاسبه خطای تکفاز به زمین با استفاده از ماتریس Zbus

ابتدا مدار معادل صای توانی های مثبت، منفی و صفر را رسم نموده در ماتریس ابرپایان توانی صارا

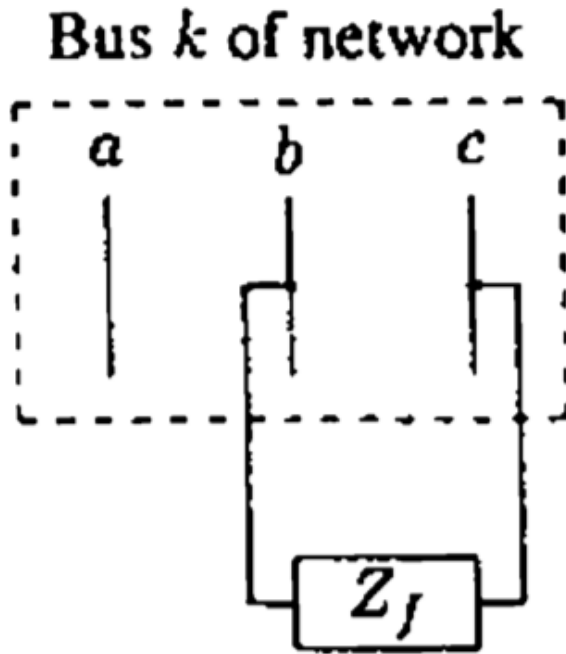
بدست می آوریم.



$$I_k^0 = I_k^1 = I_k^2 = \frac{V_k(0)}{Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2 + Z_{kk}^0 + 3Z_f}$$

$$I_k^{abc} = A I_k^{012}$$

محاسبه خطای دو فاز بهم با استفاده از ماتریس Zbus

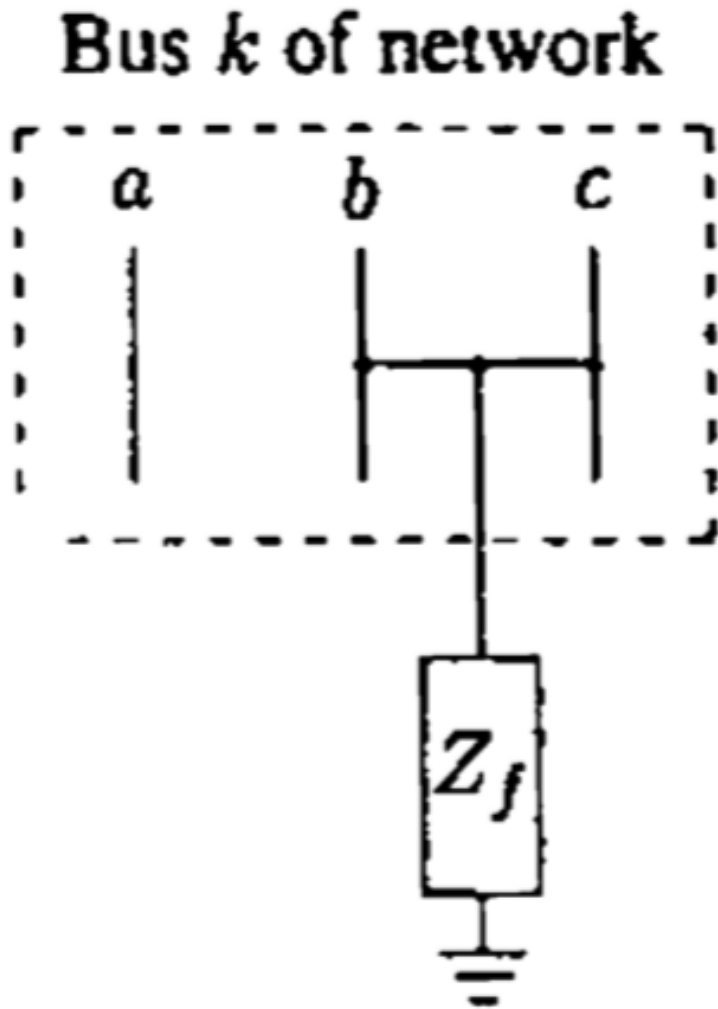


$$I_k^0 = 0$$

$$I_k^1 = -I_k^2 = \frac{V_k(0)}{Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2 + Z_f}$$

$$I_k^{abc} = \mathbf{A} I_k^{012}$$

محاسبه خطای دو فاز بهم و به زمین با استفاده از ماتریس Zbus



$$I_k^1 = \frac{V_k(0)}{Z_{kk}^1 + \frac{Z_{kk}^2(Z_{kk}^0 + 3Z_f)}{Z_{kk}^2 + Z_{kk}^0 + 3Z_f}}$$

$$I_k^2 = -\frac{V_k(0) - Z_{kk}^1 I_k^1}{Z_{kk}^2}$$

$$I_k^0 = -\frac{V_k(0) - Z_{kk}^1 I_k^1}{Z_{kk}^0 + 3Z_f}$$

$$I_k^{abc} = \mathbf{A} I_k^{012}$$

$$I_k(F) = I_k^b + I_k^c$$

محاسبه ولتاژ باس ها و جریان خطوط حین خطا

$$V_i^0(F) = 0 - Z_{ik}^0 I_k^0$$

$$V_i^1(F) = V_i^1(0) - Z_{ik}^1 I_k^1$$

$$V_i^2(F) = 0 - Z_{ik}^2 I_k^2$$

$$V_i^{abc} = A V_i^{012}$$

ماتریس جریان عبوری از خطوط:

$$I_{ij}^0 = \frac{V_i^0(F) - V_j^0(F)}{z_{ij}^0}$$

$$I_{ij}^1 = \frac{V_i^1(F) - V_j^1(F)}{z_{ij}^1}$$

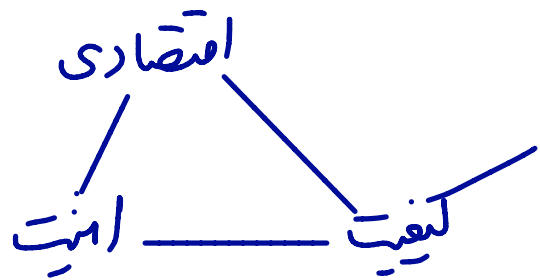
$$I_{ij}^2 = \frac{V_i^2(F) - V_j^2(F)}{z_{ij}^2}$$

$$I_{ij}^{abc} = A I_{ij}^{012}$$

فصل چهارم

پایداری گذرا

Transient stability



وظیفه سه قدرت: تأمین برق موفکند ←

- ۱- ازران بودن
- ۲- با کفایت
- ۳- با امنیت

- مبحث اقتصادی:

- ۱- هزینه احداث: investment cost
- ۲- بهره برداری: operational cost

- هزینه تولید ← $C = \underbrace{aP_G^2 + bP_G}_{\text{Variable cost}} + \underbrace{c}_{\text{Fixed cost}}$

هزینه تولید واحد از تولید P_G

هزینه ثابت
Fixed cost
↓
بیمه
مالیات
حقوق

Variable cost
هزینه متغیر
← موجود

a, b, c ضرایب ثابت هستند.

کنیت توان Power Quality

۱- کاهش ولتاژ $0.95 < |V| < 1.05$ حالت ماندگار

" " " $0.9 < |V| < 1.05$ " " " " " "

۲- فرکانس: $49.7 < f < 50.3$

بره های حذف در ایرا در فرکانس 49.2 Hz تنظیم شده اند.

تغییرات فرکانس در شمال اروپا $\pm 0.1 \text{ Hz}$ Nordel

" " " " $\pm 0.2 \text{ Hz}$ UCTE

۳- کاهش هارمونیک:

بارهای غیر خطی - تولید هارمونیک

کاهش لایه حکم موف

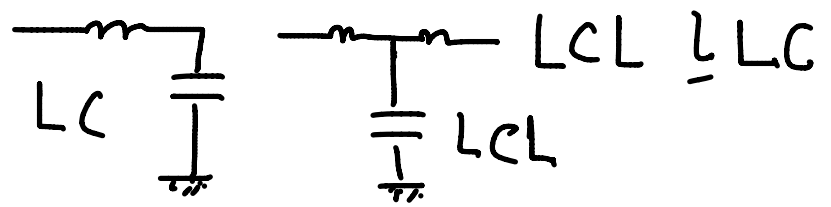
THD برای ولتاژ جریان 5% است.

- در ایرا ن
- ۱- ولتاژ عادی $V_n \pm 2\%$
 - ۲- " غیر عادی $V_n - 10\%$, $V_n + 5\%$
 - ۳- " غیر قابل تحمل $V < "$, $V > "$

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n F_i^2}}{F_1}$$

Total Harmonic Disturtion



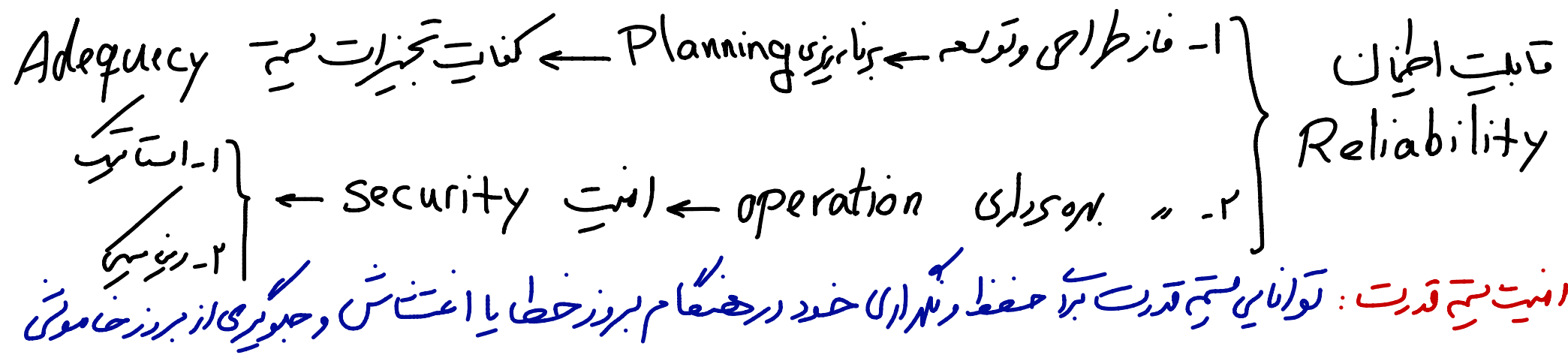
- ۱- نیامتر بسوی
 - ۲- " " " " " "
- برای حذف هارمونیک ۵ از فیلتر استفاده در لود

Voltage unbalance
Factor

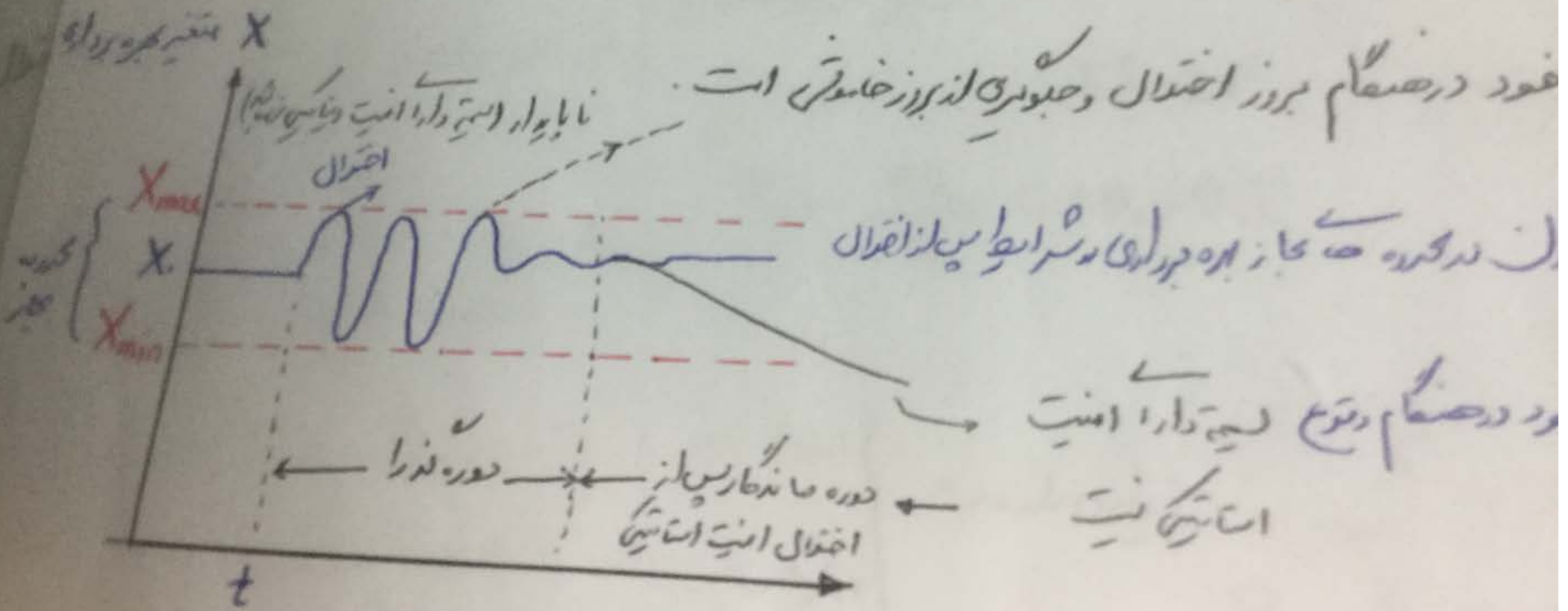
$$VUF = \frac{\text{مبلغ توان منفی ولتاژ}}{\text{مبلغ توان مثبت}} \times 100 = \frac{V_a^2}{V_a^1} \times 100$$

طبق استاندارد IEC باید VUF برابر با حدس بود که کمتر از ۲٪ باشد.

امنیت توان یا انرژی:



دفايز بجزو برداري operation است ← security است ← ۱- امنيت استاتيكي
 ۲- امنيت ديناميكي



پایداری گذرای *Transient stability*:

- ۱- میان یک اتصال کوتاه یا خروج یک خط پیربار → (افتشای بزرگ)
- ۲- ماهیت ناپایداری: خروج از سنکرونیسم هر یک از ژنراتورها
- ۳- متغیر اصل ناپایداری: δ (زاویه تورش ژنراتورها)
- ۴- دوره پدیده: حداکثر ۵ ثانیه

پدیده پایداری گذرا:

پایه یک اتصال کوتاه فاز یا تک فاز و خروج یک خط پیربار باعث پدیده پایداری گذرا می‌شود.

ماهیت پدیده: با وقوع یک اختلال در شبکه مانند اتصال کوتاه ← افت ولتاژ زمین‌های شبکه زمین‌های ژنراتوری که به

کاهش قابلیت انتقال توان الکتریکی منتهی می‌شود و به صورت انرژی جنبشی افزوده درون ژنراتورها انباشته می‌گردد ←

تک تک ژنراتورها تحت تأثیر یک توان شتاب دهنده قرار گرفته و باعث افزایش سرعت و انرژی

جنبشی می‌گردد. این روند تا زمان حضور حالت (خطا) در شبکه ادامه دارد (دوره حین خطا) **(During Fault)**

با عملکرد سیستم حفاظتی و رفع خطا، ولتاژهای سیستم بازیابی شده و روند انتقال توان ژنراتورها از

سرگرفته شده به گونه‌ای که می‌توانند بطور گذرا توان بیش از مقدر اولیه خود به شبکه تحویل دهند

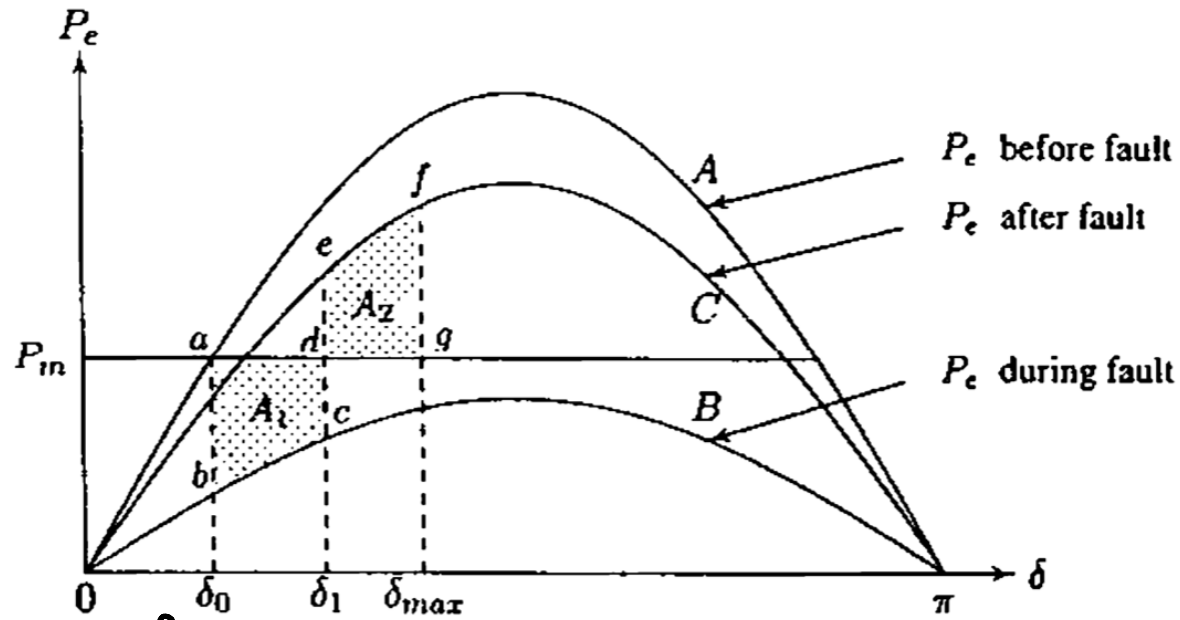
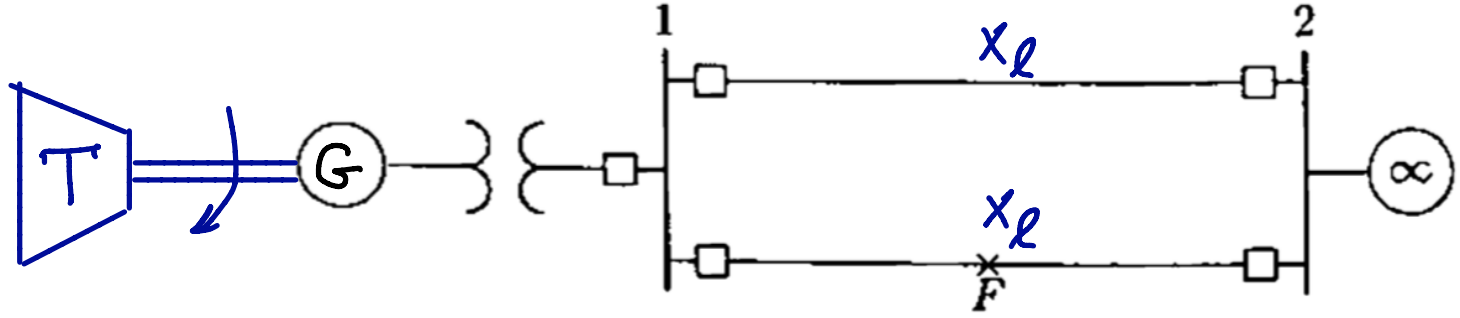
(دوره پس از اختلال **Post Fault**) این روند تا یک زمان بحرانی می‌تواند ادامه یابد. چنانچه هر یک

از ژنراتورها در دوره پس از اختلال تا بحرانی انرژی خود را تماماً از دست بدهند آن ژنراتورها پایدار

خواهند ماند. چنانچه بار رسیدن به نقطه بحرانی هنوز نباشد از انرژی جذب شده در ژنراتور وجود داشته باشد

با گذر از نقطه بحرانی روند تغییرات انرژی جنبشی کبرداً به گونه‌ای خواهد بود که توان کتاب دهنده مثبت

و کبرداً انرژی تور بدون وقفه انرژی جذب می‌نماید. ← خروج از سیکل دینام



$$P_{e}^{Pre.f} = \frac{|E'| \cdot |V_{\infty}|}{X_T^{Pre.f}} \sin \delta$$

$$X_T^{Pre.f} = X_G + X_t + \frac{X_L}{2}$$

$$P_e^{D.f} = \frac{|E'| \cdot |V_{\infty}|}{X_T^{D.f}} \sin \delta$$

$$X_T^{D.f}$$

$$P_e^{P.f} = \frac{|E'| \cdot |V_{\infty}|}{X_T^{P.f}} \sin \delta$$

$$X_T^{P.f} = X_G + X_t + X_L$$

تبیہ سازی یا پیری گنزا:

۱- معادلات مکانیکی یا معادلات نوسان swing equations ← اصل ترین معادلات

۲- معادلات الکتریکی:

$$j \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e \xrightarrow{\times \omega_0} \omega_0 j \frac{d\omega_m}{dt} = P_m - P_e \quad W = \frac{1}{2} j \omega_0^2$$

انرژی جنبشی

$$\frac{\frac{1}{2} \omega_0^2 j}{\frac{1}{2} \omega_0} \frac{d\omega_m}{dt} = P_m - P_e \Rightarrow \omega_0 \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{\omega_0}{2} (P_m - P_e) \Rightarrow \frac{P_n}{2}$$

$$H = \frac{W_0}{P_n} \frac{MWS}{MW} = s$$

ثابت اینرسی

$$\begin{cases} \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_m - \omega_0 \end{cases}$$

معادلات نوسان

P.u بر حسب P_e, P_m

$$\omega_m = \omega_0 \leftarrow \frac{d\omega_m}{dt} = 0 \leftarrow P_m = P_e$$

$$\downarrow$$

$$\frac{d\delta}{dt} = 0 \Rightarrow \delta = \delta_0$$

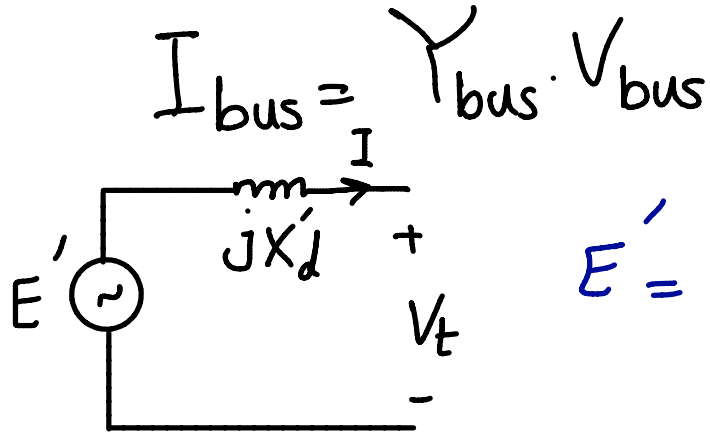
$$\begin{cases} 1) \omega = \omega_0 \\ 2) \delta = \delta_0 \end{cases}$$

در نقطه تعادل

معادلات الکتریکی:

۱- معادلات الکتریکی ژنراتور: ساده‌ترین مدل از درجه ۲ که تا درجه ۸ نیز می‌تواند باشد.

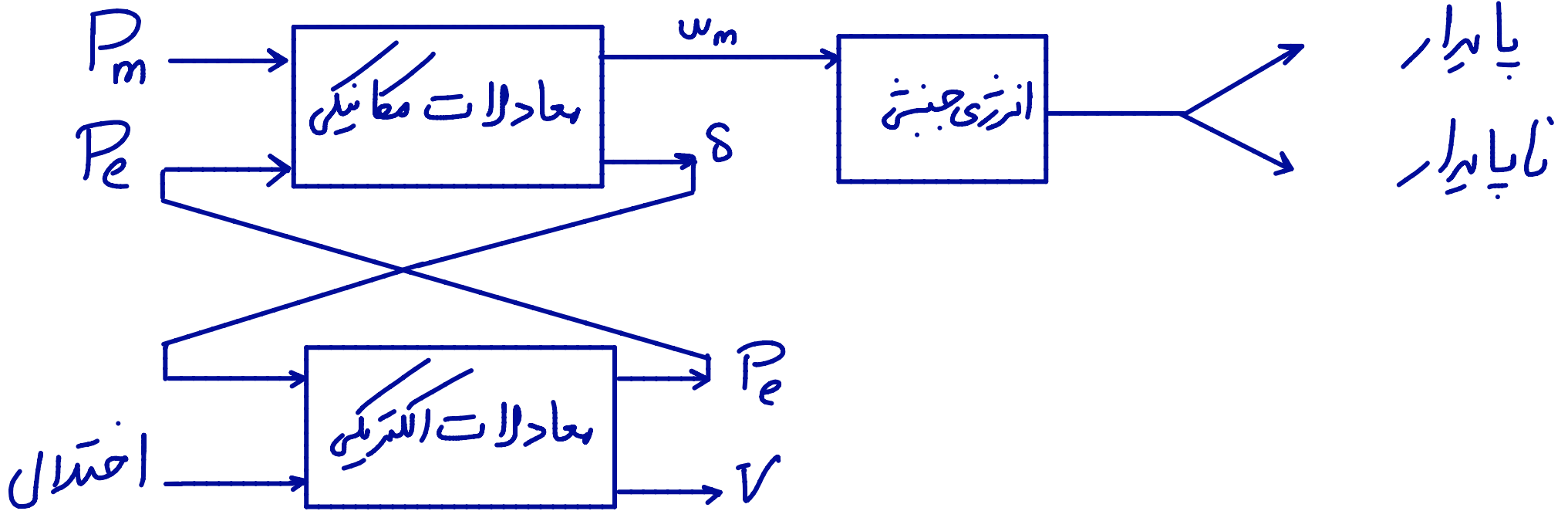
۲- شبکه: معادلات پخش بار



$$E' = V_t + jX_d \cdot I$$

مدل ژنراتور: مدل درجه ۲

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



نتیجہ نہایت:

$$\text{طرح اتصال کوتاه} \quad \text{S.C.C} \rightarrow \infty \Rightarrow X_{th} = 0 \Rightarrow V_{\infty} = \text{cte}$$

$$H \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{dw_m}{dt} = 0 \Rightarrow \delta = \text{cte}$$

$W_{P.f}^{\max}$

مابہ انرژی جبری در دور حین عطا (WDF) و بعد از خطا

معادله تغییرات انرژی جبری ژنراتور:

$$\frac{dw_m}{dt} = \frac{w_0}{2H} (P_m - P_e) \xrightarrow{\times w_m} w_m \frac{dw_m}{dt} = \frac{w_0}{2H} P_{acc} \cdot w_m \Rightarrow$$

$$w_m dw_m = \frac{w_0}{2H} P_{acc} \cdot w_m dt \quad \left(\begin{array}{l} \frac{d\delta}{dt} = w_m - w_0 \\ d\delta = w_m dt \end{array} \right) \quad \int_{w_{m1}}^{w_{m2}} w_m dw_m = \int_{\delta_1}^{\delta_2} \frac{w_0}{2H} P_{acc} d\delta$$

$$\frac{1}{2} w_{m2}^2 - \frac{1}{2} w_{m1}^2 = \frac{w_0}{2H} \int_{\delta_1}^{\delta_2} P_{acc} d\delta \xrightarrow{\times j} W_2 - W_1 = \frac{w_0 j}{2H} \int_{\delta_1}^{\delta_2} P_{acc} d\delta$$

$$\Delta W = W_2 - W_1 = \frac{w_0 j}{2H} \int_{\delta_1}^{\delta_2} P_{acc} d\delta$$

در دوره حین خطا انرژی جنبشی جذب و افزوده می‌گردد:

$$W_{D.F} \approx \int_{\delta_0}^{\delta_{clear}} (P_m - P_e^{D.F}) d\delta$$

حد اکثر انرژی قابل دفع در دوره پس از اختلال:

$$W_{P.F}^{max} \approx \int_{\delta_{clear}}^{\delta_{critical}} (P_m - P_e^{P.F}) d\delta$$

stable یا پایداری است. $W_{D.F} + W_{P.F}^{max} < 0$

unstable یا ناپایداری است. $W_{D.F} + W_{P.F}^{max} > 0$

$$S_e = P_e + jQ_e = V_t \cdot I_g^* \Rightarrow I_g = \frac{S_e^*}{V_t^*} = \frac{0.8 - j0.4}{1 \angle 0^\circ} = 0.8 - j0.4$$

$$E = V_t + j(X'_d + X_t) I_g = 1 + j(0.2 + j0.2)(0.8 - j0.4) = 1.16 + j0.32 = 1.24 \angle 15.4^\circ$$

$$V_\infty = V_t - j \frac{X_t}{2} I_g = 1 - j0.2(0.8 - j0.4) = 0.92 - j0.16 = 0.933 \angle -9.8^\circ$$

$$\delta_0 = \delta_E - \delta_{V_\infty} = 15.4 - (-9.8) = 25.2^\circ$$

$$X_T^{\text{Pre.F}} = 0.2 + 0.2 + \frac{0.4}{2} = 0.6 \Rightarrow P_e^{\text{Pre.F}} = \frac{|V_\infty| |E| \sin \delta}{X_T^{\text{Pre.F}}} = \frac{0.933 \cdot 1.2 \sin \delta}{0.6}$$

$$P_e^{\text{Pre.F}} = 1.866 \sin \delta$$

$$X_T^{\text{D.F}} = \infty \Rightarrow P_e^{\text{D.F}} = 0$$

$$X_T^{\text{P.F}} = 0.2 + 0.2 + 0.4 = 0.8 \Rightarrow P_e^{\text{P.F}} = \frac{0.933 \times 1.2 \sin \delta}{0.8} = 1.4 \sin \delta$$

بهت آوردن δ_{clear}

$$\delta_{clear} - \delta_0 = \frac{\omega_0}{2H} P_{acc}^{D.F.} \left(\frac{1}{2} t_{clear}^2 \right) \Rightarrow \delta_{clear} = 25.4 + \frac{2 \times 180 \times 50}{2 \times 5} \times (0.8 - 0)$$

$$\times \left(\frac{0.1^2}{2} \right) = 32.6^\circ = 0.569 \text{ rad}$$

$$P_m = P_{e0} = 0.8 \text{ P.u}$$

$$\delta_{critical} = 180 - \sin^{-1} \frac{P_m}{P_{max}^{P.F.}} = 180 - \sin^{-1} \frac{0.8}{1.4} = 145.15^\circ = 2.533 \text{ rad}$$

$$W_{D.F.} = \int_{0.443}^{0.569} (0.8 - 0) d\delta = 0.8 (\delta_{clear} - \delta_0) = 0.8 (0.569 - 0.443) = 0.1$$

نکته: مقادیر δ باید در کمالات تغییر انرژی جنبشی بر حسب اربابان باشد.

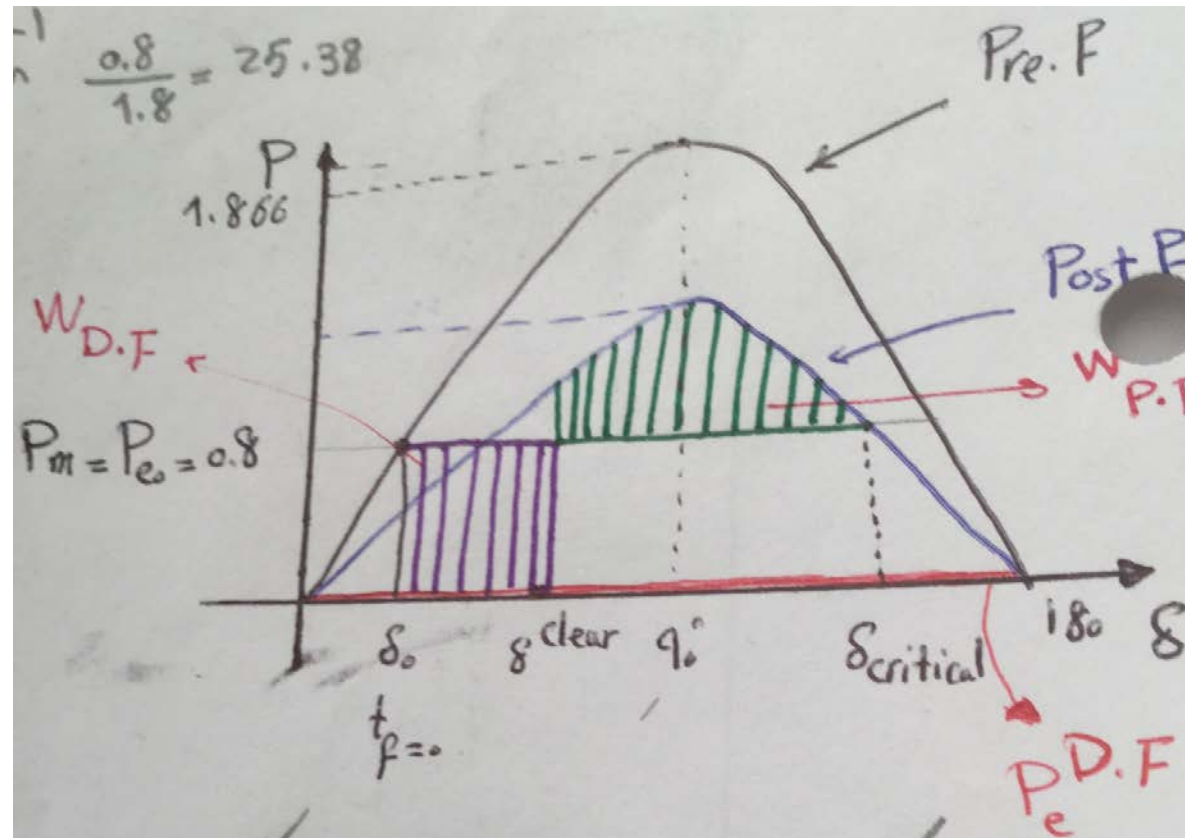
$$W_{P.F.}^{max} = \int_{\delta_{clear}}^{\delta_{critical}} (P_m - P_e^{P.F.}) d\delta = \int_{0.569}^{2.533} (0.8 - 1.4 \sin \delta) d\delta$$

$$W_{P.F}^{\max} = 0.8(\delta_{\text{critical}} - \delta_{\text{clear}}) + 1.4(\cos \delta_{\text{clear}} - \cos \delta_{\text{critical}})$$

$$= 0.8(2.533 - 0.569) + 1.4(\cos 32.6 - \cos 145.15) = -0.757$$

$$W_{D.F} + W_{P.F}^{\max} = 0.1 - 0.757 < 0 \Rightarrow \underline{\underline{\text{N.B.}}}$$

$$|W_{D.F}| < |W_{P.F}^{\max}| \Rightarrow \underline{\underline{\text{N.B.}}}$$



سؤال ۲: برای ژنراتور داده شده در مثال قبل، حداکثر زمان رنج خطا (CCT) را محاسبه نمایند؟

$$W_{D.f}^{critical} = 0.8 (\delta_{clear}^{critical} - \delta_0)$$

$$W_{P.f}^{max} = 0.8 (\delta_{critical} - \delta_{clear}^{critical}) + 1.4 (\cos \delta_{critical} - \cos \delta_{clear}^{critical})$$

$$W_{D.f}^{critical} + W_{P.f}^{max} = 0$$

$$\cos \delta_{clear}^{critical} = \frac{1}{1.4} [0.8 (2.533 - 0.493) + 1.4 \cos 145.15] = 0.379$$

$$\delta_{clear}^{critical} = 68.06^\circ \Rightarrow \delta_{clear}^{critical} = \delta_0 + 900 \times 0.8 \times t_{clear}^{critical} \quad CCT$$

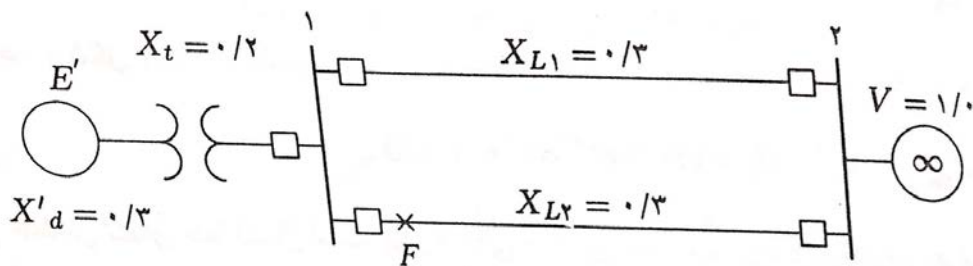
$$CCT = \sqrt{\frac{68.06 - 25.4}{900 \times 0.8}} = 0.243 \text{ Sec}$$

مثال

یک ژنراتور سنکرون با فرکانس ۶۰ هرتز که دارای ثابت اینرسی $H=5$ MJ/MVA و راکتانس گذرای محور مستقیم $X'_d = 0.3$ pu است، از طریق یک خط راکتیو خالص مطابق شکل ۱۱-۲۱ به شین بی‌نهایت متصل شده است. راکتانس‌های نشان داده شده روی شکل در یک مبنای مشترک داده شده‌اند. ژنراتور توان اکتیو $P_e = 0.8$ pu و توان اکتیو $Q = 0.74$ pu را به شین بی‌نهایت در ولتاژ $V = 1$ pu تحویل می‌دهد.

(الف) یک خطای سه‌فاز موقت در سمت ارسال خط و در نقطه F رخ می‌دهد. هنگامی که خطا رفع می‌شود هر دو خط در مدار هستند. زاویه بحرانی رفع خطا و زمان بحرانی رفع خطا را تعیین کنید.

(ب) یک خطای سه‌فاز در وسط یکی از خطوط رخ داده و سپس رفع می‌شود و خط خطا دار از سیستم جدا می‌شود. زاویه بحرانی رفع خطا را بدست آورید.



جریان ارسال شده به شین بی‌نهایت برابر است با:

$$I = \frac{S^*}{V^*} = \frac{0.8 - j0.74}{1 \angle 0^\circ} = 0.8 - j0.74 \text{ pu}$$

راکتانس انتقالی بین ولتاژ داخلی و شین بی‌نهایت قبل از خطا عبارتست از:

$$X_T^{\text{Pre.F}} = X_1 = 0.3 + 0.2 + \frac{0.3}{2} = 0.65 = X_T^{\text{P.F}}$$

ولتاژ داخلی گذرای ژنراتور از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E' = V + jX_1 I = 1.0 + (j0.65)(0.8 - j0.74) = 1.17 \angle 26.387^\circ \text{ pu}$$

(الف) چون پس از رفع خطا هر دو خط در مدار هستند، معادله توان - زاویه قبل و بعد از خطا عبارتست از:

$$P_{max} \sin \delta = \frac{(1.17)(1.0)}{0.65} \sin \delta = 1.8 \sin \delta$$

$$1/8 \sin \delta_0 = 0/8$$

$$\delta_0 = 26/388^\circ = 0/46.55 \text{ rad}$$

و با توجه به شکل ۱۱-۱۷، داریم :

$$\delta_{max} = 18^\circ - \delta_0 = 153/612^\circ = 2/681 \text{ rad} = \delta_{critical}$$

چون خطا در ابتدای خط انتقال است، توان انتقالی در حین خطا صفر بوده و زاویه رفع بحرانی خطا با توجه به رابطه (۹۱-۱۱) برابر است با:

$$\cos \delta_c = \frac{0/8}{1/8} (2/681 - 0/46.55) + \cos 153/61^\circ = 0/91.6$$

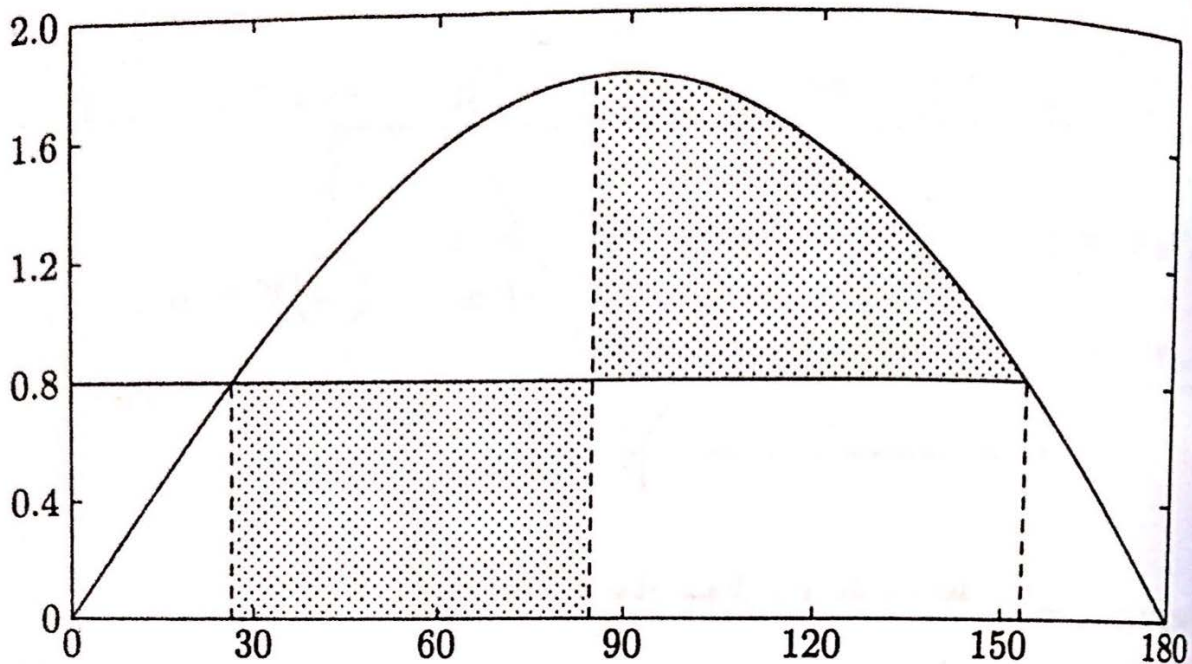
بنابراین، زاویه بحرانی رفع خطا عبارتست از:

$$\delta_c = \cos^{-1}(0/91.6) = 84/775^\circ = 1/48 \text{ rad}$$

با استفاده از رابطه (۹۲-۱۱) زمان بحرانی رفع خطا برابر است با:

$$t_c = \sqrt{\frac{2H(\delta_c - \delta_0)}{\pi f_0 P_m}} = \sqrt{\frac{(2)(5)(1/48 - 0/46.55)}{(\pi)(60)(0/8)}} = 0/26 \text{ sec} = CCT$$

کاربرد معیار سطوح برابر در سیستم با رفع خطای بحرانی



زاویه توان بر حسب درجه

(ب) معادله توان - زاویه قبل از وقوع خطا مانند بند (الف) بوده و برابر است با:

$$P_{1max} = 1/8 \sin \delta$$

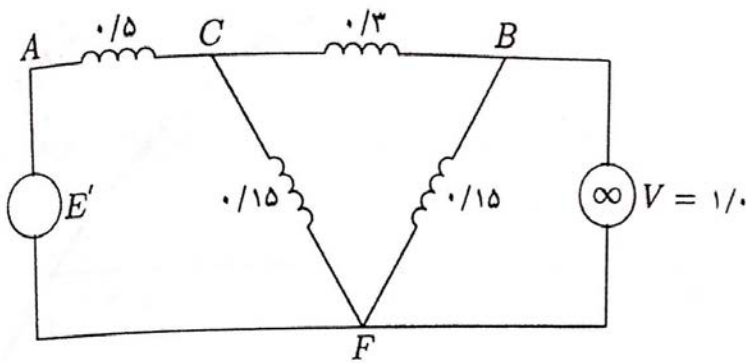
این ژنراتور در زاویه توان اولیه $\delta_0 = 26/4^\circ = 0.4605 \text{ rad}$ کار می کند. خطا در نقطه F یعنی وسط یکی از خطوط رخ می دهد که مدار معادل آن در شکل ۱۱-۲۳ نشان داده شده است. راکتانس انتقالی در حین خطا به سادگی با تبدیل مدار ستاره ABF به معادل مثلث آن و حذف نقطه اتصال C بدست می آید. مدار حاصل در شکل ۱۱-۲۴ آمده است.

راکتانس معادل بین ژنراتور و شین بی نهایت برابر است با:

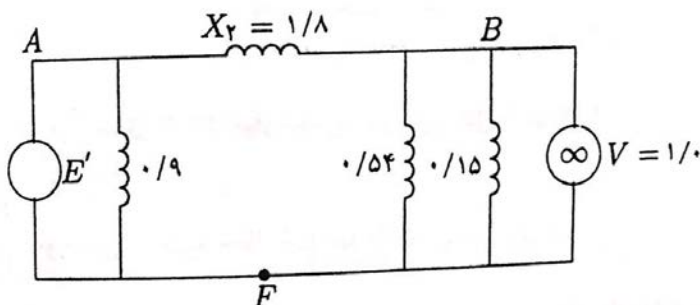
$$X_r = \frac{(0.5)(0.3) + (0.5)(0.15) + (0.3)(0.15)}{0.15} = 1/8 \text{ pu}$$

در نتیجه، معادله توان - زاویه در حین خطا عبارتست از:

$$P_{rmax} \sin \delta = \frac{(1/17)(1/0)}{1/8} \sin \delta = 0.65 \sin \delta$$



شکل ۱۱-۲۳ مدار معادل با خطای سه فاز در وسط یک خط



پس از رفع خطا، خط خطادار جدا می‌شود. بنابراین، راکتانس انتقالی پس از خطا از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$X_r = 0.3 + 0.2 + 0.3 = 0.8 \text{ pu}$$

معادله توان - زاویه در این حالت عبارتست از:

$$P_{rmax} \sin \delta = \frac{(1/17)(1/0)}{0.8} \sin \delta = 1/4625 \sin \delta$$

$$\delta_{max} = 18^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{0.8}{1/4625} \right) = 146/838^\circ = 2/5628 \text{ rad}$$

با بکارگیری رابطه (۱۱-۹۳)، زاویه بحرانی رفع خطا برابر است با:

$$\cos \delta_c = \frac{0.8(2/5628 - 0/46.55) + 1/4625 \cos 146/838^\circ - 0/65 \cos 26/388^\circ}{1/4625 - 0/65}$$
$$= -0.15356$$

در نتیجه، زاویه بحرانی رفع خطا عبارتست از:

$$\delta_c = \cos^{-1}(-0.15356) = 98/834^\circ$$

روش های بهبود پایداری گذرا

روش های بهبود پایداری گذرا سعی دارند تا یک یا چند مورد از اثرهای زیر را برآورده کنند:

(الف) کاهش تاثیر اغتشاش با حداقل سازی شدت خطا و دوره آن

(ب) افزایش نیروهای سنکرون کننده بازیافت

(ج) کاهش گشتاور شتابدهنده از طریق کنترل توان مکانیکی توربین

(د) کاهش گشتاور شتابدهنده با اعمال بار مصنوعی

۱- رفع خطا با سرعت زیاد:

استفاده از کپسول های دو سیکل همراه با بار \downarrow و وسیله ارتباطی با سرعت زیاد \downarrow t_{clear}

۲- کاهش راکتانس سیم انتقال:

با کاهش راکتانس سیم انتقال \leftarrow توان نگهدارنده پس از خطا \leftarrow پایداری گذرا را بهبود می دهد.

۱- استفاده از ترانسفورماتورهای با راکتانس فسخ کمتر

۲- جبران سازی خازن سری خطرات انتقال

۳- جبران سازی قابل تنظیم است:

استفاده از کندانسور سکون یا جبران سازی استاتیکی توان را کمتر (SVC)

۴- بازدارنده های دینامیکی:

احمال تک بار الکتریکی مصنوعی حین اغتشاش گذرا ← افزایش خروجی توان الکتریکی ژنراتور → کاهش ثابت رتبه

مقاومت صای ترزی فقط به واحدهای آبی دور از مراکز بار اعمال شده است. واحدهای آبی در مسایله با واحدهای حرارتی بسیار حس هستند و بنا بر این توانند ضربه ناگهانی ناشی از کبک زنی مقاومت ها را بدون اثر کمتری تحمل کنند.

عمده‌ااً مقاومت آبجور موازی استفاده می‌شوند.

۵- بازوبت سریع شیر توربین بخار *fast valving*

قابل اعمال به واحدهای حرارتی

- هزینه آن کم است.

- بخاطر اثرهای کم اثر توربین و دیگ بخار یا ژنراتور بخار فقط در مولدهای استفاده می‌شود که دیگر روش‌ها قادر به بهبود

پایداری نباشند.

در مسایله با خارج کردن ژنراتور این نسبت را دارد که ژنراتور متصل به شبکه باقی‌مانده در لحظه قطع کاهش پیدا نمی‌کند.

اما بازوبت سریع شیر به اندازه خدج کردن ژنراتور در حفظ پایداری موثر نیست.

۶- خارج کردن ژنراتور:

ابتدا در نیروگاه های آبی و دور از مرکز مهن استفاده می شد. از دهه ۱۹۷۰ میلادی تا کنون در واحدهای حرارتی نیز استفاده شد است. در این طرح خطوط خطا در نیز از سیستم خارج می شوند.

۷- سیستم های تحریک با سرعت زیاد:

AVR قادر است در حالت ماندگار و گذرا در پی تغییرات ولتاژ ترمینال با کنترل ولتاژ داخلی ژنراتور حاصلی در ثبت ولتاژ ترمینال نماید. برای ژنراتورهای دارای تحریک سریع هستند مانند تحریک استاتیک می توانند باعث تشدید نوسانات زوکانس پایش در عبور آن تضعیف برای این نوسانات شوند. برای رفع این مشکل از یابیدار کننده سیستم قدرت PSS استفاده می شود.

پایداری زاویه‌ای ژنراتور می‌تواند به دو پدیده زیر تقسیم شود:

۱- پدیده پایداری توان زاویه ناشی از اغتشاش بزرگ «Large Disturbance» ← خیزاول دامکان بازگشت آن مورد توجه است.

۲- پایداری نوسانی ژنراتور که در پیامده اختلال بزرگ اولیه و یا اینکه پیامده اختلال کوچک «small signal» عبارتند از:

در این حالت رتور با فرکانسی در حدود 0.5 تا 3 هرتز نوسان می‌نماید ← در این حالت مجرای میله‌ای نوسانات ژنراتور مورد

توجه است.

$$P_e = P_{max} \sin \delta$$

پایداری ماندگار - اختلال های کوچک :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) \Rightarrow \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_{max} \sin \delta)$$

با این وجود، برای اختلال های کوچک، معادله نوسان را میتوان با کم کردن کاهش دقت به صورت زیر خطی کرد: $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2(\delta_0 + \Delta\delta)}{dt^2} = P_m - P_{max} \sin(\delta_0 + \Delta\delta)$$

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta_0}{dt^2} + \frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} = P_m - P_{max} (\sin\delta_0 \cos\Delta\delta + \cos\delta_0 \sin\Delta\delta)$$

چون $\Delta\delta$ کوچک است، میتوان نوشت: $\cos\Delta\delta = 1$

$$\sin\Delta\delta = \Delta\delta$$

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta_0}{dt^2} + \frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} = P_m - P_{max} \sin\delta_0 - P_{max} \cos\delta_0 \Delta\delta$$

از آنجایی که در حالت نته کار اولیه داریم:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta_0}{dt^2} = P_m - P_{max} \sin\delta_0$$

$$P_s = \left. \frac{dP}{d\delta} \right|_{\delta_0} = P_{max} \cos\delta_0$$

ضریب سترون کننده

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + P_{max} \cos\delta_0 \Delta\delta = 0$$

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + P_s \Delta\delta = 0 \Rightarrow \frac{2H}{\omega_0} S^2 + P_s = 0 \Rightarrow S^2 = -\frac{\omega_0}{2H} P_s = -\frac{\pi P_e}{H} P_s$$

هنگامی که $P_s < 0$ است ← یک ریشه حقیقی است ← پایداری از دست می رود.

$P_s > 0$ ← دو ریشه روی محور s است ← پاسخ به صورت نوسانی میرانشده است. سیخ دارای پایداری حده بوده و فرکانس

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\pi P_0 P_s}{H}}$$

طبیعی نوسان آن به صورت زیر می باشد:

مادامی که اختلالی در سرعت زاویه ای بین رتور و میدان دوار منتجب فاصله هوایی ایجاد شود، حالت صورتور القایی بوجود آمده و گشتاوری روی رتور ایجاد می شود که تا این دارد بین این دو سرعت زاویه ای را کاهش دهد. این گشتور مرسوم به گشتور میراکننده

$$P_d = D \frac{d\delta}{dt}$$

است. توان میرایی تقریباً با تغییرات سرعت متناسب است، یعنی

ضریب میرایی D را می توان از اطلاعات طراحی یا بوسیله آزمون تعیین نمود.

اگر $P_s > 0$ ← به دلیل توان میراکنندگی ← نوسانات میرا می شود ← همگرد ماشین به زاویه تعادل اولیه باز خواهد گشت.

$$\frac{H}{\pi P_0} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \frac{D \Delta \delta}{dt} + P_s \Delta \delta = 0 \Rightarrow \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \frac{\pi P_0}{H} D \frac{d \Delta \delta}{dt} + \frac{\pi P_0}{H} P_s \Delta \delta = 0$$

$$\frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + 2 \zeta \omega_n \frac{d \Delta \delta}{dt} + \omega_n^2 \Delta \delta = 0$$

$$\zeta = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\pi P_0}{H P_s}}$$

ضریب زب میرایی

$$S^2 + 2g\omega_n S + \omega_n^2 = 0$$

$$g = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\pi P_0}{H P_s}} < 1 \quad \text{در شرایط کار عادی داریم:}$$

$$\Rightarrow S_{1,2} = -g\omega_n \pm j\omega_n \sqrt{1-g^2} = -g\omega_n + j\omega_d$$

$$\text{فرکانس میرایی} \quad \omega_d = \omega_n \sqrt{1-g^2}$$

برای میرایی مثبت اگر ضریب $P_s > 0$ ← تحت حقیق ریشه ها منفی بوده ← سطح پایا میرایی است.

فصل پنجم

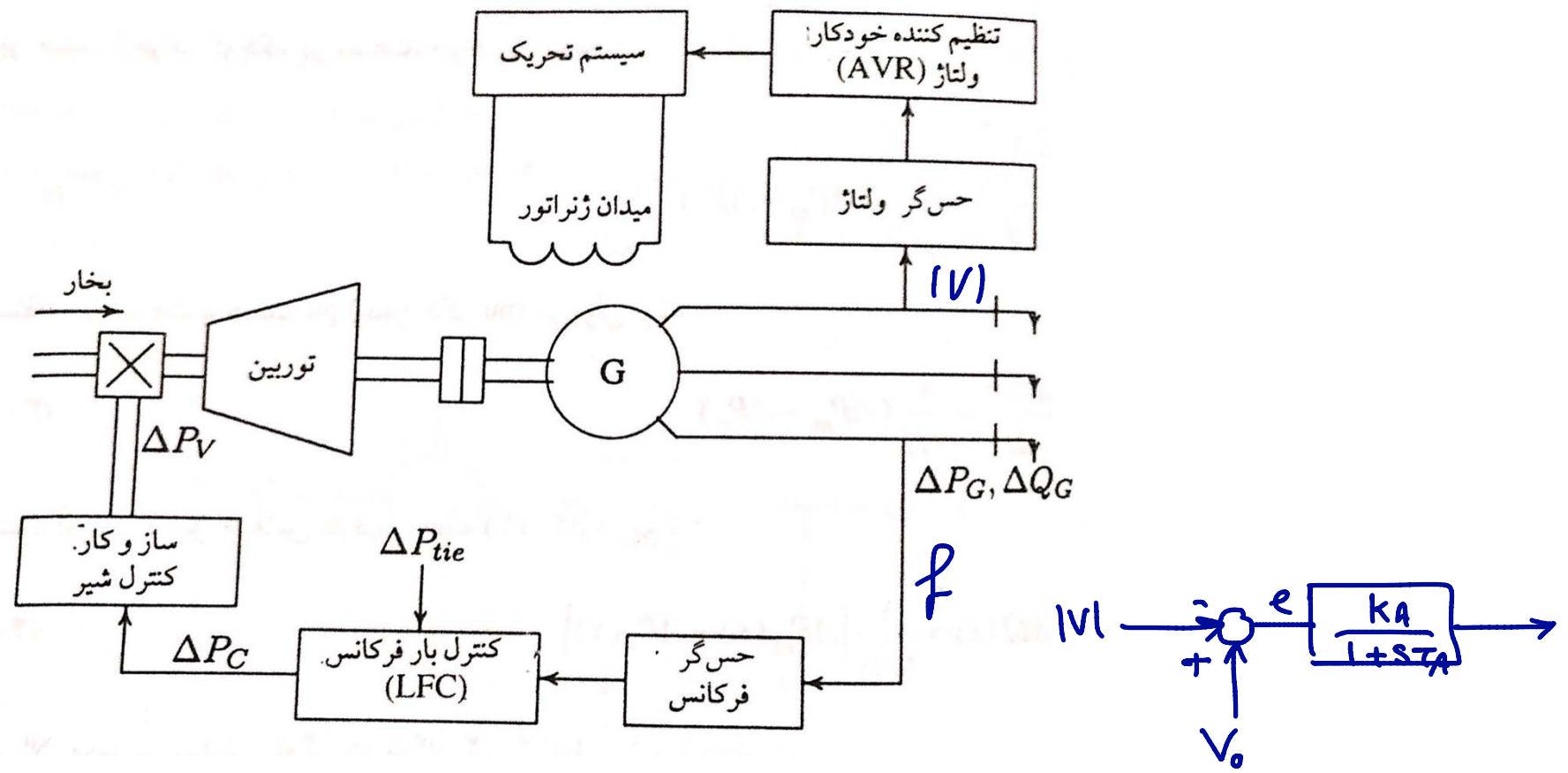
کنترل سیستم های قدرت

توان الکتریکی با فرکانس نسبت دارد. $P \propto f$

توان مکانیکی با ولتاژ نسبت دارد. $Q \propto V$

حلقه کنترل بار و فرکانس (LFC) Load Frequency control توان حقیقی و فرکانس را تنظیم می‌کند.

حلقه تنظیم کننده خودکار ولتاژ (AVR) Automatic Voltage Regulator توان را تنظیم می‌کند و ولتاژ را کنترل می‌کند.



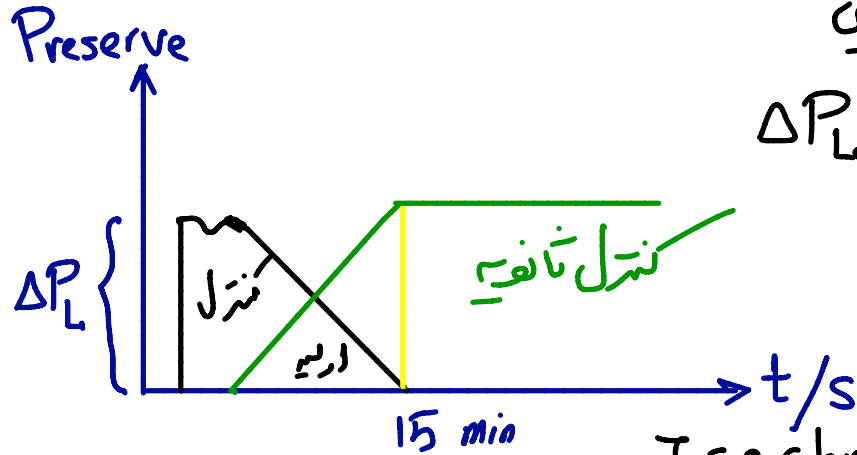
کنترل فرکانس

۱- کنترل ذاتی ← بارهای حساس به فرکانس به مثل موتورهای القایی

$$\Delta P_{Load} = D \cdot \Delta F$$

۲- کنترل اولیه: گاورنر

۳- کنترل ثانویه: AGC



Isochronous Governor

Drooping

گاورنر { ۱- سرعت ثابت :
۲- با متعنه افتی سرعت (درپ دار) }
characteristics

گاورنر را در نیروگاه های آبی و نیروگاه های ببار پایه ای تأمین میکنند.

گاورنر برای زمان های کوتاه و برای دامنه تغییرات کم بار قابل استفاده است.

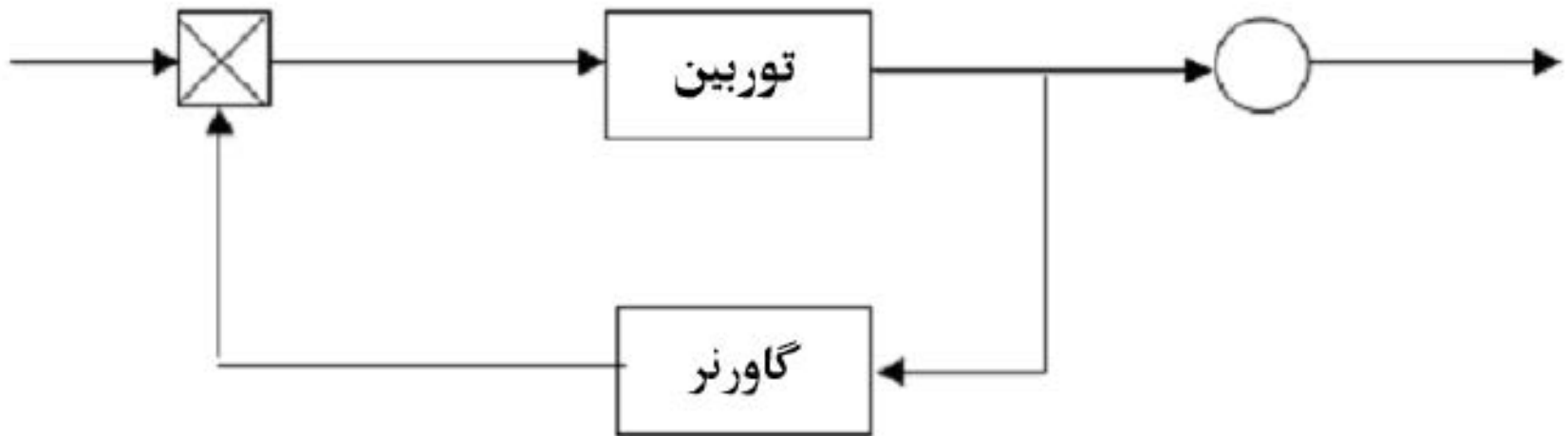
گاورنر سرعت ثابت در شبکه های بهم پیوسته استفاده نمی کنند. چون هر گاورنر به صورت منفرد عمل میکند و با تغییر کوچک

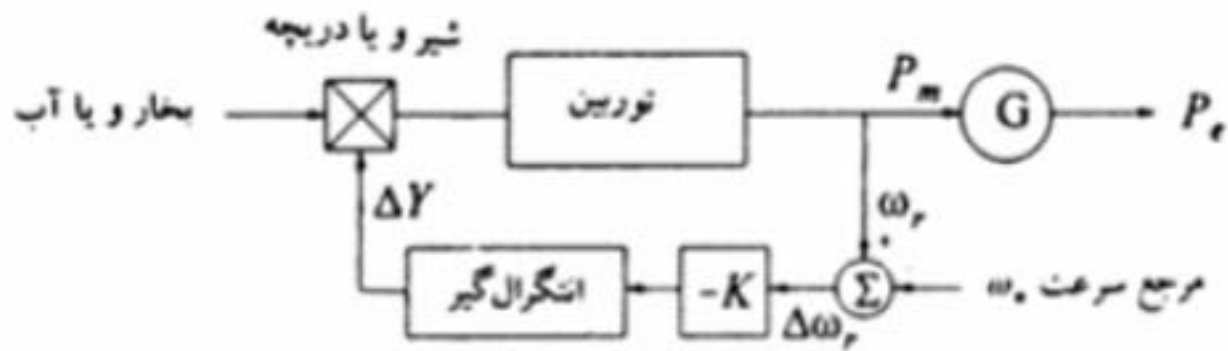
در بار نوسانات زیادی در فرکانس خواهیم داشت. (اصطلاح گاورنرها با هم درستی ندارند)

گاورنر سرعت ثابت

به طور کلی گاورنر با اندازه گیری سرعت محور ژنراتور و مقایسه با سرعت مرجع دریچه بخار یا آب را تنظیم می کند. به طور مثال موقعی که سرعت کم شده باشد اختلاف ω_{is} و ω_{soll} منفی شده $\omega_{is} = \omega_{soll} < 0$ که باعث می گردد دریچه باز شود

دریچه بخار یا آب





ω_r = سرعت روتور
 P_m = سرعت مکانیکی

Y = برفیت شیر
 یا دریچه

نموداری از گاورنر سرعت ثابت

تشریح بلوک دیاگرام:

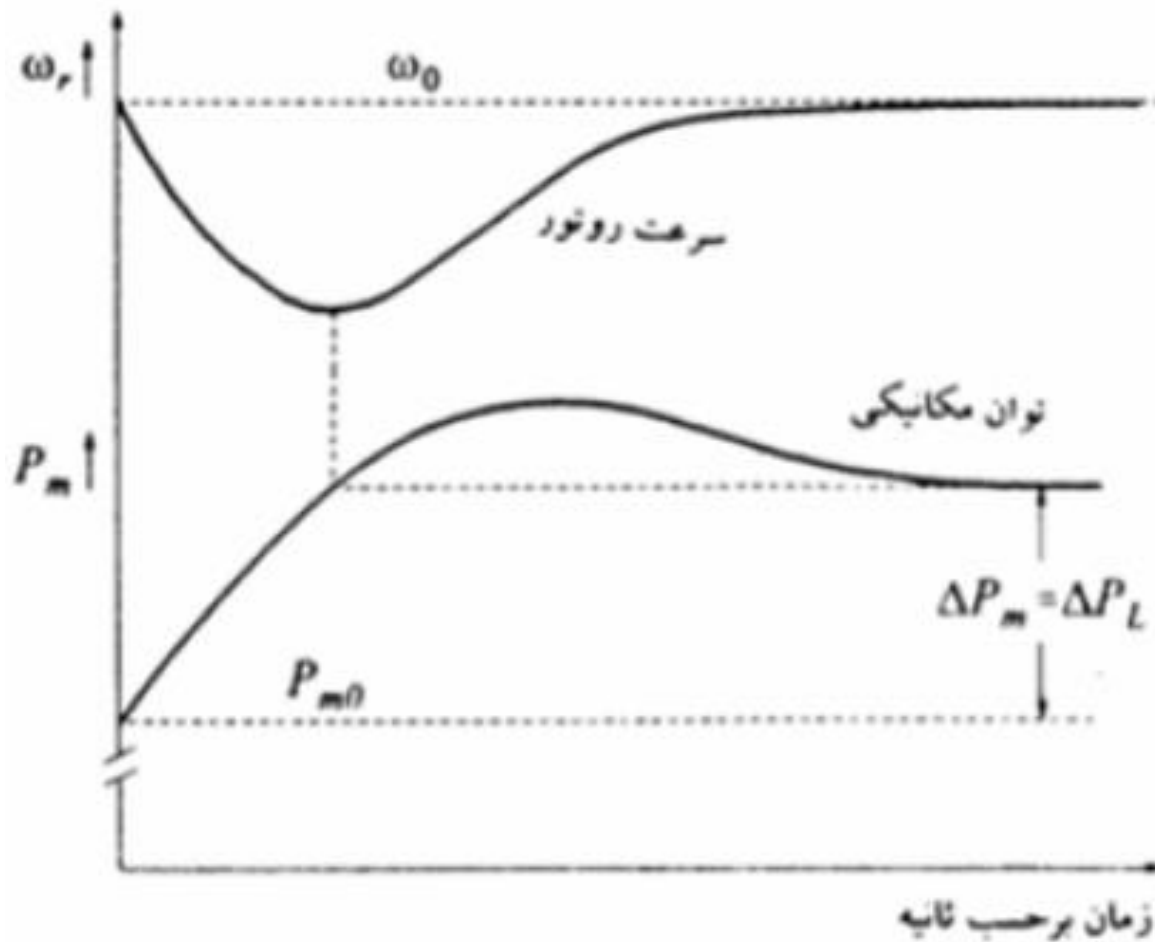
- ۱- سرعت توربین اندازه گیری می گردد.
- ۲- سرعت اندازه گیری شده با یک مقدار مرجع ω_{soll} مقایسه می شود.
- ۳- اختلاف حاصل (سیگنال خطا) تقویت و منفی می گردد.
- ۴- توسط انتگرال گیر سیگنال خطا، تبدیل به سیگنالی جهت باز یا بسته کردن دریچه بخار یا شیر آب شده است.
- ۵- زمانی که سرعت به مقدار اولیه برسد خطای سرعت $\Delta\omega_s$ صفر می گردد.

پاسخ زمانی سیستم گاورنر

با افزایش بار الکتریکی به اندازه Δp_L ، فرکانس کاهش می یابد که برای مقابله با این تغییر فرکانس توان مکانیکی توربین باید شروع به افزایش کند در نتیجه سرعت افت فرکانس کم می شود تا وقتی که توان مکانیکی و توان الکتریکی با هم برابر می شود اما افت فرکانس جبران نشده است لذا فرکانس شروع به افزایش کرده تا این کاهش جبران گردد.

باید توجه داشت که سیستم گاورنر سرعت ثابت برای یک واحد تولیدی مناسب است و اگر تعداد بیشتری واحد داشته باشیم (مثلاً برای شبکه پیوسته) این سیستم مناسب نیست و باید از سیستم دیگری با مشخصه افقی سرعت استفاده کنیم .

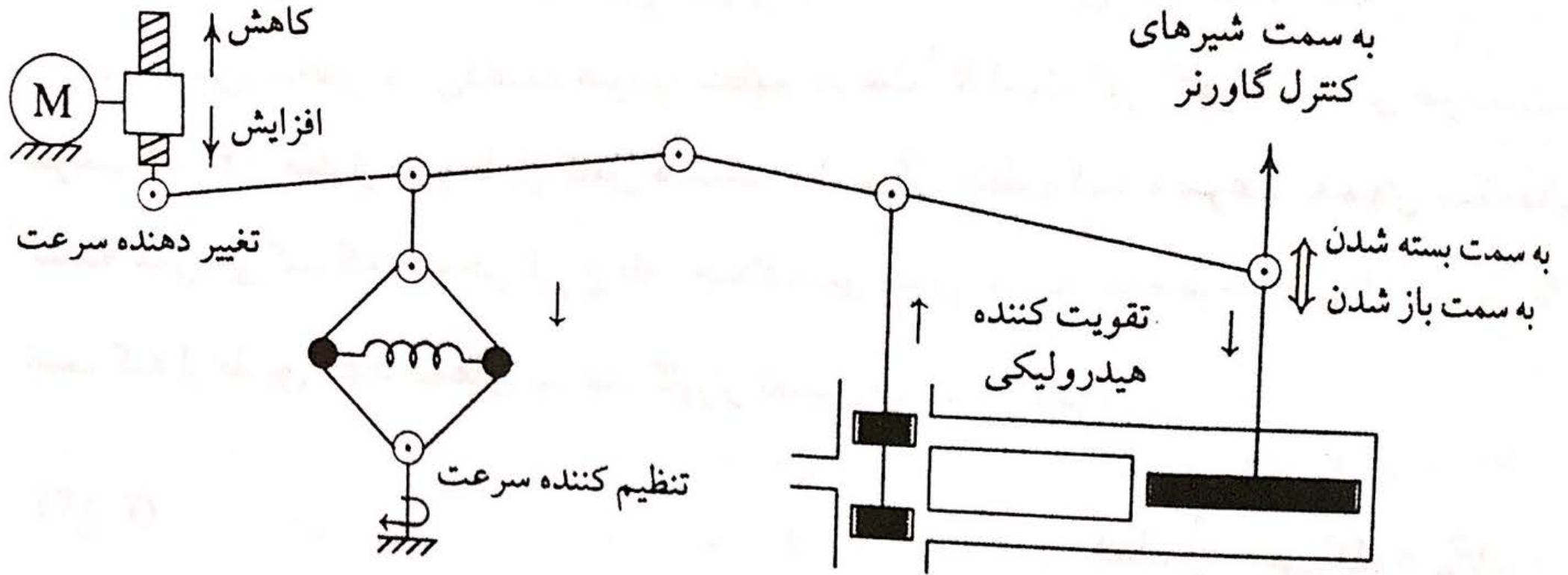
پاسخ واحد تولید با گاورنر سرعت ثابت



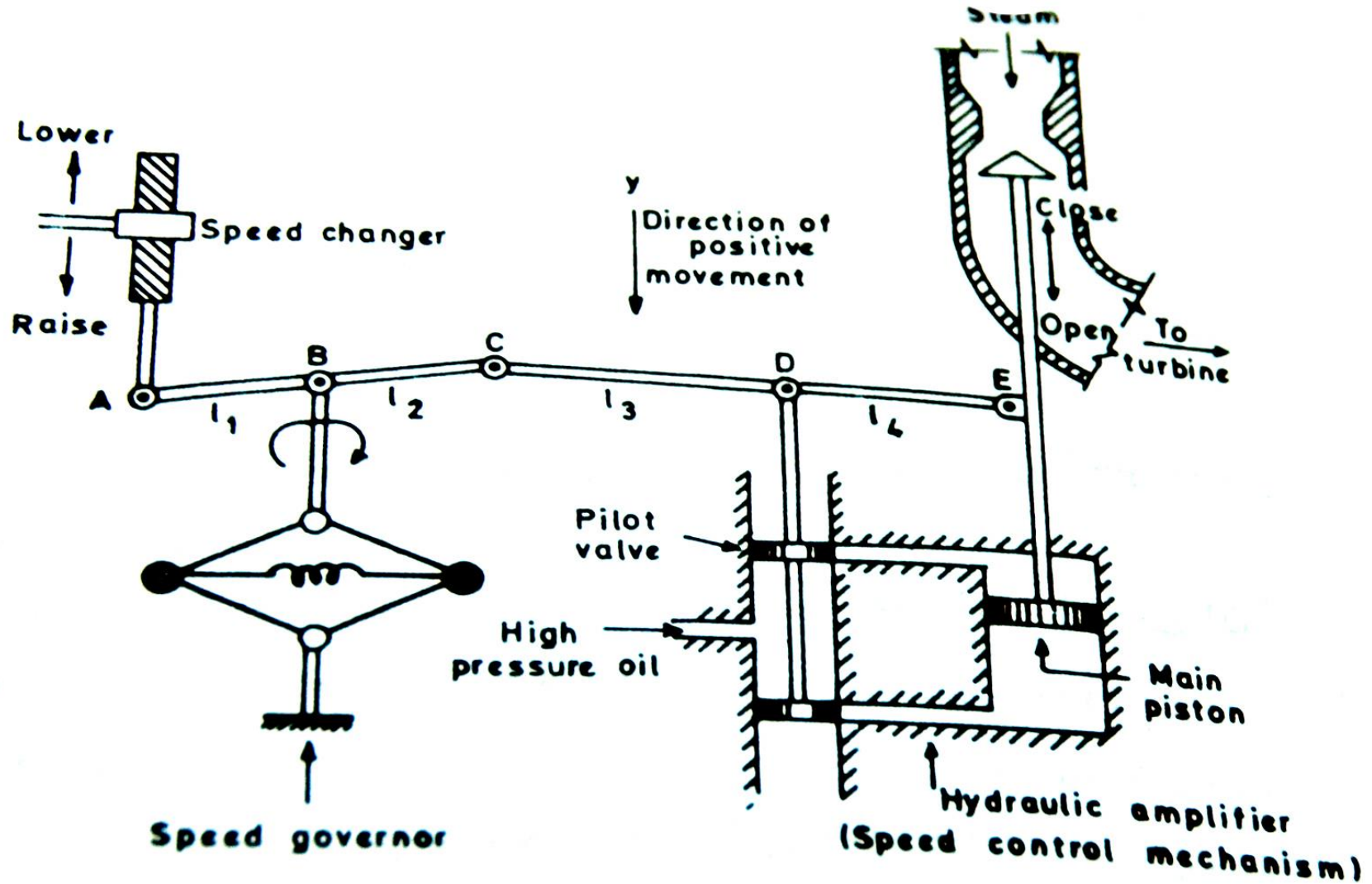
گاورنر

- ✍ گاورنر قسمت اساسی سیستم کنترل بار - فرکانس را تشکیل می‌دهد.
- ✍ گوی‌های چرخان قلب سیستم گاورنر بحساب می‌آیند. این گوی‌ها در هنگام افزایش سرعت به طرف خارج و در هنگام کاهش سرعت به طرف داخل متمایل می‌شوند. این عمل بترتیب نقطه B را بالا یا پایین می‌برد.
- ✍ تقویت‌کننده هیدرولیکی از دو عدد شیر پیستونی و یک عدد پیستون اصلی تشکیل شده است.
- ✍ اهرمها باعث انتقال نیرو به نقاط مورد نظر گاورنر می‌شوند.
- ✍ تغییر دهنده سرعت (SPCH) باعث تنظیم توان خروجی توربین در حالت مانا می‌گردد.

گاورنر

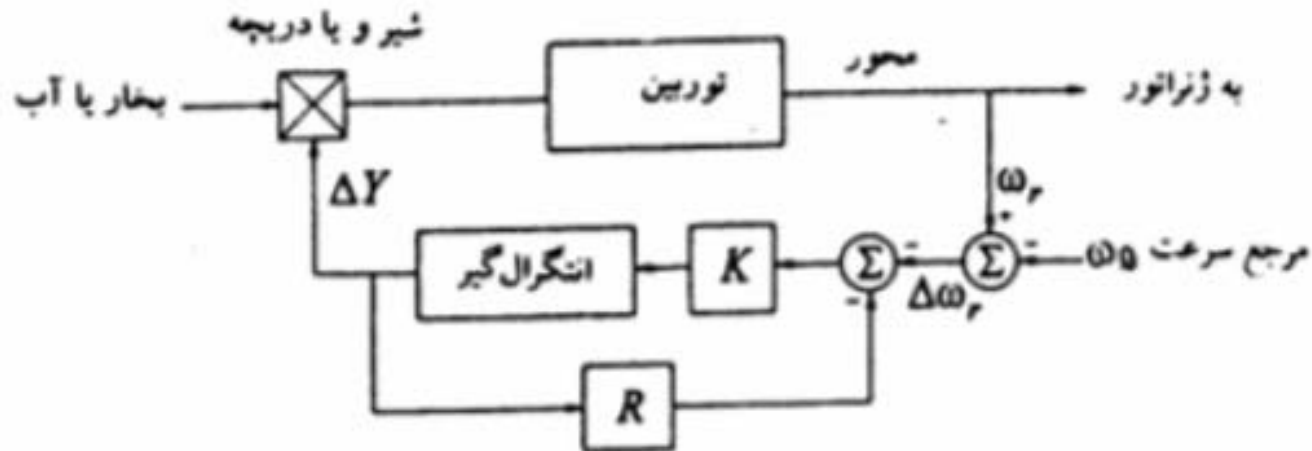


گاورنر



گاورنر با مشخصه افتی سرعت

زمانی که دو یا تعداد بیشتری واحد به یک سیستم متصل شده هستند و از طریق گاورنر تنظیم سرعت و فرکانس را برعهده دارند دیگر نمی توان از گاورنر های سرعت ثابت استفاده کرد زیرا باید هر ژنراتور به طور دقیق همان نقطه تنظیم سرعت را داشته باشد در غیر این صورت هر یک از گاورنر ها به صورت اینکه به تنهایی در سیستم هستند عمل نموده و سعی در کشاندن تغییرات بار و تنظیم آن به سمت خود را می نماید و به اصطلاح واحدها با هم درگیر می شوند از اینرو برای استفاده از گاورنرها و تقسیم انحراف بار روی آنها گاورنرهای با مشخصه افتی به صورت زیر تکمیل می گردند



گاورنر با فیدبک حالت ماندگار

در شکل ضریب R " افت سرعت یا تنظیم درصد سرعت " نام دارد که تعیین کننده سرعت حالت ماندگار در مقابل مشخصه بار واحد تولیدی می باشد .

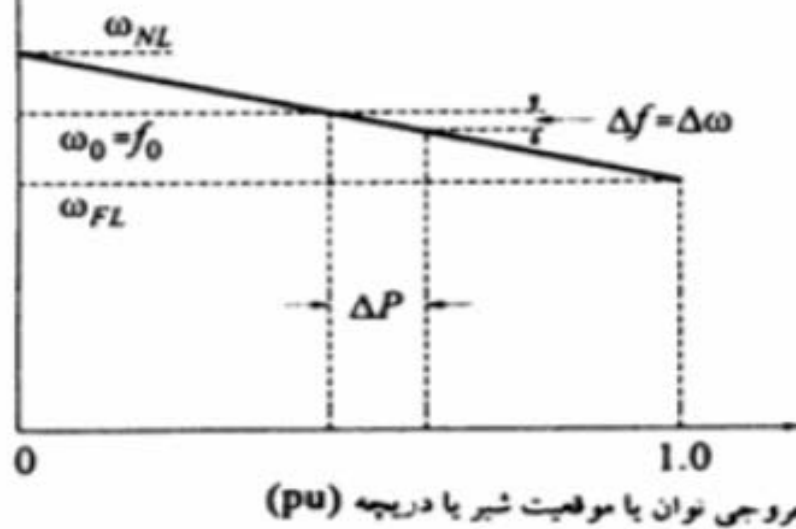
$$R = \frac{\Delta F}{\Delta P} \quad (9-1)$$

معمولا R به صورت درصد بیان می شود به طور مثال ضریب $R = 5\%$ بیانگر 5% تغییر در فرکانس بازای 100% تغییر در خروجی واحد است .

$$R = \left(\frac{\omega_{NL} - \omega_{FL}}{\omega_0} \right) * 100$$

- ω_{NL} : سرعت حالت ماندگار در بی باری ؛
- ω_{FL} : سرعت حالت ماندگار در بار کامل ؛
- ω_0 : سرعت اسمی یا نامی ، است .

فرکانس یا سرعت (pu)



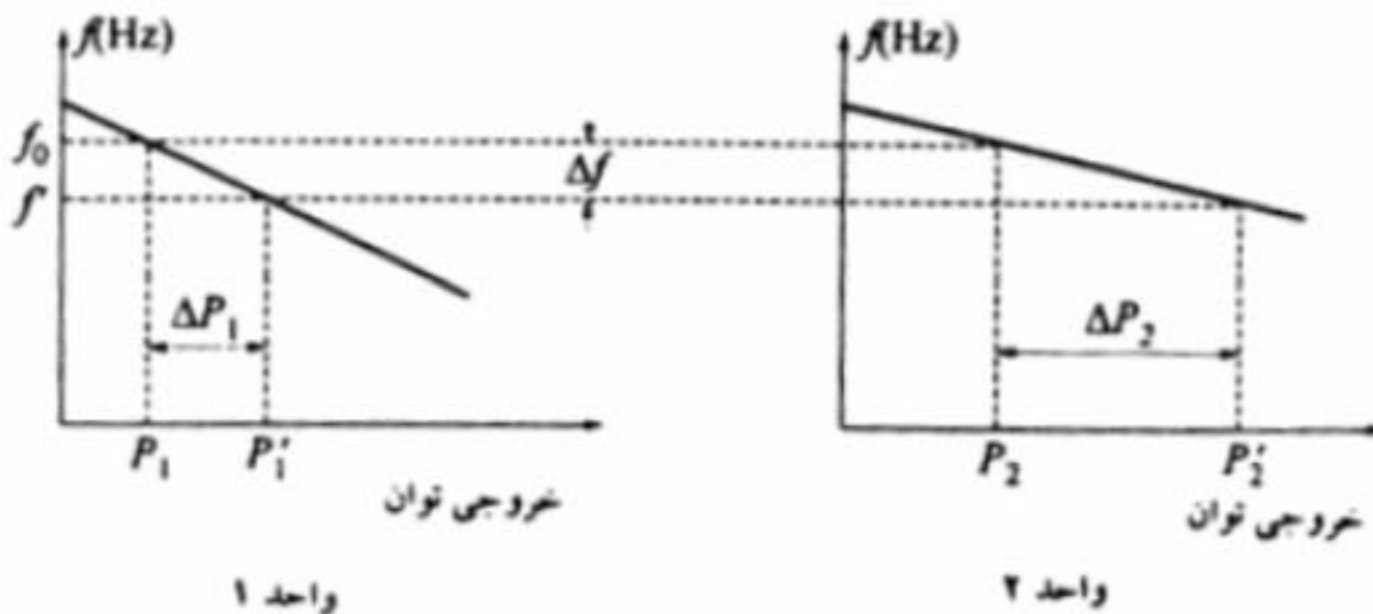
$$R = \frac{\Delta f}{\Delta P}$$

$$\Delta f = f - f_0$$

مشخصه های ایده آل حالت ماندگار گاورنو با شیب افقی سرعت

تقسیم بار بین واحدهای موازی

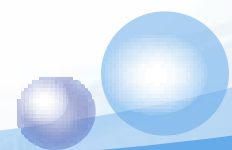
اگر دو یا تعداد بیشتری واحد به یک سیستم قدرت وصل شوند معمولاً همیشه در یک فرکانس مشخص بار را بین خود تقسیم می کنند.



تقسیم توان توسط واحدهای موازی با مشخصه‌های افقی گاورنر

۳۰

$$\Delta p_1 = p_1' - p_1 \quad \& \quad \Delta p_2 = p_2' - p_2 \quad \Rightarrow \quad \Delta p_L = \Delta p_1 + \Delta p_2$$

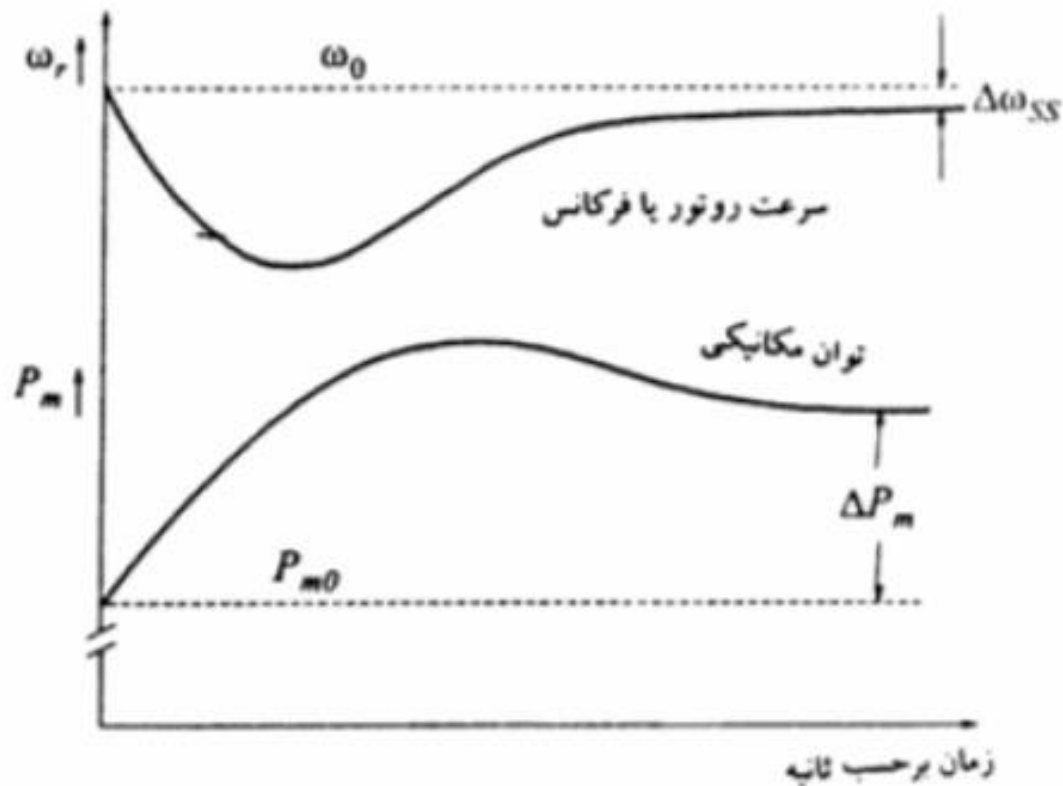


اگر ضریب تنظیم در هر دو واحد مساوی باشد تغییر در خروجی های هر واحد متناسب با ظرفیت تولیدی هر واحد خواهد بود .

$$R_2 = \frac{\Delta f}{\Delta p_2} \quad \& \quad R_1 = \frac{\Delta f}{\Delta p_1} \quad \Rightarrow \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} \quad (10-1)$$

پاسخ زمانی گاورنر با مشخصه اف‌تی سرعت

در زمانی که افزایش در بار ایجاد شود یعنی بعد از اینکه توان افزایش یافته به سیستم قدرت دقیقاً بین واحدها تقسیم شد هنوز فرکانس به مقدار نامی خود نرسیده و مقداری کمبود فرکانس در سیستم اندازه گیری می‌گردد.



۱- تغییرات تولید به وسیله بازوی بته کردن در پیچه بخار، افزایش ویاکاهش ولتژی نیت (یعنی سوخت تغییر نمی کند). گاورنر برای تغییرات کم و در مدت کوتاه استفاده می شود.

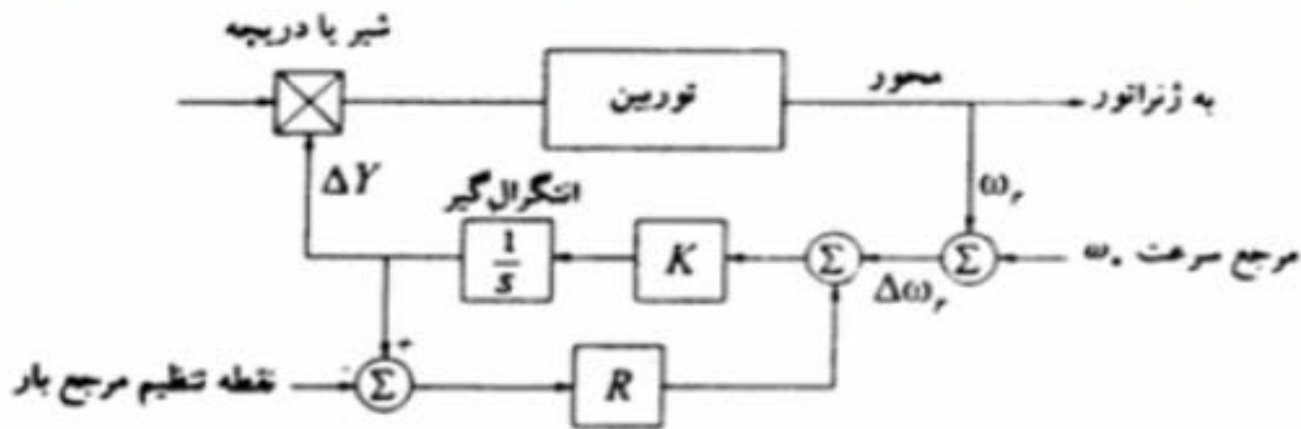
این اختلاف برای این است که مشخص نشود آیا تغییرات بار ایجاد شده لحظه ای بوده یا ماندگار شده است. در صورت تغییرات ماندگار تولید، به صورت واقعی افزایش یا به نه کاذب

۲- در صورت باز کردن در پیچه بخار پس از مدتی گاورنر دیگر نمی تواند مورد استفاده قرار گیرد. با بستن در پیچه های بخار آنها را برای اغتشاش بعدی به عنوان یک کنترل کننده در اختیار داشته باشیم. این افتدات Δw_{ss} با آن می ماند تا گاورنر به حالت اولیه بازگردد. در پیچه سوخت را باز می کنیم تا بتواند دوباره از گاورنر استفاده کنیم.

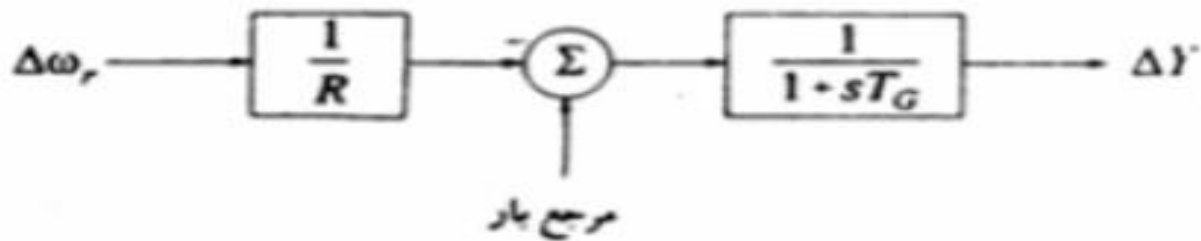
کنترل خروجی توان واحد تولیدی

برای جبران این کمبود فرکانس باید سوخت را بیشتر کنیم و یا به عبارت دیگر توان تولیدی را بیشتر کنیم چرا که گاورنر میزان بخار را افزایش می دهد نه تولید را. وجود فیدبک R در بلوک دیاگرام زیر باعث ایجاد $\Delta\omega_{ss}$ می گردد. ولی در حالت گاورنر سرعت ثابت فیدبک R وجود نداشته و مستقلاً باید کمبود فرکانس جبران شود. نکته:

با در نظر گرفتن کاهش و افزایش سوخت برای جبران حالت خطای ماندگار فرکانس در بلوک دیاگرام ((نقطه تنظیم مرجع بار)) در نظر گرفته شده است که برای مواقعی که تغییرات بار ماندگار شود با افزایش یا کاهش سوخت افزایش و یا کاهش می دهد. گاورنر به حالت اولیه برگشته و فرکانس به مقدار نامی می رسد.



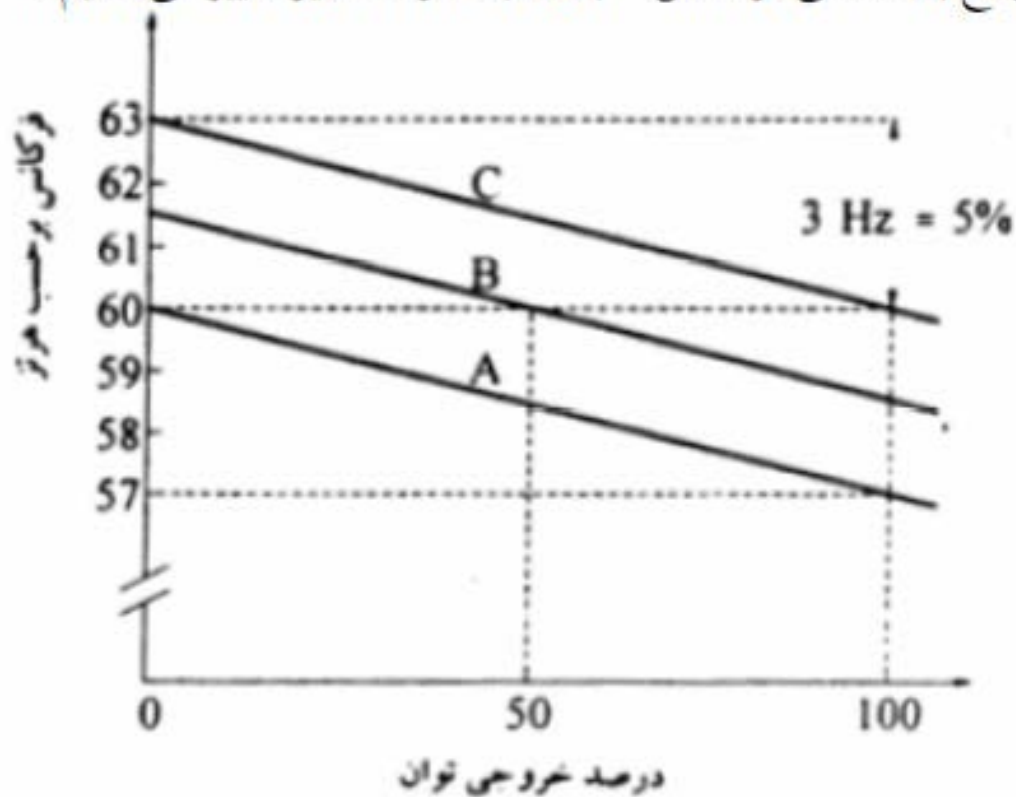
نمایش نمادین گاورنر و توربین



مرجع بار

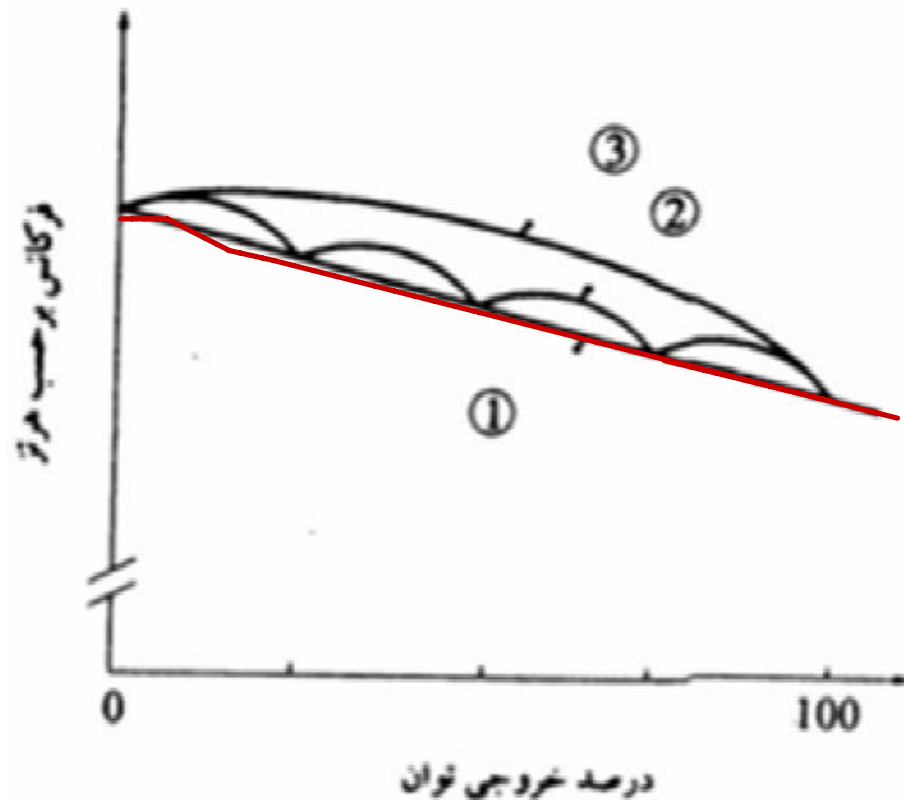
نمودار بلوکی کاهش بار با استفاده گاورنر

در حقیقت با تغییر نقطه مرجع بار منحنی فرکانس - بار را به صورت زیر تغییر می دهیم:



تأثیر نقطه تنظیم تغییر دهنده تب بر مشخصه گاورنر

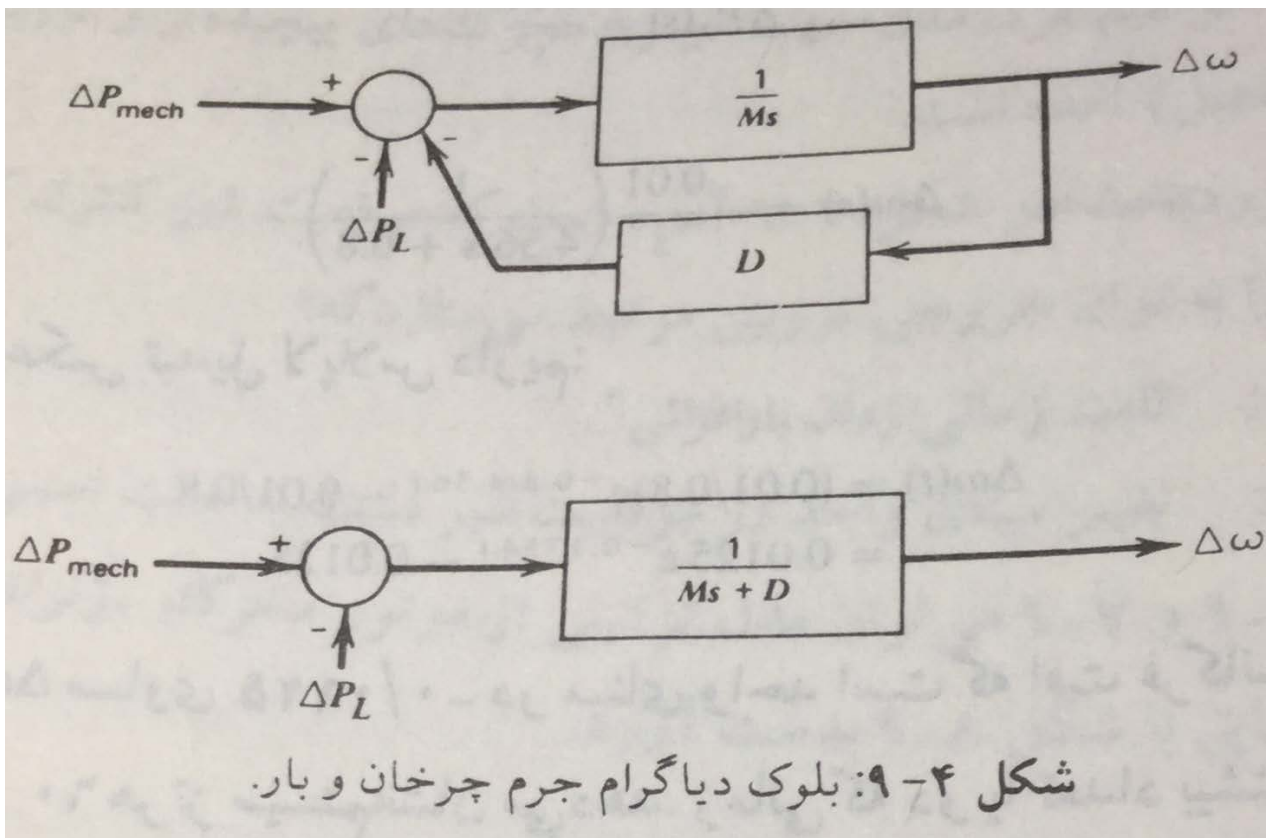
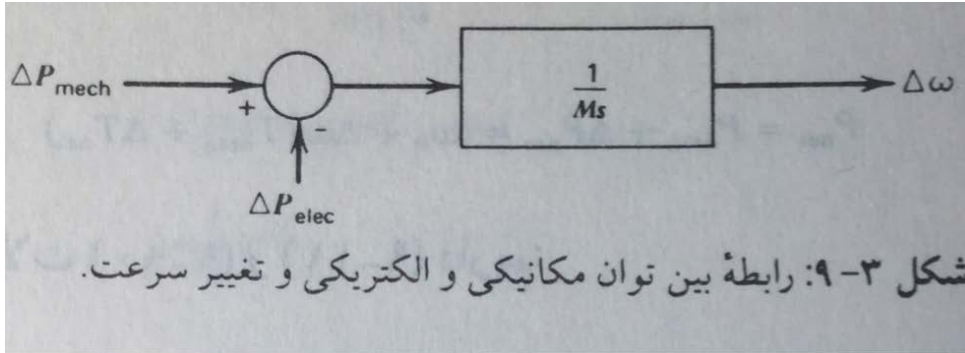
مشخصات واقعی و ایده آل افتی سرعت گاورنر



منحنی ۱: مشخصه ایده آل خطی

منحنی ۲: مشخصه واقعی برای واحدهای بخاری

منحنی ۳: مشخصه واقعی برای واحدهای آبی



۳-۹ مدل بار:

بار در یک سیستم قدرت، متشکل از دستگاههای گوناگون الکتریکی است. بعضی از آنها فقط اهمی، بعضی بار موتور با مشخصه‌های متغیر توان - فرکانس و بعضی دیگر مشخصات کاملاً متفاوتی دارند. از آنجا که بار موتوری، بار غالب یک سیستم قدرت است لازم است که تأثیر تغییر در فرکانس را بر بار خالص یک سیستم مدلسازی کنیم. رابطه تغییر بار به علت تغییر فرکانس به صورت زیر است:

$$\Delta P_{L(\text{freq})} = D \Delta \omega$$

$$D = \frac{\Delta P_{L(\text{freq})}}{\Delta \omega}$$

یا:

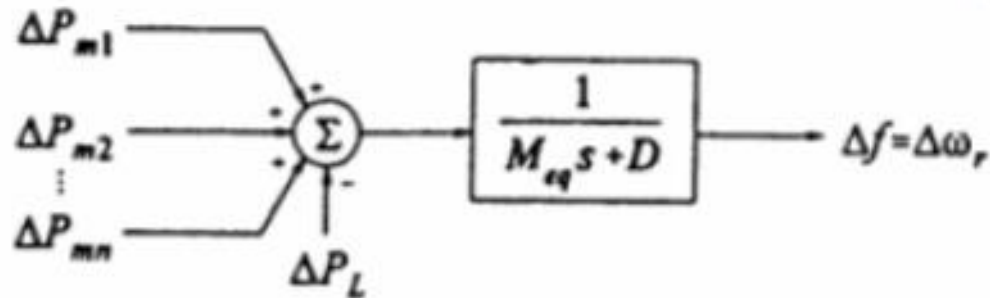
که D به صورت درصد تغییر بار تقسیم بر درصد تغییر در فرکانس بیان می‌شود. به عنوان مثال اگر تغییر بار در اثر تغییر ۱٪ در فرکانس، معادل ۱/۵٪ باشد در این صورت D مساوی ۱/۵ خواهد بود. با وجود این مقدار D در حل عکس‌العمل دینامیکی سیستم، در صورت متفاوت بودن مگاوات آمپر پایه سیستم از مقدار اسمی بار، باید تغییر کند. فرض کنید که مورد اشاره، برای یک بار خالص ۱۲۰۰ مگاواتی بوده و تمام مسئله دینامیکی قرار باشد در پایه ۱۰۰۰ مگاوات آمپر بررسی گردد. توجه کنید که $D = 1.5$ بدین معناست که تغییر بار به ازای یک (در مبنای واحد) تغییر در فرکانس، معادل ۱/۵ (در مبنای واحد) خواهد بود. بنابراین معادل $1/5 \times 1200$ یا ۱۸۰۰ مگاوات آمپر تغییر را به ازاء یک (در مبنای واحد) تغییر فرکانس خواهد داشت. براساس پایه ۱۰۰۰ مگاوات آمپر خواهیم داشت:

$$D_{1000 \text{ MVA Base}} = 1.5 \times \left(\frac{1200}{1000} \right) = 1.8$$

$$\Delta P_{\text{elec}} = \underbrace{\Delta P_L}_{\text{تغییر بار غیر حساس به فرکانس}} + \underbrace{D \Delta \omega}_{\text{تغییر بار حساس به فرکانس}}$$

مشخصات ترکیبی تنظیم سیستم های قدرت

با فرض اینکه پاسخ ژنراتورها به تغییرات بار را همساز (بالختی های برابر) فرض کنیم می توان همه ژنراتورها را به صورت معادل در نظر گرفت :



معادل سیستم برای تحلیل LFC

: که

$$M_{eq} = M_1 + M_2 + \dots + M_n$$

(۱۱-۱)

با توجه به آنچه گفته شد می توان نتیجه گرفت که مشخصه ترکیبی توان فرکانس یک سیستم به پارامترهای زیر

بستگی دارد: ۱- تاثیر ترکیبی ثابت لختی همه ژنراتورها

۲- ثابت میرایی بار سیستم

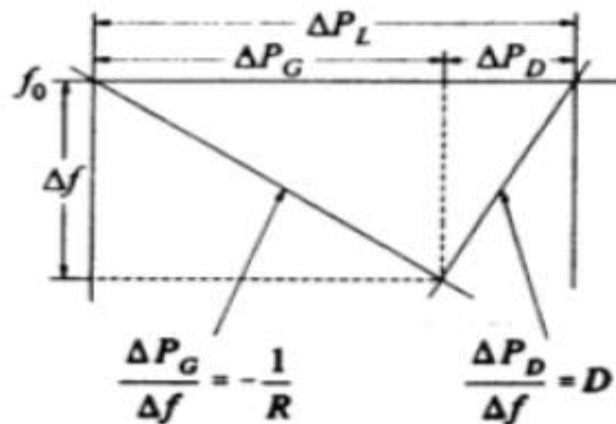
برای سیستم با Π ژنراتور و ثابت میرایی بار D انحراف حالت ماندگار فرکانس سیستم از رابطه زیر بدست می آید:

$$\Delta f_{ss} = \frac{-\Delta P_L}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}\right) + D} \quad (12-1)$$

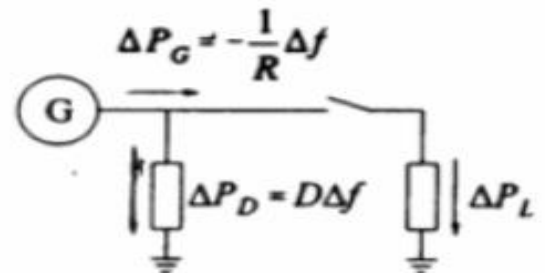
$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

که $\frac{1}{\beta}$ (ضریب ترکیبی تنظیم سیستم) و یا β (سختی سیستم) را می توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$\beta = \frac{1}{R_{eq}} + D \quad (13-1)$$



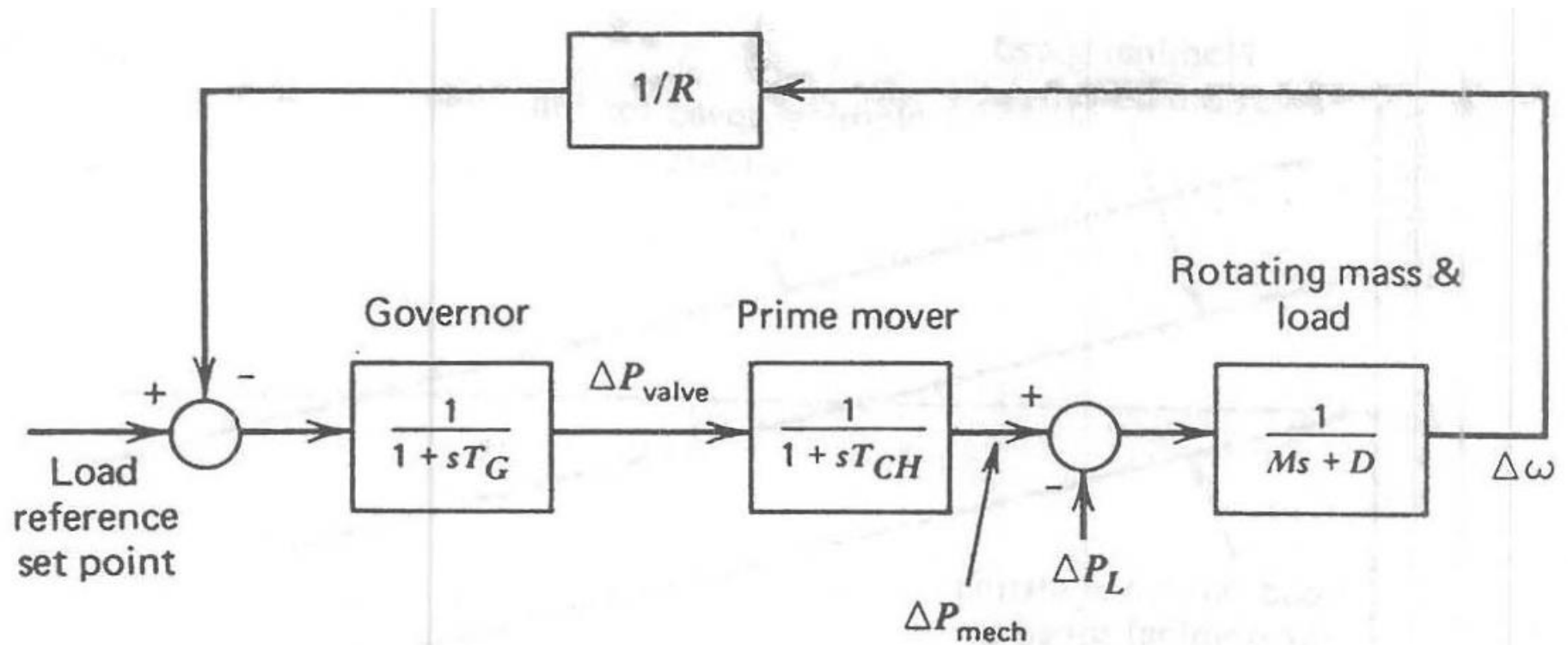
مشخصه ترکیب گاورنو و بار



$$\Delta P_L = \Delta P_G - \Delta P_D = \left(-\frac{1}{R} - D\right) \Delta f$$

$$\Delta f = \frac{-\Delta P_L}{1/R + D}$$

بلوک دیاگرام گاورنر، محرک و جرم چرخان



مثال

یک سیستم قدرت دارای بار کل 1260 MW در فرکانس 60 Hz است. بار به ازای 1% تغییر در فرکانس، $1/5\%$ تغییر می‌کند ($D=1/5$). زمانی که به طور ناگهانی یک بار 60 MW برداشته

شود، انحراف حالت ماندگار فرکانس را در حالات ذیل پیدا کنید: $\Delta P_L = -60 \Rightarrow \Delta f = 70$.
الف) هیچ کنترل سرعتی وجود نداشته باشد،

ب) سیستم دارای ذخیره چرخان 240 MW باشد که به طور یکنواخت بین 500 MW ظرفیت تولید با 5% تنظیم براساس این ظرفیت، پخش شده باشد. تمام ژنراتورهای دیگر با شیرهای کاملاً باز کار می‌کنند. فرض کنید که تأثیر باندهای راکد گاورنر به گونه‌ای است که تنها 80% گاورنرها به کاهش بار سیستم پاسخ می‌دهند. از تأثیر تلفات انتقال، چشمپوشی کنید.

بار باقیمانده کل برابر با $1260 - 60 = 1200$ MW است. ثابت میرایی بار باقیمانده برابر است با:

$$D = \left[\frac{1/5}{100} \times 1200 \right] \times \left[\frac{100}{60 \times 1} \right] = 30 \text{ MW/Hz}$$

الف) بدون هیچ کنترل سرعت، افزایش حاصل در فرکانس حالت ماندگار برابر است با:

$$\Delta f = \frac{-\Delta P_L}{D} = \frac{-(-60) \text{ MW}}{30 \text{ MW/Hz}}$$
$$= 2/0 \text{ Hz}$$

ب) از آنجا که کاهش در بار سیستم و افزایشی در فرکانس سیستم وجود دارد، تمام

واحدهای تولید و نه فقط آنهایی که دارای ذخیره جریان هستند، عکس العمل نشان می دهند. اما به علت تأثیر باند راکد، فقط ۸۰٪ تولید کل به تنظیم سرعت کمک می کند. ظرفیت کل تولید چرخان

برابر است با:

$$1260 + 240 = 1500 \text{ MW}$$

تولیدی که به تنظیم کمک می کند برابر است با:

$$\underline{0.8 \times 1500 = 1200 \text{ MW}}$$

تنظیم ۰.۵ بدین معناست که ۰.۵٪ تغییر در فرکانس، ۱۰۰٪ تغییر در تولید توان را باعث خواهد شد.

بنابراین:

$$\frac{1}{R} = \frac{1200}{(0.5/100) \times 60} = \underline{400 \text{ MW/Hz}}$$

مشخصه ترکیبی پاسخ فرکانسی سیستم برابر است با:

$$\beta = \frac{1}{R} + D = 400 + 30 = \underline{430 \text{ MW/Hz}}$$

و افزایش حالت ماندگار فرکانس برابر است با:

$$\underline{\Delta f} = \frac{-\Delta P_L}{\beta} = \frac{-(-60) \text{ MW}}{430 \text{ MW/Hz}}$$

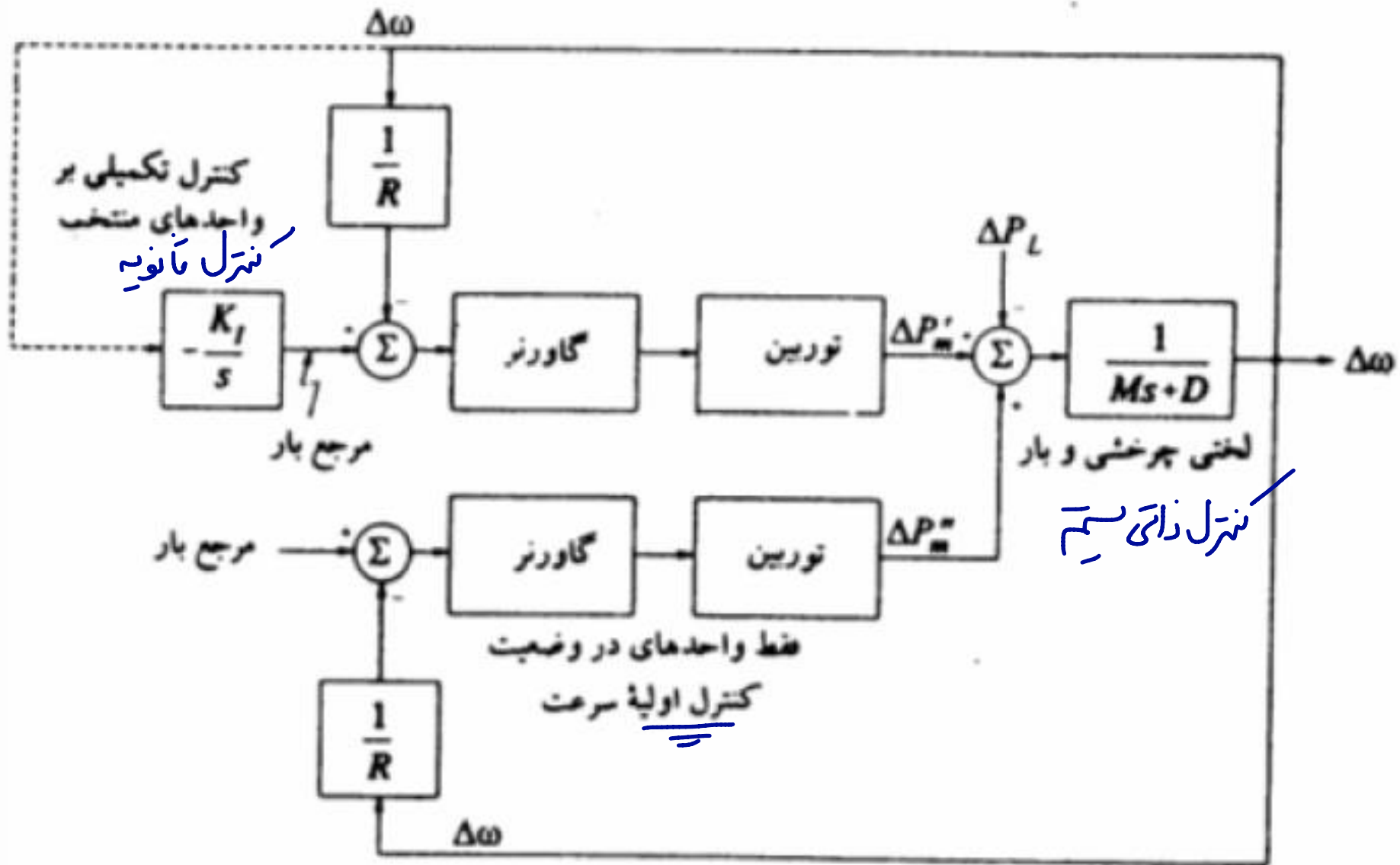
$$= 0.1395 \text{ Hz}$$

$$R = \frac{\Delta P}{\Delta f}$$
$$\frac{1}{R} = \frac{\Delta f}{\Delta P}$$

نقش AGC در سیستم های قدرت

❖ الف) AGC در یک ناحیه منفرد (جزیره ای)

در این نوع سیستم ها حفظ توان تعادلی مطرح نیست بلکه فقط بازگرداندن فرکانس سیستم به مقدار نامی هدف است. AGC با کنترل و تنظیم "نقطه تنظیم مرجع بار" روی واحدهای مختلف منتخب، مقدار تولید را کنترل می کند. باید توجه داشت که در AGC مطالعات توزیع اقتصادی بار انجام می شود و انحراف بار به صورت اقتصادی بین واحدها تقسیم می گردد.



افزودن کنترل انتگرالی بر واحدهای تولید متخپ برای AGC

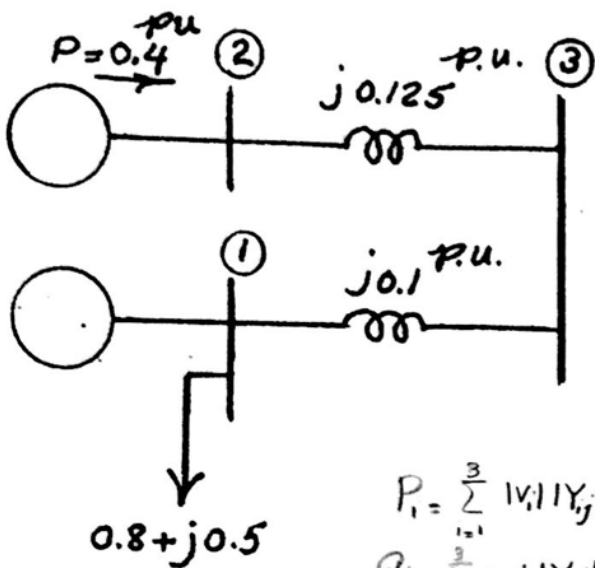
باید توجه داشت که عمل کنترل تکمیلی تولید بسیار کندتر از عمل کنترل اولیه سرعت می باشد یعنی پس از آنکه کنترل اولیه سرعت بر روی کلیه واحدها انجام گرفت و فرکانس سیستم پایدار ساخت. AGC وارد عمل شده و با تنظیم نقاط مرجع بار در واحدهای انتخابی توان خروجی آنها را تنظیم و کنترل می کند و تولید تمام واحدهای دیگر که در وضعیت AGC قرار ندارند به مقدار اولیه و برنامه ریزی شده برمی گرداند.

خلاصه:

گاورنر	↔	تغییرات لحظه ای
AGC	↔	تغییرات کم و ماندگار
خاموشی	↔	تغییرات زیاد و ماندگار

جواب سوالات میان ترم

۲- برای شبکه شکل زیر یک تکرار کامل از بخش بار به روش نیوتن - رافسون تفکیک شده Decoupled NR انجام دهید. ولتاژ تمام شینها (مقدار معلوم یا مقدار اولیه) را $1.0 \angle 0$ لحاظ کنید. شین 1 شین مرجع است.



$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_1 & 0 \\ 0 & j_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta |V_3| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_3}{\partial |V_3|} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta Q_3 \end{bmatrix}$$

$$P_i = \sum_{j=1}^3 |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^3 |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} -j10 & 0 & j10 \\ 0 & -j8 & j8 \\ j10 & j8 & -j18 \end{bmatrix}$$

$$P_2 = |V_2| |Y_{21}| |V_1| \cos(\delta_2 - \delta_1 - \theta_{21}) + |V_2|^2 |Y_{22}| \cos(-\theta_{22}) + |V_2| |Y_{23}| |V_3| \cos(\delta_2 - \delta_3 - \theta_{23})$$

$$P_3 = |V_3| |Y_{31}| |V_1| \cos(\delta_3 - \delta_1 - \theta_{31}) + |V_3| |Y_{32}| |V_2| \cos(\delta_3 - \delta_2 - \theta_{32}) + |V_3|^2 |Y_{33}| \cos(-\theta_{33})$$

$$Q_3 = |V_3| |Y_{31}| |V_1| \sin(\delta_3 - \delta_1 - \theta_{31}) + |V_3| |Y_{32}| |V_2| \sin(\delta_3 - \delta_2 - \theta_{32}) + |V_3|^2 |Y_{33}| \sin(-\theta_{33})$$

$$P_2^{cal} = 1 \times 8 \times 1 \times \cos(+90) = 0$$

$$\Delta P_2^{(1)} = P_2^{sch} - P_2^{cal} = 0.4 - 0 = 0.4 \text{ pu}$$

$$P_3^{cal} = 0$$

$$\Delta P_3^{(1)} = P_3^{sch} - P_3^{cal} = 0$$

$$Q_3^{cal} = 1 \times 10 \times 1 \sin(-90) + 8 \sin(-90) + 18 \sin(90) = 0 \quad \Delta Q_3^{(1)} = 0$$

$$\frac{\partial P_2^{(1)}}{\partial \delta_2} = -|V_2| |Y_{23}| |V_3| \sin(\delta_2 - \delta_3 - \theta_{23}) = -8 \times \sin(-90) = +8$$

$$\frac{\partial P_2^{(1)}}{\partial \delta_3} = |V_2| |Y_{23}| |V_3| \sin(\delta_2 - \delta_3 - \theta_{23}) = 8 \times \sin(-90) = -8$$

$$\frac{\partial P_3^{(1)}}{\partial \delta_2} = |V_3| |Y_{32}| |V_2| \sin(\delta_3 - \delta_2 - \theta_{32}) = 8 \times \sin(-90) = -8$$

$$\frac{\partial P_3^{(1)}}{\partial \delta_3} = -|V_3| |Y_{31}| |V_1| \sin(\delta_3 - \delta_1 - \theta_{31}) - |V_3| |Y_{32}| |V_2| \sin(\delta_3 - \delta_2 - \theta_{32}) = -10 \sin(90) + 8 \times \sin(-90) = 18$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial |V_3|} = |Y_{31}| |V_1| \sin(\delta_3 - \delta_1 - \theta_{31}) + |Y_{23}| |V_2| \sin(\delta_3 - \delta_2 - \theta_{32}) + 2|V_3| |Y_{33}| \sin(-\theta_{33})$$

$$= 10 \sin(-90^\circ) + 8 \times \sin(-90^\circ) + 2 \times 18 \sin(90^\circ) = 18$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(1)} \\ \Delta \delta_3^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8 & -8 \\ -8 & 18 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0.4 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{80} \begin{bmatrix} 18 & 8 \\ 8 & 8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.4 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.09 \\ 0.04 \end{bmatrix}$$

$$\delta_2^{(1)} = \delta_2^{(0)} + \Delta \delta_2^{(1)} = 0 + 0.09 = 0.09 \text{ rad} = 5.156^\circ$$

$$\delta_3^{(1)} = \delta_3^{(0)} + \Delta \delta_3^{(1)} = 0 + 0.04 = 0.04 \text{ rad} = 2.29^\circ$$

$$\Delta |V_3| = [18]^{-1} [.] = 0 \Rightarrow |V_3|^{(1)} = 1 \text{ pu}$$

$$S_B = V_1 I_{13}^* = V_1 \times [(V_1 - V_3)(-j10)]^* = 1 \angle 0^\circ \times [(1 - 1 \angle 2.29^\circ)(-j10)]^* = -0.4 + j0.8$$

$$S_1 = S_B + (0.8 + j0.5) = 0.4 + j1.3$$

$$Q_2 = |V_2|^2 |Y_{22}| \sin(-\theta_{22}) + |V_2| |Y_{23}| |V_3| \sin(\delta_2 - \delta_3 - \theta_{23}) = 8 \times \sin(90^\circ) + 8 \sin(5.156 - 2.29)$$

$$Q_2 = 0.01$$

نمونه سوالات حل شده

```

clear
%
%                               Line code
%       Bus bus R      X    1/2 B = 1 for lines
%       nl  nr  pu    pu    pu    >1 or <1 tr. tap at bus nl
linedata=[1  3  0.0  0.0125  0.0      0.8
          3  4  0.0  0.20    0.0      1
          3  4  0.0  0.25    0.0      1
          4  2  0.0  0.16    0.0     1.25];
lfbus      % form the bus admittance matrix
Ybus      % displays Ybus on the screen

```

Run **ch6p9** to obtain the bus admittance matrix.

6.10. In the two-bus system shown in Figure 58, bus 1 is a slack bus with $V_1 = 1.0 \angle 0^\circ$ pu. A load of 150 MW and 50 Mvar is taken from bus 2. The line admittance is $y_{12} = 10 \angle -73.74^\circ$ pu on a base of 100 MVA. The expression for real and reactive power at bus 2 is given by

$$P_2 = 10|V_2||V_1| \cos(106.26^\circ - \delta_2 + \delta_1) + 10|V_2|^2 \cos(-73.74^\circ)$$

$$Q_2 = -10|V_2||V_1| \sin(106.26^\circ - \delta_2 + \delta_1) - 10|V_2|^2 \sin(-73.74^\circ)$$

Using Newton-Raphson method, obtain the voltage magnitude and phase angle of bus 2. Start with an initial estimate of $|V_2|^{(0)} = 1.0$ pu and $\delta_2^{(0)} = 0^\circ$. Perform two iterations. Partial derivatives of P_2 , and Q_2 with respect to $|V_2|$, and δ_2 are

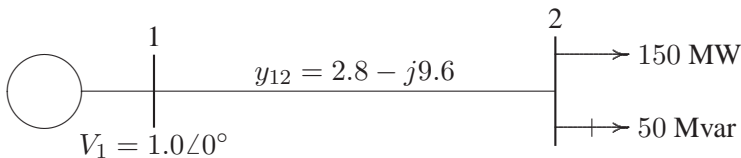


FIGURE 58

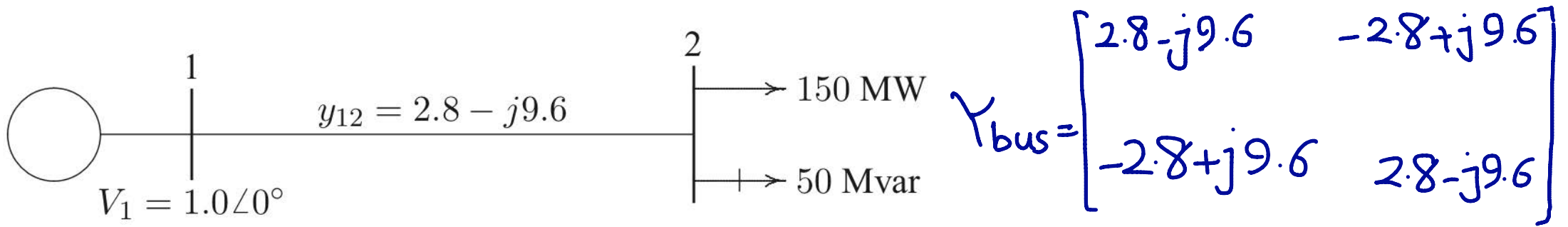
One-line diagram for Problem 6.10.

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = 10|V_2||V_1| \sin(106.26^\circ - \delta_2 + \delta_1)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} = 10|V_1| \cos(106.26^\circ - \delta_2 + \delta_1) + 20|V_2| \cos(-73.74^\circ)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} = 10|V_2||V_1| \cos(106.26^\circ - \delta_2 + \delta_1)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} = -10|V_1| \sin(106.26^\circ - \delta_2 + \delta_1) - 20|V_2| \sin(-73.74^\circ)$$



$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 10 \angle -73.74 & 10 \angle -106.26 \\ 10 \angle -106.26 & 10 \angle -73.74 \end{bmatrix} \quad V_2^{(0)} = 1 \angle 0^\circ$$

$$P_2 = |V_2| |Y_{21}| |V_1| \cos(\delta_2 - \delta_1 - \theta_{21}) + |V_2|^2 |Y_{22}| \cos(-\theta_{22})$$

$$Q_2 = |V_2| |Y_{21}| |V_1| \sin(\delta_2 - \delta_1 - \theta_{21}) + |V_2|^2 |Y_{22}| \sin(\delta_2 - \delta_2 - \theta_{22})$$

$$P_2^{(0)} = 1 \times 10 \times 1 \cos(0 - 0 + 106.26) + 1^2 \times 10 \cos(+73.74) = 0$$

$$Q_2^{(0)} = 1 \times 10 \times 1 \sin(0 - 0 + 106.26) + 1^2 \times 10 \sin(73.74) = 0$$

$$P_2^{sch} = \frac{P_{G2} - P_{D2}}{100} = \frac{0 - 150}{100} = -1.5 \text{ p.u.}, \quad Q_2^{sch} = \frac{Q_{G2} - Q_{D2}}{100} = \frac{0 - 50}{100} = -0.5 \text{ p.u.}$$

$$\Delta P_2^{(0)} = P_2^{sch} - P_2^{(0)} = -1.5 - 0 = -1.5 \text{ p.u.}$$

$$\Delta Q_2^{(0)} = Q_2^{sch} - Q_2^{(0)} = -0.5 - 0 = -0.5 \text{ p.u.}$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} \end{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = -|V_2| |Y_{21}| |V_1| \sin(\delta_2 - \delta_1 - \theta_{21}) = 1 \times 10 \times 1 \sin(0 - 0 + 106.26) = 9.6$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} = |Y_{21}| |V_1| \cos(\delta_2 - \delta_1 - \theta_{21}) + 2|V_2| |Y_{22}| \cos(-\theta_{22}) = 10 \times 1 \times \cos(106.26) + 2 \times 1 \times 10 \cos(73.74) = 2.8$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} = |V_2| |Y_{21}| |V_1| \cos(\delta_2 - \delta_1 - \theta_{21}) = 1 \times 10 \times 1 \cos(+106.26) = -2.8$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} = |Y_{21}| |V_1| \sin(\delta_2 - \delta_1 - \theta_{21}) + 2|V_2| |Y_{22}| \sin(-\theta_{22}) = 10 \times 1 \sin(106.26) + 2 \times 1 \times 10 \sin(73.74) = 9.6$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(1)} \\ \Delta |V_2^{(1)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9.6 & 2.8 \\ -2.8 & 9.6 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -1.5 \\ -0.5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.13^{\text{rad}} \\ -0.09 \end{bmatrix}$$

$$\Delta \delta_2^{(1)} = -0.13 \times \frac{180}{\pi} = -7.448^\circ$$

$$\delta_2^{(1)} = \delta_2^{(0)} + \Delta \delta_2^{(1)} = 0 - 7.448 = -7.448^\circ$$

$$|V_2^{(1)}| = 0.91 \angle -7.448^\circ$$

$$|V_2^{(1)}| = |V_2^{(0)}| + \Delta |V_2^{(1)}| = 1 - 0.09 = 0.91 \text{ p.u.}$$

The load expressed in per unit is

$$S_2^{sch} = -\frac{(150 + j50)}{100} = -1.5 - j0.5 \text{ pu}$$

The slack bus voltage is $V_1 = 1.0 \angle 0$ pu. Starting with an initial estimate of $|V_2^{(0)}| = 1.0$, $\delta_2^{(0)} = 0.0$, the power residuals are computed from (6.63) and (6.64)

$$\begin{aligned} \Delta P_2^{(0)} &= P_2^{sch} - P_2^{(0)} = -1.5 - [10 \cos(106.26^\circ) + 10 \cos(-73.74^\circ)] \\ &= -1.5 \text{ pu} \\ \Delta Q_2^{(0)} &= Q_2^{sch} - Q_2^{(0)} = -0.5 - [-10 \sin(106.26^\circ) - 10 \sin(-73.74^\circ)] \\ &= -0.5 \text{ pu} \end{aligned}$$

The elements of the Jacobian matrix at the initial estimate are

$$\begin{aligned} J_1^{(0)} &= 10(1)(1) \sin(106.26^\circ) = 9.6 \\ J_2^{(0)} &= 10(1) \cos(106.26^\circ) + 20(1) \cos(-73.74^\circ) = 2.8 \\ J_3^{(0)} &= 10(1)(1) \cos(106.26^\circ) = -2.8 \\ J_4^{(0)} &= -10(1) \sin(106.26^\circ) - 20(1) \sin(-73.74^\circ) = 9.6 \end{aligned}$$

The set of linear equations in the first iteration becomes

$$\begin{bmatrix} -1.5 \\ -0.5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9.6 & 2.8 \\ -2.8 & 9.6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta |V_2^{(0)}| \end{bmatrix}$$

Obtaining the solution of the above matrix equation, voltage at bus 2 in the first iteration is

$$\begin{aligned} \Delta \delta_2^{(0)} &= -0.13 & \delta_2^{(1)} &= 0 + (-0.13) = -0.13 \text{ radian} \\ \Delta |V_2^{(0)}| &= -0.09 & |V_2^{(1)}| &= 1 + (-0.09) = 0.91 \text{ pu} \end{aligned}$$

For the second iteration, we have

$$\begin{aligned} \Delta P_2^{(1)} &= P_2^{sch} - P_2^{(1)} = -1.5 - (-1.3403) = -0.1597 \text{ pu} \\ \Delta Q_2^{(1)} &= Q_2^{sch} - Q_2^{(1)} = -0.5 - (-0.3822) = -0.1178 \text{ pu} \end{aligned}$$

Also, computing the elements of the Jacobian matrix, the set of linear equations in the second iteration becomes

$$\begin{bmatrix} -0.1597 \\ -0.1178 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.332 & 1.0751 \\ -3.659 & 8.3160 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(1)} \\ \Delta |V_2^{(1)}| \end{bmatrix}$$

Obtaining the solution of the above matrix equation, voltage at bus 2 in the second iteration is

$$\begin{aligned}\Delta\delta_2^{(1)} &= -0.0164 & \delta_2^{(2)} &= -0.13 + (-0.0164) = -0.1464 \text{ radian} \\ \Delta|V_2^{(1)}| &= -0.0214 & |V_2^{(2)}| &= 0.91 + (-0.0214) = 0.8886 \text{ pu}\end{aligned}$$

6.11. In the two-bus system shown in Figure 59, bus 1 is a slack bus with $V_1 = 1.0\angle 0^\circ$ pu. A load of 100 MW and 50 Mvar is taken from bus 2. The line impedance is $z_{12} = 0.12 + j0.16$ pu on a base of 100 MVA. Using Newton-Raphson method, obtain the voltage magnitude and phase angle of bus 2. Start with an initial estimate of $|V_2|^{(0)} = 1.0$ pu and $\delta_2^{(0)} = 0^\circ$. Perform two iterations.

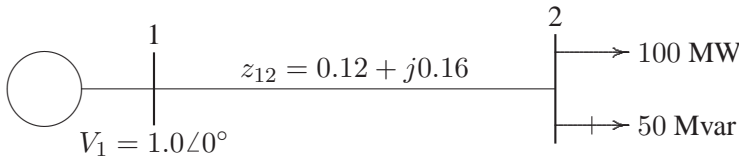


FIGURE 59

One-line diagram for Problem 6.11.

The power flow equation with voltages and admittances expressed in polar form is

$$\begin{aligned}P_i &= \sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \\ Q_i &= - \sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)\end{aligned}$$

The bus admittance matrix is

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 5\angle -53.13^\circ & 5\angle 126.87^\circ \\ 5\angle 126.87^\circ & 5\angle -53.13^\circ \end{bmatrix}$$

Substituting for admittances, the expression for real and reactive power at bus 2 becomes

$$\begin{aligned}P_2 &= 5|V_2||V_1| \cos(126.87^\circ - \delta_2 + \delta_1) + 5|V_2|^2 \cos(-53.13^\circ) \\ Q_2 &= -5|V_2||V_1| \sin(126.87^\circ - \delta_2 + \delta_1) - 5|V_2|^2 \sin(-53.13^\circ)\end{aligned}$$

Partial derivatives of P_2 , and Q_2 with respect to $|V_2|$, and δ_2 are

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = 5|V_2||V_1| \sin(126.87^\circ - \delta_2 + \delta_1)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} &= 5|V_1| \cos(126.87^\circ - \delta_2 + \delta_1) + 10|V_2| \cos(-53.13^\circ) \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} &= 5|V_2||V_1| \cos(126.87^\circ - \delta_2 + \delta_1) \\ \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} &= -5|V_1| \sin(126.87^\circ - \delta_2 + \delta_1) - 10|V_2| \sin(-73.74^\circ)\end{aligned}$$

The load expressed in per units is

$$S_2^{sch} = -\frac{(100 + j50)}{100} = -1.0 - j0.5 \text{ pu}$$

The slack bus voltage is $V_1 = 1.0 \angle 0$ pu. Starting with an initial estimate of $|V_2^{(0)}| = 1.0$, $\delta_2^{(0)} = 0.0$, the power residuals are computed from (6.63) and (6.64)

$$\begin{aligned}\Delta P_2^{(0)} &= P_2^{sch} - P_2^{(0)} = -1.0 - [5 \cos(126.87^\circ) + 5 \cos(-53.13^\circ)] \\ &= -1.0 \text{ pu} \\ \Delta Q_2^{(0)} &= Q_2^{sch} - Q_2^{(0)} = -0.5 - [-5 \sin(126.87^\circ) - 5 \sin(-53.13^\circ)] \\ &= -0.5 \text{ pu}\end{aligned}$$

The elements of the Jacobian matrix at the initial estimate are

$$\begin{aligned}J_1^{(0)} &= 5(1)(1) \sin(126.87^\circ) = 4 \\ J_2^{(0)} &= 5(1) \cos(126.87^\circ) + 10(1) \cos(-53.13^\circ) = 3 \\ J_3^{(0)} &= 5(1)(1) \cos(126.87^\circ) = -3 \\ J_4^{(0)} &= -5(1) \sin(126.87^\circ) - 10(1) \sin(-53.13^\circ) = 4\end{aligned}$$

The set of linear equations in the first iteration becomes

$$\begin{bmatrix} -1.0 \\ -0.5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 3 \\ -3 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta |V_2^{(0)}| \end{bmatrix}$$

Obtaining the solution of the above matrix equation, voltage at bus 2 in the first iteration is

$$\begin{aligned}\Delta \delta_2^{(0)} &= -0.10 & \delta_2^{(1)} &= 0 + (-0.10) = -0.10 \text{ radian} \\ \Delta |V_2^{(0)}| &= -0.2 & |V_2^{(1)}| &= 1 + (-0.2) = 0.8 \text{ pu}\end{aligned}$$

For the second iteration, we have

$$\begin{aligned}\Delta P_2^{(1)} &= P_2^{sch} - P_2^{(1)} = -1.0 - (-0.7875) = -0.2125 \text{ pu} \\ \Delta Q_2^{(1)} &= Q_2^{sch} - Q_2^{(1)} = -0.5 - (-0.3844) = -0.1156 \text{ pu}\end{aligned}$$

Also, computing the elements of the Jacobian matrix, the set of linear equations in the second iteration becomes

$$\begin{bmatrix} -0.2125 \\ -0.1156 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.9444 & 1.4157 \\ -2.7075 & 2.7195 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(1)} \\ \Delta|V_2^{(1)}| \end{bmatrix}$$

Obtaining the solution of the above matrix equation, voltage at bus 2 in the second iteration is

$$\begin{aligned} \Delta\delta_2^{(1)} &= -0.0350 & \delta_2^{(2)} &= -0.1 + (-0.0350) = -0.135 \text{ radian} \\ \Delta|V_2^{(1)}| &= -0.0773 & |V_2^{(2)}| &= 0.8 + (-0.0773) = 0.7227 \text{ pu} \end{aligned}$$

6.12. Figure 60 shows the one-line diagram of a simple three-bus power system with generation at buses 1 and 2. The voltage at bus 1 is $V = 1.0\angle 0^\circ$ per unit. Voltage magnitude at bus 2 is fixed at 1.05 pu with a real power generation of 400 MW. A load consisting of 500 MW and 400 Mvar is taken from bus 3. Line admittances are marked in per unit on a 100 MVA base. For the purpose of hand calculations, line resistances and line charging susceptances are neglected.

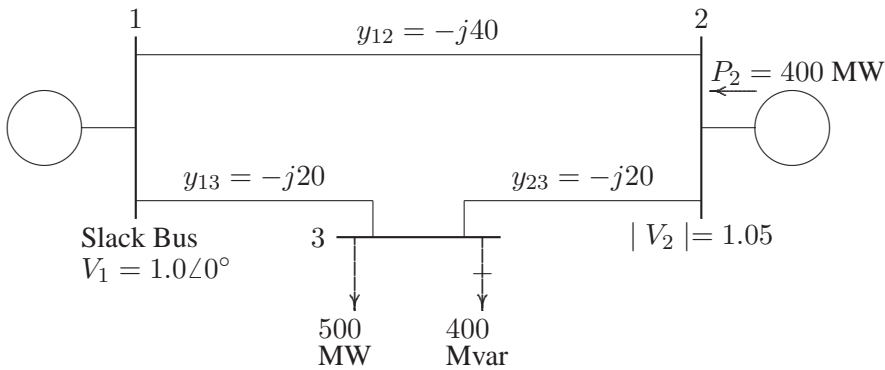


FIGURE 60

One-line diagram for problem 6.12.

(a) Show that the expression for the real power at bus 2 and real and reactive power at bus 3 are

$$\begin{aligned} P_2 &= 40|V_2||V_1| \cos(90^\circ - \delta_2 + \delta_1) + 20|V_2||V_3| \cos(90^\circ - \delta_2 + \delta_3) \\ P_3 &= 20|V_3||V_1| \cos(90^\circ - \delta_3 + \delta_1) + 20|V_3||V_2| \cos(90^\circ - \delta_3 + \delta_2) \\ Q_3 &= -20|V_3||V_1| \sin(90^\circ - \delta_3 + \delta_1) - 20|V_3||V_2| \sin(90^\circ - \delta_3 + \delta_2) + 40|V_3|^2 \end{aligned}$$

(b) Using Newton-Raphson method, start with the initial estimates of $V_2^{(0)} = 1.05 + j0$ and $V_3^{(0)} = 1.0 + j0$, and keeping $|V_2| = 1.05$ pu, determine the

phasor values of V_2 and V_3 . Perform two iterations.

(c) Check the power flow solution for Problem 6.12 using the **Ifnewton** and other required programs. Assume the regulated bus (bus # 2) reactive power limits are between 0 and 600 Mvar.

By inspection, the bus admittance matrix in polar form is

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 60\angle -\frac{\pi}{2} & 40\angle \frac{\pi}{2} & 20\angle \frac{\pi}{2} \\ 40\angle \frac{\pi}{2} & 60\angle -\frac{\pi}{2} & 20\angle \frac{\pi}{2} \\ 20\angle \frac{\pi}{2} & 20\angle \frac{\pi}{2} & 40\angle -\frac{\pi}{2} \end{bmatrix}$$

(a) The power flow equation with voltages and admittances expressed in polar form is

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)$$

Substituting the elements of the bus admittance matrix in the above equations for P_2 , P_3 , and Q_3 will result in the given equations.

(b) Elements of the Jacobian matrix are obtained by taking partial derivatives of the given equations with respect to δ_2 , δ_3 and $|V_3|$.

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = 40|V_2||V_1| \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta_2 + \delta_1\right) + 20|V_2||V_3| \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta_2 + \delta_3\right)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} = -20|V_2||V_3| \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta_2 + \delta_3\right)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial |V_3|} = 20|V_2| \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta_2 + \delta_3\right)$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} = -20|V_3||V_2| \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta_3 + \delta_2\right)$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} = 20|V_3||V_1| \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta_3 + \delta_1\right) + 20|V_3||V_2| \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta_3 + \delta_2\right)$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial |V_3|} = 20|V_1| \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta_3 + \delta_1\right) + 20|V_2| \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta_3 + \delta_2\right)$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} = -20|V_3||V_2| \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta_3 + \delta_2\right)$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} = 20|V_3||V_1| \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta_3 + \delta_1\right) + 20|V_3||V_2| \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta_3 + \delta_2\right)$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial |V_3|} = -20|V_1| \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta_3 + \delta_1\right) - 20|V_2| \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta_3 + \delta_2\right) + 80|V_3|$$

The load and generation expressed in per units are

$$P_2^{sch} = \frac{400}{100} = 4.0 \text{ pu}$$

$$S_3^{sch} = -\frac{(500 + j400)}{100} = -5.0 - j4.0 \text{ pu}$$

The slack bus voltage is $V_1 = 1.0 \angle 0$ pu, and the bus 2 voltage magnitude is $|V_2| = 1.05$ pu. Starting with an initial estimate of $|V_3^{(0)}| = 1.0$, $\delta_2^{(0)} = 0.0$, and $\delta_3^{(0)} = 0.0$, the power residuals are

$$\Delta P_2^{(0)} = P_2^{sch} - P_2^{(0)} = 4.0 - (0) = 4.0$$

$$\Delta P_3^{(0)} = P_3^{sch} - P_3^{(0)} = -5.0 - (0) = -5.0$$

$$\Delta Q_3^{(0)} = Q_3^{sch} - Q_3^{(0)} = -4.0 - (-1.0) = -3.0$$

Evaluating the elements of the Jacobian matrix with the initial estimate, the set of linear equations in the first iteration becomes

$$\begin{bmatrix} -2.8600 \\ 1.4384 \\ -0.2200 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 63 & -21 & 0 \\ -21 & 41 & 0 \\ 0 & 0 & 39 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta \delta_3^{(0)} \\ \Delta |V_3^{(0)}| \end{bmatrix}$$

Obtaining the solution of the above matrix equation, the new bus voltages in the first iteration are

$$\Delta \delta_2^{(0)} = 0.0275 \quad \delta_2^{(1)} = 0 + 0.0275 = 0.0275 \text{ radian} = 1.5782^\circ$$

$$\Delta \delta_3^{(0)} = -0.1078 \quad \delta_3^{(1)} = 0 + (-0.1078) = -0.1078 \text{ radian} = -6.1790^\circ$$

$$\Delta |V_3^{(0)}| = -0.0769 \quad |V_3^{(1)}| = 1 + (-0.0769) = 0.9231 \text{ pu}$$

For the second iteration, we have

$$\begin{bmatrix} 0.2269 \\ -0.3965 \\ -0.5213 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 61.1913 & -19.2072 & 2.8345 \\ -19.2072 & 37.5615 & -4.9871 \\ 2.6164 & -4.6035 & 33.1545 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(1)} \\ \Delta \delta_3^{(1)} \\ \Delta |V_3^{(1)}| \end{bmatrix}$$

and

$$\Delta \delta_2^{(1)} = 0.0006 \quad \delta_2^{(2)} = 0.0275 + 0.0006 = 0.0281 \text{ radian} = 1.61^\circ$$

$$\Delta \delta_3^{(1)} = -0.0126 \quad \delta_3^{(2)} = -0.1078 + (-0.0126) = -0.1204 \text{ radian} = -6.898^\circ$$

$$\Delta |V_3^{(1)}| = -0.0175 \quad |V_3^{(2)}| = 0.9231 + (-0.0175) = 0.9056 \text{ pu}$$

(c) The power flow program **lfnewton** is used to obtain the solution, with the following statements:

```
clear
basemva = 100; accuracy = 0.000001; maxiter = 10;

%      Problem 6.12(c)
%      Bus Bus Voltage Angle -Load--- -Generator-- Injected
%      No code Mag. Degree MW MVAR MW MVAR Qmin Qmax Mvar
busdata=[1 1 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0 0
         2 2 1.05 0.0 0 0 400 0.0 600 0 0
         3 0 1.0 0.0 500 400 0.0 0.0 0 0 0];

%      Line code
%      Bus bus R X 1/2 B = 1 for lines
%      nl nr pu pu pu >1 or <1 tr. tap at bus nl
linedata=[1 2 0.0 0.025 0.0 1
          1 3 0.0 0.05 0.0 1
          2 3 0.0 0.05 0.0 1];

disp('Problem 6.12(c)')
lfybus % form the bus admittance matrix
lfnewton % Power flow solution by Gauss-Seidel method
busout % Prints the power flow solution on the screen
lineflow % Computes and displays the line flow and losses
```

The above statements are saved in the file **ch6p12c.m**. Run the program to obtain the solution.

6.13. For Problem 6.12:

(a) Obtain the power flow solution using the fast decoupled algorithm. Perform two iterations.

(b) Check the power flow solution for Problem 6.12 using the **decouple** and other required programs. Assume the regulated bus (bus # 2) reactive power limits are between 0 and 600 Mvar.

(a) In this system, bus 1 is the slack bus and the corresponding bus susceptance matrix for evaluation of phase angles $\Delta\delta_2$ and $\Delta\delta_3$ from the bus admittance matrix in Problem 6.12 is

$$B' = \begin{bmatrix} -60 & 20 \\ 20 & -40 \end{bmatrix}$$

The inverse of the above matrix is

$$[B']^{-1} = \begin{bmatrix} -0.02 & -0.01 \\ -0.01 & -0.03 \end{bmatrix}$$

The expressions for real power at bus 2 and 3 and the reactive power at bus 3 are given in Problem 6.12. The slack bus voltage is $V_1 = 1.0 \angle 0$ pu, and the bus 2 voltage magnitude is $|V_3| = 1.05$ pu. Starting with an initial estimate of $|V_3^{(0)}| = 1.0$, $\delta_2^{(0)} = 0.0$, and $\delta_3^{(0)} = 0.0$, the power residuals are computed from (6.63) and (6.64)

$$\begin{aligned} \Delta P_2^{(0)} &= P_2^{sch} - P_2^{(0)} = 4 - (0) = 4 \\ \Delta P_3^{(0)} &= P_3^{sch} - P_3^{(0)} = -5 - (0) = -5 \\ \Delta Q_3^{(0)} &= Q_3^{sch} - Q_3^{(0)} = -4 - (-1) = -3 \end{aligned}$$

The fast decoupled power flow algorithm given by (6.77) becomes

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta \delta_3^{(0)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} -0.02 & -0.0 \\ -0.01 & -0.03 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{4}{1.05} \\ \frac{-5}{1.0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} .0262 \\ -0.1119 \end{bmatrix}$$

Since bus 2 is a regulated bus, the corresponding row and column of B' are eliminated and we get

$$B'' = [-40]$$

From (6.78), we have

$$\Delta |V_3| = - \begin{bmatrix} -1 \\ 40 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3 \\ 1.0 \end{bmatrix} = -0.075$$

The new bus voltages in the first iteration are

$$\begin{aligned} \Delta \delta_2^{(0)} &= 0.0262 & \delta_2^{(1)} &= 0 + (0.0262) = 0.0262 \text{ radian} = 1.5006^\circ \\ \Delta \delta_3^{(0)} &= -0.1119 & \delta_3^{(1)} &= 0 + (-0.1119) = -0.1119 \text{ radian} = -6.4117^\circ \\ \Delta |V_3^{(0)}| &= -0.075 & |V_3^{(1)}| &= 1 + (-0.075) = 0.925 \text{ pu} \end{aligned}$$

For the second iteration, the power residuals are

$$\begin{aligned} \Delta P_2^{(1)} &= P_2^{sch} - P_2^{(1)} = 4 - (3.7739) = 0.2261 \\ \Delta P_3^{(1)} &= P_3^{sch} - P_3^{(1)} = -5 - (-4.7399) = -0.2601 \\ \Delta Q_3^{(1)} &= Q_3^{sch} - Q_3^{(1)} = -4 - (-3.3994) = -0.6006 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(1)} \\ \Delta\delta_3^{(1)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} -0.02 & -0.0 \\ -0.01 & -0.03 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{0.2261}{1.05} \\ \frac{-0.2601}{0.925} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0015 \\ -0.0063 \end{bmatrix}$$

From (6.78), we have

$$\Delta|V_3| = - \left[\frac{-1}{40} \right] \left[\frac{-0.6006}{0.925} \right] = -0.0162$$

The new bus voltages in the second iteration are

$$\begin{aligned} \Delta\delta_2^{(1)} &= 0.0015 & \delta_2^{(2)} &= 0.0262 + (0.0015) = 0.0277 \text{ radian} = 1.5863^\circ \\ \Delta\delta_3^{(1)} &= -0.0063 & \delta_3^{(2)} &= -0.1119 + (-0.0063) = -0.1182 \text{ radian} = -6.7716^\circ \\ \Delta|V_3^{(1)}| &= -0.0162 & |V_3^{(2)}| &= 0.925 + (-0.0162) = 0.9088 \text{ pu} \end{aligned}$$

(c) The power flow program **decouple** is used to obtain the solution. The statements are the same as in Problem 6.12, except the **lfnewton** is replaced by **decouple**. The statements are saved in the file **ch6p13b**. Run this program to obtain the power flow solution.

6.14. The 26-bus power system network of an electric utility company is shown in Figure 61. Obtain the power flow solution by the following methods:

- (a) Gauss-Seidel power flow (see Example 6.9).
- (b) Newton-Raphson power flow (see Example 6.11).
- (c) Fast decoupled power flow (see Example 6.13).

The load data is as follows.

LOAD DATA					
Bus No.	Load		Bus No.	Load	
	MW	Mvar		MW	Mvar
1	51.0	41.0	14	24.0	12.0
2	22.0	15.0	15	70.0	31.0
3	64.0	50.0	16	55.0	27.0
4	25.0	10.0	17	78.0	38.0
5	50.0	30.0	18	153.0	67.0
6	76.0	29.0	19	75.0	15.0
7	0.0	0.0	20	48.0	27.0
8	0.0	0.0	21	46.0	23.0
9	89.0	50.0	22	45.0	22.0
10	0.0	0.0	23	25.0	12.0
11	25.0	15.0	24	54.0	27.0
12	89.0	48.0	25	28.0	13.0
13	31.0	15.0	26	40.0	20.0

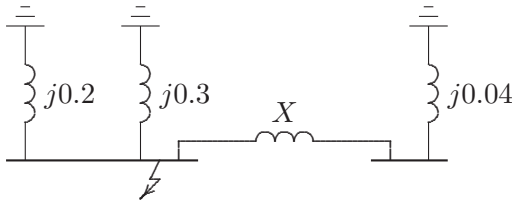


FIGURE 68
The impedance diagram for Problem 9.2.

From Figure 68, reactance to the point of fault is

$$\frac{(0.12)(X + 0.04)}{0.12 + (X + 0.04)} = 0.08$$

Solving for X , we get $X = 0.2$ pu., or

$$X_{\Omega} = (X)(Z_B) = (0.2)(9) = 1.8 \ \Omega$$

9.3. The one-line diagram of a simple power system is shown in Figure 69. Each generator is represented by an emf behind the transient reactance. All impedances are expressed in per unit on a common MVA base. All resistances and shunt capacitances are neglected. The generators are operating on no load at their rated voltage with their emfs in phase. A three-phase fault occurs at bus 1 through a fault impedance of $Z_f = j0.08$ per unit.

- (a) Using Thévenin's theorem obtain the impedance to the point of fault and the fault current in per unit.
- (b) Determine the bus voltages and line currents during fault.

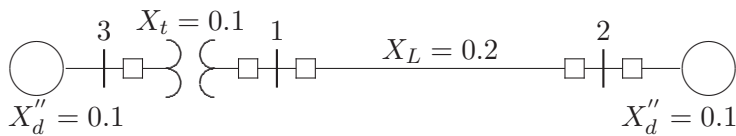


FIGURE 69
One-line diagram for Problem 9.3.

The impedance diagram is as shown in Figure 70.

- (a) Impedance to the point of fault is

$$X = j \frac{(0.2)(0.3)}{0.2 + 0.3} = j0.12 \text{ pu}$$

The fault current is

$$I_f = \frac{1}{j0.12 + j0.08} = 5 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

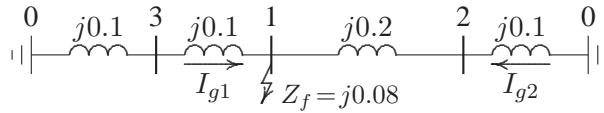


FIGURE 70
The impedance diagram for Problem 9.3.

(b)

$$V_1 = (j0.08)(-j5) = 0.4 \text{ pu}$$

$$I_{g1} = \frac{j0.3}{j0.5}(5)\angle -90^\circ = 3\angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$I_{g2} = \frac{j0.2}{j0.5}(5)\angle -90^\circ = 2\angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$V_2 = 0.4 + (j0.2)(-j2) = 0.8 \text{ pu}$$

$$V_3 = 0.4 + (j0.1)(-j3) = 0.7 \text{ pu}$$

9.4. The one-line diagram of a simple three-bus power system is shown in Figure 71. Each generator is represented by an emf behind the subtransient reactance. All impedances are expressed in per unit on a common MVA base. All resistances and shunt capacitances are neglected. The generators are operating on no load at their rated voltage with their emfs in phase. A three-phase fault occurs at bus 3 through a fault impedance of $Z_f = j0.19$ per unit.

(a) Using Thévenin's theorem obtain the impedance to the point of fault and the fault current in per unit.

(b) Determine the bus voltages and line currents during fault.

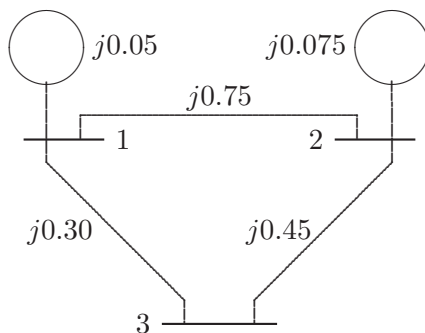
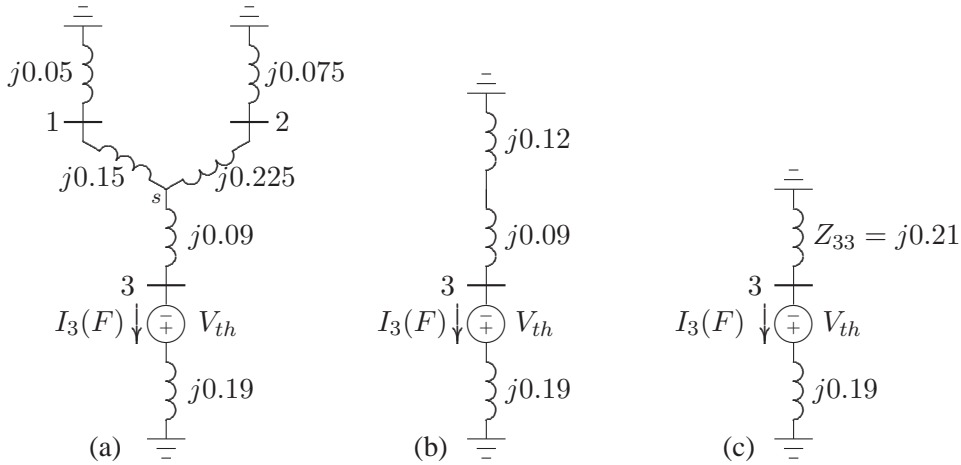


FIGURE 71
One-line diagram for Problem 9.4.

Converting the Δ formed by buses 123 to an equivalent Y as shown in Figure 72(a), we have

**FIGURE 72**

Reduction of Thévenin's equivalent network.

$$Z_{1s} = \frac{(j0.3)(j0.75)}{j1.5} = j0.15 \quad Z_{2s} = \frac{(j0.75)(j0.45)}{j1.5} = j0.225$$

$$Z_{3s} = \frac{(j0.3)(j0.45)}{j1.5} = j0.09$$

Combining the parallel branches, Thévenin's impedance is

$$Z_{33} = \frac{(j0.2)(j0.3)}{j0.2 + j0.3} + j0.09$$

$$= j0.12 + j0.09 = j0.21$$

From Figure 72(c), the fault current is

$$I_3(F) = \frac{V_3(F)}{Z_{33} + Z_f} = \frac{1.0}{j0.21 + j0.19} = -j2.5 \text{ pu}$$

With reference to Figure 72(a), the current divisions between the two generators are

$$I_{G1} = \frac{j0.3}{j0.2 + j0.3} I_3(F) = -j1.5 \text{ pu}$$

$$I_{G2} = \frac{j0.2}{j0.2 + j0.3} I_3(F) = -j1.0 \text{ pu}$$

For the bus voltage changes from Figure 72(a), we get

$$\Delta V_1 = 0 - (j0.05)(-j1.5) = -0.075 \text{ pu}$$

$$\Delta V_2 = 0 - (j0.075)(-j1) = -0.075 \text{ pu}$$

$$\Delta V_3 = (j0.19)(-j2.5) - 1.0 = -0.525 \text{ pu}$$

The bus voltages during the fault are obtained by superposition of the prefault bus voltages and the changes in the bus voltages caused by the equivalent emf connected to the faulted bus, i.e.,

$$V_1(F) = V_1(0) + \Delta V_1 = 1.0 - 0.075 = 0.925 \text{ pu}$$

$$V_2(F) = V_2(0) + \Delta V_2 = 1.0 - 0.075 = 0.925 \text{ pu}$$

$$V_3(F) = V_3(0) + \Delta V_3 = 1.0 - 0.525 = 0.475 \text{ pu}$$

The short circuit-currents in the lines are

$$I_{12}(F) = \frac{V_1(F) - V_2(F)}{z_{12}} = \frac{0.925 - 0.925}{j0.75} = 0 \text{ pu}$$

$$I_{13}(F) = \frac{V_1(F) - V_3(F)}{z_{13}} = \frac{0.925 - 0.475}{j0.3} = -j1.5 \text{ pu}$$

$$I_{23}(F) = \frac{V_2(F) - V_3(F)}{z_{23}} = \frac{0.925 - 0.475}{j0.45} = -j1.0 \text{ pu}$$

9.5. The one-line diagram of a simple four-bus power system is shown in Figure 73. Each generator is represented by an emf behind the transient reactance. All impedances are expressed in per unit on a common MVA base. All resistances and shunt capacitances are neglected. The generators are operating on no load at their rated voltage with their emfs in phase. A bolted three-phase fault occurs at bus 4.

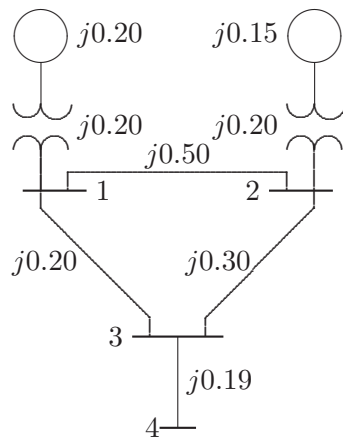


FIGURE 73
One-line diagram for Problem 9.5.

- (a) Using Thévenin's theorem obtain the impedance to the point of fault and the fault current in per unit.
- (b) Determine the bus voltages and line currents during fault.

(c) Repeat (a) and (b) for a fault at bus 2 with a fault impedance of $Z_f = j0.0225$.

(a) Converting the Δ formed by buses 123 to an equivalent Y as shown in Figure 74(a), we have

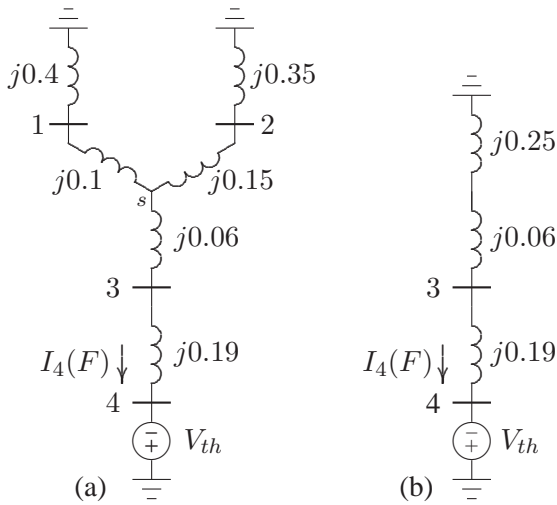


FIGURE 74
Reduction of Thévenin's equivalent network.

$$Z_{1s} = \frac{(j0.2)(j0.5)}{j1.0} = j0.10 \quad Z_{2s} = \frac{(j0.5)(j0.3)}{j1.0} = j0.15$$

$$Z_{3s} = \frac{(j0.2)(j0.3)}{j1.0} = j0.06$$

Combining the parallel branches, Thévenin's impedance is

$$Z_{33} = \frac{(j0.5)(j0.5)}{j0.5 + j0.5} + j0.06 + j0.19 = j0.5$$

The fault current is

$$I_4(F) = \frac{V_4(F)}{Z_{44}} = \frac{1.0}{j0.5} = -j2.0 \text{ pu}$$

With reference to Figure 74(a), the current divisions between the two generators are

$$I_{G1} = \frac{j0.5}{j0.5 + j0.5} I_4(F) = -j1.0 \text{ pu}$$

$$I_{G2} = \frac{j0.5}{j0.5 + j0.5} I_4(F) = -j1.0 \text{ pu}$$

(b) For the bus voltage changes from Figure 74(a), we get

$$\begin{aligned}\Delta V_1 &= 0 - (j0.4)(-j1.0) = -0.4 \text{ pu} \\ \Delta V_2 &= 0 - (j0.35)(-j1) = -0.35 \text{ pu} \\ \Delta V_3 &= 1 - (j0.19)(-j2) = -0.62 \text{ pu}\end{aligned}$$

The bus voltages during the fault are obtained by superposition of the prefault bus voltages and the changes in the bus voltages caused by the equivalent emf connected to the faulted bus, i.e.,

$$\begin{aligned}V_1(F) &= V_1(0) + \Delta V_1 = 1.0 - 0.4 = 0.60 \text{ pu} \\ V_2(F) &= V_2(0) + \Delta V_2 = 1.0 - 0.35 = 0.65 \text{ pu} \\ V_3(F) &= V_3(0) + \Delta V_3 = 1.0 - 0.62 = 0.38 \text{ pu} \\ V_4(F) &= 0 \text{ pu}\end{aligned}$$

The short circuit-currents in the lines are

$$\begin{aligned}I_{21}(F) &= \frac{V_2(F) - V_1(F)}{z_{12}} = \frac{0.65 - 0.6}{j0.5} = 0.1 \angle -90^\circ \text{ pu} \\ I_{13}(F) &= \frac{V_1(F) - V_3(F)}{z_{13}} = \frac{0.60 - 0.38}{j0.2} = 1.1 \angle -90^\circ \text{ pu} \\ I_{23}(F) &= \frac{V_2(F) - V_3(F)}{z_{23}} = \frac{0.65 - 0.38}{j0.3} = 0.9 \angle -90^\circ \text{ pu} \\ I_{34}(F) &= \frac{V_3(F) - V_4(F)}{z_{34}} = \frac{0.38 - 0}{j0.19} = 2.0 \angle -90^\circ \text{ pu}\end{aligned}$$

(c) (a) Combining parallel branches between buses 1 and 2 results in the circuit shown in Figure 75(a). Combining the parallel branches, Thévenin's impedance is

$$Z_{22} = \frac{(j0.65)(j0.35)}{j0.65 + j0.35} = j0.2275$$

The fault current is

$$I_2(F) = \frac{V_4(F)}{Z_{44} + Z_f} = \frac{1.0}{j0.2275 + j0.0225} = -j4.0 \text{ pu}$$

With reference to Figure 75(a), the current divisions between the two generators are

$$\begin{aligned}I_{G1} &= \frac{j0.35}{j0.65 + j0.35} I_2(F) = -j1.4 \text{ pu} \\ I_{G2} &= \frac{j0.65}{j0.65 + j0.35} I_2(F) = -j2.6 \text{ pu}\end{aligned}$$

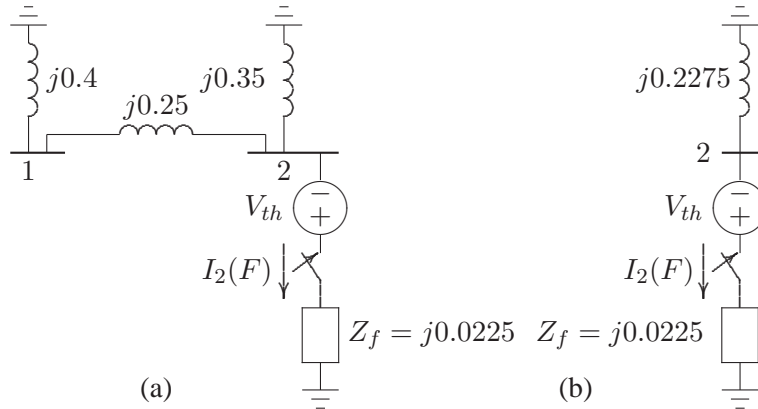


FIGURE 75

Reduction of Thévenin's equivalent network.

(c) (b) For the bus voltage changes from Figure 74(a), we get

$$\begin{aligned}\Delta V_1 &= 0 - (j0.4)(-j1.4) = -0.56 \text{ pu} \\ \Delta V_2 &= 0 - (j0.35)(-j2.6) = -0.91 \text{ pu} \\ \Delta V_3 &= -j0.56 - (j0.2)\left(-\frac{j1.4}{2}\right) = -0.70 \text{ pu} \\ \Delta V_4 &= \Delta V_3 = -0.70 \text{ pu}\end{aligned}$$

The bus voltages during the fault are obtained by superposition of the prefault bus voltages and the changes in the bus voltages caused by the equivalent emf connected to the faulted bus, i.e.,

$$\begin{aligned}V_1(F) &= V_1(0) + \Delta V_1 = 1.0 - 0.56 = 0.44 \text{ pu} \\ V_2(F) &= V_2(0) + \Delta V_2 = 1.0 - 0.91 = 0.09 \text{ pu} \\ V_3(F) &= V_3(0) + \Delta V_3 = 1.0 - 0.70 = 0.30 \text{ pu} \\ V_4(F) &= V_4(0) + \Delta V_4 = 1.0 - 0.70 = 0.30 \text{ pu}\end{aligned}$$

The short circuit-currents in the lines are

$$\begin{aligned}I_{12}(F) &= \frac{V_1(F) - V_2(F)}{z_{12}} = \frac{0.44 - 0.09}{j0.5} = 0.7 \angle -90^\circ \text{ pu} \\ I_{13}(F) &= \frac{V_1(F) - V_3(F)}{z_{13}} = \frac{0.44 - 0.30}{j0.2} = 0.7 \angle -90^\circ \text{ pu} \\ I_{32}(F) &= \frac{V_3(F) - V_2(F)}{z_{23}} = \frac{0.30 - 0.09}{j0.3} = 0.7 \angle -90^\circ \text{ pu} \\ I_{34}(F) &= \frac{V_3(F) - V_4(F)}{z_{34}} = \frac{0.30 - 0.3}{j0.19} = 0 \text{ pu}\end{aligned}$$

$$V_2^{012}(F) = \begin{bmatrix} 0 - Z_{22}^0 I_2^0 \\ V_2^1(0) - Z_{22}^1 I_2^1 \\ 0 - Z_{22}^2 I_2^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 - j0.10(j2.5) \\ 1 - j0.20(-j3.75) \\ 0 - j0.20(j1.25) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.25 \\ 0.25 \end{bmatrix}$$

$$V_3^{012}(F) = \begin{bmatrix} 0 - Z_{32}^0 I_2^0 \\ V_3^1(0) - Z_{32}^1 I_2^1 \\ 0 - Z_{32}^2 I_2^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 - j0.08(j2.5) \\ 1 - j0.12(-j3.75) \\ 0 - j0.12(j1.25) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.20 \\ 0.55 \\ 0.15 \end{bmatrix}$$

Bus voltages during fault are

$$V_1^{abc}(F) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.125 \\ 0.625 \\ 0.125 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.875 \angle 0^\circ \\ 0.50 \angle -120^\circ \\ 0.50 \angle +120^\circ \end{bmatrix}$$

$$V_2^{abc}(F) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.25 \\ 0.25 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.75 \angle 0^\circ \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V_3^{abc}(F) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.20 \\ 0.55 \\ 0.15 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.90 \angle 0^\circ \\ 0.3775 \angle -113.413^\circ \\ 0.3775 \angle +113.413^\circ \end{bmatrix}$$

10.15. The reactance data for the power system shown in Figure 85 in per unit on a common base is as follows:



FIGURE 85

The impedance diagram for Problem 10.15.

Obtain the Thévenin sequence impedances for the fault at bus 1 and compute the fault current in per unit for the following faults:

- (a) A bolted three-phase fault at bus 1.
- (b) A bolted single line-to-ground fault at bus 1.
- (c) A bolted line-to-line fault at bus 1.
- (d) A bolted double line-to-ground fault at bus 1.

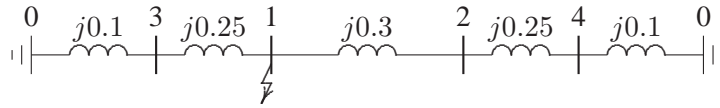


FIGURE 86
Positive-sequence impedance network for Problem 10.15.

The positive-sequence impedance network is shown in Figure 86, and impedance to the point of fault is

$$Z^1 = j \frac{(0.35)(0.65)}{0.35 + 0.65} = j0.2275 \text{ pu}$$

Since negative-sequence reactances are the same as positive-sequence reactances, $X^2 = X^1 = 0.2275$. The zero-sequence impedance network is shown in Figure 87, and impedance to the point of fault is

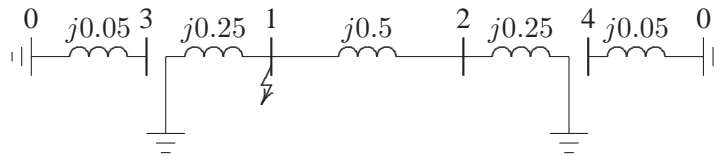


FIGURE 87
zero-sequence impedance network for Problem 10.15.

$$Z^0 = j \frac{(0.25)(0.75)}{0.25 + 0.75} = j0.1875 \text{ pu}$$

(a) For a bolted three-phase fault at bus 1, the fault current is

$$I_f = \frac{1}{j0.2275} = 4.3956 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

(b) For a bolted single-line to ground fault at bus 1, the fault current is

$$I_f = 3I_a^0 = \frac{3}{j(0.2275 + 0.2275 + 0.1875)} = 4.669 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

(c) For a bolted line-to-line fault at bus 1, the fault current in phase b is

$$I_a^1 = \frac{1}{j(0.2275 + 0.2275)} = -j2.1978 \text{ pu}$$

$$I_b(F) = -j\sqrt{3}I_a^1 = -3.8067 \text{ pu}$$

(d) For a bolted double line-to-line fault at bus 1, we have

$$I_a^1 = \frac{1}{j0.2275 + j \frac{(0.2275)(0.1875)}{0.2275+0.1875}} = -j3.02767 \text{ pu}$$

$$I_a^0 = \frac{1 - (0.2275)(-j3.02767)}{j0.1875} = j1.65975 \text{ pu}$$

$$I(F) = 3I_a^0 = 4.979 \angle 90^\circ \text{ pu}$$

10.16. For Problem 10.15, obtain the bus impedance matrices for the sequence networks. A bolted single line-to-ground fault occurs at bus 1. Find the fault current, the three-phase bus voltages during fault, and the line currents in each phase. Check your results using the **zbuild** and **lgfault** programs.

First, we obtain the positive-sequence bus impedance matrix. Add branch 1, $z_{30} = j0.1$ between node $q = 3$ and reference node 0. According to rule 1, we have

$$\mathbf{Z}_{bus}^{(1)} = Z_{33} = z_{30} = j0.1$$

Next, add branch 2, $z_{40} = j0.1$ between node $q = 4$ and reference node 0

$$\mathbf{Z}_{bus}^{(2)} = \begin{bmatrix} Z_{33} & 0 \\ 0 & Z_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j0.1 & 0 \\ 0 & j0.1 \end{bmatrix}$$

Add branch 3, $z_{24} = j0.25$ between the new node $q = 2$ and the existing node $p = 4$. According to rule 2, we get

$$\mathbf{Z}_{bus}^{(3)} = \begin{bmatrix} j0.35 & 0 & j0.1 \\ 0 & j0.1 & 0 \\ j0.1 & 0 & j0.1 \end{bmatrix}$$

Add branch 4, $z_{13} = j0.25$ between the new node $q = 1$ and the existing node $p = 3$. According to rule 2, we get

$$\mathbf{Z}_{bus}^{(4)} = \begin{bmatrix} j0.35 & 0 & j0.1 & 0 \\ 0 & j0.35 & 0 & j0.1 \\ j0.1 & 0 & j0.1 & 0 \\ 0 & j0.1 & 0 & j0.1 \end{bmatrix}$$

Add link 5, $z_{12} = j0.3$ between node $q = 2$ and node $p = 1$. From (9.57), we have

$$\mathbf{Z}_{bus}^{(5)} = \left[\begin{array}{cccc|c} j0.35 & 0 & j0.1 & 0 & -j0.35 \\ 0 & j0.35 & 0 & j0.1 & j0.35 \\ j0.1 & 0 & j0.1 & 0 & -j0.1 \\ 0 & j0.1 & 0 & j0.1 & j0.1 \\ \hline -j0.35 & j0.35 & -j0.1 & j0.1 & j1 \end{array} \right]$$