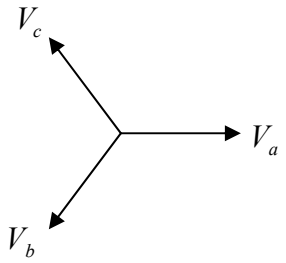
ادامه فصل دوم

مولفه هاي متقارن

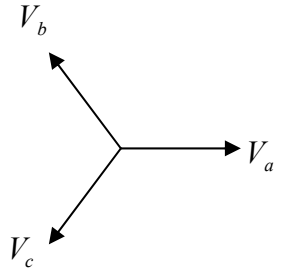
(Symmetrical Components)

abc (positive sequence)



$$\overline{V}_a = \overline{V}_a$$
$$V_b = a^2 V_a$$
$$V_a = aV_a$$

acb (negative sequence)



$$V_a = V_a$$
$$V_b = aV_a$$
$$V_a = a^2 V_a$$

$$a = e^{j120} \qquad a = e^{j240} \quad = e^{-j120} \quad = a^*$$
$$(a^2)^* = a \qquad a^3 = 1 \qquad 1 + a + a^2 = 0$$

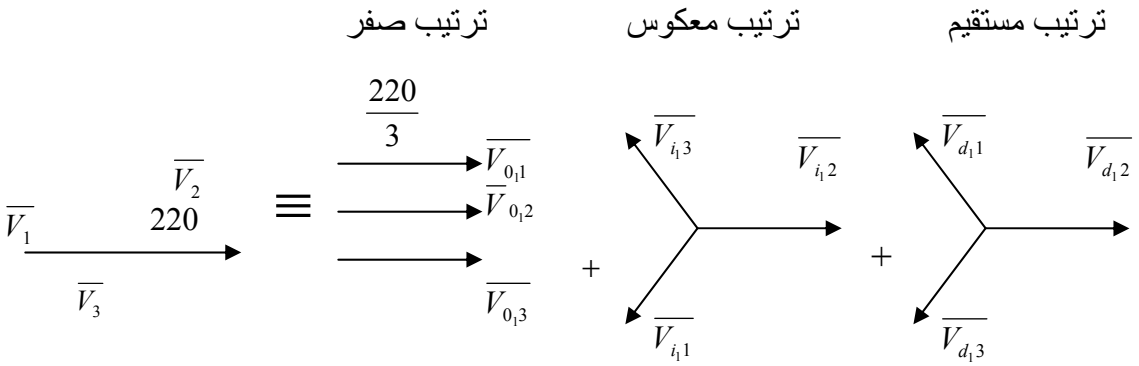
مثال- مولفه هاي هموپولر و معكوس و مستقيم سر ولتاژ در حالت رژيم دايم زير بدست آوريد.

$$\overline{V}_1 = 0 \qquad\qquad V_1(t) = 0$$
$$\overline{V}_2 = 220\angle 0^\circ \qquad \rightarrow \qquad V_2(t) = 220\sqrt{2}\sin 314t$$
$$\overline{V}_3 = 0 \qquad\qquad V_3(t) = 0$$

مولفه هاي فاز ۱ عبارتند از:

$$\overline{a} = e^{j120} = 1\angle 120^\circ$$
$$\overline{a}\overline{V}_1 = \overline{a}^2\overline{V}_1 = 0$$
$$\overline{a}\overline{V}_2 = 220\angle 120^\circ \quad \overline{a}^2\overline{V}_2 = 220\angle 240^\circ$$
$$\overline{a}\overline{V}_3 = \overline{a}^2\overline{V}_3 = 0$$

$$\overline{V}_{0,1} = \frac{1}{3}(\overline{V}_1 + \overline{V}_2 + \overline{V}_3) = \frac{220}{3}\angle 0^\circ$$
$$\overline{V}_{i,1} = \frac{1}{3}(\overline{V}_1 + \overline{a}^2\overline{V}_2 + \overline{a}\overline{V}_3) = \frac{1}{3}(0 + 220\angle 240^\circ + 0) = \frac{220}{3}\angle 240^\circ$$
$$\overline{V}_{d,1} = \frac{1}{3}(\overline{V}_1 + \overline{a}\overline{V}_2 + \overline{a}^2\overline{v}) = \frac{1}{3}(0 + 220\angle 120^\circ + 0) = \frac{220}{3}\angle 120^\circ$$



مثال- در يك شبكه قدرت مولفه هاي جريانهاي اتصال كوتاه به طرف محل اتصال عبارتند از (فاز ۱ بعنوان فاز مبنا):

$$\begin{cases} \overline{I}_0 = 1\,\text{pu} \\ \overline{I}_i = j\,\text{pu} \\ \overline{I}_d = 0\,\text{pu} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \overline{I}_{0,1} = 1\,\text{pu} \\ \overline{I}_{i,1} = j\,\text{pu} \\ \overline{I}_{d,1} = 0\,\text{pu} \end{cases}$$

مطلوب است جريانهاي هر يك از فازهاي سيستم سه فاز $\overline{I}_1, \overline{I}_2, \overline{I}_3$، اگر فاز ۱ بعنوان بردار مبنا باشد.

$$\overline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = 1\angle 120^\circ$$

$$\begin{bmatrix}\bar{I}_1\\ \bar{I}_2\\ \bar{I}_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2\\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a}\end{bmatrix}.\begin{bmatrix}\bar{I}_{0,1}\\ \bar{I}_{i,1}\\ \bar{I}_{d,1}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2\\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a}\end{bmatrix}.\begin{bmatrix}1\\ j\\ 0\end{bmatrix}\ \text{pu}$$

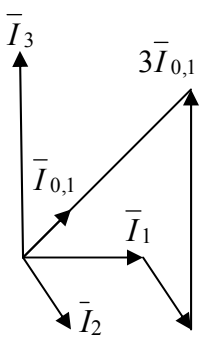
$$\bar{I}_1 = 1+j\ \text{pu} = \sqrt{2}\angle 45^\circ$$

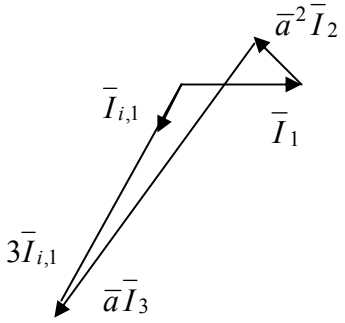
$$\bar{I}_2 = 1+j\bar{a}\ \text{pu} = 1+1\angle 210^\circ\ \text{pu} = (1-\frac{\sqrt{3}}{2})-j\frac{1}{2}\ \text{pu}$$

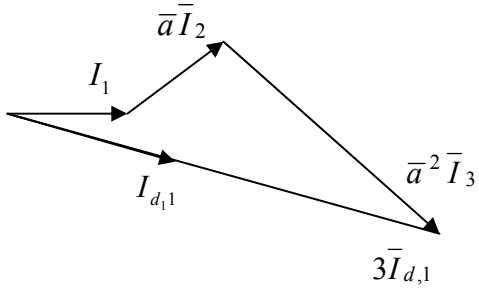
$$\bar{I}_3 = 1+j\bar{a}^2\ \text{pu} = 1+1\angle 330^\circ\ \text{pu} = (1+\frac{\sqrt{3}}{2})-j\frac{1}{2}\ \text{pu}$$

از روش هندسي مي توان مولفه ها را نيز براحتي بدست آورد

$$\bar{I}_0=\frac{1}{3}(\bar{I}_1+\bar{I}_2+\bar{I}_3) \qquad \bar{I}_i=\frac{1}{3}(\bar{I}_1+\bar{a}^2\bar{I}_2+\bar{a}\bar{I}_3) \qquad \bar{I}_d=\frac{1}{3}(\bar{I}_1+\bar{a}\bar{I}_2+\bar{a}^2\bar{I}_3)$$



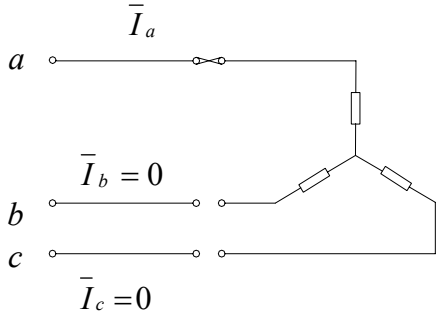




و يا از روي مولفه ها نيز مي شود از طريق هندسي به خود بردارهاي اصلي رسيد:

اساسا ژنراتورها تشكيل شبكه سه فاز متعادل را خواهند داد،پس خود شبكه اساسا يك شبكه قدرت كاملا متقارن سه فاز است.امپدانس هر فاز در خطوط هوايي و ترانس ها و موتورها ودر بارها اساسا تقسيم و توزيع متعادلي است.ذاتا يك شبكه قدرت يك شبكه متقارن سه فاز است.نا متعادلي وقتي پيش مي آيد كه در شبكه يك اتصال كوتاه نا متقارن وصل شود، مثلا يك فاز به زمين وصل شود و پتانسيل آن با پتانسيل زمين يكي مي شود.يك لحظه قبل از وقوع عيب مولفه هاي ولتاژ و جريان(مولفه مستقيم وجود دارد و مولفه هاي معكوس و هموپولر صفر هستند)

تمرين- بار سه فازمتقارني با اتصال ستاره و جريان ۳۰ آمپر از طريق يك خط ۴ سيمه سه فاز متعادل تغذيه مي شود.اگر فيوزهاي دو عدد از فازها (b,c) قطع شوند ، با استفاده از روش مولفه هاي متقارن ،جريان خط ها را قبل و بعد از حالت نامتقارني محاسبه نماييد.



الف- قبل از قطع فیوزها:

$$\bar{I}_a = 30\angle 0^\circ \text{ A} \quad \bar{I}_b = 30\angle 240^\circ \text{ A} \quad \bar{I}_c = 30\angle 120^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{0,a} = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c) = \frac{1}{3}(30\angle 0 + 30\angle 240 + 30\angle 120) = 0 \text{ A} \rightarrow \begin{cases} \bar{I}_{0,b} = 0 \\ \bar{I}_{0,c} = 0 \end{cases}$$

$$\bar{I}_{i,a} = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + \bar{a}^2\bar{I}_b + \bar{a}\bar{I}_c) = \frac{1}{3}(30\angle 0 + (1\angle 240)(30\angle 240) + (1\angle 120)(30\angle 120)) = 0 \text{ A}$$

$$\rightarrow \begin{cases} \bar{I}_{i,b} = 0 \\ \bar{I}_{i,c} = 0 \end{cases}$$

$$\bar{I}_{d,a} = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + \bar{a}\bar{I}_b + \bar{a}^2\bar{I}_c) = 30\angle 0 = \bar{I}_a \rightarrow \begin{cases} \bar{I}_{d,b} = \bar{a}^2\bar{I}_{d,a} = 30\angle 240 = \bar{I}_b \\ \bar{I}_{d,c} = \bar{a}\bar{I}_{d,a} = 30\angle 120 = \bar{I}_c \end{cases}$$

ب- بعد از قطع فیوزها:

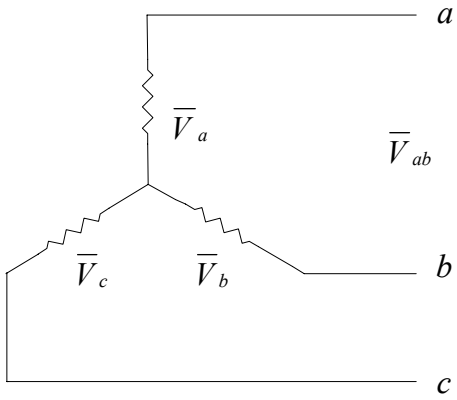
$$\bar{I}_a = 30\angle 0^\circ \text{ A} \quad \bar{I}_b = 0 \text{ A} \quad \bar{I}_c = 0 \text{ A}$$

$$\begin{cases} \bar{I}_{0,a} = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c) = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + 0 + 0) = \frac{1}{3}\bar{I}_a = 10\angle 0^\circ \text{ A} \\ \bar{I}_{0,a} = \bar{I}_{0,b} = \bar{I}_{0,c} = 10\angle 0^\circ \text{ A} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \bar{I}_{i,a} = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + \bar{a}^2\bar{I}_b + \bar{a}\bar{I}_c) = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + 0 + 0) = \frac{1}{3}\bar{I}_a = 10\angle 0^\circ \text{ A} \\ \bar{I}_{i.b} = \bar{a}\bar{I}_{i,a} = (1\angle 120^\circ)(10\angle 0^\circ) = 10\angle 120^\circ \text{ A} \\ \bar{I}_{i.c} = \bar{a}^2\bar{I}_{i,a} = (1\angle 240^\circ)(10\angle 0^\circ) = 10\angle 240^\circ \text{ A} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \bar{I}_{d,a} = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + a\bar{I}_b + \bar{a}^2\bar{I}_c) = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + 0 + 0) = \frac{1}{3}\bar{I}_a = 10\angle 0^\circ \text{ A} \\ \bar{I}_{d.b} = \bar{a}^2\bar{I}_{d,a} = (1\angle 240^\circ)(10\angle 0^\circ) = 10\angle 240^\circ \text{ A} \\ \bar{I}_{d.c} = \bar{a}\bar{I}_{d,a} = (1\angle 120^\circ)(10\angle 0^\circ) = 10\angle 120^\circ \text{ A} \end{cases}$$

تمرین- در يك سيستم سه فاز با اتصال ستاره فرض كنيدولتاژ فازها برابر $\bar{V}_a$ ، $\bar{V}_b$ ، $\bar{V}_c$ بوده و همان سيستم با اتصال مثلث داراي ولتاژهاي خط $\bar{V}_{ab}$ ، $\bar{V}_{bc}$ و $\bar{V}_{ca}$ باشد. در اينصورت ارتباط ميان مقادير مولفه هاي متقارن ولتاژ را در اين دو اتصال پيدا كنيد.



نام گذاري مي كنيم

$$\begin{cases}\overline{V}_a = V_a\angle 0^\circ \\ \overline{V}_b = V_b\angle 240^\circ \\ \overline{V}_c = V_c\angle 120^\circ\end{cases} \overrightarrow{(\overline{V}_a\overline{V}_b\overline{V}_c)} \rightarrow \begin{cases}\overline{V}_{ab} = \overline{V}_a - \overline{V}_b = \sqrt{3}V_a\angle 0+30^\circ \\ \overline{V}_{bc} = \overline{V}_b - \overline{V}_c = \sqrt{3}V_b\angle 240+30^\circ \\ \overline{V}_{ca} = \overline{V}_c - \overline{V}_a = \sqrt{3}V_c\angle 120+30^\circ\end{cases} \overrightarrow{(\overline{V}_{ab}\overline{V}_{bc}\overline{V}_{ca})}$$

ولتاژ ترتيب صفر تمام فازهاي اتصال مثلث صفر هستند. يعني در ترتيب صفر جرياني وارد مثلث نمي شود و جريان داخل مثلث و خارج آن صفر هستند.

استثنا: اما در ترانسفورماتور با اتصال مثلث و ستاره زمين شده، جريان خارج مثلث صفر هستند (از لحاظ الكتريكي) و جريان داخل مثلث ناشي از عبور جريان از طرف ستاره صفر نيستند (از لحاظ مغناطيسي).

در حالت متعادل و نامتعادل داريم:

$$\overline{V}_{0,ab} = \frac{1}{3}(\overline{V}_{ab}+\overline{V}_{bc}+\overline{V}_{ca}) = \frac{1}{3}[(\overline{V}_a-\overline{V}_b)+(\overline{V}_b-\overline{V}_c)+(\overline{V}_c-\overline{V}_a)] = 0$$

$$\overline{V}_{i,ab} = \frac{1}{3}(\overline{V}_{ab}+\overline{a}^2\overline{V}_{bc}+\overline{a}\overline{V}_{ca}) = \frac{1}{3}[(\overline{V}_a-\overline{V}_b)+\overline{a}^2(\overline{V}_b-\overline{V}_c)+\overline{a}(\overline{V}_c-\overline{V}_a)]$$

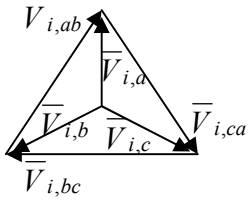
$$= \frac{1}{3}[(\overline{V}_a+\overline{a}^2\overline{V}_b+\overline{a}\overline{V}_c)-(\overline{a}\overline{V}_a+\overline{V}_b+\overline{a}^2\overline{V}_c)]$$

$$= \frac{1}{3}[(\overline{V}_a+\overline{a}^2\overline{V}_b+\overline{a}\overline{V}_c)-\overline{a}(\overline{V}_a+\overline{a}^2\overline{V}_b+\overline{a}\overline{V}_c)]$$

$$= \frac{1}{3}(1-\overline{a})(\overline{V}_a+\overline{a}^2\overline{V}_b+\overline{a}\overline{V}_c)$$

$$= (1-\overline{a})\overline{V}_{i,a}$$

$$= (\sqrt{3}\angle -30^\circ)\overline{V}_{i,a}$$



$$\overline{a} = -\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2} \qquad \overline{a}^2 = -\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2} \qquad 1-\overline{a} = \frac{3}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}\angle -30^\circ$$

$$\overline{V}_{d,ab} = \frac{1}{3}(\overline{V}_{ab}+\overline{a}\overline{V}_{bc}+\overline{a}^2\overline{V}_{ca}) = \frac{1}{3}[(\overline{V}_a-\overline{V}_b)+\overline{a}(\overline{V}_b-\overline{V}_c)+\overline{a}^2(\overline{V}_c-\overline{V}_a)]$$

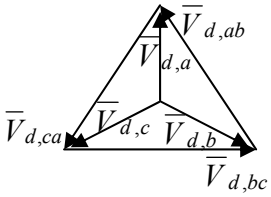
$$= \frac{1}{3}[(\overline{V}_a+\overline{a}\overline{V}_b+\overline{a}^2\overline{V}_c)-(\overline{a}^2\overline{V}_a+\overline{V}_b+\overline{a}\overline{V}_c)]$$

$$= \frac{1}{3}[(\overline{V}_a+\overline{a}\overline{V}_b+\overline{a}^2\overline{V}_c)-\overline{a}^2(\overline{V}_a+\overline{a}\overline{V}_b+a^2\overline{V}_c)]$$

$$= \frac{1}{3}(1-\overline{a}^2)(\overline{V}_a+\overline{a}\overline{V}_b+\overline{a}^2\overline{V}_c)$$

$$= (1-\overline{a}^2)\overline{V}_{d,a}$$

$$= (\sqrt{3}\angle +30^\circ)\overline{V}_{d,a}$$



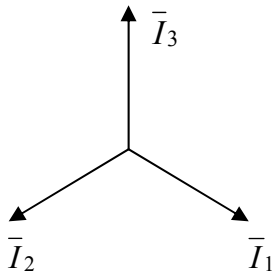
$$\overline{a}^2 = -\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2} \qquad 1-\overline{a}^2 = \frac{3}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}\angle +30^\circ$$

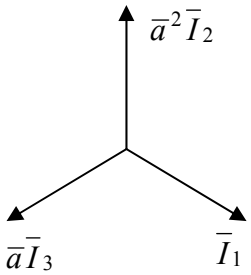
سیستم سه فاز متقارن

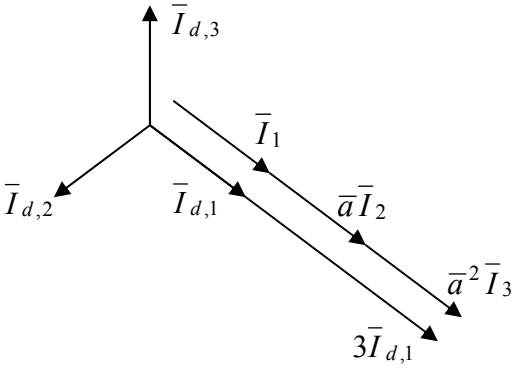
$$\bar{I}_{0,1} = \frac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3) = 0$$

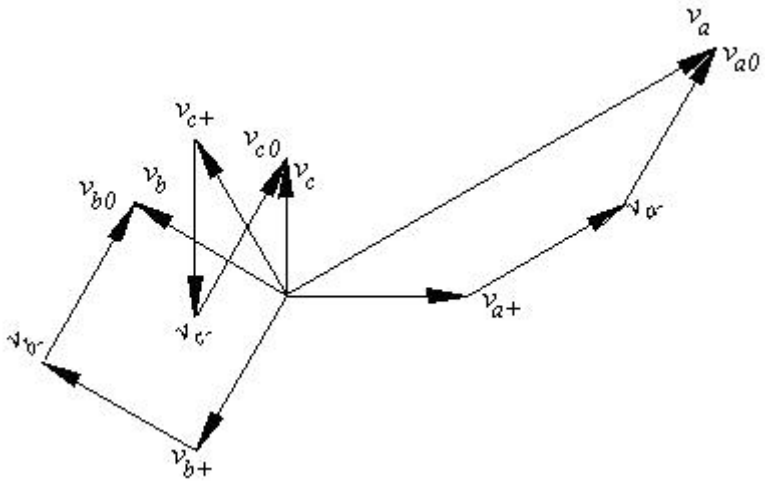
$$\bar{I}_{i,1} = \frac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{a}^2\bar{I}_2 + \bar{a}\bar{I}_3) = 0$$

$$\bar{I}_{d,1} = \frac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{a}\bar{I}_2 + \bar{a}^2\bar{I}_3) = \bar{I}_1$$

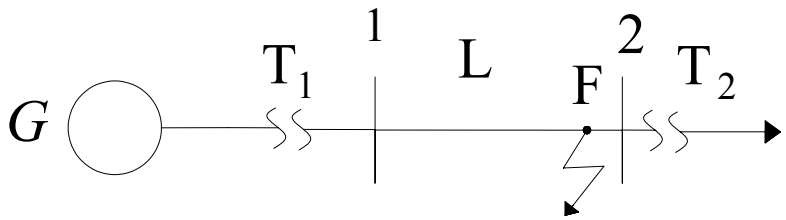






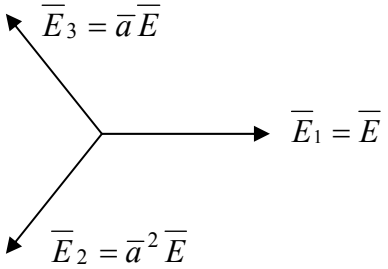


مولفه هاي مستقيم در ژنراتورها محرك هستند و مولفه هاي معكوس و هموپولر صفر هستند. در دياگرام تک خطی شبکه قدرت زیر داریم:

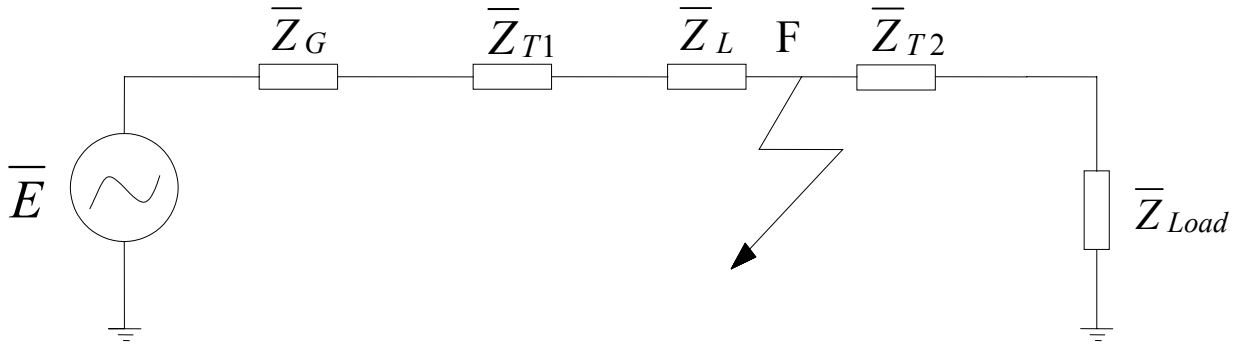


نيروهاي محرك اين ژنراتور يك سيستم سه فاز متقارن مستقيم است.

$$\overline{E}_1 = \overline{E}$$
$$\overline{E}_2 = \overline{a}^2\overline{E}$$
$$\overline{E}_1 = \overline{a}\overline{E}$$



چون شبكه وبار متعادل ومتقارن است ،اگر در يك جايي از شبكه يك اتصال كوتاه پيش آيد ،شبكه عيب تكفاز با زمين (فاز ۱ با زمين در نقطه P)با اين اتصال كوتاه با زمين معادلات شبكه به چه صورت پيش مي آيد.قبل از عيب دياگرام تك خطي براي حل مساله كافي است.



ولي در حالت اتصال كوتاه ديگر اين دياگرام تك خطي را نمي شود رسم كرد ،چون اين دياگرام براي حالت سالم مدار است و ولتاژها وجريان ها متعادل ومتقارن خواهد بود. بايستي هم ژنراتور و هم المانهاي مدار را در سه سيستم (هموپولر، مستقيم و معكوس) نوشت و KVL را نيز نوشت.

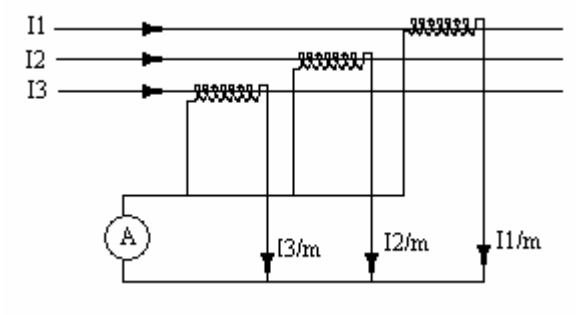
www.Mohandesyar.com

در حالت متعادل و نامتعادل داريم:

$$\overline{I}_A = \frac{\overline{V}_1}{\overline{Z}} + \frac{\overline{V}_2}{\overline{Z}} + \frac{\overline{V}_3}{\overline{Z}} = \begin{cases} 0 & \text{(Symmetrical)} \\ \frac{1}{\overline{Z}} \times 3\overline{V}_0 & \text{(Unsymmetrical)} \end{cases}$$

$$\overline{I}_A \propto \overline{V}_0$$

ج- سه ترانسفورماتور جريان در فازها قرار مي دهيم



در حالت متعادل و نامتعادل داريم:

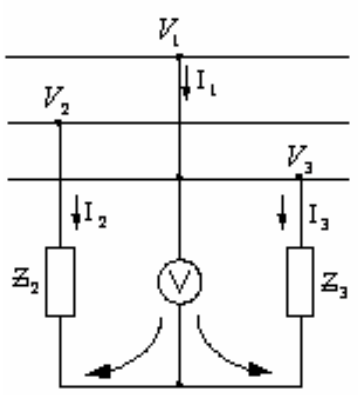
$$\overline{I}_A = \frac{1}{m}\left(\overline{I}_1 + \overline{I}_2 + \overline{I}_3\right) = \begin{cases} 0 & \text{(Symmetrical)} \\ \frac{1}{m} \times 3\overline{I}_0 & \text{(Unsymmetrical)} \end{cases}$$

$$\overline{I}_A \propto \overline{I}_0$$

د- در مدار زير $\overline{Z}_1 = R$ امپدانس داخلي ولت متر است. $\overline{Z}_2$ و $\overline{Z}_3$ را بايد آنچنان پيدا كرد تا:

۱- ولت متر ولتاژي متناسب با ولتاژ معكوس ايجاد كند.

۲- ولت متر ولتاژي متناسب با ولتاژ مستقيم ايجاد كند.



$$\text{Direct}: \begin{cases} \overline{Z}_2 = R + j\sqrt{3}R \\ \overline{Z}_3 = R - j\sqrt{3}R \end{cases} \qquad \text{Inverse}: \begin{cases} \overline{Z}_2 = R - j\sqrt{3}R \\ \overline{Z}_3 = R + j\sqrt{3}R \end{cases}$$

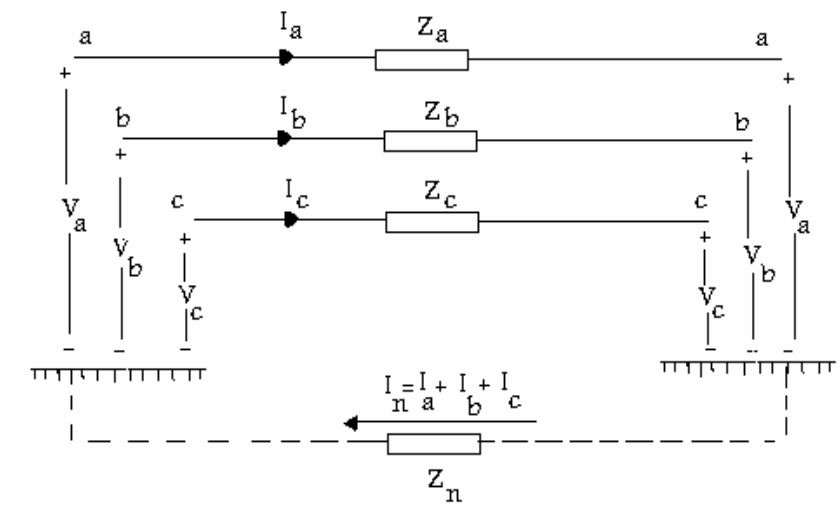
امپدانس های ترتیب صفر، مستقیم و معکوس در خط انتقال

اگرامپدانس های عنصری از سیستم، متقارن باشندرابطه افت ولتاژ هرتوالی به جریان همان توالی بستگی داشته وامپدانسی که در معادله افت ولتاژ وجریان ظاهرمی شود امپدانس آن توالی نامیده می شود.

خوشبختانه امپدانس همه عناصر سیستم ، نظیر ژنراتورها ، ترانسفورماتورها و خطوط انتقال متقارن می باشند. با توجه به استقلال روابط سه توالی از یکدیگر و متقارن بودن بردارهای هرتوالی، می توان برای هرعنصر سیستم مدار معادل یک فاز هریک ازتوالی هارادر محاسبات منظور نمود.با ترکیب مدارهای معادل یک فاز عناصرسیستم برای هر توالی،شبکه آن توالي بدست می آید.به این ترتیب به جای دیاگرام امپدانس سه شبکه امپدانسی ترتیب صفر، معکوس و مستقیم موردنیازخواهندبود.هریک ازاین شبکه ها شامل کمیت های همان توالی می باشد. مثلاً شبکه توالی مستقیم شامل ولتاژ ولتاژتوالی مستقیم، جریان توالی مستقیم، امپدانس توالی مستقیم و...می باشد.

لازم به تذکراست که بردارهای نیروهای محرکه الکتریکی ماشینهای سنکرون دارای توالی مستقیم بوده وفقط درشبکه های توالی مستقیم ظاهر می شوند.

عناصر سیستمهای قدرت از امپدانس های متعادل (متقارن) تشکیل شده اند وفقط در شرایط وقوع خطاهای نامتقارن به امپدانس های نا متعادل برخورد می کنیم. شکل زیر قسمتی ازسیستم با سه امپدانس $\overline{Z}_{1,L}$، $\overline{Z}_{2,L}$ و $\overline{Z}_{3,L}$ را نشان می دهد و امپدانس مسیر زمین $\overline{Z}_{n,L}$ می باشد.



سیستم قدرت با سه خط انتقال با امپدانس های نامتعادل

افت ولتاژدوسراین امپدانس ها را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\overline{V}_{11',L} = \overline{Z}_{1,L}\overline{I}_{1,L} + \overline{Z}_{n,L}(\overline{I}_{1,L} + \overline{I}_{2,L} + \overline{I}_{3,L})$$

$$\overline{V}_{22',L} = \overline{Z}_{2,L}\overline{I}_{2,L} + \overline{Z}_{n,L}(\overline{I}_{1,L} + \overline{I}_{2,L} + \overline{I}_{3,L})$$

$$\overline{V}_{33',L} = \overline{Z}_{3,L}\overline{I}_{3,L} + \overline{Z}_{n,L}(\overline{I}_{1,L} + \overline{I}_{2,L} + \overline{I}_{3,L})$$

و یا به شکل ماتریسی داریم:

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_{11',L} \\ \overline{V}_{22',L} \\ \overline{V}_{33',L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Z}_{1,L}+\overline{Z}_{n,L} & \overline{Z}_{n,L} & \overline{Z}_{n,L} \\ \overline{Z}_{n,L} & \overline{Z}_{2,L}+\overline{Z}_{n,L} & \overline{Z}_{n,L} \\ \overline{Z}_{n,L} & \overline{Z}_{n,L} & \overline{Z}_{3,L}+\overline{Z}_{n,L} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \overline{I}_{1,L} \\ \overline{I}_{2,L} \\ \overline{I}_{3,L} \end{bmatrix}$$

$$\overline{\boldsymbol{V}}_{\boldsymbol{123,L}} = \overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{123,L}} \overline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{123,L}}$$

با قراردادن $\overline{\boldsymbol{V}}_{\boldsymbol{123,L}} = \overline{\boldsymbol{T}}\overline{\boldsymbol{V}}_{\boldsymbol{0id,L}}$ و $\overline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{123,L}} = \overline{\boldsymbol{T}}\overline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{0id,L}}$ در رابطه اخیرداریم:

$$\overline{\boldsymbol{T}}\overline{\boldsymbol{V}}_{\boldsymbol{0id,L}} = \overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{123,L}} \overline{\boldsymbol{T}}\overline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{0id,L}}$$

واز آنجا $\overline{\boldsymbol{V}}_{\boldsymbol{0id,L}}$ را بدست می آوریم:

$$\overline{\boldsymbol{V}}_{\boldsymbol{0id,L}} = \overline{\boldsymbol{T}}^{\boldsymbol{-1}} \overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{123,L}} \overline{\boldsymbol{T}}\overline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{0id,L}} = \overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{0id,L}} \overline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{0id,L}}$$

$$\overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{0id,L}} = \overline{\boldsymbol{T}}^{\boldsymbol{-1}} \overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{123,L}} \overline{\boldsymbol{T}}$$

معادله فوق، رابطه ماتریس امپدانس مولفه های متقارن $\overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{0id,L}}$ را برحسب ماتریس امپدانس سیستم اصلی $\overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{123,L}}$ نشان می دهد. با استفاده از این معادله $\overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{0id,L}}$ رابدست می آوریم:

$$\overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{0id,L}} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \overline{a}^2 & \overline{a} \\ 1 & \overline{a} & \overline{a}^2 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \overline{Z}_{1,L}+\overline{Z}_{n,L} & \overline{Z}_{n,L} & \overline{Z}_{n,L} \\ \overline{Z}_{n,L} & \overline{Z}_{2,L}+\overline{Z}_{n,L} & \overline{Z}_{n,L} \\ \overline{Z}_{n,L} & \overline{Z}_{n,L} & \overline{Z}_{3,L}+\overline{Z}_{n,L} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \overline{a} & \overline{a}^2 \\ 1 & \overline{a}^2 & \overline{a} \end{bmatrix}$$

$$\overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{0id,L}} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} \overline{Z}_{1,L}+\overline{Z}_{2,L}+\overline{Z}_{3,L}+9\overline{Z}_{n,L} & \overline{Z}_{1,L}+\overline{a}\overline{Z}_{2,L}+\overline{a}^2\overline{Z}_{3,L} & \overline{Z}_{1,L}+\overline{a}^2\overline{Z}_{2,L}+\overline{a}\overline{Z}_{3,L} \\ \overline{Z}_{1,L}+\overline{a}^2\overline{Z}_{2,L}+\overline{a}\overline{Z}_{3,L} & \overline{Z}_{1,L}+\overline{Z}_{2,L}+\overline{Z}_{3,L} & \overline{Z}_{1,L}+\overline{a}\overline{Z}_{2,L}+\overline{a}^2\overline{Z}_{3,L} \\ \overline{Z}_{1,L}+\overline{a}\overline{Z}_{2,L}+\overline{a}^2\overline{Z}_{3,L} & \overline{Z}_{1,L}+\overline{a}^2\overline{Z}_{2,L}+\overline{a}\overline{Z}_{3,L} & \overline{Z}_{1,L}+\overline{Z}_{2,L}+\overline{Z}_{3,L} \end{bmatrix}$$

اگرامپدانس ها متقارن باشند، داریم:

$$\overline{Z}_{1,L} = \overline{Z}_{2,L} = \overline{Z}_{3,L} = \overline{Z}_L$$

$$\overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{0id,L}} = \begin{bmatrix} \overline{Z}_L+3\overline{Z}_{n,L} & 0 & 0 \\ 0 & \overline{Z}_L & 0 \\ 0 & 0 & \overline{Z}_L \end{bmatrix}$$

و لذا می توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_{0,L} \\ \overline{V}_{i,L} \\ \overline{V}_{d,L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Z}_L+3\overline{Z}_{n,L} & 0 & 0 \\ 0 & \overline{Z}_L & 0 \\ 0 & 0 & \overline{Z}_L \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \overline{I}_{0,L} \\ \overline{I}_{i,L} \\ \overline{I}_{d,L} \end{bmatrix}$$

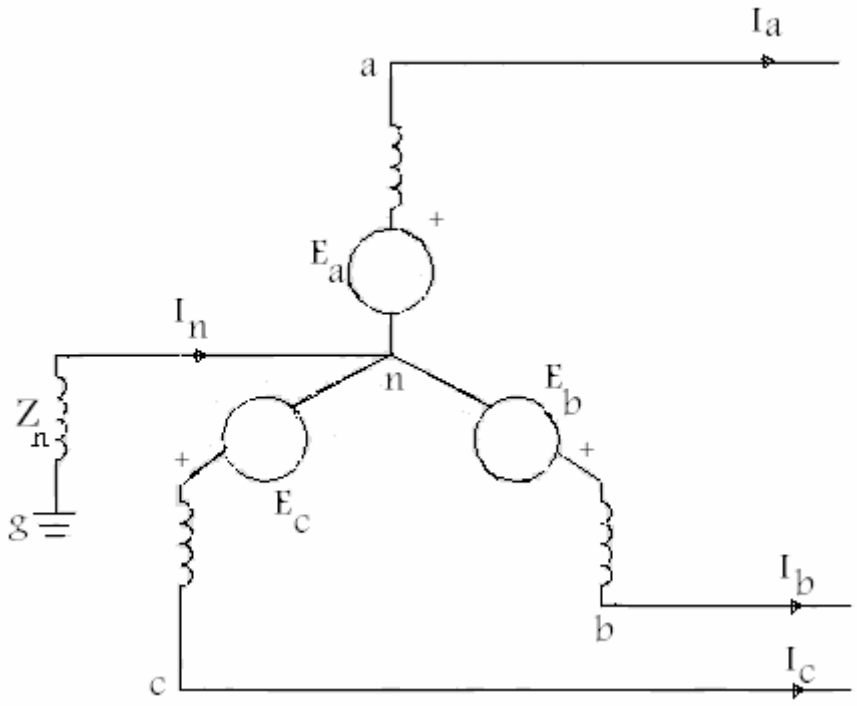
و ازآنجا:

$$\overline{V}_{0,L} = (\overline{Z}_L + 3\overline{Z}_{n,L})\overline{I}_{0,L} = \overline{Z}_{0,L}\overline{I}_{0,L}$$
$$\overline{V}_{i,L} = \overline{Z}_L\overline{I}_{i,L} = \overline{Z}_{i,L}\overline{I}_i$$
$$\overline{V}_{d,L} = \overline{Z}_L\overline{I}_{d,L} = \overline{Z}_{d,L}\overline{I}_{d,L}$$

امپدانس های $\overline{Z}_{0,L}$، $\overline{Z}_{i,L}$ و $\overline{Z}_{d,L}$ به ترتیب به امپدانس های توالی صفر، معکوس (منفی) و مستقیم (مثبت) خط انتقال موسومند. همان طوري كه ملاحظه می شودکه سه رابطه اخیراز یکدیگر مستقل بوده و ولتاژ هرتوالی فقط به جریان توالی مربوطه بستگی دارد.

امپدانس های ترتیب صفر، مستقیم و معکوس درژنراتورسنکرون

شکل زیر یک ژنراتور سنکرون راکه نقطه صفرآن توسط یک راکتورزمین شده است نشان می دهد. $\overline{E}_{1,G}$، $\overline{E}_{2,G}$ و $\overline{E}_{3,G}$ نیروهای محرکه الکتریکی ژنراتور سنکرون و $\overline{I}_{1,G}$، $\overline{I}_{2,G}$ و $\overline{I}_{3,G}$ جریان های فازی می باشند.



مدار معادل ژنراتور سنکرون سه فاز

اگر از برجستگی قطب ها صرفنظر شود، درشرایط بارداری ماشین که جریان های $\overline{I}_{1,G}$، $\overline{I}_{2,G}$ و $\overline{I}_{3,G}$ متقارن می باشند و رابطه نیروی محرکه الکتریکی با ولتاژو جریان فازها به ترتیب زیر بیان می شود:

$$\overline{E}_{1,G} = \overline{V}_{1,G} + \overline{Z}_{1,G}\overline{I}_{1,G}$$
$$\overline{E}_{2,G} = \overline{V}_{2,G} + \overline{Z}_{2,G}\overline{I}_{2,G}$$
$$\overline{E}_{3,G} = \overline{V}_{3,G} + \overline{Z}_{3,G}\overline{I}_{3,G}$$

در اینجا $\overline{Z}_{s,G}$ امپدانس سنکرون ماشین است. سیم پیچ های استاتور در ماشین کاملاً متعادل بوده و لذانیروهای محرکه الکتریکی همواره یک سیستم برداری متقارن را می سازند، یعنی:

$$\overline{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{123,G}} = \begin{bmatrix} \overline{E}_{1,G} \\ \overline{E}_{2,G} \\ \overline{E}_{3,G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{E}_{1,G} \\ \overline{a}^2 \overline{E}_{1,G} \\ \overline{a}\,\overline{E}_{1,G} \end{bmatrix} = \overline{E}_{1,G} \begin{bmatrix} 1 \\ \overline{a}^2 \\ \overline{a} \end{bmatrix}$$

بنابراین معادله ولتاژها را می توان به این صورت نوشت:

$$\overline{E}_{1,G} \begin{bmatrix} 1 \\ \overline{a}^2 \\ \overline{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{V}_{1,G} \\ \overline{V}_{2,G} \\ \overline{V}_{3,G} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \overline{Z}_{s,G} & 0 & 0 \\ 0 & \overline{Z}_{s,G} & 0 \\ 0 & 0 & \overline{Z}_{s,G} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \overline{I}_{1,G} \\ \overline{I}_{2,G} \\ \overline{I}_{3,G} \end{bmatrix}$$

$$\overline{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{123,G}} = \overline{\boldsymbol{V}}_{\boldsymbol{123,G}} + \overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{123,G}} \overline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{123,G}}$$

چون جملات غیرقطری در ماتریس $\overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{123,G}}$ برابرصفر هستند، لذا محاسبات بر مبنای یک فاز انجام می شود. حال اگرخطای نا متقارنی در ترمینال های ژنراتوراتفاق بیفتد، جریان های نامتقارن $\overline{I}_{1,G}$، $\overline{I}_{2,G}$ و $\overline{I}_{3,G}$ در آن جاری می شوند و اگرخطا به طریقی به زمین مربوط باشد. جریان $\overline{I}_{n,G} = \overline{I}_{1,G} + \overline{I}_{2,G} + \overline{I}_{3,G}$ از $\overline{Z}_{n,G}$ عبورخواهد کرد. دراینصورت در ماتریس امپدانس ژنراتور جملات غیرقطري صفرنبوده و این ماتریس بصورت زیرنوشته می شود:

$$\overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{123,G}} = \begin{bmatrix} \overline{Z}_{1,G} & \overline{Z}_{2,G} & \overline{Z}_{3,G} \\ \overline{Z}_{3,G} & \overline{Z}_{1,G} & \overline{Z}_{2,G} \\ \overline{Z}_{2,G} & \overline{Z}_{3,G} & \overline{Z}_{1,G} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} \overline{Z}_{11,G} = \overline{Z}_{22,G} = \overline{Z}_{33,G} = \overline{Z}_{1,G} \\ \overline{Z}_{12,G} = \overline{Z}_{23,G} = \overline{Z}_{31,G} = \overline{Z}_{2,G} \\ \overline{Z}_{13,G} = \overline{Z}_{21,G} = \overline{Z}_{32,G} = \overline{Z}_{3,G} \end{cases}$$

یعنی کوپلاژ مغناطیسی فاز ۱ نسبت به فارهای ۲ و ۳ مشابه کوپلاژ مغناطیسی فاز ۲ نسبت به فازهای ۱ و ۳ و کوپلاژمغناطیسی فاز ۳ نسبت به فازهای ۱ و ۲ می باشد.

با قراردادن $\overline{\boldsymbol{V}}_{\boldsymbol{123,G}} = \overline{\boldsymbol{T}}\overline{\boldsymbol{V}}_{\boldsymbol{0id,G}}$ و $\overline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{123,G}} = \overline{\boldsymbol{T}}\overline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{0id,G}}$ در رابطه اخیرداریم:

$$\overline{\boldsymbol{T}}\overline{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{0id,G}} = \overline{\boldsymbol{T}}\overline{\boldsymbol{V}}_{\boldsymbol{0id,G}} + \overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{123,G}} \overline{\boldsymbol{T}}\overline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{0id,G}}$$

یا می توان نوشت:

$$\overline{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{0id,G}} = \overline{\boldsymbol{V}}_{\boldsymbol{0id,G}} + \overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{0id,G}} \overline{\boldsymbol{I}}_{\boldsymbol{0id,G}}$$

که درآن:

$$\overline{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{0id,G}} = \overline{\boldsymbol{T}}^{-1} \overline{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{123,G}} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \overline{a}^2 & \overline{a} \\ 1 & \overline{a} & \overline{a}^2 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} 1 \\ \overline{a}^2 \\ \overline{a} \end{bmatrix} \overline{E}_{1,G} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \overline{E}_{1,G} \end{bmatrix}$$

و ماتریس امپدانس توالی ژنراتور $\overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{0id}\ ,G}$ عبارتست از:

$$\overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{0id},G} = \overline{\boldsymbol{T}}^{-1}\overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{123},G}\overline{\boldsymbol{T}} = \begin{bmatrix} \overline{Z}_{1,G}+\overline{Z}_{2,G}+\overline{Z}_{3,G} & 0 & 0 \\ 0 & \overline{Z}_{1,G}+\overline{a}\overline{Z}_{2,G}+\overline{a}^2\overline{Z}_{3,G} & 0 \\ 0 & 0 & \overline{Z}_{1,G}+\overline{a}^2\overline{Z}_{2,G}+\overline{a}\overline{Z}_{3,G} \end{bmatrix}$$

دراینجا امپدانس های توالی ژنراتوررابه ترتیب زیرتعریف می کنیم:

امپدانس توالی صفرژنراتور $\overline{Z}_{0,G} = \overline{Z}_{1,G}+\overline{Z}_{2,G}+\overline{Z}_{3,G}$

امپدانس توالی معکوس (منفی) ژنراتور $\overline{Z}_{i,G} = \overline{Z}_{1,G}+\overline{a}\overline{Z}_{2,G}+\overline{a}^2\overline{Z}_{3,G}$

امپدانس توالی مستقیم (مثبت) ژنراتور $\overline{Z}_{d,G} = \overline{Z}_{1,G}+\overline{a}^2\overline{Z}_{2,G}+\overline{a}\overline{Z}_{3,G}$

بنابراین معادله ولتاژها بصورت فرم ماتریسی زیر نوشته می شود:

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_{0,G} \\ \overline{V}_{i,G} \\ \overline{V}_{d,G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \overline{E}_{1,G} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \overline{Z}_{0,G} & 0 & 0 \\ 0 & \overline{Z}_{i,G} & 0 \\ 0 & 0 & \overline{Z}_{d,G} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{I}_{0,G} \\ \overline{I}_{i,G} \\ \overline{I}_{d,G} \end{bmatrix}$$

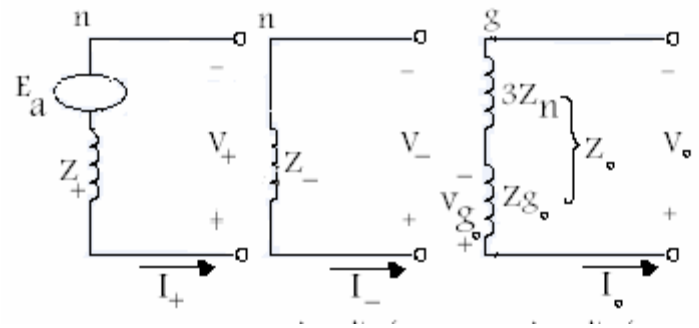
و یا:

$$0 = \overline{Z}_{0,G}\overline{I}_{0,G} + \overline{V}_{0,G}$$

$$0 = \overline{Z}_{i,G}\overline{I}_{i,G} + \overline{V}_{i,G}$$

$$\overline{E}_{1,G} = \overline{Z}_{d,G}\overline{I}_{d,G} + \overline{V}_{d,G}$$

همان طوري که ملاحظه می شود چون ماتریس $\overline{\boldsymbol{Z}}_{\boldsymbol{0id},G}$ یک ماتریس قطری است ، روابط ولتاژها و جریانها درسه شبکه توالی صفر، معکوس و مستقیم ازیکدیگرمستقل می باشند ضمناً ظاهر شده است. باتوجه به سه رابطه اخیر می توان شبکه های توالی همچنان که انتظار می رفت نیروی محرکه الکتریکی ژنراتور فقط در شبکه توالی مثبت ژنراتور را رسم نمود. شکل زیر شبکه های توالی صفر، معکوس و مستقیم ژنراتور را برای فاز ۱ نشان می دهد.



شبکه های ترتیب های صفر، معکوس و مستقیم ژنراتور سنکرون

باید دقت نمود که V_+وv_-و V_{go} ولتاژهای توالی فاز a ژنراتور نسبت به نقطه صفر آن (n) می باشند.درعمل این ولتاژهارا نسبت به زمین (نقطهg) درنظرمی گیرند. درشبکه های توالی مثبت ومنفی جریان عبوری از Z_nصفربوده و لذانقطهn با زمین هم پتانسیل خواهدبود. بنابراین برای این دوشبکه ازدیدگاه ولتاژها نقاط n و g یکسان هستند.درشبکه توالی صفر، جریان$3I_o$ ازZ_n عبورمی کندولذاپتانسیل نقطه صفر(n) به اندازه $3Z_nI_o$ کمترازپتانسیل زمین (نقطهg) است.بااضافه کردن امپدانس $3Z_n$ بین نقاطnوgامپدانس کل توالی صفرژنراتور Z_oبدست می آید:

$$Z_o=Z_{go}+3Z_n \qquad (37\text{-}12)$$

حال رابطه ولتاژوجریان رادرشبکه های توالی ژنراتوربصورت زیرمی نویسیم:

$$0=Z_oI_o+V_o \qquad (۳۸\text{-}۱۲)$$

$$0=Z_-I_-+V_- \qquad (۳۹\text{-}۱۲)$$

$$E_a=Z_+I_++V_+ \qquad (۴۰\text{-}۱۲)$$

دراین روابط شین مرجع،زمین می باشد.

اگرژنراتورتحت شرایط متقارن کار کند،توالی ولتاژها و جریان های سه فازآن مثبت بوده و میدان دواراستاتورنسبت به رتور ساکن می باشد. بنابراین بر اثرعبور جریان توالی مثبت از ژنراتورامپدانسهای توالی مثبت ماشین،بستگی به جریان اتصال کوتاه مورد نیاز،عبارتند از:

حالت ماندگار $Z_+=jX_d$

حالت گذرا $Z_+=jX_d'$

حالت زیرگذرا $Z_+=jX_d''$

روش محاسبه واندازه گیری امپدانس های توالی منفی وصفردرکتب ماشینهای الکتریکی آمده است وازبحث این کتاب خارج است.جدول(۱۱-۱)مقادیرعمومی راکتانسهای توالی منفی وصفرماشینهای الکتریکی رانشان می دهد.باکمی دقت درجدول مذکورملاحظه می شودکه راکتانس توالی منفی ماشینها (X_-)تقریباًباراکتانس توالی مثبت آنها(X_d'')برابراست. $Z_i \approx JX''_d$

۱۲-۷ امپدانسهای توالی درخطوط انتقال وترانسفورماتورها:

روابط (۱۲-۲۴) تا (۱۲-۲۶)نشان می دهندکه اگر بین فازهای یک عنصرغیرفعال کوپلاژ مغناطیسی وجودنداشته باشدرابطه بین جریان وولتاژهریک ازتوالی هامستقل ازتوالی های دیگر است.درفصل سوم هنگامی که اندوکتانس وکاپاسیتانس خطوط انتقال را باتوجه به کوپلاژمغناطیسی فازهابدست آوردیم، فقط از خاصیت متقارن بودن جریانها استفاده کردیم و ترتیب خاصی برای توالی فازها موردنظرنبوده است.بنابراین نتایج بدست آمده برای هردو امپدانس توالی مثبت ومنفی صدق می نماید.

امپدانس توالی در خطوط انتقال:

بعبارت دیگرامپدانس توالی منفی خط انتقال نیز همانندامپدانس توالی مثبت آن باامپدانس خط انتقال برابر است.

$Z_i=Z_d=Z_{line}$;$X_{line}=LW$ خط انتقال

هنگامی که ازخط انتقال فقط جریان توال صفر عبورکند،جریان فازها یکسان بوده وجریان برگشت ازطریق سیمهای زمین،خودزمین ویاهردوبرقرارمی گردد.ازآنجائیکه جریان توالی صفردر هرسه فاز خط انتقال یکسان مي باشد،میدان مغناطیسی ایجاد شده براثرآن کاملاً با میدانهای مغناطیسی ایجادشده بر اثر جریان های توالی مثبت و یا منفی متفاوت است. در نتیجه راکتانس القایی توالی صفر یک خط انتقال هوائي باراکتانس توالی مثبت آن متفاوت بوده وحدود۲الی۳/۵برابر آن بوده است.

$Z_o=2\text{-}3.5Z_d$ خط انتقال

امپدانس توالی درترانسفورماتورها:

امپدانس توالی مثبت ترانسفورماتورهمان امپدانس پراکندگی آن می باشد،وچون ترانسفور- ماتور نیزمانندخط انتقال یک عنصرساکن(غیردوار)است,اگرترتیب فازهااز abc به acbتغییر یابد امپدانس پراکندگی آن تغییری نمی کند. درنتیجه امپدانس های توالی مثبت و منفی ترانسفورماتورمشابه اند,یعنی:

$$Z_+=Z_-=Z_L \qquad (۴۱\text{-}۱۲)$$

اگر جریان های توالی صفر از هر دوسیم پیچ ترانسفورماتور عبور کنند , امپدانس توالی صفر ترانسفورماتورراخواهیم داشت.گرچه براساس روابط(۱۲-۲۴)تا(۱۲-۲۶)برای یک عنصرغیرفعال سری امپدانس توالی صفربامپدانسهای توالی مثبت ومنفی آن کمی متفاوت است,لیکن درمحاسبات سیستم هامعمولاًامپدانسهای توالی مثبت,منفي وصفرترانسفور -ماتورهارایکسان فرض می کنند $Z_o \approx Z_+=Z$

امپدانس توالی درخطوط انتقال هوائي وکابلها:

۱)چون خط هوائي یک سیستم استاتیک است . $L=2\times10^{-7}\ln D_m^{6}/D_s$

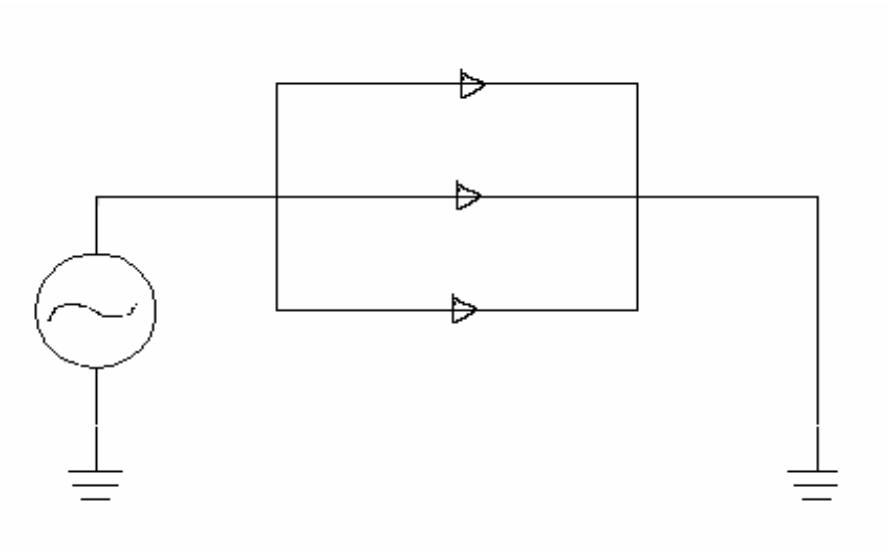
۲) پس$X_d=X_i$ است . $X_d=X_i= LW$ $(0.35\text{-}0.45)\ \Omega/km$

$X_o \cong 3X_d$ $(1.05\text{-}1.35)\ \Omega/km$

۳)براي اندازه گيريX_o ابتداوانتهارابهم وصل کرده وبوسيله يك منبع تكفازجريان از آن عبورمي دهيم كه جريانهاي همفاز ازآن عبور مي كند .

در خطوط هوايي X>>R

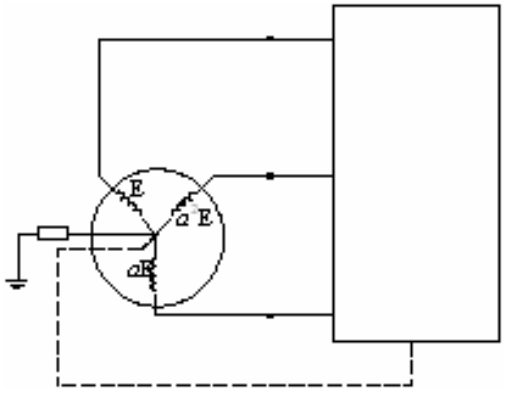
دركابلهاي زيرزميني RوX درحدودهم هستند ولي درمقايسه باشبكه قدرت سهم كوچكي راتشكيل مي دهند واز Rصرفنظرمي كنيم.



محاسبه امپدانس مستقيم، معكوس وهموپولر ژنراتور سنكرون

نيروهاي محركه توليد شده در سيم پيچهاي يک ژنراتور سه فازه عبارتند از E,a^2E,aE.

اين ژنراتور مطابق شكل زير يک شبكه سه فار را تغذيه ميكند. هر يک از سيم پيچهاي ژنراتور داراي L,R بوده و $M_{np}.i_p$ فلوي مغناطيسي القا شده به وسيله جريان i_P درفاز n است.



چون سيم پيچهاي هرسه فاز متقارن مي باشند فرض مي كنيم:

$$M_{12} = M_{23} = M_{31} = M$$

$$M_{21} = M_{32} = M_{13} = M'$$

مطلوب است :

الف-معادلات ولتاژ V_3,V_2,V_1 در سرهاي خروجي اين ژنراتور.

ب-امپدانس مستقيم معكوس هموپولر اين ژنراتور بر حسب $M',MM,L,$.

ادامه فصل دوم

مولفه هاي متقارن

(Symmetrical Components)

ترانسفورماتور دو پيچكه

چون اين المان در سيستم هاي سه فاز يك المان استاتيك است، لذا توالي مستقيم و معكوس براي آن فرقي نكرده ويكسان است پس داريم:

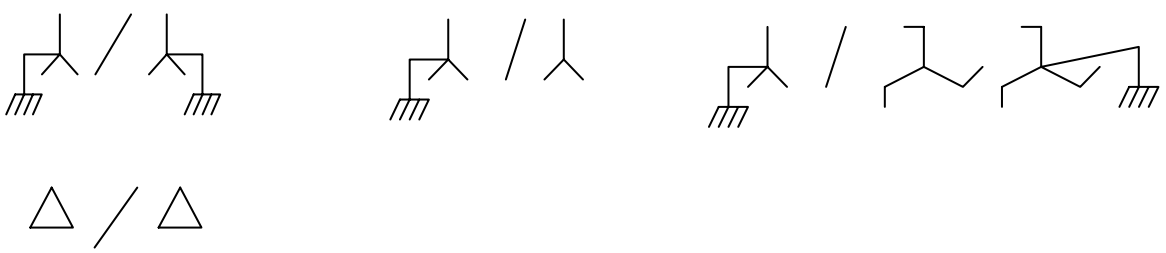
راكتانس اتصال كوتاه= $X_i = X_d = X_{cc}$

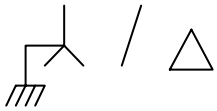
بسته به نوع ترانسفورماتور مقدار اين راكتانس (V_i^2 / S_b) در رنج ١٧-٤% تغيير مي كند. براي ترانسفورماتورهاي معمولي در حدود ١٠%، براي ترانسفورماتورهاي بزرگ درحدود ١٧% و براي ترانسفورماتور هاي كوچك درحدود ٤% مي باشد. اگر بخواهيم در رنج MVA اين راكتانس را بررسي كنيم مي توان تقسيم بندي زير را داشت.

براي ترانسفورماتور هاي چند MVA حدود ٤%، براي ترانسفورماتور هاي بزرگ مثل ١٠٠MVAحدود ١٣-٧% و براي ترانسفورماتور هاي بزرگتر در شرايط خاص ١٧% به بالا مي باشد.

راكتانس هموپلر بستگي به نوع اتصالات سيم پيچي هاي اوليه وثانويه ونوع كوپلاژ مغناطيسي (مدار مغناطيسي) ترانسفورماتور خواهد داشت.

انواع ترانسفورماتورها

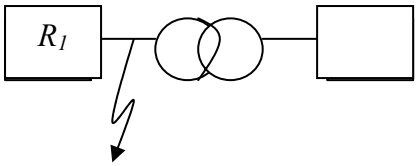


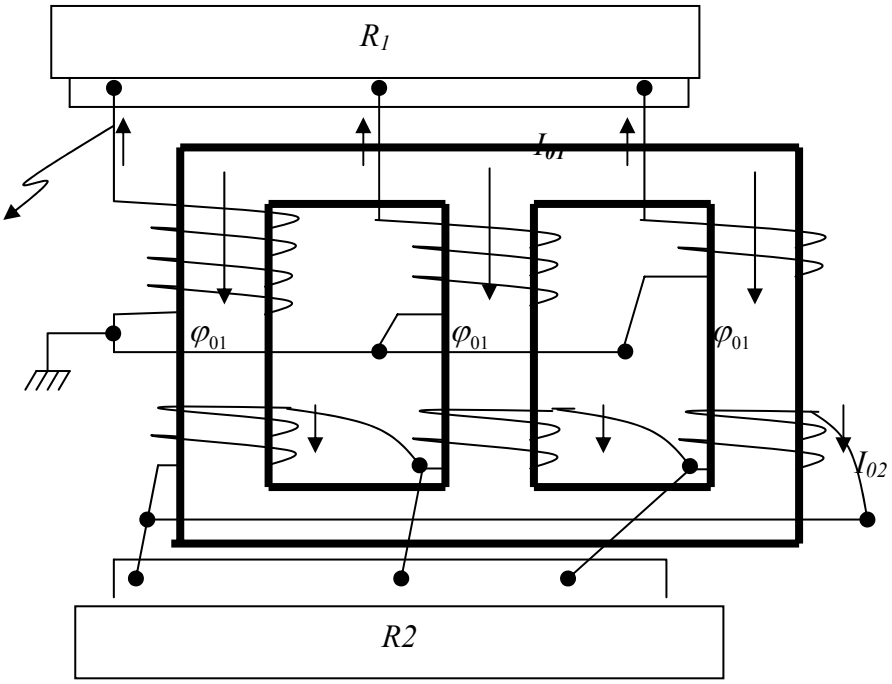


اتصال مثلث/ ستاره زمين شده:

براي اتصالات مثلث/ ستاره زمين شده، Z_o موقعي وجود دارد كه نا متعادلي مثل اتصال كوتاه داشته باشيم .

حال بايد ديد مقدار Z_o چقدر است





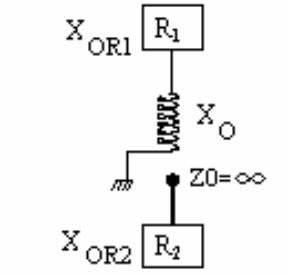
در اتصال كوتاه تكفاز، سيستم به توالي هاي هموپلر، معكوس و مستقيم تجزيه مي شود. با عبورجريان I_{01} فلوهايي كه در مدار مغناطيسي ايجاد خواهد شد، در سيم پيچي هاي ثانويه جرياني عبور خواهد داد كه با عبور فلوي مربوطه مي بايستي مخالفت كند. φ_{02}، جريان I_{02} را از ثانويه ها عبور خواهد داد.

فلوی ضعیف جهت مغناطیس کردن هسته ترانسفورماتور$=\varphi_{01}-\varphi_{02}$

$$\frac{I_{01}}{I_{02}}=\frac{N2}{N1}$$

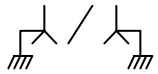
جريان I_{02} فقط در داخل مثلث گردش كرده و سيم پيچي ثانويه را گرم خواهد كرد. اين جريان گردشي بوده و به بيرون هيچ راهي پيدا نمي كند. بنابراين اگر در طرف اتصال كوتاه تكفازي روي داده باشد، مولد هموپلر به طرف ثانويه يا شبكه R_2 سرايت نخواهد كرد. اين نوع ترانسفورماتورها نقش مهمي كه دارند جريان هموپلر را ايزوله مي كنند. همچنين هارمونيك ۳ رابه تله مي اندازند. چرا كه هارمونيك ۳ در سيستمهاي سه

فاز، سينوسي بوده و با هم همفاز هستند (شبيه هموپلر). دردياگرام تك خطي اين نوع ترانسها، طرف مثلث براي سيستم هموپلر مدار باز خواهد بود. راكتانس ازطرف اوليه برابر با $X_0 = X_{cc}$ است.

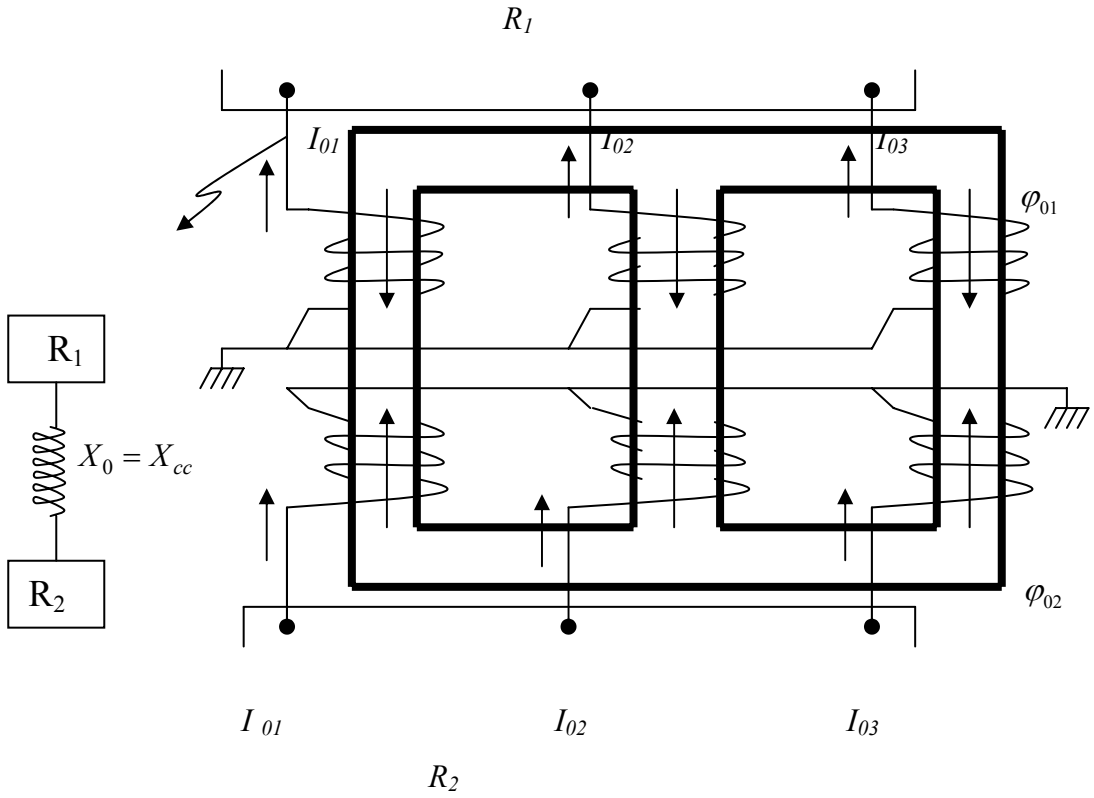


به عبارت ديگر جريانها در طرف اتصال ستاره با هم برابر بوده ($\bar{I}_{01\lambda} = \bar{I}_{02\lambda} = \bar{I}_{03\lambda} = \bar{I}_0 / 3$) و بصورت هم فاز، هم جهت و مساوی هم می باشند. در صورتی که نقطه صفر اتصال ستاره زمین شده باشد $\bar{I}_0 \neq 0$ و در صورتی که نقطه صف زمین نشده باشد $\bar{I}_0 = 0$. با عبور جريان از طرف اتصال ستاره جريانهای متناظر فازها از سيم پيچهای اتصال مثلث عبور كرده و بخاطر هم فاز، هم جهت و مساوی بودن ($\bar{I}_{01\Delta} = \bar{I}_{02\Delta} = \bar{I}_{03\Delta}$) فقط در داخل مثلث جريان داشته و در خارج آن وجود نخواهند داشت.

اتصال ستاره زمين شده / ستاره زمين شده:



در سيستم پريونيت خواهيم داشت: $\bar{I}_{1\lambda} = \bar{I}_{1\Delta}$



اتصال $\triangle/\triangle$ $Z_o=\infty$ ثانويه و $Z_o=\infty$ اوليه

اتصال Y/Y

اگر عاملي در ثانويه وجود داشته باشد كه φ_{01} راختني كند φ_{01} رو به اشباع مي رود و هسته گرم مي شود در اين صورت هيچ جريان $\bar{I}_0$ در شبكه R_2 نداريم و فقط جريان نشتي ترانسفورماتور موجود است. دراينصورت $\bar{I}_0$ مربوط به شبكه R_1 مقدار بزرگي نبوده و $X_0=\infty$ مي باشد. به عبارت ديگر مسير φ_{01} از طريق هوا بسته شده است. درحالت ٤ ستونه، رلوكتانس هرمسيربه صورت زير مي باشد (رلوكتانس هوايي)

مقاومت مغناطيسي از طريق مسير شار از طريق هوا: $\Re_f$ مقاومت مغناطيسي هر ستون $\Re_n$

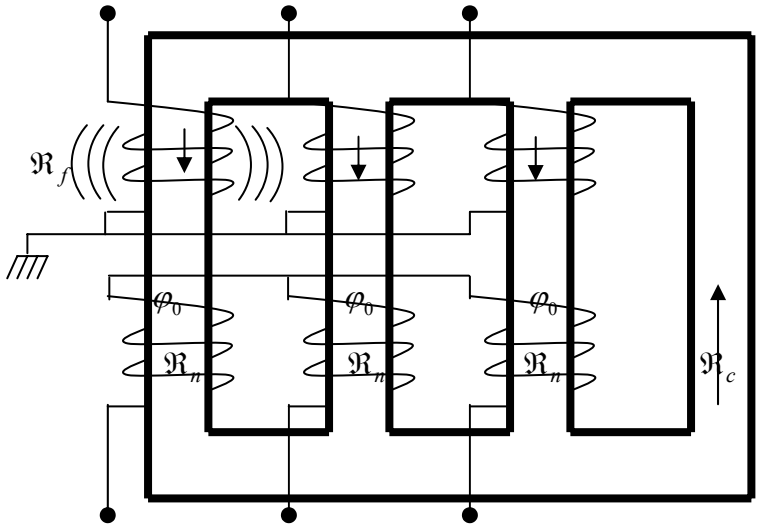
براى اتصال هسته سه ستونه داريم:

$$X_o = L_0\omega = \frac{K\omega}{\Re_n + \Re_f} \approx \frac{K\omega}{\Re_f}$$

$$\varphi_0 = \frac{KI_0}{\Re} \rightarrow \varphi_0 = L_0 I_0 \rightarrow \frac{\varphi_0}{I_0} = L_0 \rightarrow L_0\omega = \frac{K\omega}{\Re}$$

در اين حالت راكتانس نسبت به حالت قبل بيشتر است.

$X_0 \approx (10\text{-}15)\, X_{cc}$



برای اتصال هسته چهار ستونه داریم:

$$\varphi_0 = \frac{KI_0}{\Re_t}$$

$$\Re_t = \Re_n + 3\Re_{common}$$

$$\varphi_0 = \frac{KI_0}{\Re_n + 3\Re_c}$$

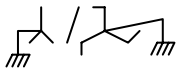
$\Re_n$ و $\Re_c$ راکتانس بستگي به پرمابليته آهن دارد.

$\Re_n + 3\Re_c$ مقدار کوچکی بوده و $\Re_n + \Re_f$ ناشی از $\Re_f$مقدار بزرگی می باشد.

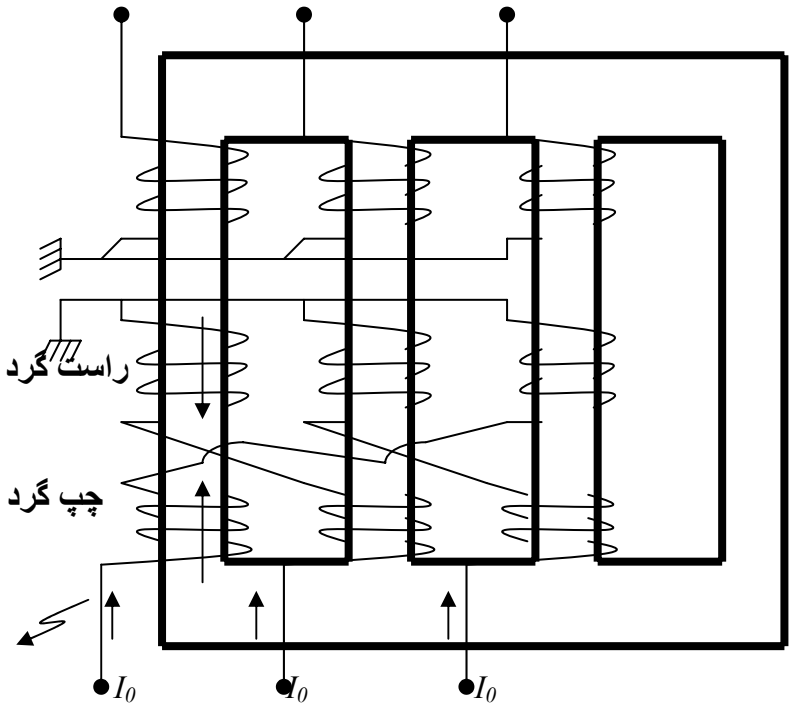
$$L_0\omega = \frac{\varphi_0}{I_0}\omega = \frac{K\omega}{R_n + 3R_c} \rightarrow L_0\omega = \infty$$

$$\frac{K\omega}{R_n + 3R_c} = X_0 \rangle\rangle X_0 = \frac{K\omega}{R_f + R_n}$$

در حالت ٤ ستونه I_{01} کوچکتري براي اشباع هسته لازم است. چون فلو خيلي آزاد مسير خود را مي بندد يك جريان چند دهم آمپري كافي است تاهسته را اشباع كند ولي در ٣ ستونه از طريق هوا مسير خود را مي بندد و جريان بيشتري را نسبت به حالت ٤ ستونه مي كشد .

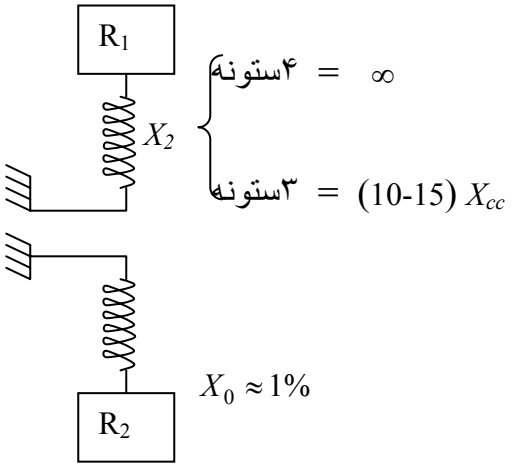
اتصال 

اگر اتصال كوتاه در طرف زيگزاگ باشد جريان همو پلررا هر قدر بتوانيم مي توانيم عبور دهيم چون فلو ها اثر همديگر را خنثي مي كنند وفلوي ضعيفي باقي خواهد ماند. $Xo=1\%$ در طرف ثانويه زيگزاگ خيلي كم بوده و مربوط به فلو هاي نشتي مي باشد. هيچ اثري در طرف اوليه از اين اتصال كوتاه نخواهيم داشت

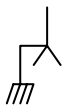
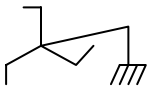
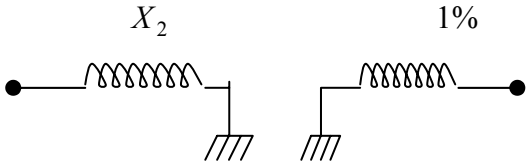
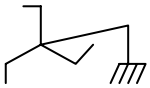
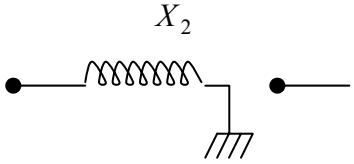
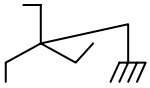
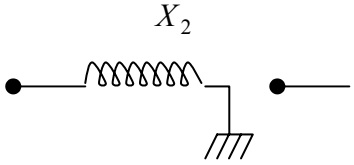


اگر اتصال کوتاه در طرف اول (ستاره) باشد سه جریان هموپلر و سه فلو در اولیه خواهیم داشت. اما این پیچك ها نمي توانند با این فلو ها به مقابله برخیزند. چون در هر نصف سیم پیچ که مقابله شده، در نصف سیم پیچ بعدي ودر فاز دیگر مخالف آن تولید خواهدشد، مثل این که هیچ فلویي تولید نشده است. پس از دید اولیه مشخصات

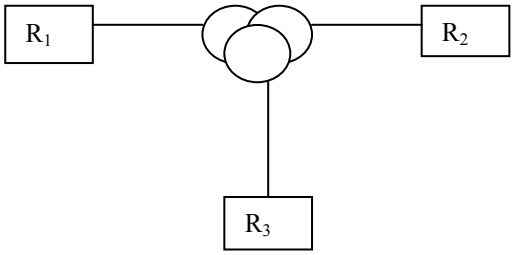
۸/۱ را داشته وبستگي به نوع ساختمان ترانس که۳ستونه یا ٤ستونه باشد دارد.

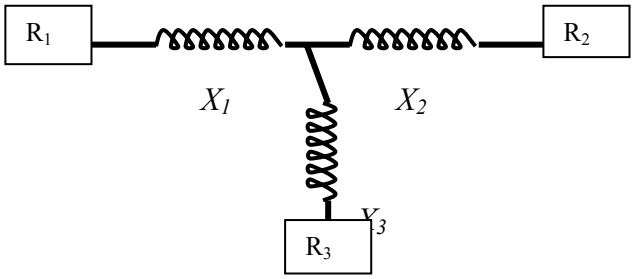


شمای معادل	کوپلاژ			
	اولیه		ثانویه	
	نقطه خنثی	نوع سیم پیچی	نقطه خنثی	نوع سیم پیچی
X_{cc}	متصل به زمین		متصل به زمین	
X_{cc}	ایزوله		متصل به زمین	
X_2 ۴ یا ۵ ستونه $X_2 = \infty$ ۳ ستونه $X_2 = (10-15)X_{cc}$	ایزوله		متصل به زمین	
X_2	ایزوله		متصل به زمین	

				۴ یا ۵ ستونه $X_2=\infty$ ۳ ستونه $X_2=(10-15)X_{cc}$
	متصل به زمین		متصل به زمین	
	متصل به زمین		ایزوله	
	متصل به زمین		ایزوله	

ترانسفورماتور سه پیچکه

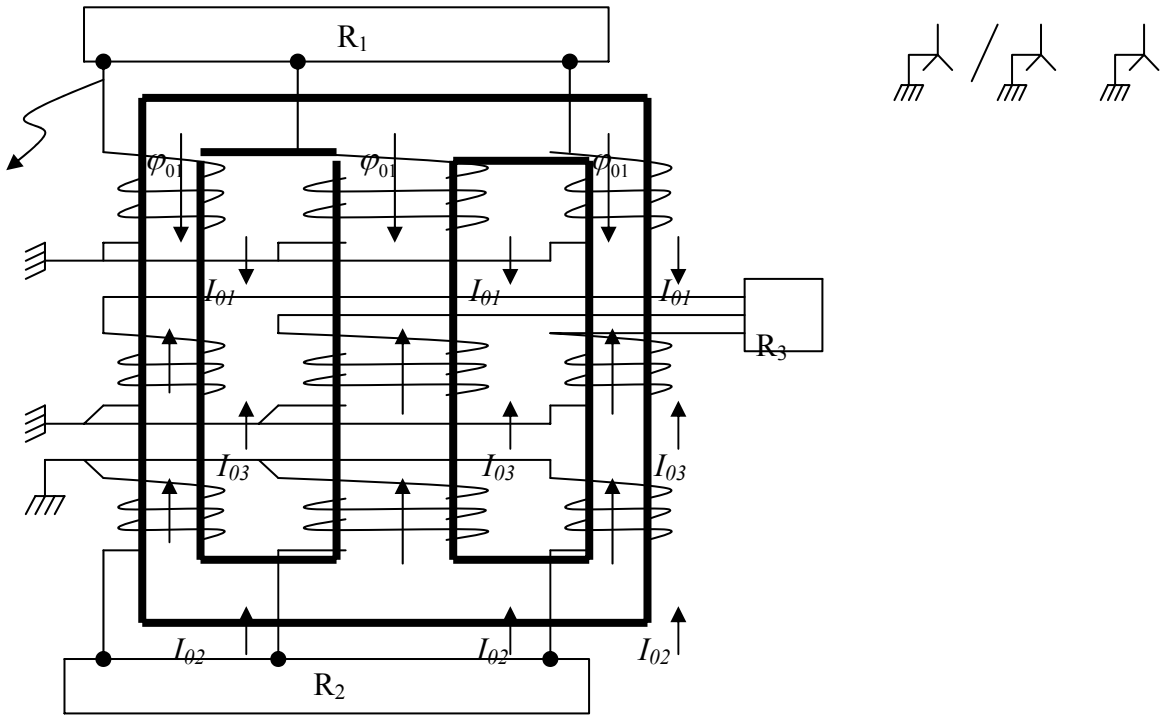


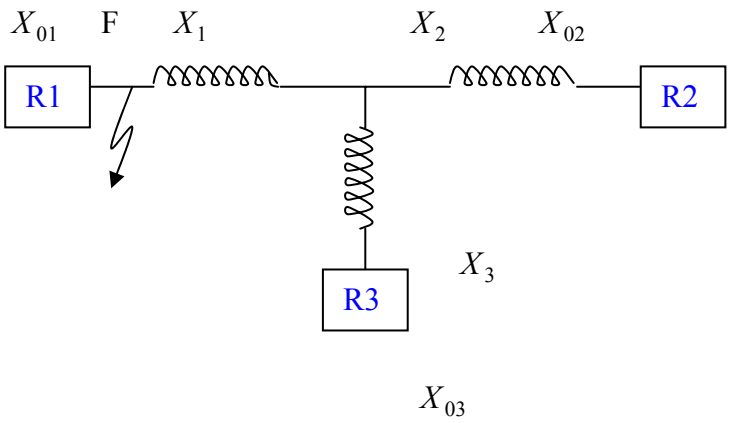


ترانسفورماتور سه پیچکه را بصورت سه راکتانس نشان مي دهیم که به صورت ستاره به هم وصل شده اند. این راکتانس ها را از طریق اندازه گیري و به کمك آزمایش اتصال کوتاه در ترانس به دست مي آیند. اگر ثالثیه مدار باز شده، ثانویه اتصال کوتاه واولیه به سیستم تغذیه وصل شود X_{12} به دست مي آید. به همین ترتیب X_{13} , X_{23} به دست خواهدآمد. طبق شکل داریم:

$$\begin{cases} X_1+X_2=X_{12} \\ X_1+X_3=X_{13} \\ X_2+X_3=X_{23} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} X_1=\frac{1}{2}\left(X_{12}+X_{13}-X_{23}\right) \\ X_2=\frac{1}{2}\left(X_{12}+X_{23}-X_{13}\right) \\ X_3=\frac{1}{2}\left(X_{31}+X_{32}-X_{12}\right) \end{cases}$$

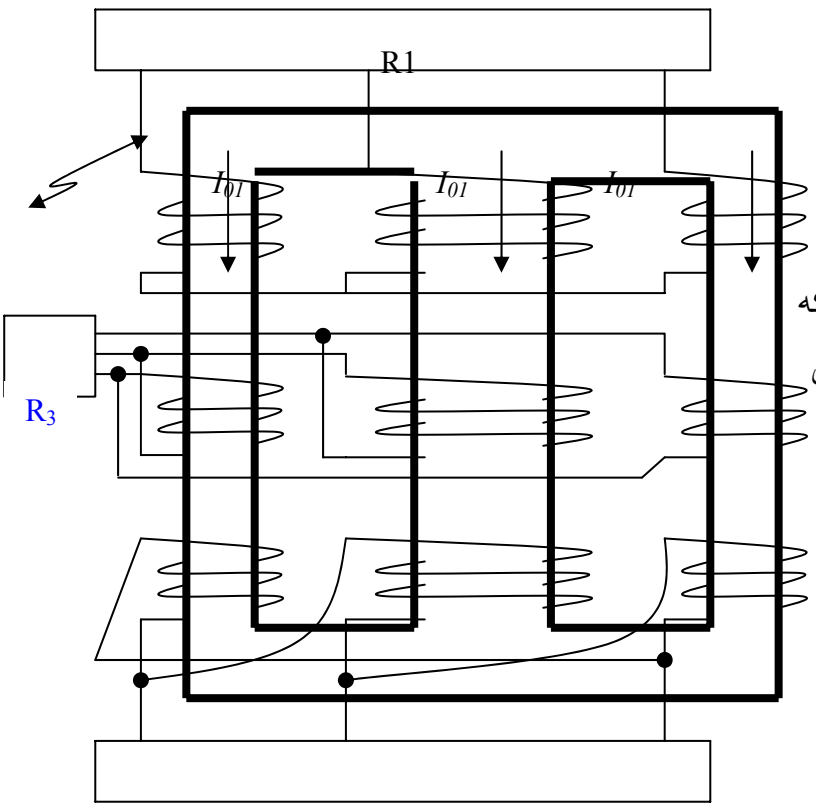
چون ترانسفورماتور يك سيستم استاتيك است پس امپدانس مستقيم ومعكوس آن يكي است ولي در اندازه گيري راكتانس هموپلر بايستي نوع اتصالات رابررسي كرده و مدار معادل هموپلر را رسم كنيم.





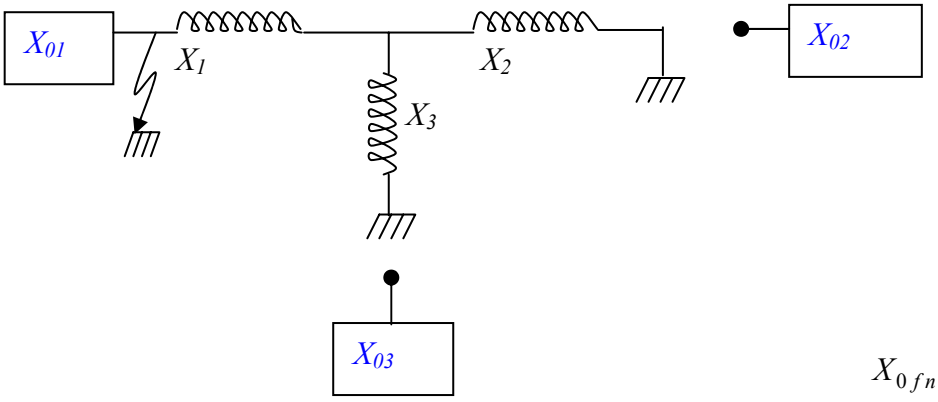
در اوليه ترانسفورماتور ودر يك فاز اتصال كوتاهي پيش مي آيد وجرياني كشيده شده كه داراي سه مولفه مي باشد. جريان همو پلر I_{01} را در نظرمي گيريم. بايستي جريان سيم پيچي I_{02} هاي ديگر با فلوي ناشي از I_{01} مقابله كنند وجريان هاي گذرنده از سيم پيچي هاي ثانويه وثالثيه فلويي ايجاد مي كنند كه با فلوي اوليه به مقابله برخيزد.

$$X_{0fn} = X_{01} \,||[X_1 + (X_2 + X_{02}) \,||\, (X_3 + X_{03})]$$

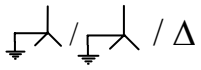


با ايجاد يك اتصال كوتاه و ايجاد جريان هاي I_{01} در اوليه، جرياني به شبكه هاي R_2,R_3 فرستاده نخواهد شد. مثل اين كه شبكه هاي R_2,R_3 مدار باز هستند.

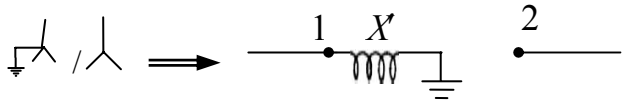
اگر اتص ال كوتاه در ثانويه ودر طرف مثلث باشد بينهايت موازي با X_{02} خواهد بود



$$X_{0fn} = X_{01} \,||\, [X_1 + (X_2 \,||\, X_3)]$$



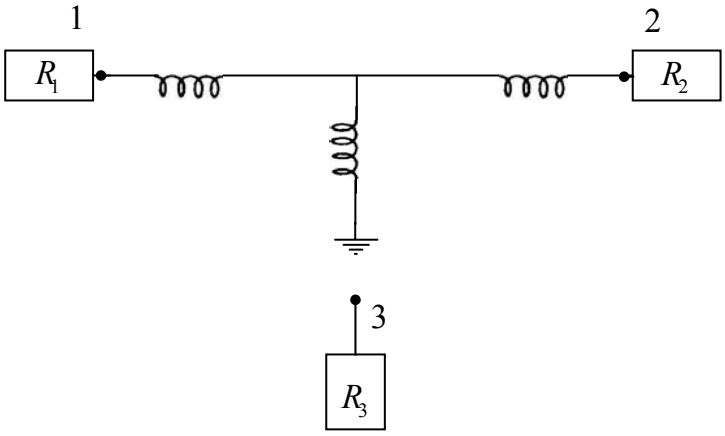
راكتانس دراينجا علاوه بر نوع اتصالات به مدار مغناطيسي ترانسفورماتور نيز بستگي دارد در ترانسفورماتور دو پيچكه داريم:

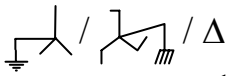


$X'=\infty$ فلوي آزاد ۴ يا ۵ پيچكه

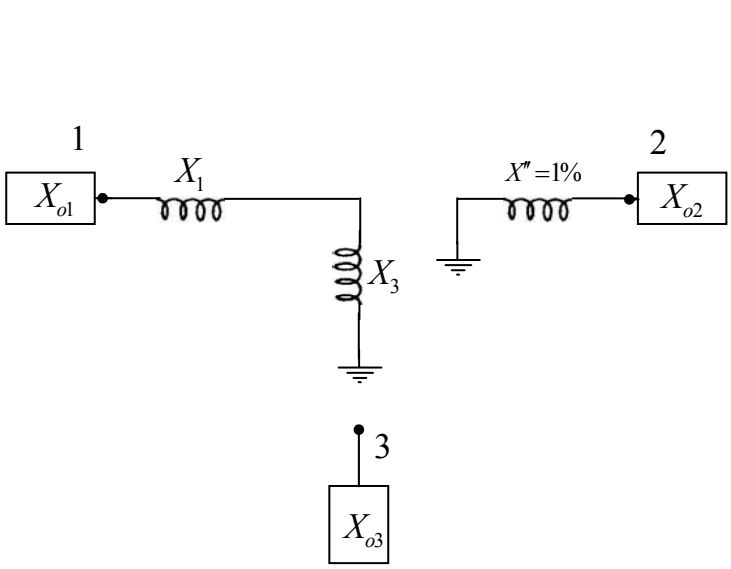
$X' = (10\text{-}15)\,Xcc$ فلوي فشرده ۳ پيچك

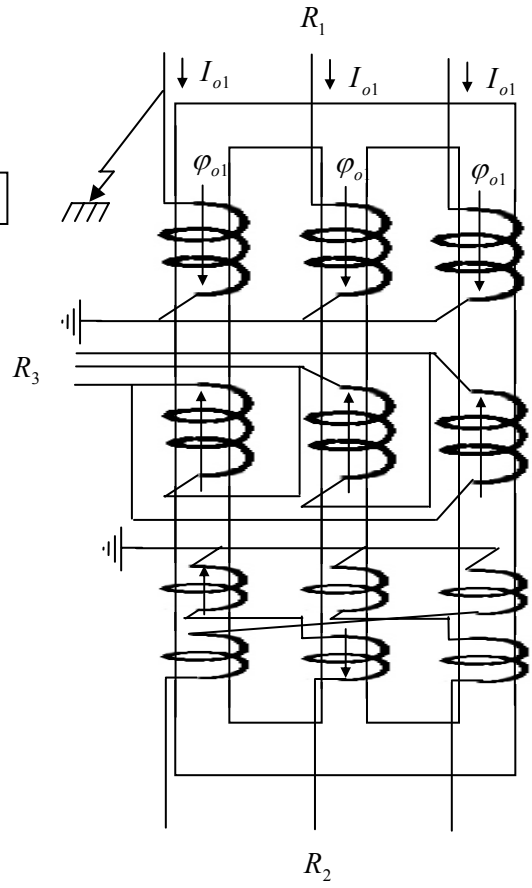
بين اوليه و ثانو يه X_1 و X'



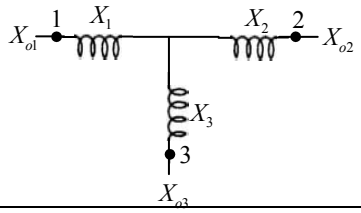


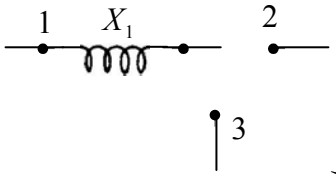
اگر اتصال كوتاه در اوليه رخ دهد سه جريان هموپولر I_{O1} را خواهيم داشت. در ثالثيه سه جريان گردشي در داخل Δ ايجاد شده و سبب گرم شدن Δ مي شود ولي در R_3 جرياني نداريم. اگر در يک پيچک زيگزاگ فلويي به بالا ايجاد كند، در پيچک دومي كه درخلاف جهت پيچک اولي پيچيده شده و با آن سري است فلويي در جهت پايين ايجاد خواهد كرد و نخواهد توانست به مقابله باI_{O1}برخيزد لذا تنها فلوهاي مقابله كننده باI_{O1} همان فلوهاي ايجاد شده در داخل Δ در ثالثيه است.

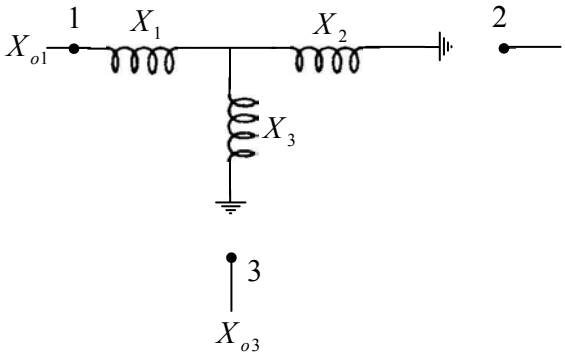


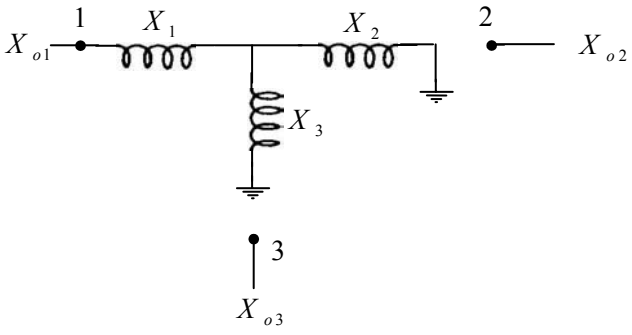


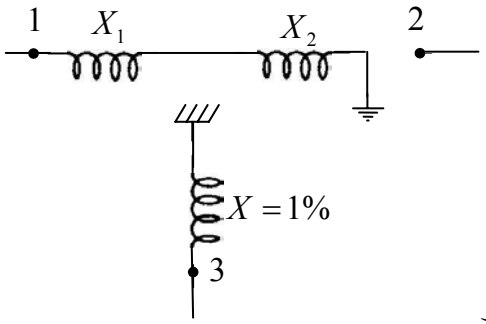
اگر اتصال کوتاه تکفازي در طرف Y داشته باشيم جريانهايي در پيچکهاي اوليه و فلوهايي در همان جهت ايجاد مي شود. ولي در نصف پيچک دوم فلوي مخالف با آن توليد شده و حذف مي شود واگر اتصال کوتاه باشد راکتانس کوچکي خواهيم داشت که هرجريان هموپولر در ثانويه Y مي توان از آن کشيد. به خاطر وجود فلوهاي نشتي و فراري فلويي در حدود ۱% در نظر ميگيرند. اگر اتصال کوتاه در طرف Δ باشد $X_{0fn} = \infty \,||\, X_{03}$ است.

۱	اولیه	ثانویه	ثالثیه
نوع کوپلاژ سیم پیچي ها			
مقدار راکتانس هموپولر از دید	$X_{o1} \parallel [X_1 + (X_2 + X_{o2}) \parallel (X_3 + X_{o3})] = A$	A	A
شماي معادل تکفاز			

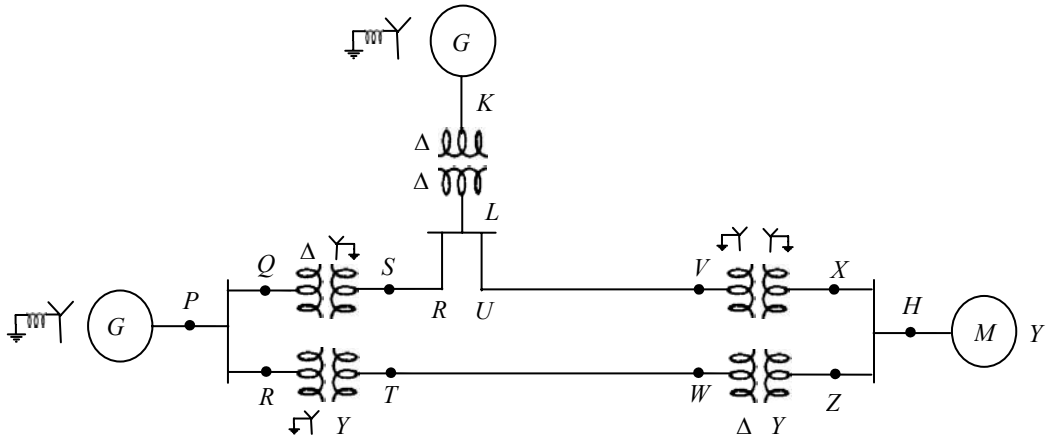
۲	اولیه	ثانویه	ثالثیه
نوع کوپلاژ سیم پیچي ها			
مقدار راکتانس هموپولر از دید	$X' = \infty$ با فلوی آزاد $X' = 10X_{cc}$ بافلوی فشرده	∞	∞
شماي معادل تکفاز			

	اوليه	ثانويه	ثالثيه
نوع كوپلاژ سيم پيچي ها		Δ	Δ
مقدار راكتانس هموپولر از ديد	$X_{o1}\|\|(X_1+X_2\|\|X_3)$	∞	∞
شماي معادل تكفاز			

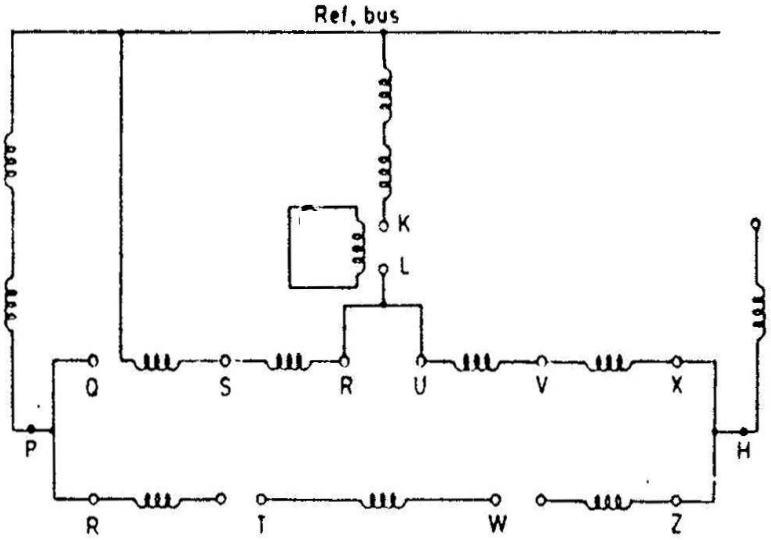
	اوليه	ثانويه	ثالثيه
نوع كوپلاژ سيم پيچي ها		Δ	
مقدار راكتانس هموپولر از ديد	$X_{o1}\|\|(X_1+(X_3+X_{o3})\|\|X_2$	∞	∞
شماي معادل تكفاز			

	اوليه	ثانويه	ثالثيه
نوع كوپلاژ سيم پيچي ها		Δ	
مقدار راكتانس هموپولر از ديد	$X_{o1} \| (X_1 + X_2)$	∞	%١
شماي معادل تكفاز			

مثال- در ديا‌گرام تک خطي سيستم قدرت زير شبكه توالي صفر سيستم را رسم نماييد



حل: با توجه به اتصال ترانسفورماتورا شبكه توالي صفر سيستم مطابق شكل زير رسم مي شود:

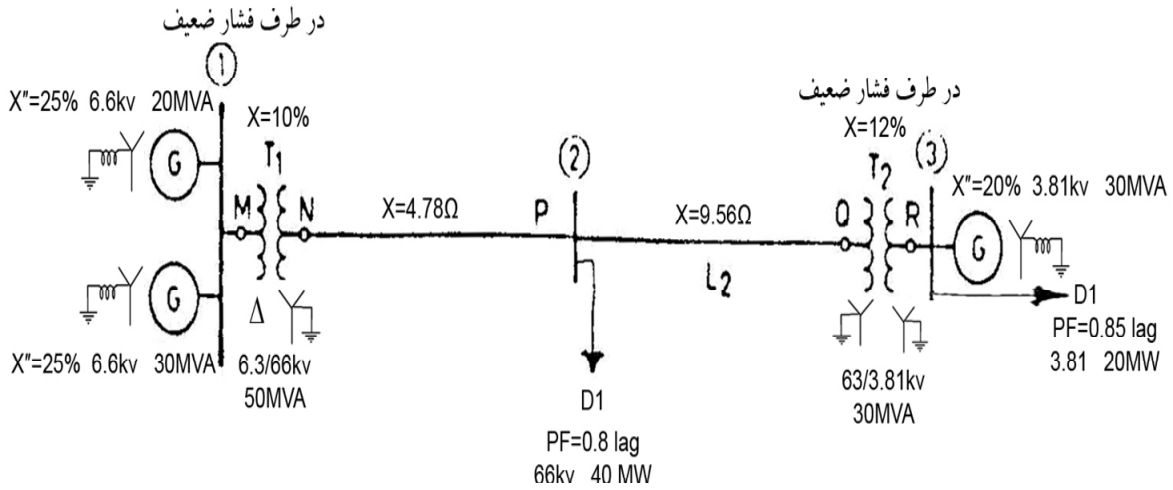


شبكه توالي صفر

مربوط به سيستم قدرت بالا

مثال: سيستم قدرت سه شينه درزير نشان داده شده است. شبكه هاي توالي مثبت، منفي و صفر اين سيستم را رسم كنيد و مقادير راكتانس ها را بر حسب *pu* روي آن مشخص نماييد. رسم اين شبكه ها براي مطالعه اتصال كوتاه صورت مي گيرد، لذا از جريان بارها صرفنظر كنيد. راكتانس توالي منفي ژنراتورها با توالي مثبت آنها برابر است. راكتانس توالي صفر هر يک از ژنراتورها ۵% و راكتانس زمين آنها ۲% مي باشند. امپدانس توالي صفر خطوط انتقال را ۲/۵ برابر امپدانس توالي مثبت آنها در نظر بگيريد.

<ترسيم دوباره شكل ها - تغيير نام بار سمت راست به D2 – تاثير بارها در دياگرام توالی ها>



دياگرام تک خطي يک سيستم قدرت

حل:

ولتاژهاي مبناي شين ها:

شين ۱ : 6.6kv

شين ۲ : $6.6\times\frac{66}{6.3}=69.16Kv$

شين ۳ : $69.14\times\frac{3.81}{63}=4.18Kv$

رابطه تبديل امپدانس از يک سيستم قديمي به يک سيستم جديد به صورت زير است.

$$\overline{Z}_{pu,new}=\overline{Z}_{pu,old}(\frac{S_{base,new}}{S_{base,old}})\times(\frac{V_{base,new}}{V_{base,old}})^2$$

$$G_1: X''=j0.25\times\frac{50}{20}=j0.625pu$$

$$G_2: X''=j0.25\times\frac{50}{30}=j0.4167pu$$

$$G_3: X''=j0.2\times\frac{50}{30}\times(\frac{3.81}{4.18})^2=j0.277pu$$

$$T_1 : X = j0.1 \times (\frac{6.3}{6.6})^2 = j0.0911 pu$$

$$T_2 : X = j0.12 \times \frac{50}{30} \times (\frac{3.81}{4.18})^2 = j0.166 pu$$

$$\overline{Z}_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{69.14K^2}{50m} = 95.6\Omega$$

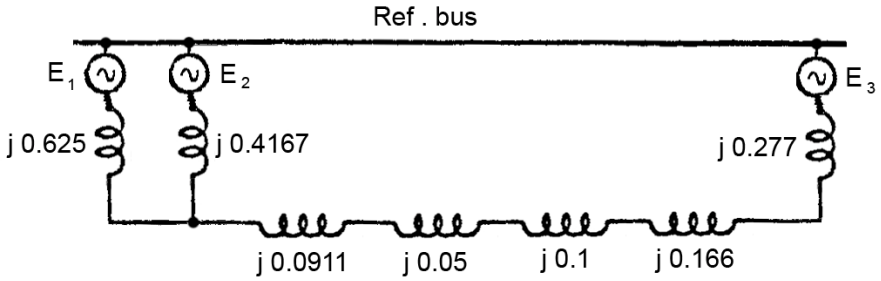
$$L_1 : X = j\frac{4.78}{95.6} = j0.05 pu$$

$$L_2 : X = j\frac{9.56}{95.6} = j0.1 pu$$

$$D_1 : \begin{cases} S_1 = \dfrac{P_1}{\cos\varphi_1} = \dfrac{40}{0.8} = 50MVA \\ |Z_1| = \dfrac{V_1^2}{S_1} = \dfrac{66K^2}{50} = 87.12\Omega \\ \overline{Z}_{base} = \dfrac{V_b^2}{S_b} = \dfrac{69.14K^2}{50m} = 95.6\Omega \\ |Z_1| = \dfrac{87.12}{95.6} = 0.911 pu \\ \overline{Z}_1 = |Z_1| \angle y_1 = 0.911 \angle \cos^{-1} 0.8 = 0.729 + j0.547 pu \end{cases}$$

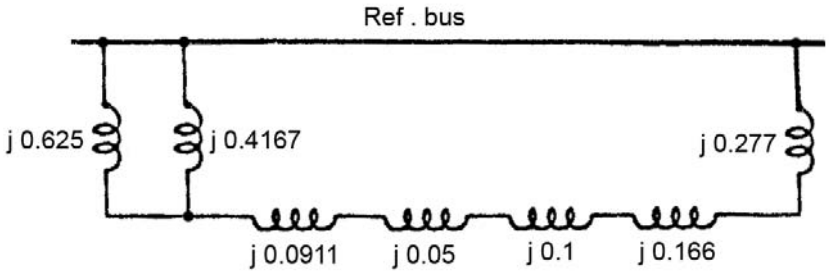
$$D_2 : \begin{cases} S_2 = \dfrac{P_2}{\cos y_2} = \dfrac{20m}{0.85} = 23.53MVA \\ |Z_2| = \dfrac{V_2^2}{S_2} = \dfrac{3.81K^2}{23.53} = 0.617\Omega \\ \overline{Z}_{base} = \dfrac{V_b^2}{S_b} = \dfrac{4.18K^2}{50m} = 0.349\Omega \\ |Z_2| = \dfrac{0.617}{0.349} = 1.766 pu \\ \overline{Z}_2 = 1.799 \angle \cos^{-1} 0.85 = 1.5 + j0.93 pu \end{cases}$$

با فرض اينكه محاسبات اتصال كوتاه مورد نظر است از جريانهاي بار (تأثير بارها) صرفنظر مي شود.
قدرت مبنا ۵۰ مگاولت آمپر است. شبكه توالي مثبت، همان دياگرام امپدانس است كه در شكل زير رسم است.



شبكه توالي مثبت سيستم قدرت

امپدانس توالي منفي ترانسفورماتورها و خطوط انتقال با امپدانس توالي مثبت آنها برابر هستند. همچنين امپدانس توالي منفي ژنراتورها با امپدانس توالي مثبت آنها يكسان است. با توجه به اينكه نيروهاي محركه الكتريكي ژنراتورها در شبكه توالي منفي ظاهر نمي شوند، شبكه توالي منفي سيستم مذكور را مطابق شكل زير رسم مي كنيم.



شبكه توالي منفي سيستم قدرت

براي رسم شبكه توالي صفر، ابتدا راكتانس هاي توالي صفر و راكتانس هاي زمين ژنراتورها را در قدرت مبناي ۵۰ مگاولت آمپر بدست مي آوريم.

راكتانس توالي صفر ژنراتورها ۵%

راكتانس زمين ژنراتورها ۲%

$$G_1 : X_{g0} = 0.05 \times \frac{50}{20} = 0.125 pu$$

$$\therefore X_n = 0.02 \times \frac{50}{20} = 0.05 pu$$

$$\therefore 3X_n = 0.15 pu$$

G_2 $: X_{go} = 0.05 \times \frac{50}{30} = 0.0838 pu$

$: X_n = 0.02 \times \frac{50}{30} = 0.0333 pu$

$3X_n = 0.1 pu$

G_3

$: X_{go} = 0.05 \times (\frac{50}{30}) \times (\frac{3.81}{4.18})^2 = 0.0692 pu$

$: X_n = 0.02 \times \frac{50}{30} \times (\frac{3.81}{4.18})^2 = 0.0277 pu$

$: 3X_n = 0.0831 pu$

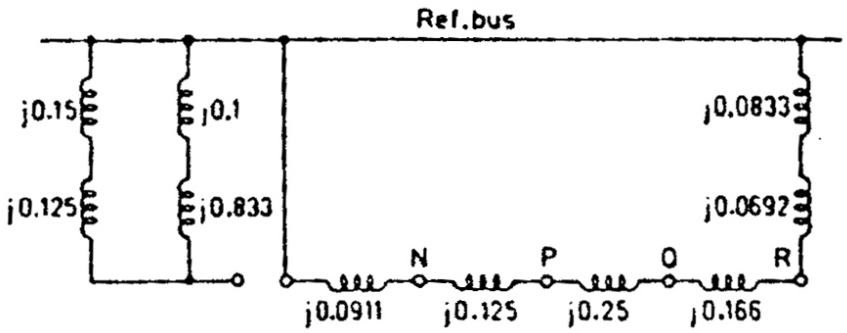
همچنين راكتانس توالي صفر خطوط انتقال را محاسبه مي كنيم:

امپدانس توالي صفر خطوط ۲/۵ برابر توالي امپدانس مثبت است.

$L_1 = X_o = 2.5 \times 0.05 = 0.125 pu$

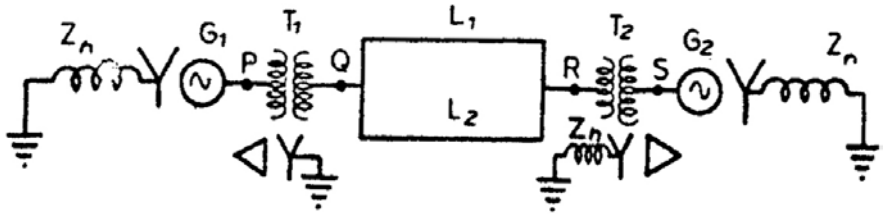
$L_2 = X_o = 2.5 \times 0.1 = 0.25 pu$

با توجه به اين مقادير و نحوه اتصال ترانسفورماتورها، شبكه توالي صفر اين سيستم در شكل زير نشان داده شده است:



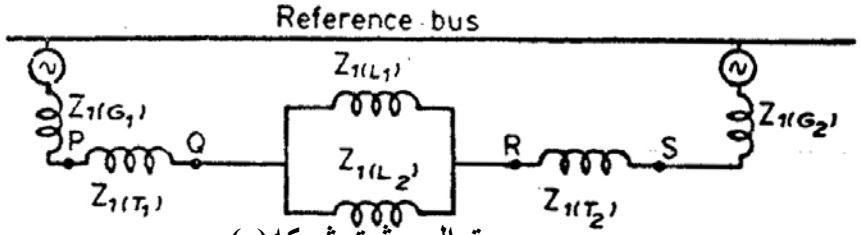
شبكه توالي سيستم قدرت

مثال: شكل زير يک سيستم ساده قدرت متشكل ازدو ژنراتور G_1 و G_2 كه از طريق ترانسفورماتورهاي T_1 و T_2 و دو خط موازي L_1 و L_2 به هم متصل است را نشان ميدهد .

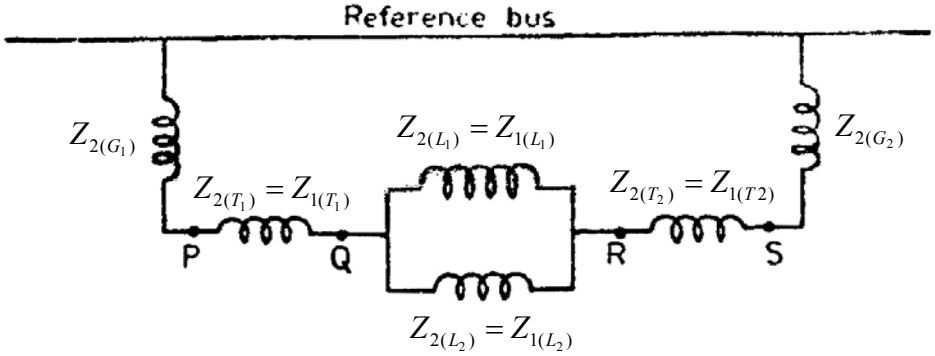


ديگرام مداري يک سيستم قدرت

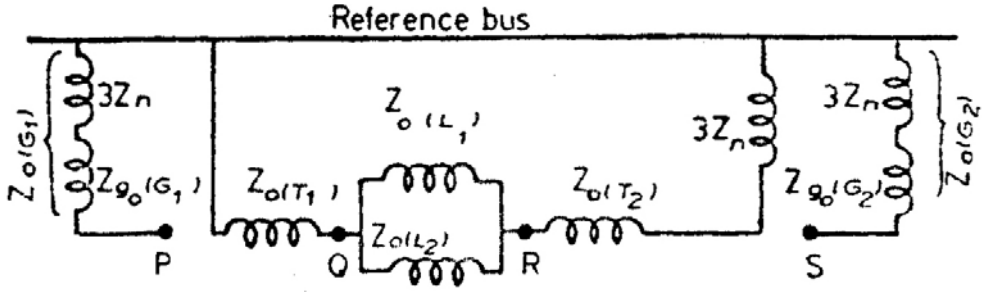
طرف فشار قوي T_2 از طريق يک راکتور محدود کننده با امپدانس Z_n به زمين متصل شده است.براي شبکه هاي توالي مثبت و منفي نقاط خنثاي اين ژنراتورها همان شين مرجع مي باشد.



توالی مثبت شبکه(a)



توالی منفی شبکه (b)

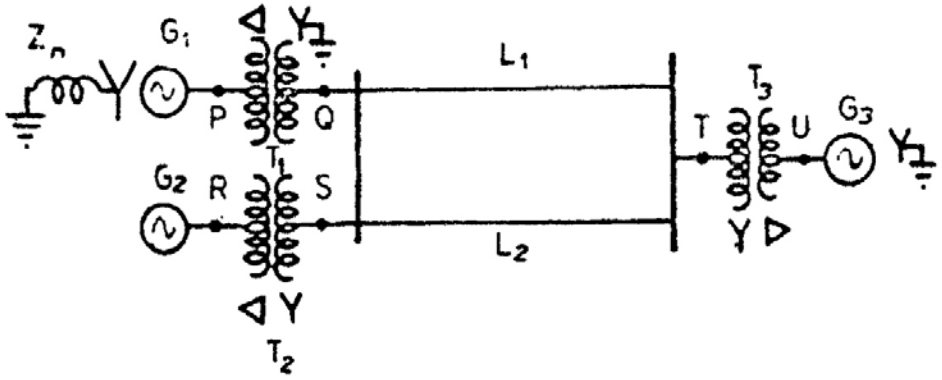


توالی صفر شبکه (c)

بنابراين شبكه هاي توالي صفر، مثبت و منفي در شكلهاي بالا نشان داده شده است. امپدانس توالي مؤلفه هاي سيستم قدرت در شبكه هاي متناظر با آنها نشان داده شده است. از آنجايي كه مؤلفه ساكن و پايا (ايستا) موضوع بحث مي باشد امپدانس هاي توالي مثبت و منفي شان با هم برابرند.

براي مثال همانطور كه پيشاپيش توضيح داده شده است امپدانس هاي توالي مثبت و منفي يک ترانسفورماتور برابر امپدانس نشتي آن مي باشد. در مورد شبكه توالي صفر بايد گفت كه هيچ جريان توالي صفري از ژنراتورهاي G_1 و G_2 جاري نمي شود. اگر يک خطاي نامتقارن بين دو نقطه Q و R شبكه بوجود آيد توجيه اين مسئله اين است كه سيم پيچي هاي اوليه هر دو ترانسفورماتور از نوع Δ مي باشد. بنابراين جريان توالي صفر فقط مي تواننددرسيم پيچ Δ جريان پيدا كند و درجريان خط ظاهر نخواهد شد.

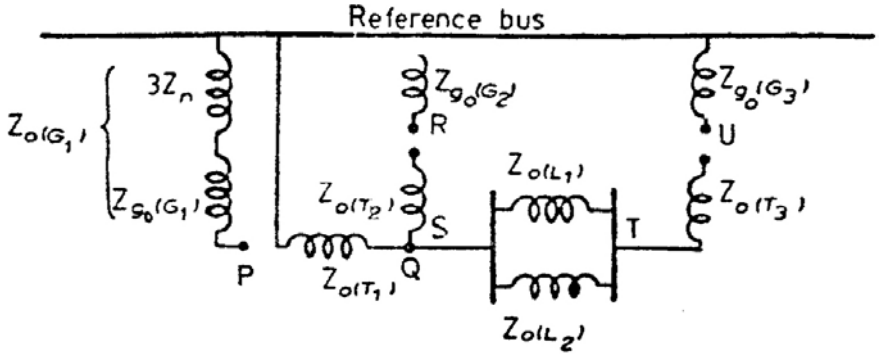
مثال:براي بررسي بيشتر نحوه استخراج توالي صفر مثال ديگري در زير آمده است.



دياگرام ساده يک سيستم قدرت

بايد ذكر شود كه امپدانس نشان داده شده در دياگرام توالي متناظر با چه (KVA) و (KV) مرجعي است.

شبكه توالي صفر سيستم در شكل زير تشريح گرديده است.



شبكه توالی صفر سيستم قدرت ساده شده

فصل دوم

مولفه هاي متقارن

Symmetrical Components

۲-۱ تجزیه سیستم n فازه نامتعادل با مولفه های متقارن

براي شناختن یک بردار در فضا بهتر است آنرا بر روي سه محور تصویر کرد و مولفه هاي آنرا بدست آورد. شبکه ممکن است در یک نقطه نامتعادل باشد یعني در یک نقطه اتصال کوتاهي رخ داده و شبکه نامتعادل گردد. در این حال جریان عبوري از فاز معیوب، از دو طرف باید حساب شده و قدرت کلیدهاي قطع نیزبایستي محاسبه شوند تا در کمترین مدت زمان این قسمت از شبکه را از خط خارج کنند درغیر اینصورت ژنراتور سنکرون بحالت غیر سنکرون رسیده و بطور تصادفي به حالت قطع و خاموشي خواهد رفت. براي حساب کردن قدرت قطع کلیدهاي قدرت باید محاسبات سیستم سه فاز را در حالت نامتعادلي انجام دهیم. راه عامیانه و سنتي، حل شبکه از طریق محاسبات گره ومش (*kcl*و*kvl*) است.اما به علت وسعت شبکه و همینطور قرار گرفتن در وضعیت نا متعادلي محاسبات مشکل خواهد بود. یک سیستم n فاز نامتعادل، قابل تجزیه به n سیستم n فازه متعادل است. براي این منظور از روش مولفه هاي متقارن که در سال ۱۹۱۸ میلادي توسط فورتسکیو (Fortesque) معرفي شد استفاده خواهد شد.

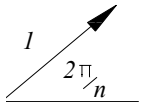
در این روش، یک سیستم n فازه نا متعادل به n سیستم n فازه متعادل و بر مبناي بردار اپراتور ترتیب که در زیر بیان شده، تجزیه خواهد شد.

$\overline{a}_n$ = Sequence Operator for n Phase System

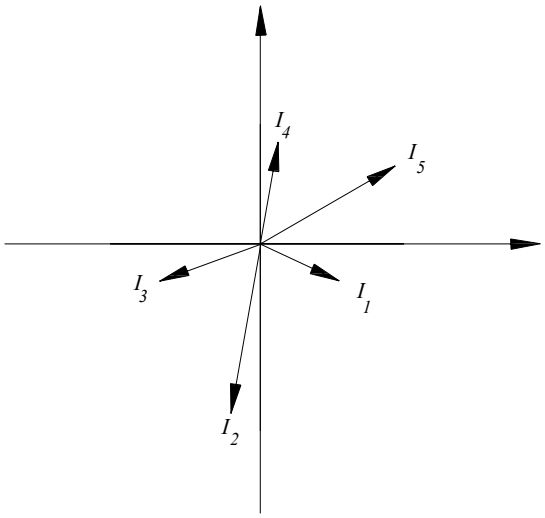
$$\overline{a}_n = e^{j\frac{2\pi}{n}}$$

$$\overline{a}_n = 1\angle 2\pi/n$$

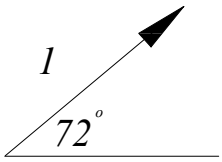
$$\overline{a}_n^n = 1\angle 0 \quad \overline{a}_n^0 = 1\angle 0$$



بعنوان مثال فرض ميكنيم كه در يک سيستم ۵ فازه نامتعادل جريانها به صورت زير است:



اين سيستم ۵ فازه نامتعادل را مي شود به ۵ سيستم ۵ فازه متعادل تبديل كرد. بردار $\bar{a}_5 = e^{j2\pi/5}$ در زير نشان داده شده است.



V- سيستم ۵ فازه ترتيب صفر يا ترتيب ۵ (با فرض بردار فاز ۱ $\bar{I}_{V,1}$)

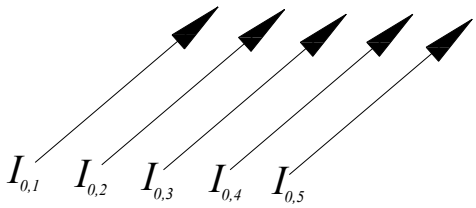
فاز ۲= بردار يک يا فاز ۱ را ۵ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5 = e^{j2\pi/7=j72°}$ ضرب مي كنيم

فاز۳= فاز ۲ را ۵ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5$ ضرب مي كنيم.

فاز۴= فاز ۳ را ۵ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5$ ضرب مي كنيم.

فاز۵= فاز ۴ را ۵ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5$ ضرب مي كنيم.

$$\bar{I}_{0,i} = \bar{a}_5^0 \bar{I}_{0,i-1} = \bar{I}_{0,i-1}$$
$$\bar{I}_{V,i} = \bar{a}_5^5 \bar{I}_{V,i-1} = \bar{I}_{V,i-1} \qquad i = 2,3,...,5$$
$$\bar{a}_5^0 = \bar{a}_5^5 = 1\angle 0$$



IV- سیستم ۵ فازه ترتیب ۴ (با فرض فاز ۱ $\bar{I}_{\mathrm{IV},1}$)

فاز ۲= فاز ۱ را ۴ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5 = e^{j2\pi/7=j72^\circ}$ ضرب مي كنيم

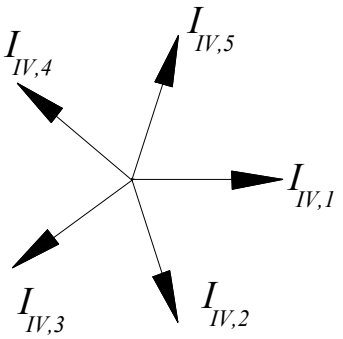
فاز ۳= فاز ۲ را ۴ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5$ ضرب مي كنيم.

فاز ۴= فاز ۳ را ۴ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5$ ضرب مي كنيم.

فاز ۵= فاز ۴ را ۴ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5$ ضرب مي كنيم.

$$\bar{I}_{\mathrm{IV},i} = \bar{a}_5^4 \bar{I}_{\mathrm{IV},i-1} = \bar{a}_5^{-1} \bar{I}_{\mathrm{IV},i-1} \qquad i = 2,3,...,5$$

$$\bar{a}_5^4 = \bar{a}_5^{-1}.\bar{a}_5^5 = \bar{a}_5^{-1}.(1\angle 0) = \bar{a}_5^{-1}$$



III- سیستم ۵ فازه ترتیب ۳ (با فرض فاز ۱ $\bar{I}_{\mathrm{III},1}$)

فاز ۲= فاز ۱ را ۳ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5 = e^{j2\pi/7=j72^\circ}$ ضرب مي كنيم

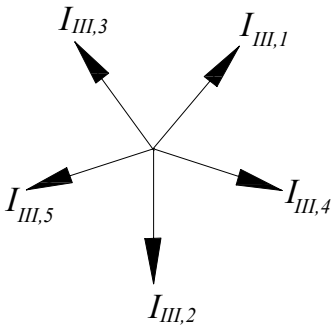
فاز ۳= فاز ۲ را ۳ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5$ ضرب مي كنيم.

فاز ۴= فاز ۳ را ۳ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5$ ضرب مي كنيم.

فاز ۵= فاز ۴ را ۳ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5$ ضرب مي كنيم.

$\bar{I}_{\mathrm{III},i} = \bar{a}_5^3 \bar{I}_{\mathrm{III},i-1} = \bar{a}_5^{-2} \bar{I}_{\mathrm{III},i-1} \qquad i = 2,3,...,5$

$\bar{a}_5^3 = \bar{a}_5^{-2}.\bar{a}_5^5 = \bar{a}_5^{-2}.(1\angle 0) = \bar{a}_5^{-2}$



II - سيستم ۵ فازه ترتيب ۲ (با فرض فاز ۱ $\bar{I}_{\mathrm{II},1}$)

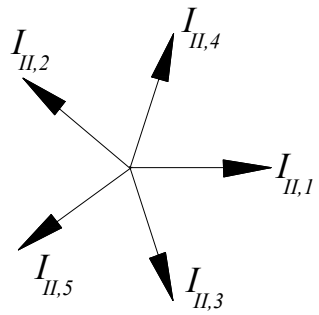
فاز ۲= فاز ۱ را ۲ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5 = e^{j2\pi/7 = j72^\circ}$ ضرب مي كنيم

فاز ۳= فاز ۲ را ۲ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5$ ضرب مي كنيم.

فاز ۴= فاز ۳ را ۲ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5$ ضرب مي كنيم.

فاز ۵= فاز ۴ را ۲ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5$ ضرب مي كنيم.

$\bar{I}_{\mathrm{II},i} = \bar{a}_5^2 \bar{I}_{\mathrm{II},i-1} = \bar{a}_5^{-3} \bar{I}_{\mathrm{II},i-1} \qquad i = 2,3,...,5$



I - سيستم ۵ فازه ترتيب ۱ (با فرض فاز ۱ $\bar{I}_{I,1}$)

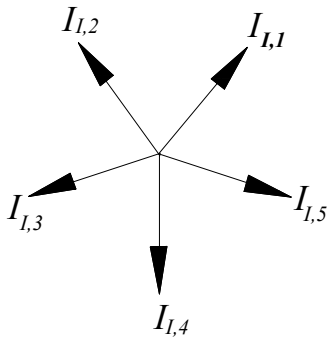
فاز ۲= فاز ۱ را ۱ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5 = e^{j2\pi/7 = j72^\circ}$ ضرب مي كنيم

فاز ۳= فاز ۲ را ۱ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5$ ضرب مي كنيم.

فاز ۴= فاز ۳ را ۱ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5$ ضرب مي كنيم.

فاز ۵= فاز ۴ را ۱ بار در جهت مثلثاتي به $\bar{a}_5$ ضرب مي كنيم.

$$\bar{I}_{\mathrm{I},i} = \bar{a}_5^1 \bar{I}_{\mathrm{I},i-1} = \bar{a}_5 \bar{I}_{\mathrm{I},i-1} \qquad i = 2,3,...,5$$



مجموع توالي فازهاي ۱، بايد بردار فاز ۱ را نتيجه دهد. به همين صورت مجموع توالی هر فاز بردار همان فاز را نتيجه می دهد.

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{\mathrm{V},1} + \bar{I}_{\mathrm{IV},1} + \bar{I}_{\mathrm{III},1} + \bar{I}_{\mathrm{II},1} + \bar{I}_{\mathrm{I},1}$$
$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{\mathrm{V},2} + \bar{I}_{\mathrm{IV},2} + \bar{I}_{\mathrm{III},2} + \bar{I}_{\mathrm{II},2} + \bar{I}_{\mathrm{I},2}$$
$$\bar{I}_3 = \bar{I}_{\mathrm{V},3} + \bar{I}_{\mathrm{IV},3} + \bar{I}_{\mathrm{III},3} + \bar{I}_{\mathrm{II},3} + \bar{I}_{\mathrm{I},3}$$
$$\bar{I}_4 = \bar{I}_{\mathrm{V},4} + \bar{I}_{\mathrm{IV},4} + \bar{I}_{\mathrm{III},4} + \bar{I}_{\mathrm{II},4} + \bar{I}_{\mathrm{I},4}$$
$$\bar{I}_5 = \bar{I}_{\mathrm{V},5} + \bar{I}_{\mathrm{IV},5} + \bar{I}_{\mathrm{III},5} + \bar{I}_{\mathrm{II},5} + \bar{I}_{\mathrm{I},5}$$

بعبارت ديگر مجموع فازهاي يک بردار مثلا ۴ از ۵ سيستم بدست آمده در سيستم متعادل بايد بردار $\bar{I}_4$ در سيستم نامتعادل را بدهد.

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{0/\mathrm{V},1} + \bar{I}_{\mathrm{I},1} + \bar{I}_{\mathrm{II},1} + + \bar{I}_{\mathrm{III},1} + \bar{I}_{\mathrm{IV},1}$$
$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{0/\mathrm{V},1} + \bar{a}_5^1 \bar{I}_{\mathrm{I},1} + \bar{a}_5^2 \bar{I}_{\mathrm{II},1} + \bar{a}_5^3 \bar{I}_{\mathrm{III},1} + \bar{a}_5^4 \bar{I}_{\mathrm{IV},1}$$
$$\bar{I}_3 = \bar{I}_{0/\mathrm{V},1} + \bar{a}_5^2 \bar{I}_{\mathrm{I},1} + \bar{a}_5^4 \bar{I}_{\mathrm{II},1} + \bar{a}_5^1 \bar{I}_{\mathrm{III},1} + \bar{a}_5^3 \bar{I}_{\mathrm{IV},1}$$
$$\bar{I}_4 = \bar{I}_{0/\mathrm{V},1} + \bar{a}_5^3 \bar{I}_{\mathrm{I},1} + \bar{a}_5^1 \bar{I}_{\mathrm{II},1} + \bar{a}_5^4 \bar{I}_{\mathrm{III},1} + \bar{a}_5^2 \bar{I}_{\mathrm{IV},1}$$
$$\bar{I}_5 = \bar{I}_{0/\mathrm{V},1} + \bar{a}_5^4 \bar{I}_{\mathrm{I},1} + \bar{a}_5^3 \bar{I}_{\mathrm{II},1} + \bar{a}_5^2 \bar{I}_{\mathrm{III},1} + \bar{a}_5^1 \bar{I}_{\mathrm{IV},1}$$

دراينصورت مي توان بردار جريانهاي واقعي سيستم نا متعادل را بر حسب بردار جريان مولفه متقارن فاز ۱ بصورت زير نوشت:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \bar{I}_4 \\ \bar{I}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}_5^1 & \bar{a}_5^2 & \bar{a}_5^3 & \bar{a}_5^4 \\ 1 & \bar{a}_5^2 & \bar{a}_5^4 & \bar{a}_5^1 & \bar{a}_5^3 \\ 1 & \bar{a}_5^3 & \bar{a}_5^1 & \bar{a}_5^4 & \bar{a}_5^2 \\ 1 & \bar{a}_5^4 & \bar{a}_5^3 & \bar{a}_5^2 & \bar{a}_5^1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \bar{I}_{0/\mathrm{V},1} \\ \bar{I}_{\mathrm{I},1} \\ \bar{I}_{\mathrm{II},1} \\ \bar{I}_{\mathrm{III},1} \\ \bar{I}_{\mathrm{IV},1} \end{bmatrix}$$

در حالت كلي رابطه جبري براي اين مسئله را بصورت زير مي توان نوشت (برای سادگی در نمایش $\bar{a}_n^i = \bar{a}^i$):

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \bar{I}_{n-1} \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \ldots\ldots\ldots 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \ldots\ldots \bar{a}^{n-2} & \bar{a}^{n-1} \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a}^4 \ldots\ldots \bar{a}^{n-4} & \bar{a}^{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \quad \vdots & \vdots \\ 1 & \bar{a}^{n-2} & \bar{a}^{n-4} \ldots\ldots \bar{a}^4 & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^{n-1} & \bar{a}^{n-2} \ldots\ldots \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{0,1} \\ \bar{I}_{\mathrm{I},1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \bar{I}_{n-2,1} \\ \bar{I}_{n-1,1} \end{bmatrix}$$

$$\bar{\boldsymbol{I}}_{1,\ldots,n} = \bar{\boldsymbol{T}}_n . \bar{\boldsymbol{I}}_{0,I,\ldots,n-1}$$

بردار جريان هاي مولفه هاي متقارن فاز ۱ $\bar{\boldsymbol{I}}_{0,I,\ldots,n-1} = \bar{\boldsymbol{I}}_{(0,I,\ldots,n-1),1}$

بردار جريانهاي واقعي سيستم n فازه $\bar{\boldsymbol{I}}_{1,2,\ldots,n}$

ماتريس تبديل مولفه های متقارن سيستم n فازه $\bar{\boldsymbol{T}}_n$

۲-۲ تجزیه سیستم ۳ فازه نامتعادل با مولفه های متقارن

دريک سيستم سه فاز نيز پيدا كردن مولفه هاي متقارن $\bar{I}_{\mathrm{II}}, \bar{I}_{\mathrm{I}}, \bar{I}_0$ مورد نظر مي باشند كه منظور مولفه هاي متقارن فاز ۱ بصورت $\bar{I}_{\mathrm{II},1}, \bar{I}_{\mathrm{I},1}, \bar{I}_{0,1}$ ميباشد. براي حل مسئله كافي است معكوس ماتريس نوشته شده، $\bar{\boldsymbol{T}}_3$ ، را يافته و با ضرب در ماتريس جريانهاي سيستم نامتعادل($\bar{I}_3, \bar{I}_2, \bar{I}_1$)، جريانهاي سيستم متعادل بدست مي آيد. به اين معني كه از معكوس ماتريس $\bar{\boldsymbol{T}}_3$ ،يعنی $\bar{\boldsymbol{T}}_3^{-1}$ ، مي توان مولفه هاي متقارن را بدست آورده و از سيستم نا متعادل به مولفه ها و از مولفه ها به سيستم نا متعادل رسيد. براي يک سيستم سه فازه داريم:

$$\bar{\boldsymbol{I}}_{1,2,3} = \bar{\boldsymbol{T}}_3 \, \bar{\boldsymbol{I}}_{0,I,II}$$

$$\bar{\boldsymbol{I}}_{0,I,II} = \bar{\boldsymbol{T}}_3^{-1} \bar{\boldsymbol{I}}_{1,2,3}$$

اگر فاز $\bar{I}_1$ بعنوان مبنا باشد:

$$\bar{I}_1 = \left|\bar{I}_1\right| \angle I_1 = I_1 \angle I_1$$

$$\bar{a} = \bar{a}_3 = e^{j\frac{2\pi}{3}} = e^{j120} = 1\angle 2\pi/3$$

$$\bar{a}_3^3 = 1\angle 0 \quad \bar{a}_3^0 = 1\angle 0$$

$$\bar{a}^2 + \bar{a} + 1 = 0$$

$$\bar{a}^* = \bar{a}^2$$

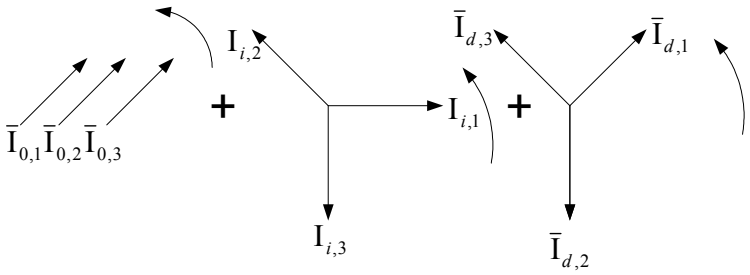
$$(\bar{a}^2)^* = \bar{a}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{0,1} \\ \bar{I}_{\mathrm{I},1} \\ \bar{I}_{\mathrm{II},1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_{\mathrm{I}} \\ \bar{I}_{\mathrm{II}} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_i \\ \bar{I}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_- \\ \bar{I}_+ \end{bmatrix}$$

سيستم سه فازه مستقيم + سيستم سه فازه معكوس + سيستم سه فازسه هموپولر = سيستم سه فازه نا متعادل

توالي +	توالي -	توالي صفر
ترتيب۲، $\bar{I}_{\mathrm{II},1}$	ترتيب۱، $\bar{I}_{\mathrm{I},1}$	ترتيب۰، $\bar{I}_{0,1}$



ترتيب۲ $\bar{I}_{\mathrm{II},1}$: متشكل ازسه بردار مساوي از نظر قدر مطلق و با اختلاف زاويه اي ۱۲۰ درجه بهم بوده كه توالي فاز مولفه ها با سيستم يكسان است (۱،۲،۳ يا abc).

ترتيب۱، $\bar{I}_{\mathrm{I},1}$: متشكل ازسه بردار مساوي از نظر قدر مطلق و با اختلاف زاويه اي ۱۲۰ درجه بهم بوده كه توالي فاز مولفه ها معكوس سيستم است (۱،۳،۲ يا acb).

ترتيب۰، $\bar{I}_{0,1}$: متشكل ازسه بردار مساوي از نظر قدر مطلق و با اختلاف زاويه اي صفر درجه بهم است.

اين مجموعه بردارها با سرعت زاويه اي $(\omega = 2\pi f)$, $f = 50\ HZ$ در حال چرخش هستند.

برای مجموعه بردارهای ولتاژها با ترتیب a,b,c نیز بصورت مشابه می توان نوشت.

$$\overline{V}_a = \overline{V}_{0,a} + \overline{V}_{-,a} + \overline{V}_{+,a} = \overline{V}_{0,a} + \overline{V}_{i,a} + \overline{V}_{d,a}$$
$$\overline{V}_b = \overline{V}_{0,b} + \overline{V}_{-,b} + \overline{V}_{+,b} = \overline{V}_{0,b} + \overline{V}_{i,b} + \overline{V}_{d,b}$$
$$\overline{V}_c = \overline{V}_{0,c} + \overline{V}_{-,c} + \overline{V}_{+,c} = \overline{V}_{0,c} + \overline{V}_{i,c} + \overline{V}_{d,c}$$

برای مجموعه بردارهای ولتاژها با ترتیب 1,2,3 می توان نوشت.

$$\overline{V}_1 = \overline{V}_{0,1} + \overline{V}_{-,1} + \overline{V}_{+,1} = \overline{V}_{0,1} + \overline{V}_{i,1} + \overline{V}_{d,1}$$
$$\overline{V}_2 = \overline{V}_{0,2} + \overline{V}_{-,2} + \overline{V}_{+,2} = \overline{V}_{0,2} + \overline{V}_{i,2} + \overline{V}_{d,2} = \overline{V}_{0,1} + \overline{a}\overline{V}_{i,1} + \overline{a}^2\overline{V}_{d,1}$$
$$\overline{V}_3 = \overline{V}_{0,3} + \overline{V}_{-,3} + \overline{V}_{+,3} = \overline{V}_{0,3} + \overline{V}_{i,3} + \overline{V}_{d,3} = \overline{V}_{0,1} + \overline{a}^2\overline{V}_{i,1} + \overline{a}\overline{V}_{d,1}$$

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_0 \\ \overline{V}_i \\ \overline{V}_d \end{bmatrix} = \overline{\boldsymbol{T}}^{-1} . \begin{bmatrix} \overline{V}_1 \\ \overline{V}_2 \\ \overline{V}_3 \end{bmatrix}$$

اگرفاز $\bar{I}_1$ به عنوان مبنا باشد داریم.

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{0,1} + \bar{I}_{i,1} + \bar{I}_{d,1} = \bar{I}_{0,1} + \bar{I}_{i,1} + \bar{I}_{d,1}$$
$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{0,2} + \bar{I}_{i,2} + \bar{I}_{d,2} = \bar{I}_{0,1} + \overline{a}\bar{I}_{i,1} + \overline{a}^2\bar{I}_{d,1}$$
$$\bar{I}_3 = \bar{I}_{0,3} + \bar{I}_{i,3} + \bar{I}_{d,3} = \bar{I}_{0,1} + \overline{a}^2\bar{I}_{i,1} + \overline{a}\bar{I}_{d,1}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_i \\ \bar{I}_d \end{bmatrix} = \overline{\boldsymbol{T}}^{-1} . \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix}$$

بدست آوردن $\overline{\boldsymbol{T}}^{-1}$:

$$\overline{\boldsymbol{T}}^t = \overline{\boldsymbol{T}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \overline{a} & \overline{a}^2 \\ 1 & \overline{a}^2 & \overline{a} \end{bmatrix}$$
$$|\boldsymbol{T}| = \det[\boldsymbol{T}] = 1(\overline{a}^2 - \overline{a}) + 1(\overline{a}^2 - \overline{a}) + 1(\overline{a}^2 - \overline{a}) = 3(\overline{a}^2 - \overline{a})$$

از روي $\boldsymbol{T}^t$ ماتريس كمكي $\boldsymbol{T}_{adj}$ را مي نويسيم.

$$T_{adj} = \begin{bmatrix} \overline{a}^2 - \overline{a} & \overline{a}^2 - \overline{a} & \overline{a}^2 - \overline{a} \\ \overline{a}^2 - \overline{a} & \overline{a} - 1 & 1 - \overline{a}^2 \\ \overline{a}^2 - \overline{a} & 1 - \overline{a} & \overline{a} - 1 \end{bmatrix}$$

با توجه به رابطه زیر حواهیم داشت:

$$\frac{\overline{a} - 1}{\overline{a}^2 - \overline{a}} = \frac{1}{\overline{a}} = \frac{\overline{a}^2}{\overline{a}^3} = \frac{\overline{a}^2}{1} = \overline{a}^2$$

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

$$\bar{a} = e^{j120}$$

$$\bar{a} = -1/2 + j\sqrt{3}/2 \qquad \bar{a}^2 = -1/2 - j\sqrt{3}/2 \qquad \bar{a}^0 = \bar{a}^3 = 1 \qquad 1 + \bar{a}^2 + \bar{a} = 0$$

براي يافتن مولفه هاي فازهاي ديگر هر كدام از مولفه ها در بردار $\bar{a}$ يا $\bar{a}^2$ ضرب مي شوند.

فاز ۱

$$\begin{cases} \bar{I}_{0,1} = \frac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3) \\ \bar{I}_{i,1} = \frac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{a}^2\bar{I}_2 + \bar{a}\bar{I}_3) \\ \bar{I}_{d,1} = \frac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{a}\bar{I}_2 + \bar{a}^2\bar{I}_3) \end{cases}$$

فاز ۲

$$\begin{cases} \bar{I}_{0,2} = \bar{I}_{0,1} \\ \bar{I}_{i,2} = \bar{a}\bar{I}_{i,1} \\ \bar{I}_{d,2} = \bar{a}^2\bar{I}_{d,1} \end{cases}$$

فاز ۳

$$\begin{cases} \bar{I}_{0,3} = \bar{I}_{0,1} \\ \bar{I}_{i,3} = \bar{a}^2\bar{I}_{i,1} \\ \bar{I}_{d,3} = \bar{a}\bar{I}_{d,1} \end{cases}$$

در سيستم سه فاز متقارن داريم:

$$\bar{I}_1 = I_1\angle 0 - \alpha$$
$$\bar{I}_2 = I_2\angle -120^\circ - \alpha = I_2\angle 240^\circ - \alpha = \bar{I}_1\bar{a}^2$$
$$\bar{I}_3 = I_3\angle -240^\circ - \alpha = I_3\angle 120^\circ - \alpha = \bar{I}_1\bar{a}$$

نكته: حتماً دقت نمائيد كه رعايت نوشتن ترتيب $\begin{matrix} 0 & 0 \\ - & i \\ + & d \end{matrix}$ در برابر مولفه هاي متقارن اهميت دارد. زيرا محل نوشتن اين مولفه ها تعيين كننده عناصر ماتريس تبديل $\boldsymbol{\bar{T}^{-1}}$ و $\boldsymbol{\bar{T}}$ است. در صورتيكه در برخي مراجع محل نوشتن مولفه ها بصورت $\begin{matrix} 0 & 0 \\ + & d \\ - & i \end{matrix}$ باشد در آنصورت ماتريسهاي تبديل بدست آمده $\boldsymbol{\bar{T}^{-1}}$ و $\boldsymbol{\bar{T}}$ معكوس ماتريسهاي ارائه شده در اين درس خواهند بود.

مثال: مولفه هاي ترتيب صفر ،۱و۲ (هموپولر، معکوس و مستقيم) جريان سه فاز را در رژيم دائم سينوسي زير را پيدا کنيد.

$$i_1(t) = 5\sqrt{2}\sin(314t) = \sqrt{2}\,\mathrm{Im}\left\{\bar{I}_1 e^{j\omega t}\right\}$$
$$i_2(t) = 0 = \sqrt{2}\,\mathrm{Im}\left\{\bar{I}_2 e^{j\omega t}\right\}$$
$$i_3(t) = 10\sqrt{2}\cos(314t) = 10\sqrt{2}\sin(314t - 90) = \sqrt{2}\,\mathrm{Im}\left\{\bar{I}_3 e^{j\omega t}\right\}$$

در روابط سينوسي و بر حسب مقادير موثر خواهيم داشت:

$$\bar{I}_1 = 5\angle 0^\circ \qquad \bar{I}_2 = 0 \qquad \bar{I}_3 = 10\angle -90^\circ$$

مقادير موثر مقادير موثر مقادير موثر

در روابط کسينوسي و بر حسب مقادير موثر خواهيم داشت:

$$\bar{I}_1 = 5\angle 90^\circ \qquad \bar{I}_2 = 0 \qquad \bar{I}_3 = 10\angle 0$$

مولفه هاي فاز I به صورت زير هستند:

$$\bar{I}_{0,1} = 1/3(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3)$$
$$\bar{I}_{i,1} = 1/3(\bar{I}_1 + \bar{a}^2\bar{I}_2 + a\bar{I}_3)$$
$$\bar{I}_{d,1} = 1/3(\bar{I}_1 + a\bar{I}_2 + \bar{a}^2\bar{I}_3)$$

$$\bar{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = 1\angle 120°$$
$$\bar{a}^2 = e^{j\frac{2\pi}{3}} = 1\angle 240°$$

$$\bar{a}\bar{I}_2 = 0 \qquad \bar{a}^2\bar{I}_2 = 0$$
$$\bar{a}\bar{I}_3 = 10\angle 30^\circ \qquad \bar{a}^2\bar{I}_3 = 10\angle 150^\circ$$

$$\bar{I}_{0,1} = 1/3(5 + 0 + 10\angle -90^\circ) = 3.72\angle -63.43$$
$$\bar{I}_{i,1} = 1/3(5 + 0 + 10\angle 30^\circ) = 4.84\angle 20.1$$
$$\bar{I}_{d,1} = 1/3(5 + 0 + 10\angle 150^\circ) = 2.06\angle 126.2$$

,

$$\bar{I}_{0,2} = 3.72\angle -63.43$$
$$\bar{I}_{i,2} = 4.84\angle 140.1$$
$$\bar{I}_{d,2} = 2.06\angle 366.2 \approx 6.2$$

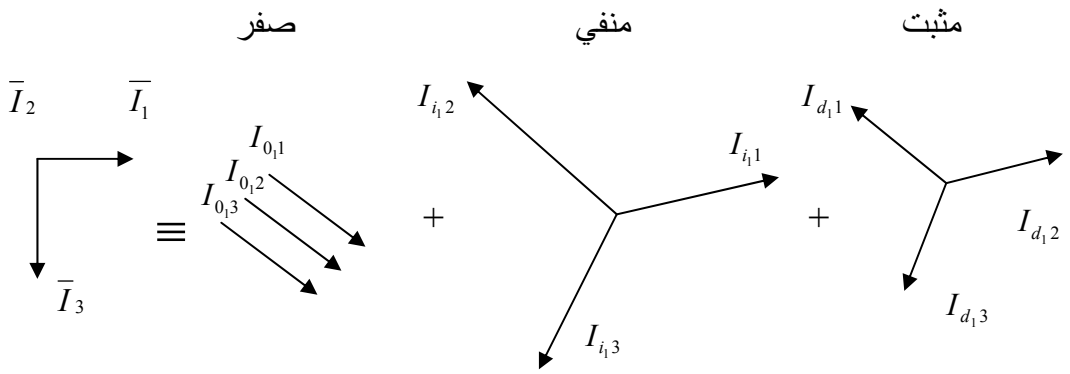
,

$$\bar{I}_{0,3} = 3.72\angle -63.43$$
$$\bar{I}_{i,3} = 4.84\angle 260.1$$
$$\bar{I}_{d,3} = 2.06\angle 246.2$$

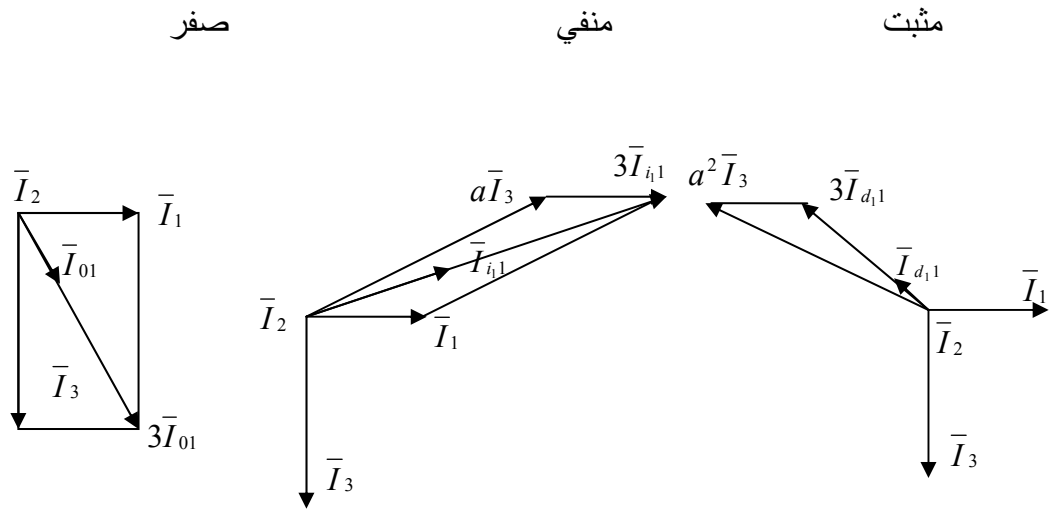
ملاحظه مي شود كه نتيجه قبلي حاصل شده است:

فاز ۱		فاز ۲		فاز ۳
$I_{0,1}$		$I_{0,2} = I_{0,1}$		$I_{0,3} = I_{0,1}$
$I_{i,1}$	$\rightarrow$	$I_{i,2} = aI_{i,1}$	$\rightarrow$	$I_{i,3} = a^2 I_{i,1}$
$I_{d,1}$		$I_{d,2} = a^2 I_{d,1}$		$I_{d,3} = aI_{d,1}$

بوده و در شبكه توالي صفر نسبت به شين مرجع مدار باز خواهيم داشت. شبكه توالي صفر چنين اتصالي در شكل زير نشان داده شده است.



تحقيق درستي بردار هاي مولفه هاي متقارن از روش ترسيمي



فصل سوم

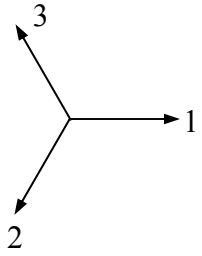
اتصال کوتاه های نامتقارن

Unsymmetrical Faults Analysis

۳-۱ عوامل اتصالي در شبکه

در حالات زیر شبکه قدرت در حالت نامتعادل کار می کند:

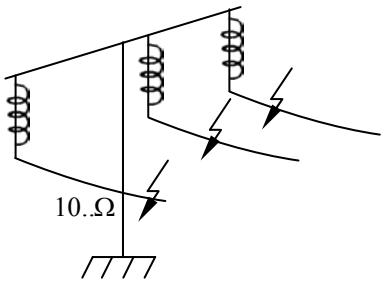
۱- به خاطر نيروهاي محرک نامتعادل ژنراتورها (که اغلب بدین صورت نبوده و ژنراتورها دارای ولتاژ تولیدی متعادل و متقارن می باشند)



۲- به خاطر عیوب موجود در شبکه قدرت

۳- تغذیه یک بار نامتقارن (تکفازه یا دوفازه) توسط سیستم سه فازه

۴- اتصال کوتاه ها: علل اين اتصال کوتاهها ميتواند پيري عايقهاي موجود در شبکه که به خاطر استفاده زياد و علل مکانيکي، عايق يک کابل خراب شده باشد. علت ديگر شاخ و برگهاي درختان در يک منطقه کوهستاني، سقوط ناگهاني يک شيء روي شبکه، عوامل جوي مانند صاعقه. اگر مقدار بار نشسته شده روي کابلها از يک حدي بيشتر باشد ممکن است جرقه گير نتواند تمام بار را به زمين انتقال دهد.



اگر مقاومت مسير دكل 10Ω بوده و بار زيادي روي كابلها نشسته وجريان 50 KA باشد، اختلاف پتانسيل دكل با زمين 500 KV خواهد بود (براي خط مثلا 132 KV) با توجه به اينكه فواصل كابلها براي 500 KV طراحي نشده، بين كابلها اتصال كوتاه مي شود.

۵- از رژيم گذرا: به عنوان مثال در هنگام قطع يک كليد يا در هنگام قطع يک سكسيونر اتصال كوتاه روی می دهد چون فرآيند قطع باعث ايجاد اختلاف ولتاژ زياد با فاصله زياد می باشد.

اغلب موارد اتصال كوتاهها، تكفاز بوده يا شروع آنها با تكفاز است و رفته رفته به ساير فازها نيز سرايت مي كند. حدود ۷۰% اتصالي ها از تكفاز شروع شده و كم كم به ديگر فازها نيز سرايت مي كند.

۳-۲ عواقب اتصالي در شبكه:

چون با جريان و ولتاژ بالا در اتصال كوتاه سر و كار داريم اگر مدت زيادي اين اتصال كوتاه در شبكه باشد ممكن است عواقب ناگواري در سيستم داشته باشد لذا بايد بر طرف شود و به محض اينكه عامل حفاظتي شبكه احساس كرد كه جريان زيادي وجود دارد به كليدها (ديژنكتورها) فرمان قطع مي دهد. براي سفارش كليد قطع بايد جرياني كه اين كليدها تحت ولتاژ نامي قطع مي كنند دانسته و محاسبه شود. قدرت قطع كليد را جريان قطع كليد مشخص مي كند.

قدرت قطع = جريان قطع × جريان ولتاژ نامي

پس بايد بدترين اتصال را در بدترين نقطه به دست آورد. محاسبات اتصال كوتاه نامتقارن از نظر مؤلفه هاي متقارن بررسي مي شود.

اگرجريان 50KA در حدود 0.2 ثانيه برقرار باشد. كابل گرمايي RI^2t توليد مي كند كه متناسب با مجذور جريان است. اين گرما خيلي بالاست، ممكن است عايق كابل آسيب ديده و باعث اتصالي هاي ديگر شبكه مانند زيربشود.

۱- سوزاندن عايقها

۲- خراب كردن عايقهاي ترانس

۳- نيروهاي الكتروديناميكي بر روي دو كابل مجاور هم مي تواند موجب خم شدن باسها يا شينها پست ها شود (بين سيم پيچهاي اوليه و ثانويه ترانس نيز وجود دارد).

۴- سوزاندن سر پلمپ كابلها

۵- اثر نامساعد روي خطوط مخابراتي

۶- گرفتن پايداري از شبكه

وقوع جريان عيب قوي باعث ايجاد افت ولتاژ قوي شده و در نهايت ماشينهاي سنكرون از حالت سنكروني خارج مي شوند. براي به حداقل رساندن اين عواقب بايد جريان اتصال كوتاه در اسرع وقت از بين برود و كليد قطع اين عمل را بايد انجام دهد، بنابراين:

۱- کليد قطع بايد براي بدترين اتصال در بدترين نقطه و در حداقل زمان عمل کند. (تجهيزات شبکه)
۲- اين اتصال ها را بايد خوب تشخيص داد و به محض تشخيص به وسيله سيستمهاي حفاظتي در کمتر از ۷ يا ۸ سيکل دستور قطع دهد. (عيوب را به نحو احسن بايد تشخيص داد. سيستمهاي اندازه گيري در شبکه قرار داد که وقتي شبکه به طور نرمال کار مي کند چيزي نشان نميدهند اما به محض اينکه جريان نامتعادلي در شبکه داشتيم ووقتي دستگاههاي اندازه گيري مولفه هاي هموپولرو معکوس رااحساس کردند. فرمان قطع صادر ميشود.)

طبق مدار معادل ترتيب صفر شبکه جريان اتصال کوتاه نسبت معکوس با امپدانس هموپولر شبکه دارد. پس براي کم کردن جريان اتصال کوتاه بايد امپدانس هموپولر را با گذاشتن ترانس يا بوبين پترسون زياد کرد. وقتي که نقطه زمين را صفر قرار دهيم اگر نقطه صفر ترانس هاي ثانويه يا اوليه صفر نباشند ولتاژها در ديگر فازها $\sqrt{3}$برابر افزايش مي يابد. زمين کردن نقطه صفر در ولتاژ بالا بوسيله بوبين پترسون و در ولتاژهاي پايين بوسيله مقاومت صورت گرفته که در کار شبکه در حالت نرمال هيچ تأثيري ندارد.

۳-۳ انتخاب کليدهاي قدرت (Circuit Breakers)

جريان نامي يک کليد، جرياني است که کليد بايد قابليت قطع آن را داشته باشد. اين جريان کمتر از جريان موقت اتصال کوتاه بوده و به سرعت قطع کليد بستگي دارد. سرعت قطع کليدها معمولاً به صورت تعداد سيکل مانند ۲، ۳، ۵ و ۸ اندازه گيري مي شود (يعني تعداد سيکل پس از وقوع اتصال کوتاه تا خاموش شدن کامل قوس در کليد). مقدار نامي قدرت قطع يک کليد (يا ظرفيت اتصال کوتاه يا قدرت قطع):

SCC = $\sqrt{3}$ (ولتاژ نامي KV) (جريان قطع نامي KA) [MVA]

بيشترين مقدار SCC در اتصال کوتاه متقارن سه فاز به دست مي آيد.

در اتصال کوتاه تکفاز به زمين در نزديکي ژنراتورها S_{22} حاصله بيشتر از ظرفيت اتصال کوتاه سر فاز متقارن است و قدرت قطع کليد بايد بر حسب آن تعيين شود.

در حالت کلي ظرفيت اتصال کوتاه روي حالت تکفاز به زمين در هر نقطه محاسبه مي شود و S_{22} بزرگتر بعنوان ملاک تعيين قدرت قطع کليد در نظر گرفته مي شود.

بايد يک نقطه صفر از شبکه را بوسيله بوبين پترسون حتماً به زمين وصل کرد.

۳-۴ محاسبات اتصال کوتاه

به عیب های اتصال کوتاه عیب هاي نوع موازي (Shunt Type Faults) گفته می شود و شامل انواع زیر می باشد:

۱- عیب اتصال کوتاه تکفاز به زمین(LG)

۲- عیب اتصال کوتاه دو فاز به هم بدون زمین(LL)

۳- عیب اتصال کوتاه دو فاز به هم با زمین (LLG)

۴- عیب اتصال کوتاه سه فاز به هم بدون زمین(LLL) – عِب اتصال کوتاه متقارن

۵- عیب اتصال کوتاه سه فاز به هم و با زمین(LLLG) – عیب اتصال کوتاه متقارن

۶- عیب اتصال کوتاه دو فاز به هم بدون زمین و فاز سوم به زمین(LL-LG)

عملاً اتصال کوتاه مستقیم به زمین نبوده و همراه با یک مقاومت ($\overline{Z}_f$) است. اگر کلید قطع را براي حالت بدون مقاومت ($\overline{Z}_f = 0$) طراحي کنیم خیال ما راحت است چون در این حالت جریان بیشتر از حالتي است که با مقاومت وصل شده باشد. اتصال دو فاز یا سه فاز نسبت به هم نیز همین مسئله رادارا‌ست باید جریانها را در فازها حساب کرد و کلید قطعي که در طرف این خط قرار داده شده براي بدترین حالت محاسبه شود.

۳-۵ فرضهای مهم

۱- اتصال کوتاه به طور غیرمستقیم، همراه با مقاومت و امپدانس در محل اتصال بررسی می شود ($\overline{Z}_f \neq 0$).

۲- از جریان نامي قبل از اتصال در شبکه (در آن فاز) در مقابل جریان اتصال کوتاه موجود در فاز، صرفنظر مي کنیم چرا که حدود سه تا چهار درصد جریان اتصال کوتاه است. همچنین در همه جاي شبکه در حالت بي باري ولتاژ pu ۱ است.

اگر در محل ژنراتورها فازهاي متعادل و متقارن و مستقیم داشته باشیم در تمامي نقاط حتي در محل اتصال کوتاه هم نیروهایي متعادل مستقیم یک پریونیت خواهد بود.

۳-۶ اتصال کوتاه تکفاز با زمین

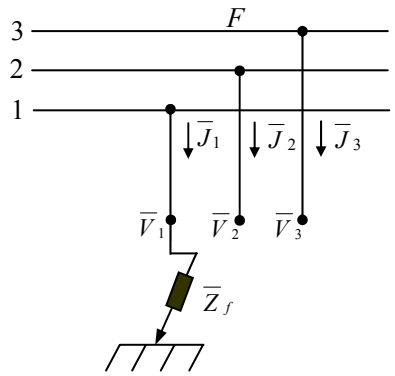
مي خواهیم اتصال کوتاه فاز به زمین را بررسي کنیم ولتاژ در محل اتصال قبل از اتصال کوتاه و قبل از اتصال کوتاه نیروهاي محرک مولد است و ۱۰۰% ولتاژ (حدود سه تا چهار درصد خطا) یعني یک پریونیت در تمامي نقاط شبکه خواهیم داشت. بیشتر از سه تا چهار درصد تقریب را در سفارش کلید در نظر مي گیریم و شبکه را با فرضها و پیش بیني هاي ده ساله در نظر بگیریم (در حالت دقیق ولتاژ نقطه عیب را قبل از وقوع عیب در نظر مي گیریم).

۱- کار با الماني است که در آن اتصال کوتاه رخ داده که در سیستم سه فاز بررسي مي کنیم.

۲- در محل اتصالي سه هادي فرضي را بیرون مي کشیم. براي اتصال کوتاه تکفاز با زمین یک فاز را به زمین وصل مي کنیم براي هر کدام جریان $\overline{J}_3,\overline{J}_2,\overline{J}_1$ در نظر مي گیریم.

قبل از اتصال کوتاه $\overline{J}_1^0=\overline{J}_2^0=\overline{J}_3^0=0$ و ولتاژ نامي $\overline{V}_1^0,\overline{V}_2^0,\overline{V}_3^0$ برابر یک پریونیت مي باشد.

بعد از اتصال کوتاه با زمین وضعیت جریانها $\overline{J}_2^f=\overline{J}_3^f=0$ و $\overline{J}_1=?$ و وضعیت ولتاژها $\overline{V}_2,\overline{V}_3=?$ و $\overline{V}_1=\overline{Z}_f\overline{J}$ می باشد.



لازم به ذکر است $\overline{J}$ به جاي $\overline{I}$ بکار برده شده تا با جریانهاي حالت متعادل اشتباه نشود.

هدف پیدا کردن بردارهاي ولتاژها و جریانها در هنگام عیب بصورت $\begin{bmatrix}\overline{J}_1^f\\ \overline{J}_2^f\\ \overline{J}_3^f\end{bmatrix},\begin{bmatrix}\overline{V}_1^f\\ \overline{V}_2^f\\ \overline{V}_3^f\end{bmatrix}$ می باشند. که معلومات آن $\overline{V}_1^f=\overline{Z}_f\overline{J}_1^f$ $\overline{J}_3^f=0$ $\overline{J}_2^f=0$ است. اگر مولفه ها را به دست آوریم مي توانیم خود مجهولات را نیز به دست آوریم ومحاسبات را بر حسب مولفه ها انجام دهیم. $\begin{bmatrix}\overline{J}_0\\ \overline{J}_i\\ \overline{J}_d\end{bmatrix},\begin{bmatrix}\overline{V}_0\\ \overline{V}_i\\ \overline{V}_d\end{bmatrix}$ مجهولات مسئله میباشد. براي یك فاز بدست آورده و براي سه فاز تعمیم خواهیم داد.

$J_0+a.Ji+a^2.J_d=0$

$J_o+a^2.Ji+a.J_d=0 \Rightarrow a.Ji+a^2.J_d=a^2.Ji+a.J_d \Rightarrow Ji=J_d$

$V_o+Vi+V_d=0 \text{ or } Z_f.J_1 \qquad (a-a^2).Ji=(a-a^2).J_d \qquad J_o=Ji$

یعني مولفه هاي جریان باهم برابر مي باشند $J_o=J_d=J_i$

$$\begin{pmatrix} J_o \\ J_i \\ J_d \end{pmatrix} = 1/3 \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} J_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Longrightarrow \quad J_i = J_o = J_d = (1/3).J_1$$

قبل از اتصال كوتاه نيروي هاي محركه به صورت زير بودند $V_d=E\ ,\ V_i = V_o = 0$

مجهول ها $Vo, Vi, Vd\ ,\ Jo,\ Ji,\ Jd$ مي باشند و معادله ها دردست مي باشند با جمع كردن سه معادله پايين‌ي $V_1\ V_2\ ,V_3$ به دست مي آيند.

$$Jd = E / [(Zo+Zd+Zi)+3Zf] = Ji = Jo \Longrightarrow \quad Vd = E - Zd.E / [(Zd+Zi+Zo)+3Zf]$$

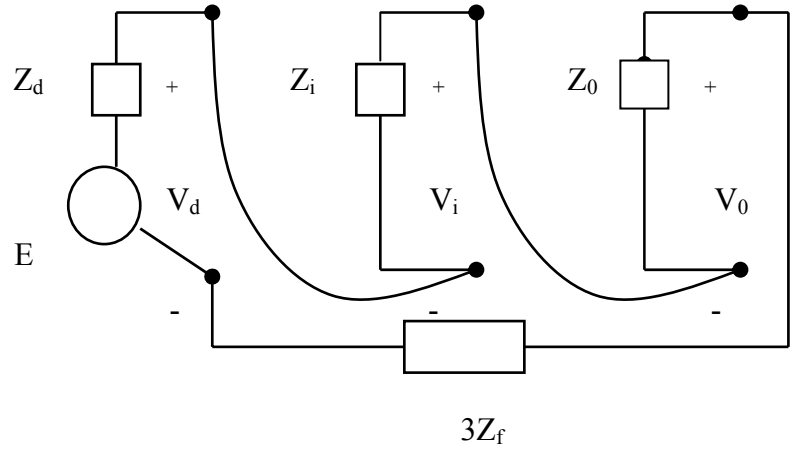
$$J_1 = Jo + Jd + Ji = 3E / [(Zo+Zd+Zi)+3Zf] \qquad Vi = -E.Zi / [(Zo+Zi+Zd)+3Zf]$$

$$Vd=(Zi + Zo)E / [(Zd+Zo+Zi)+3Zf] \qquad Vo= -E.Zo / [(Zo+Zd+Zi)+3Zf]$$

$V_1 = Zf.J_1$

$V_2 = Vo + a.Vi + a^2.Vd$

$V3 = Vo + a^2.Vi + Vd$



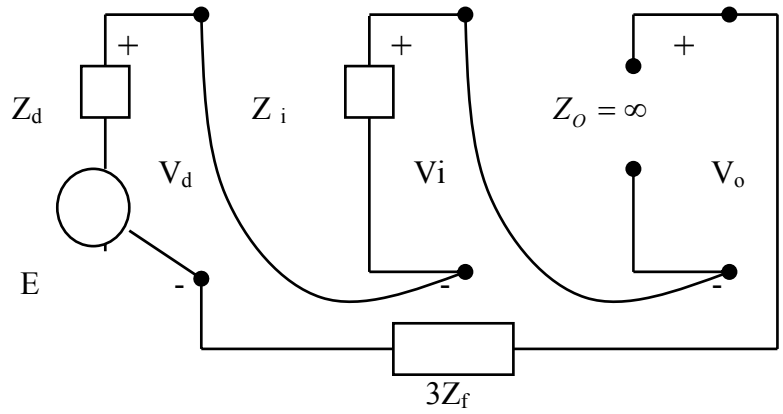
الف: $Z_o \neq \infty$

در سيستم اتصال كوتاه تكفاز بزمين $Z_o \neq \infty$ ميباشد (وقتي كه نقطه صفر از شبكه زمين شده باشد) و سه سيستم هموپلر ومستقم ومعكوس رابا هم سري وصل مي كنيم. براي اينكه $Z_o \neq \infty$ باشد بايدحداقل يك نقطه صفر از شبكه به زمين وصل شده باشد(بوسيله بوبين پترسون كه امپدانس بوبين Z_O مي باشد).

ب : وقتي تمام صفر شبكه از زمين ايزوله باشد $Z_O = \infty$

I_1 نمي تواند عبور كند چون يكي از Z ها ∞ است. در حالت اول نقطه صفري داشتيم كه جريان عبوري بزمين را دوباره به شبكه برگرداند ولي در اين حالت جريان در يك مدار باز قرارگرفته است پس :

$$J_1 = 0 \rightarrow J_0 + J_d + J_i = 0 \rightarrow 3J_o = 0 \rightarrow J_o = 0$$



$$\begin{pmatrix} I_1=0 \\ I_2=0 \\ I_3=0 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} I_o=0 \\ I_i=0 \\ I_d=0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_i=0 \\ V_o=E \\ V_d=-E \end{pmatrix} \qquad V_1 = V_o + V_i + V_d = 0$$

$$V_o = (V_i + V_d) = -E$$

$$V_1 = 0$$

$$V_2 = -E + 0 + a^2 E = (a^2 - 1) E = (-3/2 - j\sqrt{3}/2) E$$

$$V_3 = -E + 0 + a E = (a - 1) E = (-3/2 + j\sqrt{3}/2) E$$

وقتي فاز يك به زمين شده وصل باشد وتمامي نقاط صفر شبكه ازمين ايزوله باشند $|V_1| = 0$

ولتاژ هاي فاز ديگر به اندازه ۷۰% افزايش مي يابد اما عايق ها و

$$|V_2| = \sqrt{3}E = 1.732E$$

مقره ها براي ۱۵-۱۰% اضافه ولتاژ طراحي ومحاسبه شده اند

$$|V_3| = \sqrt{3}E = 1.732E$$

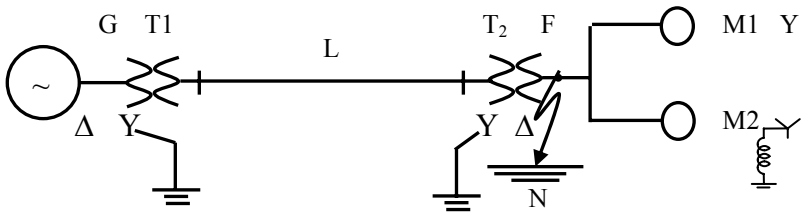
در اين حالت عايق بندي فاز هاي سالم معيوب خواهد بود پس بايستي $Z_o \neq \infty$ باشد وبراي اين كار بايد حداقل يك نقطه صفر از شبكه زمين شده باشد براي محدود كردن جريان هاي اتصال كوتاه توسط بوبين اتصال كوتاه مي كنيم .

مثال) يك ژنراتور سه فاز با قدرت نامي 20MVA و ولتاژ نامي 11kv داراي راكتانس زيرگذراي 20% است. اين ژنراتور از طريق يك خط انتقال و دو ترانسفورماتور در ابتدا و انتهاي خط، دو موتور الكتريكي با ولتاژ 10kv و قدرتهاي نامي 7.5MVA و 15MVA را كه داراي راكتانس زيرگذراي 25% مي‌باشند را تغذيه مي-كند. ترانسفورماتورهاي سه فاز هر دو داراي مقادير نامي 30MVA ، 10.8/121kv با اتصال ΔY وراكتانس نشتي leakage 10% هستند. مقدار راكتانس سري خط انتقال برابر 100Ω مي‌باشد. با فرض برابري راكتانس ترتيب معكوس ماشين‌ها باراكتانس زيرگذرا و صرفنظر كردن از مقادير مقاومتي و در نظر گرفتن مقادير نامي ژنراتور بعنوان مقادير مبناي مدار سه فاز مطلوبست

الف) ترسيم شبكه‌هاي ترتيب مستقيم، معكوس و صفر با مقادير پريونيت

ب) قبل از وقوع عيب تكفاز به زمين بدون امپدانس عيب (LG) در نقطه F ، موتورها در شرايط بارداري با قدرت 7.5MW ، 15 و ولتاژ 10kv و ضريب قدرت 0.8 lead پيش فاز قرار دارند. اگر از جريان قبل از عيب صرفنظر گردد، جريان عيب و جريان زيرگذرا را در تمام قسمتهاي شبكه بدست آوريد.

پ) جريانهاي عيب را بدون صرفنظر كردن از جريان قبل از عيب محاسبه نمائيد.



راكتانسهاي ترتيب صفر ژنراتور و موتورها =0.06Pu

راكتورهاي محدود كننده جريان ژنراتور و موتور دوم = 2.5Ω

راكتانس ترتيب صفر خط انتقال = 300Ω

حل)

الف) مقادير مبنا:

$$G: S_b = S_n = 25MVA \quad , \quad V_b = V_n = 11kv$$

$$L: S_b = 25MVA \quad , \quad V_b = 11 \times \frac{121}{10.8} = 123.2\,kv$$

$$M_1, M_2: S_b = 25\,MVA \quad , \quad V_b = 123.2 \times \frac{10.8}{121} = 11kv$$

مقادیر درصد (پریونیت) راکتانس‌ها

$$G: Xd = X_i = j0.2Pu \Rightarrow X0 = j0.06Pu$$

$$\begin{cases} T_1 \\ T_2 \end{cases} : j0.1 \times \frac{25}{30} \times \left(\frac{10.8}{11}\right)^2 = j0.0805\,Pu \Rightarrow X_0 = X_d = X_i = j0.0805\,Pu$$

$$L_1 : {}^{j100}\!/_{Z_b} = \frac{(123.2k)^2}{25M} = j0.1647Pu \Rightarrow X_0 = {}^{j300}\!/_{Z_b} = \frac{(123.2k)^2}{25M}$$
$$= j0.494\ Pu$$

$$M_1 : j0.25 \times \frac{25}{15} \times \left(\frac{10}{11}\right)^2 = j0.345Pu = X_d, X_i$$

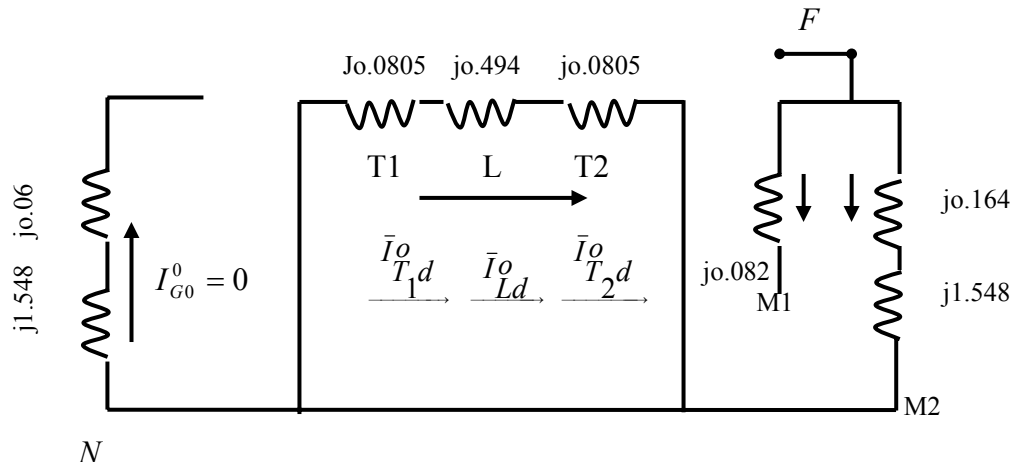
$$M_2 : j.25 \times \frac{25}{7.5} \times \left(\frac{10}{11}\right)^2 = j0.69Pu = X_d, X_i$$

$$X_o = j0.06 \times \frac{25}{15} \times \left(\frac{10}{11}\right)^2 = j0.082Pu \qquad X_o = j0.06 \times \frac{25}{7.5}\left(\frac{10}{11}\right)^2 = j0.164Pu$$

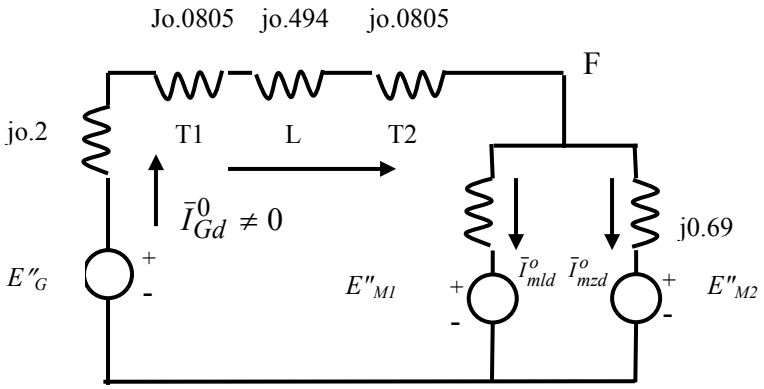
$$Current\ \ limiting\ \ Reactor: \left.\begin{matrix} G \\ M_2 \end{matrix}\right\} j2.5/Z_b = \frac{(11k)^2}{25M} = j0.516Pu = Z_n \text{ یا } X_n$$

$$X_o = 3 \times j0.516 = j1.548Pu$$

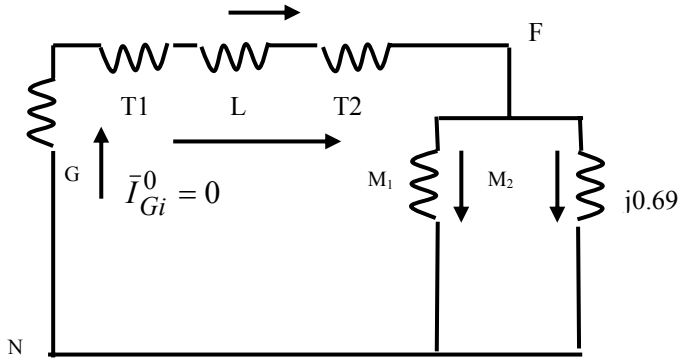
شبکه توالي صفر، مثبت و منفي به ترتيب زير مي باشند.



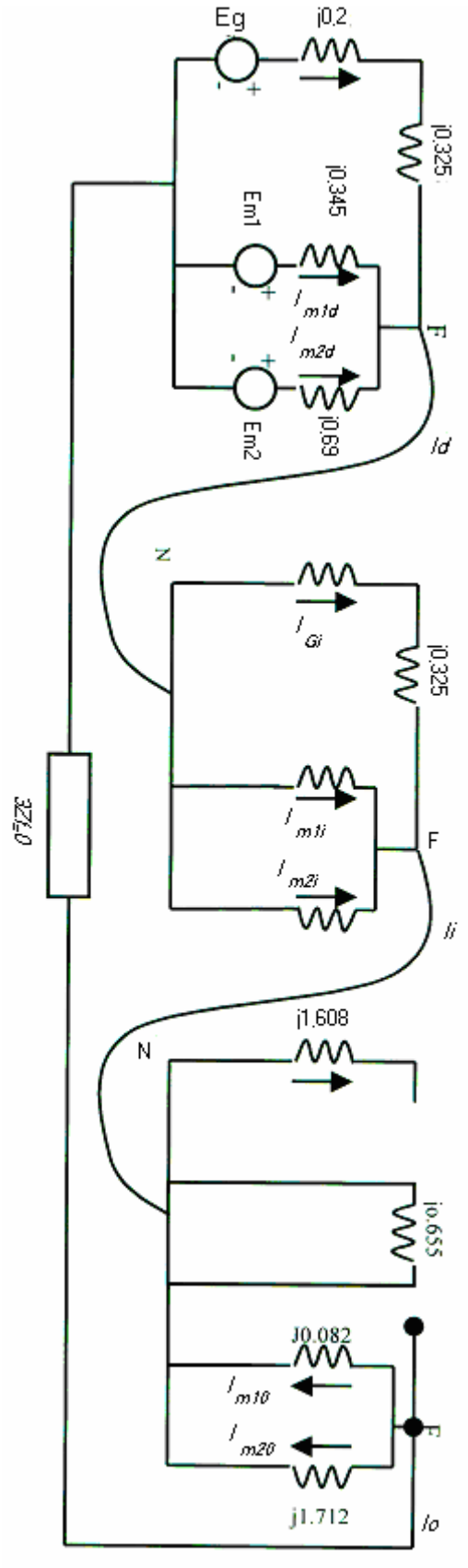
www.Mohandesyar.com



ب)



www.Mohandesyar.com


Eg
j0.2
j0.325
j0.345
Em1
I_{m1d}
I_{m2d}
F
Em2
j0.69
Id
N
I_{Gi}
j0.325
327.0
I_{m1i}
I_{m2i}
F
Ii
j1.608
N
j0.655
J0.082
I_{m10}
I_{m20}
F
j1.712
Io

$$E''_G = E''_{M1} = E''_{M2} = V_F^0(\text{Pr}\,efault \quad Voltage\ at\ F) = \frac{10k}{11k} = 0.909Pu$$

چون از جريان قبل از عيب صرفنظر شده است سطح ولتاژ در تمام نقاط شبكه يكسان است.

تعويض شبكه ترتيب مثبت با مدار معادل تونن:

$$\overline{Z}_d = \frac{j0.525 \times j0.23}{j0.525 + j0.23} = j0.16Pu$$

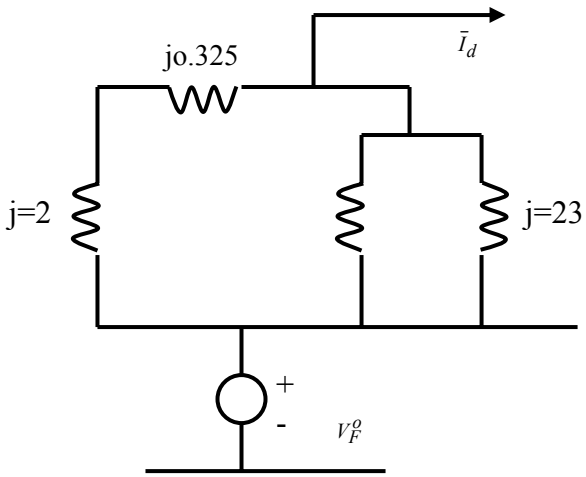
همچنين در شبكه ترتيب منفي:

$$\overline{Z}_i = \overline{Z}_d = j.16Pu$$

$$\bar{I}_d = \bar{I}_2 = \bar{I}_o = \frac{V_F^0}{\overline{Z}_d + \overline{Z}_2 + \overline{Z}_0 + 3\overline{Z}_f.} = \frac{0.909}{j2.032} = -j0.447Pu$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_i + \bar{I}_d = 3\bar{I}_d = -j1.341Pu$$

جريان عيب



چون هيچ جرياني از شبكه در حالت بي باري براي مدار معادل تونن نمي‌گذرد توانستيم براحتي V_F^0 را در قسمت معيوب قرار دهيم. در صورتيكه اگر شبكه بار دار بود بايستي ولتاژ نقطه F به زمين در حالت بارداري محاسبه مي‌شد. بدترين كار در محاسبه مدار معادل تونن اين است كه امپدانس معادل تونن با صفر كردن منابع محاسبه شده و بجاي بكار بردن ولتاژ سر نقطه تونن، امپدانس معادل تونن را با منبع مدار اوليه سري كنيم. ***(بدترين اشتباه مداري)***

جريانهاي مولفه‌ها :

$$\bar{I}_{Gd}^{f} = -j0.447 \times \frac{j0.23}{j0.755} = -j0.136Pu \Rightarrow \begin{cases} \bar{I}_{Gi}^{f} = -j0.136Pu \end{cases}$$

$$\bar{I}_{M12d}^{f} = -j0.447 \times \frac{j0.525}{j0.755} = -j0.311Pu \Rightarrow \bar{I}_{M12i}^{f} = -j0.311Pu$$

$$\bar{I}_{Go}^{f} = 0,\ I_{Mlo}^{f} = 0,\ \bar{I}_{M20}^{f} = \bar{I}_{o} = -j0.447Pu$$

جريانهاي فازها:

$$G: \begin{bmatrix} I_{G_1} \\ I_{G_2} \\ I_{G_3} \end{bmatrix}^{f} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -j^{o}0.136 \\ -j0.136 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0.272 \\ j0.136 \\ j0.136 \end{bmatrix}$$

$$M_1, M_2: \begin{bmatrix} I_{M12,1} \\ I_{M12,2} \\ I_{M12,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -j0.447 \\ -j0.311 \\ -j0.311 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j1.069 \\ -j0.136 \\ -j0.136 \end{bmatrix}$$

نكته: جريانها و ولتاژهاي فازهاي همنام با استاندارد $Y\Delta$ كلاسيك ترتيب مثبت خط انتقال نسبت به ژنراتور (y نسبت Δ در T_1) °90- شيفت مي‌يابد. $\begin{Bmatrix} A-a \\ B-b \\ C-c \end{Bmatrix}$

نكته: جريانها و ولتاژهاي فازهاي همنام با استاندارد $Y\Delta$ كلاسيك ترتيب منفي خط انتقال نسبت به ژنراتور (y نسبت به Δ در T_1) °90 + شيفت مي‌يابد.

$$\bar{I}_{Ld}^{f} = -j\bar{I}_{Gd}^{f} = -j(-j0.136) = -0.136Pu$$
$$\bar{I}_{Li}^{f} = +j\bar{I}_{Gi}^{f} = j(-j0.136) = 0.136Pu$$

جريان ترتيب صفر در خط جريان نمي‌يابد. $\bar{I}_{Lo}^{f} = 0$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{L1} \\ \bar{I}_{L2} \\ \bar{I}_{L3} \end{bmatrix}^{f} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.136 \\ -0.136 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ a-a^2 \\ a^2-a \end{bmatrix} 0.136$$

$$M_1: \bar{I}_{M1}^{o} = \frac{P_{m1}}{V_{m1} \times \cos\vartheta_{m1}} \angle \cos^{-1}\vartheta_{m1} = \frac{15M/25M}{0.909 \times 0.8} \angle 36.86^{\circ} = 0.825 \angle 36.86^{\circ} Pu$$

$$M_2: \bar{E}_{M2}^{o} = \frac{7.5M/25M}{0.909 \times 0.8} \angle 36.86^{\circ} = 0.4125 \angle 36.86 = 0.33 + j0.246Pu$$

$$\bar{I}^0_{M12} = \bar{I}_{M1} + \bar{I}_{M2} = 0.99 + j0.743Pu = \bar{I}^0_{Gd}$$

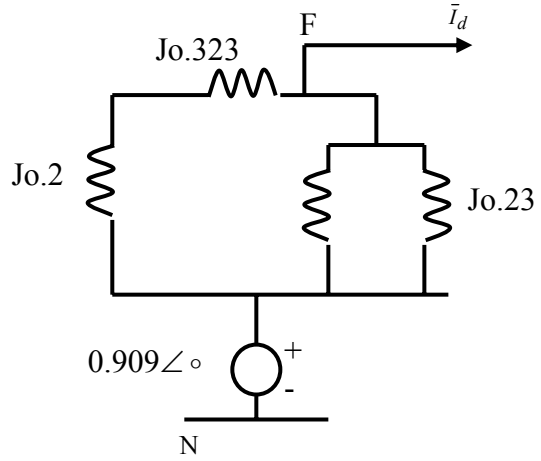
ولتاژهاي زيرگذراي موتورها و ژنراتور

$$M_1 : \bar{E}''_{m1} = \bar{V}_{m1} - \bar{Z}_{m1}\bar{I}^D_{m1} = 0.909\angle\circ - j0.345\left(0.825\angle 36.86^\circ\right)$$
$$= 1.08 - j0.228 = 1.104\angle -11.92^\circ Pu$$

$$M_2 : \bar{E}''_{m2} = 0.909\angle\circ - j0.69\left(0.4125\angle 36.86^\circ\right) = 1.08 - j0.228 = 1.104\angle -11.92^\circ Pu$$

$$G : \bar{E}''_G = \bar{V}_G + \left(\bar{Z}_G + \bar{Z}_{T1} + \bar{Z}_L + \bar{Z}_{T2}\right)\bar{I}^o_G = 0.909 + j0.525\left(1.2375\angle 36.86^\circ\right)$$
$$= 0.52 + j0.52 = 0.735\angle 45^\circ Pu$$

توجه كنيد كه با در دست بودن ولتاژهاي زيرگذراي موتورها و ژنراتور مدار معادل تونن ترتيب مثبت همان مدار قبلي خواهد بود.



$$\bar{V}_{th} = \bar{V}_{FN} = \bar{V}_{m1} = \bar{V}_{m2} = \bar{V}^0_F$$

بنابراين در عمل نيازي به محاسبه $E''_G, E''_{m2}, E''_{m1}$ نخواهد بود و فقط بايستي جريانها حساب مي‌شدند.

از سوي ژنراتور به سمت محل عيب

$$\frac{\bar{E}''_G - V''_{FN}}{j0.2 + j0.325} = 1.236\angle 36.8$$

$$\bar{I}_{m12d} = \bar{I}^o_{m12d} + \bar{I}^f_{m12d} = \left(0.99 + j0.743\right) + \left(-j0.136\right) = 0.99 + j1.054Pu$$

از سوي محل عيب به موتورها :

$$\bar{I}_{m12d} = \bar{I}^0_{m12d} - \bar{I}^f_{m12d} = \left(0.99 - j - 1.054\right)Pu$$

از سوي موتورها به سمت محل عيب

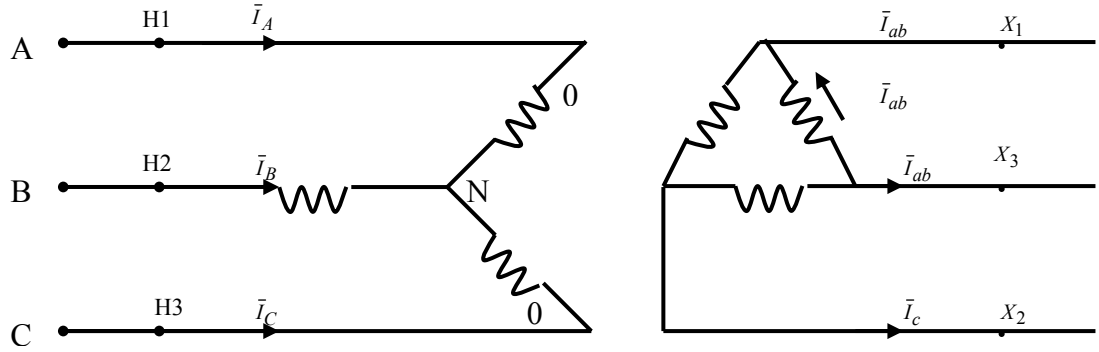
$-0.99-j1.1054Pu$

در اين مسئله چون راكتانس ترتيب صفر بزرگ بود جريان بار (قبل از عيب) قابل مقايسه و حتي بزرگتر از جريان عيب بود در صورتيكه در مسائل واقعي و تحت شرايط عادي جريان بار نسبت به جريان عيب قابل صرفنظر كردن است.

۳-۷ بررسی نقش ترانسفورماتورها

استاندارد كلاسيك (اين نوع اتصال معمولاً در محاسبات بكار مي‌رود)

حالت(۱): ترانسفورماتور سه فاز $Y\Delta$ (اوليه ستاره ثانويه مثلث) را در نظر بگيريد كه سيم پيچي‌هاي هر فاز بصورت موازي در اوليه و ثانويه بهمد يگر كوپل مغناطيسي شده باشد. ترتيب پلاريته‌ها بصورت زير مي-باشد.



براساس نقاط سيم پيچ‌ها V_{AN} هم فاز با V_{bc} است

- با علامتگذاري ABC براي طرف Y مي‌توان به روشهاي مختلف علامتگذاري *abc* را براي طرف Δ انجام داد.

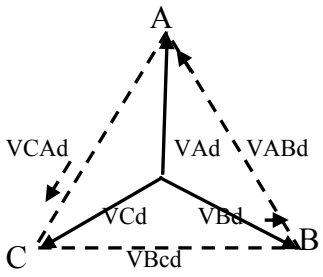
- در يك علامتگذاري كه در محاسبات زير مناسب باشد (حالت فوق):

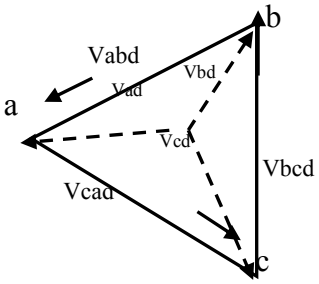
درحالت متقارن ترتيب مثبت ولتاژ فاز a نسبت به نقطه خنثي مجازي n در طرف $\Delta \Leftarrow +90°$ جلوتر است نسبت به ولتاژ فاز A نسبت به نقطه خنثي در طرف Y

در ترتيب منفي $-90°$ مي‌شود.

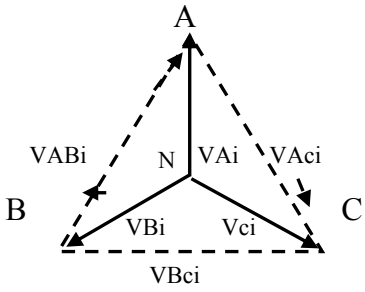
با فرض زيرنويس‌هاي تكي روي پارامترهاي فاز و دوبل براي پارامترهاي خط و نسبت تبديل واحد براي پارامترهاي خط ترانسفورماتور:

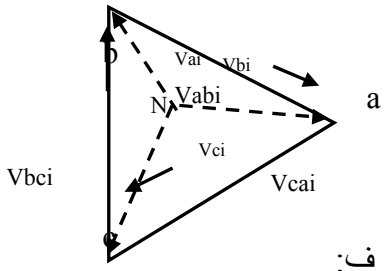
ولتاژ هاي ترتيب مثبت:





ولتاژهاي ترتيب منفي:

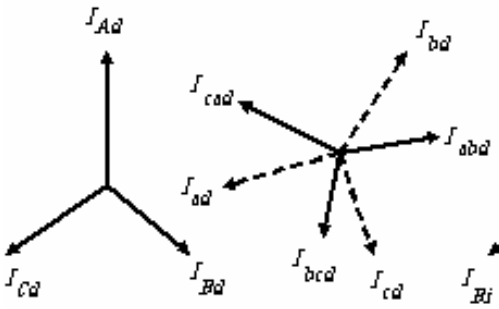




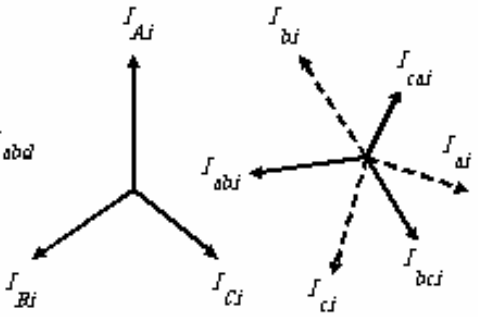
ارتباط بين مقادير فازي و خطي هر طرف:

$$y: V_{ABd} = \sqrt{3} V_{Ad} \angle 30^\circ \qquad y: V_{AB} i = \sqrt{3 V_{ai}} \angle -30^\circ$$

$$\Delta: V_{abd} = \sqrt{3} V_{ad} \angle 30^\circ \qquad \Delta: V_{abi} = \sqrt{3} V_{ai} \angle -30^\circ$$



جریانهای ترتیب مثبت



جریانهای ترتیب منفی

ارتباط بین مقادیر فازي و خطي در طرف Δ:

$$\Delta: \bar{I}_{abd} = \frac{\bar{I}_{ad}}{\sqrt{3}} \angle -150^\circ \qquad \Delta: \bar{I}_{abi} = \frac{I_{ai}}{\sqrt{3}} \angle 150^\circ$$

نتيجه كليI:

(اتصال فازهاي همنام در طرف ستاره و مثلث) $\begin{cases} V_{ad} = +jV_{Ad} & \text{ترتيب} \\ I_{ad} = +jI_{Ad} & \text{مثبت} \end{cases}$ $\begin{cases} \overline{V}_{ai} = -j\overline{V}_{Ai} & \text{ترتيب} \\ I_{a_i} = -j^{\lambda}\bar{I}_{Ai} & \text{منفي} \end{cases}$

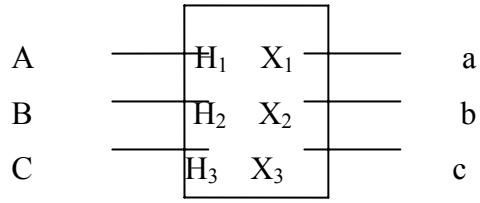
در صورتيكه جهت جريان عوض شود (از Δ به سمت λ) در آنصورت

۱- در فازورهاي ولتاژ تغييري حاصل نمي شود.

۲-فازورهاي جريان معكوس مي شوند.

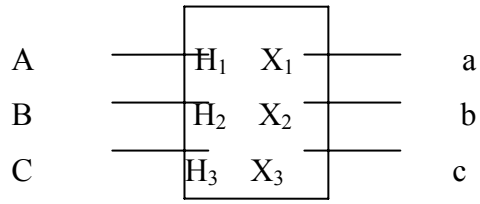
بنابراين در اينجالت ارتباط ما بين ولتاژهاو جريانهاي λ,Δ نسبت به هم بدون تغيير باقي مي ماند

حالت (۲): با علامتگذاري ثابت ABC در طرف y مي توان علامتگذاري جابجا شده abc را در طرف Δ بصورت $b \to a, c \to b, a \to c$ (American standard) انجام داد. (استاندارد Yd1)



در استاندارد آمريكائي در ترتيب مثبت فاز طرف ستاره ۳۰° از فاز طرف مثلث جلوتر است.

حالت (۳) در صورتيكه پلاريته طرف Δ باز هم معكوس شود (استاندارد Yd11)



در اينصورت V_{an} نسبت به V_{AN} داراي زاويه ۳۰°+ است(در ترتيب مثبت). اما فاز اول مثلث V_{bn} نسبت به فاز اول ستاره V_{AN} داراي زاويه ۳۰° است.

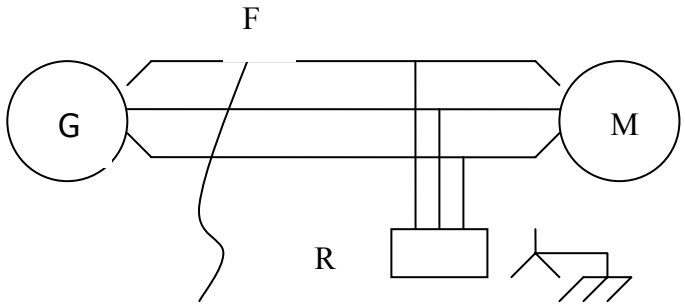
نتيجه كليII :

ترتيب مثبت:فاز اول مثلث $\begin{matrix} b(1) \\ a(2) \\ c(3) \end{matrix}\Big\}$ نسبت به فاز اول ستاره (A) ۳۰° عقب تر است (-۳۰°)

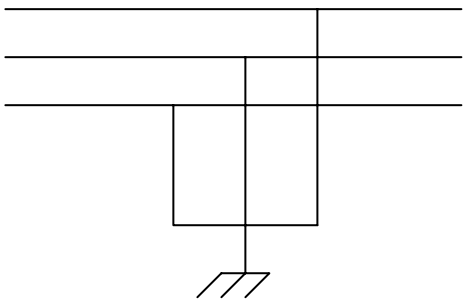
ترتيب منفي:فاز اول مثلث $\begin{matrix} b(1) \\ a(2) \\ c(3) \end{matrix}\Big\}$ نسبت به فاز اول ستاره (A) ۳۰° جلوتر است (+۳۰°)

در هر حالت نتيجه كلي II براي تمامي حالات (۱)، (۲)، (۳) برقرار است.

مثال) در شكل زير ژنراتور G داراي سيم پيچي بصورت اتصال λ بوده و نقطه صفر ژنراتور به سيم زمين وصل شده است. امپدانس هاي پريوديک اين ژنراتور در سه سيستم عبارتند از Z_{Go} Z_{Gi} Z_{Gd} اين ژنراتور مستقيماً يك بار سه فازه R را تغذيه مي كند و اين بار در سيستم هاي مستقيم و معكوس داراي امپدانس Z_{Rd} و در سيستم هموپولر امپدانس Z_{Ro} مي باشد. نقطه صفر اين بار به سيم صفر متصل شده است. ژنراتور مزبور علاوه بر بار R يك موتور كه داراي امپدانس Z_{md} در سيستم مستقيم و Z_{mi} در سيستم معكوس مي باشد را تغذيه مي كند. اگر اتصال كوتاه تكفاز درنقطه F خروجي ژنراتور بين فاز 1 و زمين رخ دهد جريانهاي ژنراتور، موتور و بار R را بدست آوريد.



۳-۸ اتصال كوتاه سه فاز بهم (با زمين و بدون زمين)



$V_1 = V_2 = V_3 = 0$

$J_1, J_2, J_3 = ?$

$V_2 = V_3 \Rightarrow v_i = v_d$

$\overline{V_2} = 0,\ v_i = v_d \Rightarrow V_0 + (a + a^2)V_i = 0 \rightarrow v_0 = v_i$

$\overline{V_1} = 0 \Rightarrow V_0 + V_i + V_d = 3\overline{V_0} = 3\overline{V_0} = 3V_i = 3Vd = 0$

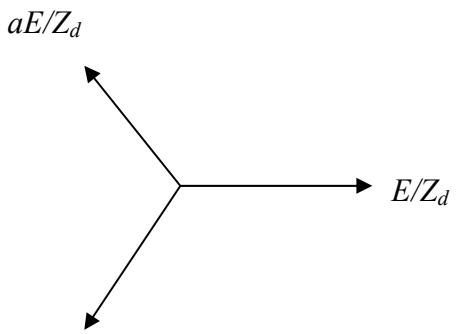
از روش ماتريسي زودتر به اين نتيجه مي توان رسيد.

$$\begin{cases} E = V_d + Z_d J_\partial & \rightarrow \\ 0 = V_i + Z_i J_i & \rightarrow \\ 0 = V_0 + Z_0 J_0 & \rightarrow \end{cases} \begin{cases} J_d = \dfrac{E}{Zd} \\ J_i = 0 \\ J_0 = 0 \end{cases} \qquad \begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dfrac{E}{Z_d} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E/Zd \\ a^2 E/Zd \\ a\,E/Zd \end{pmatrix} \quad |J_1| = |J_2| = |J_3| = J_{3\phi} = \left|\frac{E}{Z_d}\right|$$

$$J_1\phi, \mathrm{LG} = \frac{3E}{\Sigma Z}$$

$$V_0 = V_i = V_d = 0$$



<u>در سر ژنراتور:</u>

سه فاز $J_1 = \dfrac{E}{\bar{Z}_d} = \dfrac{3E}{3\bar{Z}_d}$ $>$ $J_1 = \dfrac{}{(\bar{Z}_0 + \bar{Z}_i + \bar{Z}_d) + 3\bar{Z}_f} \rightarrow \bar{Z}_f = 0 \rightarrow \dfrac{3E}{\Sigma\bar{Z}}$ تك فاز با زمين

$$Z = \bar{Z}_d + \bar{Z}_i + \bar{Z}_0 = 2\bar{Z}_d + \bar{Z}_0$$

<u>در خط انتقال:</u>

سه فاز $J_1 = \dfrac{E}{\bar{Z}_d} = \dfrac{3E}{3\bar{Z}_d}$ $<$ $J_1 = \dfrac{3E}{(\bar{Z}_0 + \bar{Z}_i + \bar{Z}_d) + 3\bar{Z}_f} \rightarrow \bar{Z}_f = 0 \rightarrow \dfrac{3E}{\Sigma\bar{Z}}$ تك فاز با زمين

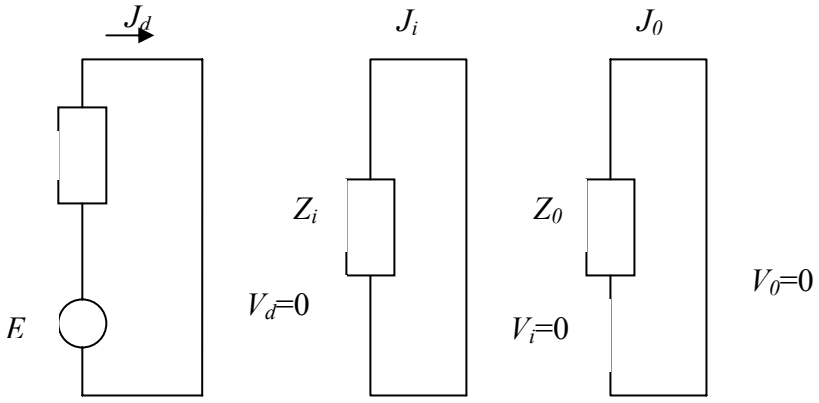
پس در ژنراتور جريان اتصال كوتاه تكفاز بيشتر از جريان اتصال كوتاه سه فاز است (وقتي نقطه صفر ژنراتور بدون امپدانس زمين شده باشد $(\bar{Z}_n = 0)$ شديدتر است $(\bar{Z}_0 = \bar{Z}_{G0} + 3\bar{Z}_n)$ $\left(\begin{cases} solidly \\ grounded \end{cases}\right)$. اما در خط انتقال جريان اتصال كوتاه تكفاز كمتر از جريان اتصال كوتاه سه فاز است.

در ژنراتور داريم: $\bar{Z}_0 \langle\langle \bar{Z}_d = \bar{Z}_i$ در صورتي كه در خط انتقال داريم: $\bar{Z}_0 \rangle\rangle \bar{Z}_d = \bar{Z}_i$

در صورتيكه نقطه خنثي ژنراتور با امپدانسي زمين شده باشد بخاطر بزرگ بودن امپدانس زمين كننده (Z_n) و تاثير گذاري آن بر روي امپدانس ترتيب صفر (Z_0) در اينصورت $\bar{Z}_0$ در مقايسه با $\bar{Z}_i, \bar{Z}_d$ قابل ملاحظه بوده پس در اينحالت براي عيب سر ژنراتور خواهيم داشت:

$$\bar{J}_{1,1\phi} < \bar{J}_{1,3\phi}$$

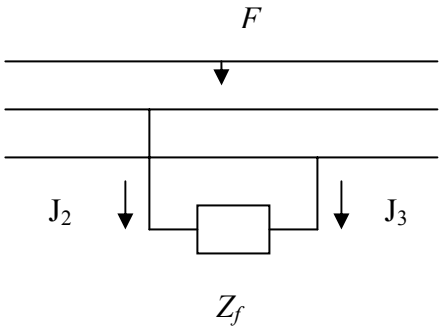
شماي مدار معادل تونن شبكه مستقيم اتصال كوتاه هموپولر و معكوس مدار باز



اگر اتصال سه فاز بدون زمين باشد داريم:

$$\begin{cases} V_1 = V_2 = V_3 \\ J_1 + J_2 + J_3 = 0 \end{cases} \xrightarrow{\text{نتايج}} V_1 = V_2 = V_3 = 0$$

۳-۱۰ اتصال كوتاه دوفاز به هم بدون زمين LINE TO LINE (LL) FAULT



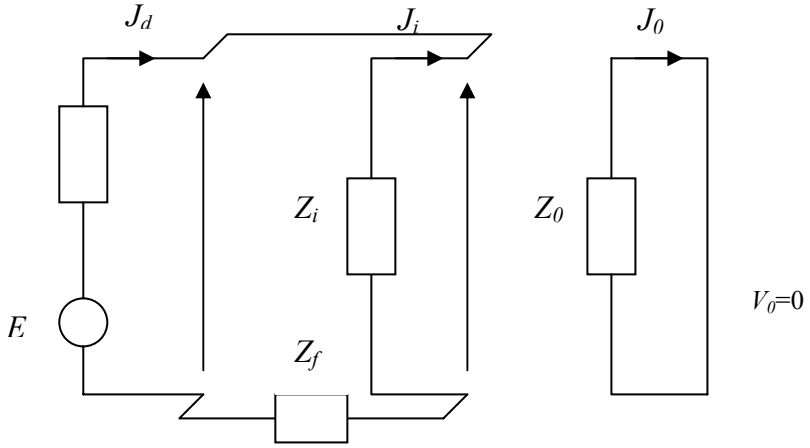
$$\begin{bmatrix} J_1 = 0 \\ J_2 = ? \\ J_3 = -J_2 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} J_{10} + J_{1i} + J_{1d} = 0 \\ V_2 - V_3 = Z_f J_2 \end{matrix}$$

$$\begin{bmatrix} J_{10} \\ J_{1i} \\ J_{1d} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ J_2 \\ -J_2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{matrix} J_{10} = 0 \\ J_{1i} = -J_{1d} = 3(a^2 - a)J_2 \end{matrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{11} \\ V_{1d} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_2 - Z_f J_2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} 3V_{10} = V_1 + 2V_f - Z_2 J_2 \\ 3V_{ll} = V_1 + (a^2 + a)V_2 - a\,Z_f J_2 \\ 3V_{1d} = V_1 + (a + a^2)V_2 - a^2 Z_f J_2 \end{cases}$$

$$3(V_{1d} + V_{li}) = (a - a^2)Z_f J_2 = +j\sqrt{3}Z_f J_2$$

$$\begin{cases} -J_{1d} = \frac{1}{3}(a^2 - a)J_2 \\ J_2 = J_{10} + a^2 J_{1i} + aJ_{1d} = (a^2 - a)J_{1d} = -j\sqrt{3}J_{1d} \end{cases}$$



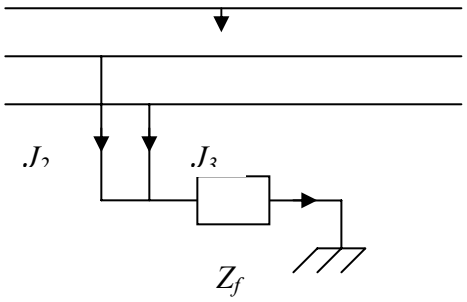
$$\begin{cases} V_{1d} - V_{1i} = Z_f J_{1d} \\ J_0 = 0 \rightarrow \overline{V_0} = 0 \end{cases}$$

$$J_{1d} = \frac{E}{Z_{1i} + Z_{1d} + Z_f}$$

$$J_2 = \frac{-j\sqrt{3}E}{Z_{1i} + Z_{1d} + Z_f} = -J_3$$

$$\left.\begin{aligned} V_{10} &= 0 - Z_{10}J_{10} = 0 \\ V_{1d} &= E - Z_{1d}J_{1d} = \frac{(Z_{1i} + Z_f)E}{Z_{1i} + Z_{1d} + Z_f} \\ V_{1i} &= 0 - Z_{1i}J_{1i} = Z_{1i}J_{1d} = \frac{Z_{1i}E}{Z_{1i} + Z_{1d} + Z_f} \end{aligned}\right\} \rightarrow \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

۱۱-۳ اتصال کوتاه دو فاز به هم و به زمین DOUBLE LINE TO GROUND (LLG) FAULT



$$J_1 = 0 \rightarrow J_{10} + J_{1i} + J_{1d} = 0$$

$$\begin{bmatrix} J_{10} \\ J_{1i} \\ J_{1d} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ J_2 \\ J_3 \end{bmatrix}$$

$$3J_{10} = J_2 + J_3$$

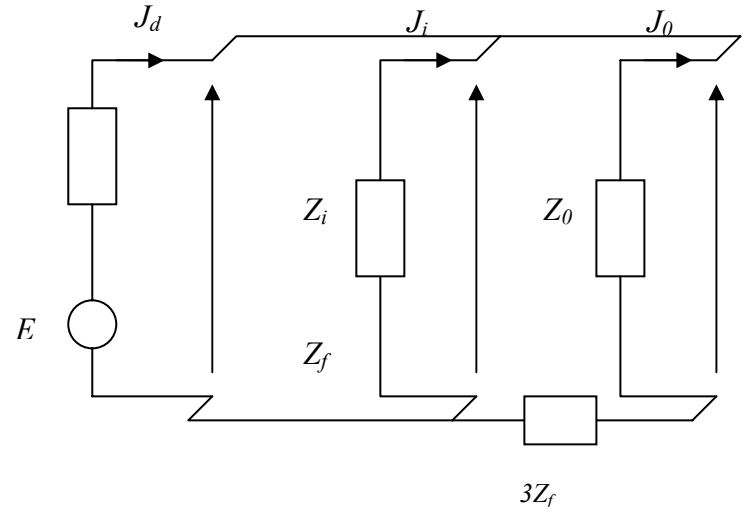
$$V_2 = V_3 = Z_f(J_2 + J_3) = 3Z_f J_{10}$$

$$\begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{1i} \\ V_{1d} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \qquad v_{10} = \frac{1}{3}(v_1 + 2v_2)$$

$$v_{1d} = v_{i1} = \frac{1}{3}(v_1 + (a + a^2)v_2)$$

$$V_{10} - V_{1d} = \frac{1}{3}(2 - a - a^2)V_2 = V_2 = 3Z_f J_{10}$$

$$V_{10} = V_{1d} + 3Z_f J_{10}$$



$$J_{1d} = \frac{E}{Z_{1d} + Z_{1i}11(Z_{10} + 3Z_f)}$$

$$J_{10} + J_{1i} + J_{1d} = 0 \Rightarrow J_{1i} + J_{1d} = -J_{1o}$$

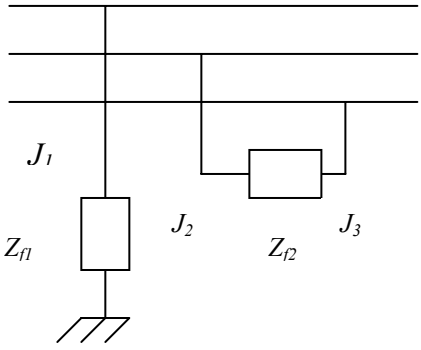
$$E - Z_{1d}J_{1d} = Z_{1i}(J_{1d} + J_{10}) \rightarrow J_{10} = \frac{E}{Z_{1i}} - \left(\frac{Z_{1d}}{Z_{1i}} + 1\right)J_{1d}$$

$$J_{2N} = J_2 + J_3 \quad = 3J_0$$

$$J_2 = J_0 + aJ_i + a^2J_d$$

$$J_3 = J_0 + a^2J_i + aJ_d$$

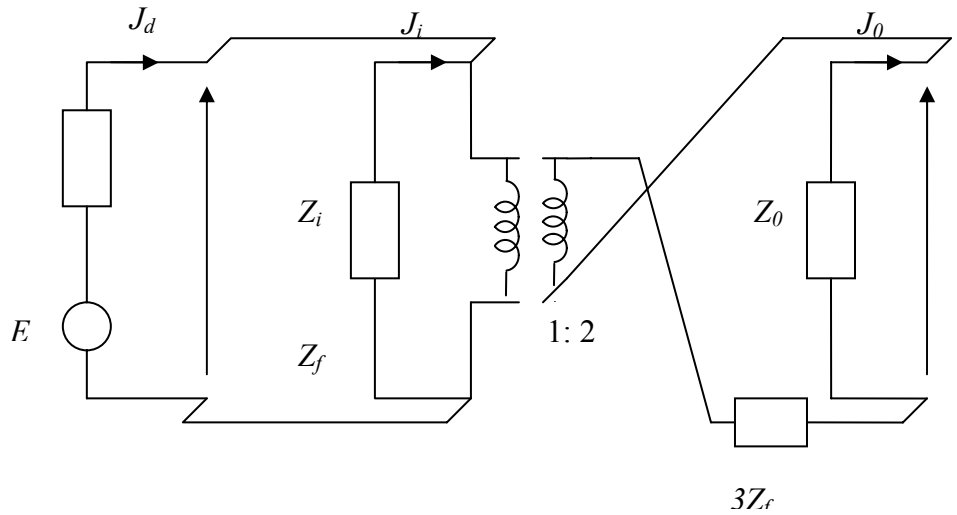
۳-۱۲- عیب دو فاز بهم بدون زمین و فاز سوم به زمین LL-LG



$$\overline{V}_1 = \overline{Z}_{f_1}\overline{I}_1$$

$$\overline{V}_2 - \overline{V}_3 = \overline{Z}_{f_{23}}\overline{I}_2$$

$$\overline{I}_2 = -\overline{I}_3$$



مثال – يك توربو ژنراتوري با قدرت اسمي 100 MVA ولتاژ نامي 15 KVوجود دارد. براي اين ژنراتور داريم:

$S_n = 100MVA$
$U_n = 15kV$
$X'd = 25\% \quad X_i = 20\%$
$X_b = \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{U_b^2}{Sb} = \frac{15k^2}{100M} = 2.25\Omega$
$X'_d = \frac{25}{100} \times 2.25 = 0.56\Omega \qquad X_i = \frac{20}{100} \times 2.25 = 0.45\Omega$

مثال - ژنراتوري با قطب هاي برجسته به قدرت نامي 10 MVA به ولتاژ خطي 10KV مفروض است براي اين ژنراتور داريم:

$X'_d = 1.5\Omega \; X_i = 2.5\Omega \quad X_d = 3.5\Omega$

اگر نقطه صفر اين ژنراتوربه وسيله راكتانس 100/3 اهمي زميني شده باشد مطلوب است

الف- راكتانس گذرا و معكوس و هموپولر ماشين به درصد (پريونيت)

ب- امپدانس هموپولر آلترناتو به اهم

ج - در صورت وقوع يك اتصال كوتاه سه فاز بار زمين در خروجي هاي آلترناتور مقدار جريان اتصال كوتاه

د- اگر اتصالي از نوع تكفاز با زمين باشد جريان اتصالي چند پريونيت و چند آمپر مي باشد.

نقطه صفر ژنراتور بصورت مستقیم زمین نشده است و $\overline{Z}_n$ در مقایسه $\overline{Z}_i, \overline{Z}_d$ قابل ملاحظه است پس $J_{1,LG} < J_{1,LLL}$ (درسر ترمینال ژنراتور) مي باشد. اما درحالت اتصال مستقیم نقطه صفر ژنراتور $\overline{Z}_n = 0$ که درآنصورت $Z_0 << Z_d, Z_i$ و $J_{1,LG} > J_{1.LLL}$ (در سر ترمینال ژنراتور) مي باشد.

$$\overline{Z}_f = 0$$

$$X_b = \frac{U_b^2}{S_b} = \frac{10k^2}{10M} = 10\Omega$$

الف)

$$X_0 = \frac{1.5\Omega}{10\Omega} = .15pu$$

$$X_i = .25pu \qquad x'_d = 35pu$$

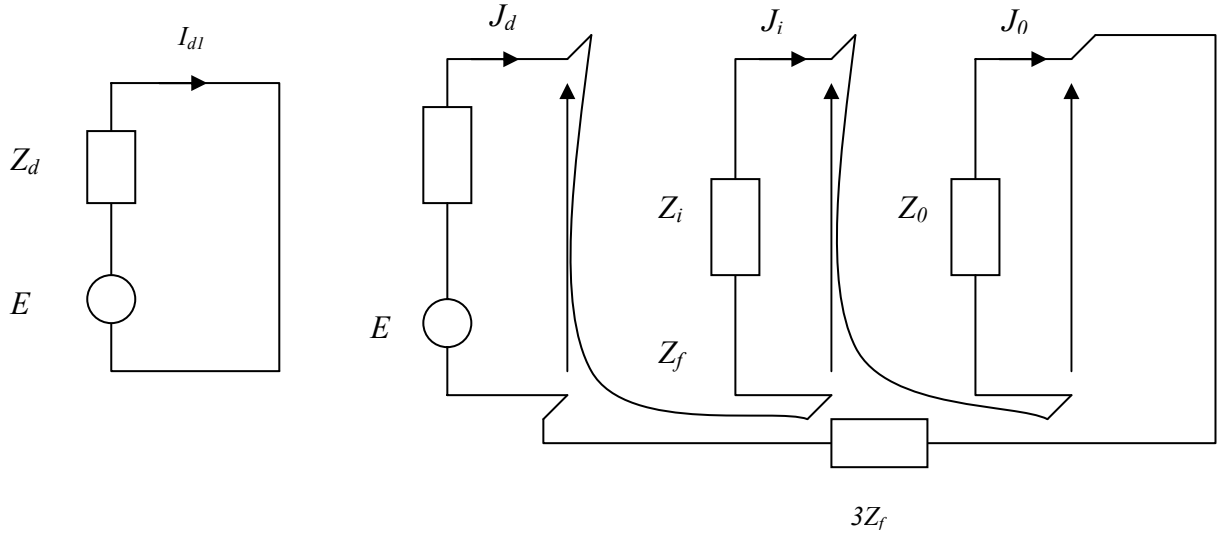
ب)

$$X_0 = X_0 + 3X_\circ = 15 + 3\frac{100/3}{10} = 10.15pu$$

ج) در اتصال کوتاه سه فاز:

$$\bar{I}_{123} = \overline{F}\ \bar{I}_{oid}$$

$$\bar{I}_{1,LLL} = I_{d1} = \frac{E}{Z_d} = \frac{U_b}{JX'd} = \frac{10K}{J3.5\Omega} = -j2.857kA \qquad \bar{I}_{2,LLL} = a^2 E / Z_d, \bar{I}_{3,LLL} = aE / Z_d$$



اتصال مستقیم $Z_n = 0$

$$I_{1,LG} = \frac{3E}{(Z_d + Zi + Z_0) + \overline{Z}_f} = \frac{3 \times 10k}{J(3.5 + 2.5 + 1.5) + 0} = -j3.999KA > I_{1,LLL}$$

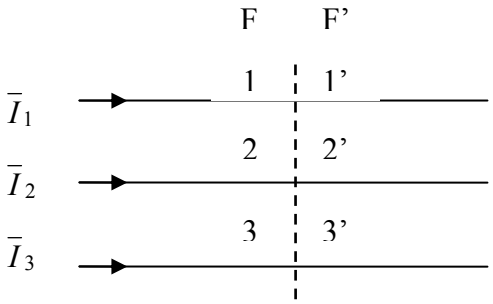
$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}U_b} = \frac{10M}{\sqrt{3}.10k} = 577.35A \rightarrow I_{11} = \frac{I_{11}}{I_b} = j6.92\ pu$$

اتصال با امپدانس $Z_n = \frac{100}{3} \rightarrow 100\Omega$

$$I_{1,LG} = \frac{3E}{j3.5 + j2.5 + (100j + j1.5)} = -j0.278KA < I_{1,LLL}$$

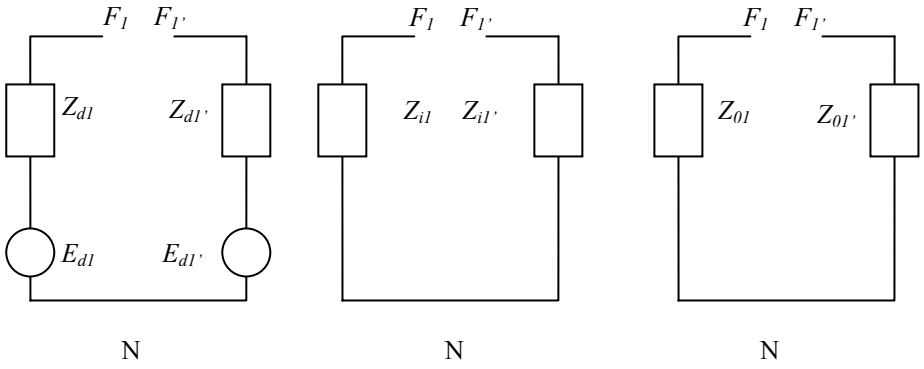
۱۳-۳ عیب قطع شدگي (قطع فازها) Open Conductor Faults (Series Type Faults)

اين عيوب از نوع عيوب سري در خط انتقال يا هادي هستند. در اينحالت بايستي جريان خطوط انتقال و ولتاژهاي سري معين نقاطع قطع شده محاسبه شوند. بردارهاي جريان وولتاژ در اينحالت عبارتند از:

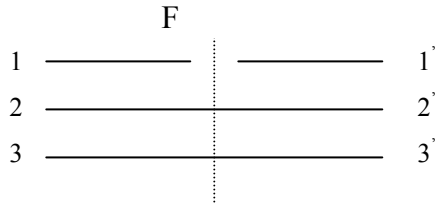


$$\bar{I}_{oid}=\begin{bmatrix}\bar{I}_{01}\\ \bar{I}_{i1}\\ \bar{I}_{d1}\end{bmatrix} \quad \bar{V}_{oid}\begin{bmatrix}\bar{V}_{011'}\\ \bar{V}_{i11'}\\ \bar{V}_{d11'}\end{bmatrix} \quad \bar{I}_{123}=\begin{bmatrix}\bar{V}_{11'}\\ \bar{V}_{22'}\\ \bar{V}_{33'}\end{bmatrix} \quad \bar{V}_{123}=\begin{bmatrix}\bar{V}_{11'}\\ \bar{V}_{22'}\\ \bar{V}_{33'}\end{bmatrix}$$

شبكه هاي ترتيب صفر، معكوس و مستقيم (مدارات معادل تونن) برای فاز شماره ۱ به صورت زير است.



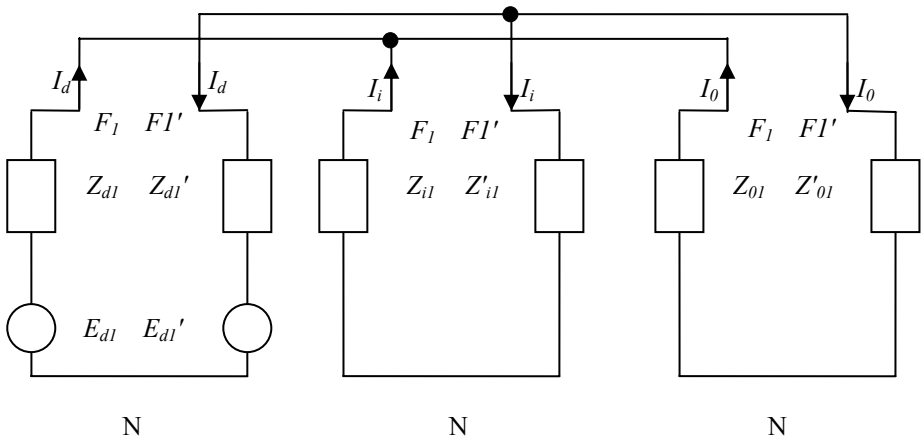
حالت اول – قطع يك فاز (فاز ۱)



$$\bar{I}_1 = 0$$
$$\bar{V}_{22} = \bar{V}_{33'} = 0$$

$$\begin{bmatrix} V_{011'} \\ V_{i11'} \\ V_{d11'} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & 1 \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \overline{V}_{11'} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} I_{01} \\ I_{i1} \\ I_{d1} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ \bar{I}_2 \\ I_3 \end{bmatrix}$$

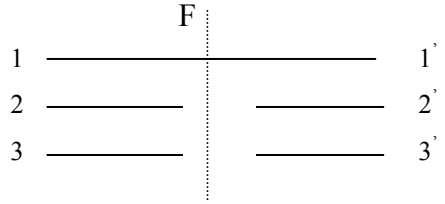
$$\overline{V}_{0_{11'}} - \overline{V}_{i_{11'}} = \overline{V}_{d_{11'}} = \frac{1}{3}\overline{V}_{11'} \qquad \bar{I}_{01} + \bar{I}_{i1} + \bar{I}_{d_1} = 0$$



برای فا ز شماره ۱ داریم:

$$\begin{cases} \overline{Z}_d = \overline{Z}_{d1} + \overline{Z}_{d1'} \\ \overline{Z}_i = \overline{Z}_{i1} + \overline{Z}_{i1'} \\ \overline{Z}_0 = \overline{Z}_{01} + \overline{Z}_{01'} \end{cases} \quad \bar{I}_d = \frac{\overline{E}_{d1} - \overline{E}_{d1'}}{\overline{Z}_d + (\overline{Z}_i \parallel \overline{Z}_0)} \quad \bar{I}_i = -\bar{I}_d\left(\frac{\overline{Z}_0}{\overline{Z}_i + \overline{Z}_0}\right) \quad \bar{I}_0 = -I_d\left(\frac{\overline{Z}_i}{\overline{Z}_i + \overline{Z}_0}\right)$$

حالت دوم – قطع دو فاز (فاز ۲ و ۳)

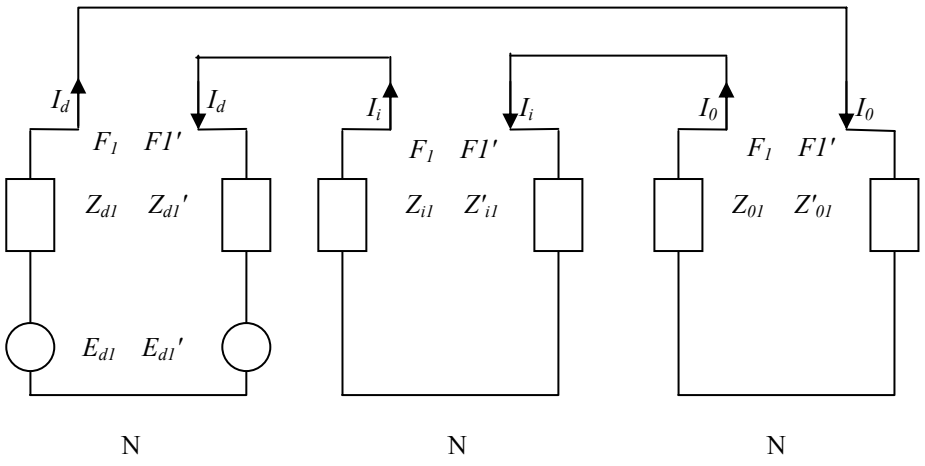


$$\overline{V}_{11'} = 0$$
$$\bar{I}_2 = \bar{I}_3 = 0$$

تبدیل معکوس

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_{0_{11'}} \\ \overline{V}_{i_{11'}} \\ \overline{V}_{d_{11'}} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} o \\ \overline{V}_{22'} \\ \overline{V}_{33'} \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} \bar{I}_{01} \\ \bar{I}_{i1} \\ \bar{I}_{d1} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

تبدیل معکوس $\bar{I}_{01} = \bar{I}_{id} = \bar{I}_{d1} = \frac{1}{3}\bar{I}_1$ $\qquad$ تبدیل مستقیم $\overline{V}_{011'} + \overline{V}_{i11'} + \overline{V}_{d_{11'}} = \overline{V}_{11'} = 0$



$$\overline{Z}_d = \overline{Z}_{d1} + \overline{Z}_{d1'} \qquad \overline{Z}_i = \overline{Z}_{i1} + \overline{Z}_{i1'} \qquad \overline{Z}_0 = \overline{Z}_{01} + \overline{Z}_{01'}$$

براي فاز ۱داريم:

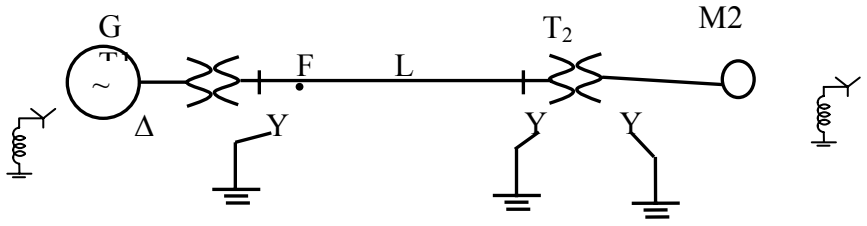
$$\bar{I}_d = \bar{I}_i = I_0 = \frac{\overline{E}_{d1} - \overline{E}_{d1'}}{\overline{Z}_d + \overline{Z}_i + \overline{Z}_0}$$

۳-۱٤ عيب هاي تركيبي

۱- سري (قطع فاز)

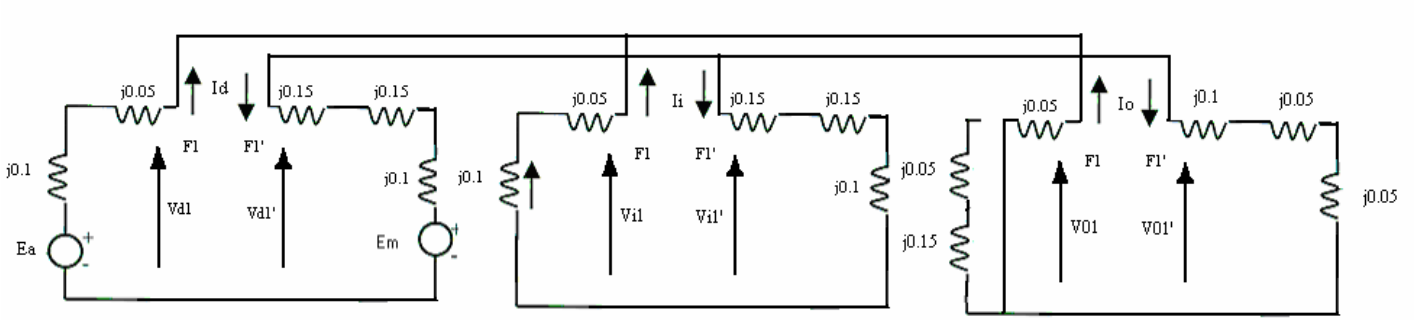
۲- موازي(اتصال كوتاه)

مثال) عيب قطع فاز: در نقطه F روي شبكه زير



$$G, M : X_d = X_i = j\,0.1 pu \quad x_0 = j0.05 X_\eta = j0/05$$
$$T_1, T_2 : X_d = X_i = X_0 = j0.05 pu$$
$$L : X_d = X_i = j0.15 \quad X_0 = j1$$

فرض شرايط كاركرد اوليه: $V_{tm} = 1.0 \propto 0 \quad I_L = 1.0 \propto 0 pu$



$$\begin{cases} E_a = V_{Tm} + I_L(j0.05 + j0.15 + j0.05 + j0.1) = 1 + j0.35 = 1.059\angle 19.29\, pu \\ E_m = V_{Tm} - I_L(j0.1) = 1 - j0.1 = 1.005\angle -5.71 pu \end{cases}$$

$$\begin{cases} \overline{Z}_d = \overline{Z}_i = j(0.1 + 0.05 + 0.15 + 0.05 + 0.1) = J0.95 \\ \overline{Z}_0 = j(0.05 + 1 + 0.05 + 0.05) = j1.15 \end{cases}$$

$$\bar{I}_d = \frac{Ea - E_M}{Z_d + (\overline{Z}_i \parallel \overline{Z}_0)} = \frac{j0.45}{j0.773} = 0.582 \rightarrow \begin{cases} \bar{I}_i = -\bar{I}_d \dfrac{Z_0}{Z_i + Z_0} = -0.418 \\ \bar{I}_0 = -\bar{I}_d \dfrac{Z_i}{Z_i + Z_0} = -0.164 \end{cases}$$

$T1$(Yطظر)$I_{dT1} = \bar{I}_d \quad \bar{I}_{iT_1} = \bar{I}_i \quad \bar{I}_{0T_1} = \bar{I}_0$:1فاز

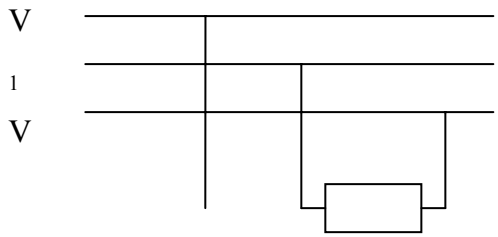
$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_i \\ I_d \end{bmatrix}_{T_1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.9\angle -105.9 \\ 0.9\angle 105.9 \end{bmatrix}$$

T_1(Δطرف)$\mathrm{I_{dG}} = jI_d = j0.582 \quad I_{iG} = -jI_i = j0.418 \quad I_{0u} = 0$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix}_G = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}_G = \begin{bmatrix} 1\angle 90 \\ 0.52\angle -74.1 \\ 0.52\angle -105.9 \end{bmatrix}$$

۳-۱۵ انواع عيوب نامتعادلي (بر اثر اتصال بار نامتعادل)

انواع اتصال ها بررسي شد. وقتي بار نامتعادل باشد بايد تاثير اين نامتعادلي را حساب كرد. يك بار تكفازي را بين دو فاز تغذيه كرده و فاز سوم را آزاد مي گذاريم.



مثال – قطار برقي دو فاز

Z_n

$$\begin{cases} V_2 - V_3 = Z_n I_n = Z_n J_2 \\ J_2 + J_3 = 0 \quad J_i = -J_d \\ J_1 = 0 \qquad J_0 = 0 \end{cases}$$

قبل از نامتعادلي $V_0=0,V_i=0$ بود ولي در حالت نامتعادلي V_i مقداري غير صفر بدست آمده است. مقدار نامتعادلي شبكه به صورت زير بدست مي آيد.

$$\begin{cases} V_0 = 0 \\ V_i = \dfrac{+EZ_i}{Z_n + Z_d + Z_i} \\ V_d = E(Z_n + Z_i)/Zn + Zd + Z_i \end{cases}$$

$$\varepsilon_v = \frac{V_i}{V_d} = \frac{Z_i}{Z_i + Z_n} \approx \frac{Z_i}{Z_n}$$

Z_i در مقابل Z_n خيلي كوچك است.

اگر Z_n طوري باشد كه نسبت به امپدانس شبكه امپدانس بزرگي بوده و از Z_o شبكه بيشتر باشددرصدافت در طول شبكه كم و ولتاژ رسيده به دو سر بار در حد معقولي باشد. Z مدار همان Z_d است كه $Z_d = Z_i$.

براي خطوط هوايي و ترانس قدرت تحويلي به باربرابر است با:

$$\overline{S}_n = \overline{V}_n . I^*_n$$

$$S_n = (V_2^{\overline{V}_n} - V_3)\frac{(V_2 - V_3)^*}{Z_n^*} = \frac{|V_n^2|}{Z_n^*}$$

اگر در اين شبكه عوض بار يك اتصال كوتاه سه فاز داشته باشيم:

$$I_{cc3N} = \frac{E}{Zd} = \frac{Un/\sqrt{3}}{Zd}$$

قدرت اتصال کوتاه هر قدر بیشتر باشد جریان اتصال کوتاه سه فاز نیز بزرگ خواهد بود

$$S_{cc} = \sqrt{3}U_n.I^*_{cc3}$$

قدرت اتصال کوتاه برابر است با ولتاژ نامي در نقطه اتصال کوتاه در جریان اتصال کوتاه(بصورت سه فاز) لذا هر قدر ولتاژ نامي بالاتر، قدرت اتصال کوتاه شبکه بیشتر است.

$$S_{cc} = \sqrt{3}U_n.\left(\frac{Un/\sqrt{3}}{Zd}\right) = \frac{|V_n^2|}{Z_d^*}$$

در بالاترین ولتاژ قدرت اتصال کوتاه بیشتر است. و براي بالا بردن قدرت اتصال کوتاه شبکه باید Zd را پائین آورد که این کار باید بصورت مصنوعي انجام شود. چون شبکه بصورت سلفي است با گذاشتن خازنهاي سري این کار انجام مي شود(براي بالا بردن قدرت اتصال کوتاه شبکه و پایداري شبکه). خازنهاي موازي براي اصلاح ضریب قدرت مدار استفاده مي شوند. اگر کل شبکه از خطوط هوایي و ترانس تشکیل شده باشد داریم: $Z_i=Z_d$

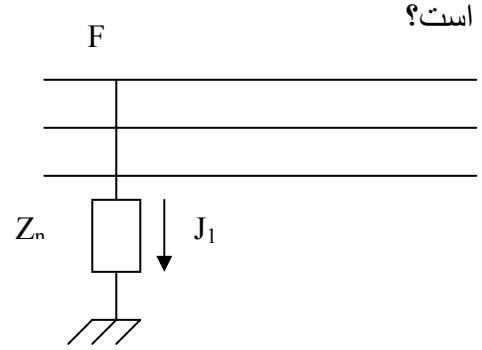
$$\varepsilon_v = \frac{Zi}{Zn} = \frac{Zd}{Zn} \rightarrow \varepsilon_r^* = \frac{Z_d^*}{Z_n^*} = \frac{|V_n^2|/scc}{|V_n^2|/s_n} = \frac{Sn}{S_{cc}}$$

نتیجه:

در صد نامتعادلي ولتاژ در شبکه مثل قدرت تکفاز تغذیه شده در آن نقطه، به قدرت اتصال کوتاه سه فاز بستگي دارد. هر قدرقدرت اتصال کوتاه شبکه در نقطه نامتعادلي بیشتر باشد درصد نامتعادلي ولتاژ کمتر است. هر گاه توان بار(Sn) که بطور تکفاز تغذیه میکنیم کمتر باشد، درصد نامتعادلي ولتاژ شبکه کمتر خواهد بود. پس براي پائین آوردن نامتعادلي باید بار نامتعادل در جایي به شبکه وصل شود که در آنجا قدرت اتصال کوتاه بیشتر است (در ولتاژهاي بالا) و یا قدرت کمتري از شبکه بخواهد. ولي اگر در آن واحد، سه بار نامتعادل داریم(سه قطار) میتوان آنها را در شبکه بین سه فاز پخش کرده و در صد نامتعادلي شبکه راپائین آورد.یکي از عوامل پائین آوردن درصد نامتعادلي شبکه بستن سلف و خازن روي خطوط (۲و۱) و(۳و۱) است که ازدو فاز ۲ و ۳ بار تکفاز گرفته ایم. استانداردهاي مختلف درصد نامتعادلي بین ۱/۵%-۱ را قبول مي کنند.

$$\varepsilon_i = \frac{J_i}{J_n} = \frac{\dfrac{-E}{Z_n + Z_d + Z_i}}{\dfrac{(a^2 - a)E}{Z_n + Z_d + Z_i}} = \frac{1}{a - a^2} \rightarrow |\varepsilon_i| = \frac{1}{\sqrt{3}} = 58\%$$

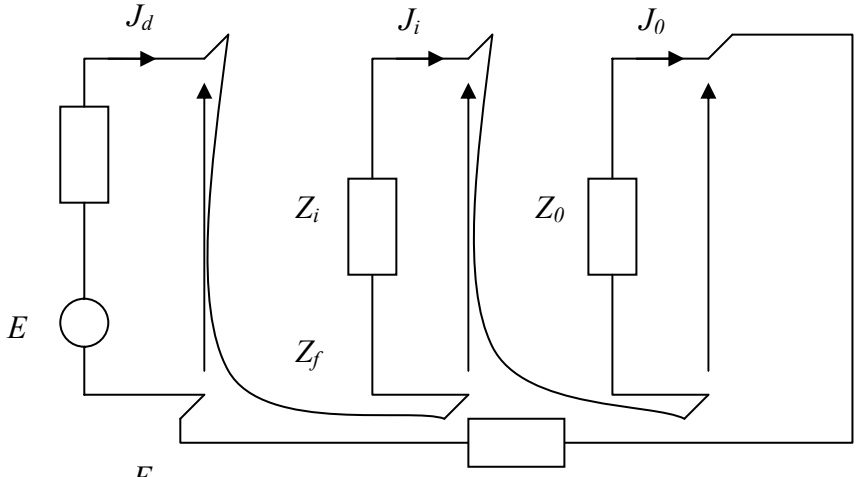
مثال:درصد نامتعادلي ولتاژ و جريان در شكل زيرچقدر است؟



$$\begin{cases} J_2 = 0 \\ J_3 = 0 \\ V_1 = ZnJ_1 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} J_{01} \\ J_{i1} \\ J_{d1} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} J_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow J_{01} = J_{i1} = J_{d1} = \frac{1}{3}J_1$$

$$V_{01} + V_{i1} + V_{d1} = Z_n I_1 = 3ZgJ_{d_1} \qquad \begin{cases} E = V_d + Z_d Id \\ 0 = V_i + Z_i I_i \\ 0 = V_0 + Z_0 I_0 \end{cases}$$



$$J_{d_1} = J_{i1} = I_{01} = \frac{E}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z_n} \quad I_1 = 3I_{d_1} = 3I \quad 3Z_f$$

$$V_{d1}E - Z_d I_{d1} = \frac{(Z_i + Z_0 + 3Z_n)E}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z_n}$$

$$V_{i1} = Z_i I_{i1} = \frac{Z_i E}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z_n} V_{01} = Z_0 I_{01} = \frac{Z_{01} E}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z_n}$$

$$\varepsilon_V = \frac{V_i}{V_d} = \frac{Z_i}{\overline{Z}_i + \sum_0 + \overline{Z}_y} \approx \frac{Z_i}{3Z_y} \approx \frac{\overline{Z}_d}{3\overline{Z}_y}$$

$$\varepsilon_i = \frac{I_i}{I_n} = \frac{I_i}{I_1} = \frac{I_i}{3I_i} = \frac{1}{3} = 33.33\%$$

مثال - يك توربو ژنراتور با مشخصات زير مفروض است:

Exam 11.1/342

ژنراتور با اتصال λ بوده و نقطه صفر زمين شده همچنين با قدرت نامي 10MVA و ولتاژ نامي 13.8KV مي باشد. بر مبناي مشخصات اسمي مقادير راكتانس هاي ژنراتور عبارتند از:

$X''_d = X_i = 15\% pu$
$X_0 = 0.05 pu$

مطلوب است :

الف) نسب جريان اتصال كوتاه فوق گذرا براي اتصال تكفاز به زمين و سه فاز به زمين در خروجي ژنراتور

ب- اگر اتصال كوتاه دو فاز داشته باشيم اين نسبت و جريان اتصال چقدر خواهد بود؟

ج) براي اينكه جريان فوق گذاري عيب تكفاز به زمين و سه فاز با زمين مساوي گردند چه مقدار راكتانس بايد بين نقطه صفر ژنراتور و سيم زمين قرار گيرد.

الف - $I_{ccN} = \dfrac{3E}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z_n} \rightarrow \qquad I_0 = I_i = I_d = \dfrac{E}{\sum X}$ در اتصال كوتاه

تكفاز

تكفاز $I_{cc1N} = 3I_d$ $I_{cc1\phi} = \dfrac{3E}{Z_d + Z_i + Z_0} \rightarrow$ اگر بدون امپدانس زمين شده باشد.

$I_{cc1\phi} = I_0 + I_i + I_d$ در يك فاز، تنها از فاز اتصالي جريان كشيده شده و از طريقF بزمين مي‌رود.

$I_{3L} = \dfrac{E}{Z_d} = \dfrac{3E}{3Zd} \rightarrow \; I_d = \dfrac{E}{X_d}, I_{cc3\phi} = I_d$ در اتصال كوتاه سه فاز مي گذرد

در سه فاز از هر فاز اين جريان كشيده شده $aI_d, a^2 I_d, I_d$ ولي مجموعه برداري اينها كه صفر است

$$\frac{I_{CC1\phi}}{I_{CC3\phi}} = \frac{3Z_d}{\sum Z} = \frac{3X''_d}{X''_d + X_i + X_0} = \frac{3 \times 0/15}{0/15 + 0/15 + 0.5} = 1.2857$$

در اين شرط $I_{LG} > I_{3L}$

ب)

$$\text{در اتصال كوتاه دو فاز} \begin{cases} I_{LL1} = 0 \\ I_{LL2} \\ I_{LL3} \end{cases} = \frac{\sqrt{3}E}{Z_d + Z_i} \leftarrow (I_d = \frac{E}{Z_d + Z_i} \; I_i = -I_d \;\; I_0 = 0)$$

$$\frac{I_{LL}}{I_{3L}} = \frac{\sqrt{3}\dfrac{E}{X''_d + Xi}}{\dfrac{E}{X''d}} = \frac{\sqrt{3}X''_d}{X''_{\,d} + X_i} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0/86$$

$I_{ll} < I_{3L}$

ج)

$$I_{LG} = I_{3L} \rightarrow \frac{3E}{X''_d + X_i + x_0 + 3X_n} = \frac{3E}{3X''_d}$$

$$X''_d + X_i + X_0 + 3X_n = 3X''_d \rightarrow X_n = \frac{2X''_d - X_i - X_0}{3}$$

بوبين پترسون جريان اتصال كوتاه نامتعادل را كم مي كند و در كار عادي شبكه دخالتي نمي كند.

$$X_n = 0.33pu \rightarrow X = 0.33 \times 19.044 = 0.63\Omega$$

$$Z_b = \frac{Un^2}{sb} = 19.044\Omega$$

مثال - يك ژنراتور با قدرت اسمي ۱۰ MVA مفروض است راكتانس هاي اين ژنراتور عبارتند از:

$$X''_d = X_i = pu \qquad X_0 = 0.5pu$$

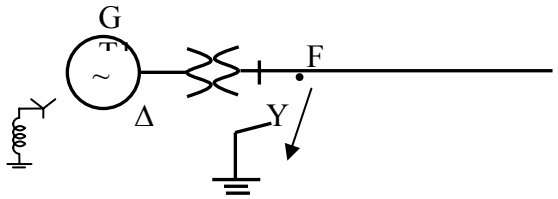
مركز ستاره اين ژنراتور از طريق راكتانس $X = 0.381\Omega$ به زمين وصل شده است در ژنراتور در حالت بي باري 6.9kv را توليد مي كند اگر اتصال كوتاه تك فاز به زمين در يكي از فازهاي ژنراتور بوقوع بپوندد جريان فوق گذرا را در فازمعيوب بدست آوريد.

ب- اگر اين ژنراتور را به ترانسفورماتور Δ/λ و بقدرت اسمي 10MVA وصل كنيم موقعيكه يک اتصال كوتاه تكفاز به زمين در طرف فشار قوي ترانس رخ دهد جريان هر يک از فازهاي ژنراتور را پيدا كنيد. ولتاژ طرف Δ ترانس 6.9kv و طرف ستاره 44kv بوده و راكتانس اتصال كوتاه آن 7.5% مي باشد.

$$I_d = \frac{E}{Z_d + \frac{Z_i Z_0}{Z_i + Z_0}} = 5.7pu \qquad I_{cc2\phi} = 3J_0 = 8.41pu$$

$$I_i = I_d = \frac{Z_0}{Z_0 + Z_i} = I_d = \frac{JZ_i}{Z + Z_i} = j2.67$$

اگر عيب دو فاز با زمين داشتيم جريان اتصال كوتاه چقدر مي شد؟



الف –

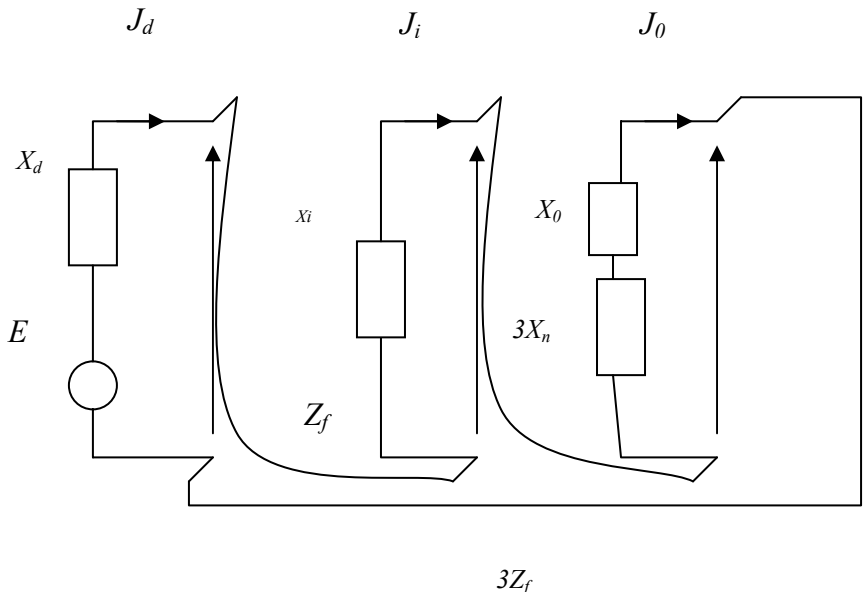
$$S_b = 10MVA$$

$$\rightarrow Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} = \frac{6.9^2}{10M} = 4.761$$

$$U_b = 6.9kv$$

$X''_d = X_i = 0.15PM \;\; X_0 = 0.05pu$

$3X_n = 3\dfrac{0.381}{4.761} = 0.24pu$



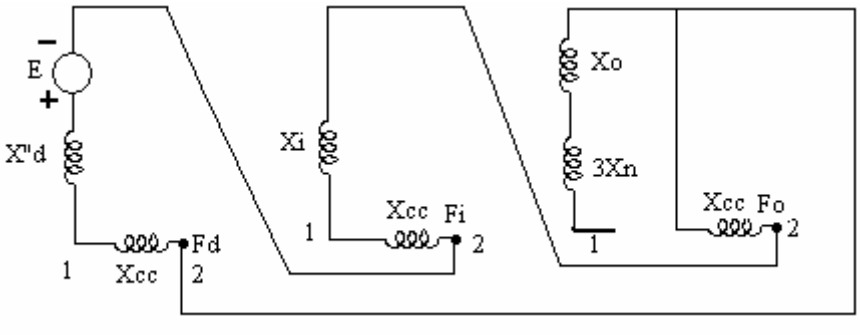
$I_d = \dfrac{E}{\sum X}$

$I_1'' = \dfrac{3E}{\sum x} = \dfrac{3\times 1}{0/15+0/15+0/05+0/24} = 5.084pu$

ب)

$X_{cc} = 7.5\%pu \qquad s_b = 10MVA$

جريان هموپولر به قسمت Δ نمي تواند نفود كند



$I''_d = \dfrac{E}{X''_d + X_i + 3X_{cc}} = \dfrac{1}{J(015+015+3\times 0.75)} = -j.1/9 \;\; pu = I_0 = I_i$

$I''_1 = 3I''_d = 5.714pu\angle 0$ فازمعيوب

براي $\lambda\lambda 0$ جريانهاي I_i, I_o, I_d كه در طرف ثانويه داشتيم در طرف اوليه نيز خواهيم داشت

براي $\Delta\lambda$

$I_{d\Delta} = j\, I_{d\lambda} \qquad I_i = -jI_{il}$:

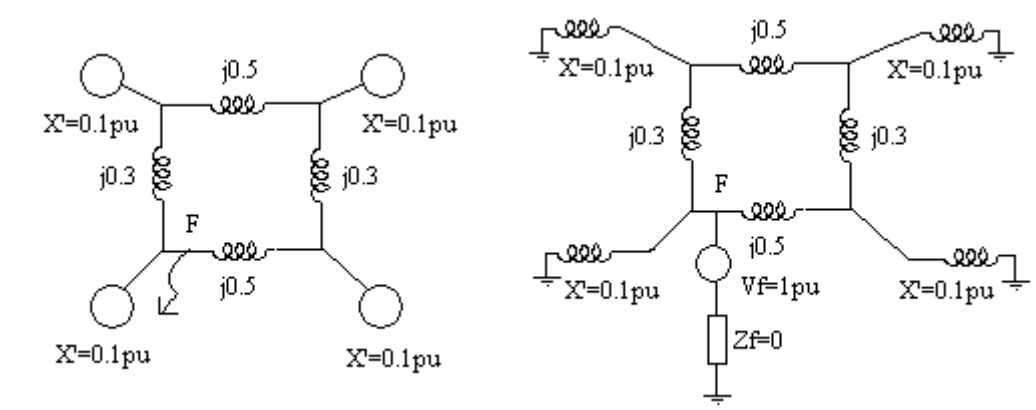
در هموپرلراز طرف Δ جرياني نمي گذرد.

$$\begin{cases} I_{G_0} = 0 \\ I_{d\Delta} = I_{dGj} = j1/9 \\ I_{i\Delta} = I_{iG} = 0j1.9 \end{cases} \begin{cases} I_{1G} = I_{dG} + I_{iG} + I_{oG} = 0 \\ I_{2G} = I_{0G} + aI_{iG} + a^2 I_{dG} = (a^2 - a)1.9 = j\sqrt{3}1.9 \\ I_{3a} = I_{0G} + a^2 I_{iG} + aI_{dG} = j\sqrt{3}1.9 \end{cases}$$

در فاز ۱ در طرف λ ترانس اتصالي روي داده كه در G در فاز ۱ جرياني نيست ولي در فازهاي ۲ و ۳ جريان داريم.

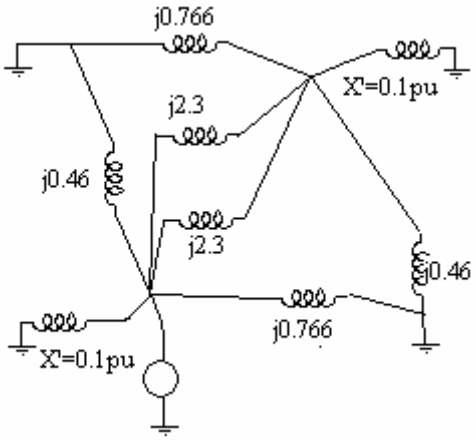
Example 9.5/293

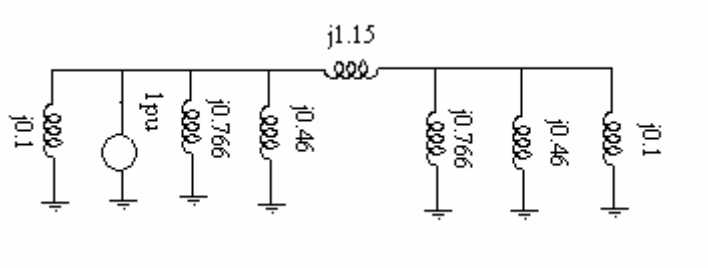
در نقطه F از يك شبكه سه فاز، مطابق شكل زير يك اتصال كوتاه سه فاز روي مي‌دهد مطلوب است جريان اتصال كوتاه به KA, pu

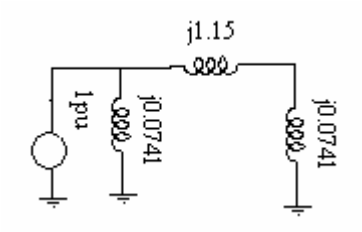


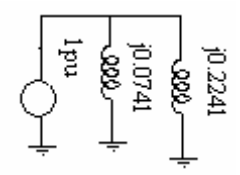
S_b=100MVA,U_b=11KV

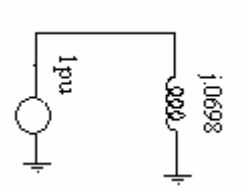
بخاطر تقارن جريانهاي گردشي در حلقه وجود دارد و قبل از اتصالي ولتاژ ژنراتور يک پريونيت است. درتمام نقاط از جمله نقطه F و جود دارد و در اتصال كوتاهي بايد V_f ولتاژ نقطه اتصالي قبل از اتصال كوتاه و در حالت عادي مدار باشد.











$$I_f = \frac{1}{j0.0698} = -j14.295\,pu$$

$$\Rightarrow \bar{I} = \bar{I}_f \times \bar{I}_b = 75.12KA$$

$$I_b = \frac{s_b}{\sqrt{3}u_b} = \frac{100M}{\sqrt{3}\times 11K} = 5.2486KA$$

ادامه فصل چهارم

پایداری در سیستم های قدرت

Power Systems Stability

افزایش بار الکتریکی $p_{e_0} \to p_{e_1} \Rightarrow P_{mo} \to P_{m1}, \delta_0 \to \delta_1$ (پس از برقراري / پايداري / استاتيكي)

قطع بار الکتریکی $p_{m_1} \to p_{m_0} \Rightarrow p_{m_0} < p_1 \Rightarrow p_a = p_{m_0} - p_{e1} < 0 \Rightarrow \delta_1 \to \delta_0$

حال اگر نقطه کار حول نقطه A باشد باتوجه به اینکه نقطه A يك نقطه *stable* (پايدار) است خواهيم گفت پايداري استاتيكي وجود دارد ولي نقطه B حتي براي تغييرات جزيي، يك نقطه غير استاتيكي است.

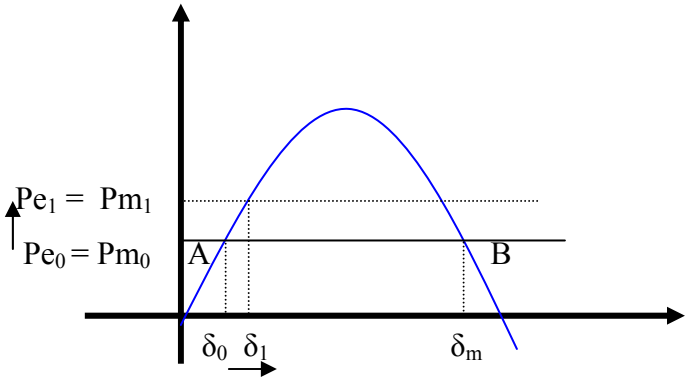
$p_{m_0} \to p_{m1} \to p_{m_0}$

زيرا :

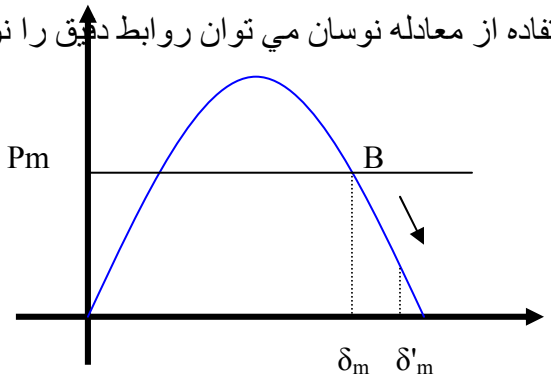
۱- بطور لحظه اي از ژنراتور بار كشيده و سپس قطع مي كنيم. فرض مي كنيم كه چنين ژنراتوري به شين بي نهايت وصل بوده و تغييرات جزئي قدرت در شبكه بي نهايت پيش آيد. مثلاً توان بيشتري لازم باشد. در اين صورت فرض كنيم توان بعلت اتصال بارهاي اضافي يك مقدار جزيي افزايش يابد (البته با فرض ثابت بودن قدرت مكانيكي) در اينصورت حتي اگر اين قدرت خواسته شده بصورت لحظه‌اي هم باشد، با فرض ثابت بودن قدرت مكانيكي اين قدرت اضافه خواسته شده از انرژي جنبشي ماشين تامين مي شود. مي خواهيم رفتار ژنراتور را در اين حالت بررسي كنيم. در اين حالت داريم:

$p_m < p_e \Rightarrow \delta_1 \to \delta_0$

شتاب منفي بوده و سرعت روتور به نقطه قبلي بر مي گردد. پس A بطور استاتيكي پايدار است.



هرگاه اين مسئله را از ديد نقطه B بررسي كنيم اگر زاويه بار از δm به مقدرا $\delta' m$ افزايش يابد چون Pe كـاهش يافتـه ولـي Pm ثابـت اسـت پـس δ افـزايش مـي يابـد(افـزايش سـرعت روتـور و افـزايش ناپايداري). بصورت كلي تربا استفاده از معادله نوسان مي توان روابط دقيق را نوشت.



$\delta \rightarrow \delta'_m \rightarrow p_m > p_e \rightarrow p_a \rangle 0$ افزايش سرعت روتور و افزايش ناپايداری

حالت اوليه A_0=Peo=Pmo

$p_{m_0} \rightarrow P_{m_1} \Rightarrow P_{m_1} > P_{e_0} \Rightarrow pa = p_{m_{10}} - p_{e_0} > 0 \Rightarrow \delta_0$ افزايش می يابد

$\delta_0 \rightarrow \delta_1$ ذخيره شدن انرژي جنبشي ناشي از شتاب مثبت $A_1 : pe \rightarrow pm_1$ $p_a = p_{m1} - p_{a1} = 0 \rightarrow \delta = \delta_1$

اما تغييرات زاويه δ متوقف نمي شود زيرا انرژي جنبشي دخيره شده در روتور بايستي آزاد شده و بصورت انرژي الكتريكي به شبكه به علاوه اصطكاك تبديل شود.

$\delta_1 \rightarrow \delta \quad p_{e1} \rightarrow p_e \rangle p_{m1} \quad p_a = p_{m1} - p_{a1} \langle 0 \rightarrow A_2 : \delta = \delta 2$

تمامي انرژي جنبشي ذخيره شده آزاد مي شود

$p_a = p_{m1} - p_{e2} < 0$

$\delta 2 \rightarrow \delta, Pe2 \rightarrow Pe \Rightarrow \delta 2 \rightarrow \delta 1.$ آزادشدن انرژي جنبشي ناشي از شتاب منفي $.A1 = Pe$ -

اما تغييرات زاويه δ متوقف نمي شود و انرژي جنبشي آزاد شده + اصطكاك بايستي بصورت انرژي الكتريكي از شبكه اخذ شود.

$\delta_1 \to \delta \quad p_{e1} \to p_{e1} \to P_e \langle p_{m1} \quad p_a \rangle 0 \quad \to A_0 : \delta = \delta 0$

$Pa = Pm1 - Pe0$

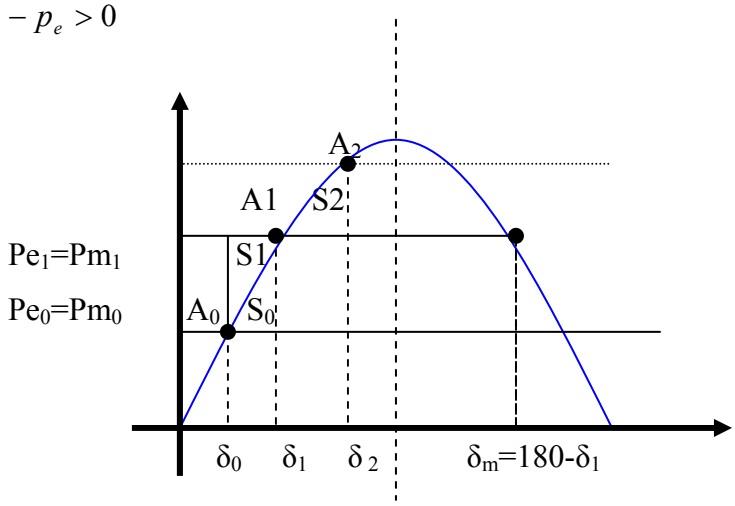
تمام انرژي جنبشي آزاد شده جذب مي شود.

براي كار ماشين بايد هميشه:

$\delta_0 \langle \pi / 2$

۲- حال براي تحقيق پايداري ديناميكي قدرت مكانيكي را بطور ناگهاني زياد مي كنيم و در همانجا نگه مي داريم تا اينكه پس از نوسانات متعدد $\delta_0 \Rightarrow \delta_1$. بر عكس حالت قبل كه بطور لحظه اي بار كشيده و قطع مي‌كرديم باز به همان حالت ماشين را در نظر مي گيريم و فرض مي كنيم قدرت مكانيكي داده شده را به ۲۰% افزايش دهيم $p_{m_0} \to p_{m_1}$ كه در اين حالت ماشين مي خواهد با زاويه δ_1 كار كند. حال با توجه به اينكه زاويه مكانيكي نمي تواند جهشي باشد لذا زاويه الكتريكي هم به تبعيت از آن تغييرات تدريجي خواهد داشت و علي رغم تغيير pm ، δ هم تقريباً δ_0 است و قدرت الكتريكي تحويل همان مقدار قبلي pe است پس $p_{m_1} > p_e$ و مابقي قدرت صرف شتاب دادن روتور مي شود و با گذشت زمان

$pa = p_{m1} - p_e > 0$



با افزايش δ Pe افزايش مي يابد و در نقطه A' $\begin{cases} p_{m_1} = pe \\ p_a = 0 \end{cases}$. در لحظه t_1 زاويه بار به δ_1 رسيده و در اين حالت سطح مستطيلي S، مجموع سطح مثلث پائيني(قدرت الكتريكي داده شده S_0) و مثلث بالايي(هاشور خوردهS_1) است كه بصورت انرژي جنبشي (صرف شتاب شده) در سيستم باقي ميماند.

$S=S_0+S_1$

سپس قدرت معادل همان سطح بالا مي رود تا همان مقدار انرژي جنبشي ذخيره شده را بصورت الكتريكي به شبكه تحويل دهد(مثلاً تا نقطه F) در اين نقطه $P_e > P_m$ بوده و سرعت روتور كمتر مي شود باز هم به همان ترتيب p_{m_1} ثابت بوده و $P_e \uparrow \quad p_a = p_{m_1} - p_e < 0$ و روتور سرعتش را كاهش مي دهد تا در حالت ثابت بماند.

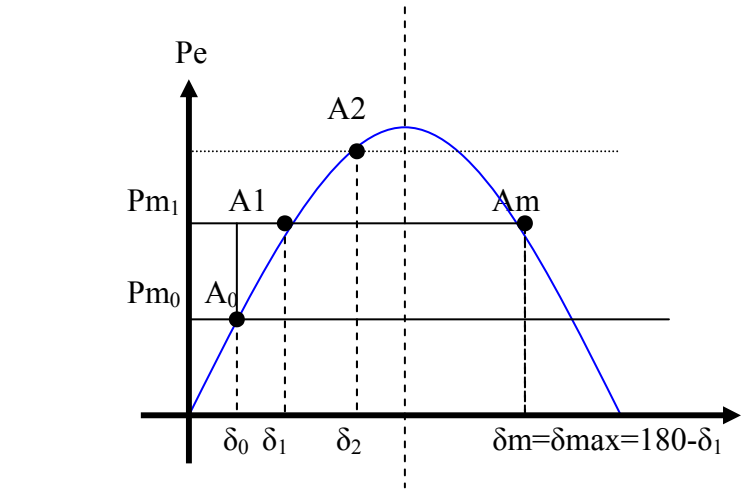
$$\begin{cases} p_{m_1} = p_e \\ p_a = 0 \end{cases}$$

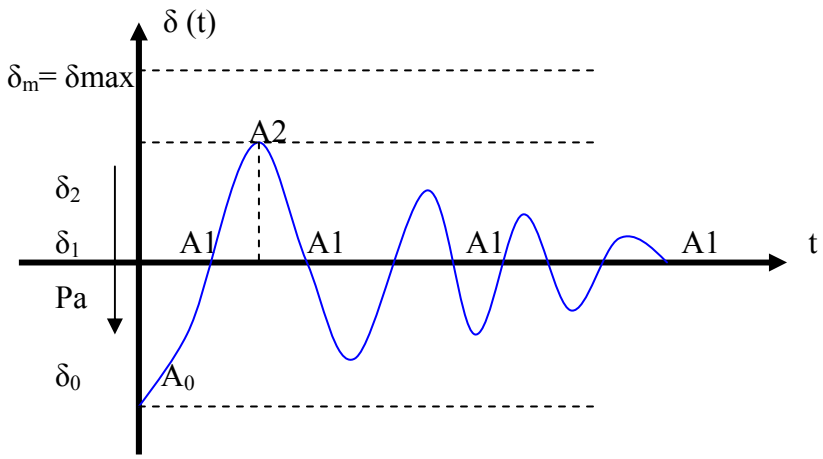
$$S_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (p_{m_1} - p_e) ds \qquad S_2 = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (p_e - p_{m_1}) d\delta$$

به علت وجود انرژي جنبشي نوسان بين δ_0 و δ_2 ادامه مي يابد (مربوط به نقطه F) ولي با توجه به تلفات اصطكاك دامنه نوسان بصورت ميرايي كاهش يافته و در نهايت بر هم منطبق مي شود (وضعيت جديد) ولي بايد توجه كرد كه بايد سطح بالايي تا نقطه F برابر سطح پائيني $A_1=A_2$ هاشور خورده باشد . منظور سطحي است كه تا δ_M باشد و اگر سطح بالايي كه معادل افزايش قدرت مكانيكي است، براي نوسان كافي نباشد δ از δ_M عبور كرده و پايداري از بين خواهد رفت و همين مسئله است كه ما را بر آن مي‌دارد كه تغييرات افزايش P_m را بطور تدريجي انجام دهيم تا دامنه نوسان زياد نباشد.

رسم نمودار توان شتاب دهنده Pa

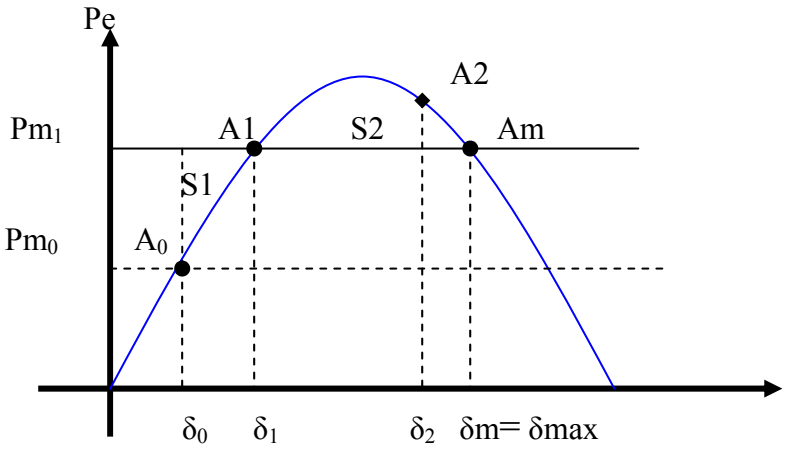
در حالت كلي اصطكاك به پايداري شبكه هاي قدرت كمك مي كند. δm=δmax حداكثر زاويه بار در شرايط پايداری گذرا می باشد. δm=90 حداكثر زاويه بار در شرايطپايداری استاتيكی (ماندگار) است.

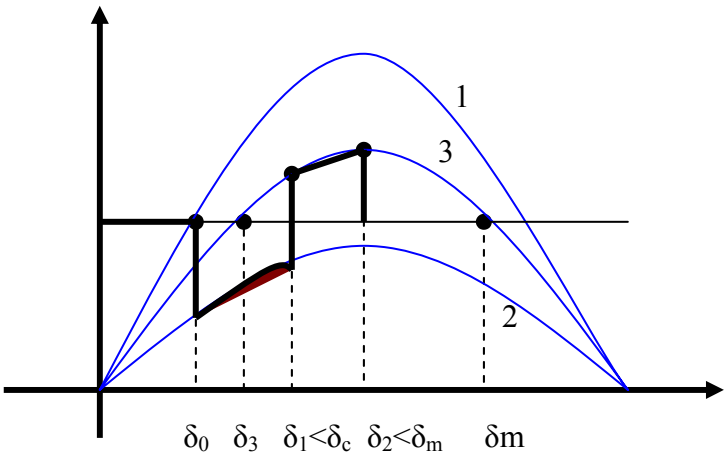


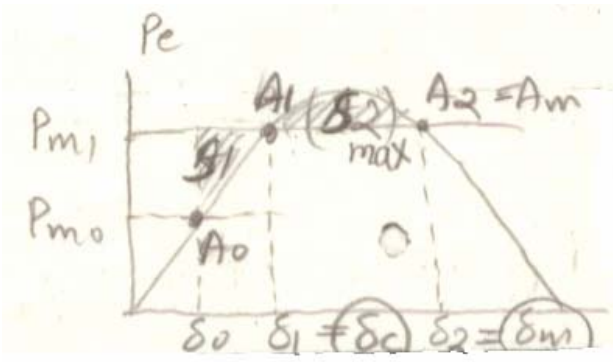


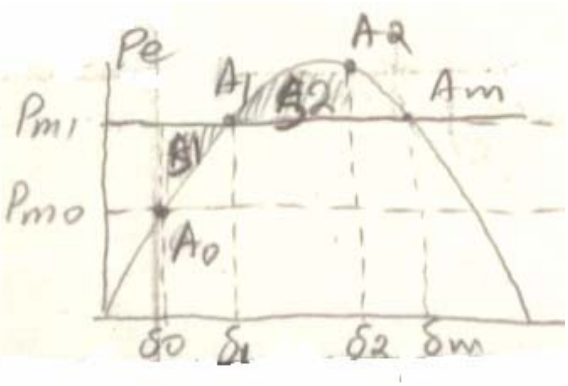
اين منحني مي تواند منحني توان الكتريكي و توان شتاب دهنده هم (بصورت معكوس) باشد. البته تغييرات ناگهاني قدرت نمي تواند درشبكه رخ دهد ولي عيب واتصالي زياد پيش مي آيد. در شبكه اتصالي ايجاد شده است. شرط كامل وجود پايداری گذرا بصورت معيار سطوح برابر:

$$S_1 = S_2 \le S_{2,\max}$$





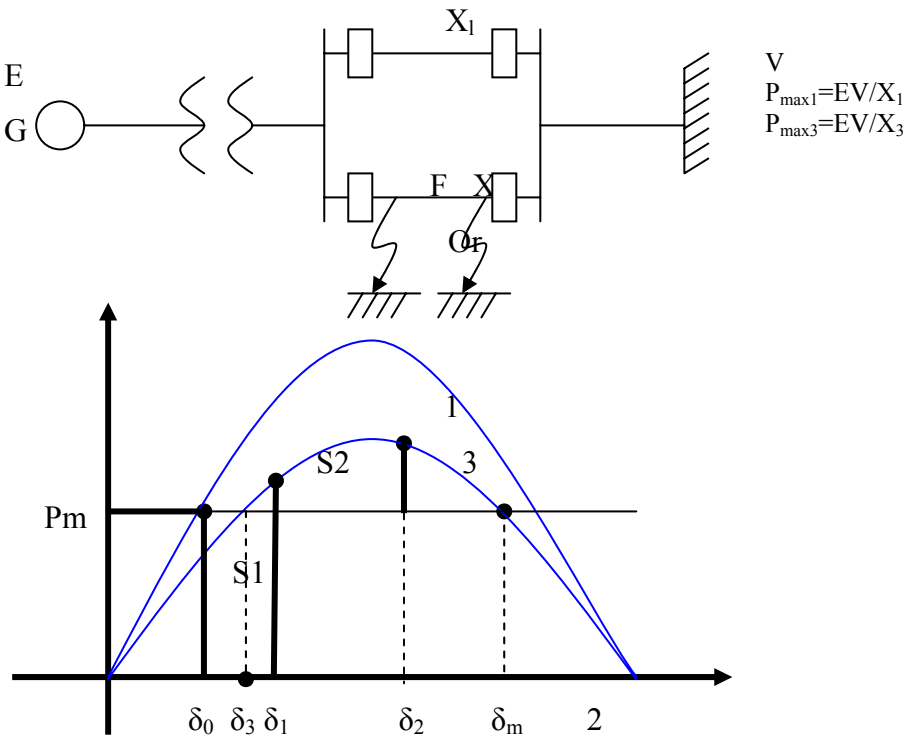




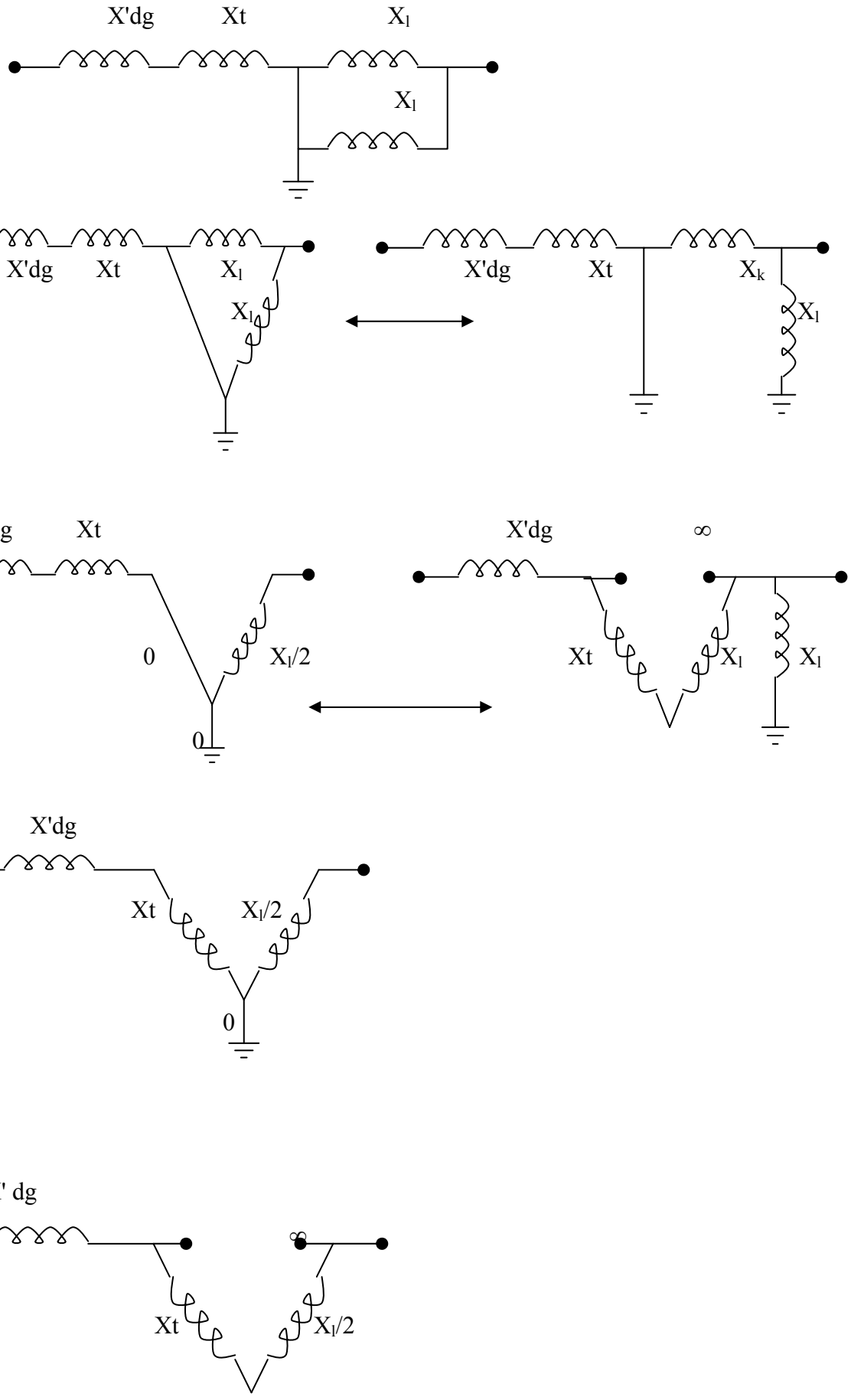
بررسي تغيرات زاويه بار ماشين

الف- اتصال كوتاه در يک طرف خط انتقال

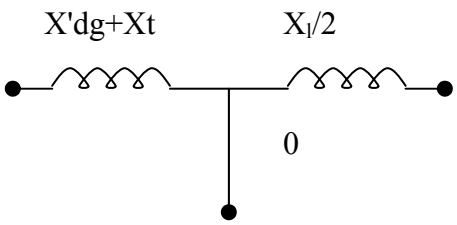
اتصال كوتاهي در اول يا آخر يكي از خطوط بوقع مي پيوندد. مسلماً دژنكتور بلافاصله قطع نمي كند.

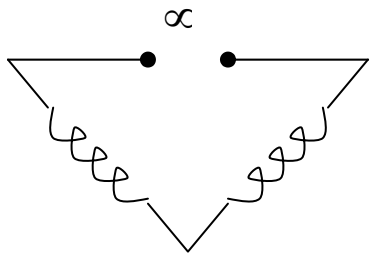


با توجه به اينكه اتصال كوتاه ۳ فاز است، در زمان عيب از $t_0 \rightarrow t_1$ قدرت انتقالي به شبكه صفر است كه در منحني فوق نشان داده شده است حال مي خواهيم X بين ژنراتور و شبكه را حساب كنيم.


X'dg
Xt
Xl
Xl
X'dg
Xt
Xl
Xl
X'dg
Xt
Xk
Xl
X'dg
Xt
0
Xl/2
0
X'dg
∞
Xt
Xl
Xl
X'dg
Xt
Xl/2
0
X' dg
∞
Xt
Xl/2

یا به طور ساده تر:





در زمان عیب $(p_{\max 2}=0)$ $x_2=\infty \rightarrow P_{e_2}=0$ (دژنکتور بلافاصله عمل نمي كند و پس از Δt خط معیوب را جدا مي سازد.

بعد از رفع عیب برداشته شدن خط معیوب داریم:

$$X_3 = X'_{dg} + X_t + X_l$$

$$P_{e3} = \frac{EV}{X_3}\sin\delta = P_{\max}\sin\delta$$

پس با توجه به X_3 ملاحظه مي شود كه توان انتقالي كاهش خواهد يافت. با توجه به اینكه در فاصله زماني رفع عیب سرعت زاویه اي و انرژي جنبشي روتور افزایش مي یابد منحني قدرت روي منحني جدید آمده (منحني۳) و باید سطح بالاي منحني جدید با منحني انرژي جنبشي ذخیره شده باشد برابر باشد. براي پایدار بودن سیستم سطح ضد شتاب دهنده بایستي با سطح شتاب دهنده مساوي باشد.

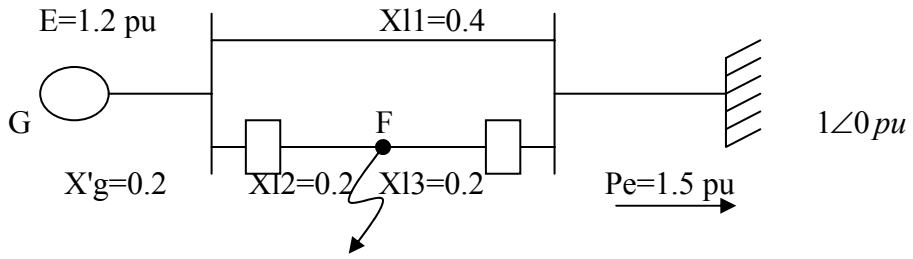
$$S_1 \le (S_2)_{\max}$$

شرط وجود پایداري گذرا معیار سطوح برابراست.Equal Area Criterion

سطح S_1 بستگي به زمان $\Delta t = t_1 - t_0$ براي رسیدن به $\delta_0 \rightarrow \delta_1$ دارد كه پایداري را كوچك بودن این زمان Δt و كوچك شدن سطح S_1 بهتر میكند.

پس از نوسان سیستم حالت پایدار خواهد یافت ولي ممكن است زاویه بار تا یك حدي مثلاً δe (بحراني) بتواند پیش رود تا پایداري سیستم از بین نرود.

مثال: ژنراتوري توسط دو خط پارالل مطابق شكل قدرت معادل ۱/۵ پريونيت را به شبكه تحويل مي دهد. در نقطه F عيبي پيش مي آيد كه بلافاصله دژنكتورهاي طرفين خط معيوب عمل كرده و خط معيوب را از شبكه حذف مي كنند تغييرات زاويه اي بار را روي اين شبكه بررسي كنيد .

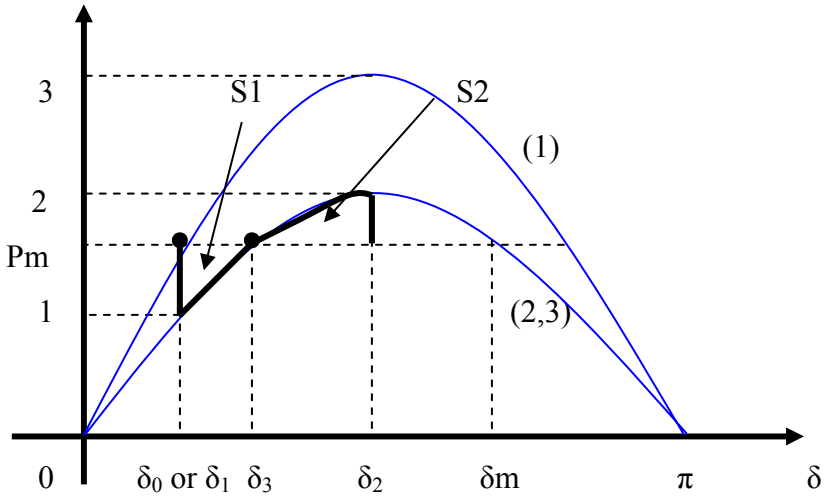


حل

قبل از عيب $X_1 = 0.2 + \frac{4}{2} + 0 = 0.4$

$$\frac{EV}{X_1}\sin\delta = \frac{1.2\times 1}{4}\sin\delta_c \Rightarrow 1.5 = 3\sin\delta_0$$

$$\delta_0 = 30 = 0.524 \text{ rad}$$



چون دژنكتورتها بلافاصله عمل كردندپس قدرت انتقالي روي منحني يك خط سالم قرار خواهد گرفت (نه روي خط صفر مثل حالت قبل)

$$X_3 = 0.2 + 04 + 0 = 0.6 \qquad \frac{EV}{X_3}\sin\delta = 2\sin\delta \rightarrow$$

$$2\sin\delta_3 = 1.5 \rightarrow \delta_3 = 48.6 = 0.848 rad$$

$$\delta_m = 90^0 + (90 - \delta_3) = 180 - \delta_3 = 131.4^o \rightarrow 2.293 rad$$

حال بايد ديد بالاي p_m مي توان سطحي بدست آورد كه معادل سطح پائيني باشد. δ بر حسب راديان است.

$$A_1 = \left| \int_{\delta_0}^{\delta_3} (1.5 - 2\sin\delta) d\delta \right| = 0.773$$

$$(A_2)_{\max} = \left| \int_{\delta_3}^{\delta_2} (25m\delta - 1.5) d\delta \right| = .478$$

براي تعين δ_2 :

$$S_1 = S_2 \rightarrow 0/0773 = \int_{848=\delta_3}^{\delta_2} (2\sin\delta - 1.5) d\delta = (-2\cos\delta - 1.5\delta)\Big|_{\delta_1}^{\delta_2}$$

$$1.5\delta_2 + 2\cos\delta_2 = 2.518$$

$$\delta_2 = 10218 rad = 69.8^o$$

تغييرات زاويه بار δ از روي معادله نوسان بررسي مي شود.

$$1.5 - 2\sin\delta = M\frac{d^2\delta}{dt^2}$$

$$M\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_m - \frac{EV}{X}\sin\delta = P_a$$

طرفين به $\frac{d\delta}{dt}$ ضرب مي شود.

$$M\frac{d^2\delta}{dt^2}.\frac{d\delta}{dt} = (p_m - p_e).\frac{d\delta}{dt}$$

$$\frac{M}{2}\frac{d}{dt}[(\frac{d\delta}{dt})^2] = (pm - pe)\frac{d\delta}{dt}$$

$$\frac{d}{dt}[(\frac{d\delta}{dt})^2] = 2(\frac{d^2\delta}{dt^2})(\frac{d\delta}{dt})^{2-1} = 2.\frac{d^2\delta}{dt^2}.\frac{d\delta}{dt}$$

$$\frac{M}{2}d[(\frac{d\delta}{dt})^2] = (p_m - p_e)d\delta$$

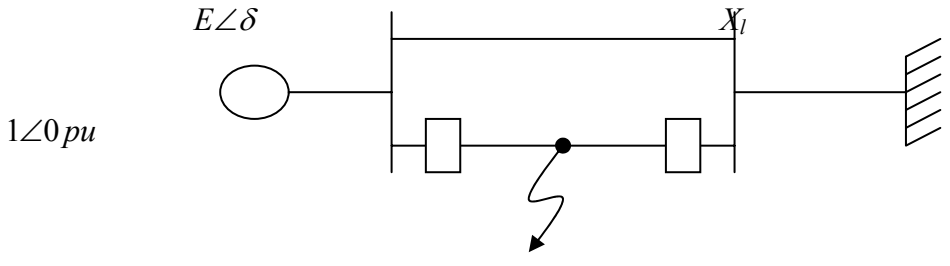
سطح زير منحني

$$\frac{M}{2}(\frac{d\delta}{dt})^2 = \int (p_m - p_e)d\delta = \int (p_m - \frac{Ev}{x}\sin\delta)d\delta$$

و از همين رابطه نتيجه مي گيريم كه سطح مشخص شونده در منحنيهاي قبل معادل انرژي جنبشي است.

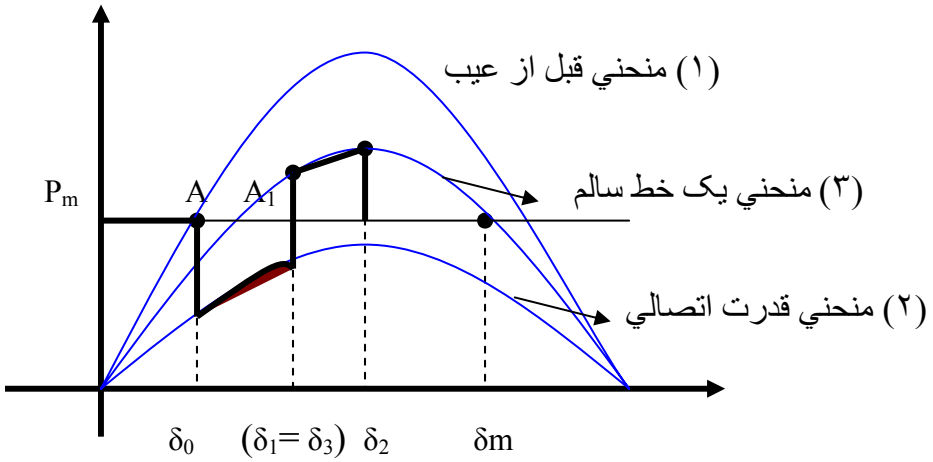
در حالت اتصال کوتاه غیر ۳ فاز (مثلاً تکفاز) و به غیر از ابتدا و انتهای خط انتقال

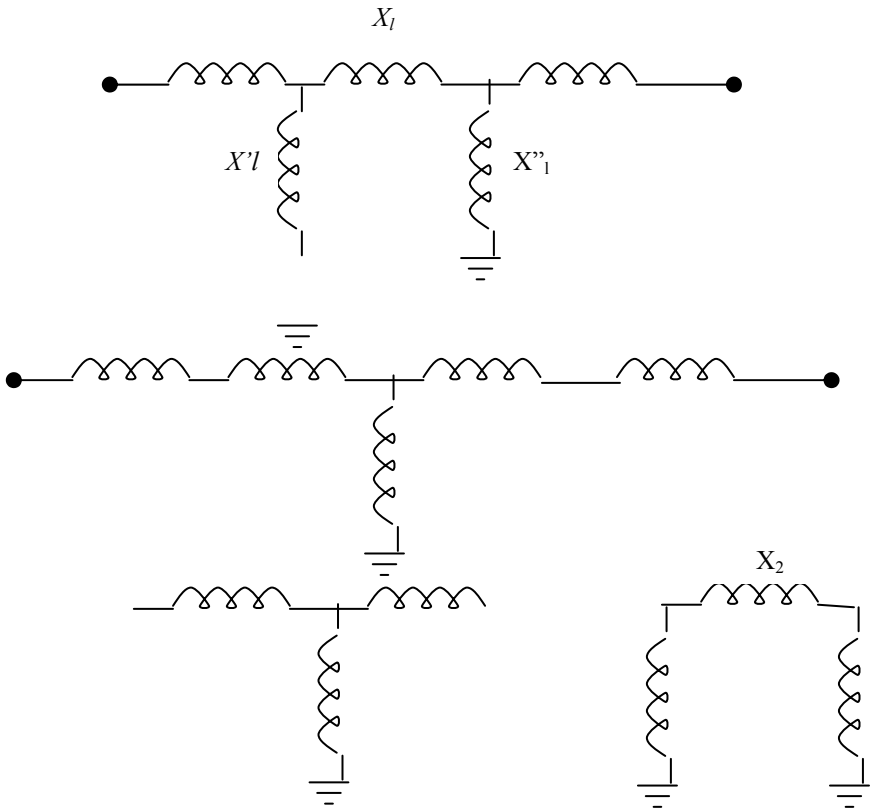
اتصال کوتاه در وسط يكي از خطوط صورت مي گيرد. نقطه عيب هر نقطه ديگر می تواند باشد.



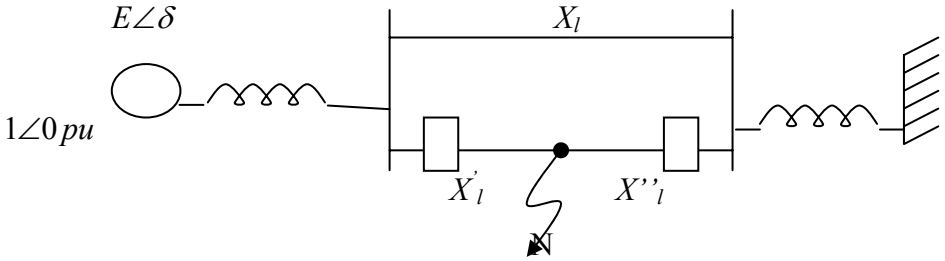
Z_f

$X_l=X'_l+X''_l$





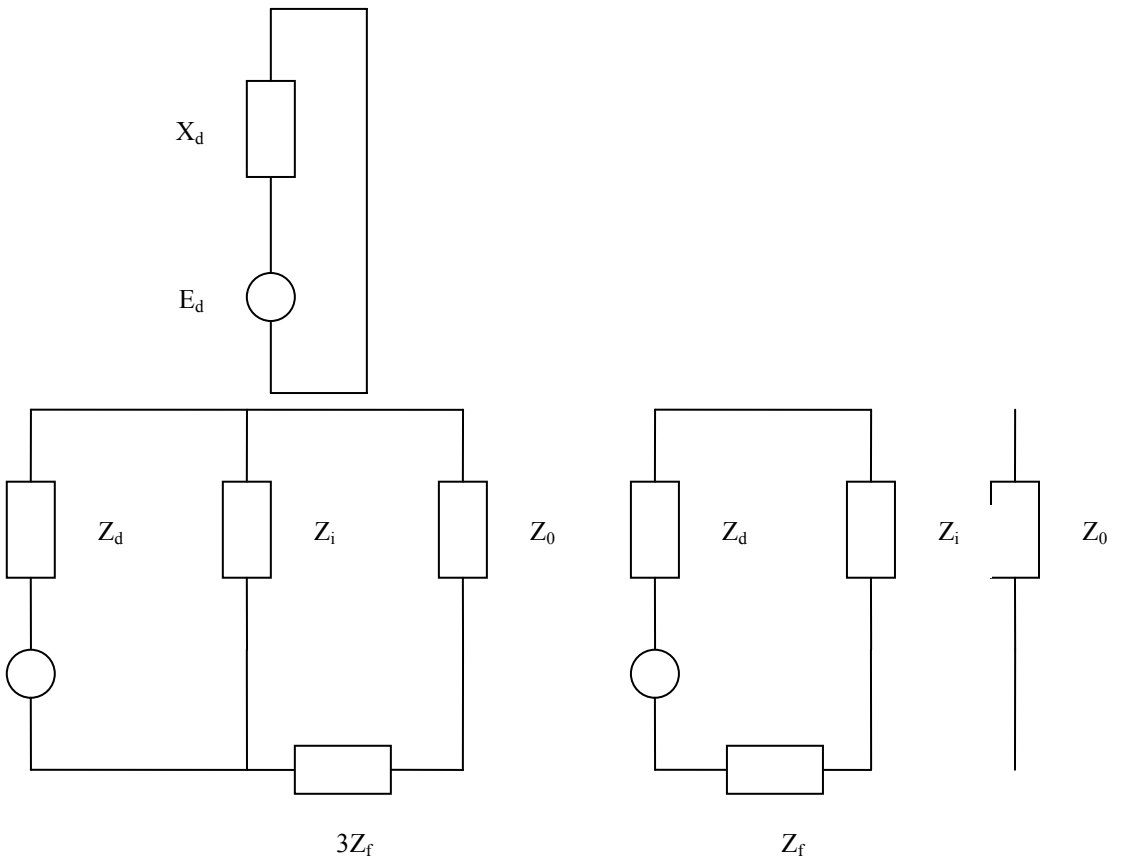
عيب غير از اول يا انتهاي خطوط صورت مي گيرد كه مي تواند L-L يا L-L-L يا L-G يا L-L-G باشد. در اينصورت $X_2 \neq \infty$ خواهد بود (در زمان عيب). در شبكه هاي قدرت ماشين هاي سنكرون ممكن است از حالت سنكرون خارج شوند و بعلت هاي مختلف ممكن است اين مساله بوقوع بپيوندد. مثلاًاتصال كوتاهي كه برطرف نشود، عمليات سويچينگ ويا افزايش ناگهاني بار. بطور كلي اين مورد در مورد يك سيستم دو ماشينه كه قدرت توسط دو خط پارالل انتقال يابد و در يكي اتصال كوتاه پيش آيد مي تواند مطرح باشد. دياگرام تك خطي شبكه اي مطابق شكل زير است:

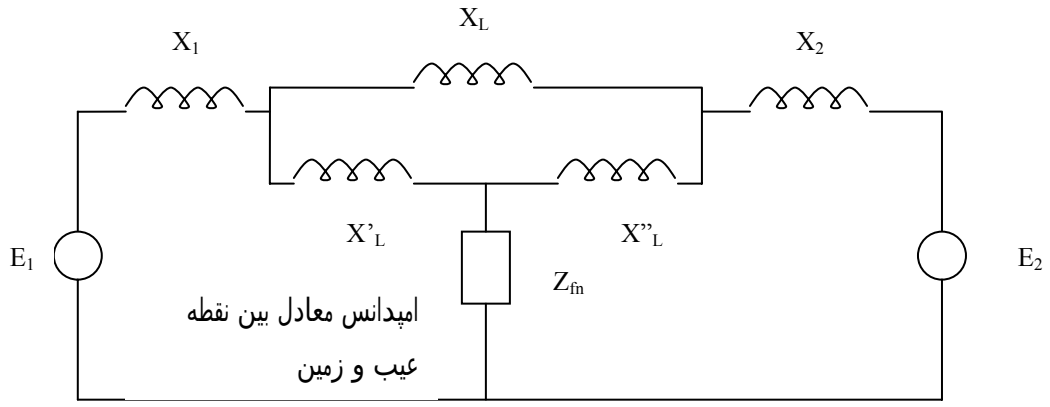


اتصال كوتاه از هرنوع در يكي از خطوط

انتقال رخ مي دهد (F) $X_l = X'_l + X''_l$

اگر اتصال كوتاه از نوع ۳ فاز باشد. بين N,F شماي مستقيم را پيدا كرده و NF را اتصال كوتاه مي كنيم. اگر از نوع ۲ فاز بدون زمين باشد شماي مستقيم و راكتانس معكوس و هموپولر را حساب كرده و راكتانس معكوس را با شماي مستقيم موازي ميكنيم يعني بين N,F راكتانس معكوس قرار مي دهيم در اتصال كوتاه ۲ فاز با زمين در شماي مستقيم بين N,F موازي شده راكتانس معكوس و هموپولر را قرار مي‌دهيم.





اتصال کوتاه ۳ فاز (LLL)

(LL) ۲ فاز بدون زمین

(LG) ۱فاز با زمین

(LLG) ۲ فاز با زمین

$$Z_{FN}=\begin{cases}0 & \\ Z_i & Z_i+Z_f \\ Z_i+Z_0 & Z_i+Z_0+3Z_f \\ Z_i \parallel Z_0 & Z_i \parallel (Z_0+3Z_f)\end{cases}$$

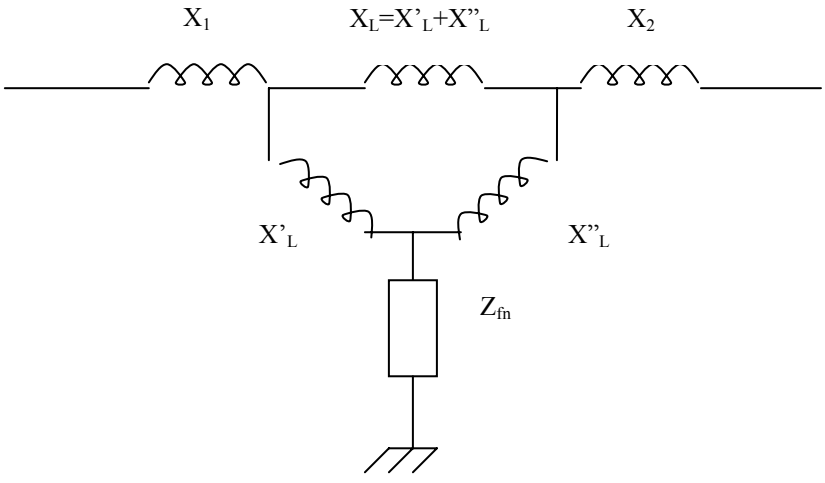
این امپدانس بین N,F در شبکه ترتیب مستقیم قرار مي گیرد. براي هر اتصالي مسئله پایداري را در این شبکه باید بررسي کرد.

قدرت منتقله در حین اتصالي بین E_2,E_1 (از ژنراتور به شبکه)

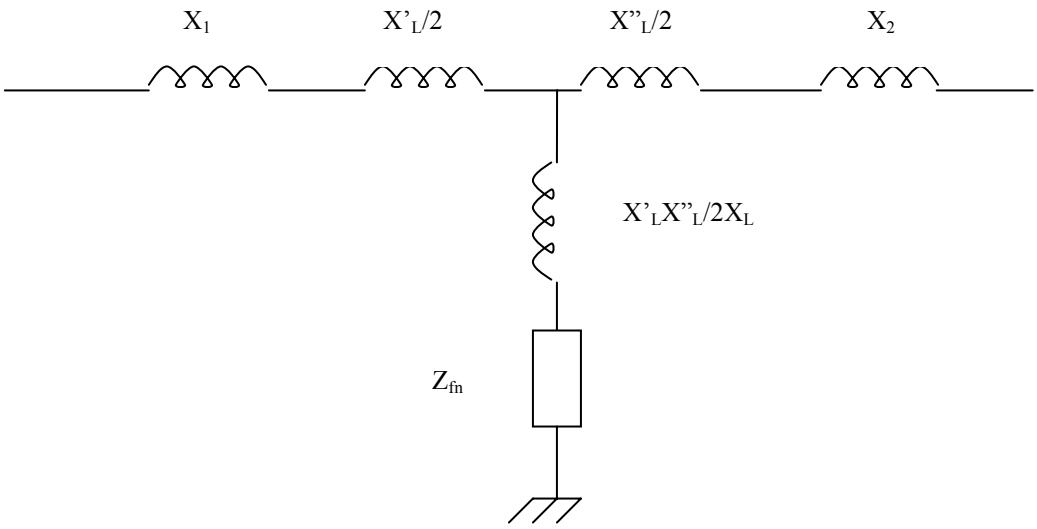
$$p=\frac{E_1E_2}{X_{12}}\sin\delta$$

X_{12} راکتانس سري بین E_2,E_1

δ زاویه بار بین E_2,E_1



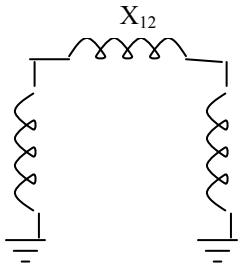
با تبدیل مثلث به ستاره در شبکه انتقال داریم

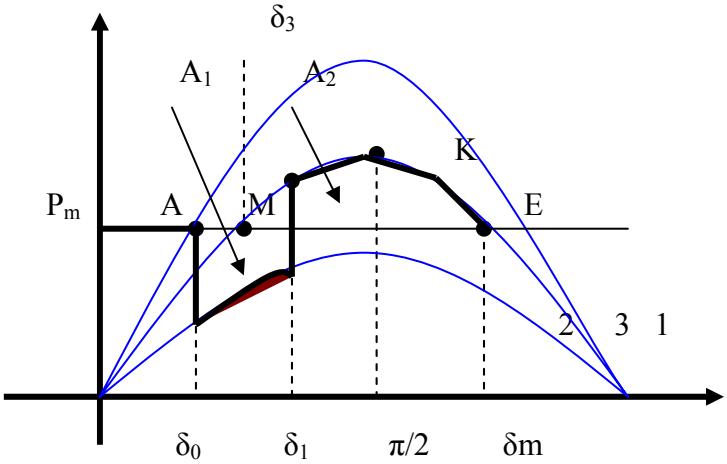


با تبدیل ستاره به مثلث با احتساب مقاومت هاي ديگري سري بـه ستاره قبلي و در اين Δ بـه ضلع بـالا

اين كه قدرت را منتقل مي كند احتياج داريم:

$$X_{12,2} = (X_1 + \frac{X''l}{2}) + (X_2 + \frac{X''l}{2}) + \frac{(X_1 + \frac{x'l}{2})(X_2 + \frac{X''l}{2})}{(\frac{x'_l x''_l}{2X_l} + Z_{FN})}$$





قبل از عيب

$$\begin{cases} P = \dfrac{E_1 E_2}{X_{12,1}} \sin\delta = r_1 P_{\max} \sin\delta \\ X_{12,1} = X_1 + \dfrac{Xl}{2} + X_2 \end{cases} \qquad r_1 = 1$$

در زمان عيب

$$p = \frac{E_1 E_2}{X_{12,2}} \sin\delta = r_2 \frac{E_1 E_2}{X_{12,1}} \sin\delta$$
$$r_2 \langle r_1 = 1$$

در اينجا $X_{12,2} \rangle X_{12,1}$ پس در زمان عيب $X_{12,2} = \dfrac{1}{r_2} X_{12,1}$ و $P = r_2 P_{\max} \sin\delta$.

قدرت منتقله بوسيله توربين ژنراتور E_1 توليد مي شود. نقطه كار P_m تحت زاويه δ_0 مي باشد. در حالت عيب منحني قدرت منتقله منحني پائيني شده و نقطه كار بطور ناگهاني بعلت عيب از A به B نزول كرده و توسط منحني پائين قدرت منتقل مي شود اگر اين عيب به همين ترتيب ادامه يابد بايد δ آنقدر افزايش يابد تا P_m لازم را به شكل تحويل دهد ولي اين تا آخر نمي تواند ادامه داشته باشد چون وضع p_m ژنراتور خراب تر شده و ژنراتور از حالت سنكرون خارج مي شود و بايد اين ادامه در جايي قطع شود در زاويه قدرت δ_1 كليد قدرت عمل كرده و خط معيوب را از مدار قطع مي كند كه در اين حال قدرت از طريق يكي از خطوط منتقل مي شود.

بعد از رفع عيب

$$P = \frac{E_1 E_2}{X_{12,3}} \sin\delta = r_3 P_{\max} \sin s$$
$$x = x_1 + x_l + x_2 \qquad r_2 < r_3 < r_1 = 1$$

در ذوزنقه پائيني در ژنراتور انرژي جنبشي در اينرسي ماشين ذخيره شده كه بايستي اين انرژي جنبشي به شبكه تحويل داده شود. از نقطه D به بعد شتاب ژنراتور در حال كند شدن است و اين كند شدن تا ε مانده به E ادامه پيدا خواهد كرد(شرط براي پايداري گذرا $A_1 \le A_2$ **).**

هر چه دژنكتور زودتر عمل كند انرژي ذخيره شده در اينرسي ماشيني كمتر بوده و زودتر مساحت بالاي مساوي با مساحت پائين را پيدا مي كنيم. اين زاويه زاويه بحراني رفع عيب δ_c است و آن زاويه اي كه در آن $A_1 = A_{2\max}$ و در بيشتر ازاين زاويه، پايداري از دست مي رود اگر زاويه در كمتر از δ_c عمل كند آنجا $A_1 < A_{2_{\max}}$ و پايداري صددرصد خواهد بود. پس سرعت عمل دژنكتورها خيلي مهم است. t_c زمان بحراني رفع عيب، حداكثر زماني است كه در شبكه مي توان تحمل كرد تا پايداري در

شبکه از دست نرود ولي عمل تنظيم بين ۱-۰/۵ ثانيه صورت مي گيرد. ۷-۵ سيکل بعد دژنکتور قطع مي کند که اين حداکثر مقدار براي دژنکتور است. اگر دژنکتور بعد از اين سيکل عمل کند پايداري از دست مي‌رود.

Case c: Recloser

حالت ٤ اگر کليد قدرت خط شماره ۲ بطور موفقيت آميزي reclose يا دوباره بسته شود (يعني عيب خط دوم بصورت گذرا بوده و بنابراين بعد از مدتي از بين رفته است) داريم:

$$P_{e4} = P_{el} = P_{\max l} \sin\delta$$

چون با عمل دوباره بسته شدن کليد دوباره همان قدرت اوليه به سيستم داده مي شود پس عملکرد پايدار سيستم توسعه مي يابد. براي شرايط کلي داريم:

$$\delta_m = \pi - \sin^{-1}(\frac{pm}{p_{\max 4} or P_{\max 1}})$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1}(p_m - p_{\max 2}\sin\delta)d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta rc}(p_{\max 3}\sin\delta - p_m)d\delta$$

$$+\int_{\delta_{rc}}^{\delta_2}(P_{\max 4}\sin\delta - p_m)d\delta$$

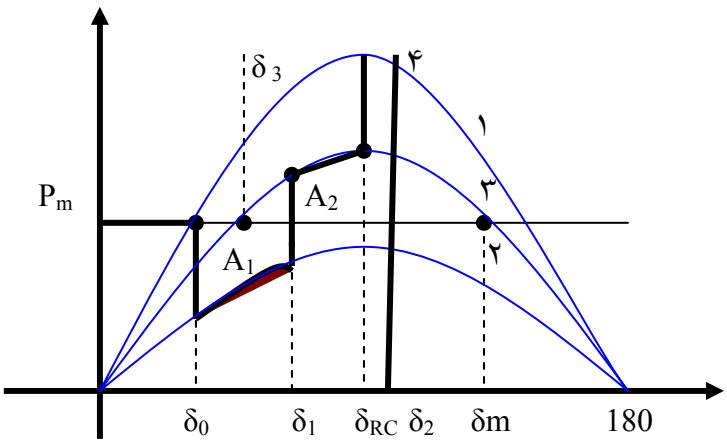
براي شرايط زاويه رفع عيب بحراني δ_c داريم:

$$\delta_1 \to \delta_c \Rightarrow \delta_2 \to \delta_m$$

$$\delta_2 = \delta_m = \pi - \sin^{-1}(\frac{pm}{p_{\max 4}})$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta c}(p_m - p_{\max 2}\sin\delta)d\delta = \int_{\delta c}^{\delta rc}(p_{\max}\sin\delta - pm)d\delta$$

$$+\int_{\delta rc}^{\delta m}(p_{\max 4}\sin\delta - p_m)d\delta$$



پيدا كردن زاويه بحراني رفع عيب

$$A_1 = A_{2_{\max}}$$

$$\delta_c \quad \rightarrow S_{ABCMA} = S_{MDKEM}$$

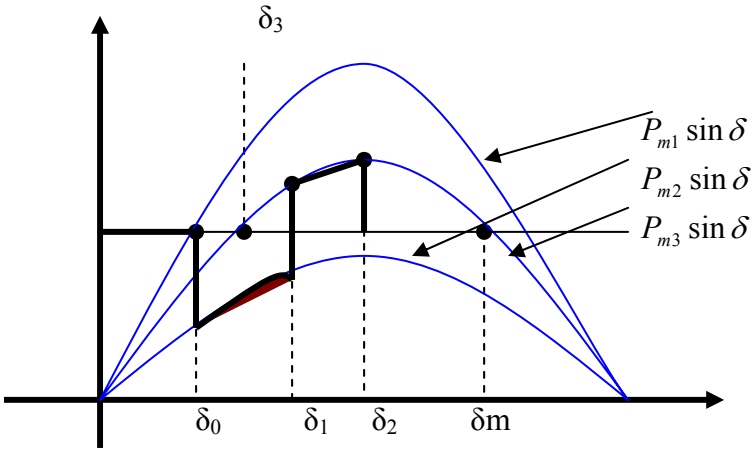
$$P_m(\delta_c - \delta_0) - \int_{\delta 0}^{\delta c}(r_2 p_{\max}\sin\delta)d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_m}(r_3 P_{\max}\sin\delta)d\delta$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta c}(pm - Pe2)d\delta = \int_{\delta c}^{\delta m}(pe_3 = p_m)d\delta$$

$$-p_m\delta_0 + r_2 p_{\max}(\cos\delta_c - \cos\delta_c) - r_3 p_{\max}(\cos\delta_c - \cos\delta_m) - p_m\delta_m$$

$$p_{\max}(r_2\cos\delta_c - r_3\cos\delta_c) = p_m(\delta_c - \delta_m) + P_{\max}(r_2\cos\delta_0 - r_3\cos\delta_m)$$

$$\cos\delta_c = \frac{\frac{pm}{p_{\max}}(\delta_0 - \delta_m) + (r_2\cos\delta_0 - r_3\cos\delta_m)}{r_2 - r_3}$$



فقط δ_m, δ_0 به راديان مي باشد.

P_Mقدرت منتقله قبل از عيب

روي منحني (۱) $\delta_0 = \sin^{-1}(\frac{p_m}{p_{\max 1}})$ راديان نقطه $p_0 = p_m\frac{EV}{X_0}\sin\delta_0$

پايداري

روي منحني(۳) $\delta_m = \sin^{-1}\frac{p_m}{p_{\max 3}}$ $\delta_m = \pi - \sin^{-1}\frac{pm}{p_{\max}}$

زمان بحراني رفع عيب از روي زاويه معلوم مي شود ?tc= ⟵معلوم

$\delta c =$

اگرمقدارتغييرات زاويه بار را بر حسب زمان رسم كنيم از روي منحني مي توان زمان بحراني را حساب كرد.

$$P_{e2} = \frac{EV}{X_0}\sin\delta_0 \qquad p_a = p_m - r_2\sin\delta_0 = M\frac{d^2\delta}{dt^2}$$

$$p_a = p_m - \frac{EV}{X_0}\sin\delta_0 = M\frac{d^2\delta}{dt^2}$$

از حل اين معادله غير خطي به صورت غير خطي زاويه بار تعيين خواهد شد.

$$p_m^{MW} - p_e^{MW} = M^{MJ\sec/rad}\frac{d^2\delta}{dt^2}^{rad/\sec^2}$$

$$M = HS_b/(F_s\pi)$$

$$p_m^{Pu} - p_e^{Pu} = M^{MJ\sec/rad}\frac{d^2\delta}{dt^2}^{rad/\sec^2}$$

مي توان زواياي استفاده شده در معادله بالا را بر حسب درجه هم بيان كرد.

$$M' = M\frac{H}{f_s\pi}[\frac{\sec^2}{rad}] or \frac{H}{f_s 180}[\frac{\sec^2}{\deg}] \qquad \Delta t = \frac{tc - t_0}{n}$$

در روش گام بگام زمان را به n قسمت مساوي تقسيم كرده و بزرگي n روي تقريباً محاسبات اثر دارد.

$$(n-2)\Delta t \qquad (n-1)\Delta t \quad (n)\Delta t \Rightarrow t_o + (n-2)\Delta t....(t_o + n\Delta t = t_c)$$

بجاي اينكه شتاب را بصورت يك منحني الخط حساب كنيم آنرا بصورت خط شكسته فرض مي كنيم، از وسط گام قبل آخر تا وسط گام آخر، در لحظه $(n-1)\Delta t$ شتابي داريم و براي گام هايي ديگر نيز چنين عمل مي كنيم. از وسط يك گام تا وسط گام ديگرشتاب را ثابت فرض مي كنيم وبه اين ترتيب منحني توان شتاب دهنده بوجود مي‌آيد. در لحظه n و n-1 شتاب را ثابت فرض مي‌كنيم. سرعت را هم در لحظه $n-\frac{3}{2}, n-\frac{1}{2}$ ثابت فرض مي كنيم. تغييرات سرعت و جهش سرعت مربوط به توان شتاب دهنده

$$\alpha = \frac{\omega'_{n-1} - \omega'_{n-\frac{2}{3}}}{\Delta t} = \left.\frac{d^2\delta}{dt^2}\right|_{n-1} = \frac{p_a(n-1)}{M}$$

همان بازه در منحني اول است.

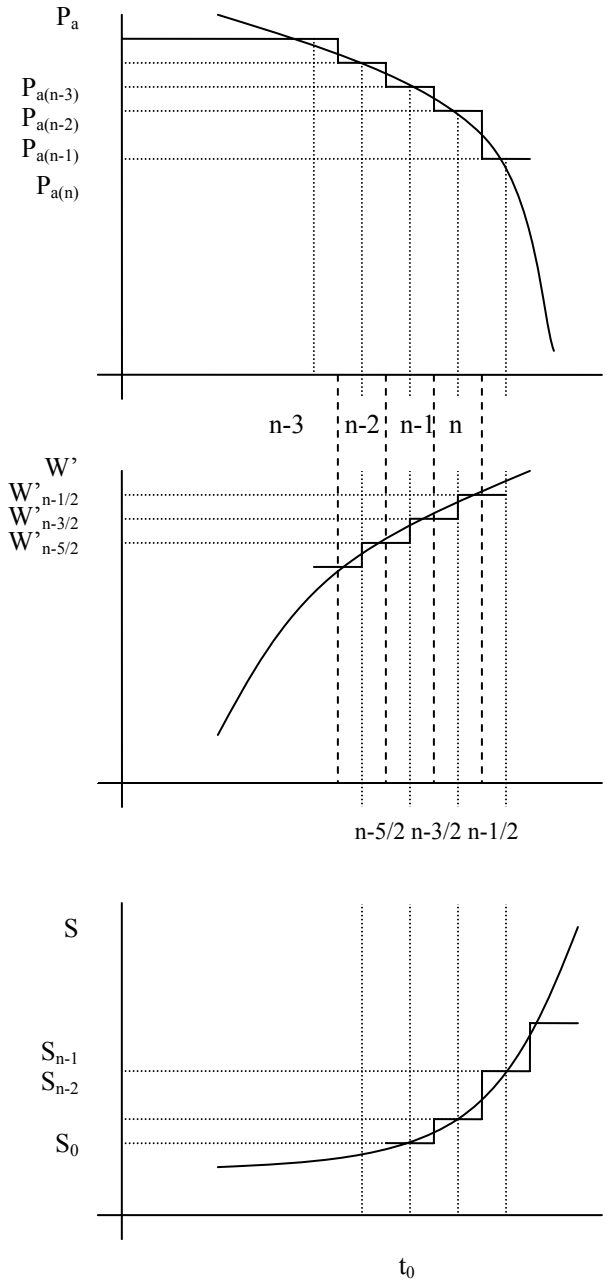
$$\omega'_{n-\frac{1}{2}} - \omega'_{n-\frac{3}{2}} = \Delta t.\frac{Pa(n-1)}{M}$$

$$\omega'_{n-\frac{3}{2}} - \omega'_{n-\frac{5}{2}} = \Delta t.\frac{pa(n-2)}{M}$$

يكي از روش هاي حل عددي اين معادله ديفرانسيل روش گام به گام است.

توان شتاب دهنده يك تابع نقضاني است كه رفته رفته كم مي شود. تغييرات سرعت ماشين بر حسب زمان

را در منحني دوم رسم مي كنيم. در زمان غير از عيب $\omega - \omega_s = 0$.در لحظه t=0 با زياد شدن زمان $w\text{-}w_s$ افزايش مي يابد.در منجني دوم زاويه δ بر حسب زمان را رسم مي كنيم در لحظه $t=t_0$ ، $\delta = \delta_0$ و با افزايش زمان افزايش مي يابد. خط معيوب قبل از δ_c بايد قطع شود. اگر δ را بر حسب زمان پيدا كرديم از روي منحني tc را مي توان پيدا كرد. پس مهم رسم منحني $\delta(t)$ است.



منحني (۲)

در لحظه $t = \bar{o}$ ←منجني (۱) پايدار در δ_0

$$p_{a\bar{o}} = p_m - p_{e1,\delta_0} = 0$$

در لحظـــــــه $t = 0^+$ ←منجنـــــــي (۲) در حـــــــال نوســـــــان در شـــــــروع از δ_0

$$p_{a0} + = p_m - p_{e2,\delta_0} \neq 0$$

پس بطور متوسط در t=0 توان شتاب دهنده P_{a0} جمع مقادير فوق و تقسيم بر ۲ خواهد شد. مقدار ميانگين فقط در لحظه t=0 به صورت زير است:

$$P_{a_0} = \frac{p_{a\bar{o}} + P_{aot}}{2}$$

$$M = \frac{S_b H}{\pi f_s}[\frac{MJ\sec}{rad}] \quad \frac{s_b H}{180 f_s}[\frac{MJSec}{\deg}]$$

$$M' = \frac{M}{S_b} = \frac{H}{\pi f_s}[\frac{\sec^2}{rad}] \quad or \quad \frac{H}{180 fs}[\frac{\sec^2}{\deg}]$$

$$\frac{\Delta t^2}{M}.P_{a(n-1)}^{[MW]} \rightarrow [rad] or [\deg]$$

$$\frac{\Delta t^2}{M'}.P_{a(n-1)}^{[pu]} \rightarrow [rad] or [\deg]$$

حال تغييرات δ را به تغييرات ω ربط مي دهيم. تغييرات δ بيان لحظه n-۲ و n-۱ مربوط به $\omega'_{n-\frac{1}{2}}$ است و همينطور بقيه. پس مي نويسيم

$\frac{\Delta\delta}{\Delta t}$ سرعت $\frac{\Delta\omega}{\Delta t}$ شتاب

$$\Delta\delta_{n-1} = \delta_{n-1} - \delta_{n-2} = \Delta t.\omega'_{n-\frac{3}{2}}$$

$$\Delta\delta_n = \delta_n - \delta_{n-1} = \Delta t.\omega'_{n-\frac{1}{2}}$$

$$\Delta\delta_n - \Delta\delta_{n-1} = \Delta t(\omega'_{n-\frac{1}{2}} - \omega'_{n-\frac{3}{2}}) = \Delta t.\Delta t.P_{a(n-1)}$$

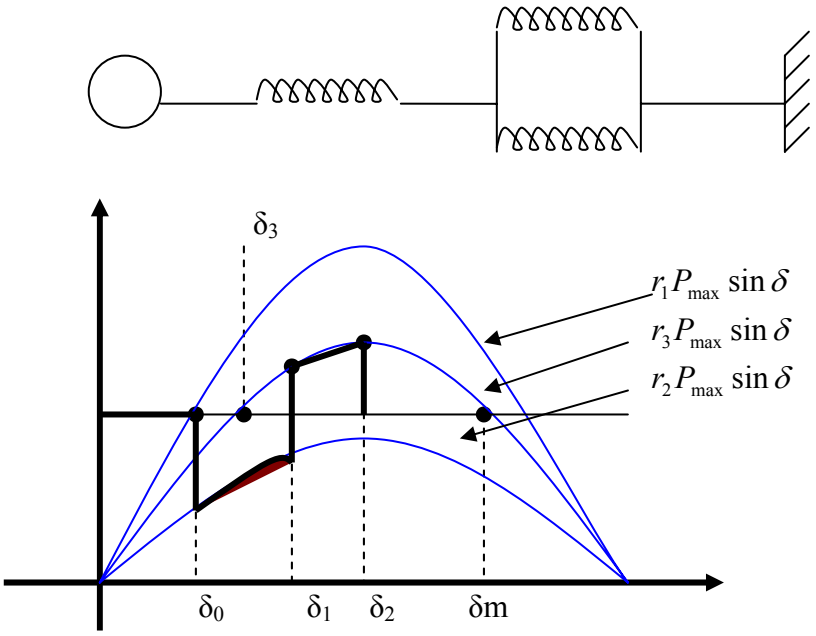
$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + (\frac{\Delta t^2}{M})Pa(n-1)$$

$$t = 0 \rightarrow \Delta\delta_1 = \Delta\delta_0 + \frac{(5\times10^{-2})^2}{M}P_{a0}$$

$$\Delta\delta_0 = 0$$

$\Delta\delta_n$ بر روي منحني (۲) درجه يا راديان است كه بستگي به واحد Mيا M' خواهد داشت.

مثال – يك ژنراتور قدرت $P_m = P_e = 1pu$ را به شين بي نهايت مي فرستد قبل از وقوع اتصالي ژنراتور قدرت ماكزيمم 1.8pu را دارا بود و در زمان اتصالي اين قدرت به 0.4 كاهش مي يابد و پس از رفع عيب در خط معيوب قدرت منتقله توسط خط سالم به 1.3pu افزايش مي يابد مطلوبست الف – محاسبه زاويه بحراني بار δc ب- اگر مقدار حركت زاويه اي ماشين $M' - 3\times10^{-4}\ \sec^2/\deg$ (پس $\Delta\delta$ درجه خواهد بود). فرض شود باانتخاب گام زماني $\Delta t = 0.05\sec$ تغييرات را بر حسب زمان بروش گام بگام پيدا كرده ورسم كنيد و زمان مي نيمم قطع دژنكتورها را از روي آن بدست آوريد (t_c)



$$P_{\max_1} = r_1 P_{\max} = 1.8pu$$

$$P_{\max} = 1.8pu$$

$$P_{\max_2} = r_2 P_{\max} = 0.4 \rightarrow r_2 = \frac{0.4}{1.8} = 0.222$$

$$P_{\max} = r_3 P_{\max} = 1.3 \rightarrow r_3 = \frac{1.3}{1.8} = 0.722$$

$$\cos\delta_c = \frac{\frac{p_m}{p_{\max}}(\delta_0 - \delta_m) + (r_2\cos\delta_0 - r_3(\cos\delta_m)}{r_2 - r_3}$$

منحني ۱ $1 = 1.8\sin\delta_0 \rightarrow \delta_0 = 33.7^o \ or \ 0.589rad$

زاويه منفرجه بدست مي آيد منحني (۳) $1 = 1.3\sin\delta_m \rightarrow \delta_m = 129.7^o or 2.226rad$

$\cos\delta_c = ... \qquad \rightarrow \delta_c = 67.8^o \ or \ 55.3rad$

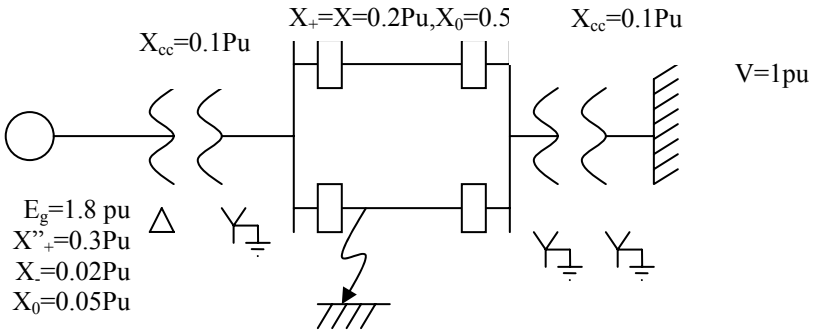
تغییـــرات δ_0 تـــا δ_c را بایـــستي رســـم کـــرد. در لحظـــه $t=0^-$، $p_{a(0)}=0$ در لحظـــه ,

$P_a(0)=1-4st=0\ t=0^+$

$\Delta\delta_n=\Delta\delta_{n-1}+\frac{(\Delta t)^2}{M'}Pa(n-1)$ منحني (٢) $\quad\frac{(\Delta t)^2}{M'}=\frac{25}{3}[\deg]$

$n=1\quad \Delta\delta_1=\Delta\delta_c+\frac{(\Delta t)^2}{M'}\qquad Pa(0)=0+\frac{25}{3}(\frac{1-04\sin\delta_c}{2})\approx 3.23°$

مثال – نمايش تك خطي شبكه اي طبق شكل زير است



١-مطلوب است حد پايداري استاتيكي شبكه فوق

٢-اگر با يك مانور يكي ازخطوط پارالل قطع شود تخصص كنيد شبكه پايدار خواهد بوديا نـه (قدرت انتقالي قبل از مانور pu ١ بوده است)

٣-اگر يك اتصال كوتاه تكفاز زمين در نقطه F بلافاصله بعد از دژنكتور مانند شكل رخ دهد تحقيق كنيد حتي اگر اتصال در سيستم دوام يابد شبكه پايدار است.

٤-اگر يك اتصال كوتاه سه فاز در F رخ دهد مطلوب است زاويه قطع بحراني كليدهاي K_2,K_1

٥-بـا فـرض اينكـه مقدار حركت زاويـه اي ماشين $M'=3\times10^{-4}\left[\frac{\sec}{\deg}\right]^2$ باشد بـا انتخـاب گـام زمـاني $\Delta t=0.03^s$ مطلوب است رسم تغييرات δ بر حسب زمان پيدا كردن زمان بحراني قطع عيب كليدهاي K_1,K_2

١– قبل از عيب $X_1=X'_+ +X_{cc}+\frac{Xd}{2}+X_{cc}+0=0.3+0.1+\frac{0.2}{2}+0.1=0.6pu$

$\frac{EV}{X}\sin\delta=1pu=\frac{1.8\times1}{0.6}\times\sin\delta_0=1\rightarrow\delta_0=19.5^o$

$2-\quad X_2=X'_+ +X_{cc}+X_+ +X_{cc}+0=0.7$

$\frac{EV}{X}\sin\delta=1pu\rightarrow\frac{1.8\times1}{0.7}\sin\delta_1=1\rightarrow\delta_1=22.9$

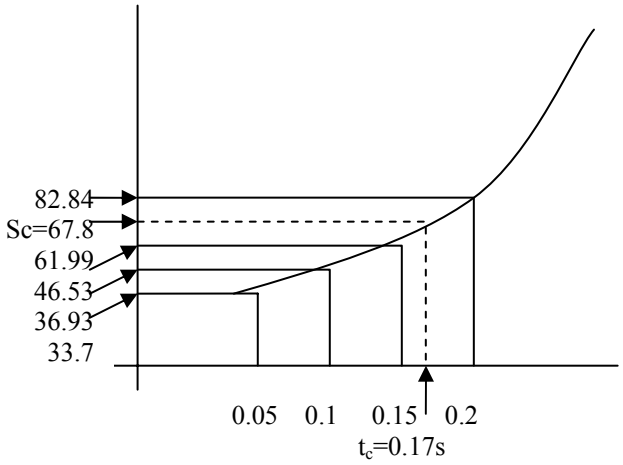
توان شتاب دهنده اين مقدار تقسيم بر 2 خواهد شد (مقدار ميانگين) فقط در لحظه صفر

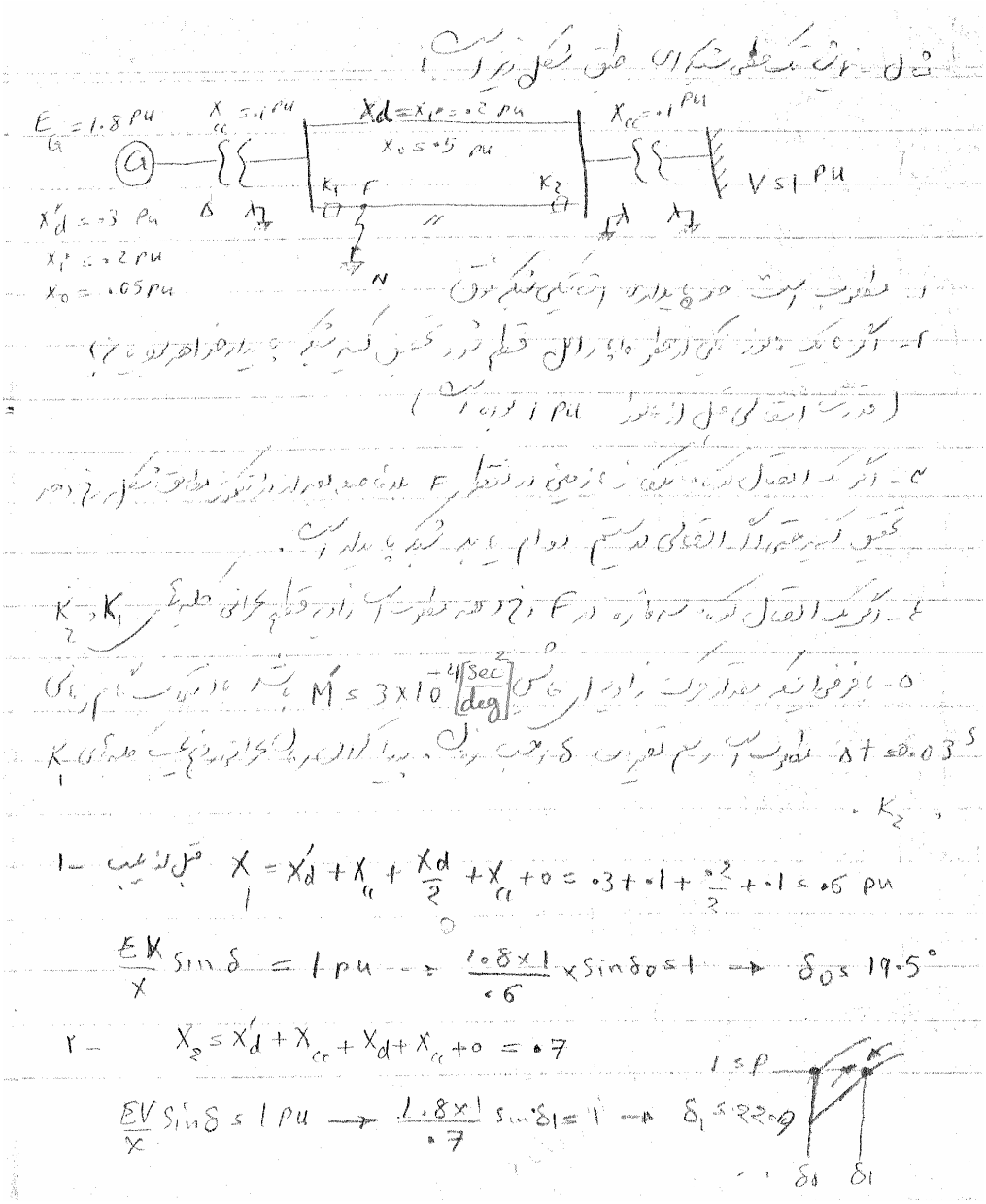
$$\begin{cases}\delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta_1 = 33.7 + 3.23^o = 36.93^o \\ t = 0 + 0.05 = 0.05\,\text{sec}\end{cases}$$

$$\begin{cases}\Delta\delta_2 = \Delta\delta_1 + \dfrac{25}{3}P_a(1) = 3.23 + \dfrac{25}{3}(1 - 0.04\sin 36.13) = 9.6^o \\ \delta_2 = 36.93 + 9.6 = 46.53^o \\ t = 2 \times 0.05 = 0.1\,\text{sec}\end{cases}$$

$$\begin{cases}\Delta\delta_3 = 9.6 + \dfrac{25}{3}(1 - 4\sin 46.53) = 15.96° \\ \delta_3 = 46.53 + 15.46 = 61.99° \\ t = 3 \times 0.05 = 0.15\,\text{sec}\end{cases}$$

$$\begin{cases}\Delta\delta_4 = 15.46 + \dfrac{25}{3}(1 - 4\sin 61.99) = 20.89 \\ \delta_4 = 82.84 \\ t = 4 \times 0.05 = 0.20\end{cases}$$





عوامل پايداري در شبكه قدرت

۱-كوچك بودن زمان بحراني رفع عيب.

اگر كليدهاي قطع در زمان كوتاه سيستم را قطع كنند بهتر است ولي اين عمل از لحاظ هزينه گرانتر است در واقع سرعت عمل دژنكتور بايد بالا باشد.

۲- راكتانسهاي شبكه $p = \frac{EV}{X}\sin\delta$.

اگر X كوچك شود قدرت حداكثر زيادمي شود. اگر در شبكه X پائين بيايد قدرت مستقيم بالا مي رود. پارالل كردن خطوط انتقال انرژي و استفاده از خازنهاي سري راكتانس بين E_2, E_1 را پائين مي آورد.

۳-نيروي محركه ژنراتور $p = \frac{EV}{X}\sin\delta$ افزايش E درزمان اتصال كوتاه.

تحريك ژنراتوررابطور مصنوعي و گذراافزايش مي دهيم لذا پيك منحني بالا مي رود كه به پايداري كمك مي كند.

٤-با تنظيم سرعت توربين.

در حالت اتصال كوتاه روتور ژنراتور سرعت گرفته واز حالت سنكون خارج مي شود. سرعت روتوررا با استفاده از شير بخار كم مي كنيم ولي بستن شير بخار ممكن است باعث از بين رفتن سنكرونيزاسيون و زياد توصيه نمي شود (ثايت زماني سيستم مكانيكي بيشتر از سيستم الكتريكي است).

مثال – يك موتور سنكرون ٤٠% قدرت ماكزيمم را از شبكه ∞ جذب مي كند بار موتور را بطور ناگهاني حداكثر به چند درصد قدرت ماكزيمم موتور مي توان رسانيد تا موتور سنكرونيزمي خودش را از دست ندهد؟

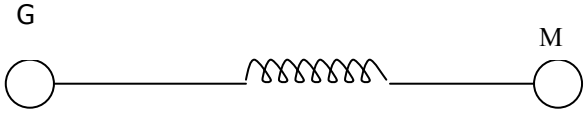
ملاحظات كلي

۱-افزايش تدريجي قدرت براي شبكه خطرناك نيست ولي اگر تغييرات ناگهاني باشد اگر بالاي سطح pm نتوان سطح معادل را پيداكرد ممكن است پايداري از دست برود. اگر بخواهيم قدرت انتقالي را افزايش دهيم $1 \rightarrow 1.5pu$ بايستي تدريجي باشد.

۲-حد پايداري ديناميكي از حد پايداري استاتيكي كوچكتر است.

90^o	$<90^o$
۳-زاويه بحراني رفع عيب	0

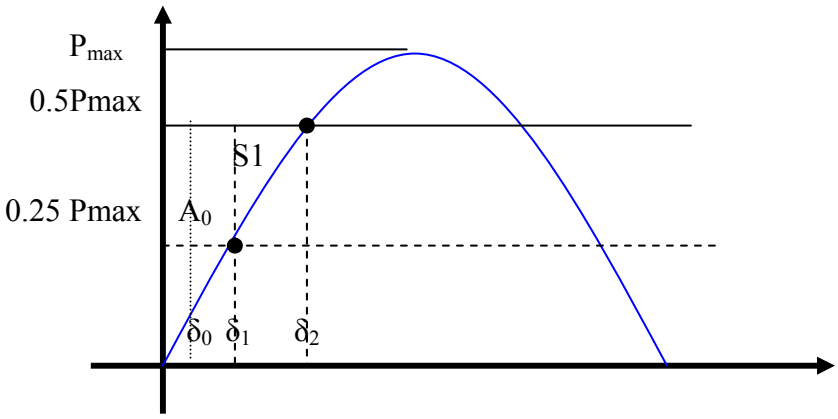
مثال – موتوري كه به يك شبكه بي نهايت وصل شده ۲۵ % قدرت ماكزيمم را جذب مي كند. بار موتور را ۲ برابر مي كنيم براي اينكه موتور به نقطه تعادل حد ماشين برسدحداكثر تغييرات زاويه δ چقدر است.



$25P_{\max} = P_{\max}\sin\delta_0$

$\delta_0 = 14.48^o$

Pe



$0.5\ \ P_{max} = P_{max} \sin \delta_1$

$\delta_1 = 30^o$

$\int_{14.48}^{30} (0.5 p_{max} - P_{max} \sin \delta) d\delta = \int_{30^o}^{\delta_2} (p_{max} \sin \delta - 0.5 P_{max}) d\delta$

$0.5(\frac{\pi}{6} - \frac{14.46 \times \pi}{180}) + \cos \frac{\pi}{6} - \cos 14.48^o$

$= \cos \frac{\pi}{6} - \cos \delta_2 + 0.5(\frac{\pi}{6} - \delta_2)$

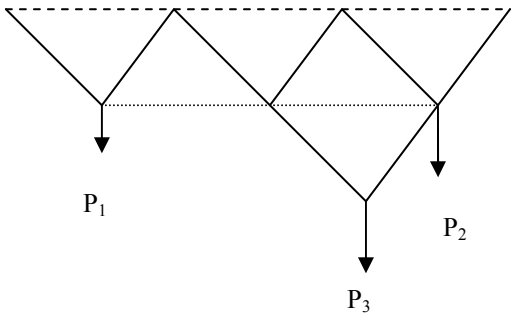
$2\cos \delta_2 + \delta_2 - 1.43 = 0$

فصل چهارم

پایداری در سیستم های قدرت

Power Systems Stability

براي يك شبكه در حالت عادي مي توان ولتاژها و جريانها را حساب كرد. وقتي بار جديدي را از شبكه حذف و يا به آن اعمال كنيم ويا اتصال كوتاه در شبكه ايجاد شود و در اينحال تغييراتي در شبكه ايجاد خواهد شد كه اگر اين تغييرات بطور تدريجي و آهسته باشد ممكن است شبكه تحمل كرده و به شرايط ديگر ازپايداري برسد ولي اگر شبكه نتواند اين تغييرات را تحمل كند، اجباراً با آمدن بار جديد شبكه فرو ريخته و ناپايدار خواهد شد. ژنراتورهاي موجود در شبكه چون سنكرون بوده و براي حالت هاي ديناميكي حساس هستند اگر تغييرات ناگهاني پيش آيد و در حالي كه بارها ثابتند ژنراتوري از مدار خارج شده، موجب خواهد شد قدرت آن ژنراتور به روي ديگر ژنراتورها تحميل شده و زاويه بارها و فلوهاي ژنراتورهاي ديگر افزايش يابد. در اين حال قدرت توربينها بايد بيشتر شود. افزايش قدرت ژنراتور با افزايش زاويه بار انجام خواهد شد. در اين حال اگر زاويه بار به حد ٦٠ ^{o}(زاويه بار بحراني) برسد، با افزايش ازمقدار ٦٠ ^{o} به بعد و باتوجه به رابطه $P = \frac{EV}{X}\sin\delta$ اين كار باعث كاهش P خواهد بود و ژنراتور نخواهد توانست اين بار تحميل شده را تحمل كند. در مواقع پيك بار (شب) كنترل شبكه مهم است چرا كه اگر نتوان پايداري كل شبكه را ايجاد كرد، بايستي قسبتي از شبكه را از مدار خارج كرد.



پايداري سيستم دوشينه يا دوماشينه را بحث و بررسي خواهيم كرد. اگر از سقفي وزنه هايي را از بعضي نقاط يك شبكه توري آويزان كرده باشيم، اگر طنابي از نقطه اي قطع شود، وضع ايستايي شبكه فرق خواهد كرد و سيستم وضعيت ديگري براي تحمل وزنه ها براي خود ايجاد مي كند. اما اگر طناب اصلي از سيستم قطع شود، ممكن است شبكه تحمل نكرده و از هم بپاشد ويا ممكن است وزن وزنه ها را زياد كنيم كه در نهايت سيستم تا حدي مي تواند افزايش تدريجي را تحمل كند. ولي اگر اضافه كردن وزنه از يك حد افزايش يابد ممكن است بعضي از طنابها و يا حتي خود سيستم از هم بپاشد.

انواع پايداري

۱) استاتيكي (ماندگار)

در این نوع پایداری تغییرات بصورت تدریجی و کم دامنه می باشد. در بررسی پایداری ماندگار از مدل ماشین ساده (بصورت یک منبع ولتاژ) برای ژنراتور سنکرون استفاده می شود. در این حالت، حد پایداری ماندگار ماشین سنکرون بصورت زاویه بار بحرانی ماشین (δ_C) زاویه قبل از خارج شدن ماشین از حالت سنکرونیزاسیون تعریف می شود. پایداری استاتیکی به شرایط بهره برداری سیستم قدرت اعم از تولید، انتقال و مصرف بستگی دارد.

۲)- ديناميكي

مسائل مربوط به پایداری استاتیکی و دینامیکی تقریبا یکسان می باشند. در پایداری دینامیکی نیز تغییرات بصورت تدریجی و جزئی در شبکه اتفاق می افتد. تغییرات زمانی در پایداری دینامیکی از حدود چند ده ثانیه تا چند دقیقه می باشد. در پایداری دینامیکی اثرات سیستم تحریک و سیستم گاورنر نیز در مدل ماشین سنکرون بررسی می شوند. پایداری دینامیکی با استفاده از پایدارساز های سیستم قدرت PSS بهبود می یابد.
وجود تغییرات تدریجی و کوچک باعث ایجاد نوسانات طبیعی در شبکه می شود. هرگاه دامنه نوسانات کم باشد درآنصورت نوسانات در زمان کوتاه مستهلک شده و پایداری دینامیکی واقع می شود. هرگاه دامنه نوسانات زیاد باشد درآنصورت نوسانات در زمان طولانی ادامه یافته و ناپایداری دینامیکی ایجاد می گردد.

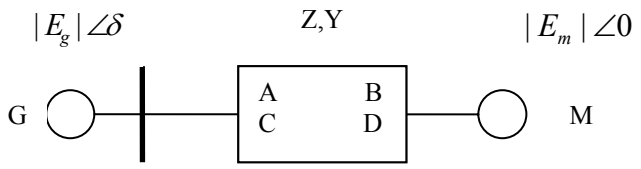
۳)- گذرا (Transient)

پایداری گذرا در اثر وقوع تغییرات و اختلال ناگهانی و شدید در سیستم شامل اتصال کوتاه، خروج بار، قطع خط، خروج ژنراتور و ... ایجاد می شود. تغییرات زمانی در پایداری گذرا در حدود چند صدم ثانیه تا چند ثانیه می باشد. در مساله پایداری گذرا، سرعت ماشین سنکرون در اثر تغییرات شدید قدرت الکتریکی و زاویه قدرت نقاط مختلف سیستم تغییر می یابد. در صورت عدم برطرف شدن عیب، ماشین های سنکرون در شبکه از سنکرونیزاسیون خارج می شود. در صورت برطرف شدن عیب شبکه به شرایط پایداری استاتیکی

قبل از وقوع غیب برگشته و در غیر اینصورت با قطع محل عیب از شبکه با حفظ یکپارچگی شبکه به شرایط پایداری استاتیکی بعدی خواهیم رفت.

پايداري ماندگار

در بررسي پايداري فرض مي شود ژنراتوري را با خط انتقال بلندي به يك بار وصل كرده ايم. ژنراتور با يك خط بلند به يك بار موتوري (سيستم يك ماشينه متصل به شبكه ∞) در نظر گرفته می شود.



$$\begin{bmatrix}\overline{E}_g\\ \overline{I}_g\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\overline{A}\ \overline{B}\\ \overline{C}\,\overline{D}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\overline{E}_m\\ \overline{I}_m\end{bmatrix}\Rightarrow\begin{cases}\overline{E}_g=\overline{E}_m\cosh\overline{\gamma}\ell+\overline{I}_m\overline{Z}_C\sinh\overline{\gamma}\ell\\ \overline{I}_g=\dfrac{\overline{E}_m}{\overline{Z}c}\sinh\overline{\gamma}\ell+\overline{I}_m\sinh\overline{\gamma}\ell\end{cases}$$

ثابت انتشار $\overline{\gamma}=\alpha+j\beta,\ \overline{Z}=R+j\omega L,\ \overline{Y}=G+j\omega C,\ \overline{Z}_c=\sqrt{\dfrac{Z}{Y}},\ \overline{\gamma}=\sqrt{ZY}$

$$\begin{cases}\overline{A}=\cos h\overline{\gamma}\ell=\overline{D} & \overline{A}\overline{D}-\overline{B}\overline{C}=1\\ \overline{B}=\overline{Z}_c\sin h\overline{\gamma}\ell & \overline{C}=\dfrac{1}{\overline{Z}_c}\sin h\overline{\gamma}\ell\end{cases}$$

$$\overline{A}=\overline{D}=1+\frac{\overline{Z}\overline{Y}}{2},\ \ \overline{B}=\overline{Z}(1+\frac{\overline{Z}\overline{Y}}{6}),\ \ \overline{C}=\overline{Y}(1+\frac{\overline{Z}\overline{Y}}{6})$$

$$\overline{S}_g=P_g+jQ_g=\overline{E}_g.I_g^*=\frac{|A||Eg|^2}{|B|}\angle b-a\ -\frac{|E_m||E_g|}{|B|}\angle b+\delta$$

$$\overline{A}=|A|\angle a\quad \overline{B}=|B|\angle b\quad \overline{C}=|C|\angle c\quad \overline{D}=|D|\angle d$$

$$\overline{E}_g=|E_g|\angle\delta\quad \overline{E}_m=|E_m|\angle 0\qquad \overline{A}=\overline{D}\quad \overline{A}\overline{D}-\overline{B}\overline{C}=1$$

اگر بتوانیم δ را تغییر دهیم:

$$Cos(b+\delta)=-1\Rightarrow b+\delta=\pi\Rightarrow(P_g\rightarrow P_g|_{\max})$$

بنابراین وقتي b به حدود 90° رسید قدرت ماکزیمیم از فرستنده گرفته مي شود در این صورت داریم: $b\approx\dfrac{\pi}{2}$

$$\overline{B}=jX=X\angle 90$$
$$|B|=X$$
$$b=90$$

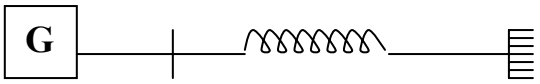
مقدار P_g همچنین وقتی به مقدار حداکثر خود خواهد رسید که داشته باشیم:

$a = 0$

$|A| = |D| = 1$

همچنين براي خطوط كوتاه $A = D = 1, B = Z, C = 0$ يعني از مقاومت خط صرف نظر مي شود.

براي يك ژنراتور كه به شين ∞ وصل شده است داريم:



$V = 1\angle 0\text{pu}$

$f = \text{cte}$

$$\overline{E} = jX_s\overline{I} + \overline{V}$$

$$\begin{cases} D = A = 1 \\ B = jXs \\ C = 0 \end{cases}$$

$$P_{eg} = \frac{|E||V|}{X_s}\sin\delta$$

$$Q = \frac{|E|}{X_s}(|E| - |V|\cos\delta)$$

$$P_{ij} = \frac{|A|}{|B|}|V_i|^2\cos(b-a) - \frac{|V_i||V_j|}{|B|}\cos(b+\delta)$$

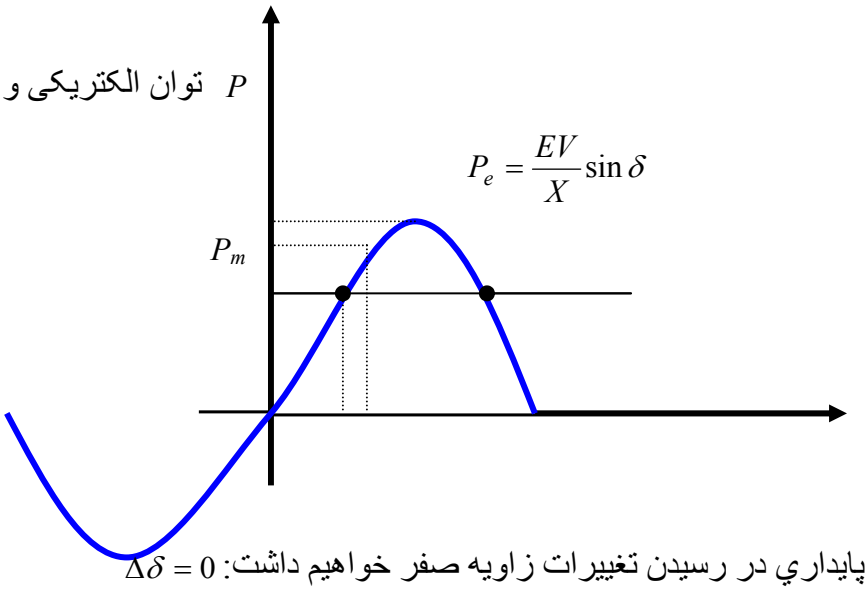
$$Q_{ij} = \frac{|A|}{|B|}|V_i|^2\sin(b-a) - \frac{|V_i||V_j|}{|B|}\sin(b+\delta)$$

پس تغييرات قدرت براي يك ژنراتور بصورت تغييرات سينوسي از δ است.

$$P_m = P_e + P_{loss}$$

$$P_{loss} \to 0$$

اگر از تلفات مكانيكي ژنراتور صرفنظر شود آنگاه خواهيم داشت $P_m = P_e$ (معادله نوسان در حالت پايدار)

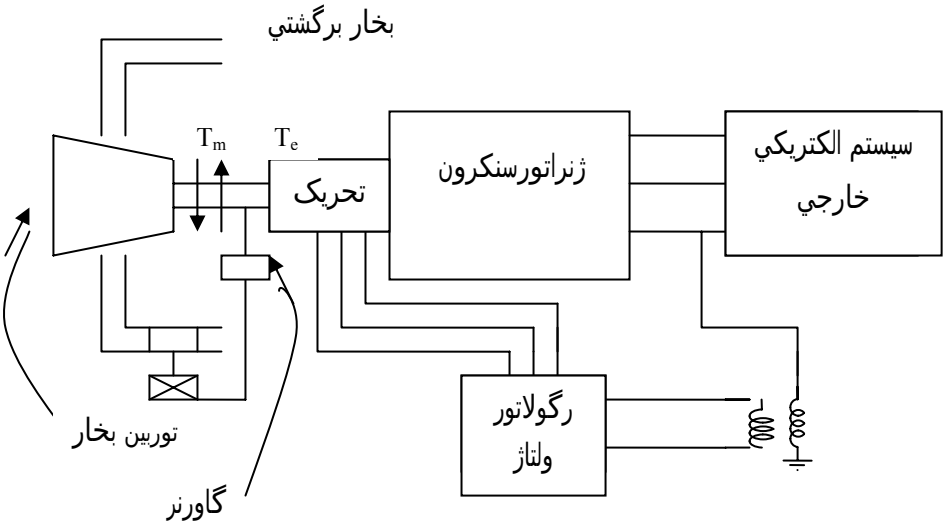


در حالت پايداري در رسيدن تغييرات زاويه صفر خواهيم داشت: $\Delta\delta = 0$

P_m را تا جايي مي توان افزايش داد تا δ به ۹۰ درجه برسد و از اين محدوده به بعد ژنراتور از حالت پايداري خارج مي شود. اگر افزايش قدرت تدريجي باشد زاويه بار فرصت پيدا خواهد كرد تا خروجيش را با شرايط جديد تطبيق دهد ولي تا محدوده ۹۰° (مرحله استاتيكي) ميتوان آنرا زياد كرد. پايداري ديناميكي يكدفعه (لحظه اي) خواهد بود وافزايش قدرت از ٦٠% بار تا ۹٥% بار خواهدبود. هر چند شايد امكان نداشته باشد ولي اين افزايش به صورت تدريجي رخ مي دهد. پس براي پايداري در يك شبكه قدرت ايجاد شود افزايش تدريجي قدرت توصيه مي شوند نه افزايش دفعه اي.

كنترل قدرت اكتيو

گاورنر بصورت يك سيستم مكانيكي خود كار عمل مي كند و از روي شفت توربين كم سرعتي يا پرسرعتي آنرا با فرمان دادن به شير اصلي بخار تنظيم ميكند



با افت ولتاژ در يك فاز اثرآن در ثانويه ترانس مشاهده شده و با تنظيم كننده ولتاژ به تحريك كننده، فرمان افزايش ولتاژ داده يا با افزايش ولتاژ در خروجي فرمان كاهش تحريك را مي دهد (سيستم خودكار الكتريكي)

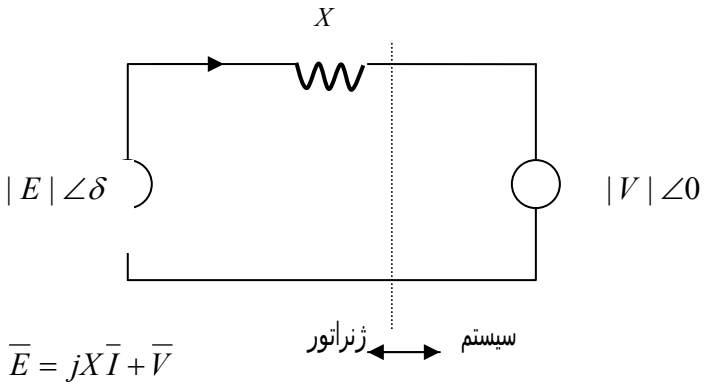
نتيجه:

۱-توان مكانيكي تبديلي به توان الكتريكي توسط شير بخار كنترل شود (تنظيم قدرت).

۲- ولتاژ ترمينال ماشين توسط تنظيم كننده يا رگولاتور ولتاژكنترل مي شود (تنظيم ولتاژ).

مدل تك ماشينه

اتصال ژنراتور به شين بي نهايت:



$$\overline{E} = jX\overline{I} + \overline{V}$$

$$\overline{S} = \overline{V}\overline{I}^{*} = \overline{V}(\frac{\overline{E}' - \overline{V}}{jX})^{*}$$

$$\overline{S} = \frac{|E||V|}{X}\angle 90 - \delta - j\frac{|V|^2}{X}$$

$$= \frac{|E||V|}{X}\sin\delta + j(\frac{|E||V|}{X}\cos\delta - \frac{|V|^2}{X})$$

$$= P + jQ$$

توان اكتيو وراكتيوي كه يك ژنراتور به شبكه تحويل مي دهد به صورت زير است:

$$P = \frac{|E||V|}{X}\sin\delta \qquad Q = \frac{|E||V|}{X}\cos\delta - \frac{|V|^2}{X}$$

با باز كردن هر چه بيشتر شير اصلي توربين T_m و نهايتاً P_m افزايش مي يابد. لذا T_e و P_e نيز افزايش مي يابد از آنجائيكه $X, |V|, |E|$ ثابت هستند δ افزايش خواهد يافت.

$$P_m \to \langle P_m' \quad \Rightarrow \quad \delta_0 \to \langle \delta'$$

پس با افزودن توان از P_m به P_m' زاويه δ نيز از δ_0 به δ' افزايش خواهد يافت. براي P بايستي حدي قايل شد و اين حد $(P_{\max})$ همان حد پايداي استاتيكي ناميده مي شود كه مقدار آن برابراست با:

$$P_{\max} = \frac{EV}{X} \qquad \sin\delta = 1 \qquad \delta = 90^{o}$$

زاويه بحراني $\delta = \delta_c$

اگر به فرض توان مكانيكي P_m از حد فوق فراتر رود ژنراتور از حالت سنكرونيزاسيون خارج مي شود. براي جلوگيري از اين امر در شبكه هاي قدرت ژنراتورها تحت زاويه كوچكی حدوداً ۱۰° الی ۲۰° كار مي كنند. از نظر پايداري زاويه بار ژنراتور هر چقدر كمتر باشد بهتر است. اگر دومين سيستم كنترل را در نظر بگيريم (تنظيم ولتاژ) با افزايش توان راكتيو تقاضا Q_D ، چون δ, X, V ثابت فرض مي شوند با افزايش تحريك ژنراتور E زياد شده نتيجتاً Q زياد مي شود (با افزايش E، P نيز افزايش مي يابد اما چون ثابت زمان

مكانيكي را بيشتر از الكتريكي فرض كرده ايم شير بخار و گاورنرنمي تواند به سرعت عمل كند) پس Q زياد شده و قدرت راكتيو تحويلي به شبكه افزايش مي يابد.

مثال – ژنراتور مربوط به سيستم فوق تحت شرايط نامي، ضريب قدرت ۰/۸ پس فاز كار مي كنند X=0.7Pu بر مبناي ولتاژو قدرت نامي ژنراتور($\cos\varphi = 0.8\,\text{lag}$)

الف- محاسبه δ, E, Q, P

ب – شيربخار را باز كنيم تا P بيشتر از ۲۰% زياد شود فرض الف را تكرار كنيد.

ج- سيستم را به فرض الف بازگردانده و حال تحريك كننده را طوري تنظيم مي كنيم كه E به ميزان ۲۰% زياد شود. مجدداً فرض الف را تكرار كنيد.

$$\overline{V} = 1\angle 0\ pu$$
$$\cos\varphi = 0.8 \quad \varphi = \arccos 0.8 = 36.9°$$
$$\overline{I} = 1pu\angle -36.9^o = 0.8 - j0.6$$
$$\overline{E}_0 = jX\overline{I}_0 + \overline{V} = j0.7(0.8 - j0.6) + 1 = 1.42 + j0.56$$
$$= 1.53\angle 21.5^o = \delta_0$$
$$= |E|\angle\delta_0$$

$$P_0 = \frac{E_0 V}{X}\sin\delta_0 = \frac{1.53\times 1}{0.7}\sin 21.5^0 = 0.8$$
$$Q_0 = \frac{E_0 V}{X}\cos\delta_0 - \frac{V^2}{X} = \frac{1.53\times 1}{0.7}\cos 21.5° - \frac{1^2}{0.7} = 0.6$$

ب- افزايش قدرت اكتيو نتيجه خواهد داد:

$$P_1 = 1.2P_0 = 1.2(0.8pu) = 0.96pu$$
$$E_1 = E = 1.53pu$$
$$\sin\delta_1 = \frac{P_1 X}{E_1 V} = \frac{0.96\times 0.7}{1.53\times 1} \rightarrow \delta_1 = 26.1°$$

افزايش δ نتيجه شده است. همچنين كاهش قدرت راكتيو نتيجه شده است:

$$Q_1 = \frac{1.53\times 1}{0.7}\cos 26.1° - \frac{1^2}{0.7} = 0.535pu$$

بنابراين با E ثابت، افزايش P به ميزان ۲۰% كاهش ۱۱% در Q را بما خواهد داد.

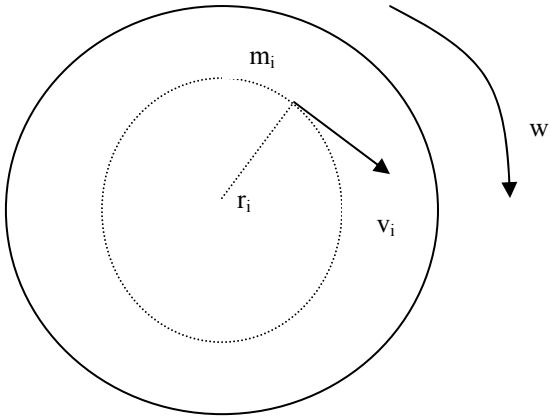
ج) با فرض اينكه تغييرات E بلافاصله روي P اثر نمي گذارد. باثابت نگه داشتن P بر روي تحريك عمل كرده و ۲۰ درصد نيروي محركه را افزايش مي دهيم در نتيجه قدرت راكتيو را نيز افزايش داده ايم.

$$P_2 = 0.8 \quad \Delta P = 0$$
$$E_2 = 1.2E_0 = 1.84$$
$$\delta_2 = \arcsin\frac{0.8\times 0.7}{1.84\times 1} = 17.8°$$

$$Q_2 = \frac{1.84 \times 1}{0.7}\cos 17.8 - \frac{1^2}{0.7} = 1.07\,pu$$

افزايش بيش از ٤٤ %

موقعي كه ناپايداري در شبكه روي مي دهد از حالت ديناميكي مي گذريم. حال روتوري كه با سرعت ω مي چرخد با تغييراتي در شبكه، تغييرات در سرعت را خواهد داشت. بايد ديد اين تغييرات چگونه است. جرم كوچك mi در داخل سيلندر نيز با سرعت ω مي چرخد.



$$\omega = \frac{d\theta}{d_t}$$

$$v_i = r_i\omega = r_i\frac{d\theta}{dt}$$

$$\gamma_i = \frac{dv_i}{dt} = r_i\frac{d\omega}{dt} = ri\frac{d^2\theta}{dt^2}$$

$F_i = m_i\gamma_i = m_i r_i \frac{d^2\theta}{dt^2}$ نيروي جزيي كه روي جرم اعمال مي شود.

$\Gamma_i = F_i r_i = m_i r_i^2 \frac{d\theta^2}{dt^2}$ كوپلي كه اين جرم جزيي بوجود مي آورد

تمامي جرمهائي كه سيلندر را پر كرده و كوپل هايي كه تشكيل مي دهند برابر است با (n جرم جزئي):

$$\Gamma_T = \Sigma T_i = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d^2\theta}{dt^2}\sum_{i=1}^{n} m_i' r_i^2$$

اگرw=cte

$$\Gamma_T = J.\frac{d^2\theta}{dt^2}$$

كار جزيي كه جرم جزيي انجام مي دهيد.

$$dw_i = F_i(r_i d\theta)$$

$$p_i = \frac{dwi}{dt} = \frac{Firid\theta}{dt} = F_i r_i.\omega$$

$$P_T = \sum P_i = \omega\sum F_i.r_i = \omega.\Gamma_T$$

انرژي جنشي روتور برحسب ممان اينرسي و سرعت زاويه اى

$$[MJ]E_k = \frac{1}{2}J\omega_m^2 = \frac{1}{2}M\omega_m = \frac{1}{2}M\omega_e$$

H ثابت اينرسي ماشين سنكرون است كه برابر است با نسبت انرژي جنبشي ذخيره شده در سرعت نامي به قدرت نامي ماشين. در مطالعه پايداري سيستم ها معمولاً از ثابت اينرسي ماشين ها استفاده مي شود. در شرايط نامي $W_m=W_s$.

$$H_n = \frac{E_{k,n}}{S_n}[\frac{MJ}{MVA}][\frac{MW\sec}{MVA}]$$

اگر قدرت مبناي سيستم S_b با قدرت نامي ماشين متفاوت باشد S_bH جايگزين S_nH_n مي‌شود

$$E_k = S_nH_n = S_bH$$

در اينجا ω_s و مقادير زاويه اي بصورت مكانيكي هستند

$$M = \frac{2S_bH}{\omega_s}$$

$$M = \frac{S_bH}{\pi f}\left[\frac{Mj\sec}{rad}\right] = \frac{S_bH}{180f_s}\left[\frac{MJ\sec}{dag}\right]$$

با تقسيم بر S_b بصورت پريونيت تبديل مي شود

$$P_m - P_e = M\alpha = \frac{S_bH}{\pi f_s}\alpha \quad \frac{-\deg}{s^2}$$

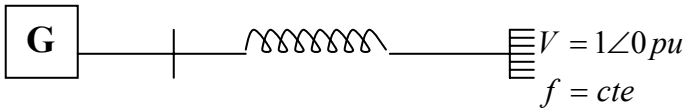
$$M' = \frac{M}{S_b} = \frac{H}{\pi f_s}\left[\frac{\sec^2}{rad}\right]$$

$$P_m - P_e = M'.\alpha = \frac{H}{\pi f_s}\alpha = \frac{H}{180fs}\left[\frac{\sec^2}{\deg}\right]$$

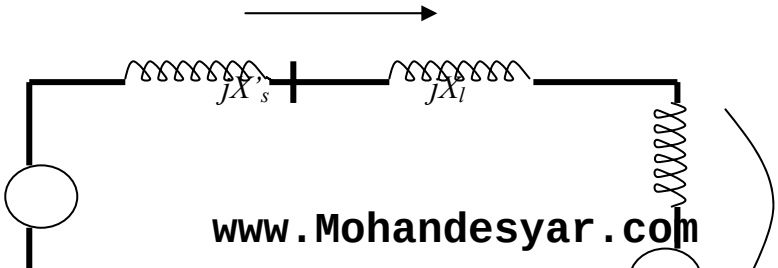
مزيت استفاده از H بجاي E_k آن است كه H مستقل از اندازه ماشين بوده و مقدار معمول آن در ماشين ها بين ۲ تا ۸ است.

مدل تك ماشينه

فرض مي كنيم يك ژنراتور به شين بي نهايت (با ولتاژ ۱ پريونيت و فاز صفر و راكتانس X_l) وصل باشد.



در حالت اتصال كوتاه و اختلال داريم:



jXs_m

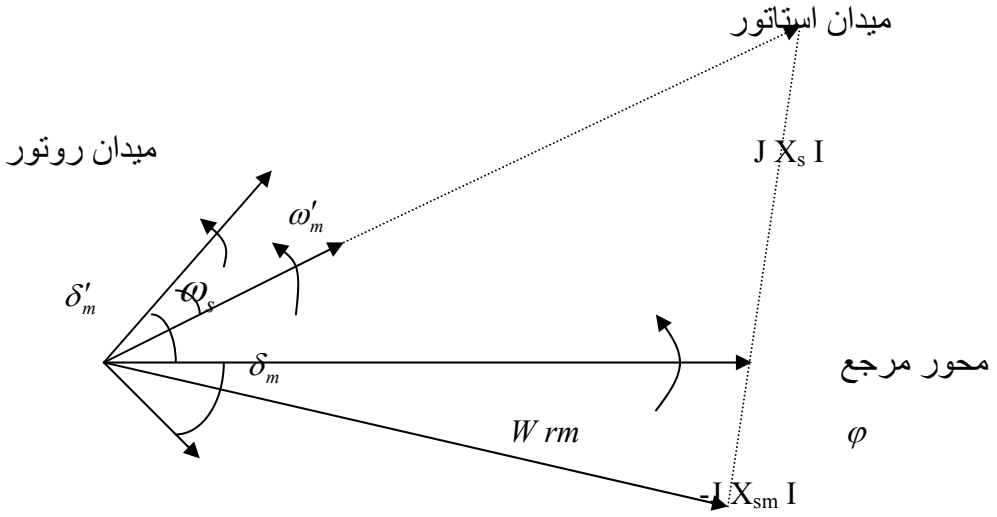
$$E_1 = | E_1 | \angle \delta$$

$$E_2 = | V | \angle 0$$

قدرت اكتيو تحويلي به سيستم خارجي به صورت زير است:

$$P = \frac{E_g V}{x'_s + x_l = x}$$

با توجه به اينكه ژنراتور سنكرون است، ميدان روتور با اندازه δ'_m از ميدان استاتور جلوتر است در شرايط عادي كار $\omega_m = \omega_s = \omega_{rm}$



I E_m

فرض كنيد كوپل مكانيكي شفت موتور بيشتر بشود واتصال كوتاهي در سيستم پيش آيد در اين صورت حالت استاتيكي بهم خورده و حالت ديناميكي پيش خواهد آمد. دراينصورت δ يا زاويه بار تغيير خواهد كرد. با اتصال كوتاه در سيستم خارجي يك جريان سلفي خواهيم داشت كه ۹۰ درجه پس فاز است (چون خط انتقال سلفي(X) است) و قدرت راكتيو به زمين را خواهيم داشت؛ لذا روتور سرعتش افزاش خواهد يافت كه تغيير δ_m باعث تغيير ω_s خواهد شد. دو حالت كلي ديناميكي داريم كه به صورت زير است:

مكانيكي $\omega = P\omega_m$ الكتريكي

$$\omega_m = \omega_s + \frac{d\delta'_m}{dt}$$

$$\omega_s = \omega_{rm} + \frac{d}{dt}(\delta_m - \delta'_m) \qquad \omega_{rm} = \omega_{reference\,machine}$$

$$\omega_m = \omega_{rm} + \frac{d\delta_m}{dt}$$

$$\omega = \omega_r + d\delta / dt$$

حال اگر اتصال كوتاه ۳ فاز پيش آيد تمام قدرت به قدرت راكتيو تبديل مي شود ولي اگر تك فاز باشد علاوه بر قدرت راكتيو به زمين، قدرت اكتيو هم به شبكه داده مي شود.

P_m-P_e=P_a

توان شتاب دهنده برابر است با توان مكانيكي روي شفت موتور منهای توان الكتريكی داده شده به شبكه در طول اختلال

با توجه به اينكه موتور يك اينرسي دارد و نمي تواند زاويه بار خود را دفعتاً تغيير دهد بايد بتدريج اينكارصورت گيرد و اين عمل بوسيله توان Pa صورت مي گيرد.

$$P_a = \omega_m T_a = \omega_m J\alpha$$

$$\text{Accelerating Power} = P_a\left[\text{MW}\right] \text{ or } \left[\text{MJsec/rad}_{\text{elect}}\right]$$

$$\alpha\left[\text{rad}_{\text{elect}} / \text{sec}^2\right]$$

J [MJsec2/rad2 elec or mech] or ممان اينرسي ماشين

[Kgm2]

$=M$ [MJsec/rad elec or mech] ممنتم زاويه اي ماشين (اندازه حركت زاويه اي ماشين)

w_mJ

$$P_a = P_m - P_e = \omega_m J\frac{d\omega}{dt} + \text{اصطكاک}$$

$$P_a = \omega_m T_m - \omega_m T_e = \omega_m \begin{cases}\text{mech}\\ \text{elect}\end{cases} \quad J\begin{cases}\text{mech}\\ \text{elect}\end{cases} \quad \frac{d\omega}{dt}\begin{cases}\text{elect}\\ \text{elect}\end{cases} + \text{اصطكاک}$$

$$P_a = P_m - P_e = \omega_m J\frac{d}{dt}(\omega_r + \frac{d\delta}{dt}) \qquad \omega_r = \omega_{reference} \qquad \omega_{re} = \omega_{reference\,electrical} = \omega_s$$

$$P_a = P_m - P_e = \omega_{\text{m}} J(d\frac{\omega_r}{dt} + \frac{d^2\delta}{dt^2})$$

و با فرض صفر بودن اصطكاك و ثابت بودن ω_r داريم:

معادله نوسان ماشين سنكرون

$$P_a = P_m - P_e = M(\frac{d^2\delta}{dt^2}) = M(\frac{d\omega}{dt}) = M\alpha$$

$$P_a = P_m - P_e = M\alpha$$

$$P_a = P_m - \frac{EV}{X}\sin\delta = M\frac{d\omega}{dt}$$

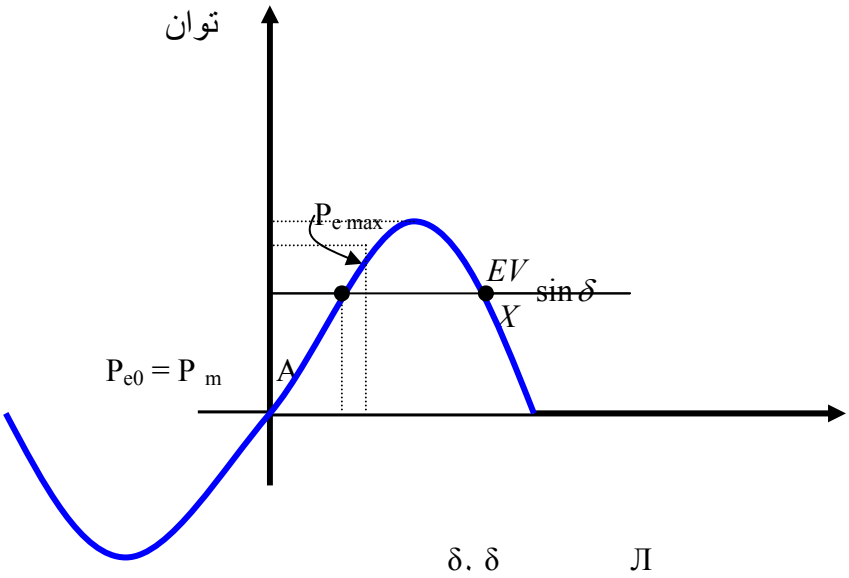
$$P_a = P_m[\text{pu}] - \frac{EV}{X}\sin\delta_{elect} = M\frac{d^2\delta}{d^2t} \qquad \Rightarrow \qquad \delta(t)$$

باحل معادله ديفرانسيل فوق مي توان δ را بر حسب زمان رسم نمود و پس از اين مورد كار ساده است. چون مي خواستيم ببينيم δ_m تغيراتش با زمان چگونه است و آيا حالت ديناميكي يا گذرا است و پاسخ به چه صورتي است و در حالت كلي مسئله پايداري به اين صورت حل مي شود.

فرض مي كنيم كه ژنراتوري طبق رابطه زير به شبكه اي قدرتي را تحويل مي دهد.

$$P_m = P_e = \frac{EV}{x}\sin\delta$$

اين رابطه فقط در حالت استاتيكي صدق مي كند. چون ω ثابت است پس $o = \frac{d\omega}{dt}$



مثال ـ يك توربور ژنراتور چهار قطبي، با فركانس ۵۰ هرتز،توان نامي ۲۰ MVA و ولتاژ نامي ۱۱ kv داراي ثابت اينرسي ماشين برابر H=۹ Mw.S/MVA است. هر گاه قدرت ورودي مكانيكي با در نظر گرفتن تلفات برابر ۲۶۸۰۰ hp و قدرت الكتريكي ۱۶ MV باشد مقدار شتاب روتور را بدست آوريد.

$$P_M = 26800 \times 746 \times 10^{-6} = 19.99MW$$
$$Pe = 16MW$$
$$Pa = Pm - Pe = 19.99 - 16 = 3.99MW$$
$$S = 20MVA, H = 9S$$
$$M = \frac{SH}{\pi f} = \frac{20M \times 9}{\pi .50} = 1.146Mws^2 / rod(elect)$$

$$Pa = M\frac{d^2\delta}{dt^2} \Rightarrow 1.146\frac{d^2\delta}{dt^2} = 3.99$$
$$\alpha = \frac{d^2\delta}{dt^2} = 3.48 \qquad rad(elect)/s^2 = 199.5\deg(elect)/s^2$$

ادامه فصل پنجم

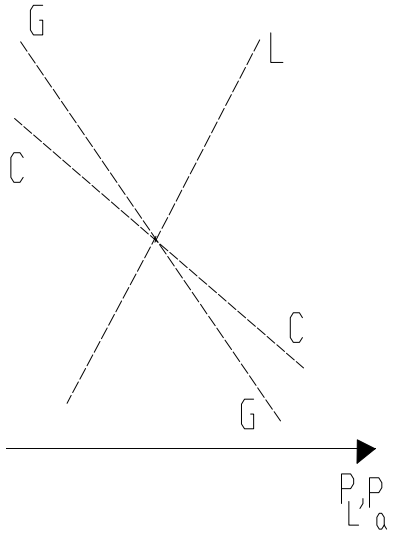
كنترل توان اكتيو و فركانس

Active Power & Frequency Control

Interconnected Tie line system

بهره‌برداري سيستم‌هاي به هم پيوسته

اگر به دلايلي بار سيستم تغيير يابد مشخصات بار سيستم پارالل با مشخصات قبلي خواهد بود كه موجب كاهش فركانس خواهد شد. براي آنكه سيستم را در همان فركانس قبلي بكار ببريم بايد مشخصات G را پارالل با حالت قبلي تغيير دهيم در اين حالت مشخصات سيستم نيز پارالل تغيير خواهد كرد.



$$P_{G1} - P_{load} = P_{G0} + 10\beta_1(f_{act} - f_0) - 10\beta_2(f_{act} - f_0) - P_{L0}$$

اين براي يك واحد است.

حال اگر در بار تقاضا به اندازه dp_L تغییر حاصل شود. با افزایش dp_G سعي مي‌شود این تغییرات به صفر رسد حال اگر با تغییرات در تولید نتوان در تغییرات بار تقاضا را به صفر رساند در آن صورت به اندازه dp در سیستم نامتعادلي به وجود مي‌آید.

$$-dP = dP_D - dP_G = dP_D \pm dP_{tie} \quad (+\text{ exit from region})\ (\text{-enter to region})$$

$$-\frac{dP}{df} = \frac{dP_D}{df} - \frac{dP_G}{df}$$

$$K = \frac{dP_D}{df} - \frac{dP_G}{df} \quad \left[\frac{\text{MW}}{\text{Hz}}\right]$$

این نسبت Stiffness یا سفتي نامیده مي‌شود. اگر به اندازه ۱۰% در تغییرات بار داشته باشیم به اندازه ۱% تغییرات در فرکانس باشد سیستم نرمال است.

$\frac{dP_G}{df}$ به وسیله منحني GG **یا** G′G′ بدست مي‌آید

$\frac{dP_D}{df}$ به وسیله منحني LL **یا** L′L′ بدست مي‌آید

پس داریم:

$$dP = dP_G - dP_D \quad K = -\frac{dP}{df} \rightarrow df = -\frac{dP}{K}$$

df بخاطر افت فرکانس در اثر نامتعادلي می باشد.

دو ناحیه را به صورت پیوسته به هم در نظر بگیریم و تحت این شرایط بایستي نواحي و علت بهم پیوسته بودن را اشاره کنیم. هر ناحیه از واحد تولیدي و بارهاي مخصوص بخود تشکیل مي‌شود.

A_{KA} tie line dp dp_D B dp_G K_B

dptie

dp_{AB}

dp_{12}

هر ناحیه بایستي Reserve مخصوص بخود داشته باشد توسط خط مشترك این دو سیستم به صورت بهم پیوسته مورد بهره‌برداري قرار مي‌گیرند این مي‌تواند اطمینان سیستم را بالا ببرد. سیستم قوي مي‌شود انرژي KE ذخیره شده در سیستم افزایش مي‌یابد براي تغییرات جز بار فرکانس بدان صورت تغییرات ندارد. هر چه سیستم بزرگ باشد بر سیستم بي‌نهایت بیشتر نزدیك مي‌شویم سیستم‌ها به صورت پیوسته بهم مورد مصرف قرار مي‌گیرند.

ظرفیت انتقال این خط نسبت به ظرفیت انتقال هر کدام از نواحي کمتر است.

توان از ناحیه خارج شود + توان به ناحیه داده شود-

در ناحیه B به اندازه dP_D تغییراتي در بار مصرفي بطور ناگهاني رخ مي‌دهد. ابتدا خود ناحیه این مقدار تغییرات ناگهاني بار را تامین مي‌کند. حال اگر خودش نتواند این ناحیه باندازه dP نامتعادلي دارد که مي‌تواند از A کمك بگیرد چون این دو ناحیه بصورت بهم پیوسته مورد بهره‌برداري هستند داراي فرکانس مشخص هستند اگر این ناحیه به اندازه dP کمبود داشته باشد بایستي قدرت از A بگیرد.

تغییرات در قدرت ارسالي dP_{tie} (از A بر B) وقتي از ناحیه خارج مي‌شود + و قتي به ناحیه وارد مي‌شود – است این dP_{tie} که از ناحیه A گرفته شود و به B وارد بشود – است.

تغییرات فرکانس

$$df_B = -\left(\frac{dP_D - \Delta(dP_{tie})}{K_B}\right) = -\frac{(0 + dP_{tie})}{K_A} = df_A$$

چون توان از ناحیه A به سمت ناحیه B است پس در ناحیه A توان تبادلی بصورت $+dP_{tie}$ و درناحیه B بصورت $-dP_{tie}$ می باشد.

اگر ناحیه ضریب سفتي هر ناحیه و نامتعادلي ناحیه B در دست باشد مقدار قدرت ارسالي tie line را بدست آورده و فرکانس جدید سیستم را بدست می آوریم.

$$dP_{tie} = \left(\frac{K_A}{K_A + K_B}\right) dP \Rightarrow f$$

در دو ناحیه متصل و بهم پیوسته داریم. $df_A = df_B$

مثال ـ دو سیستم بهم پیوسته قدرت که داراي فرکانس 50Hz مي‌باشد بوسیله B و A مشخص شده‌اند و به ترتیب داراي ضریب سفتي (stiffness) $500\frac{\text{MW}}{\text{HZ}}, 750\frac{\text{MW}}{\text{HZ}}$ مي‌باشند که به وسیله tie line بهم پیوسته‌اند اگر بار سیستم B بطور ناگهاني 300MW افزایش یابد: الف ـ مقدار قدرت انتقالي از tie line به فرکانس جدید بهم پیوسته را پیدا کنید

حل ـ چون دو ناحیه بهم پیوسته هستند، با وجود تغییرات بار در ناحیه B، توان انتقالی از ناحیه A خارج و به ناحیه B وارد مي‌شود و برای این دو ناحیه به هم پیوسته $\Delta f_A = \Delta f_B$.

$$-\frac{(dP - dP_{tie})}{K_B} = -\frac{(0 + dP_{tie})}{K_A}$$

$$-\frac{300 - dP_{tie}}{500} = -\frac{dP_{tie}}{750} \rightarrow dP_{tie} = 180\text{MW}$$

$$\Delta f_A = \frac{0 + \Delta P_{tie}}{K_A} = \frac{180}{750} = 0.24\text{Hz}$$

$$\Delta f_B = \frac{\Delta P - \Delta P_{tie}}{K_B} = \frac{300-180}{500} = 0.24\text{Hz}$$

$$f_{act} = f_0 - \Delta f = 50 - 0.24 = 49.76\text{Hz}$$

هر دو سيستم در فركانس مشترك f در حال كار هستند.

هر گاه خط ارتباطي tie بين دو سيستم قطع شود. فركانس هر كدام از سيستمها به صورت زير خواهد بود:

افزايش فركانس به خاطر افزايش توليد توان در ناحيه A $f_A = f + \frac{dP_{tie}}{K_A}$

كاهش فركانس به خاطر كاهش توليد توان در ناحيه B $f_B = f - \frac{dp_{tie}}{K_B}$

در اين صورت $\frac{dP_{tie}}{f_A - f_B} = \frac{K_A K_B}{K_A + K_B}$

$$dP_{tie} = \frac{K_A K_B}{K_A + K_B}(f_A - f_B) = \frac{K_A K_B}{K_A + K_B}\Delta f_{AB}$$

بنابراين با قطع خط ارتباطي و اندازه‌گيري فركانسهاي f_A و f_B مرتبط به هر ناحيه مقادير ضرايب سفتي K_A و K_B بر ناحيه محاسبه مي‌شود.

ب- در قسمت بعد فرض مي‌شود كه اين دو ناحيه بصورت بهم پيوسته كار مي‌كنند و فركانس سيستم f است حال اگر بطور ناگهاني اين tie line باز مي‌شود حال بايد ديد فركانس هر ناحيه چقدر مي‌شود.

$$f_A = f + \frac{\Delta P_{tie}}{K_A} = 49.76 + \frac{180}{750} = 50\text{Hz}$$

$$f_B = f - \frac{\Delta P_{tie}}{K_B} = 49.76 + \frac{180}{500} = 49.4\text{Hz}$$

$$K = \frac{dP_D}{df} - \frac{dP_G}{df}$$

تاثير مشخصه فركانس بروي بار مصرفي را اندازه‌گيري مي‌كند $\frac{dP_D}{df}$

$dP_G \alpha (P_T - P_G)$ ظرفيت توان توربين متصل به شبكه توان خروجي از ژنراتورها

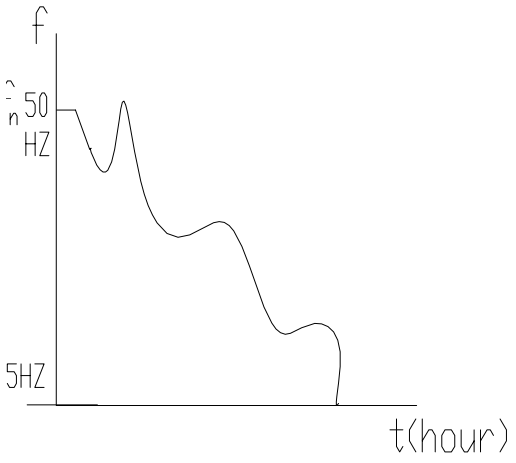
با صرف نظر كردن از تلفات، در شرايط ماندگار SS دوباره $P_D = P_G$

بنابراين $K = K_1 P_T - K_2 P_L$

در اينجا براي هر شبكه مقدار K بصورت آزمايشي و در رنج قدرت مناسبي (حداقل و حداكثر قدرت انتقالي) براي دو سيستم مجزاي بزرگ كه توسط يك لينك بهم متصل شده‌اند مشخص مي‌شود. در اين آزمايش اتصال بين دو سيستم قطع شده تغييرات فركانس اندازه‌گيري مي‌شود.

درسيستمهاي كوچك تغييرات بار باعث بوجود آمدن تغييرات زياد در فركانس مي‌شوند بنابراين در اينگونه سيستم‌ها لازم است گاورنرهاي الكتريكي مشخصه بار – فركانس را بهبود بخشند.

ناشي از تغييرات بار شديد در سيستم شامل صاعقه، ممكن است اين سيستم اصلي قطع شود در آن صورت توليد داخلي سيستم جوابگوي مصرف داخلي نبوده و فركانس بشدت افت مي‌كند.



مدل سازي خط رابط بين دو ناحيه ۱ و ۲

در كاركرد عادي شبكه، توان عبوري از خط رابط توان عبوري از ۱ به ۲ مثبت است.

$$P_{12}^0 = \frac{\left|V_1^0\right|\left|V_2^0\right|}{X} \quad \sin(\delta_1^0 - \delta_2^0)$$

ولتاژ ابتداي خط رابط $\overline{V_1} = \left|V_1^0\right| < \delta_1^0$

$$\overline{V_2} = \left|V_2^0\right| < \delta_2^0$$

تغييرات توان خط رابط به ازاي تغييرات بسيار كوچك δ_1 و δ_2

$$\delta_1 = \delta_1^0 + \Delta\delta_1 \quad , \quad \delta_2 = \delta_2^0 + \Delta\delta_2$$

$$\Delta P_{12} \approx \frac{\left|V_1^0\right|\left|V_2^0\right|}{X}\cos(\delta_1^0 - \delta_2^0)(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2)$$

ضريب هم گاهي = ضريب سنكرونيزه كننده

$$T_{12}^0 \triangleq \frac{\left|V_1^0\right|\left|V_2^0\right|}{X}\cos(\delta_1^0 - \delta_2^0)$$

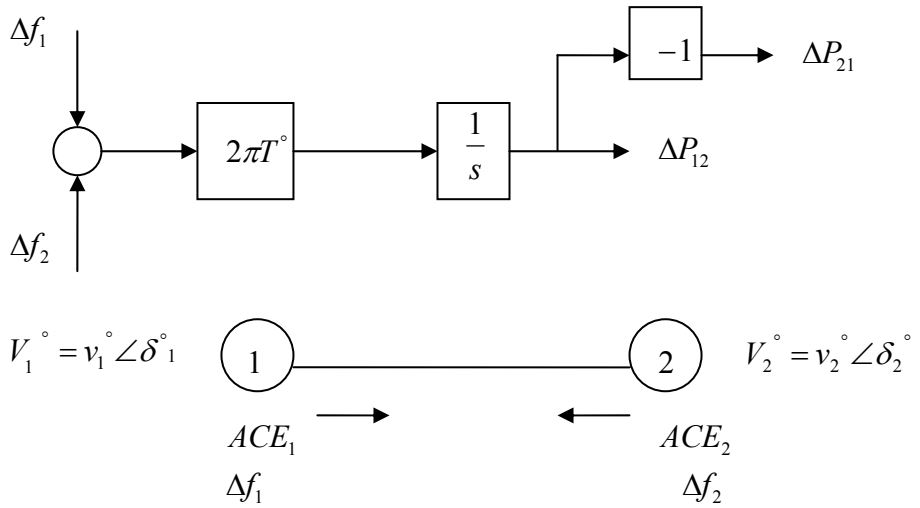
رابطه تغييرات فركانس با تغييرات زاويه بار

$$\omega = 2\pi f \Rightarrow \Delta\omega = 2\pi\Delta f \Rightarrow \begin{cases} \Delta f = \dfrac{1}{2\pi}\dfrac{d}{dt}(\Delta\delta) \Rightarrow \Delta\delta = 2\pi\int \Delta f dt \\ \Delta f = \dfrac{1}{2\pi}\dfrac{d}{dt}(\delta_0 + \Delta\delta) \end{cases}$$

$$\Delta P_{12} \approx 2\pi T_{12}^0(\int \Delta f_1 dt - \int \Delta f_2 dt)$$

$$\Delta P_{12}(S) = \frac{2\pi T_{12}^0}{s}(\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s))$$

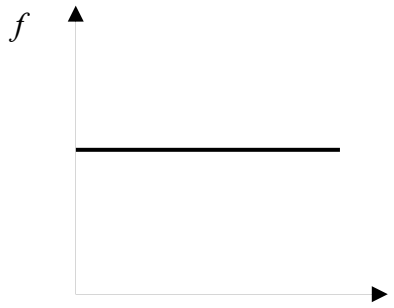
نمايش مدل خطي دو ناحيه با يك خط رابط Tie Line $\Delta P_{12} + \Delta P_{21} = \Delta P_{LOSS} \to 0 \quad \Rightarrow \Delta P_{21} = -\Delta P_{12}$



انواع بهره‌برداري از سيستم‌هاي بهم پيوسته

۱- در اين حالت سيستم‌ها طوري بهره‌برداري مي‌شوند كه تك‌تك سيستم‌ها فقط فركانس خود را كنترل مي‌كنند.

Flat frequency control (infinile Bias)



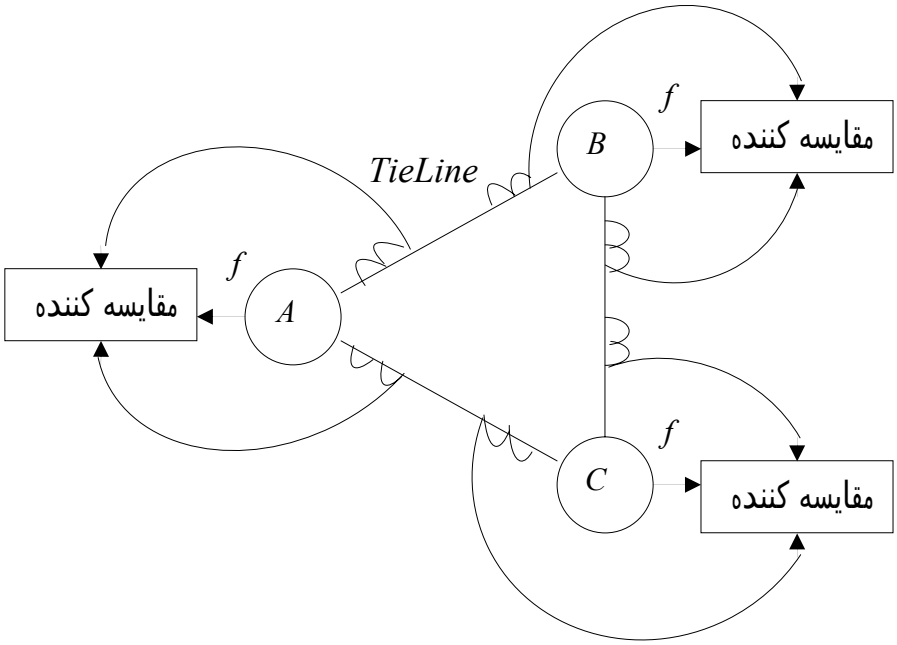
۲- هر سيستم قدرت tie line را بدون توجه به فركانس سيستم كنترل مي‌كند. هر ناحيه سعي دارد مقدار قدرت لازم براي فرستادن به نواحي ديگر را بدون توجه به فركانس تهيه كند.

Flat tie line control (zero bias)

۳- هيچ كدام از اين كنترل‌ها براي بهره‌برداري مناسب نيستند.

Tie Line with frequency Bias

براي ۳ ناحيه بهم پيوسته هر ناحيه بايستي قدرت فرستاده شده ازtie line را اندازه‌گيري كرده و به سيستم مقايسه كننده بدهد تا قدرت انتقالي از يك ناحيه بر ناحيه مقايسه مي‌شود، قدرتي كه بايستي دريافت مي‌شد و در اينجا يك tie Line error داريم و همچنين فركانس بايستي به يك مقايسه كننده داده شود تا خطاي فركانس نيز مشخص شود.



B یا قبلي عبارت است از :

$$\begin{cases} ACE = (P_0 - P_{act}) - 10\beta(f_0 - f_{act}) \\ ACE = \Delta P_{AB} + K_A \Delta f \end{cases}$$

و مقداري منفي است.

β : Area Bias $\frac{\text{MW}}{0.1\text{Hz}}$

ACE : Area Control Error

P_0 , f : Programmed Power and Frequency

P_{act} , f_{act} : Actual Power and Frequency

براي نواح ديگر نيز همچون كاري بايستي انجام شود.

مثال ـ در دو سيستم بهم پيوسته A و B تبادل خالص قدرت براساس برنامه‌ريزي قبلي 200MW درسيستم A و B مي‌باشد اگر مقدار حقيقي تبادل از سيستم A و B 150MW و فركانس 50HZ و فركانس حقيقي 50.05HZ در منطقه B باشد خطاي كنترل منطقه B را پيدا كنيد.

مقدار بایاس برابر است با $\frac{-50\text{MW}}{0.1\text{HZ}}$

$$\text{ACB}_\text{B} = (-200 - (-1501) - 10(-50)(50 - 50\text{p}5) = -75\text{MW}$$

اين نشانگر اين است كه چون اين خطاي منطقه منفي است پس در ناحيه B بيش از مورد نياز قدرت وجود دارد و لازم است قدرت ناحيه B به اندازه 75MW پائين آورده شود.

كنترل بایاس فركانس سیستم دوناحیه‌اي Frequency Control

در كنترل انتگرالي یا كنترل كامل سیستم كنترل بار ـ فركانس حلقه بسته با مطالعه منحني‌هاي پاسخ در مي‌یابیم كه براي بازگرداندن فركانس به مقدار اولیه خود باید نوعي كنترل كننده انتگرالي باز نشاننده به سیستم دو ناحیه‌اي مورد بحث افزوده شود. خطاي ایستاي فركانس بطور دپریا، به همان دلیلي كه براي حالت تك ناحیه‌اي گفته شد، در اینجا نیز غیرقابل تحمل است. همچنین، یك خطاي ایستاي دیرپا یا شارش توان خط رابط ـ یا به عبارت دیگر «مبادله سهوي» به معني پشتیباني دائمي یك ناحیه بوسیله ناحیه دیگر است. یكي از اصول اساسي همیاري آن است كه هر ناحیه باید قادر به تامین بار خود باشد.

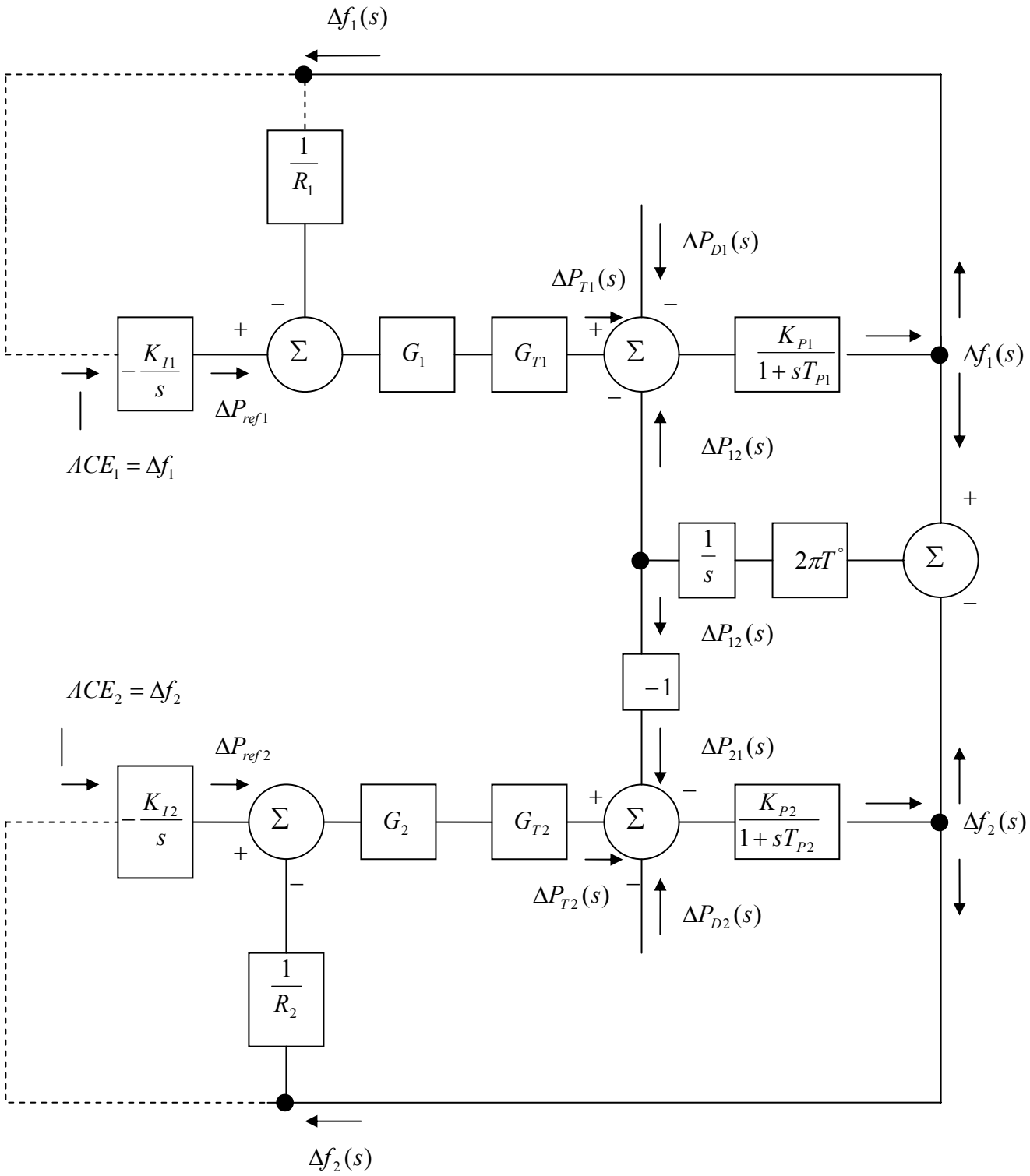
در طي سالهاي گذشته روش‌هاي گوناگون كنترل انتگرالي در مورد سیستم‌هاي چند ناحیه‌اي آزمایش شده‌اند و پیوسته جاي خود را به روش‌هاي جدیدتري داده‌اند. براي مثال، در سیستم دو ناحیه‌اي مورد بحث مي‌توانستیم فرض كنیم كه ناحیه ۱ عهده‌دار بازگرداندن فركانس به مقدار اولیه باشد و ناحیه ۲ شارش توان خط ارتباط را كنترل كند. در این صورت خطاي كنترل ناحیه‌ها به صورت زیر مي‌بودند:

$$ACE_1 \triangleq \Delta f_1$$

$$ACE_2 \triangleq \Delta f_2$$

این خطاها (ACE)ها از طریق انتگرال‌گیرهاي كند به تغییر دهنده‌هاي سرعت مربوطه وارد مي‌شدند. چنین طرحي ممكن است عملي باشد ولي كاركرد خوبي نخواهد داشت. در واقع در سالهاي اولیه هم یاري بین ناحیه‌ها، یك ناحیه عهده‌دار تنظیم فركانس سیستم و وظیفه ناحیه‌هاي دیگر آن بود كه هر یك «مبادلات خالص توان» خود را در حد صفر نگه دارند. مشكل این طرح آن بود كه ناحیه مركزي مسئول كنترل فركانس سعي در تنظیم فركانس هر ناحیه داشت در حالي كه خود آن ناحیه‌ها در حال تنظیم مبادلات توان با نواحي دیگر بودند. در نتیجه نوسان گسترده‌اي در محدوده‌هاي توان تولیدي ناحیه مركزي به چشم مي‌خورد.

در نتیجه تحقیقات اولیه‌اي كه توسط كوهن صورت گرفت، استانداردي براي كنترل سیستم بنام «كنترل بایاس خط رابط» ارائه شد و بر این اصل استوار است كه تمامي اعضاي همیاري افزون بر كنترل مبادله خالص خود، بایستي در كنترل فركانس نیز مشاركت داشته باشند.


$\Delta f_1(s)$
$\frac{1}{R_1}$
$\Delta P_{D1}(s)$
$\Delta P_{T1}(s)$
$-\frac{K_{I1}}{s}$
Σ
G_1
G_{T1}
$\frac{K_{P1}}{1+sT_{P1}}$
$\Delta f_1(s)$
ΔP_{ref1}
$ACE_1 = \Delta f_1$
$\Delta P_{12}(s)$
$\frac{1}{s}$
$2\pi T^{\circ}$
-1
$ACE_2 = \Delta f_2$
ΔP_{ref2}
$\Delta P_{21}(s)$
$-\frac{K_{I2}}{s}$
G_2
G_{T2}
$\frac{K_{P2}}{1+sT_{P2}}$
$\Delta f_2(s)$
$\Delta P_{T2}(s)$
$\Delta P_{D2}(s)$
$\frac{1}{R_2}$
$\Delta f_2(s)$

كنترل بایاس توان خط رابط و فركانس در سیستم دو ناحیه‌اي Tie Line with Frequency Bias

به منظور اعمال كنترل بایاس خط رابط به سیستم دوناحیه‌اي، در شكل زیر حلقه‌هاي خط چین را به نمودار قبلي مي‌افزاییم. در این حالت خطاي كنترل هر ناحیه به صورت یك تركیب خطي فركانس و خط رابط خواهد بود:

$$ACE_1 \triangleq \Delta P_{12} + B_1 \Delta f_1 \to O$$

$$ACE_2 \triangleq \Delta P_{21} + B_2 \Delta f_2 \to O$$

در این صورت خروجي‌هاي تغییر دهنده‌هاي سرعت نیز به صورت زیر خواهند بود:

$$\Delta P_{ref,1} = -K_{11} \int (\Delta P_{12} + B_1 \Delta F_1) dt$$

$$\Delta P_{ref,2} = -K_{12} \int (\Delta P_{21} + B_2 \Delta F_2) dt$$

ثابت‌هاي K_{11} و K_{12} بهره‌هاي انتگرال‌گیرها هستند و ثابت‌هاي B_1 و B_2 پرامترهاي بایاس فركانس مي‌باشند. علامت منفي بدان خاطر است كه اگر در هر ناحیه هر كدام از كمیتةاي خطاي فركانس و یا نمي‌توان خط رابط منفي شوند، باید به میزان تولید آن ناحیه افزوده شود.

پاسخ ایستاي سیستم

بنابه دلائلي كه در زیر خواهد آمد، راهبرد كنترلي بالا انحرافات حالت دائم فركانس و توان خط رابط را حذف خواهد كرد.

به دنبال تغییر پله‌اي بار در هر ناحیه، تنها هنگامي تعادل ایستاي جدید – اگر چنین تعادلي وجود داشته باشد ـ حاصل خواهد شد كه خروجي تغییر دهنده‌اي سرعت به مقادیر ثابتي رسیده باشند. ولي این شرط لازم مي‌دارد كه انتگراندهاي معادله صفر باشند، یعني

$$\Delta P_{12.0} + B_1 \Delta fo = o$$

$$\Delta P_{21.0} + B_2 \Delta fo = o$$

$$\Delta f_1^0 = \Delta f_2^0 = \Delta f^0$$

$$\Delta P_{21} = -\Delta P_{12} MW$$

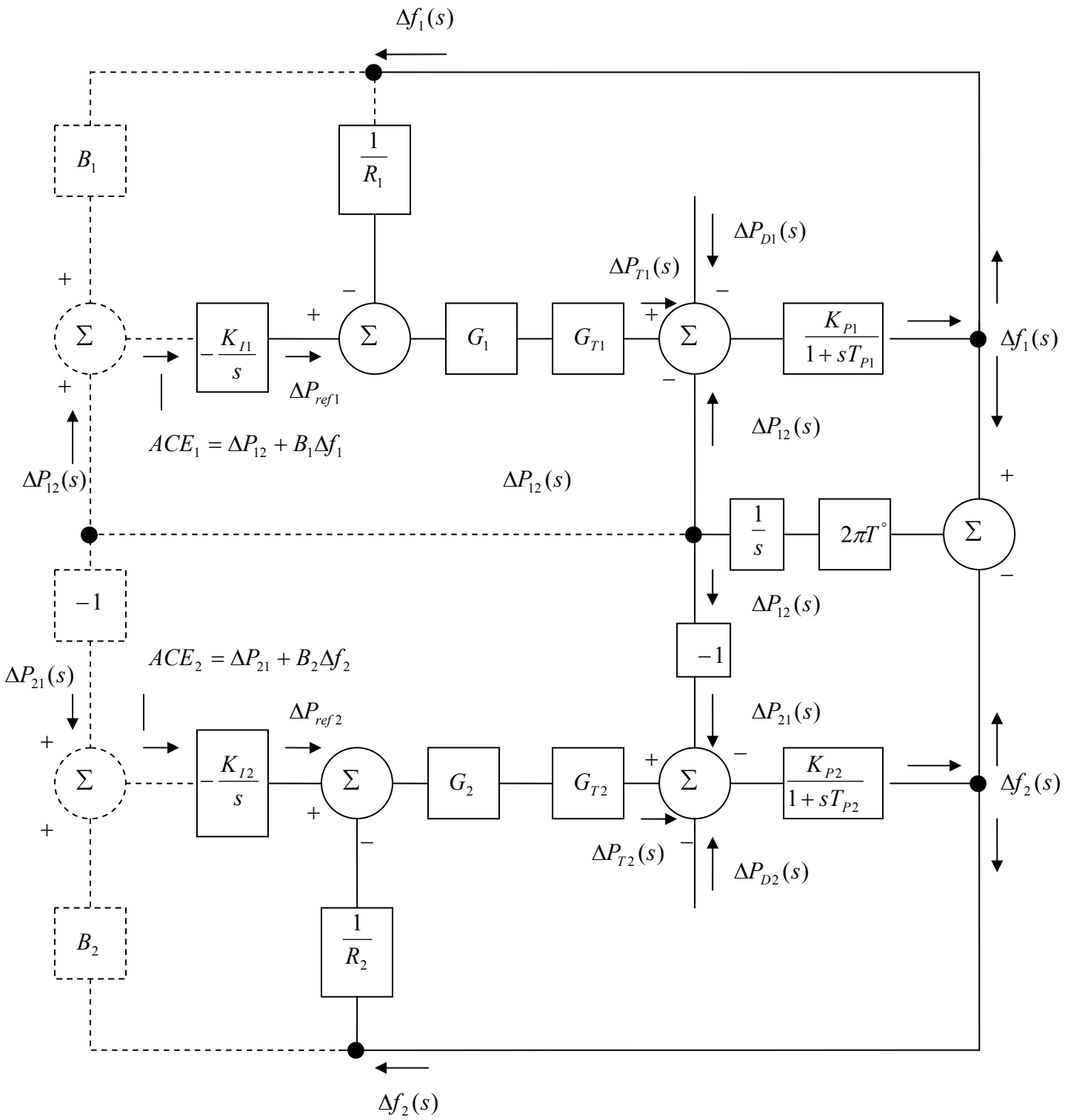
$$(\Delta P_{loss} = 0)$$

از دید معادله، این شرایط تنها وقتي برقرار خواهند بود كه:

$$(B_1 + B_2)\Delta f^0 = 0 \to \Delta f_0 = \Delta P_{12.0} = \Delta P_{21.0} = 0$$ در حالت ماندگار

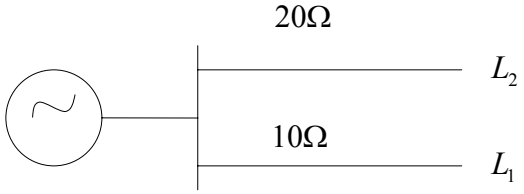
كنترل بایاس توان خط رابط و فركانس در سیستم‌هاي چند ناحیه‌اي

$$ACE_i = \sum \Delta P_{ij} + B_i \Delta f_i$$

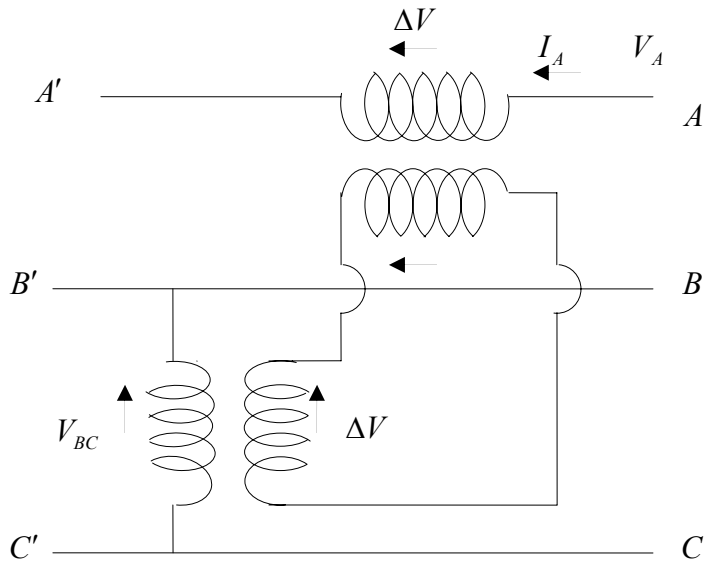

$\Delta f_1(s)$
B_1
$\frac{1}{R_1}$
$\Delta P_{D1}(s)$
$\Delta P_{T1}(s)$
Σ
$-\frac{K_{I1}}{s}$
G_1
G_{T1}
$\frac{K_{P1}}{1+sT_{P1}}$
$\Delta f_1(s)$
ΔP_{ref1}
$ACE_1 = \Delta P_{12} + B_1 \Delta f_1$
$\Delta P_{12}(s)$
$\frac{1}{s}$
$2\pi T^{\circ}$
-1
$ACE_2 = \Delta P_{21} + B_2 \Delta f_2$
$\Delta P_{21}(s)$
ΔP_{ref2}
$-\frac{K_{I2}}{s}$
G_2
G_{T2}
$\frac{K_{P2}}{1+sT_{P2}}$
$\Delta f_2(s)$
$\Delta P_{T2}(s)$
$\Delta P_{D2}(s)$
B_2
$\frac{1}{R_2}$

كنترل قدرت به وسيله ترانسفورماتورهاي شيفت قاز

وقتي قدرتي از طريق دو خط موازي هم عبور دهيم مقدار قدرت به اندازه عكس امپدانس‌ها تقسيم مي‌شود A_2 قدرت كمتري نسبت به L_1 انتقال مي‌دهد و امكان اين كه خط L_1 زودتر Overload بشود بيشتر است.

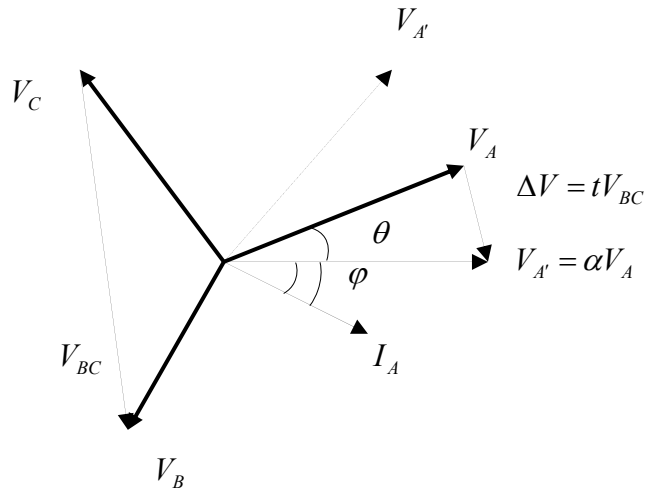


با استفاده از خازنهاي سري مي‌توان راكتانس خط را پائين آورد. راه حل ديگر استفاده از ترانسفورماتورهاي شيفت فاز است (براي پايين آوردن Overload خط) سيستم تحريك اين ترانسفورماتور موازي با دو فاز ديگر است تا بتواند از دو فاز ديگر تحريك شود.



$$V_{A'N} = V_{AN} + \Delta V = V_{AN} + tV_{BC} = (1 - j\sqrt{3}t)V_{AN} = \alpha V_{AN}$$

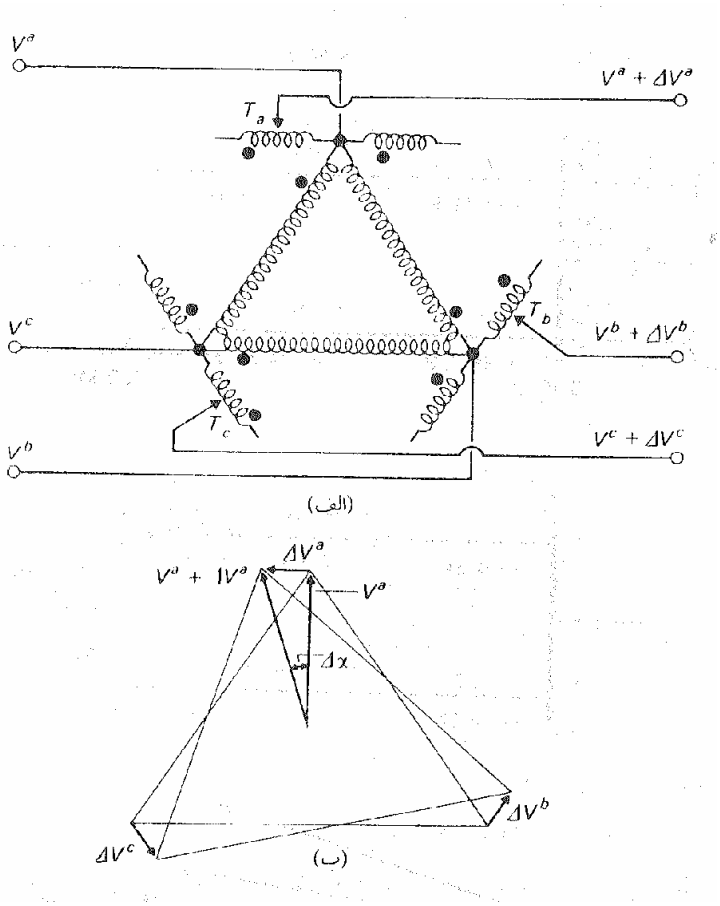
V_A و $V_{A'}$ از لحاظ مقدار تقريباً باهم برابر هستند فقط $V_{A'}$ شيفت فاز داده شده است. اين كارعينا براي دو فاز ديگر نيز بايستي تكرار شود.



پس به وسيله اين ترانسفورماتورها مي‌توان در فازها تغيير طولي نداد و فقط تغيير عرضي (تغيير شيفت فاز) داد پس در خطي كه مي‌خواهيم قدرت انتقال بيشتري داشته باشيم اختلاف فازي بيشتري نسبت به دو فاز به وجود مي‌آيد، پس براي كنترل جريان اكتيو در باي‌ها مي‌توان از ترانس فاز شيفت استفاده كرد. هر چقدر در يك خط اختلاف فاز V و I را كمتر كنيم P بيشتري از آن خط مي‌گذرد.

$$P = VI\cos\varphi$$

در نوع ديگری از ترانسفورماتور شيفت فاز، سيم پيچ سری هر فاز به وسيله سيم‌پيچ تحريک متصل به دوفاز ديگر تحريك مي‌شود .



ترانسفورماتور تنظيم زاويه فاز ولتاژ

$$\Delta V_{an} = \begin{cases} 0 \\ 180^\circ \end{cases} \| V_{bc}$$

اگر سيم پيچ سري با سيم پيچ تحريك هم سو باشد ΔV به صورت تقدم فاز نسبت به ولتاژ خودش خواهد بود.

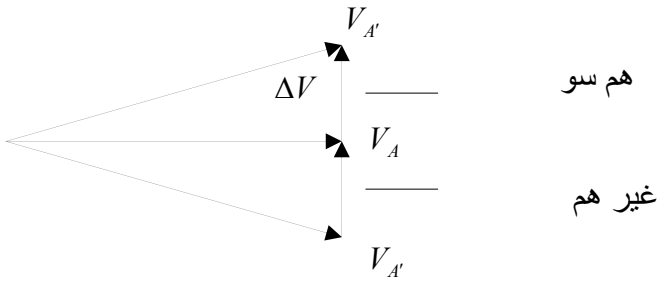
$$|V_A| \cong |V_{A'}| \qquad |V_C| \cong |V_{C'}|$$

$$|V_B| \cong |V_{B'}|$$

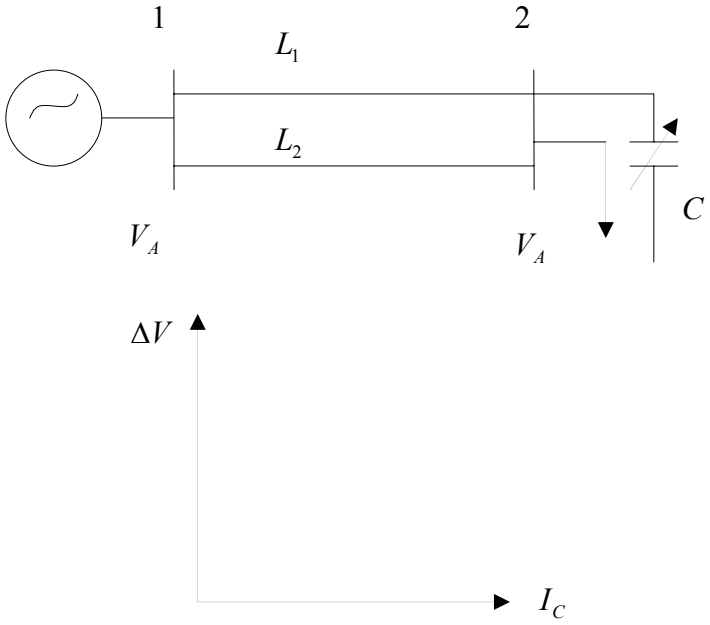
تقدم فاز اگر سيم پيچ سري با سيم پيچ تحريك غير هم سو باشد ΔV نسبت به فاز 90° اختلاف فاز داشته و 90° تاخير فاز دارد.

تقدم فاز يا تاخير فاز بودن ΔV بستگي به هم سو يا غير هم سو بودن سيم پيچ سري با سيم پيچ تحريك دارد.

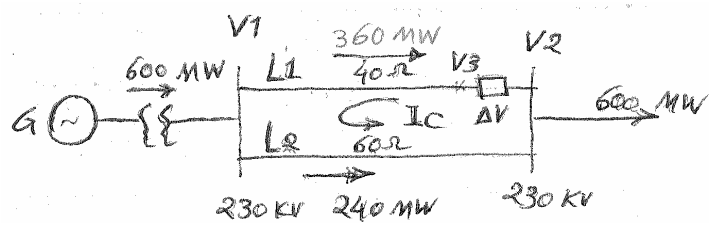
پس در اين سيستم $|V|$ تقريباً ثابت مي‌ماند $|V_A| \cong |V_{A'}|$ و اختلاف فاز ايجاد مي‌شود كه در سيستم پارالل كه مي‌خواستيم قدرت بيشتري به وسيله خط انتقال دهيم اختلاف فاز بيشتري بين دو باست براي آن خط را بيشتر كرده و جريان اكتيو خط را بالا ببرد.



كنترل ولتاژ و ضريب قدرت (و فركانس) در مصرف كننده ها و خطوط انتقال با تزريق قدرت راكتيو نيز انجام می شود. اين كار با تزريق قدرت راكتيو در حالت پس فاز و پيش فاز امكان پذير می باشد. در متيج اين عمل سطوح ولتاژ بالا يا پائين رفته و ضريب قدرت اصلاح می گردد.



مثال - در شكل زير دو خط انتقال 230kv موازي 600MW قدرت را از باس نيروگاه 1 به باس 2 كه باس بار است انتقال مي‌دهد خط L_1 داراي راكتانس $40\frac{\Omega}{phase}$ و خط L_2 داراي راكتانس $60\frac{\Omega}{phase}$ مي‌باشد به وسيله كنترل ژنراتور باس 1 روي 23okv نگه داشته مي‌شود و يك خازن متغير به باس بار 2 وصل شده براي ثابت نگه داشتن قدر مطلق باس شماره 2 به 23okv به وسيله نصب ترانس تنظيم كننده زاويه فاز به خط L_1 در باس 2 مي‌خواهيم قدرت بين L_1 و L_2 را به طور مساوي انتقال يابد پيدا كنيد. همچنين زاويه فاز جديد ولتاژهاي شين‌هاي ۱ و ۲ را محاسبه نمائيد.



حل تقريبي

$$p=\frac{|V_1||V_2|}{X}\sin\delta \qquad |V_1|\approx|V_2|$$

$$p_1=\frac{230^2}{40}\sin\delta$$

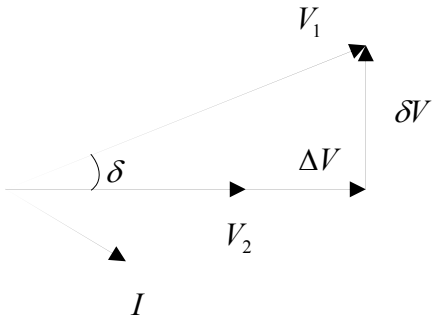
$$|V_1||V_2|$$

$$p_2=\frac{230^2}{60}\sin\delta \quad p_1+p_2=600 \quad \delta=15.796^\circ \quad \begin{cases} p_1=360\text{MW} \\ p_2=240\text{MW} \end{cases} \quad \Delta p_{3\phi}=60\text{MW}$$

$$p_1=300=\frac{230^2}{40}\sin(\delta-\alpha) \quad |V_2|\approx|V_3|$$

$$p_2=300=\frac{230^2}{60}\sin(\delta)$$

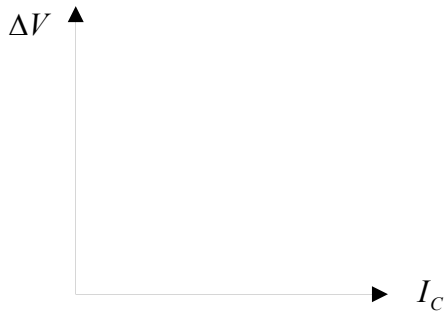
$$\delta=19.893^\circ,\alpha=6.78^\circ$$



پس قدرتهاي راكتيو براي حالت ۲ و يا حالت قبل مي‌شود پيدا كرد.

ترانس بايستي يك شدت جريان دوراني در حلقه ايجاد كند و از شدت جريان مولفه اكتيو ۱ بكاهد (به اندازه $\Delta P_{3\phi}$)

هم جهت با شدت جريان ۲ باشد شدت جريان Ic هم فاز V_2 و 90° اختلاف با ΔV دارد (چون جريان تقريباً سلفي است نسبت به ΔV) و اين Ic فقط مولفه راكتيو دارد اين جريان به مولفه اكتيو I_2 و از مولفه اكتيو I_1 كم مي‌كند.



$\Delta V = 27.344 kv / line$

راه حل تقريبي $Ic = \frac{\Delta V}{Zloop} \quad Tan\alpha = \frac{\Delta V}{V_2} \Rightarrow \Delta V = 15.78 kv / phase$

$Ic = \frac{j15.78}{j100} = 0.1578 \angle 0 KA / phase$

براي هر فاز $\Delta P1_\phi = |V_2||Ic| = \frac{230}{\sqrt{3}} \times 0.1578 = 20.45 MW / phase \backsimeq 20MW$

$\Delta P_{3\phi} = 3\Delta P_{1\phi} \backsimeq 60MW$

www.Mohandesyar.com

فصل ششم

کنترل توان راکتیو و ولتاژ

Reactive Power & Voltage Control

در سیستم دوباس زیر افت ولتاژ مابین آنها بصورت زیر نوشته مي‌شود :

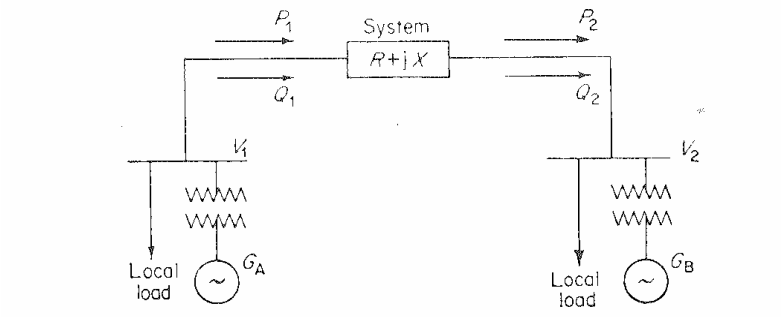
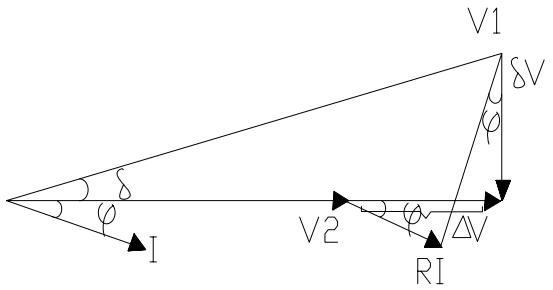


Figure 4.7 Two generating stations linked by an interconnector of impedance $(R + jX)\Omega$. The rotor of A is in phase advance of B and $V_1 > V_2$.



www.Mohandesyar.com

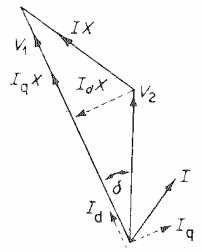
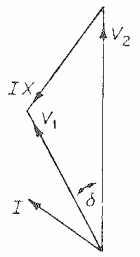


Figure 5.1 Phasor diagram for system shown in Figure 4.7; $V_1 > V_2$. Resistance of line zero, inductive reactance X ohms. I_d and I_q in-phase and quadrature components of the current I.



Phasor diagram for system in Figure 4.7. $V_2 > V_1$.

$$V_1^2 = (V_2 + \Delta V)^2 + \delta V^2 = (V + RI\cos\varphi + I\sin\varphi)^2 + (XI\cos\varphi - RI\sin\varphi)^2$$

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V_2} \quad , \quad \delta V = \frac{XP - RQ}{V_2}$$

$$If \quad \delta V << V_2 + \Delta V \quad then \quad V_1^2 = \left(V_2 + \frac{RP + XQ}{V_2}\right)^2$$

$$and \quad V_1 - V_2 = \frac{RP + XQ}{V_2} = \Delta V$$

بنابراين اختلاف ولتاژ بين دوشين V_2, V_1 توسط رابطه تقريبي ΔV بيان مي‌شود.

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V_2}$$

$$Q = \frac{V_2 \Delta V}{X} - \frac{R}{X}P$$

اگر X, V_2 ثابت باشند و رابطه بين قدرت اكتيو و راكتيو

$$Q = K - \frac{R}{X}P$$

$$Q' = K - \frac{R}{X}P' \qquad \Rightarrow \qquad Q - Q' = \frac{R}{X}(P' - P)$$

تغييرات در توان اكتيو باعث تغييرات در توان راكتيو مي‌شود. اما مقدار R بخاطر بزرگ بودن X مقدار كوچكي است و مي‌توان در قسمت دوم صرفنظر كرد. پس مي‌توان نتيجه گرفت كه تغييرات اندازة ولتاژ بيشتر در ارتباط با تغييرات توان راكتيو است.

$Q \alpha V_2$

در مولد $\begin{cases} >0 & \text{قدرت راکتیو تولید} \\ <0 & \text{قدرت راکتیوجذب} \end{cases}$

در بار (ترانسفورماتورها، خطوط، کابل‌ها) $\begin{cases} <0 & \text{قدرت راکتیو تولید} \\ >0 & \text{قدرت راکتیوجذب} \end{cases}$

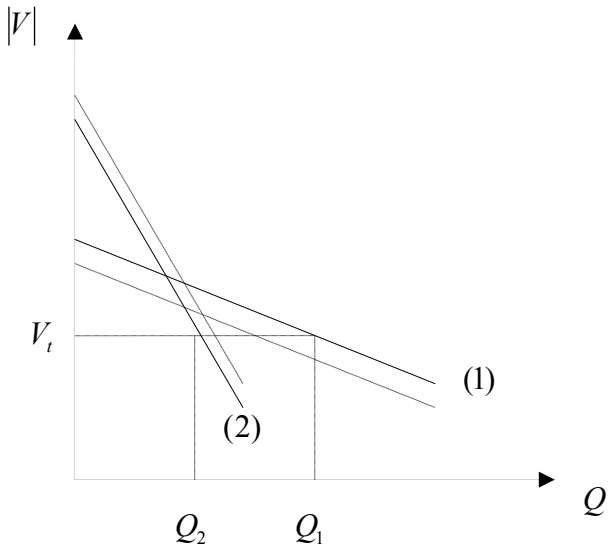
ارتباط بین این دو کانال تولید مشابه هم هستند این دو موضوع را موضوع دوگانه گویند.

dual concept applying to P' V.S. f and $|V|$ V. S Var

در بحث پارالل بار بین دو ژنراتور در اینجا نیز قابل بحث است.

$\left.\begin{matrix} P,F \\ Q,V \end{matrix}\right\}$ رابطه دوگانه

براي كم كردن قدرت واحد ۱ و زياد كردن قدرت واحد ۲ با كم كردن قدرت واحد ۱ براي ثابت بودن فركانس بايستي مشخصه آن به پائين آمده و به يك V ديگر افت پيدا خواهد كرد. براي رساندن V به V_t بايستي تحريك ژنراتور ۲ را زياد كنيم كه با اينكار مشخصه ۲ به بالا مي‌رود.



ميزان قدرت راكتيو در ژنراتور بوسيله نسبت اتصال كوتاه (عكس راكتانس سنكرون) مشخص مي‌شود.

در اينصورت ميزان جذب يا توليد قدرت راكتيو در ژنراتور بستگي به پيش فاز (زيرتحريک Under excited) يا پس‌فاز (فوق تحريک Over excited) بودن ژنراتور دارد.

براي يك ژنراتور ۲۰۰MW و ضريب قدرت ۰/۸۵ با ميزان پايداري ۱۰ درصد ظرفيت قدرت راكتيو برابر ٤٥MVAR است.

مقدار قدرت راكتيو جذب شده در بار نيز به ميزان I^2X ارتباط دارد.

در برخي از بارها كه در آنها خازن وجود دارد (در خطوط طويل) تبديل به توليدكننده قدرت راكتيو مي‌شوند.

در ترانسفورماتورها اغلب قدرت راكتيو جذب مي‌شود.

$X_{T(pu)}$ راكتانس ترانسفورماتور

$3VI_{rated}$ قدرت توليد توان نامي

راكتانس (اهم) $= X_{Base}X_{T(pu)} = \frac{V}{I_{rated}}X_T$

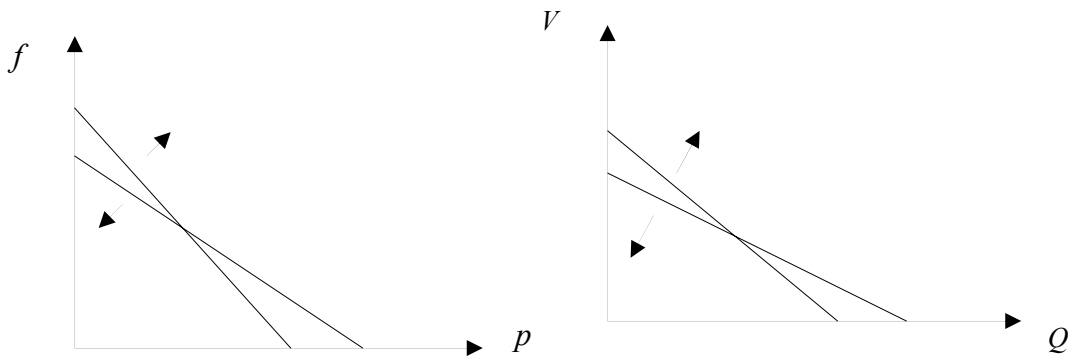
ميزان قدرت جذب شده $= 3I^2\frac{VX_T}{I_{rated}} = 3\frac{I^2V^2}{(IV)_{rated}}X_T = \frac{(VA\,load)^2}{VA\,rated}X_T$

كابل‌ها با ظرفيت بالا به مثابه ژنراتورهاي توليد قدرت راكتيو هستند.

در يك كابل ٢٧٥KV و ٢٤٠MVA مقدار قدرت راكتيو توليدي $\frac{MVAR}{Km}$ ٧/٥ – ٦/٢٥ است.

١٣٢ KV	١/٩
٣٣ KV	٠/١٢٥

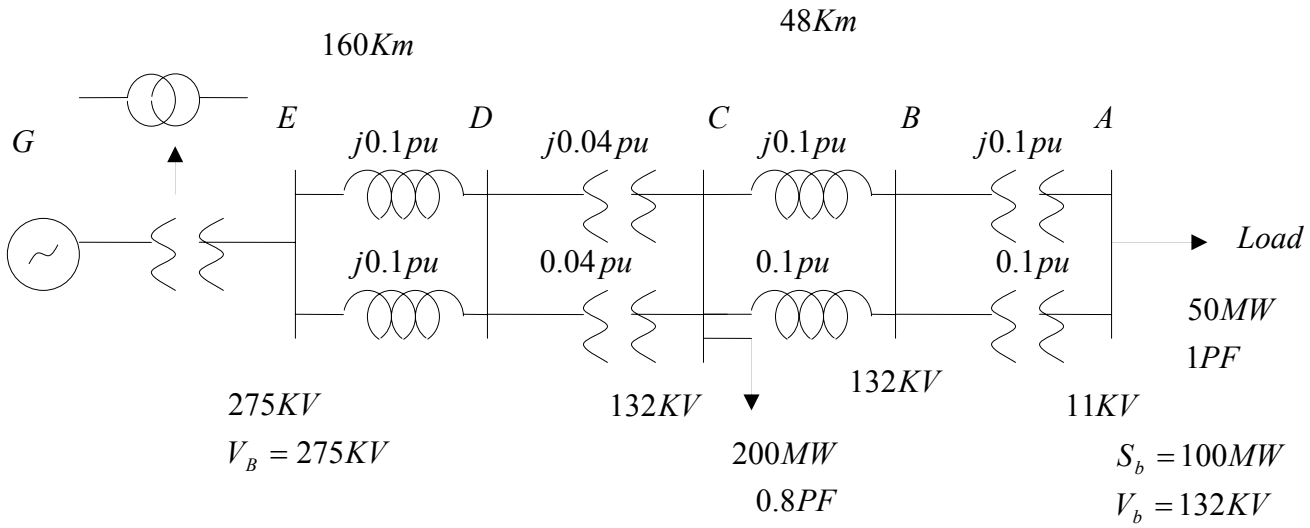
$\|V\|$ V.S Var	P V.S f
١- كنترل ميدان تحريك ژنراتور	١- كنترل سرعت محركة اصلي
٢- ولتاژ ترمينال	٢- فركانس
٣- $Q_L = Q_1 + Q_2$	٣- $P_L = P_1 + P_2$
٤- Q V.S $\|V\|$	٤- P V.S f
٥- بوسيلة افزايش تحريك يكي از ژنراتورها ولتاژ ترمينان تنظيم $Q - V \propto AVR$	٥- بوسيلة افزايش سرعت نيروي محركة فركانس تنظيم $f \propto P \propto$
٦- براي كنترل ولتاژ ترمينان تحريك دو نيروگاه بصورت عكس هم عمل مي‌كنند.	٦- براي كنترل فركانس كنترل نيروي محركة دو نيروگاه بصورت عكس هم عمل مي‌كنند.



پس بين اين دو سيستم يك دوگانگي ديده مي‌شود. پس ژنراتور خودش يك عامل جذب براي كنترل بار است فقط عيب آن اين است كه قابليت و ظرفيت آن بحد كافي نيست و نمي‌توان تمامي بار شبكه را بوسيلة ژنراتور تنظيم نمائيم.

المانهاي موجود در شبكه ترانسفورمرها كه همواره قدرت راكتيو جذب مي‌كنند خطوط انتقال مخصوصاً خطوط انتقال طولاني و كابل‌ها كه قدرت راكتيو ايجاد مي‌كنند مخصوصاً در بار كه ژنراتورها خود مي‌توانند توليد و يا جذب قدرت راكتيو كنند و يا موتورهاي سنكرون بعنوان كمپانزاتور كه با دست زدن به تحريك آنها مي‌شود كه آنرا بعنوان مولد قدرت راكتيو بكار برد.

مثال : يك بار با ظرفيت 50MW با ضريب قدرت واحد در شين A در شبكه زير مفروض است. در اين شبكه براي تنظيم ولتاژ چقدر قدرت راكتيو احتياج است تا ژنراتور توليد نمايد كه بايد آيا به تنهايي كافي است يا نه؟



$$V \propto Q \begin{cases} Q_G \\ Q_C \\ Q_L \end{cases}$$

از انتهاي خط شروع كرده و جلو مي‌رويم و مقدار قدرت اكتيو و راكتيو موردنياز را در بارها بدست آوريم.

در شين A بار $P = 0.5\,Pu \qquad Q = 0$

در شين B $X_{AB} = X_{BC} = 0.05$

$X_{CA} = 0.05 + 0.05 = 0.1$

$I^2 X_{CA} = ?$ افت قدرت راکتیو خط (فقط سلفي است)

$$|I|^2 = \frac{Q^2 + P^2}{V_2} = \frac{0^2 + 0.5^2}{1}$$

$$I_2^2 X_{CA} = \frac{0.5^2}{1} \times .025 = Q_{CA}$$

$\cos\varphi = 0.8 \quad \rightarrow \quad \mathrm{Q} = \tan\varphi \times \mathrm{P} = 1.5$

$P_C = 2 + 0.5 = 2.5 \quad pu$ $\qquad$ $Q_c = 0.025 + 1.5 = 1.525$ در شین C

$X_{EC} = X_{ED} + X_{DC} = 0.05 + 0.02 = 0.07$

$$I^2 X_{EC} = \frac{1.525^2 + 2.5^2}{1} \times 0.07 = 0.6$$

اگر از تلفات ترانس و ژنراتور صرفنظر شود

$$\begin{cases} P_E = P_{EC} + P_C \\ \quad P = 2.5\ pu \end{cases} \qquad \begin{cases} Q_E = Q_{EC} + Q_C \\ Q = 1.525 + .6 = 2.125\ pu \end{cases} \quad \rightarrow \quad \cos\varphi = .7619$$

حال باید دید ژنراتور تحت این PF و قدرت مي‌تواند ظرفیت تولید داشته باشد یا نه؟

رابطه بین ولتاژ و قدرت اکتیو و راکتیو در یك نقطه (باس)

در یك نقطه ولتاژ تابع قدرت اکتیو و راکتیو است.

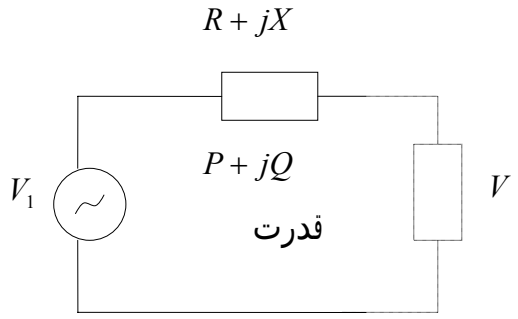
$V = f(P, Q)$

$$dV = \frac{\partial V}{\partial P} dP + \frac{\partial V}{\partial Q} dQ$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial P} = 1 \qquad \frac{\partial Q}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial Q} = 1$$

$$(۱)\ dV = \frac{dP}{\frac{\partial P}{\partial V}} + \frac{dQ}{\frac{\partial Q}{\partial V}}$$

تغییرات ولتاژ در یك نقطه بستگي به تغییرات قدرت اکتیو و راکتیو نسبت به ولتاژ دارد که این تغییرات مي‌تواند قبلاً مشخص شود. براي پیدا کردن این تغییرات در یك مدار ساده بصورت زیر اقدام می شود.



$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V}$$

$$(V_1 - V)\ V = RP + XQ$$

حال اگر V_1 ثابت باشد V بستگي به مقدار قدرت انتقالي اكتيو و راكتيو دارد. اين معادله را نسبت به P حل مي‌كنيم :

$$P = \frac{(V_1 - V)}{R}V - \frac{XQ}{R} \qquad Q = \frac{(V_1 - V)}{X}V - \frac{RP}{X}$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{V_1 - 2V}{R} \qquad \frac{\partial Q}{\partial V} = \frac{V_1 - 2\partial}{X}$$

با جايگزين كردن اين دو معادله در بالا داريم : (١)

$$dV = \frac{dP.R + dQ.X}{V_1 - 2V}$$

هرگاه V_1, dV ثابت باشند $dV = 0$

تغييرات قدرت اكيتو نسبت به تغييرات قدرت اكتيو $R\,dP + X\,dQ = 0 \ \rightarrow\ dQ = -\frac{R}{X}dP$

$$V\,\alpha\,Q\ \ \alpha\ P\,\alpha\,f$$

ضريب سفتي يا stiffness يك ناحيه كه قبلاً اشاره شد :

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

هرگاه $\frac{\Delta Q}{\Delta V} \propto \frac{V}{X}$ براي يك شبكه يا يك باس در دست داشته باشيم مي‌توان از روي اين نسبت مقدار قدرت راكتيو تزريق شده به آن منطقه براي ترميم افت و ولتاژ مشخص ساخت و از روي آزمايش بدست مي‌آيد.

در حالتي مي‌دانيم كه وقتي قدرت راكتيو مثلاً Q_{before} و ولتاژ در آن نقطه V_{before} (قبل از موقعيكه به آن نقطه قدرت راكتيو تزريق كنيم حالت معمولي before)

حال يك قدرت راكتيو معلوم به آن نقطه تزريق مي‌كنيم و مي‌توان ولتاژ را در آن نقطه اندازه گرفت.

Q_{after} $\frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{Q_{after} - Q_{before}}{V_{after} - V_{before}}$

V_{after}

تغييرات $\frac{\Delta Q}{\Delta V}$ نيز قبلاً بدست آمده است هرچه راكتانس آن نقطه كمتر باشد اين نسبت بزرگتر خواهد بود. وقتي چند خط در يك باس تلاقي كنند X كوچك بوده و اين نسبت بزرگ خواهد بود پس اين نسبت بستگي به شرايط شبكه دارد و مقدار آن بطور متوسط $15-10\frac{\text{MVar}}{1\text{KV}}$ مي‌باشد.

مثال : اگر افت طبيعي در يك نقطه بدون تزريق‌وار مصنوعي 5KV باشد و تغييرات $\frac{\Delta Q}{\Delta V}$ در آن نقطه برابر $15\frac{\text{KVAR}}{\text{KV}}$ باشد براي ترميم 5KV افت ولتاژ چقدر قدرت راكتيو بايستي بدان نقطه تزريق گردد؟

نتيجه مهم : $\frac{\Delta Q}{\Delta V}$ برابر شدت جريان اتصالي در همان نقطه (باس) است.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{V_1 - 2V}{X}$$

حال اگر شكل قبل ولتاژ خروجي اتصال كوتاه شود $V = 0$ از روي مدار مشخص است كه

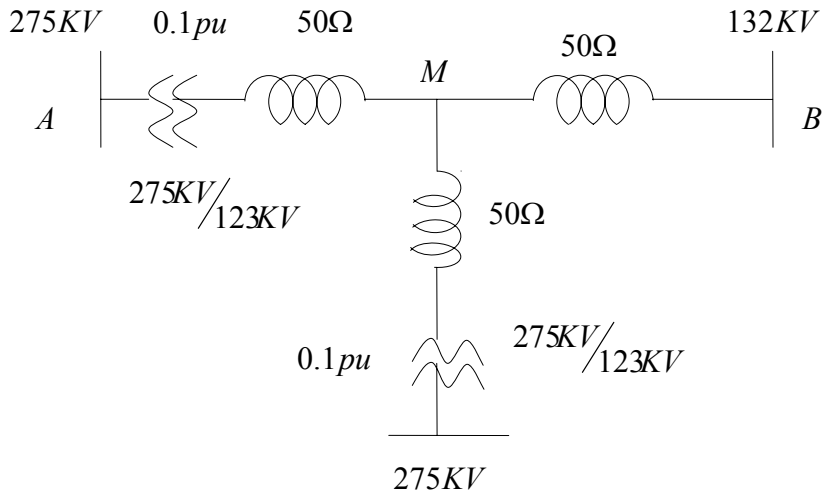
$I_{S.C} = \frac{V_1}{X}$ [A] $R << X$

در حالت بي‌باري كه مدار باز است. $\frac{\partial Q}{\partial V} = -\frac{V_1}{X} \quad (V = V_1)$

$\frac{\partial Q}{\partial V}$ از نظر قدرمطلق برابر شدت جريان اتصال كوتاه است.

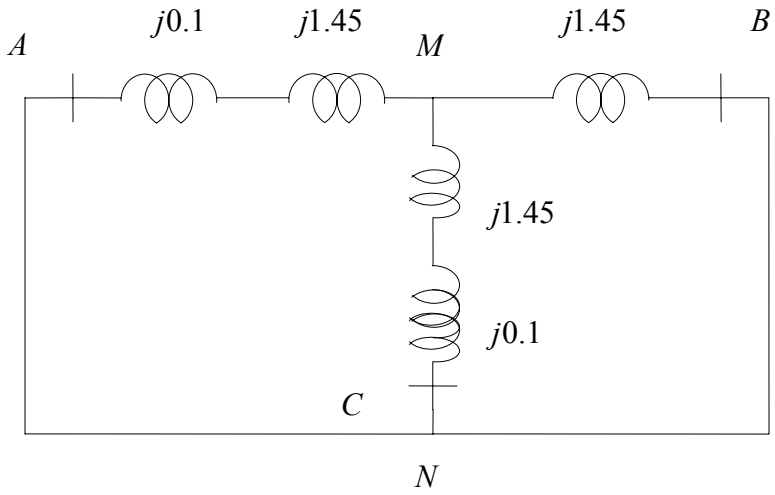
$$\left|\frac{\partial Q_P}{\partial V_{Phase}}\right| = I_{S.C,Phase}$$

مثال : سه نقطه تغذيه CBA به يك باس مشترك m وصل شده‌اند نقطه تقديه A روي 275KV ثابت نگه داشته شده و از طريق ترانس 275/132KV به نقطة m وصل شده اند. راكتانس ترانسفورماتورها $0.1pu$ مى باشد.



راکتانس خط 132KV برابر 50Ω است. نقطه تغذیه B داراي ولتاژ اسمي 132KV بوده و از طریق خط 132KV با راکتانس 50Ω به نقطه m اتصال داده شده است. نقطه تغذیه C دارای ولتاژ اسمي 275KV است و از طریق ترانسفورماتور 275/132KV که داراي راکتانس $0.1pu$ و خط 132KV با راکتانس 50Ω به نقطة m وصل شده است. اگر در يك بار معيني ولتاژ خط در نقطه m، 5KV از مقدار اسمي افت پيدا كند حساب كنيد قدرمطلق ظرفيت جبران ساز راكتيو (خازن) را كه به نقطه m تزريق نمود تا ولتاژ اوليه بدست آيد. مقادير پريونيت در مقدار 500MVA داده شده و از مقاومت خطوط صرفنظر شده است.

مدار معادل حالت اتصال کوتاه



$$Z_b = \frac{132^2}{500} = 34.85\Omega$$

$$X_{MN} = 0.505057\text{pu} \cong 0.5\ \text{pu}$$

شدت جريان اتصال كوتاه سه فاز

$$Z(\Omega) = Z_{base} \times Z(\text{pu}) = \left(\frac{V}{I_{Full\ Load}} \right) \times Z(\text{pu})$$

$$I_{S.C.} = \frac{V}{Z_{S.C}(\Omega)} = \frac{V}{Z_{base} \times Z_{SC}(\text{pu})} = \frac{V}{\frac{V}{I_{Full\ Load}} \times Z_{S.C.}(\text{pu})} = \frac{I_{Full\ Load}}{Z_{S.C}.(\text{pu})}$$

$$S_{3phase\,S.C} = \sqrt{3}\ V_{Line} I_{S.C_{Line}} = \sqrt{3}\ V \frac{I_{Full\ Load}}{Z_{S.C}(\text{pu})} = \frac{S_{Full\ Load}}{Z_{S.C}(\text{pu})}$$

$$S_{3phase\ S.C} = \frac{500}{0.5} = 1000\text{MVA}$$

$$I_{S.C,Line} = \frac{S_{3phase\,S.C}}{\sqrt{3}\ V} = \frac{1000\text{M}}{\sqrt{3} \times 132\text{K}} = 4373.86\ \text{A}$$

در بحث سه فاز

$$\frac{\partial Q_{3phase}}{\sqrt{3}\ \partial V_L} = I_{S.C,Line} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial Q_{phase}}{\partial V_{phase}} = \frac{\frac{\partial Q_{3phase}}{3}}{\frac{\partial V_L}{\sqrt{3}}} = \frac{\partial Q_{3phase}}{\sqrt{3}\ \partial V_L}$$

كل قدرت اكتيو سه تار در نقطه M $\Delta Q_M = \sqrt{3} I_{S.C.,Line} V_L = \sqrt{3} \times 5\text{KV} \times 4.37386\text{KA} = 37.88\ \text{MVAR}$

جبران سازها

قدرت انتقالي در يك شبكه غيرواحد بصورت زير است.

از رابطه $\Delta V = \frac{RP + XQ}{V}$ مشخص است كه افت فشار بشدت به مقدار توان راكتيو Q وابسته است.

افزايش عبور جريان خط باعث ايجاد افت I^2R و كاهش ظرفيت حرارتي خط خواهد بود.

يكي از بهترين محل‌ها براي تزريق قدرت راكتيو در محل بار مي‌باشد. براي تزريق قدرت راكتيو سه روش زير وجود دارد :

1. Static shnnt Capacitors and Reactors

در سيستم‌هاي توزيع و فوق توزيع (بهمراه ترانسفورماتورهاي تپ چنجر)

خازنهاي موازي براي پيش فاز نمودن ضريب قدرت مدارات استفاده مي‌شود. (در مدارات پس‌فاز بكار مي‌روند) توليدكننده توان اكتيو

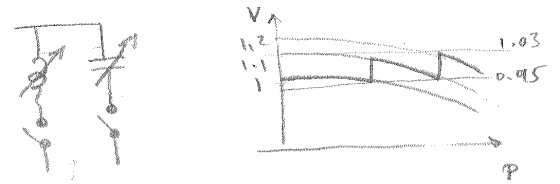
سلفهاي موازي پس‌فاز (در مدارات پيش‌فاز مثل كابل‌ها بكار مي‌روند) مصرف‌كننده توان راكتيو هستند. در هر دو حالت هدف تأمين توان راكتيو Q روي تثبيت مقدار ولتاژ مي‌باشد.

خازنها بصورت مستقيم و يا از طريق سيمپيچ ثالثيه يك ترانسفورماتور به شين متصل شده و مقدار تلفات و افت ولتاژ را كاهش مي‌دهند.

بدبختانه با كاهش ولتاژ شين، توان راكتيو توليد شده توسط خازن يا سلف (راكتور) نيز كاهش مي‌يابد.

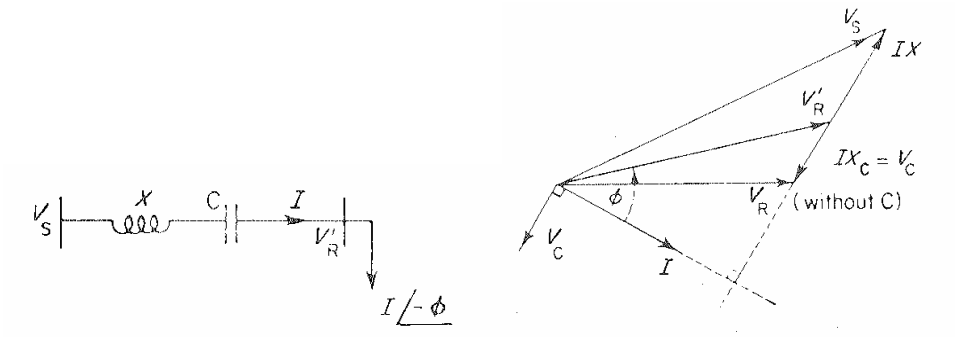
همينطور در بارهاي روشنائي با افزايش ولتاژ به سمت مقادير غيرمجاز خروجي خازن موازي نيز افزايش مي‌يابد. كنترل ولتاژ در چند مرحله (پله) انجام مي‌شود.

پس ΔV توسط توليد محلي Q در شين بار با افزايش ولتاژ دو طرف خط كاهش مي‌يابد.



2. Series Capacitors

اين خازنها بصورت سري با خط انتقال متصل مي‌شوند و براي كاهش ميزان راكتانس سلفي خط بين شين توليد و مصرف بكار مي‌روند. يكي از شرايط خطرناك، وجود اضافه ولتاژ توليدي در حين عبور جريان اتصال كوتاه از خازن سري خواهد بود كه توسط جرقه‌گيرها باتي حفاظت شوند.



(خازنهاي سري در خلال خطاها، اتصال كوتاه مي‌شوند تا به آنها آسيبي نرسد). (كليدهاي اتصال كوتاه‌كننده معمولاً تريسقدري است).

اختلافات اساسي بين تأثير خازنهاي سري و موازي :

۱- در صورتيكه ميزان وار موردنياز بار كم باشد خازنهاي سري به تعداد كم استفاده مي‌شوند.

۲- تأثير خازن سري در كاهش جريان خط كم است. در صورتيكه شرايط ظرفيت حرارتي خط در نظر گرفته شود خازن موازي تأثير بيشتري بر جريان خط مي‌گذارد.

۳- هر گاه افت ولتاژ عامل محدودكننده مي‌باشد در آنصورت تأثير خازنهاي سري در اينمورد بيشتر خواهد بود.

٤- هرگاه راكتانس كل خط بزرگ باشد خازنهاي سري بسيار سودمند بوده و حتي پايداري را نيز بهبود مي‌بخشند.

در حقيقت نقش اصلي خازن سري در بهبود پايداري خطوط بلند است.

وقتي در خطوط بسيار بلند خازن سري استفاده مي‌شود از راكتور موازي نيز براي كنترل ولتاژ حالتهاي كم‌بار و بي‌بار استفاده مي‌شود.

نتايج در نصب خازنهاي سري

۱- افزايش قدرت انتقالي ماكزيمم و بهبود پايداري ماندگار

۲- افزايش بار طبيعي خط $SIL \uparrow = P_C = \frac{V^2}{Z_C \downarrow}$ بار طبيعي

۳- كاهش زاويه انتقال δ در قدرت ثابت $P = \frac{|V_1||V_2|}{X \downarrow} \sin\delta \downarrow \Rightarrow \delta \downarrow$ ثابت

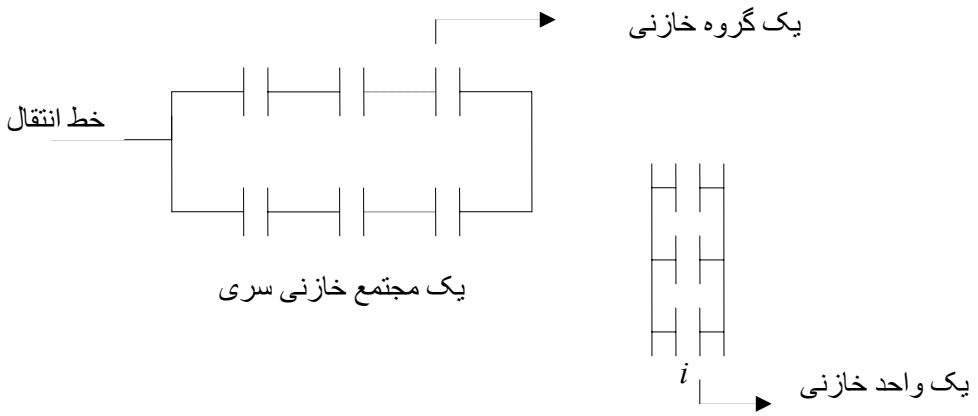
٤- كاهش تلفات خط

٥- كاهش افت ولتاژ و ايجاد پروفيل ولتاژ بهتر در طول خط

٦- بهبود پايداري گذرا

۷- كاهش حساسيت ولتاژ به اختلالات گذرا

محل نصب خازنهاي سري (بسته به عوامل اقتصادي) در يك يا در محل در ابتدا، انتها و وسط خط انتقال است.



3. Synchronous Compensators

جبران سازهای سنکرون

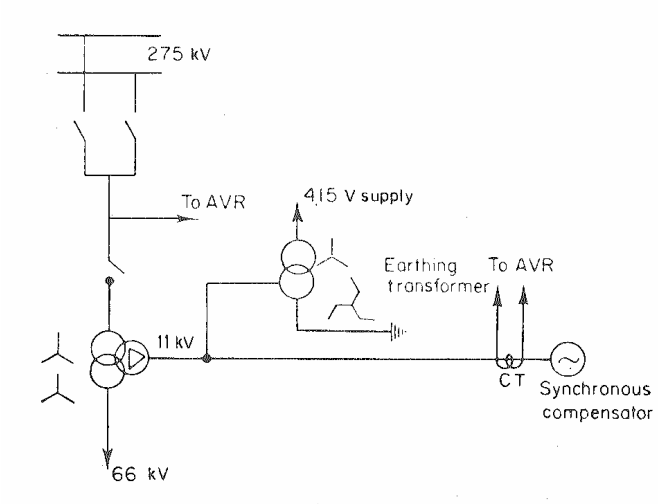
(هم در سيستم فوق توزيع و هم انتقال)

جبران كننده سنكرون در واقع يك موتور سنكرون بي‌بار است و جذب يا توليد توان راكتيو در آن به مقدار تحريك بستگي دارد.

تلفات آن قابل مقايسه با خازنهاي استاتيك است در حاليكه ضريب قدرت آن غيرصفر مي‌باشد.

در حالت high load بصورت overxcited بعنوان جبران و تنظيم‌كننده ولتاژ بكار مي‌رود (بصورت اتوماتيكي).

در حالت light load بصورت underexcited



سيستم AVR مربوط به كمپاتراتور توسط ولتاژ خط 275kv و جريان كمپانزاتور كنترل مي‌شود.

اين كار باعث ايجاد تغييرات لازم در مشخصه V-Q مربوط به سيستم خواهد شد.

از ويژگيهاي مهم اين روش انعطاف عملكرد آن در شرايط بارداري مختلف است. هزينه نصف چينين تاسيساتي نيز بالاست.

براي خطوط بلند HV در انتهاي بار با ضريب قدرت كمتر از ۱ اين تجهيزات توجيه نمي‌شوند و بجاي آنها در قسمت LV از خازن موازي استفاده مي‌شود.

۱- كنترل ولتاژ در يك نقطه

۲- تنظيم خط و در نتيجه افزايش قدرت اكتانس و بهبود پايداري سيستم

۳- تأمين قدرت راكتيو در شرايط اضطراري

٤- كاهش نوسانات

4. Static Compensators

جبران‌كننده‌هاي استاتيك

۱- راكتيو كنترل‌شده با تريستور TCR

۲- TCR و خازنهاي ثابت موازي TCR/FC

۳- خازن سوييچ شده با تريستور TSC

٤- راكتور اشباع شده SR

بررسي اقتصادي ميزان ترميم قدرت راكتيو

مثال : قدرت راكتيو مي تواند در محل يا نزديك‌تر به بار توليد شود و اينكار به سود و نفع مصرف‌كننده و هم به توليدكننده است. توليدكننده مي‌خواهد فقط قدرت اكتيو انتقال دهد چون در موارد مصارف خانگي و تجاري فقط به قدرت اكتيو تعرفه پرداخت مي‌شود در اين محل براي قدرت راكتيو كشيده شده در شبكه پولي داده نمي‌شود تلفات خط و سيستم را افزايش مي‌يابد بخاطر وجود مدرك راكتيو و شدت جريان نامي خط افزايش مي‌يابد تول گيس در مصارف كه داراي ضريب قدرت پائين‌تر هستند مي‌خواهد تا ضريب قدرت خودش را بالا ببرد و يا تعرفه الكتريكي مصرف را دو قسمت كند كه براي بارهاي صنعتي صورت مي‌گيرد.

يك تعرفه براي KVA موردنظر براي مصرف محل $f\,A\times KVA+B\times KWh$

و يك تعرفه براي انرژي مصرف شده KWA مي‌تواند هم مؤلفه اكتيو دهم مؤلفه راكتيو داشته باشد. حال اگر مصرف‌كننده بخواهد VAR موردنياز خود را تأمين كند KVA پائين مي‌آيد و هر ماه يا سال و يا در هر پريود بازاي هر KVA پرداخت كسري خواهد داشت و اين كار براي كارخانه بطور جسماني صورت نمي‌گيرد بلكه آنها بايستي سرمايه‌گذاري روي كمپاتراتورها داشته باشد. اگر اين سرمايه‌گذاري انجام نشود بايستي تعرفه بپردازد بايد ديد چقدر بايد مصرف‌كننده ضريب قدرت خود را بالا برد تا برايش اقتصادي‌تر باشد؟

P_1 : قدرت قبل از اصلاح θ_1 : ضريب قدرت تأخيري

P_1,θ_2 : ضريب قدرت بعد از اصلاح

$KVA=\frac{P_1}{\cos\theta_2}$ $KVA=\frac{P_1}{\cos\theta_1}$ موردنياز كارخانه

KVA صرفه‌جويي در $=\left(\frac{P_1}{\cos\theta_1}-\frac{P_1}{\cos\theta_2}\right).A$

خازنهاي موجود در بازار بازاي هر KVAR ظرفيت خازن مطرح مي‌شود.

قدرت راكتيو موردنياز قبل از اصلاح $\cos^0_\varphi$ $P_1\tan\theta_1$

بعد از اصلاح $P_1\tan\theta_2$

KVAR مورد احتياج بوسيله كمپاتورتورها $KVAR=P_1\tan\theta_1-P_1\tan\theta_2$

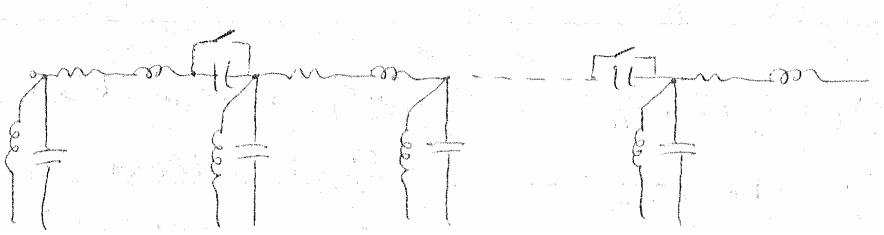
هزينه سالانه مسئله اگر برابر هر KVAR $C\,f/KVAR$ سرمايه‌گذاري شود اگر به بالا ضرب شود كل هزينه سرمايه‌گذاري است اين هزينه در طي عمر خازنها استهلاك دارد براي هر سال استهلاكهاي فراوان از جمله استهلاك ارزش پول و نرخ بهره بوجود مي‌آيد.

هزينه سالانه سرمايه‌گذاري $= C'\,f/KVAR$

KVA صرفه‌جويي خالص $=\left[AP_1\left(\frac{1}{\cos\theta_1}-\frac{1}{\cos\theta_2}\right)-C'P_1(\tan\theta_1-\tan\theta_2)\right]$

θ_2 متغير است. مي‌توان از اين صرفه‌جويي نسبت به θ_2 مشتق گرفته و مساوي صفر قرار دهيم.

θ_2 بيشتر بستگي به هزينه سرمايه‌گذاري سالانه و تعرفه KVA دارد. $\sin\theta_2 = \frac{C'}{A}$



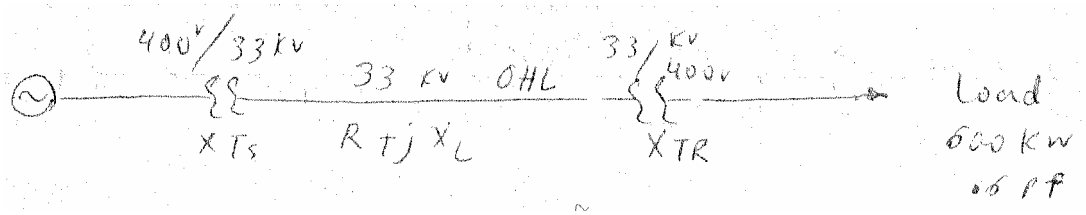
خازنهاي سري و كاهش افت ولتاژ، يا اتصال كوتاه كردن اين خازنهاي سري مي‌توان فقط بارهاي راكتور (سلف) را به مدار آورد. خازنهاي سري در مواقع بار زياد كه افت ولتاژ بيشتر مطرح است مورد استفاده است و راكتورها در مواقع بار سبك خازنهاي موازي عمده/ كاهش تلفات مي‌تواند قابليت انتقال خط را به حد قابل معيني افزاي دهد در خازنهاي سري افت ولتاژي را مي‌تواند جبران كند از خازنهاي موازي براي تقسيم بار بين خطوط استفاده مي‌شود چون بار بصورت عكس امپدانس بين خطوط تقسيم مي‌شود.

مثال : در شكل زير مي خواهيم ضريب قدرت را ابتدا توسط خازن موازي و سپس توسط خازن سري برابر 1 نمائيم. مقدار بار $PF = 0.6$ 600KW ترانسفورماتور $33^{KV}/_{400V}$ خط overhead 33KV $R_L + JX_L$ و ترانسفورماتور ديگر $400V/_{33KV}$ است.

$X_{TS} = 87\Omega/pu$

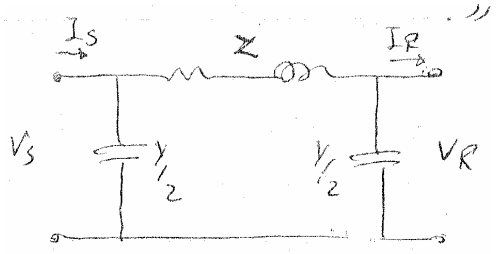
$X_{TR} = 87\Omega/pu$

$R = 6u\ \Omega/pu$ $\qquad X_L = 22\ \Omega/pu$



قدرت راكتيو لازم براي كنترل ولتاژ يك خط طولاني

خط طولاني را مي‌توان بصورت مدار معادل π معادل‌سازي كرد.



بازاي اينكه V_R چه مقداري از V_S باشد مقدار قدرت راكتيو لازم براي انتقال يك قدرت معيني را بررسي كنيم. A , B به مشخصات خط مربوط هستند.

$$V_S = (V_R \frac{Y}{Z} + I_R) Z + V_R \qquad A = \frac{zy}{2} + 1 = |A| < \alpha$$

$$V_S = (\frac{ZY}{2} + 1) V_R + Z I_R \qquad B = Z \quad = |B| < \beta$$

$V_r = |V_r| < 0$, $I_r = |I_r| < -\phi r$ طرف دريافتي

$V_S = |V_S| < \delta_S$ طرف ارسالي

$$|V_S|^2 = |A|^2 |V_r|^2 + |B|^2 + |I_r|^2 + |A||B||V_r||I_r|[\cos(\alpha - \beta)\cos\phi_r - \sin(\alpha - \beta)\sin\phi_r]$$

ايجاد نول بايستي برحسب قدرت انتقالي نوشته شود تا پارامترها قابل اندازه‌گيري باشند.

$P_r = V_r I_r \cos\phi_r$ $\qquad Q_r = V_r I_r \sin\phi_r$

$I_r = I_P + jI_q$ $\qquad I_r^2 = I_p^2 + I_q^2$

$I_P = \frac{P_r}{V_r}$ مؤلفه اكتيو شدت جريان دريافتي $\qquad I_q = \frac{Q_r}{V_r}$

$$V_S^2 = A^2 V_r^2 + B^2 \left(\frac{P_r^2}{V_r^2} + \frac{Q_r^2}{V_r^2} \right) + 2AB \; P_r \cos(\alpha - \beta) - 2AB Q_r \sin(\alpha - \beta)$$

براي يك شبكه قدرت اكتيو و راكتيو انتقالي Q_r, P_r در دست باشد، بازاي اينكه V_r داراي چه نسبتي با V_S باشد Q_r را مي‌توان مشخص ساخت و از روي آن مي‌توان ديد چقدر كمپاتره نمودن در پايان خط لازم است.

اقتصادي و راحت‌ترين راه براي كنترل ولتاژ ترانس‌هاي مجهز به tap changing هستند.

كنترل ولتاژ مي‌تواند بصورت استفاده از خازنهاي سري و موازي يا با استفاده از راكتور نيز باشد كه قبلاً بحث آن رفت. اين ترانس‌ها به ترتيبات مختلف مي‌توانند در خط استفاده شوند : دو عدد ترانسفور مانند تپ‌چنجر در دو طرف خط

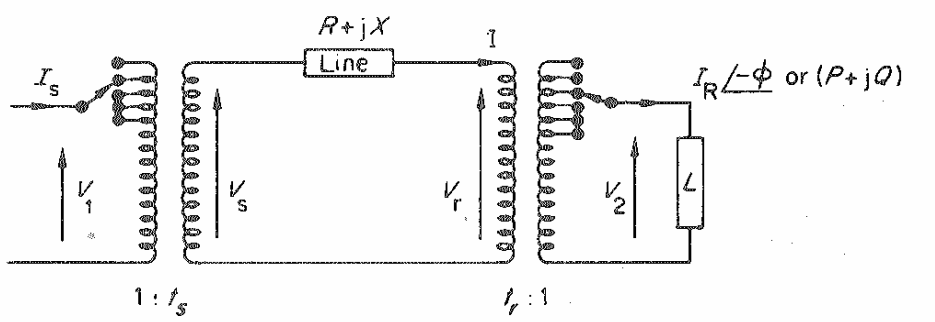


Figure 5.10 (a) Coordination of two tap-changing transformers in a radial transmission link.

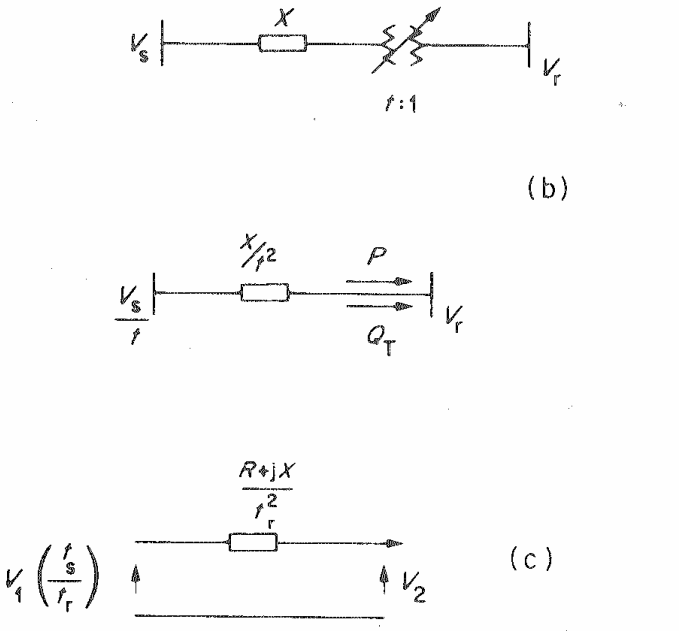


Figure 5.10 (b) and (c) Equivalent circuits for dealing with off-nominal tap ratio. (b) single transformer (c) two transformers.

V_1 ولتاژ اسمي	nominal voltage	تنظيم واحد
V_S ولتاژ حقيقي	actual voltage	t_S تنظيم off- nominal
V_r	actual voltage	t_r تنظيم off- nominal
V_2	actual voltage	تنظيم واحد

t = of nominal tap ratio Or perunit tap setting نسبت ترانس‌ها

t_S, t_r نسبتي از نسبتهاي اسمي ترانسفورماتورها fraction of nominal transformation ratio

نسبت ترانس‌ها وقتي تپينگ صورت مي‌گيرد به نسبت ترانس وقتي كه تپ صورت نمي‌گيرد يعني (در حالت عادي)

$$t_S = \frac{\text{tap ratio}}{\text{no min alratio}}$$

$$t_S = \frac{(\frac{T}{P})\,\text{tap}}{(\frac{T}{P})\,\text{nominal}}$$

مثلاً اگر نسبت اسمي ترانس ۱ و ۲ $6.6/33^{KV}$ باشد و وقتي كه تپينگ انجام مي‌شود نسبت ترانس به $6.6/36$ تبديل مي‌شود (تپينگ در step هاي مختلف صورت مي‌گيرد).

$$t_S = \frac{36/6.6}{33/6.6} = \frac{36}{33} = 1.09 \qquad t_S.t_r = 1 \quad \rightarrow \quad t_r = 0.917$$

اگر $t_S.t_r = 1$

$$V_S = V_1 t_S \qquad V_r = t_r V_2$$

براي جبران كامل افت ولتاژ و براي داشتن حداقل tap cho در كنترل ولتاژ بايستي داشته باشيم :

$$t_r.t_S = 1$$

$$\overline{V_S} = \Delta\overline{V} + \overline{V_r} \qquad t_S V_1 = I_{2t} t_r V_2 \qquad I_2 = \Delta V = \frac{RP + XQ}{V_r = t_r V_2}$$

$$\Delta\overline{V} = V_1(\frac{t_S}{t_r}) - \overline{V_2} \equiv \frac{\frac{R}{t_r^2}P + \frac{x}{t_r^2}Q}{\overline{V_2}}$$

$$\begin{cases} t_S V_1 = t_r V_2 + \dfrac{RP + XQ}{t_r V_2} \rightarrow t_S V_1 = \dfrac{V_2}{t_S} + \dfrac{RP + XQ}{\frac{V_2}{t_S}} \\ t_r.t_S = 1 \end{cases}$$

طرفين در $\frac{t_S}{V_1}$ ضرب

$$t_S{}^2 = \frac{V_2}{V_1} + \frac{RP + XQ}{V_1 V_2}.t_S{}^2 \qquad \frac{V_2}{V_1} = t_S{}^2(1 - \frac{RP + XQ}{V_1 V_2})$$

$$t_S^2 V_1 V_2 - V_2^2 = (RP + XQ)t_S^2$$

بازاي يك مقدار قدرت انتقالي از خط و بازاي اينكه V_2 چه نسبتي از V_1 باشد t_r, t_S را مشخص سازيم و بخواهيم افت ولتاژ متوسط ترانس مجهز به tapch كمپانزه باشد يعني $V_1 = V_2$ باشد خواهيم داشت :

$$t_S = \sqrt{\frac{V_2/V_1}{1 - \frac{RP + XQ}{V_1 V_2}}} \xrightarrow{V_1 = V_2} \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{RP + XQ}{V_1{}^2}}}$$

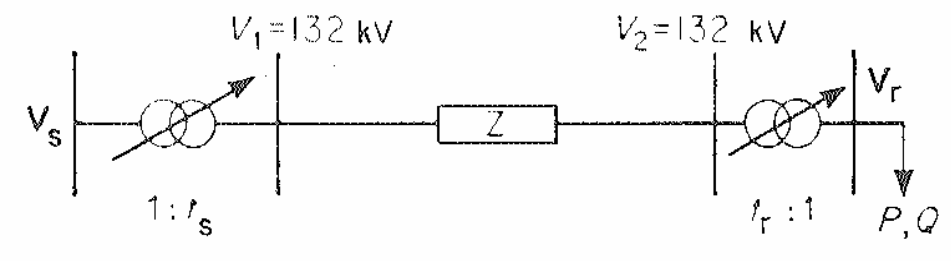
$$V_2 = \frac{1}{2}\left(t_S{}^2 V_1 \pm t_S\sqrt{t^2 = V_1{}^2 - 4(RP + XQ)}\right)$$

براي يك مشخصه معيني از خط و براي يك اتصال يك قدرت معيني و يك تصحيح معيني با داشتن V_1 مي‌توان ولتاژ V_2 را مشخص ساخت.

مثال- يك خط انتقال ۱۳۲KV از طريق ترانسفوماتور 11/132 KV تغذيه مي‌شود. در طرف ديگر خط (طرف بار) اين ولتاژ توسط ترانسفورماتور ديگر 132/11 KV كاهش مي‌يابد. امپدانس كل خط و ترانسفورماتورها در طرف 132 KV برابر $25 + j66\Omega$ است.

هر دو ترانسفورماتور، داراي سيستم تپ چنجر هستند كه در آنها حاصلضرب تنظيمات طرف off- nominal برابر واحد است.

اگر بار انتهاي خط برابر 100MW در ضريب قدرت ۰/۹ پس‌فاز باشد در آنصورت تنظيمات $t_S.t_r = 1$ تپ‌چنجرها را براي ثابت نگه‌داشتن ولتاژ شين بار در 11KV محاسبه كنيد (توان مثبت 100MW).



حالت جبران كامل مي‌باشد (طبق شرايط مسئله) $V_S = V_r = 132KV = 1pu$

$t_S \times t_r = 1$ $\qquad Z_{un} = 25 + j66\Omega = 0014 + j0.38\ pu$

$load = P + jQ = 100MW + j48.3MVAR = 1 + j0.483\ Pu$

از معادلة كلي

$$1 = \frac{1}{2}\left[(t_S{}^2.1) \pm t_S\sqrt{(t_S{}^2.1^2 - 4(0.14 \times 0.38 \times 0.483)}\right]$$

$$2 = t_S{}^2 \pm t_S\sqrt{t_S{}^2 - 1.28}$$

$$(2 - t_S{}^2)^2 = t_S{}^2(t_S{}^2 - 1.28) \quad \rightarrow \quad t_S = 1.21 \quad \rightarrow \quad t_r = \frac{1}{1.21} = 0.83$$

شرايط عادي براي تپ‌چنجر بيش از ۲۰ درصد نمي‌باشد و مقادير بدست آمده كمي بيشتر از حالت معمول است. بنابراين لازم است براي تثبيت ولتاژ در شين بار از تزريق وار نيز استفاده شود.

دقت شود كه اين ترانسفورماتورها مقدار قدرت راكتيو را تغيير نمي‌دهند بلكه با افزايش نسبت تنظيم t_S (با كاهش t_r) جريان خط افزايش مي‌يابد.

قبل از تپ‌چنجر $I = 100A$

$ratio\ 1:1$

بعد از تپ‌چنجر $\frac{I'}{100} = \frac{1.1}{1} \quad \rightarrow \quad I' = 100 \times 1.1$

$$\Delta V_L{}' = 1.1\ \Delta V_L$$

از طرف ديگر افزايش ولتاژ ثانويه (كاهش t_r) نيز باعث افزايش اين افت ولتاژ (افزايش جريان) خواهد بود.

www.Mohandesyar.com

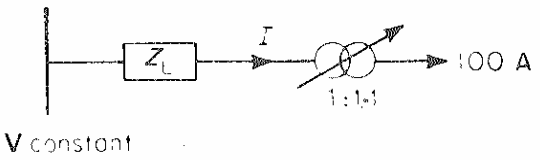


Figure 5.12 Effect of tap changing on line current and voltage drop.

ترکیب ترانسفورماتورهای تنظیم Tap-changing و تزریق توان راکتیو

در بعضي از منابع $t_r = a_2$, $t_S = a_1$ t per unit tap setting

در طرف دريافتي وقتي t_r را كاهش مي‌دهيم شدت جريان در اين قسمت افزايش مي‌يابد و لذا با كاهش t_r كه مي‌خواهيم افت ولتاژ را جبران كنيم از طرف ديگر شدت جريان را افزايش داده‌ايم. پس بايستي توجه داشت اين ترانس‌ها را در خطوطي بكار برد كه داراي امپدانس كمتري باشند.

اين ترانس‌ها حداكثر تا 20% ولتاژ را كنترل كنند اگر ترميم ولتاژ بيشتر از آن مورد احتياج باشد لازم است ترانسفورماتورها را همراه با ساير كمپانزاتورها مثل خازنها يا موتورهاي سنكرون استفاده كنيم كه آنها به ثالثيه ترانسفورماتورهاي سه‌سيم‌پيچه اتصال پيدا مي‌كنند.

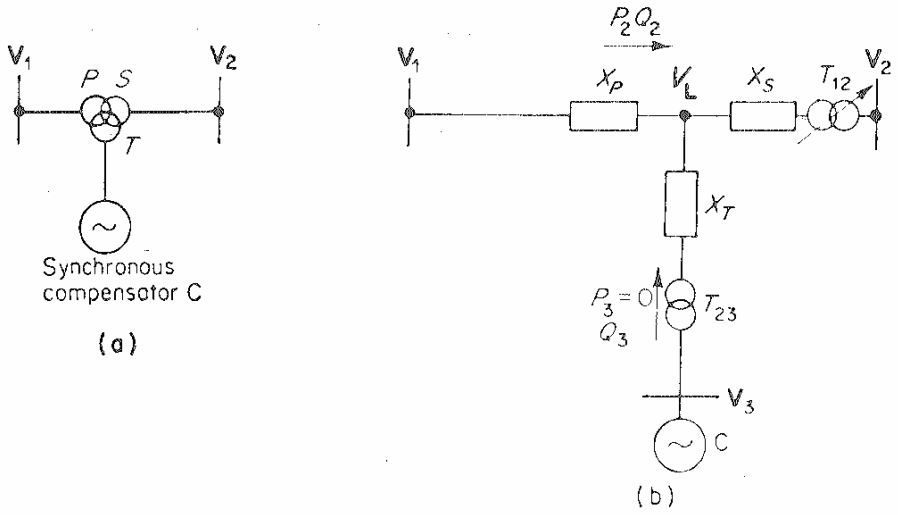


Figure 5.13 (a) Schematic diagram with combined tap changing and synchronous compensation. (b) Equivalent network.

براي انتقال يك قدرت معيني و بازاي اينكه ولتاژ ثانويه چه نسبتي با ولتاژ اوليه داشته باشد و با توجه به محدود بودن tap , settingهاي اين ترانس مقدار قدرت راكتيوي كه اين كمپانزاتور بايستي بدهد چقدر بايد باشد؟

در طرف ثالثيه $P_3 = 0$,Q_3 افت ولتاژ در نقطة V_1 تا V_n با صرفنظر از R

$$\Delta V = \frac{X_P Q_2 / 3}{V_n} = X_P \frac{Q_2}{\sqrt{3} V_b} \quad V_L = \sqrt{3} V_n$$

www.Mohandesyar.com

www.Mohandesyar.com

$$\delta V = X_P \frac{P_2}{\sqrt{3}V_L}$$

$$(V_n + \Delta V)^2 + (\delta V)^2 = V_1^2$$

$$(V_L^2 + X_P Q_2)^2 + (X_P\ P_2)^2 = 3V_1^2 V_L^2$$

$$V_{1L} = \sqrt{3}V_1$$

$$V_L^4 + X_P^2 Q_2^2 + 2X_P Q_2 V_L^2 + X_P^2 P_2^2 = V_{1L}^2 V_L^2 = 0$$

$$V_L^4 + (2X_P Q_2 - V_{1L}^2)V_L^2 + (X_P^2 Q_2^2 + X_P^2 P_2^2) = 0$$

$$V_L^2 = \frac{(V_{1L}^2 - 2X_P Q_2)}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{V_{1L}^2 (V_{1L}^2 - 4X_P Q_2) - 4X_P^2 P_2^2}$$

190

Example 5.4 A three-winding grid transformer has windings rated as follows: 132 kV (line), 75 MVA, star connected; 33 kV (line), 60 MVA, star connected; 11 kV (line), 45 MVA, delta connected. A synchronous compensator is available for connexion to the 11-kV winding.

The equivalent circuit of the transformer may be expressed in the form of three windings, star connected, with an equivalent 132 kV primary reactance of 0.12 p.u., negligible secondary reactance, and an 11 kV tertiary reactance of 0.08 p.u., both values expressed on a 75 MVA base.

In operation, the transformer must deal with the following extremes of loading:

(a) Load of 60 MW, 30 MVAr with primary and secondary voltages governed by the limits 120 kV and 34 kV; synchronous compensator disconnected.

(b) No load. Primary and secondary voltage limits 143 kV and 30 kV; synchronous compensator in operation and absorbing 20 MVAr.

Calculate the range of tap changing required. Ignore all losses.

www.Mohandesyar.com

روش ديگر مورد استفاده از ترانس‌هاي مجهز به tap chan در خطوط براي كنترل جريان قدرت راكتيو است VAR

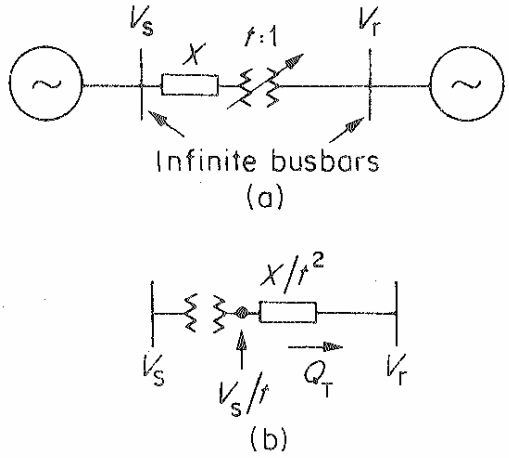


Figure 5.15 (a) Two power systems connected via a tap-change transformer. (b) Equivalent circuit with impedance transferred to receiver side.

اگر V_r, V_S ثابت باشند و ترانس مجهز به t.cH با tap nominal ratio t باشد مي‌توان مدار را بصورت زير در نظر گرفت :

تمام پارامترها را به سمت راست ترانس مي‌توان انتقال داد.

افت ولتاژ در خط $\Delta V = \frac{V_S}{t} - V_r = \frac{X}{t^2}\frac{Q_r}{V_r}$

اگر طرفين به $\frac{V_r.t^2}{X}$ ضرب شود. $Q_r = (V_S v_r t - V_r^2 t^2)\frac{1}{X}$

تحت اين شرايط داريم :

$V_S = V_r = V$

قدرت اتصال كوتاه $S = \frac{V^2}{X}$ $tV^2(1-t)\frac{1}{X} = Q_T$

$St(1-t) = Q_T$

Q_T مثبت است. V_S بزرگتر از V_r بوده و جريان از باس V_S بطرف V_r است. $t < 1$

Q_T منفی است. V_S كمتر از V_r بوده و جهت جريان قدرت راكتيو از V_r به طرف V_S است. $t > 1$

بنابراين با تنظيم مناسب ترانسفورماتور تبديل مقدار توان راكتيو بين دو ناحيه كنترل می شود. در حالت پيشرفته می توان از تعداد دو ترانسفورماتور تنظيم تبديل موازی بين دو ناحيه استفاده نمود. هرگاه يكی از ترانسفورماتورها در نسبت تبديل off-nominal برابر 1:1.1 و ديگری در جهت مخالف يعنی 1:0.8 تنظزم

شونددرآنصورت جريان گردشی متناسب با توان راکتيو در حلقه بين دو ترانسفورماتور ظاهر می شود. اين روش بنام Tap Stagger يا اتصال قابل تغيير ناميده شده و راه حل مناسبی برای جذب توان راکتيو می باشد.

ترانسفورماتور تقويت **Booster Transformers**

Booster transformer = دو نوع هستند و ترانس‌هاي تنظيم‌کننده يا regulating trans هستند که ولتاژ را در جهت طولي تغيير مي‌دهند (که قبلاً توضيح داده شده است) ترتيب سيم‌پيچهاي سري و تحريك که در مدار قرار مي‌گيرند Phase shift صورت مي‌گرفت در اين ترانس‌ها سيم‌پيچ تحرك و سري از يك باس گرفته مي‌شود. افزايش ولتاژ خواهيم داشت بدون Phase shift

تحريك سيم‌پيچ سري از خود همان فاز است. در حاليکه در حالت قبل تحريك سيم‌پيچ سري از دو فاز ديگر گرفته مي‌شد که 90 نسبت به ولتاژ ديگر فاز اختلاف فاز دارند.

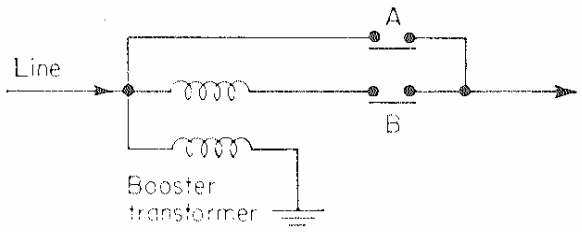
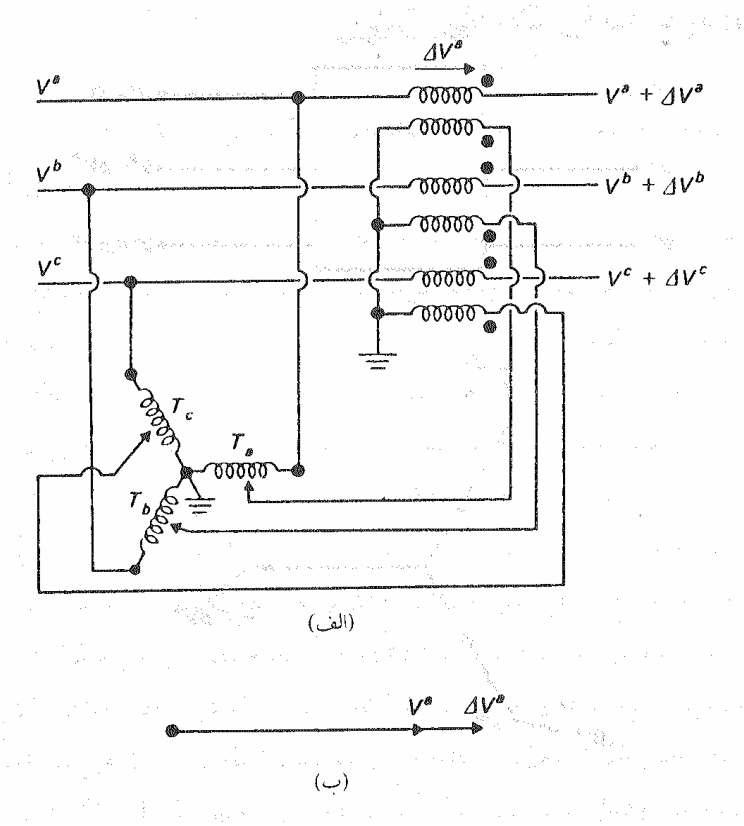


Figure 5.16 Connexion of in-phase booster transformer. One phase only shown.



ترانسفورماتور تنظيم مخصوص تنظيم دامنه ولتاژ

www.Mohandesyar.com

Example 5.5 In the system shown by the line diagram in Figure 5.17 each transformer T_A and T_B have tap ranges of ±10 per cent in 14 steps of 1.43 per

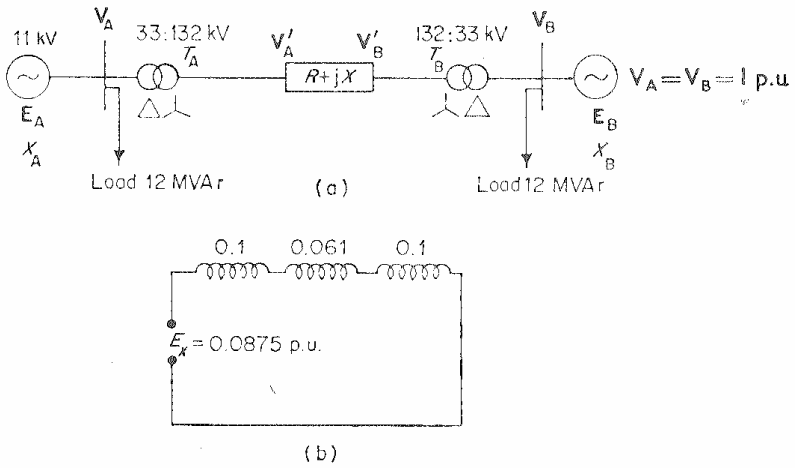
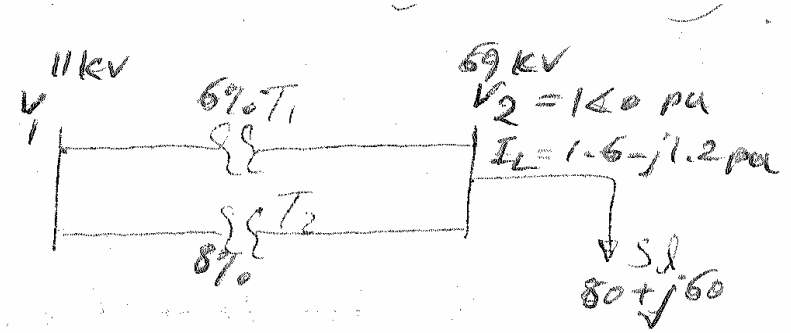


Figure 5.17 (a) Line diagram of system for Example 5.5. (b) Equivalent network with voltage boost E_x acting.

cent. Initially $V'_A = V'_B$ and hence no power or var transfer takes place through the line. It is required to calculate the magnitude of the circulating current resulting from an in-phase boost of 8.75 per cent on T_A, with the busbar voltages maintained constant by automatic voltage regulators on generators A and B. The plant data are as follows expressed on a 20 MVA base, resistance ignored. Generators A and B: 20 MVA, $X = 0.2$ p.u. Transformers T_A and T_B: 20 MVA, 132/33, $X = 0.1$ p.u.; 132 kV line, 8 km, $X = 3.85\ \Omega = 0.061$ p.u.

مثال - در شكل زير 2 ترانسفورماتور بطور موازي مورد بهره‌برداري قرار گرفته و قدرت را بين باس $V_1 = 11KV$ و باس $V_2 = 69KV$ انتقال مي‌دهند. S_L قدرت بار دريافتي $80MW + j60MVAR$ و تحت ولتاژ 50MVA تغذيه مي‌شود دو ترانسفورماتور داراي قدرت 50MVA مساوي هم بوده و ولتاژ نامي آنها $11/69KV$ است. دو ترانس قدرت 100MVA را تغذيه مي‌نمايند.



www.Mohandesyar.com

حال اگر امپدانس این ترانس‌ها با هم برابر بودند قدرت بطور مساوي بین دو ترانس تقسیم مي‌شد مسئله‌اي نبود اما امپدانس ترانس‌ها متفاوت است. $X_{T1} = j.06$, $X_{T2} = j.08$ است،

وقتي نسبت ترانس‌ها $1/1$ است يعني بدون تغيير دادن t.ch بار بطور مساوي بين آنها تقسيم نخواهد شد چون امپدانس ترانس 1 كمتر است Overload مي‌شود ولي T_2 تحت شرايط under load مورد استفاده قرار مي‌گيرد حال اگر بوسيلة تغييرات نسبت ترانس‌ها تا چه اندازه مي‌توان بارها را بطور مطلوب بين ترانس‌ها تقسيم نمود. ميدانيم نسبت هر يك از ترانس‌ها بين 90-110% از نسبت نامي $a^0 = 11/69KV$ در 32 مرحله يا پله step بطوريكه در هر مرحله يا پله $5/8\%$ تغيير يابد.

Nominal ratio تغيير پيدا خواهد كرد (هر كدام از اين 32 پله $5/8\%$ ولتاژ را تغيير خواهند داد).

حل : در صورتيكه هيچ اصلاحي صورت نمي‌گيرد حل مي‌كنيم پس بررسي مي‌كنيم كه با تغييرات مناسب بار را به چه شكل مطلوب مي‌توان بين دو خط تقسيم نمود : $S_b = 50MVA$

$V_b = 11KV, 69KV$

چون 69KV ولتاژ V_2 را 1 پريونيت در نظر گرفته‌ايم.

$I_L = 1.6 - j1.2 \qquad S = VI_L^*$

با داشتن شدت جريان مي‌توان شدت جريان هر خط را بدست آورد به نسبت عكس امپدانس‌ها.

$$I_{L1} = \frac{j.08}{j.08 + j.06} I_L = .914 - j.686 \ Pu$$

$$I_{L2} = \frac{j.06}{j.08 + j.06} I_L = .686 - j.514 \ Pu \qquad \frac{|I_{L2}|}{|I_{L1}|} = \frac{6}{8} = .75$$

طرف 1 14 درصد Over load كار مي‌كند $|I_{L1}| = 1.14$

طرف 2 14 درصد Under load كار مي‌كند $|I_{L2}| = .86$

اختلاف ولتاژي كه مي‌خواهيم ايجاد كنيم فرض مي‌كنيم اختلاف ولتاژ ΔV در بين ثانويه ترانس 1 و ثانويه ترانس 2 بوجود مي‌آوريم و اين اختلاف ولتاژ بايستي موجب ايجاد يك شدت جريان دوراني V_{I_L} كه از شدت جريان خط L_1 كم و به شدت جريان خط L_2 اضافه نمايد.

ΔV اختلاف ولتاژ بين ثانويه T_1 و ثانويه T_2 شدت جريان دوراني $I_C = \frac{\Delta V}{Z_{Loop}}$ فرض مي‌شود تغييرات 1tap را فقط در يك ترانس انجام مي‌دهيم tapهاي T_2 را ثابت نگه داشته و tap ترانس 1 را مقداري افزايش مي‌دهيم

پس نسبت ترانس 2 روي مقدار نامي ثابت نگه مي‌داريم روي ترانس 1 به اندازه Δa افزايش مي‌دهيم :

$$a^0 = 11/69\,KV$$

$$T_2 : a^0 \to t_2 = \frac{a^0}{a^0} = 1$$

$$T_1 : a^0 + \Delta a \to t_1 = \frac{a^0 + \Delta a}{a^0} = 1 + \frac{\Delta a}{a^0}$$

Δa مقدار كوچكي است پس $\Delta a.a_0 \to 0$ $\qquad T_2 \Delta a^0 = \frac{V_1}{V_2}$

اگر صورت و مخرج كسر را به V_2 تقسيم كنيم ΔV برحسب Pu بدست مي‌آيد.

$$T_1 \;\; a^0 + \Delta a = \frac{V_1}{V_2}$$

$$\Delta V = \frac{V_1}{a_0} - \frac{V_1}{a_0 + \Delta a} = \frac{V_1(a_0 + \Delta a) - V_1 a_0}{a_0(a_0 + \Delta a)} = \frac{V_1 \Delta a}{{a_0}^2 + \Delta a.a_0} \cong \frac{V_1 \Delta a}{(a_0)^2}$$

به Pu $V_1 = 1$ يا برحسب پريونيت $\qquad \frac{\Delta V}{V_2} \cong \frac{V_1}{V_2}.\frac{\Delta a}{{a_0}^2}\,Pu \;\; (\Delta V)_{Pu} \cong \frac{\Delta a}{a_0}\,Pu$

با داشتن شدت جريان دوراني مي‌توان نسبت ترانس را بدست آورد.

$$I_C = \frac{\Delta a / a_0}{j./4} = \frac{\Delta V}{\Sigma X}$$

بصورت ترسيمی مي‌توان

$$\begin{cases} I_1 = I_{L1} - I_C \\ I_2 = I_{L2} + I_C \end{cases} \to |I_{L1} - I_C| = |I_{L2} + I_C|$$

چون I_C فقط مؤلفه راكتيو دارند لذا $I_C = -jb$ (در كتاب $b \to a$ نوشته شده است)

$-ja =$ قدرمطلق شدت جريان دوراني

$$|.914 - j.686 + ja| = |.686 - j.514 - ja| \to a = .238$$

$$\frac{\Delta a}{a_0} = I_C(j.14) \to \frac{\Delta a}{a_0} = .0333\,Pu \to \begin{cases} t_2 = 1 \\ t_1 = 1 + \frac{\Delta a}{a^0} = \pm .0333 \end{cases}$$ كل تغييرات

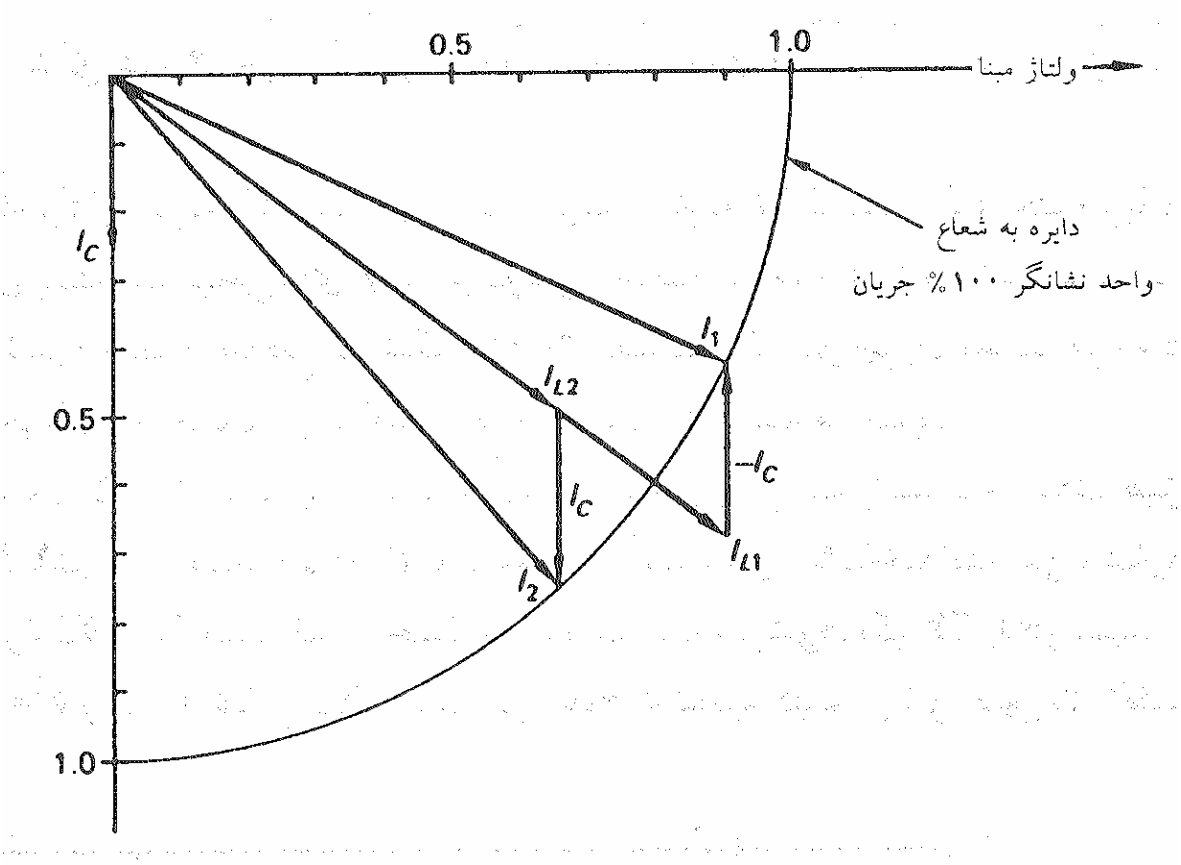
در هر مرحله فقط $5/8\,\%$ اين نسبت تغيير پيدا مي‌كند.

تعداد پله‌ها $\qquad$ تعداد پله $= \frac{\text{تپ ترانسفورماتور t}}{\text{مقدار تپ هر پله}}$

$$\text{تعداد پله} = \frac{.0333}{(5/8)\frac{1}{1000}} = 5.33 =$$

اگر ترانسفورماتور T_1 را 6 پله تغيير بدهيم اختلاف ولتاژ باعث مي‌شود بار بطور مساوي بين خط تقسيم شود اين 6 پله خوب است. اگر 3 پله يكي را افزايش مي‌دهيم (T_1) ديگري را 3 پله كاهش دهيم (T_2) و بدين ترتيب به 6 پله برسيم.

روش ترسيم آموزنده است. I_C در خلاف جهت I_{L1} است. مقدار I_C بايستي طوري انتخاب شود كه I_{L1} بعد از tap cha... روي دايره بيفتد و I_C روي شدت جريان I_{L2} اضافه شده و آنرا روي دايره بيندازد.



محاسبه جريان گردشی به روش ترسيمی

Voltage Stability

Voltage Control in Distribution Networks

Voltage Control in Long Lines

فصل هفتم

پایداری و کنترل سیستم های قدرت

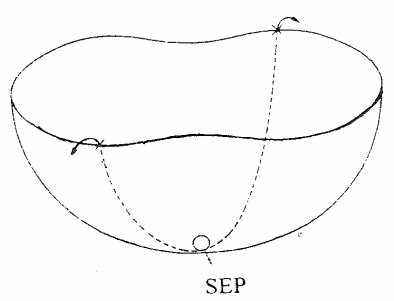
Power System Stability & Control

۷-۱ روش مستقیم تحلیل پایداری گذرا

روش های مستقیم پایداری را بدون حل صریح معادلات دیفرانسیل سیستم تعیین می کنند. این روش, از نظر اکادمیک جذاب است و از زمان کارهای اولیه ماگنوسن و آیلت, که انرژی گذرا را برای ارزیابی پایداری گذرا به کار گرفتند, تاکنون توجه زیادی را به خود جلب کرده است. روشهای مبتنی برانرژی , حالت خاصی از روش کلی دوم لیاپانوف یا روش مستقیم است و تابع انرژی, یک تابع مناسب لیاپانوف است. این بخش مفاهیم اساسی را توضیح می دهدکه روشهای مستقیم بر آنها استوار شده است.

۷-۲ توصیف روش تابع انرژی گذرا

همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است, روش انرژی گذرا را میتوان با در نظر گرفتن توپی که بر روی سطح داخلی یک کاسه می چرخد توصیف کرد. محدوده داخل کاسه نشان دهنده ناحیه پایداری است و محدوده خارج آن ناپایداری را نشان می دهد.لبه کاسه, صورت نامنظمی دارد و از این رو نقاط مختلف روی لبه دارای ارتفاعات متفاوتی هستند.



نمایش توپ چرخان بر روی سطح داخلی یک کاسه

در آغاز توپ در پایین کاسه در حالت سکون است, این حالت را نقطه تعادل پایدار(Stable Equilibrium Point) می نامند. هنگامی که مقداری انرژی جنبشی به توپ وارد شود , توپ در جهت خاصی حرکت می کند و بر روی سطح داخلی کاسه بر روی مسیری که با جهت حرکت اولیه تعیین می گردد به طرف بالا غلت خواهد زد. نقطه ای که توپ از حرکت باز خواهد ایستاد با مقدار اولیه انرژی پتانسیل وارد شده به سیستم, تعیین میشود. اگر توپ قبل از آنکه به لبه کاسه برسد تمامی انرژی جنبشی خود را به انرژی پتانسیل تبدیل کند, به طرف پایین غلت می خورد و در نهایت بعدازمقداری رفت و برگشت درنقطه تعادل پایدار, مستقر خواهد شد. لیکن اگر انرژی جنبشی وارد بر سیستم به اندازه کافی بزرگ باشد, توپ به لبه کاسه رسیده و از آن بیرون می افتد. در این صورت توپ به محدوده ناپایداری وارد می شودوبه نقطه تعادل پایدار, باز نخواهد گشت.سطح داخل کاسه, سطح انرژی پتانسیل و لبه کاسه , سطح مرزی انرژی پتانسیل(Potential Energy Boundary Surface) را نشان می دهند.

برای تعیین اینکه آیا توپ وارد محدوده ناپایداری خواهد شد یا نه, دو کمیت لازم است: الف) انرژی اولیه جنبشی وارد شده به سیستم و ب) ارتفاع لبه در نقطه عبور, موقعیت نقطه عبور به جهت حرکت اولیه بستگی دارد.

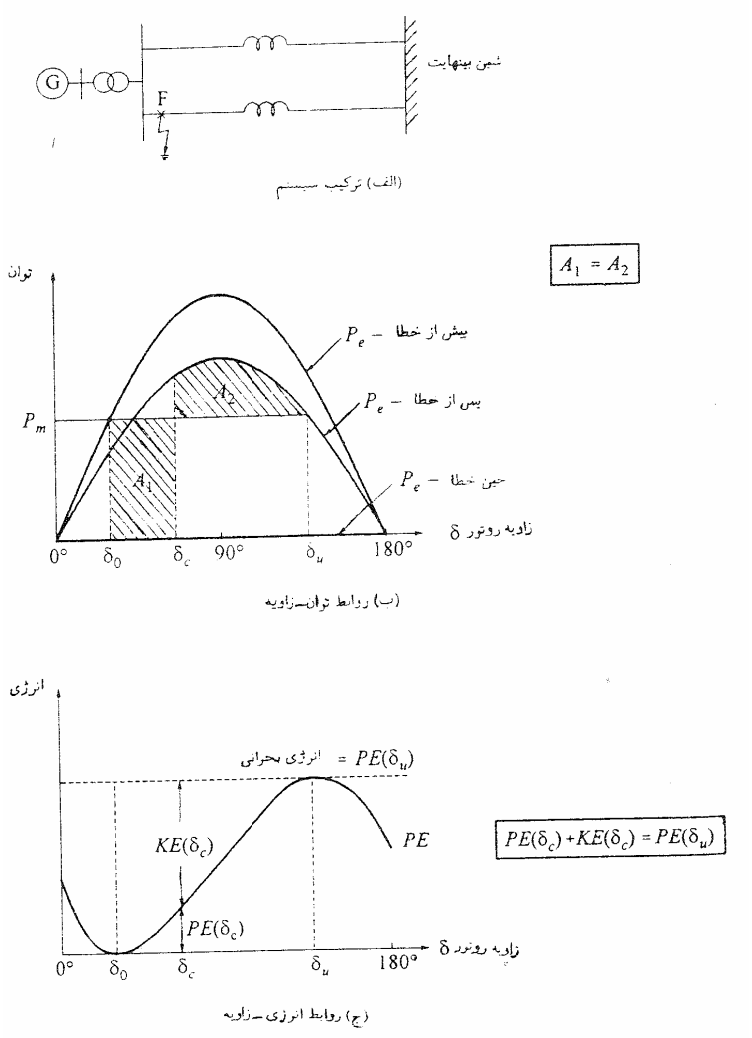
۲-۷ کاربرد در سیستمهای قدرت

اصول لازم برای اعمال روش تابع انرژی گذرا TEF (Transient Energy Function) به تحلیل پایداری سیستم قدرت, به طور مفهومی مشابه اصول حاکم بر توپ غلتان در کاسه است. در آغاز, سیستم در یک نقطه تعادل پایدارعمل می نماید; اگر خطایی رخ دهد, تعادل دچار اغتشاش می شود و ماشینهای سنکرون شتاب می گیرند. در طول زمان خطا, سیستم قدرت مقداری انرژی جنبشی و پتانسیل می گیرد و از SEP دور می شود. بعد ازرفع خطا, سیستم انرژی جنبشی خود را مشابه توپ غلتان روی به بالای سطح انرژی پتانسیل, به انرژی پتانسیل تبدیل می کند. برای اجتناب از ناپایداری در زمانیکه نیروهای وارد بر ژنراتورسعی در آوردن آنها به طرف موقعیتهای تعادل جدید دارند, سیستم باید توانایی جذب انرژی جنبشی را داشته باشد. این موضوع به توانایی جذب انرژی پتانسیل به وسیله سیستم بعد از اغتشاش, بستگی دارد.در یک ترکیب مشخص و پس از بروز اغتشاش در شبکه, مقدارانرژی گذرای حداکثری وجود دارد که سیستم توانایی جذب آنرا دارد.در نتیجه, ارزیابی پایداری گذرا مستلزم موارد ذیل است:

الف) توابعی که بطورکافی انرژی گذرای مسبب جداسازی یک یا چند ماشین سنکرون از باقیمانده سیستم را توصیف می کنند.

ب) تخمینی از انرژی بحرانی مورد نیاز برای از دست دادن سنکرونیزم.

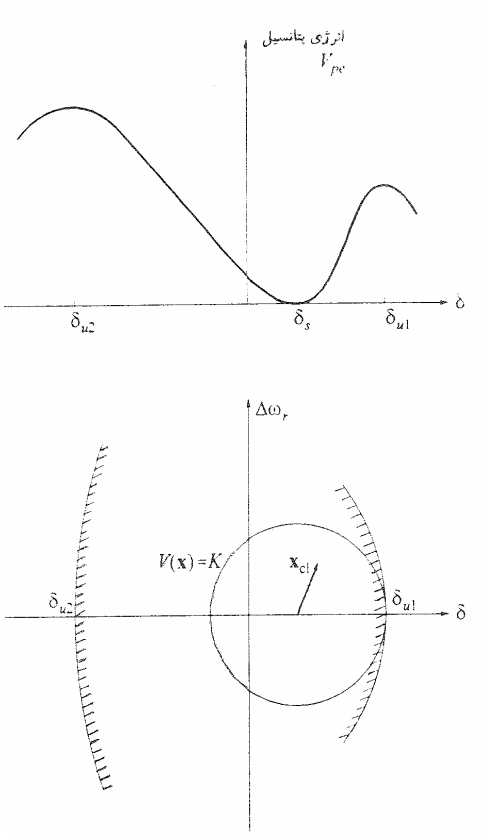
برای یک سیستم دو ماشینه, انرژی بحرانی به طور منحصر به فردی تعریف میشود و تحلیل TEF معادل با معیار سطوح مساوی توضیح داده شده در قصل پایداری گذرا است. این موضوع در شکل زیر نمایش داده شده است, که دو نمودار را با زاویه روتور (δ) بعنوان محور افقی نشان می دهد. نمودار بالا معیارسطوح مساوی را نشان می دهد, که درآن زاویه بحرانی رفع (δ_c) از تساوی سطوحA1وB1 به دست می اید. نمودار پایین روش انرژی گذرا را نمایش می دهد که از آن می توان برای مشخص کردن زاویه بحرانی رفع بر حسب انرژی جنبشی و پتانسیل استفاده کرد. انرژی جنبشی به دست آمده در طول دوره وجود خطا با انرژی پتانسیل در زاویه روتور متناظر جمع می شود و برای تعیین پایداری, با انرژی پتانسیل بحرانی مقایسه می گردد.



نمایش معادل بودن روش انرژی گذرا و معیار سطوح معادل

با بروز اغتشاش, نقطه تعادل پایداری برای سیستم پس از خطا وجود خواهد داشت.می توان برای این SEP پس از خطا ناحیه جذبی را مطابق شکل زیر تعریف کرد. بطوریکه هر مسیر سیستم پس از خطا در حالتی

که حالت سیستم در رفع خطا (x_d) در راخل این ناحیه جذب قرار داشته باشد, در نهایت به سمت SEP همگرا خواهد شد وسیستم, پایدار می ماند. از طرف دیگر, اگر x_d خارج از ناحیه جذب قرار داشته باشد, سیستم پس از خطا به نقطه تعادل پایدار همگرا نمی شود و آنرا ناپایدار می نامند.



ناحیه پایدار و تقریب محلی ئن

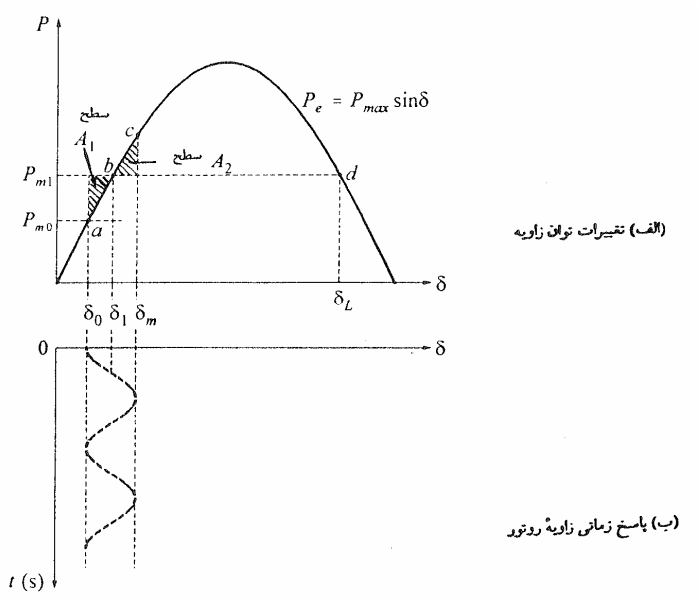
حالت سیستم در رفع خطا(x_d)را می توان با مقدار تابع انرژی محاسبه شده درx_d , به عبارت دیگر $V(x_d)$ توصیف کرد. از این رو روش مستقیم , مساله پایداری را با مقایسه$V(x_{C1})$ با انرژی بحرانی V_{Cr} حل می کند.سیستم, پایدار است اگر$V(x_{C1})$کمتر از V_{Cr}باشد و کمیت$V_{Cr}-V(x_{C1})$ معیار خوبی از پایداری نسبی سیستم است. این کمیت بعنوان حاشیه انرژی گذرا تعریف می شود.

کمیت$V(x_{C1})$, مقدار انرژی گذرای وارد به سیستم به وسیله خطا را اندازه گیری می کند. حال آنکه انرژی بحرانی, قدرت سیستم را پس از خطا اندازه گیری می کند. به طور دقیق تر, انرژی بحرانی توانایی سیستم را در جذب انرژی پس از خطا, اندازه گیری می کند.

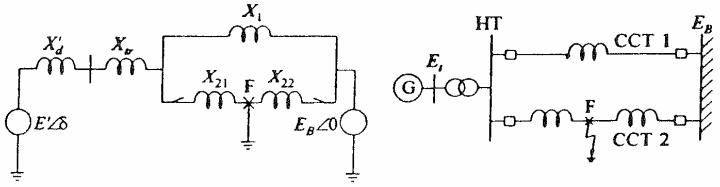
با مراجعه به شکل فوق ملاحظه می شود اگر روتور در گستره δ_{U1} تا δ_{U2} نوسان کند, سیستم پایدار گذرا باقی می ماند و اگر فراتر از این نوسان کند سیستم ناپایدار خواهد شد. از این رو نقاط δ_{U1} و δ_{U2} بر روی

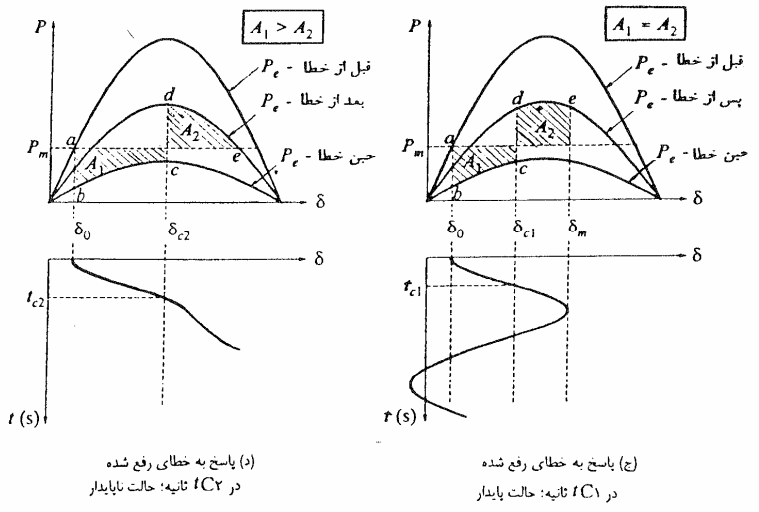
منحنی انرژی پتانسیل, مرزی را برای کلیه مسیرهای زاویه روتور پایدار تشکیل می دهند. این مرز را سطح مرزی انرژی پتانسیل(PEBS)می نامند و نقاط روی این مرز اوجهای محلی انرژی پتانسیل هستند.

مرز ناحیه پایداری, همانطور که در شکل فوق نشان داده شده است, معمولا با یک سطح انرژی ثابت{ X/ V(x)=k} تقریب زده میشود که در آن k نشاندهنده انرژی بحرانی V_{CR} سیستم پس از خطا می باشد.



پاسخ به تغییر پله ای در ورودی توان مکانیکی





ادامه فصل هفتم

پایداری و کنترل سیستم های قدرت

Power System Stability & Control

مقدمه ای بر مساله پایداری سیستم های قدرت

در این فصل به معرفی کلی مساله پایداری قدرت شامل مفاهیم فیزیکی ، طبقه بندی و تعارف واژه های مربوطه پرداخته می شود. بررسی ساختار های ابتدایی سیستم قدرت با استفاده از مدلسازی ایده آل، ویژگی های اساسی پایداری سیستم قدرت را نشان می دهد. به علاوه، بر پیدایش انواع مسائل پایداری که در حین تکامل سیستم های قدرت شکل گرفته، ضروری شده، بسط و توسعه روش های مطالعهٔ آنها شرح داده خواهد شد. هدف این است که دیدگاه کلی از پدیدهٔ پایداری سیستم قدرت عرضه شود و پایهٔ لازم بر اساس دلایل فیزیکی نسبتا ساده بنیانگذاری گردد. این موضوع کمک خواهد کرد که در فصول آینده به بررسی جامع موضوع از جنبه های مختلف پرداخته شود.

۲ – ۱ مفاهیم اولیه و تعاریف

پایداری سیستم قدرت را می توان به طور کلی آن ویژگی از سیستم قدرت دانست که آن را قادر می سازد تا تحت وضع عادی، در حالت تعادل باقی بماند و در صورتی که تحت تاثیر اغتشاشی قرار گیرد، مجددا حالت قابل قبول متفاوتی را به دست آورد. ناپایداری در یک سیستم قدرت ممکن است بستگی به ترکیب سیستم و حالت کاری آن به شکل های مختلفی بروز کند. معمول بوده است که مساله پایداری را به عنوان مساله حفظ عملکرد سنکرون ژنراتور ها بشناسند. از آنجا که تولید در سیستم قدرت بر پایه ماشین های سنکرون (ژنراتور ها) استوار است، شرط لازم برای عملکرد قابل قبول سیستم این است که همه ماشین های مزبور با یکدیگر در حالت سنکرون یا همامنگ باقی بمانند. این جنبه پایداری تحت تاثیر دینامیک روابط زاویهٔ روتور و توان حقیقی – زاویه ژنراتور قرار دارد.

همچنین ممکن است سیستم بدون آنکه سنکرون از دست برود، ناپایدار شود. به عنوان مثال ممکن است سیستمی شامل یک ماشین سنکرون که از طریق یک خط انتقال، یک موتور القائی را تغذیه می کند، در اثر

فروپاشی ولتاژ بار، ناپایدار شود. حفظ عملکرد سنکرون در این حالت مطرح نیست بلکه مسالهٔ پایداری و حفظ ولتاژ است. این نوع ناپایداری می تواند در مورد بارهایی که در یک محدودهٔ وسیع قرار دارند واز یک سیستم بزرگ تغذیه می شوند نیز اتفاق افتد.

در ارزیابی پایداری، مسالهٔ مهم رفتار سیستم در زمانی است که تحت تأثیر یک اغتشاش گذرا قرار گیرد. اغتشاش ممکن است کوچک یا بزرگ باشد. اغتشاش های کوچک به شکل تغییرات بار دائما اتفاق می افتد و سیستم خود را با وضعیت متغیر حاصل، تنظیم می کند. سیستم باید قادر باشد که تحت این حالت، عملکرد قابل قبولی داشته باشد و بتواند حداکثرمقدار بار را تأمین نماید. نیز باید بتواند در مقابل اغتشاش های سخت از قبیل اتصال کوتاه یک خط انتقال، از دست دادن یک ژنراتور یا بار بزرگ و یا از دست دادن خط ارتباطی بیت دو زیرسیستم، مقاوم باقی بماند. عملکرد سیستم در مقابل اغتشاش عمدتا ناشی از نحوهٔ عملکرد تجهیزات تشکیل دهندهٔ آن است. به عنوان مثال، اتصال کوتاهی که بر یک جزء حساس واقع می شودو آن جزء به وسیلهٔ رله های محافظ از سیستم جدا می گردد، باعث می شودکه تغییراتی را در توان های انتقالی خطوط ارتباطی، سرعت های روتور ژنراتورها و ولتاژ شینها داشته باشیم. تغییرات ولتاژ خود باعث عملکرد تنظیم کننده های ولتاژ ژنراتورها و سیستم انتقال می شود، حال آنکه تغییرات سرعت روتور ژنراتورها، گاورنر محرکها (توربین ها) را به عکس العمل وا می دارد. تغییرات در توان های انتقالی خطوط ارتباطی ممکن است سیستم های کنترل تولید را به کار اندازد. تغییرات ولتاژ و فرکانس باعث می شود که بستگی به مشخصات آنها، بارهای سیستم به درجات متفاوتی تغییر نماید. به علاوه، سیستم های محافظ اجرا ممکن است نسبت به تغییرات در متغییرهای سیستم، عکس العمل نشان دهدو بدینگونه بر عملکرد سیستم تأثیر بگذارد. با وجود این، در هر وضع بخصوص،عکس العمل تعداد محدودی از تجهیزات ممکن است قابل توجه باشد. از این رو معمولا فرضیات زیادی انجام می پذیرد تا مساله، ساده شود و بتوان کار را بر روی عواملی که بر روی یک مسالهٔ پایداری بخصوص تأثیر می گذارند، متمرکز کرد. درک مسالهٔ پایداری را می توان تا حد زیادی با طبقه بندی آن به انواع مختلف، تسهیل کرد.

بخش هایی که به دنبال می آید انواع مختلف ناپایداری سیستم های قدرت به همراه مفاهیم مربوط و نیز در موارد لازم، ترکیب سادهٔ سیستم قدرت را مطرح می نماید. بررسی چنین سیستم هایی با استفاده از مدل های ایده آل کمک می نماید تا ویژگی های اساسی هر شکل از شکل های پایداری را تشخیص داد.

۲-۱-۱ پایداری زاویه ای روتور

پایداری زاویه ای روتور توانایی ماشین های به هم پیوستهٔ سنکرون یک سیستم قدرت است که در حالت سنکرون با یکدیگر باقی بمانند. مسالهٔپایداری در این حالت شامل مطالعه نوسان های الکترومکانیکی است که به طور ذاتی در سیستم های قدرت وجود دارد. عامل مهم در این مساله، نحوهٔ رفتار توان های خروجی ماشین های سنکرون در مقابل نوسان های روتور آنهاست. در گام اول، بحث کوتاهی در خصوص مشخصه های ماشین های سنکرون می تواند در درک مفاهیم اولیهٔ مربوطه، مفید واقع شود.

مشخصه های ماشین های سنکرون

مشخصه ها و مدلسازی ماشین های سنکرون به طور مفصل در فصل سوم، چهارم و پنجم مطرح خواهد شد. در این جا بحث به مشخصه های اولیهمربوط به عملکرد سنکرون محدود می شود.

یک ماشین سنکرون دو جزء اساسی شامل تحریک و آرمچیر دارد. معمولا، تحریک روی روتور و آرمچیر روی استاتور واقع است. سیم پیچ تحریک با استفاده از جریان مستقیم تغذیه می شود.زمانی که روتور را با یک تحریک (توربین) بچرخانیم، میدان مغناطیسی دوارسیم پیچ تحریک، ولتاژ های متناوبی در سه فاز سیم پیچ های آرمیچر استاتور، القا می نماید. فرکانس ولتاژ متناوب القا شده و جریان های حاصل در سیم پیچ های استاتور (زمانی که بار به آن متصل است) بستگی به سرعت روتور دارد. از این رو مشاهده می شود که فرکانس متغیرهای الکتریکیاستاتور با سسرعتمکانیکی روتور، سنکرون یا هماهنگ شده اند. از این روست که واژۀ ماشین سنکرون به کار می رود.

زمانی که دو یا چند ماشین سنکرون به یکدیگر متصل می شوند، باید ولتاژ وجریان استاتور همۀ ماشین ها دارای فرکانس باشندو سرعت مکانیکی هر یک از این فرکانس، هماهنگ باشند. از این رو روتور تمام ماشین های سنکرون به هم پیوسته، باید با یکدیگر سنکرونیزه باشند.

ترکیب فیزیکی (توزیع فضایی) سیم پیچ های آرمیچر استاتور به گونه ای است که جریان های متغیر با زمان که از سیم پیچهای سه فاز عبور می کنن، در حالت ماندگار میدان مغناطیسی دواری را ایجاد می کنند که با سرعت روتور می چرخد(به فصلسوم بخش ۳-۱-۳ مراجعه شود). میدان های روتور و استاتور بر یکدیگر تأثیر می گذارند و از اینکه دو میدان سعی می کنند در یک جهت قرار گیرند، گشتاور الکترومغناطیسی ایجاد می شود. در یک ژنراتور، این گشتاور با جهت حرکت روتور مقابله می کند به گونه ای که لازم است گشتاور مکانیکی به وسیلۀ توربین اعمال شود تا چرخش روتور همچنان حفظ گردد. گشتاور (یا توان) الکتریکی خروجی ژنراتور تنها زمتنی تغییر می کند که گشتاور ورودی مکانیکی که به وسیلۀ محرک اعمال می شود، تغییر نماید. تأثیر افزایش گشتاور مکانیکی آن است که روتور را در وضعیت جدیدی قرار می دهد که نسبت به میدان دوار مغناطیسی استاتور جلوتر واقع می شود. یا برعکس، کاهش گشتاور یا توان مکانیکی ورودی ، روتور را عقب تر از میدان دوار مغناطیسی استاتور قرار می دهد. در حالت ماندگار، میدان روتور و میدان دوار حاصل از جریان های استاتور دارای سرعت مشابههستند. با وجود این، مقداری اختلاف زاویه ای بین آنها وجود دارد که بستگی به گشتاور (توان) خروجی الکتریکی ژنراتور دارد.

در یک موتور سنکرون نقش گشتاور های الکتریکی و مکانیکی نسبت به آنچه که در ژنراتور وجود دارد، جابجا می شود. گشتاور الکتریکی چرخش ا حفظ می کندحال آنکه بار مکانیکی با چرخش، مخالفت می کند. افزایش بار مکانیکی باعث عقب افتادن موقعیت روتور نسبت به میدان دوار استاتور می شود.

در بحث فوق دو واژۀ توان و گشتاور تواما استفاده شد. این مسأله در فرهنگ پایداری سیستم های قدرت رایج است زیرا که سرعت چرخشی متوسط ماشین ها ثابت است هر چند که ممکن است تغییرات زود گذری،

بالا و پایین سرعت سنکرون اتفاق افتد. در حقیقت مقادیر توان و گشتاور در مبنای واحد، تقریبا با هم مساوی است.

رابطهٔ توان – زاویه

مشخصهٔ مهمی که در خصوص پایداری سیستم قدرت اهمت دارد رابطهٔ بین توان مبادله شده و موقعیت زاویه ای روتور ماشین سنکرون است. این رابطه به شدت غیر خطی است. برای نشان دادن موضوع، سیستم ساده شکل ۲-۱ "الف" را در نظر بگیرید. این سیستم شامل دو ماشین سنکرون است که از طریق خط انتقالی با راکتانس X_L به یکدیگر متصل شده اند. از مقاومت وظرفیت خازنی خط صرف نظر شده است. فرض کنید که ماشین شمارهٔ ۱ ژنراتور سنکرونی است که ماشین شماره ۲ را، که یک موتور سنکرون است، تغذیه می کند. توان انتقال یافته از ژنراتور به موتور تابعی از زاویه δاست که اختلاف زاویه بین روتورهای دو ماشین را نشان می دهد. زاویهٔ δ

خود از سه مولفه تشکیل شده است: یکی زاویهٔ داخلی ژنراتور به نام δ_G (که زاویه ای است که روتور ژنراتور نسبت به میدان حاصل از استاتور آن جلوتر است)، دیگری δ_L. اختلاف زاویه بین ولتاژ های پایانهٔ ژنراتور و موتور (یعنی زاویه ای که میدان استاتور ژنراتور از میدان استاتور موتور جلوتر است) و دیگری δ_M ، زاویهٔ داخلی موتور (که زاویه ای است که روتور موتور نسبت به میدان حاصل از اتاتور عقبتر است). شکل ۲-۱ "ب" مدلی از سیستم را نشان می دهد که به کمک آن می توان رابطهٔ توان – زاویه را به دست آورد. برای هر ماشین، مدل ساده ای شامل یک منبع داخلی ولتاژ و یک راکتانس موثر فرض شده است. مقدار راکتانس ماشین، بستگی به نوع مطالعه ای دارد که در پی آن هستیم. برای مطالعات حالت ماندگار، کافی است که راکتانس سنکرون ماشین را به همراه ولتاژ تحریک به عنوان منبع داخلی ولتاژ به کار برد. اساس لازم برای چنین مدلی و تقریبهایی را که در آن به کار رفته در فصل سوم بیان خواهیم کرد.

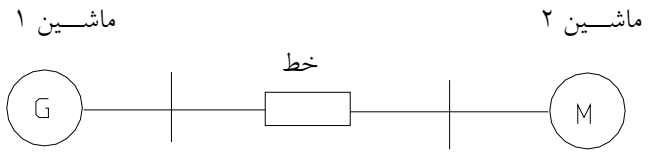
نمودار فازوری که ارتباط بین ولتاژ ها را نشان می دهد در شکل ۲-۱ "ج" نشان داده شده است. توان انتقالی از ژنراتور به موتور برابر است با:

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin\delta \qquad (۱-۲)$$

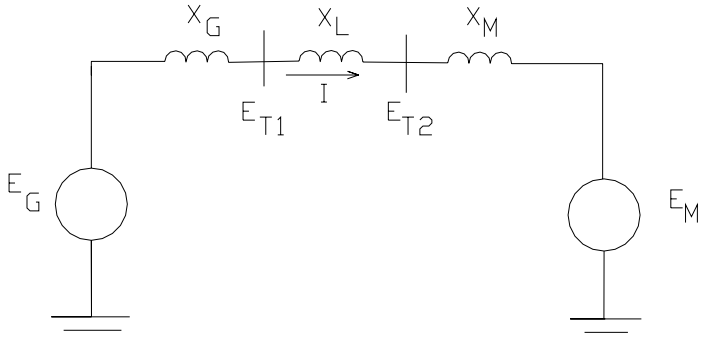
که :

$$X_T = X_G + X_L + X_M$$

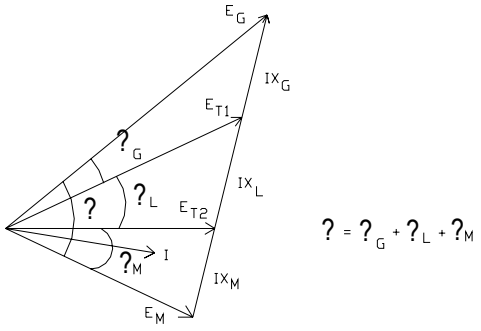
رابطهٔ توان – زاویه در شکل ۲-۱ "د" رسم شده است. با مدل های نسبتا ایده آلی که برای ماشین ها فرض شد، رابطهٔ بدست آمده به صورت سینوسی استکه رابطهٔ کاملا غیر خطی را نشان می دهد. با مدل های دقیق تر ماشین، که تأثیر سیستم های تحریک (تنظیم کننده های خود کار ولتاژ) را نیز در نظر گرفته، رابطهٔ توان – زاویه به میزان زیادی از حالت سینوسی خارج می شوداما به هر حال شکل کلی آن باز هم مشابه است.



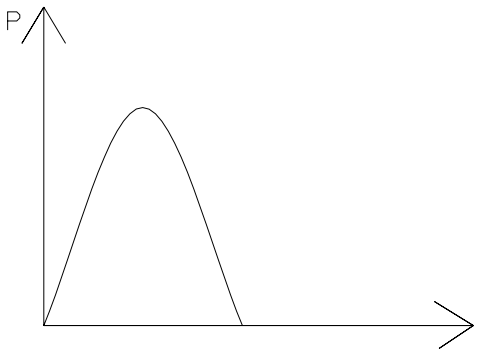
الف) نمودار تـک خطـی



ب) مدل ایده ال



ج)نمـودار فـازوری



د) منحـنی تـوان - زاویـه

شکل ۲-۱ مشخصه انتقال توان یک سیستم دو ماشینه

زمانی که زاویه صفر است هیچ توانی مبادله نمی شود. هر چه زاویه افزایش داده شود توان نیز افزایش می یابد تا به حداکثر خود برسد. اگر زاویه از 90° بیشتر شود، توان، کاهش می یابد. از این رو در حالت مانگار می توان حداکثر توانی مشخص را از ژنراتور به موتور منتقل کرد. مقدار این توان مستقیما با ولتاژهای داخلی ژنراتور . موتور به طور معکوس با مجموع راکتانس های هر دو ماشین و خط انتقال، متناسب است.

زمانی که بیش از دو ماشین وجود داشته باشد، موقعیت نسبی روتورها نسبت به هم بر تبادل توان به طور مشابهی تأثیر می گذارد. با وجود این، مقادیر حداکثر توان های مبادله شده و اختلاف زوایا تابعی پیچیده از توزیع، تولید و بار است. اختلاف زاویه 90° بین هر دو ماشین (که در مورد حالت دو ماشینه محدود کننده بود)به خودی خود هیچ اهمیت مشخصی ندارد.

پدیدهٔ پایداری

پایداری حالت تعادل بین نیروهای متضاد را نشان می دهد. مکانیزمی که به وسیلهٔ آن ماشین های سنکرون به هم پیوسته، حالت سنکرون را بین یکدیگر حفظ می کنند از طریق نیروهای باز یافت است که، زمانی عمل می نماید که نیروهایی وجود داشته باشدتا یک یا چند ماشین را نسبت به سایر ماشین ها شتاب مثبت یا منفی دهد. در حالت ماندگار، تعادل بین گشتاور میکانیکی ورودی و گشتاور الکتریکی خروجی وجود دارد و سرعت، ثابت باقی می ماند. اگر سیستم دستخوش تغییر شود این تعادل از بین می رود و در نتیجه روتور ماشین ها بر اساس قوانین حرکت اجسام دوار، شتاب مثبت یا منفی پیدا می کند. اگر به طور موقت ژنراتوری نسبت به دیگری سریعتر بچرخد، موقعیت زاویه ای روتور آن نسبت به ماشین کندتر، جلوتر قرار می گیرد. بسته به رابطهٔ توان – زاویه ، اختلاف زاویه بین روتور بین دو ماشین باعث می شود تا بخشی از بار ماشین کند به ماشین تند منتقل شود. این موضوع سبب می شود که اختلاف سرعت و در نتیجه اختلاف زاویهٔ روتورها کاهش یابد. همچنان که ذکر شد، رابطهٔ توان – زاویه بشدت غیر خطی است. بالاتر از حد مشخصی، افزایش در اختلاف زاویه، باعث کاهش در توان مبادله شده می شود. این موضوع سبب می شود که اختلاف زاویهٔ باز هم بیشتر شود و منجر به ناپایداری گردد. در هر وضعیت بخصوص، پایداری سیستم به این بستگی دارد که آیا انحراف زوایای روتور ماشین ها منجر به گشتاورهای باز یافت کافی می شود یا خیر. زمانی که یک ماشین سنکرون، حالت سنکرونیزه یا هماهنگ خود با سایر ماشین ها را از دست داد، روتور آن در سرعتی بالاتر یا پایین تر از سرعتی که برای تولید ولتاژ در فرکانس سیستم لازم است، می چرخد. اغزش بین میدان دوار استاتور (مربوط به فرمانس سیستم) و تحریک روتور منجر به تغییرات بزرگی در توان خروجی، جریانو ولتاژ ماشین می شود. این موضوع باعث می شود که سیستم های حفاظتی، ماشین ناپایدار را از سیستم جدا کنند.

از دست رفتن حالت سنکرونیزه ممکن است بین یک ماشین و بقیهٔ سیستم یا بین گروهی از ماشین ها اتفاق افتد. در حالت دوم، ممکن است بعد از جدائی گروه ها از یکدیگر، حالت سنکرونیزه بین ماشین های هر گروه را حفظ کرد.

عملکرد سنکرونیزه ماشین های سنکرون به هم پیوسته را می توان به مجموعه ای از خودروهایی تشبیه کرد که به کمک تسمه های لاستیکی به یگدیگر متصل شده اند و در یک مسیر دایره وار می چرخند. روتور ماشین های سنکرون به خودرو و خطوط انتقال به تسمه تشبیه شده است. زمانی که خودرو ها با یکدیگر هم نوا و هم سرعت باشند تسمه های لاستیکی دست نخورده باقی می مانند. زمانی که نیروی یکی از خودرو ها

افزایش یابد، سرعت آن نیز موقتا افزایش می یابد. این موضوع باعث می شود که تسمهٔ متصل به آن کش بیابد که درنتیجه سرعت آن کاهش و سرعت سایر خودروها افزایش می یابند. بدین ترتیب عکس العملی زنجیروار اتفاق می افتد تا مجددا تمام خودروها در سرعت مشابه ادامه طریق دهند. اگر نیروی وارده به یکی از تسمه ها از حد توانایی آن بیستر شود، پاره می شود و باعث می شود که یک یا چندین خودرو از سایر خودروها جدا شوند.

در سیستم های قدرت می توان با بروز اغتشاش، تغییرات گشتاور الکتریکی یک ماشین سنکرون را، به دو مولفه تجزیه کرد:

$$\Delta T_e = T_S \Delta\delta + T_D \Delta\omega \qquad (۲-۲)$$

که $T_S \Delta\delta$ مولفه ای از تغییرات گشتاور است که با تغییرات زاویهٔ روتور ، $\Delta\delta$ ، هم فاز است و از آن به نام مولفهٔ گشتاور سنکرون کننده یاد می شود. T_S ، ضریب گشتاور سنکرون کننده است. $T_D \Delta\omega$ مولفه ای از تغییرات گشتاور است که با تغییرات سرعت، $\Delta\omega$ ، هم فاز است و از آن به نام مولفهٔ گشتاور میرا کننده یاد می شود. T_D ، نیز ضریب گشتاور میرا کننده است.

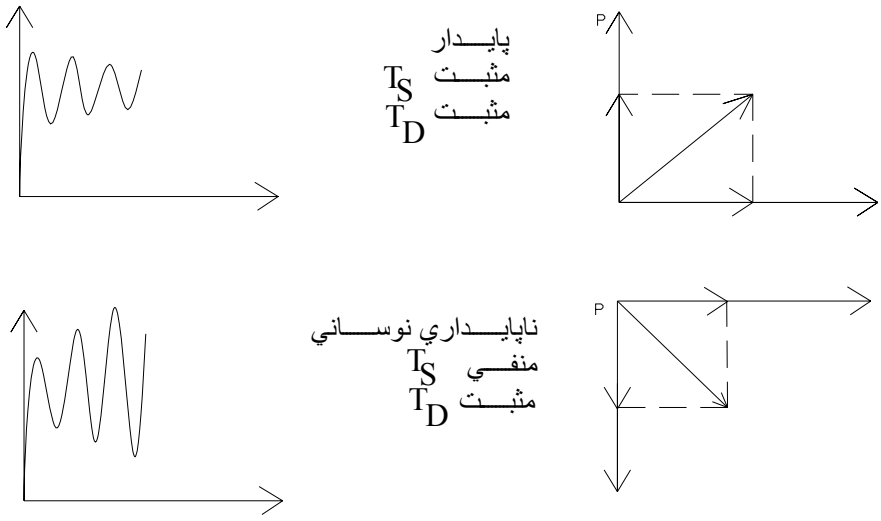
پایداری سیستم بستگی به وجود هر دو مولفهٔ گشتاور برای هر ماشین سنکرون دارد. کمبود گشتاور سنکرون کننده منجر به ناپایداری از طریق رانش غیر نوسانی زاویه روتور می شود. از طرف دیگر، کمبود گشتاور میرا کننده هم منجر به ناپایداری نوسانی می شود.

به منظئر سهولت در امر بررسی پایداری و کسب نگرشی مفید بر طبیعت مسائل پایداری، مناسب است که پایداری زاویهٔ روتور را بر حسب دو طبقه بندی ذیل، تقسیم کرد:

الف) پایدار اغتشاش کوچک یا سیگنال کوچک ، توانایی سیستم را برای حفظ حالت سنکرونیزه در اثر اغتشاش های کوچک نشان می دهد. این اغتشاش ها به علت تغییرات کوچک بار و تولید، دائما اتفاق می افتد. اغتشاش ها را می توان به اندازهٔ کافی کوچک به حساب آورد تا اجازهٔ خطی کردن معادلات سیستم را برای بررسی پایداری داشته باشیم. ناپایداری که ممکن است اتفاق بیفتد به دو صورت باشد: یکی اینکه زاویهٔ روتور به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده دائما افزایش یابد و دیگری حالتی که به کمبود توان میرا کننده، نوسان های روتور با دامنهٔ در حال افزایش اتفاق افتد. عکس العمل سیستم در مقابل اغتشاش های کوچک، به عوامل چندی از جمله: نقطهٔ کار اولیه، قدرت سیستم انتقال و نوع سیستم کنترل تحریک بستگی دارد. برای ژنراتوری که به طور شعاعی به یک سیستم قدرت بزرگ متصل است، ناپایداری در غیاب تنظیم کننده های خودکار ولتاژ (AVR) (یعنی با ولتاژ تحریک ثابت)، به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده، اتفاق می افتد. این مسأله منجر به ناپایداری غیر نوسانی مطابق با شکل ۲-۲-"الف" می شود. با وجود تنظیم کننده های خودکار ولتاژ، زمانی سیستم در مقابل اغتشاش کوچک پایدار است که اطمینان حاصل شود نوسان های سیستم میرایی کافی دارند. ناپایداری معمولا خود را به صورت نوسان هایی با دامنهٔ در حال افزایش نشان می دهد. شکل ۲-۲ "ب" عکس العمل سیستم را با وجود تنظیم کنندهٔ خودکار ولتاژ به تصویر کشیده است.

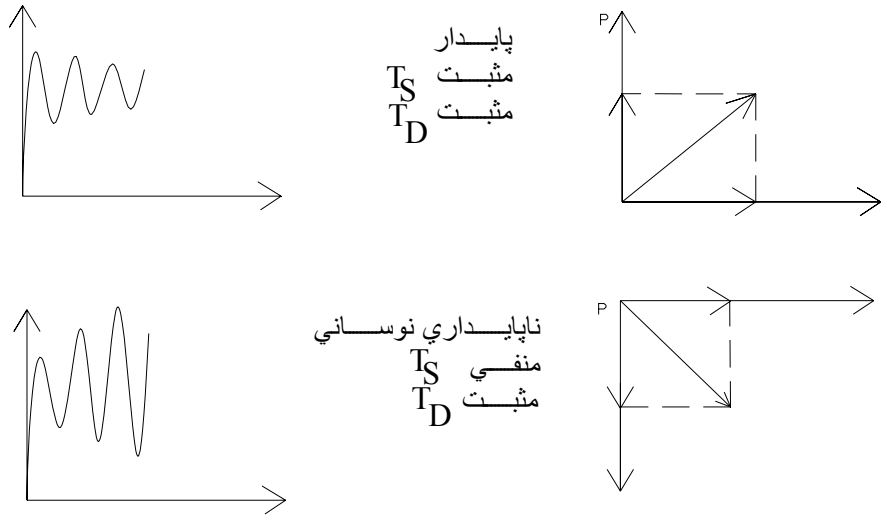
در سیستم های قدرت امروزی، پایداری اغتشاش کوچک، عمدتا به علت کمبود میرایی نوسان ها اتفاق می افتد. پایداری انواع نوسان های زیر مورد توجه است:

- **مد های محلی یا مد های ماشین** – سیستم که مربوط به نوسان هی واحد های یک نیروگاه نسبت به بقیهٔ سیستم قدرت است. واژهٔ محلی به این علت استفاده می شود که نوسان ها به یک نیروگاه یا بخشی کوچک از سیستم قدرت محدود می شود.
- **مد های بین ناحیه ای** – که مربوط به نوسان های تعدادی ماشین سنکرون در یک بخش سیستم نسبت به ماشین های سنکرون سایر بخش هاست. این مدها زمانی اتفاق می افتد که دو یا چند بخش که هر بخش از تعدادی ماشین سنکرون کاملا نزدیک به هم متصل تشکیل شده است، به وسیلهٔ خطوط ارتباطی ضعیف به هم متصل شده باشند.
- **مد های کنترلی** – که مربوط به کنترلگرهای نیروگاه، کنوروتورهای HVDC وجبرانگرهای استاتیکی توان راکتیو (SVC)، بد تنظیم شده باشد، ناپایداری این گونه مدها اتفاق می افتد.
- **مدهای پیچشی** – که مربوط به اجزای چرخان روی محور توربین – ژنراتور است. ناپایداری این مدها ممکن است به علت تأثیر متقابل اجزای مذکور با سیستم تحریک، گاورنر، کنترولگرهای HVDC وخطوط انتقالی که با خازن سری جبران شده اند، اتفاق افتد.



الف) با

ولتاژ تحریک



(ب) با کنترل تحریک

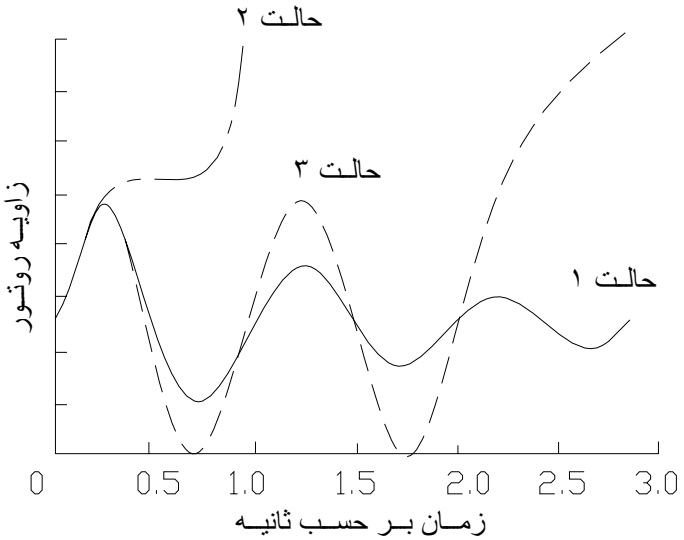
شکل ۲-۲ طبیعت پاسخ اغتشاش کوچک

ب) پایداری گذرا، توانایی سیستم را به منظور حفظ حالت سنکرونیزه در اثر بروز یک اغتشاش شدید گذرا نشان می دهد. عکس العمل سیستم، شامل بغییرات بزرگ زاویهٔ روتور ژنراتور است و از رابطهٔ غیر خطی توان – زاویه تأثیر می پذیرد. پایداری، هم به نقطهٔ کار اولیهٔ سیستم و هم به شدت اغتشاش بستگی دارد. معمولا در این حالت، سیستم دستخوش تغییر می شود به گونه ای که نقطهٔ کار حالت ماندگار سیستم بعد از اغتشاش با نقطهٔ کار قبل از اغتشاش متفاوت است.

در سیستم ممکن است اغتشاش هایی با شدت درجات و احتمال وقوع بسیار متفاوت روی دهد. با وجود این، سیستم به گونه ای طراحی می شود که در مقابل مجموعه ای از پیشامدهای برگزیده، پایدار بماند. این پیشامدها، عمدتا اتصال کوتاه فاز به زمین، فاز به فاز به زمین و سه فاز است. معمولا اتصال کوتاه را روی خطوط انتقال فرض می کنند اما گاهی اتصال کوتاه در شین یا ترانسفورمر نیز در نظر گرفته می شود. فرض می شود که به وسیلهٔ کلید زنی لازم، بخشی که تحت تأثیر خطا واقع شده از بقیهٔ سیستم جدا می گردد. در بعضی شرایط، می توان باز بست سریع را فرض کرد.

شکل ۲-۳ رفتار ماشینی سنکرون را در وضعیتهای پایدار و ناپایدار نشان می دهد. این شکل، عکس العمل زاویهٔ روتور را برای یک حالت پایدار و دو حالت ناپایدار نشان می دهد. در حالت پادار (حالت۱)، زاویهٔ روتور ابتدا افزایش یافته ، به حداکثر خود می رسد و سپس کاهش یافته و با دامنهٔ در حال کاهش به صورت نوسانی در می آید تا اینکه به حالت ماندگار می رسد. در حالت۲ ، زاویهٔ روتور به طور پیوسته و یکنوا افزایش می یابد تا اینکه حالت سنکرون از دست برود. این شکل ناپایداری موسوم به ناپایداری اولین

نوسان است و به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده ایجاد می شود. در حالت۳ ، سیستم ابتدا در اولین نوسان پایدار است اما با افزایش دامنهٔ نوسان ها، تدریجا ناپایدار می شود. این شکل ناپایداری عموما زمانی اتفاق می افتد که شرایط حالت ماندگار سیستم بعد از خطا، خود از دیدگاه "سیگنال کوچک " ناپایدار است و لزوما به علت اغتشاش گذرا اتفاق نمی افتد.



شکل ۲-۳

پاسخ زاویه روتور به یک اغتشاش گذرا

در سیستم های قدرت بزرگ، ممکن است ناپایداری گذرا همیشه به صورت ناپایداری اولین نوسان بروز نکند بلکه می تواند به علت جمع آثار چندین مد نوسانی باشدکه اعث تغییرات شدید زاویهٔ روتور بعد از اولین نوسان می شود. در مطالعات پایداری گذرا، زمان مطالعه معمولا محدود به ۳ تا ۵ ثانیه بعد از اغتشاش می شود هر چند که ممکن است برای سیستم های بسیار بزرگ با مد های نوسانی بین ناحیه ای غالب، این زمان به ۱۰ ثانیه هم برسد.

از واژهٔ پایداری دینامیکی نیز در آثار چاپ شده به عنوان نوعی از پایداری زاویهٔ روتور یاد شده است. با وجود این، نویسندگان مختلف از این واژه برای جنبه های متفاوت پدیده استفاده کرده اند. در امریکای شمالی، از این واژه به همان معنای پایداری سیگنال کوچک با وجود تجهیزات کنترل خودکار (عمدتا تنظیم کننده های ولتاژ ژنراتور) در مقابل پایداری بدون وجود این تجهیزات یاد شده است[۲،۱]. در فرانسه و آلمان، از این واژه به همان معنای پایداری گذرا، که در اینجا استفاده شده است یاد گردیده است. از آنجا که استفاده از این واژه ابهامات زیادی را ایجاد کرده، هم CIGRE و هم IEEE به عدم استفاده از آن توصیه نمودهاند[۳،۴].

۲-۱-۲ پایداری ولتاژ و فرو پاشی ولتاژ

پایداری ولتاژ عبارت است از توانایی سیستم قدرت برای حفظ ولتاژ ماندگار قابل قبول در تمام شین های سیستم در شرایط عادی عملکرد و بعد از اینکه تحت یک اغتشاش قرار گرفت. زمانی که حضور اغتشاش، افزایش تقاضای بار، یا تغییر در وضعیت سیستم باعث افت فزاینده و غیر قابل کنترل در ولتاژ گردد سیستم وارد حالت ناپایداری ولتاژ می شود. دلیل اصلی ناپایداری، عدم توانایی سیستم قدرت در تأمین توان راکتیو مورد تقاضاست. قلب مسأله معمولا افت ولتاژی است که به هنگام عبور توان حقیقی و راکتیو از راکتانس های خطوط انتقال ایجاد می گردد[۵ تا ۷].

یکی از معیار های پایداری ولتاژ آن است که در وضعیت کاری خاصی، در هر شین سیستم و در زمانی که توان راکتیو تزریقی به آن شین افزایش می یابد، دامنهٔ ولتاژ نیز افزایش یابد. سیستم، از دید ولتاژ، ناپایدار است اگر حداقل برای یک شین سیستم، افزایش توان راکتیو تزریقی به آن (Q)، باعث کاهش دامنهٔ ولتاژ آن (V)شود. به عبارت دیگر سیستمی از نظر ولتاژ پایدار استکه حساسیت V-Q آن برای هر شین مثبت باشد و ناپایدار است اگر این حساسیت حداقل برای یک شین منفی شود.

افت ولتاژ شین ممکن است به علت از دست رفتن حالت سنکرونیزه و افزایش زاویهٔ روتور نیز صورت پذیرد. به عنوان مثال، از دست دادن تدریجی حالت سنکرونیزه ماشین ها، زمانی که زوایای روتور بین دو گروه از ماشین ها به 180°نزدیک شده یا از آن فراتر رود، منجر به ولتاژهای بسیار پایین در نقاط واسطه ای از شبکه می شود(به فصل سیردهم، بخش ۱۳-۵-۳ مراجعه کنید). در مقابل، کاهش مداوم ولتاژ، که مربوط به ناپایداری ولتاژ است، زمانی اتفاق می افتد که از نظز پایداری پاویهٔ روتور مشکلی وجود نداشته باشد.

اساسا ناپایداری ولتاژ یک پدیدهٔ محلی است. با وجود این، آثار آن ممکن است تأثیر فراگیر داشته باشد. فروپاشی ولتاژ پدیده ای پیچیده تر از ناپایداری سادهٔ ولتاژ است و معمولا اثر رشته ای از حوادث ناپایداری ولتاژ است که منجر به ولتاژ پایین در بخش عمده ای از سیستم قدرت می شود.

ناپایداری ولتاژ ممکن است به صورت های مختلفی بروز کند. در ساده ترین شکل، موضوع را می توانبا توجه به شبکه ساده شکل ۲-۴ نشان داد[۵]. این شبکه، شامل یک منبع ثابت ولتاژ (E_S) است که باری ($\overline{Z}_D$) را از طریق یک امپدانس سری ($\overline{Z}_L$) تغذیه می کند. این شبکهنمونه ای از یک سیستم شعاعی است که در آن بار یا ناحیهای از بارها به وسیلهٔ یک خط انتقال از سیستمی بزرگ تغذیه می شود. جریان $\overline{I}$ در شکل ۲- ۴ برابر است با:

$$\overline{I} = \frac{\overline{E}_S}{\overline{Z}_L + \overline{Z}_D} \qquad (۳-۲)$$

که $\overline{I}$و $\overline{E}_S$مقادیر فازوری هستند و داریم:

$$\overline{Z}_L = Z_L \angle \theta \quad , \quad \overline{Z}_D = Z_D \angle \varphi$$

دامنهٔ جریان برابر است با:

$$I = \frac{E_S}{\sqrt{(Z_L \cos\theta + Z_D \cos\varphi)^2 + (Z_L \sin\theta + Z_D \sin\varphi)^2}}$$

که این رابطه را به صورت زیر هم می توان بیان کرد:

$$I = \frac{1}{\sqrt{A}} \frac{E_S}{Z_L} \qquad (۴-۲)$$

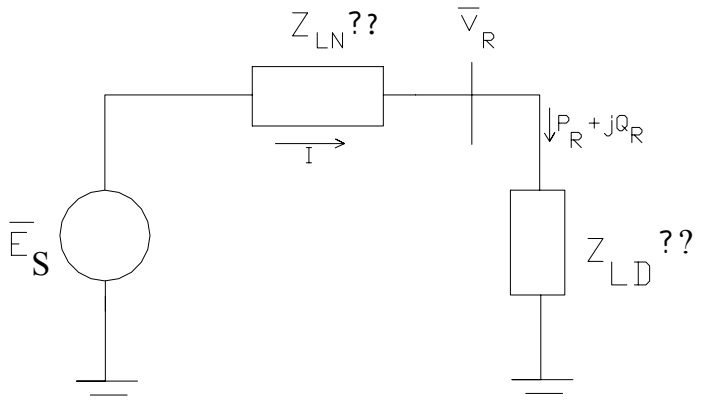
که:

$$A = 1 + \left[\frac{Z_D}{Z_L}\right]^2 + 2\left[\frac{Z_D}{Z_L}\right]\cos(\theta - \varphi)$$

دامنهٔ ولتاژ طرف گیرنده (بار) برابر است با :

$$\overline{V}_R = \overline{Z}_{LD}\overline{I} \qquad \rightarrow V_R = Z_{LD} I$$

$$= \frac{1}{\sqrt{A}} \frac{Z_D}{Z_{LN}} E_S \qquad (۵-۲)$$



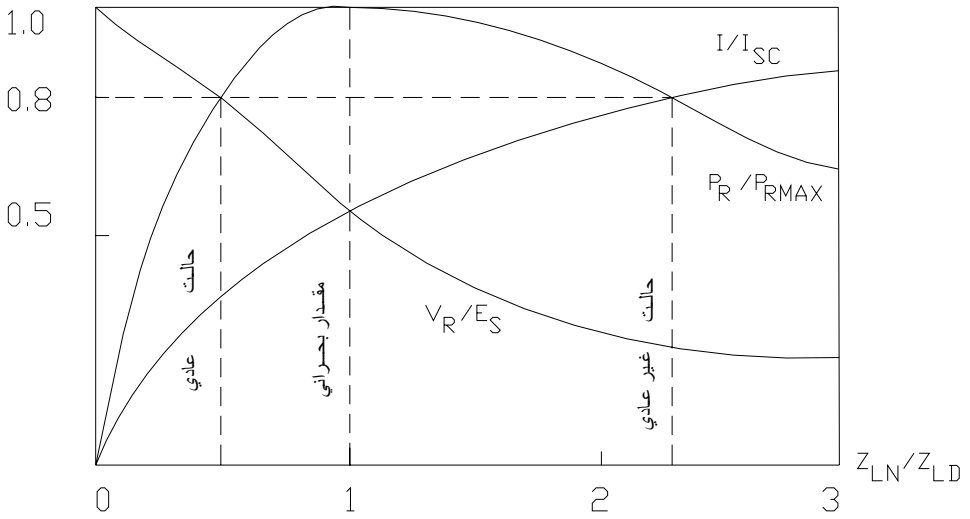
شکل ۲-۴ یک سیستم ساده شعاعی برای نمایش پدیده پایداری ولتاژ

و توان حقیقی برابر است با:

$$P_R = V_R I \cos\varphi$$

$$= \frac{Z_D}{A}\left[\frac{E_S}{Z_L}\right]^2 \cos\varphi \qquad (۶-۲)$$

نمودار I ، V_R ، P_R برحسب Z_L/Z_D برای حالتی که $\tan\theta = 0.0$ و $\cos\varphi = 0.95$ است در شکل ۲-۵ رسم شده است. برای اینکه بتوان نتایج را برای هر مقدار Z_L به کاربرد، مقادیر I ، V_R ، P_R به طور مناسبی نرمالیزه شده اند.



شکل ۲-۵ ولتاژ، جریان وتوان طرف گیرنده به صورت تابعی از تقاضای جریان بار برای سیستم شکل ۲-۴

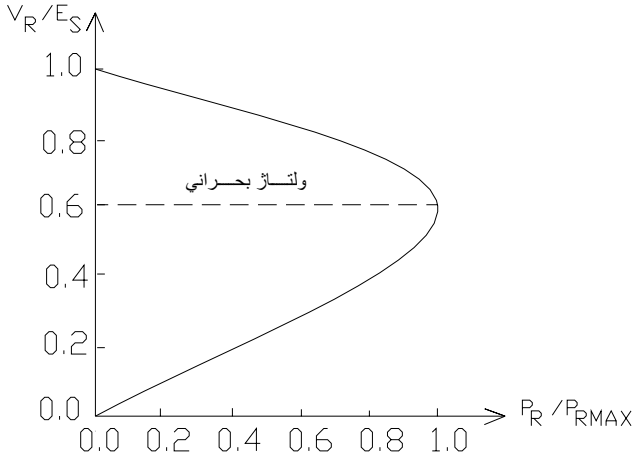
اگر با کاهش Z_D ، بار مورد تقاضا (جریان بار) را افزایش دهیم، P_R قبل از رسیدن به یک حداکثر، ابتدا سریعا و سپس کندتر افزایش می یابد و بعد از آن شروع به کاهش می کند. از این رو مقدارحداکثری برای توان حقیقی وجود دارد که می توان آن را با منبع ولتاژ ثابتی از طرق یک امپدانس، انتقال داد. توان، زمانی حداکثر است که افت ولتاژ خط، از نظر مقدار مساوی V_R ، باشد یعنی زمانی که $Z_L / Z_D = 1$ است. زمانی که Z_D رفته رفته کاهش یابد، I زیاد می شود و V کم می گردد. در ابتدا در مقادیر بزرگ Z_{LD} ، افزایش در جریان بر کاهش در ولتاژ غالب است و در نتیجه با کاهش Z_D ، P_R سریعا افزایش می یابد. زمانی که Z_D به Z_L نزدیک شد، تأثیر کاهش I فقط کمی بیشتر از تأثیر کاهش در V_R است. زمانی که Z_D کمتر از Z_L باشد، کاهش در V_R بر افزایش در I غالب می شود که در نتیجه تأثیر خالص آن، کاهش P_R است.

حالت بحرانی کاری که در آن توان، حداکثر است، حد بهره برداری قابل قبول را نشان می دهد. در تقاضاهای بیشتر بار، کنترل توان به وسیلهٔ تغییر بار ممکن است به ناپایداری بینجامد یعنی کاهش امپدان بار منجر ه کاهش توان می شود. اینکه آیا ولتاژ به طور فزاینده ای کاهش یابد و سیستم ناپایدار گردد بستگی به مشخصه های بار دارد. با باری با مشخصه استاتیکی امپدانس ثابت، سیستم در توان و ولتاژی کمتر از حدود مطلوب، پایدار می شود. از طرفی اگر مشخصهٔ بار به صورت توان ثابت باشد، سیستم با فرو پاشی ولتاژ شین بار، ناپایدار می شود. با مشخصه های دیگر بار، ولتاژ به کمک ترکیب مشخصه های خط انتقال و بار، تعیین می گردد. اگر بار به وسیلهٔ ترانسفورمرهایی با وجود تغییر دهنده های خودکار تپ زیربار (ULTC) تغذیهشود، تغییر دهنده سعی خواهد کرد که ولتاژ را بالا ببرد. این موضوع باعث می شودکه Z_D موثر از

دیدگاه سیستم کاهش یابد که خود باعث می شود V_Rباز هم کاهش یابد و سرانجام منجر به کاهش فزایندهٔ ولتاژ شود. این موضوع، شکل ساده و خالص ناپایداری ولتاژ است.

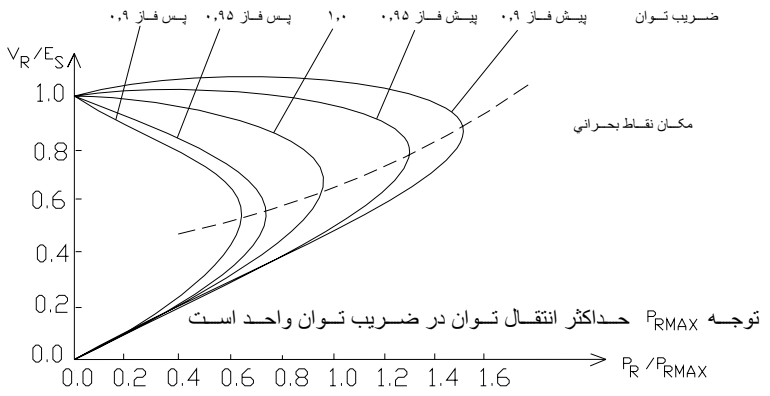
از دیدگاه پایداری ولتاژ، رابطهٔ بین P_R و V_R مورد توجه است. این رابطه در شکل ۲-۶ برای سیستم مورد مطالعه، زمانی که ضریب توان بار مساوی ۰,۹۵ پس فاز است، نشان داده شده است.

با توجه به معادلات۲-۵ و ۲-۶ ، ضریب توان تأثیر مهمی بر مشخصه توان – ولتاژ سیستم دارد. این موضوع، منطقی است زیرا افت ولتاژ در خط انتقال تابعی هم از توان حقیقی و هم از توان راکتیو انتقالی است. پایداری ولتاژ در حقیقت به روابط بین P ،Q و V بستگی دارد.



شکل ۲-۶ مشخصه های توان- ولتاژ سیستم شکل ۲-۴

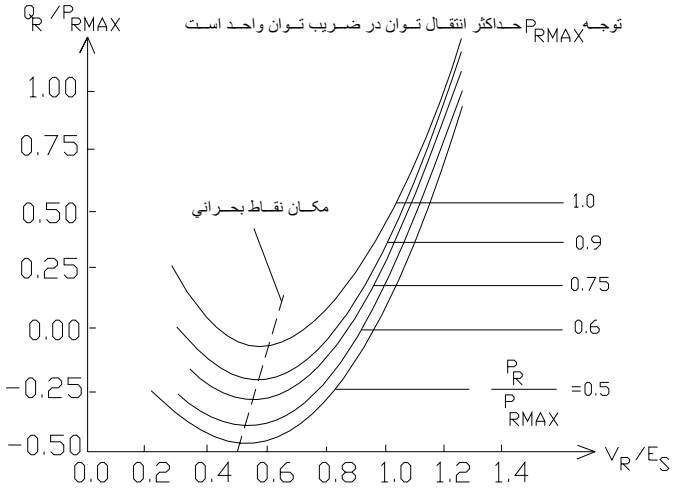
صورت های مرسوم جهت نمایش این ارتباط ها در شکل های ۲-۷ و ۲-۸ نشان داده شده است. شکل ۲-۷ منحنی های V_R-P_R را برای مقادیر مختلف ضریب توان در سیستم قدرت شکل ۲-۴ نشان می دهد. مکان هندسی نقاط بحرانی به صورت نقطه چین در شکل نشان داده شده است. معمولا تنها نقاط کاری بالای نقاط بحرانی، شرایط کاری قابل قبول را نشان می دهند. کاهش ناگهانی در ضریب توان (افزایش Q_R) می تواند سیستم را از حالت کاری پایدار به یک حالت کاری غیر قابل قبول و احتمالا ناپایدار (در محدودهٔ پایین منحنی ها) سوق دهد.



شکل ۲-۷ مشخصه های V_R-P_R مربوط به سیستم شکل ۲-۴ با ضریبهای مختلف توان بار

تأثیر مخصه های توان راکتیو تجهیزات و وسایلی که در طرف گیرنده قرار دارند (بار و تجهیات جبرانگر) بیشتر در شکل ۲-۸ نمایان است. این شکل، مجموعه ای از منحنی ها برای سیستم قدرت ۲-۴ است که هر منحنی رابطهٔ بین V_R و Q_R را برای یک P_R ثابت نشان می دهد. سیستم در محدوده ای که مشتق dQ_R/dV_R مثبت است، پایدار است. حد پایداری ولتاژ (نقطهٔ بحرانی) زمانی فرا می رسد که مشتق، صفر باشد. از این رو بخشی از منحنی ها که در طرف راست نقطهٔ حداقل قرار دارد، نماینگر محدودهٔ عملکرد پایدار و بخش طرف چپ نمایانگر محدودهٔ ناپایدار است. عملکرد پایدار در محدوده ای که dQ_R/dV_R منفی است، فقط زمانی قابل کسب است که یک جبرانگر قابل تنظیم توان راکتیو با محدودهٔ کافی کنترلی با بهرهٔ Q/V بالا و با پلاریته عکس حالت عادی، در دسترس باشد.

شرح فوق در خصوص پدیدهٔ پایداری ولتاژ، ابتدایی است و هدف، کمک به طبقه بندی و درک جنبه های متفاوت پایداری سیستم قدرت است. بررسی، محدود به یک سیستم شعاعی شد که تصویری ساده و در عین حال گویا از مسألهٔ پایداری ولتاژ را نشان دهد. در یک سیستم عملی پیچیدهٔ قدرت، عوامل زیادی به فرایند فروپاشی ولتاژ سستم در اثر ناپایداری ولتاژ، کمک می کنند؛ از آن جمله، می توان از قوت سیستم انتقال، سطوح توانی انتقالی، مشخصه های بارها، حدود توانایی توان راکتیو ژنراتورها و مشخصه های تجهیزات جبران گر توان راکتیو نام برد. در بعضی حالات، مسأله با عملکرد ناهماهنگ سیستم های گوناگون حفاظتی و کنترل، ترکیب می شود.



شکل ۲-۸ مشخصه های V_R-Q_R مربوط به سیستم شکل ۲-۴ با نسبتهای مختلف P_R/P_{RMAX}

به منظور بررسی، مناسب است که پایداری ولتاژ را به دو طبقهٔ ذیل تقسیم نمود:

الف) پایداری اغتشاش بزرگ ولتاژ، مربوط به توانایی سیستم در کنترل ولتاژ به دنبال وقوع اغتشاش ها بزرگ از جمله خطاهای سیستم، از دست دادن تولید یا پیشامدهای خطوط است. این توانایی به وسیلهٔ مشخصه های بار سیستم و تأثیر متقابل سیستم های کنترلی و حفاظت پیوسته و گسسته مشخص می شود. تعیین پایداری اغتشاش بزرگ، مستلزم آن است که عملکرد غیر خطی دینماکی سیستم در محدودهٔ زمانی کافی که تأثیر متقابل تجهیزاتی از قبیل تغییر دهنده های تپ زیر بار (ULTC) و محدود کننده های جریان تحریک ژنراتور مشخص می شود، تعیین گردد. زمان مطالعه ممکن است از چند ثانیه تا چندین دقیقه طول بکشد. از این رو شبیه سازی دینامیکی بلند مدت برای بررسی مسأله، ضروری است. معیاری جهت پایداری اغتشاش بزرگ ولتاژ آن است که به دنبال بروز اغتشاش و بعد از عمل کنترل کننده های سیستم، ولتاژ تمام شین ها به سطوح ماندگار قابل قبول برسند.

ب) پایداری اغتشاش کوچک ولتاژ، مربوط به توانایی سیستم در کنترل ولتاژ به دنبال وقوع اغتشاش های کوچک، مثلا تغییرات کوچک در بار سیستم، است. این نوع پایداری به کمک مشخصه های بار، کنترل کننده های پیوسته و کنترل کننده های گسسته در یک لحظهٔ زمانی مشخص، تعیین می گردد. این مفهوم، مشخص می کند که در هر زمان سیستم چگونه در مقابل اغتشاش های کوچک،عکس العمل نشان می دهد.

فرایند های اصلی که به پایداری اغتشاش کوچک ولتاژ کمک می کند اساسا دارای طبیعت حالت ماندگار هستند. از این رو می توان به طور موثر از بررسی استاتیکی برای تعیین حاشیهٔ پایداری، عوامل موثر بر پایداری و مطالعهٔ تأثیر محدودهٔ ئسیعی از وضعیت های سیستم و تعداد زیادی سناریو که به دنبال پیشامدها و اغتشاشات رخ می دهد، استفاده کرد.

معیاری جهت پایداری اغتشاش کوچک ولتاژ آن است که در یک حالت کاری مشخص، دامنهٔ ولتاژ هر شین سیستم، زمانی که توان راکتیو تزریقی به آن شین افزایش می یابد، زیاد شود.سیستم، از نظر ولتاژ، ناپایدار است اگر حداقل در یک شین سیستم، دامنهٔ ولتاژ (V)، زمانی که توان راکتیو تزریقی (Q) به آن افزایش یابد، کم شود. به عبارت دیگر، سیستم از نظر ولتاژ،پایدار است اگر حساسیت V-Q برای هر شین، مثبت و ناپایدار است اگر حساسیت V-Q حداقل برای یک شین، منفی باشد.

ناپایداری ولتاژ همیشه به شکل خالص خود بروز نمی کند. اغلب، ناپایداری ولتاژ و زاویه با یکدیگر تداخل می کنند. ناپایداری از یک نوع ممکن است به ناپایداری از نوع دیگر منجر شود و تفکیک، واضح و روشن نباشد. با وجود این، تفکیک مهم است زیرا به دنبال درک و تعیین عوامل موثر بر مساله است که می توان روش های مناسب بهره برداری و طراحی را برگزید. شرح مفصل تر پایداری ولتاژ شامل روش های مطالعه و جلوگیری از فرو پاشی ولتاژ در فصل چهاردهم آمده است. بررسی جامع و عمیق مسأله در کتاب پایداری ولتاژ سیستم قدرت که قلم تیلور تألیف شده، بیان گردیده است.

۲-۱-۳ پایداری میان مدت و بلند مدت

واژه های پایداری بلند مدت و میان مدت در فرهنگ پایداری سیستم های قدرت نسبتا جدید هستند. این واژه ها به دنبال نیاز به بررسی عکس العمل دینامیکی سیستم قدرت در حالی که سیستم، دستخوش آشفتگی های شدید می شود، مطرح شده اند. آشفتگی های شدید در سیستم منجر به تغییرات بزرگی در ولتاژ، فرکانس و توان های انتقالی می شود و فرایندها، کنترل کننده ها و سیستم های حفاظتی کُند را که در مطالعات سنتی پایداری گذرا، مدل نمی شوند به عکس العمل وا می دارد. مشخصه های زمانی ای فرایند ها و تجهیزات، که در اثر تغییرات بزرگ فرکانس و ولتاژ تحریک می شوند و از محدودهٔ چند ثانیه (در خصوص تجهیزاتی از قبیل کنترل کننده ها و سیستم های حفاظتی ژنراتور)تا چند دقیقه (در خصوص تجهیزاتی از قبیل سیستم های تأمین انرژی چرخاننده ها و تنظیم کننده های بار – ولتاژ) متغییر است.

در پایداری بلند مدت فرض می شود که نوسان های توان سنکرون کنندهٔ بین ماشین های سنکرون، میرا شده است و در نتیجه فرکانس یکنواختی در کل سیستم برقرار است. در اینجا تأکید بر پدیده های کُندتر و بلند مدت تر است که همراه با آشفتگی های شدید سیستم ودر نتیجه عدم تطابق زیاد و طولانی بین تولید و مصرف توان های حقیقی و راکتیو است. پدیده ها شامل عکس العمل دینامیکی دیگ های بخار واحد های حرارتی، عکس العمل دینامیکی آبگذر و کانال آب واحدهای آبی، کنترل خودکار تولید، کنترل کننده ها و سیستم های حفاظتی نیروگاه ها و سیستم انتقال، اشباع در ترانسفورمر وتأثیرات فرکانس غیر اسمی بر بار و شبکه است.

عکس العمل میان مدت نمایشگر انتقال بین عکس العمل های کوتاه مدت و بلند مدت است. در مطالعات پایداری میان مدت، تأکید بر نوسان های توان سنکرون کننده بین ماشین های سنکرون و از جمله تأثیر بعضی از پدیده های کُندتر و احتمالا تغییرات شدید ولتاژ یا فرکانس است. از نظر زمانی، بازه های نوعی به صورت زیر است:

- کوتاه مدت یا گذرا : صفر تا ۱۰ ثانیه
- میان مدت : ۱۰ ثانیه تا چند دقیقه
- بلند مدت : چندین دقیقه تا چندین ده دقیقه

باید خاطر نشان کرد که تمایز بین پایداری میان مدت و بلند مدت عمدتا بر اساس پدیده های مورد بررسی و مدلسازی مورد استفاده سیستم بخصوص با توجه به نوسان های زودگذر و بین ماشینی و نه با توجه به دورهٔ زمانی مورد نظر، صورت می پذیرد. به طور کلی مسائل پایداری بلند مدت و کوتاه مدت مربوط به نقص در عکس العمل تجهیزات، هماهنگی ضعیف بین سیستم های کنترلی و حفاظتی یا کمبود ذخیرهٔ توان های حقیقی و راکتیو اتفاق می افتد.

پایداری بلند مدت معمولا مربوط به عکس العمل سیستم در مقابل اغتشاش های بزرگی استکه از محدودهٔ معیار های طراحی معمولی سیستم خارج است. این موضوع ممکن است به وقفه های متوالی و پارگی سیستم به چندین زیر سیستم منجر شود که در هر زیر سیستم، ژنراتورها در حالت سنکرونیزه باقی بمانند. مفهوم پایداری در این حالت آن است که " آیا هر زیر سیستم به حالت قابل قبول تعادلی با حداقل بار زدایی می رسد یا خیر" . این موضوع از عکس العملی کلی زیر سیستم با توجه به فرکانس متوسط آن و نه با توجه به حرکت نسبی بین ماشین های سنکرون، تعیین می شود. در بدین وضع، ممکن است عکس العمل تجهیزات حفاظتی سیستم و واحدها وضعیت را باز هم بدتر کند و فروپاشی سیستم یا بخشی از آن رخ دهد.

کاربردهای دیگر بررسی پایداری بلند مدت و کوتاه مدت، در خصوص بررسی دینامیکی پایداری ولتاژ است که نیازمند بهشبیه سازی تأثیر تغییر دهنده های تپ ترانسفورمرها، حفاظت فوق تحریک ژنراتورها، حدود منابع توان راکتیو و بارهای ترموستاتی است. در این حالت، کمتر متحمل است که نوسان های بین ماشین های سنکرون، مهم باشد. با وجود این، باید دقت کردکه از بعضی از عکس العمل های دینامیکی سریع چشم پوشی کرد.

در خصوص بررسی پایداری بلند مدت و میان مدت تجربه م مطالعه به صورت محدود انجام گرفته است. همچنان که بر تجربه ها افزوده گردد و روش های بهبود یافته در خصوص شبیه سازی عکس العمل های دینامیکی کُند و سریع مطرح شود، تمایز بین پایداری بلند مدت اهمیت کمتری پیدا می کند.

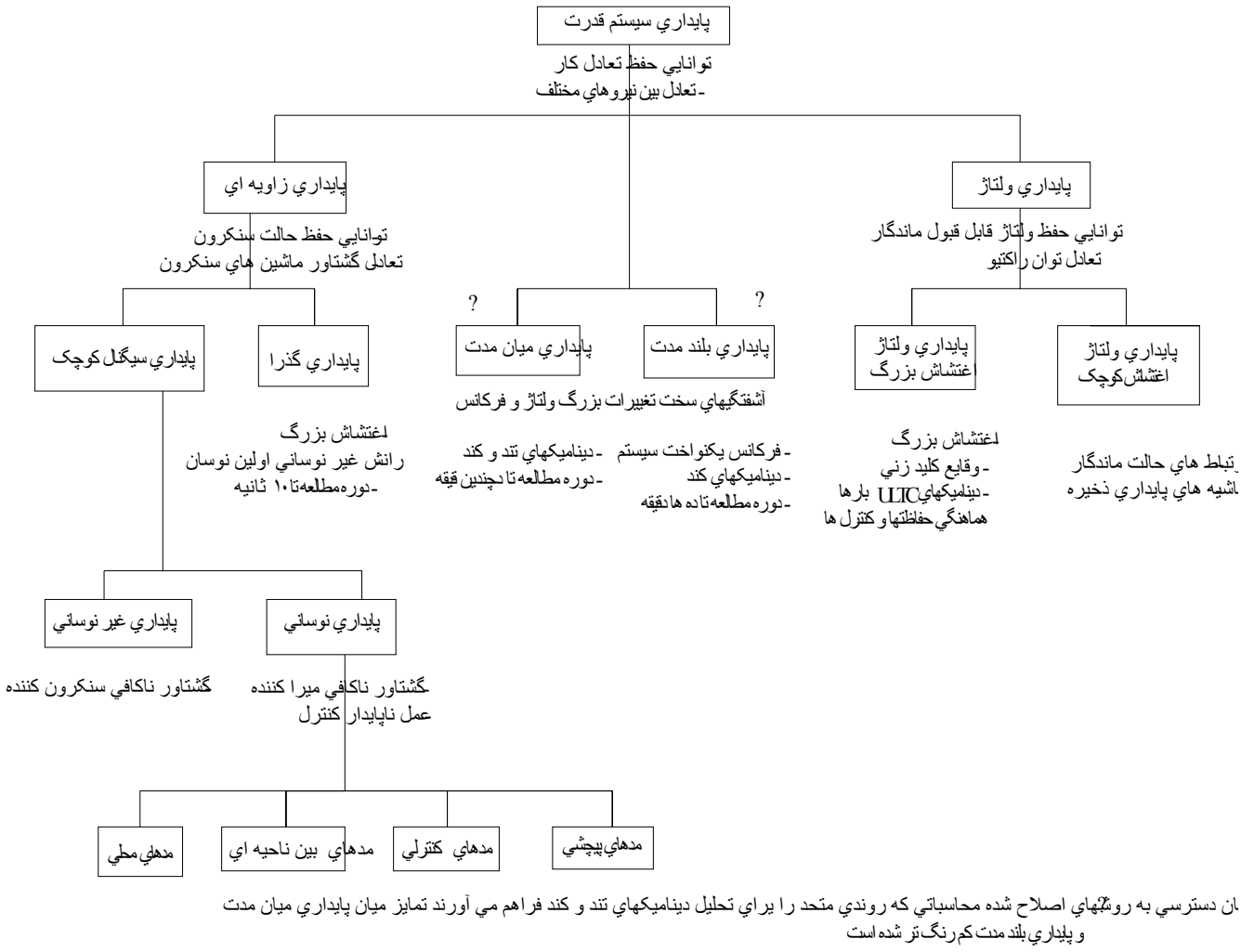
۲-۲ طبقه بندی پایداری

پایداری سیستم قدرت یک مسألهٔ منفرد است اما عملی نیست که آن را بدین صورت مطالعه کرد. همچنان که در بخش قبل مطرح گردید، ناپایداری یک سیستم قدرت می تواند شکل های مختلفی داشته باشد و از عوامل گوناگونی تأثیر پذیرد. با طبقه بندی مناسب پایداری، می توانبررسی مسائل مربوطه، تشخیص عوامل اصلی سهیم در ناپایداری و ایجاد روش های بهبود عملکرد پایدار سیستم را تا حد زیادی تسهیل بخشید. این طبقه بندی بر اساس نکات زیر صورت می پذیرد:

- طبیعت فیزیکی ناپایداری حاصل؛

- اندازهٔ اغتشاش موجود؛
- تجهیزات، فرایندها و محدودهٔ زمانی که برای تعیین پایداری لازم است مورد توجه قرار گیرند؛
- مناسب ترین روش محاسبه و پیش بینی پایداری.

شکل ۲-۹ شکل کلی مسألهٔ پایداری سیستم قدرت را به تصویر کشیده است که در آن طبقات و زیر طبقه ها بر اساس آنچه که در بخش قبلی بیان گردید، مشخص شده اند. از بعد عملی، طبقه بندی بر اساس نکات متنوعی انجام گرفته که مرزبندی مشخص را بین طبقات و تعیین تعاریفی را که دقیق و در عین حال از دید عملی مفید باشند، مشکل می نماید. به عنوان مثال، همیشه نوعی هم پوشانی بین پایداری میان مدت، بلند مدت وپایداری ولتاژ وجود دارد. با مدل سازی مناسب بارها، تغییر دهنده زیر بار تپ ترانسفورمرها و حدود توان راکتیو ژنراتورها، شبیه سازی پایداری میان مدت و بلند مدت، مناسب بررسی دینامیکی پایداری ولتاژ نیز خواهد بود. به طور مشابه، هم پوشانی بین پایداری گذرا، میان مدت و بلند مدتوجود دارد، بدین صورت که که روش های محاسباتی مشابه برای پیش بینی عکس العمل غیر خطی زمانی سیستم در مقابل اغتشاش های بزرگ استفاده می کنند. اگر چه این سه طبقه، مسألهٔ پایداری را از جنبه های مختلف مورد توجه قرار می هند، از دیدگاه محاسباتی و شبیه سازی، هر یک تعمیمی از دیگری است و مرز بندی مشخص، مشکل است



شكل ۲-۹ طبقه بندی پایداری سیستم قدرت

هر چند که طبقه بندی پایداری سیستم قدرت، وسیلهٔ موثر و مناسبی در برخورد با پیچیدگی های موجود در مسأله است، اما باید همواره پایداری کلی سیستم را مد نظر داشت. حل مسألهٔ پایداری یک طبقه نباید منجر به تأثیر منفی بر پایداری طبقهٔ دیگر شود. این نکته، اساسی است که باید تمام جنبه های پدیدهٔ پایداری را مورد توجه قرار داد و هر جنبه را از بیش از یک دیدگاه بررسی کرد. لازمهٔ این امر آن است که انواع روش های محاسباتی گوناگون ایجاد گردد و از آنها به صورت منطقی استفاده شود. در این صورت است که تا حدی، هم پوشانی در پدیدهٔ مورد بررسی، مطلوب است.

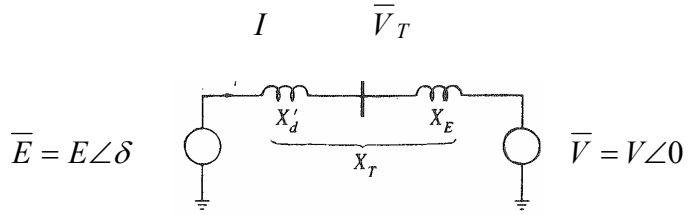
ادامه فصل هفتم

پایداری و کنترل سیستم های قدرت

Power System Stability & Control

پایداری سیگنال کوچک سیستم مدرن یک ماشینه متصل به شین بینهایت

برای ژنراتور سیستم وبا صرفنظر از کلیه مقاومتها نمایش سیستم بصورت زیر خواهد بود. نیروی محرکه $\overline{E}$ متصل به راکتانس X_d بوده و اندازه آن قبل از وقوع اغتشاش ثابت فرض می شود. δزاویه ولتاژ $\overline{E}$ می باشد که نسبت به ولتاژ $\overline{V}$ پیش فاز می باشد.



در اینصورت با وقوع نوسان در روتور مقدارδ تغییر می یابد. با در نظر گرفتن $\overline{V}$ به عنوان فازور مرجع داریم:

$$\overline{I} = = \frac{E\angle\delta - V\angle 0}{jX_T}$$

$$X_T = X_d + X_E$$

توان مختلط متصل به X_d به صورت زیر داده می شود:

$$\overline{S} = \text{P+jQ} = \overline{E}\ \ \overline{I^*}$$

$$E\angle\delta\left(\frac{E\angle\delta - V\angle 0}{-jX_T}\right) = \frac{EV\sin\delta}{X_T} + j\frac{E(E - V\cos\delta)}{X_T}$$

با در نظر نگرفتن مقاومت استاتور, توان فاصله هوایی P_e با توان پایانه P برابر می باشد و در مبنای واحد گشتاور فاصله هوایی با توان فاصله هوایی برابر است. از این رو داریم:

$$T_e = P = \frac{EV}{X_T}\sin\delta$$

خطی سازی حول نقطه کار نشان داده شده با δ_o =δ نتیجه می دهد:

$$\Delta T_e = \frac{\partial T_e}{\partial \delta}\Delta\delta = \frac{EV}{X_T}\cos\delta_o(\Delta\delta)$$

معادله نوسان با در نظر گرفتن مولفه گشتاور میرا کننده:

$$\Delta w_r = w_r - w_o$$

$$dw_r = \frac{\Delta w_r}{w_c} = \frac{1}{w_o}\frac{ds}{dt}$$

$$\frac{ds}{dt} = w_o dw_r$$

$$\frac{2H}{w_o}\frac{d^2\delta}{dt^2} = T_m - T_e - K_D dw_r$$

معادلات حرکت در مبنای واحد عبارت است از:

$$\frac{d\Delta w_r}{dt} = P\Delta w_r = \frac{1}{2H}(T_m - T_e - k_D\Delta w_r)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = p\delta = w_o\Delta w_r$$

که در آن Δw_r انحراف سرعت در مبنای واحد , δ زاویه روتور بر حسب رادیان الکتریکی , w_o سرعت مبنای زاویه روتور بر حسب رادیان بر ثانیه , و P عملکرد دیفرانسیلی d/dt با زمان t به ثانیه است. با خطی سازی معادله $\frac{d\Delta w_r}{dt}$ وجایگزینی ΔT_e داده شده با معادله مربوطه به دست می آوریم:

گشتاور در فاصله هوائی

$$T_e = P = \frac{EV}{X_T}\sin\delta \rightarrow \Delta T_e = \frac{\partial T_e}{\partial\delta}\Delta\delta = \frac{EV}{X_T}\cos\delta_o(\Delta\delta) = K_S\Delta\delta$$

$$p\Delta w_r = \frac{1}{2H}[\Delta T_m - K_S\Delta\delta - K_D\Delta w_r]$$

که در آن K_S ضریب گشتاور سنکرون کننده داده سده با معادله زیر است:

$$K_S = [\frac{EV}{X_T}]\cos\delta_o$$

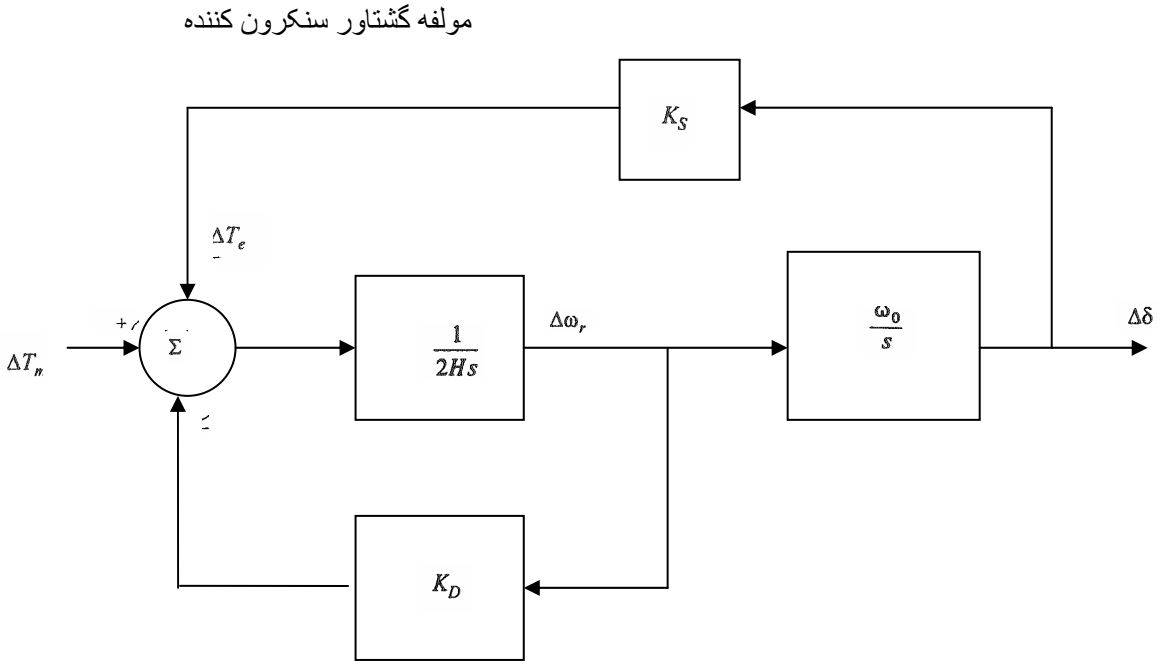
از خطی سازی معادله $\frac{d\delta}{dt}$ داریم:

$$p\Delta\delta = w_o \Delta w_r$$

با نوشتن معادلات $p\Delta w_r$ و $p\Delta\delta$ بصورت بردار-ماتریسی,به دست می آوریم:

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix}\Delta w_r \\ \Delta\delta\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\frac{-K_D}{2H} & \frac{-K_S}{2H} \\ w_o & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta w_r \\ \Delta\delta\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}\frac{1}{2H} \\ 0\end{pmatrix}\Delta T_m$$

که بصورت $x = Ax + bu$ است و مشاهده می شود که عناصر ماتریس A به پارامترهای سیستم K_D, H, X_T و شرایط اولیه نشان داده شده با مقادیر E و δ_o بستگی دارند. می توان از نمایش نمودار بلوکی شکل ۱۲-۵ برای توصیف عملکرد سیگنال کوچک استفاده کرد.



نمودار بلوکی سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت با مدل کلاسیک ژنراتور

K_S = ضریب گشتاور سنکرون کننده بر حسب مبنای واحد گشتاور بر رادیان

K_D = ضریب گشتاور میرا کننده بر حسب گشتاور مبنای واحد انحراف سرعت مبنای واحد

H = ثابت لختی بر حسب $MW.S/MVA$

Δw_r = انحراف سرعت بر حسب $(w_r - w_o)/w_o$

$\Delta\delta$ = انحراف زاویه روتور بر حسب رادیان الکتریکی

S= عملگر لاپلاس

w_o = سرعت ناشی بر حسب $2\pi f_o = elec.rad/s$

از نمودار بلوکی شکل فوق داریم:

$$\Delta\delta = \left[\frac{1}{2HS}(-K_S\Delta\delta - K_D\Delta w_r + \Delta T_m)\right] = \frac{w_o}{S}\left[\frac{1}{2HS}(-K_S\Delta\delta - K_D S\frac{\Delta\delta}{w_o} + \Delta T_m)\right]$$

از مرتب کردن این رابطه نتیجه می شود:

$$S^2(\Delta\delta) + \frac{K_D}{2H}S(\Delta\delta) + \frac{K_S}{2H}w_o(\Delta\delta) = \frac{w_0}{2H}\Delta T_m$$

بنابراین معادله مشخصه بصورت زیر داده می شود:

$$S^2 + \frac{K_D}{2H}S + \frac{K_S w_0}{2H} = 0$$

که بصورت کلی زیر است:

$$S^2 + \xi w_n S + w_n^2 = 0$$

بنابر این فرکانس طبیعی میرا نشده عبارت است از:

$$w_n = \sqrt{K_S\frac{w_0}{2H}} rad/s$$

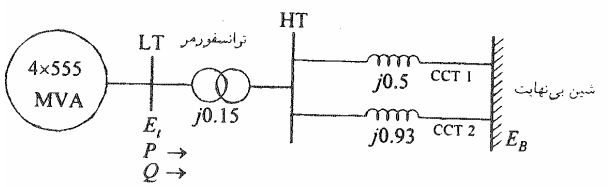
و نسبت میرایی برابر است با:

$$\xi = \frac{1}{2}\frac{K_D}{2Hw_n}$$

$$= \frac{1}{2}\frac{K_D}{\sqrt{K_S 2Hw_0}}$$

با افزایش ضریب گشتاور سنکرون کننده K_S, فرکانس طبیعی افزایش یافته و نسبت میرای کاهش می یابد. از سویی افزایش ضریب گشتاور میرا کننده K_D نسبت میرایی را افزایش داده, حال آنکه افزایش در ثابت لختی هر دو w_n, ξ را کاهش می دهد.

مثال- شکل زیر سیستمی قابل اعمال به نیروگاهی حرارتی (تشکیل شده از چهار واحد555MVA , 24KV , 60Hz)را نشان می دهد.



راکتانسهای شبکه نشان داده شده در شکل , در مبنای واحد بر پایه مقادیر2220MVA , 24KV هستند (به طرف فشارضعیف ترانسفورمر بالا برنده ارجاع شده است)و فرض شده مقاومتها قابل چشم پوشی باشند. هدف از این مثال تحلیل مشخصه های پایداری سیگنال کوچک سیستم حول نقطه کارحالت ماندگار به دنبال از دست دادن مدار ۲ می باشد. وضعیت پیش از خطای سیستم در مبنای واحد رب پایه مقادیر 2220MVA , 24KV به صورت زیر است:

$$P=0.9 \quad Q=0.3 \qquad \overline{V_T} = 1.0\angle 36 \quad \overline{V} = 0.995\angle 0$$

ژنراتورها به صورت یک ژنراتورمعادل منفرد توصیف شده در مبنای واحد بر پایه مقادیر 2220MVA , 24KV مدل می شوند:

$$X_a = 0.3 \qquad H = 3.5 \quad MWS/MVA$$

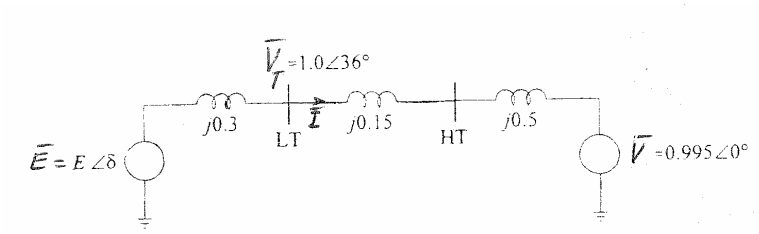
الف) معادلات حالت خطی شده سیستم را بنویسید. مقادیر ویژه فرکانس میرا شده نوسان (برحسبHz), نسبت میرایی و فرکانس طبیعی غیر میرا را برای هر یک از مقادیر ضریب میرایی (بر حسب سرعت مبنای واحد بر گشتاور مبنای واحد) تعیین کنید.

$$(i)K_D = 0 (ii)K_D = -10/0 (iii)K_D = 10/0$$

برای حالتی که $K_D = 10/0$باشد بردارهای ویژه چپ و راست و ماتریس مشارکت را پیدا کنید. اگر در $t = 0$, $\Delta\delta = 5$و $\Delta w = 0$ باشد, پاسخ زمانی را تعیین کنید

حل

الف) شکل زیر مدل مدار نشان دهنده نقطه کار حالت-ماندگار را پس از بروز خطا با کلیه پارامترهای توصیف شده در مبنای واحدبر پایه2220MVA نشان می دهد:



با در نظر گرفتن $\overline{V_T}$ بعنوان فازورمرجع جریان استاتورژنراتوربه صورت زیر داده می شود :

$$\text{مرجع اول} \quad \overline{V_T} = 1\angle 36 \qquad T = \frac{(P+jQ)^*}{\overline{V_T^*}} = \frac{0.9 - j0.3}{1/0}$$

$$\text{مرجع دوم} \quad \overline{V_T} = 1\angle 0 \qquad = 0.9 - j0.3 \quad pu$$

ولتاژمتصل به راکتانس گذرا عبارت است از :

$$\overline{E} = \overline{V_T} + jX_d\overline{I}$$

$$= 1/0 + j0/3(0/9 - j0/3)$$

$$= 1/09 + j0/27 = 1/123\angle 13/92 \qquad pu$$

زاویه پیش فاز بودن $\overline{E}$ نسبت به V عبارت است از :

$$\delta_0 = 13/92 + 36 = 49/92$$

مجموع راکتانس سیستم خواهد شد:

$$X_T = 0/3 + 0/15 + 0/5 = 0/95 \qquad pu$$

ضریب گشتاور سنکرون کننده متناظر از معادله ۱۲-۷۶ برابر است با :

$$K_S = \frac{EV}{X_T}\cos\delta_0$$

$$= \frac{1/123 \times 0/995}{0/95}\cos 49/92$$

$$= 0/757 \qquad pu$$ گشتاور بر رادیان

بنابراین معادلات حالت خطی شده عبارت است از :

$$\begin{pmatrix}\Delta w_r \\ \Delta\delta\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\frac{-K_D}{2H} & \frac{-K_S}{2H} \\ w_0 & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta w_r \\ \Delta\delta\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}\frac{1}{2H} \\ 0\end{pmatrix}\Delta T_m$$

$$= \begin{pmatrix}-0/143K_D & -0/108 \\ 377/0 & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta w_r \\ \Delta\delta\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}0/143 \\ 0\end{pmatrix}\Delta T_m$$

مقادیر ویژه ماتریس به صورت زیر داده می شوند:

$$\begin{vmatrix}-0/143K_D - \lambda & -0/108 \\ 377/0 & -\lambda\end{vmatrix} = 0$$

یا: $$\lambda^2 + 0/143K_D\lambda + 40/79 = 0$$

وبا مقایسه با شکل استاندارد ذیل:

$$\lambda^2 + 2\zeta w_n\lambda + w_n^2 = 0$$

خواهیم داشت:

$$w_n = \sqrt{40/79} = 6/387 rad/s = 1/0165 Hz$$

$$\zeta = 0/143K_D/(2\times 6/387) = 0/0112K_D$$

پس مقادیر ویژه عبارتند از:

$$\lambda_1, \lambda_2 = \pm w_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

فرکانس میرا شده خواهد شد:

$$w_d = w_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

در زیر نتایج خواسته شده برای مقادیر مختلف K_D آورده شده است:

K_D	۰	۱۰	-۱۰
مقادیر ویژه ①	۰+j۶/۳۹	-۰/۷۱۴+j۶/۳۵	۰/۷۱۴+j۶/۳۶
فرکانس میرا w_r	۱/۰۱۶۵Hz	۱/۰۱۰۱Hz	۱/۰۱۰۱Hz
نسبت میرایی ②	۰	۰/۱۱۲	-۰/۱۱۲
فرکانس طبیعی غیر میرا w_n	۱/۰۱۶۵Hz	۱/۰۱۶۵Hz	۱/۰۱۶۵Hz

ب) بردارهای ویژه راست به صورت زیر داده می شود:

$$(A-\lambda I)\phi = 0$$

برای سیستم داده شده با $K_D = 10$ معادله بالا چنین می شود:

$$\begin{pmatrix} -1/43-\lambda_1 & -0/108 \\ 377/0 & -\lambda_2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \end{pmatrix} = 0$$

برای $\lambda = -0/714 + j6/35$ معادلات متناظر عبارت است از:

$$(0/714 + j6/35)\phi_{11} + 0/108\phi_{21} = 0$$

$$377/0\phi_{11} + (0/714 - j6/35)\phi_{21} = 0$$

معادلات بالا سمتقل خطی نیستند. همانطور که در مثال ۱۲-۱ بحث شد باید یکی از عناصر بردار ویژه متناظر با یک مقدار ویژه را به دلخواه انتخاب کنید. بنابراین, با فرض:

$$\phi_{21} = 1/0$$

داریم:

$$\phi_{11} = -0/0019 + j0/0168$$

بطور مشابهی بردار ویژه متناظر با $\lambda_2 = -0/714 - j6/35$ عبارت است از:

$$\phi_{12} = -0/0019 - j0/0168 \qquad \phi_{22} = 1/0$$

لذا ماتریس مدال بردار ویژه راست عبارت است از:

$$\phi = \begin{pmatrix} -0/0019 + j0/0168 & -0/0019 - j0/0168 \\ 1/0 & 1/0 \end{pmatrix}$$

بردارهای ویژه چپ نرمالیزه شده به صورت $\psi_1\phi_1 = 1/0$ عبارت است از:

$$\psi = \phi^{-1} = \frac{adj(\phi)}{|\phi|}$$

$$= \frac{\begin{pmatrix} 1/0 & -1/0 \\ 0/0019 + j0/0168 & -0/0019 + j0/0168 \end{pmatrix}^T}{(-0/0019 + j0/0168 + 0/0019 + j0/0168)}$$

$$= \begin{pmatrix} -j29/76 & 0/5 - j0/056 \\ j29/76 & 0/5 + j0/056 \end{pmatrix}$$

ماتریس مشارکت برابر می شود با:

$$P = \begin{pmatrix} \phi_{11}\psi_{11} & \phi_{12}\psi_{12} \\ \phi_{21}\psi_{21} & \phi_{22}\psi_{22} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 0/5 + j0/056 & 0/5 - j0/056 \\ 0/5 - j0/056 & 0/5 + j0/056 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0/503\angle 6/4 & 0/503\angle -6/4 \\ 0/503\angle -6/4 & 0/503\angle 6/4 \end{pmatrix}$$

وپاسخ زمانی به صورت زیر داده می شود:

$$\begin{pmatrix} \Delta w_r(t) \\ \Delta\delta(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 e^{\lambda_1 t} \\ c_2 e^{\lambda_2 t} \end{pmatrix}$$

که با فرض (رادیان) $\Delta\delta = 5 = 0/0873$ و $\Delta w_r = 0$ در $t = 0$ داریم:

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \psi_{11} & \psi_{12} \\ \psi_{21} & \psi_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta w_r(0) \\ \Delta\delta(0) \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} -j29/76 & 0/5 - j0/056 \\ j29/76 & 0/5 - j0/056 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0/0873 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 0/0436 - j0/0049 \\ 0/0436 + j0/0049 \end{pmatrix}$$

پاسخ زمانی انحراف سرعت عبارت است از:

$$\Delta w_r(t) = \phi_{11}c_1 e^{\lambda_1 t} + \phi_{12}c_2 e^{\lambda_2 t}$$

$$= (-0/0019 + j0/0168)(0/0436 - j0/0049)e^{(-0/714 + j6/35)t} +$$

$$(-0/0019 - j0/0168)(0/0436 + j0/0049)e^{(-0/714 - j6/35)t}$$

$$= -0/0015e^{-0/714t}\sin(6/35t)$$

به طور مشابه پاسخ زمانی انحراف زاویه روتور عبارت است از:

$$\Delta\delta(t) = 0/088e^{-0/714t}\cos(6/35t - 0/112)$$

پس با سیستمی مرتبه دوم با یک مد نوسانی پاسخ با فرکانس میراشده ۶/۳۵ رادیان بر ثانیه با 1/0101 هرتز سرو کارداریم. نوسانها با ثابت زمانی $\frac{1}{0/714}$ ثانیه از بین خواهند رفت (که متناظر با نسبت میرایی ζ 0/112 است). از آنجا که این یک مد زاویه روتور است Δw_r و $\Delta\delta$ به طور مساوی در آن مشارکت دارند.

ادامه فصل هفتم

پایداری و کنترل سیستم های قدرت

Power System Stability & Control

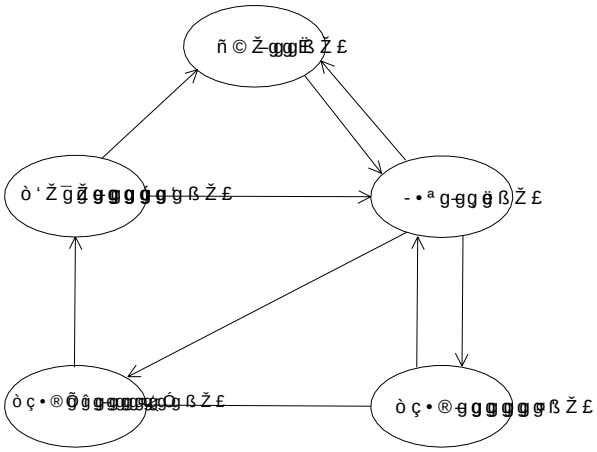
پایداری میان مدت و بلند مدت

پایداری میان مدت و پایداری بلند مدت، مربوط به پاسخ سیستم های قدرت به آشفتگی های شدید، است. آشفتگی های شدید، اغتشاش هایی هستند که به انحراف های فرکانس، ولتاژ و توان های انتقالی منجر می شوند که این انحراف ها چنان بزرگ یا ماندنی هستند که اقدامات فرایند های گند، سیستم های حفاظتی و کنترل هایی را که در مطالعات مرسوم پایداری گذرا مدل نشده اند، بر میانگیزانند.

این فصل ماهیت پاسخ سیستم را، هنگامی که تحت آشفتگی های شدید قرار گرفته باشد، نشان می دهد و نیاز به تمایز بین پایداری میان مدت و بلند مدت را بررسی می کند. همچنین در این فصل ملاحظات مدلسازی و روش های تحلیلی شبیه سازی پاسخ دینامیکی بلند مدت توصیف و مثال هایی توضیحی و رهنمودهایی برای افزایش توانمندی سیستم های قدرت در مواجهه با این آشفتگی ها بیان شده است.

۱-۱۶ ماهیت پاسخ سیستم به اغتشاش های شدید

در مطالعهٔ ماهیت پاسخ سیستم به اغتشاش های بزرگ، به تصویر در آوردن وضعیت کاری سیستم بر حسب پنج حالت نشان داده شده در شکل ۱-۱۶ سودمند است. توصیفی از این حالت ها و راه های انتقال از یک حالت به حالت دیگر، در فصل اول (بخش ۱-۳)، آورده شده است. این فصل بر وقایع و شرایط سیستمی تمرکز دارد که با حالت فوق بحرانی مرتبط است.



• - ª × â ˜ ´ ô ³ ä Ë Ž - ë ß Ž ł £ Þ 0 ·

é © ¡ • ® © - û ú Þ 0 - © 6 ³ Ž ¶ 6 • ó î 4 ê ß ª • ë 6 ã å Ž [ç ú] â ˜ ´ ô ³ ì × 5 ï Ž µ ë Ž ¸ ˜ ï 6 ³ - ® ‘
å Ž ¸ ì © î 6 ç • ® Õ ¤ í ‘ Ó ß Ž æ £ • ª ¸ ë ß Ž ¯ £ Ý Ž Ø ® ç • è – ã ³ • æ 0 ä ê ã 6 Ì ó Ž å × í Ê / – ³ • é ª ·
© ® 0 à ê ã Ž Ë ú ó ê à ô ë í å © ® / ä Ë ‘ ì 6 Ì ô ï Ã ª Ž ã 6 · Ž ¸ ˜ ª ï ç • • ï ã ® 3 ¯ Ž › ï © . Ž ¯ £ • é ª é © • ©
Ž ê ì Ÿ • - î Œ ê / ª ç î 6 ã 5 ¯ • ª é ç • ł - 6 £ • ® 5 Ã ê ç ê 3 • - ª × å - ª ß ã Ž ê ã ˜ ´ ô ª ³ · Ž 6 ‘ ç Ž 5 ç ® ô ç
6 ß Ž ã 5 ˜ Ž £ ë • ª ã Œ Ž ô ô 1 5 –) ® ª · Ž ê ‘ ˜ · æ © Œ ä Ä ä ô ® ˜ ® ¸ É ô î × ý Ë Ž ä Ž 6 ß Ž ã 5 ˜ Ž £ ë • ª ã Ž ¸ ô !
5 - Ž ñ ´ © ® ô ß ê Ž ã ã Ž ® Œ è ª ç • 6 î ã – ª × 5 Ž ê ã ˜ ´ ô © - • î ã - ® (œ ª ô • è • ô ú Þ ¼ 6 Ó £ • ® Ã
- • 5 ® ô 3 5 ì è ® Ý ‘ ® ˜ ì è 6 / ˜ Ç Ž 5 Œ ê ã ˜ ´ ô ³ è è / ä ¤ ª – è 6 ã ¥ - â ë Ž ê / • - 6 ß Ž ã 5 ˜ Ž £ ë • ª ã ¯ Ž ¸ ô !
. ª è ê ã Þ ä Ë 0 ’ 5 Ž - ë ä ´ ® ó Ž ª ¸ ˜ ï Ž ¸ ˜ ç •
Þ ã Ž î / Ã ê ì ê ˜ ³ ¡ ã ô œ ê ‘ â ˜ ´ ô ³ 6 ˜ ä ê × © î 6 ã š Ë Ž ™ © • 5 ï © Ž ® Ë ô • ï ô / ® 6 - ë Ž æ 3 0 ô ß
® È - ç © © - ¯ • ê ã – ³ • 5 ª ã Ž û ¡ õ ä ì Œ ã 3 ¯ Ž › ï © . Ž ë Ë © ô 0 • ¸ – 6 – 0 ó ® ˜ - Œ Ž ³ Ž è ó) í é ª • ª Ÿ
5 © Ž ‘ ® © × ® © Ž Ž Ø Ì Š ç ê • ó ª å ê ª) • - Ž š ê ç ¯ ã ª ç ® – ‘ ³ • ® — ª ô £ • • ® Ì Ã ô ’ - Ã Ž ô - Ì Œ ê ª ê ˜ Ó ® 3
- • ® ž ¸ – Ó ¤ – Ž ì ® 3 ¯ ž Ë © • Ž 6 · Ž ™ ç © • 6 £ – Ž • ® ã à ô å í © Ð / ä Ë ‘ Ž ó ¡ ô å Ž Ó ã Œ ê – ¨ ³
é ª ¶ ê ÷ ô Ì ¿ 6 Ã - © – ³ • æ 0 . ä © ã î 6 ã Ý ® ˜ Þ è ‘ / Ž × ô 5 ï • é ® ô 5 ç Ž ê Ô × ì ê ˜ Ë Ø ³ ¸ å © • ©
¯ • Þ ’ × • ª Ø ã ú û Ù Ž — ù ¯) • + Ž ˜ - ß © ï ô í ç (° — ® ü ë Ž — ¯) ² ç Ž / ® © Ó Ì ô ³ • í • ® ô ô Ð —
ô ê ç ª è / ª ê ô Ì × Ý ã è ê ê ç ç • ® Õ ¤ í ‘ Ó ß Ž æ £ ç • 6 ì ã â ˜ ´ ô ê — æ ® ó ª ó © ì Ÿ é (µ Ž ¸ ˜ ï •
¦ ³ Ž ì ! 6 ˜ Ç Ž Ž Ô â Œ ˜ ´ ô ê 6 ß ® Ý æ ã Ë è – / ì Ã ê . ‘ – ³ • â ˜ ´ ô Ž â È Ë 5 Ž - ë ä ´ å © – ® © ¯ å •
6 4 è ë Ž ‘ ä ê Ì × æ ã ô © - • 6 ï ß ® ‘ © ª è ë 6 © – • ® © × ì ß Ž Ì – ¤ ì — ô Ì ¿ á é 6 • Ã - © • - â ˜ ´ ô ³
â ˜ ´ Ô ® ³ ¸ ê) ® ë Ž ç ì È è ê ã ª ó Ž ‘ è 6 © © ì 6 ã ª ó ª ì ¸ Ý — ® ï ê / Ç Ž 5 Œ ê ã ˜ ´ æ Ô ‘ ô Ì ¿
. © ® é / © Ž 5 Ô • ® • Ý Ç ® • Þ è ä Ë ì Þ ã Œ · / Ž ! í ¯ ® Ó