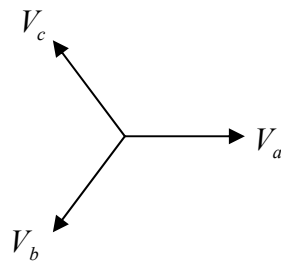


ادامه فصل دوم

مولفه های متقارن

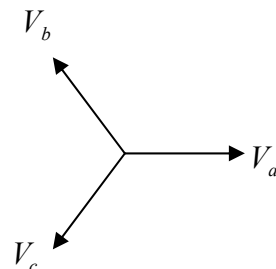
(Symmetrical Components)

abc (positive sequence)



$$\begin{aligned}\bar{V}_a &= \bar{V}_a \\ V_b &= a^2 V_a \\ V_c &= a V_a\end{aligned}$$

acb (negative sequence)



$$\begin{aligned}V_a &= V_a \\ V_b &= a V_a \\ V_c &= a^2 V_a\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}a &= e^{j120} & a &= e^{j240} = e^{-j120} = a^* \\ (a^2)^* &= a & a^3 &= 1 & 1 + a + a^2 &= 0\end{aligned}$$

مثال- مولفه های هموپولر و معکوس و مستقیم سر ولتاژ در حالت رژیم دائم زیر بدست آورید.

$$\begin{aligned}\bar{V}_1 &= 0 & V_1(t) &= 0 \\ \bar{V}_2 &= 220 \angle 0^\circ & \rightarrow & V_2(t) = 220\sqrt{2} \sin 314t \\ \bar{V}_3 &= 0 & & V_3(t) = 0\end{aligned}$$

مولفه های فاز ۱ عبارتند از:

$$\bar{a} = e^{j120^\circ} = 1 \angle 120^\circ$$

$$\bar{a}\bar{V}_1 = \bar{a}^2\bar{V}_1 = 0$$

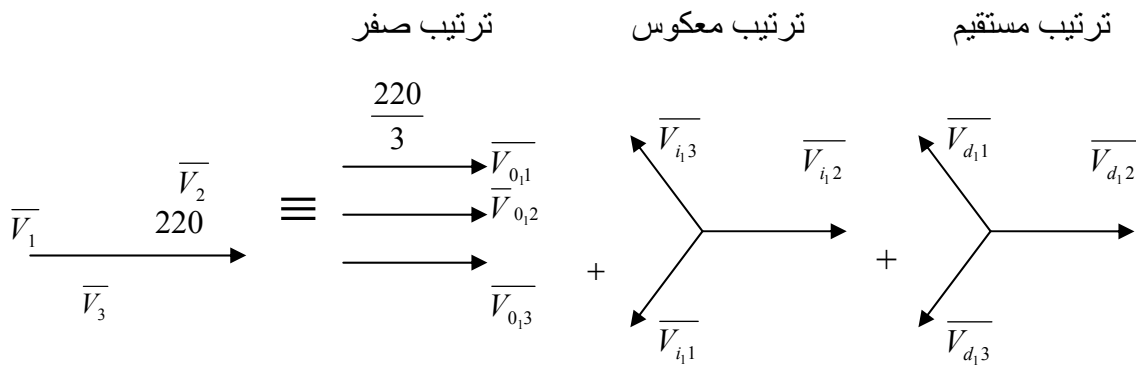
$$\bar{a}\bar{V}_2 = 220 \angle 120^\circ \quad \bar{a}^2\bar{V}_2 = 220 \angle 240^\circ$$

$$\bar{a}\bar{V}_3 = \bar{a}^2\bar{V}_3 = 0$$

$$\bar{V}_{0,1} = \frac{1}{3}(\bar{V}_1 + \bar{V}_2 + \bar{V}_3) = \frac{220}{3} \angle 0^\circ$$

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

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



مثال- در يك شبکه قدرت مولفه های جریانهایی اتصال کوتاه به طرف محل اتصال عبارتند از (فاز ۱ بعنوان فاز مبنا):

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

مطلوب است جریانهایی هر يك از فازهای سیستم سه فاز $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3$ ، اگر فاز ۱ بعنوان بردار مبنا باشد.

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

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

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

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

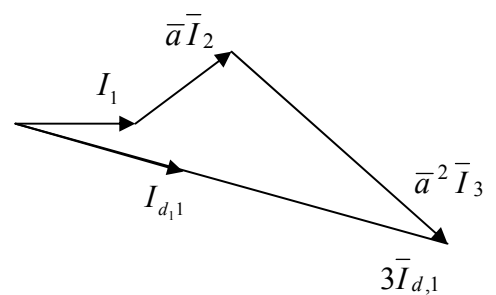
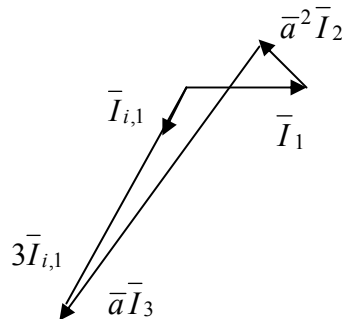
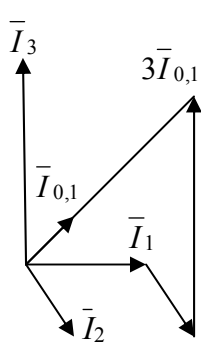
$$\bar{I}_3 = 1 + j\bar{a}^2 \text{ pu} = 1 + 1 \angle 330^\circ \text{ pu} = \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right) - j\frac{1}{2} \text{ pu}$$

از روش هندسی می توان مولفه ها را نیز براحتی بدست آورد

$$\bar{I}_0 = \frac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3)$$

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

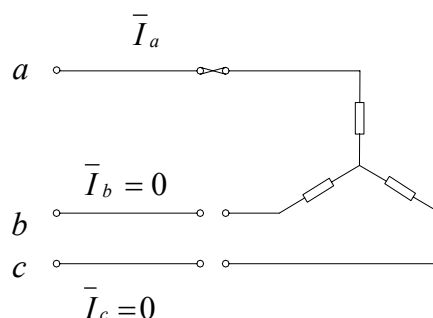
$$\bar{I}_d = \frac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{a} \bar{I}_2 + \bar{a}^2 \bar{I}_3)$$



و یا از روی مولفه ها نیز می شود از طریق هندسی به خود بردارهای اصلی رسید:

اساساً ژنراتورها تشکیل شبکه سه فاز متعادل را خواهند داد، پس خود شبکه اساساً يك شبکه قدرت كاملاً متقارن سه فاز است. امپدانس هر فاز در خطوط هوایی و ترانس ها و موتورها و در بارها اساساً تقسیم و توزیع متعادلی است. ذاتاً يك شبکه قدرت يك شبکه متقارن سه فاز است. نا متعادلی وقتی پیش می آید که در شبکه يك اتصال کوتاه نا متقارن وصل شود، مثلاً يك فاز به زمین وصل شود و پتانسیل آن با پتانسیل زمین یکی می شود. يك لحظه قبل از وقوع عیب مولفه های ولتاژ و جریان (مولفه مستقیم وجود دارد و مولفه های معکوس و هموپولر صفر هستند)

تمرین- بار سه فاز متقارنی با اتصال ستاره و جریان ۳۰ آمپر از طریق يك خط ۴ سیمه سه فاز متعادل تغذیه می شود. اگر فیوزهای دو عدد از فازها (b,c) قطع شوند، با استفاده از روش مولفه های متقارن، جریان خط ها را قبل و بعد از حالت نامتقارنی محاسبه نمایید.



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:

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

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

$$\bar{I}_{0,a} = \bar{I}_{0,b} = \bar{I}_{0,c} = 10 \angle 0^\circ \text{ A}$$

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

$$\bar{I}_{i,b} = \bar{a} \bar{I}_{i,a} = (1 \angle 120^\circ)(10 \angle 0^\circ) = 10 \angle 120^\circ \text{ A}$$

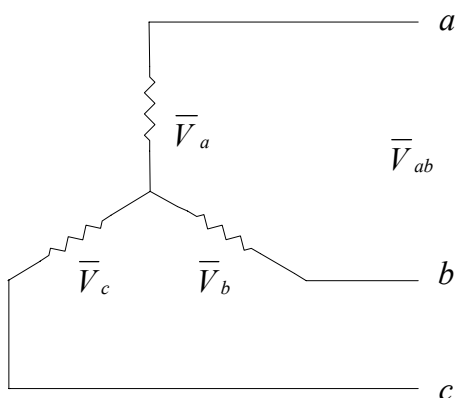
$$\bar{I}_{i,c} = \bar{a}^2 \bar{I}_{i,a} = (1 \angle 240^\circ)(10 \angle 0^\circ) = 10 \angle 240^\circ \text{ A}$$

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

$$\bar{I}_{d,b} = \bar{a}^2 \bar{I}_{d,a} = (1 \angle 240^\circ)(10 \angle 0^\circ) = 10 \angle 240^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{d,c} = \bar{a} \bar{I}_{d,a} = (1 \angle 120^\circ)(10 \angle 0^\circ) = 10 \angle 120^\circ \text{ A}$$

تمرین- در يك سیستم سه فاز با اتصال ستاره فرض کنید ولتاژ فازها برابر \bar{V}_a ، \bar{V}_b ، \bar{V}_c بوده و همان سیستم با اتصال مثلث دارای ولتاژهای خط \bar{V}_{ab} ، \bar{V}_{bc} و \bar{V}_{ca} باشد. در اینصورت ارتباط میان مقادیر مولفه های متقارن ولتاژ را در این دو اتصال پیدا کنید.



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

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:

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

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

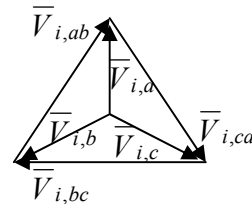
$$= \frac{1}{3}[(\bar{V}_a + \bar{a}^2 \bar{V}_b + \bar{a} \bar{V}_c) - (\bar{a} \bar{V}_a + \bar{V}_b + \bar{a}^2 \bar{V}_c)]$$

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

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

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

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



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

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

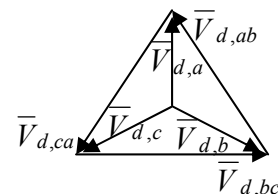
$$= \frac{1}{3}[(\bar{V}_a + \bar{a} \bar{V}_b + \bar{a}^2 \bar{V}_c) - (\bar{a}^2 \bar{V}_a + \bar{V}_b + \bar{a} \bar{V}_c)]$$

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

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

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

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

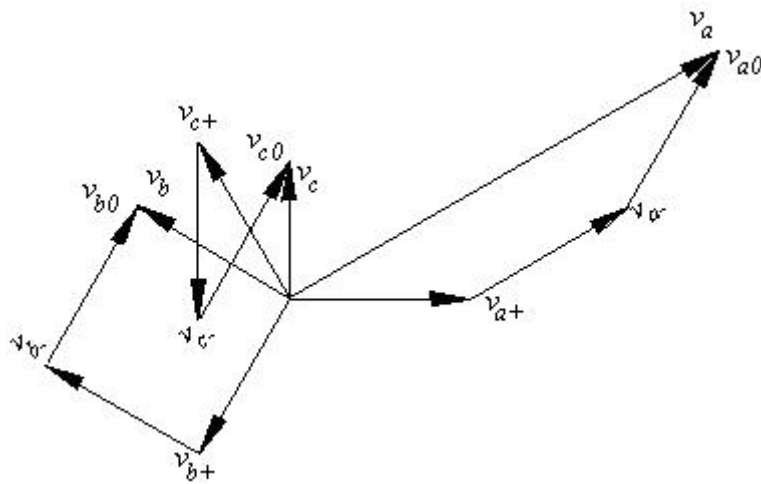
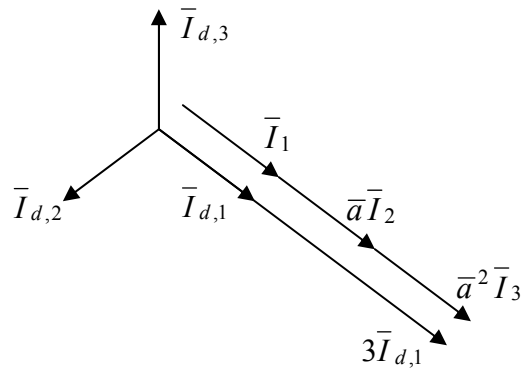
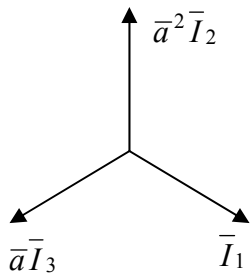
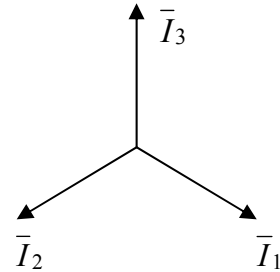


$$\bar{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad 1 - \bar{a}^2 = \frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \angle +30^\circ$$

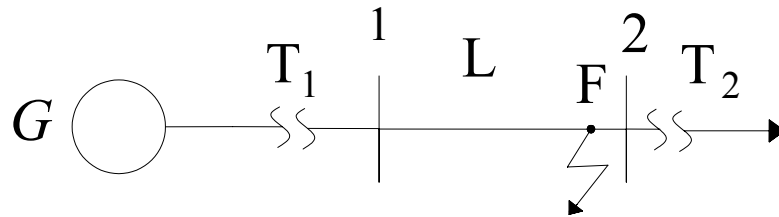
$$\bar{I}_{0,1} = \frac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3) = 0$$

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

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



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

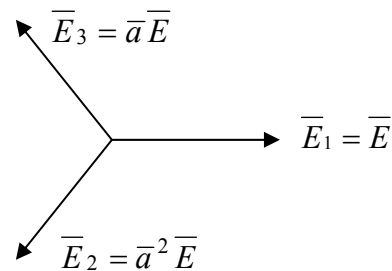


نیروهای محرك این ژنراتور يك سیستم سه فاز متقارن مستقیم است.

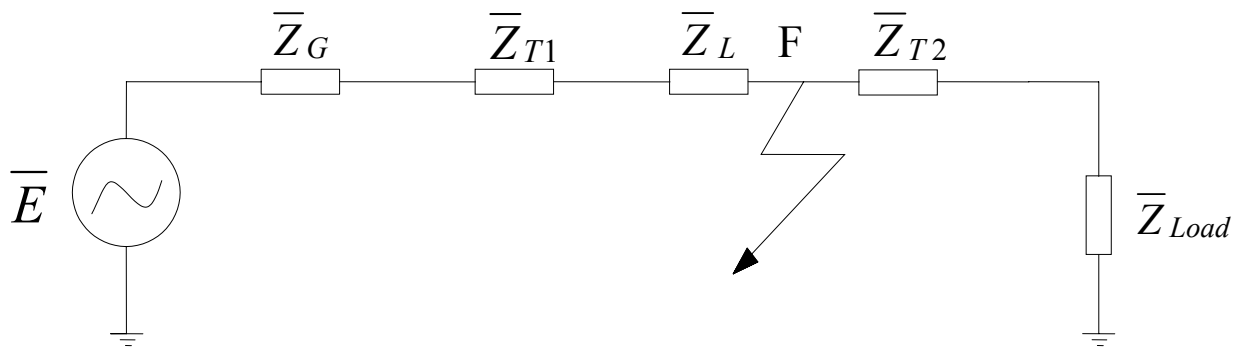
$$\bar{E}_1 = \bar{E}$$

$$\bar{E}_2 = \bar{a}^2 \bar{E}$$

$$\bar{E}_3 = \bar{a} \bar{E}$$



چون شبکه و بار متعادل و متقارن است، اگر در يك جايی از شبکه يك اتصال کوتاه پیش آید، شبکه عیب تکفاز با زمین (فاز ۱ با زمین در نقطه P) با این اتصال کوتاه با زمین معادلات شبکه به چه صورت پیش می آید. قبل از عیب دياگرام تک خطی برای حل مساله کافی است.



ولی در حالت اتصال کوتاه دیگر این دياگرام تک خطی را نمی شود رسم کرد، چون این دياگرام برای حالت سالم مدار است و ولتاژها و جریان ها متعادل و متقارن خواهد بود. بایستی هم ژنراتور و هم المانهای مدار را در سه سیستم (هموپولر، مستقیم و معكوس) نوشت و KVL را نیز نوشت.

در نقطه عیب ولتاژها و جریانهای نامتعادل داریم ولی در سر ژنراتور ولتاژها و جریانهای متعادل داریم و نا متعادلی در سر عیب و نامتعادلی در سر افت ولتاژهای خطها باعث می شود که ولتاژ در دو سر ژنراتور در همان حالت متعادل باقی بماند.

$$G \begin{cases} \bar{E}_1 = \bar{E} \\ \bar{E}_2 = \bar{a}^2 \bar{E} \\ \bar{E}_3 = \bar{a} \bar{E} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \bar{E}_0 = 0 \\ \bar{E}_i = 0 \\ \bar{E}_d = \bar{E} \end{cases} \quad \text{در حالت متعادل و نامتعادل}$$

مقادیر L و C های بدست آمده در بررسی سیستم های قدرت ۱ در حالت متعادل است چون آنها برای شرط $\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = 0$ بدست آمده بودند (در سیستم مستقیم). در سیستم های دیگر لازم نیست L و C را حساب کرد. اگر \bar{Z}_G امپدانس ژنراتور باشد در آن صورت امپدانس های ترتیب های صفر، منفی و مثبت ژنراتور به قرار زیر می باشند.

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{0,G} \\ \bar{Z}_{i,G} \\ \bar{Z}_{d,G} \end{aligned}$$

در موتورها و در سیستم دینامیک $\bar{Z}_d \neq \bar{Z}_i$ اگر جایی دو فاز با هم عوض شوند، جهت چرخش نیز عوض می شود. در ژنراتورها در سیستم استاتیکی $\bar{Z}_d = \bar{Z}_i$ می باشند.

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{0,L} \\ \bar{Z}_{i,L} \\ \bar{Z}_{d,L} \end{aligned}$$

برای خطوط هوایی

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{0,T} \\ \bar{Z}_{i,T} \\ \bar{Z}_{d,T} \end{aligned}$$

برای ترانسفورماتورها

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_{1,F} \\ \bar{V}_{2,F} \\ \bar{V}_{3,F} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \bar{V}_{0,1} \\ \bar{V}_{i,1} \\ \bar{V}_{d,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_{0,F} \\ \bar{V}_{i,F} \\ \bar{V}_{d,F} \end{bmatrix}$$

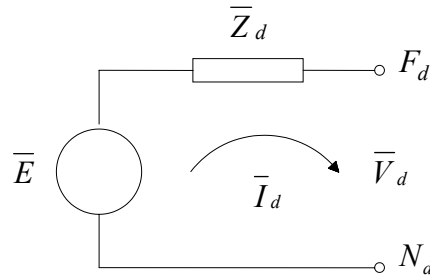
ولتاژها در محل اتصال (عیب) F

برای یکی از فازها داریم:

معادل تونن شبکه در سیستم ترتیب مستقیم (مثبت)

$$\bar{E} = \bar{Z}_d \bar{I}_d + \bar{V}_d$$

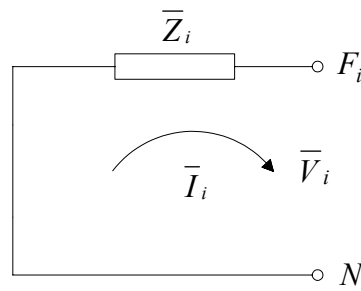
$$\bar{Z}_d = \bar{Z}_{d,G} + \bar{Z}_{d,T1} + \bar{Z}_{d,L}$$



معادل تونن شبکه در سیستم ترتیب معکوس (منفی)

$$0 = \bar{Z}_i \bar{I}_i + \bar{V}_i$$

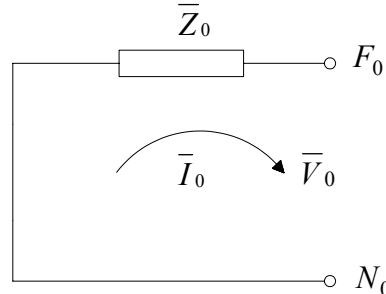
$$\bar{Z}_i = \bar{Z}_{i,G} + \bar{Z}_{i,T1} + \bar{Z}_{i,L}$$



معادل تونن شبکه در سیستم ترتیب معکوس (منفی)

$$0 = \bar{Z}_0 \bar{I}_0 + \bar{V}_0$$

$$\bar{Z}_0 = \bar{Z}_{0,G} + \bar{Z}_{0,T1} + \bar{Z}_{0,L}$$



با نمایش ماتریسی معادلات ترتیب های صفر، معکوس و مستقیم داریم:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_i \\ \bar{V}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \bar{E} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_i & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_i \\ \bar{I}_d \end{bmatrix}$$

\bar{I}_0 و \bar{I}_i نمی توانند صفر باشند چون بایستی در آن صورت \bar{V}_i و \bar{V}_0 صفر باشند. بنابراین در مواقع وقوع عیب از جمله اتصال کوتاه ها با ترکیب مدارهای معادل فوق در نقطه عیب مقادیر ولتاژها و جریان های ترتیب های مختلف و نیز مقادیر واقعی محاسبه می شوند.

اگر ژنراتور ولتاژ نامتعادل تولید کند، در شبکه قدرت \bar{E}_d و \bar{E}_i و \bar{E}_0 وجود داشته که در آن مولفه صفر و منفي مخالف صفر هستند و لذا تولید جریان در سیستم هاي معکوس و هموپولر خواهند کرد. پس اتصال کوتاه نامتقارن در محل اتصال کوتاه، تولید جریان مولفه معکوس و هموپولر خواهد کرد. برای اجزای استاتیک شبکه (ترانس-خط هوایی-بار غیر موتوري) $\bar{Z}_d = \bar{Z}_i$ است در حالیکه برای اجزای دینامیک شبکه (ترانس-خط هوایی-بار غیر موتوري) $\bar{Z}_d \neq \bar{Z}_i$ است.

بررسی شبکه ترتیب صفر در ترانسفورماتورهای سه فاز

در ترانسفورماتورهای قدرت \bar{Z}_0 بستگی به نحوه اتصالات اولیه و ثانویه دارد. اگر نحوه اتصالات اولیه Δ باشد، \bar{Z}_0 ای را نمی شود از طرف Δ ترانسفورماتور عبور داد. اگر نقطه صفر ستاره به زمین وصل نشود $I_0 = 0$ و KCL نقض می شود. در قسمت Δ نیز بایستی $I_0 = 0$ باشد. چون سه جریان همفاز که به یک گره وصل می شوند بایستی بگونه ای باشد تا KCL نقض نشود.

اگر نقطه ستاره را با یک مقاومت \bar{Z}_n زمین کنیم از این \bar{Z}_n ، $3\bar{I}_0$ عبور می کند پس در مدار معادلی که امپدانس زمین \bar{Z}_n است و جریان $3\bar{I}_0$ از آن عبور میکند، باید امپدانس $3\bar{Z}_n$ قرار داده و جریان \bar{I}_0 از آن عبور دهیم. اگر در یک ترانس ستاره / مثلث که در آن نقطه ستاره زمین نشده است خواهیم داشت

$$\bar{I}_0 = 0 \rightarrow \bar{Z}_0 = \infty$$

در صورتی که در یک ترانسفورماتور ستاره / مثلث که در آن نقطه ستاره زمین شده است خواهیم داشت

$$\bar{I}_0 \neq 0 \rightarrow \bar{Z}_0 \neq \infty$$

به عبارتی دیگر:

از دید اولیه	از دید ثانویه
ΔY (ستاره زمین شده)	مقداری مشخص $\bar{Z}_0 =$
$\bar{Z}_0 = \infty$	

برای خط هوایی و عناصر استاتیک خواهیم داشت:

$$\bar{Z}_0 = \bar{Z}_{0L} \cong 3\bar{Z}_{dl} \cong 3\bar{Z}_{il}$$

برای بار نیز \bar{Z}_0 بستگی به نحوه اتصال بار دارد. اگر بار به صورت ستاره زمین نشده باشد امپدانس هموپولر آن وجود ندارد ($\bar{Z}_0 = \infty$) ولی امپدانس توالی صفر باری که به صورت ستاره وصل شده می تواند مقداری داشته باشد.

ترانسفورماتور ستاره زمین نشده - مثلث

امپدانس طرف Δ : $\bar{Z}_{0,\Delta} = \infty$ امپدانس طرف Y بدون نقطه زمین شده: $\bar{Z}_{0,Y} = \infty$

الف- بررسی از لحاظ الکتریکی

مجموع جریان های خارج اتصال مثلث به دلیل همفاز بودن، صفر هستند. چون این سه جریان با هم همفاز هستند، پس وجود چنین جریان هایی در هر سه حلقه بخاطر عدم وجود فازها امکان پذیر نیست.

$$\bar{I}_{0,1} + \bar{I}_{0,2} + \bar{I}_{0,3} = 0 \rightarrow 3\bar{I}_{0,1} = 0 \rightarrow \bar{I}_{0,1} = \bar{I}_{0,2} = \bar{I}_{0,3} = 0$$

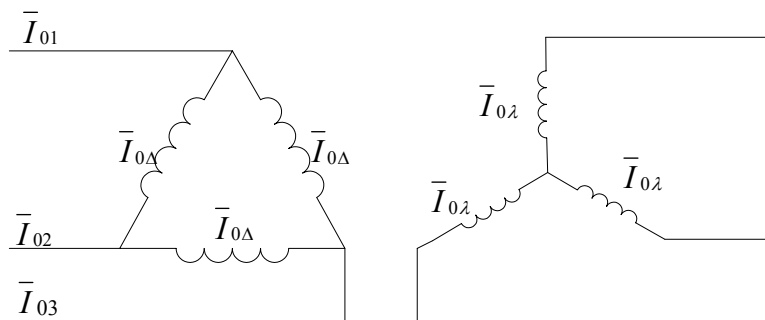
$$\bar{I}_{0,Y} = 0 \Rightarrow \bar{I}_{0,\Delta} = 0$$

پس مسیر عبور جریان وجود ندارد و امپدانس های دو طرف بی نهایت می باشند.

$$\bar{Z}_{0,Y} = \infty, \quad \bar{Z}_{0,\Delta} = \infty$$

الف- بررسی از لحاظ مغناطیسی

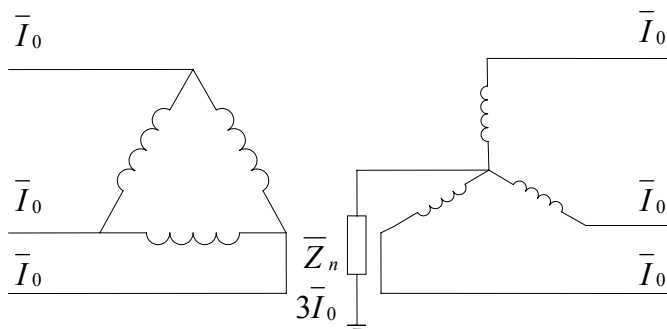
در این حالت نیز جریانی در داخل مثلث وجود ندارد



ترانسفورماتور ستاره زمین شده - مثلث

امپدانس طرف Δ : $\bar{Z}_{0,\Delta} = \infty$ امپدانس طرف Y بدون نقطه زمین شده: $\bar{Z}_{0,Y} \neq \infty$

در طرف با نقطه صفر زمین شده با امپدانس Z_n ، Z_0 وجود دارد در صورتی که در طرف مثلث این امپدانس برابر با بی نهایت است.



در حالت کلی داریم:

$$0 = \bar{Z}_0 \bar{I}_0 + \bar{V}_0$$

در صورتی که شبکه از طریق یکی از فازها به زمین متصل شود داریم:

$$0 = \bar{Z}_n(3\bar{I}_0) + \bar{Z}\bar{I}_0 + \bar{V}_0$$

$$0 = (3\bar{Z}_n + \bar{Z})\bar{I}_0 + \bar{V}_0$$

$$\bar{Z}_0 = 3\bar{Z}_n + \bar{Z} + \dots$$

به جای سه نقطه در معادله بالا امپدانس های دیگر در مدار ترتیب صفر قرار می گیرد.

از لحاظ الکتریکی در خارج اتصال Δ داریم :

$$\bar{I}_{0,1} + \bar{I}_{0,2} + \bar{I}_{0,3} = 0 \rightarrow 3\bar{I}_{0,1} = 0 \rightarrow \bar{I}_{0,1} = \bar{I}_{0,2} = \bar{I}_{0,3} = 0$$

در طرف اتصال Y به دلیل برگشت جریان عیب از نقطه خنثی Y به طرف فازهای آن $\bar{I}_{0,Y} \neq 0$ است که این کار باعث القای مغناطیسی در طرف Δ می شود.

از لحاظ مغناطیسی، در داخل Δ جریان های توالی صفر اتصال مثلث با همدیگر، هم فاز بوده و لذا صفر نمی باشند $\bar{I}_{0,\Delta,internal} \neq 0$ اما جیان خارج مثلث صفر بوده $\bar{I}_{0,\Delta,external} = 0$ و بنابراین امپدانس آن بی نهایت خواهد بود.

دیگرام شبکه ترتیب صفر در ترانسفورماتورهای سه فاز

در رسم شبکه های توالی صفر ترانسفورماتورها باید دقت بیشتری نمود زیرا شبکه های توالی صفر ترانسفورماتورها با اتصالات مختلف اولیه و ثانویه با یکدیگر تفاوت دارند. چنانچه از جریان مغناطیس کننده ترانسفورماتورها صرف نظر کنیم جریان اولیه و ثانویه با توجه به نسبت تبدیل ترانسفورماتورها بر حسب یکدیگر بدست می آیند و اگر یکی از آنها صفر باشد دیگری نیز صفر خواهد بود.

در شکل زیر انواع اتصالات ترانسفورماتورهای سه فاز و شبکه توالی صفر آنها نشان داده شده است.

پیکان های نشان داده شده نمایش وجود جریانهای توالی صفر در سیم پیچها میباشند. حال به شرح مختصر هر یک از این اتصالات می پردازیم:

الف) ترانسفورماتور Y-Y با یک اتصال زمین : اگر در یک طرف ترانسفورماتور نقطه صفر زمین نشده باشد عدم وجود جریان توالی صفر در آن طرف باعث می شود تا طرف دیگر نیز بدون جریان باشد بنابراین در شبکه توالی صفر این نوع اتصال مدار باز بین دو طرف ترانسفورماتور وجود خواهد داشت.

ب) ترانسفورماتور Y-Y با دو اتصال زمین : اگر نقاط صفر هر دو اتصال ستاره به زمین متصل باشند

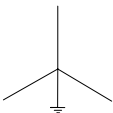
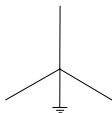
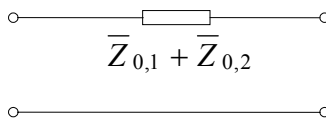

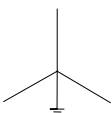
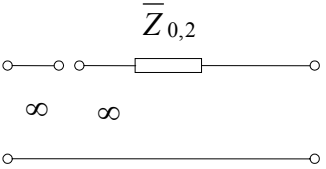
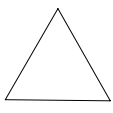
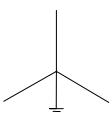
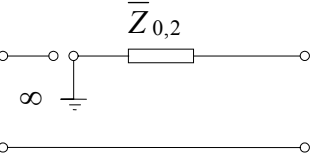
در هر دو سیم پیچ جریانهای توالی صفر وجود داشته و لذا اولیه و ثانویه ترانسفورماتور در شبکه توالی صفر از طریق امپدانس توالی صفر بیکدیگر متصل می باشند. در این حالت شبکه توالی صفر دقیقاً مشابه شبکه های مثبت و منفی ترانسفورماتور است.

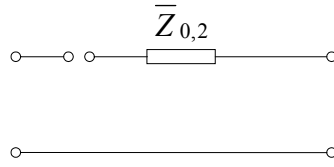
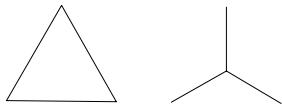
ج) ترانسفورماتور $Y-\Delta$ با اتصال زمین نقطه صفر ستاره: در این حالت چون مسیر برگشت در طرف اتصال ستاره وجود دارد جریانهای توالی صفر در هر دو سیم پیچ وجود خواهند داشت. جریانهای توالی صفر در داخل مثلث یک جریان گردش بوجود می آورند و مولفه های توالی صفر جریانهای خطی این اتصال صفر خواهند بود. بنابراین امپدانس توالی صفر ترانسفورماتور طرف ستاره را به شین مرجع متصل می کند و بین طرف مثلث و شین مرجع مدار باز خواهند ماند.

د) ترانسفورماتور $Y-\Delta$ بدون اتصال زمین: این اتصال حالت خاصی از قسمت (ج) بوده که در آن امپدانس بین نقطه صفر ستاره و زمین بجای صفر بی نهایت می باشد. در اینصورت در هیچیک از سیم پیچها جریان توالی صفر وجود نخواهد داشت.

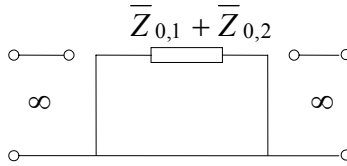
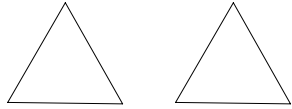
ه) ترانسفورماتور $\Delta-\Delta$: در این حالت چون مسیر برگشت برای جریانهای توالی صفر وجود ندارد جریانهای خطی ترانسفورماتور فاقد جریانهای توالی صفر بوده و فقط ممکن است داخل اتصالات مثلث جریانهای گردش توالی صفر وجود داشته باشد بنابراین شبکه توالی صفر این ترانسفورماتور در هر دو طرف دارای مدار باز خواهد بود. در یک سیستم قدرت با استفاده از شبکه توالی صفر عناصر و ترکیب آنها شبکه توالی صفر سیستم بدست می آید.

نوع اتصال

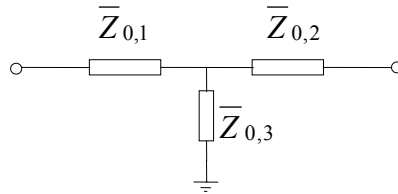
اولیه	ثانویه	نمایش فاز هموپولر (صفر)	توضیحات
			جریان ترتیب صفر می تواند آزادانه از اولیه به ثانویه انتقال یابد. $\bar{I}_0 \neq 0$
			مسیری برای عبور جریان از اولیه به ثانویه وجود ندارد. $\bar{I}_0 = 0$
			جریان مولفه صفر فقط داخل حلقه بسته مثلث و نه در خارج آن گردش خواهد کرد. $\bar{I}_{0,\Delta} = 0$, $\bar{I}_{0,Y} \neq 0$



هیچ جریان ترتیب صفر در مدار ترتیب صفر عبور نمی کند. $\bar{I}_0 = 0$

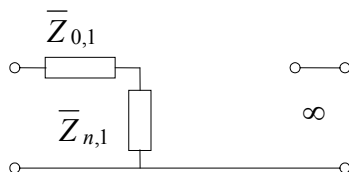
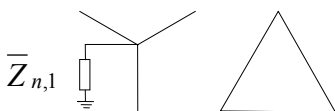
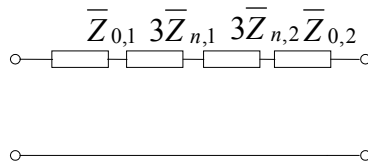
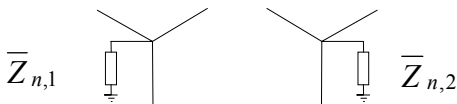
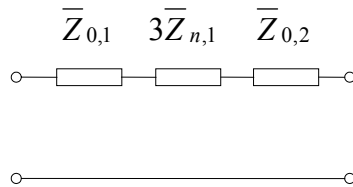
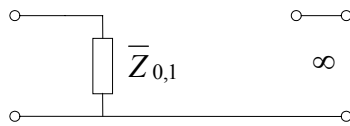
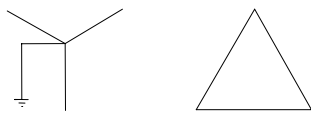
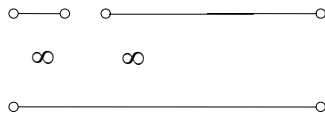
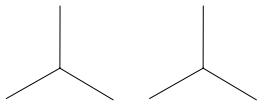


هیچ جریان ترتیب صفر عبور نمی کند. $\bar{I}_0 = 0$

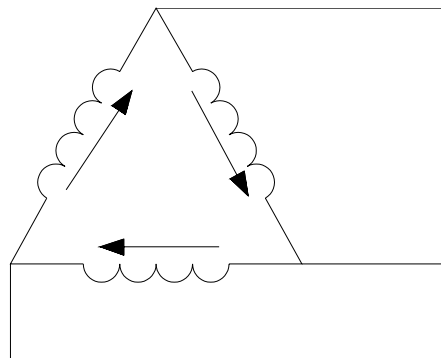
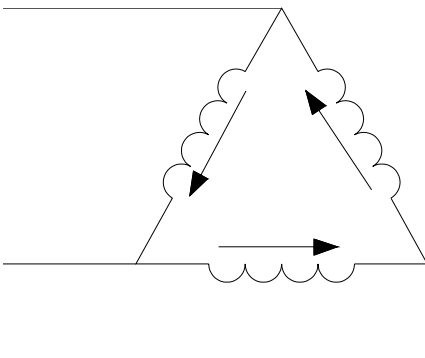
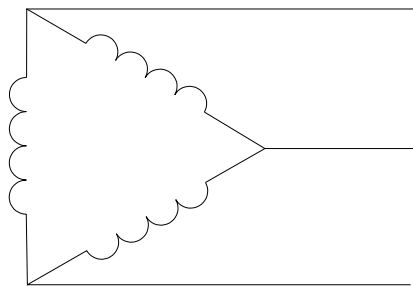
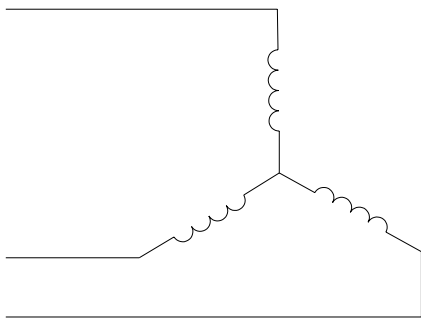
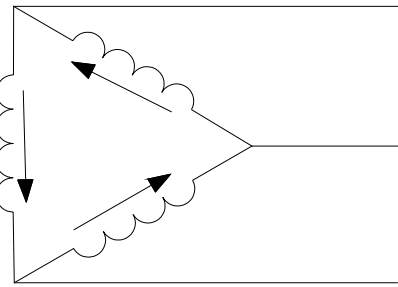
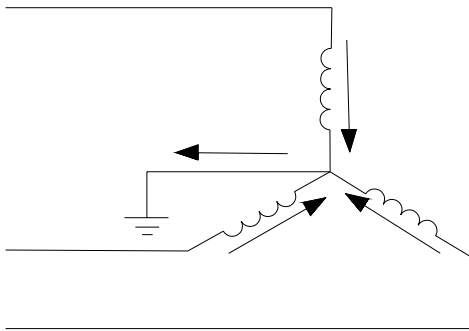
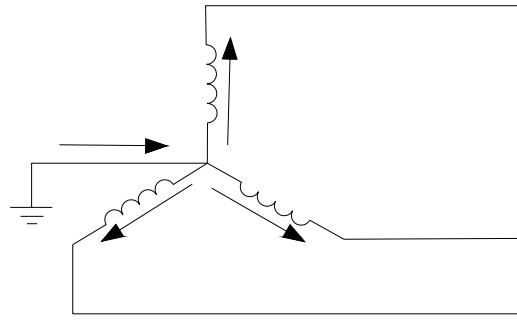
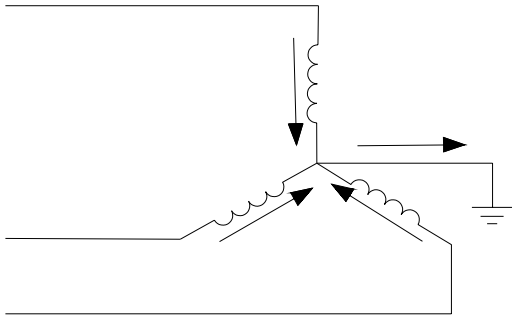
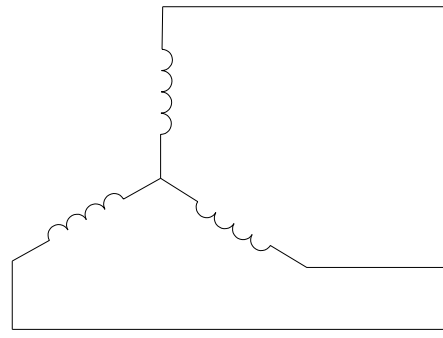
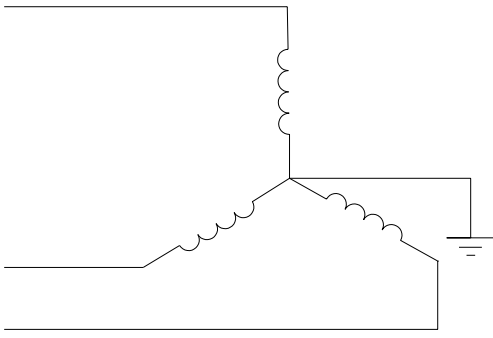


ترانسفورمر سیم پیچ ثالثیه می تواند جریان ترتیب صفر را عبور دهد. $\bar{I}_0 \neq 0$

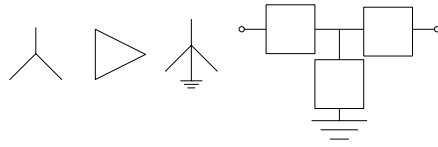
بایستی بر حسب نوع اتصال آنها را بررسی کنیم



شبکه های توالی صفر اتصال های ستاره و مثلث ترانسفورماتورها



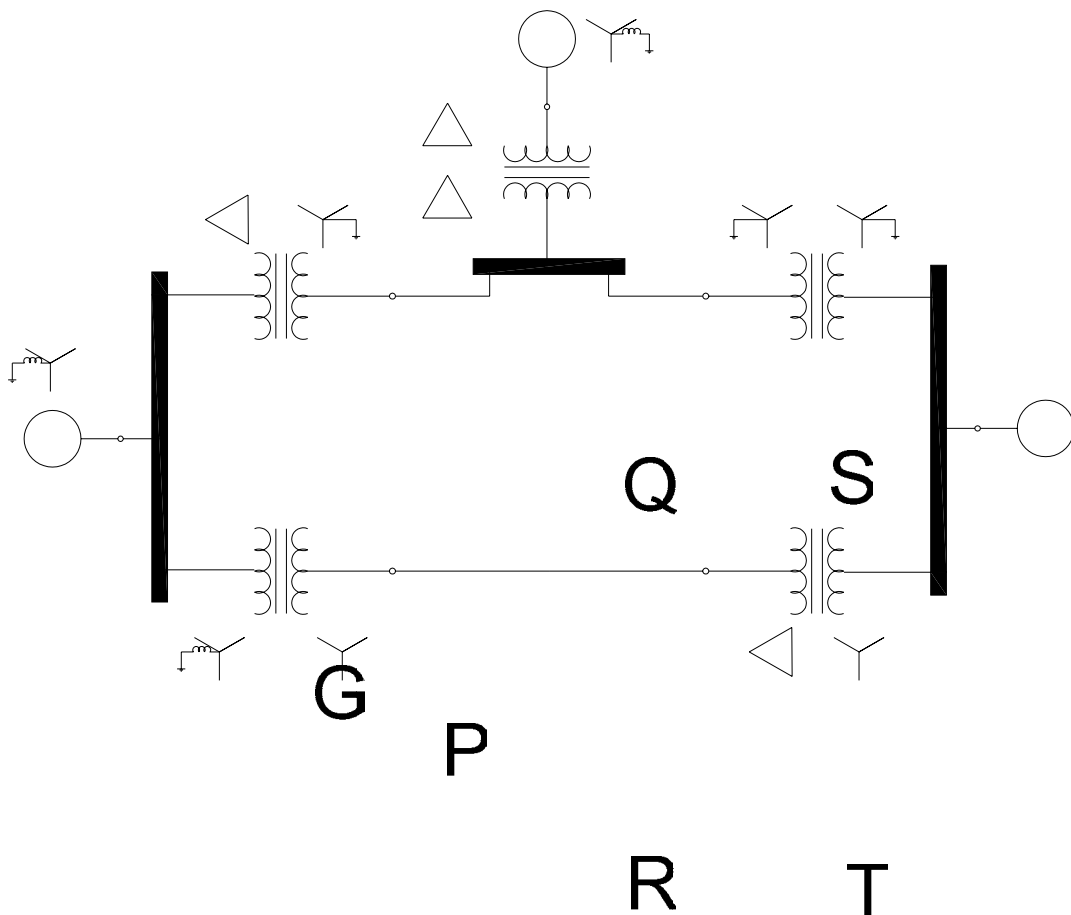
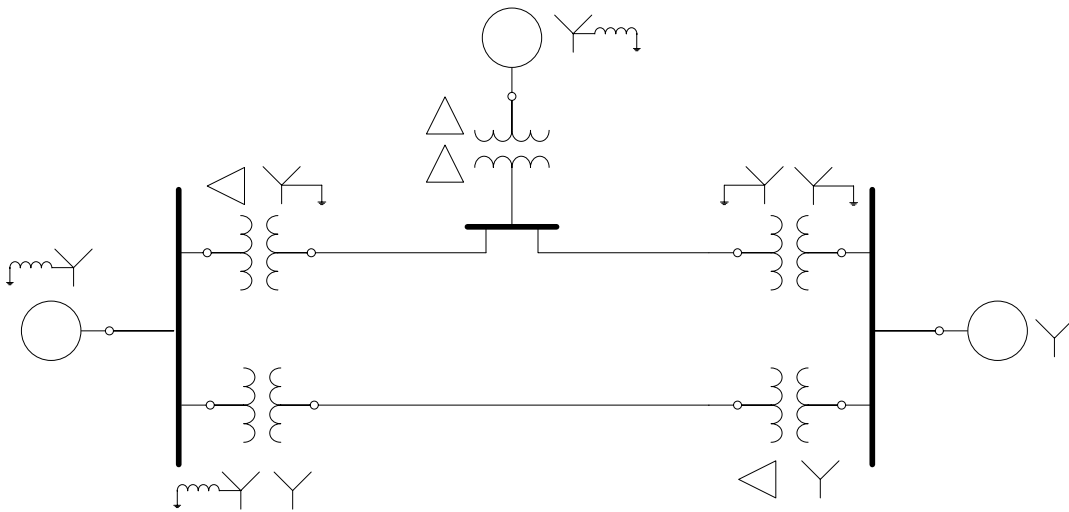
دياگرام اتصال شبکه هاي توالي صفر ترانسفورماتورها



شبکه توالی صفر ترانسفورماتور سه سیم پیچه

T

مثال- دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت در شکل زیر نشان داده شده است. شبکه توالی صفر این سیستم را رسم کنید.



G

K