

عیبهای نامتقارن

اغلب عیبهایی که در سیستمهای قدرت رخ می دهند عیبهای نامتقارن اند مانند اتصال کوتاههای نامتقارن، عیبهای نامتقارن از طریق امیدانسیها، یا پارگی هادیها. عیبهای نامتقارن به صورت تک خط-به-زمین، خط-به-خط، یا دو خط-به-زمین رخ می دهند. مسیر جریان عیب از خط به خط یا از خط به زمین، ممکن است امیدانسی را در بر بگیرد یا نگیرد. پارگی يك یا دو هادی- یا از طریق پارگی آنها یا از طریق عملکرد فیوزها و وسایل دیگری که امکان دارد سه فاز را به طور همزمان قطع نکنند- منجر به عیبهای نامتقارن می شود.

از آنجا که هر عیب نامتقارن، سبب عبور جریانهای نامتعادل در سیستم می شود، در تحلیل برای تعیین جریانها و ولتاژهای همه قسمت های سیستم، پس از وقوع عیب، روش مؤلفه های متقارن بسیار سودمند است. ابتدا عیبهای واقع در سرهای يك ژنراتور بی بار را بررسی می کنیم. سپس با به کار گیری قضیه تونن- که اجازه می دهد تا با گذاشتن يك ژنراتور و امیدانس متوالی به جای همه سیستم، جریان عیب را بیابیم- عیب در يك سیستم قدرت را در نظر خواهیم گرفت. سرانجام، ماتریس امیدانس شینه را به شکلی که در تحلیل عیبهای نامتقارن به کار می رود بررسی خواهیم کرد.

بدون توجه به نوع عیبی که در سرهای يك ژنراتور رخ می دهد می توانیم از معادله های (۱۱-۲۱) تا (۱۱-۲۳) که در بخش ۱۱-۸ به دست آمد، استفاده کنیم. شکل ماتریسی این معادله ها چنین است:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (1-12)$$

همراه با معادله (۱-۱۲)، معادله‌های توصیف‌کننده شرایط عیب را نیز برای هر نوع عیب به کار خواهیم برد تا I_{a1} را بر حسب E_a ، Z_1 ، Z_2 و Z_0 به دست آوریم.

۱-۱۲ عیب تک خط-به-زمین در مولد بی بار

نمودار مدار ی عیب تک خط-به-زمین در یک ژنراتور اتصال-ستاره‌ای بی بار، که نقطه خنثای آن از طریق یک رئکتانس، زمین شده است در شکل ۱-۱۲ دیده می‌شود که در آن فاز a فاز عیب کرده است. روابطی که برای این نوع عیب به دست می‌آیند فقط وقتی صادق خواهند بود که عیب در فاز a باشد اما این امر، مشکلی ایجاد نمی‌کند زیرا فازها به‌طور دلخواه علامت گذاری شده‌اند و هر فاز می‌تواند به عنوان فاز a معرفی شود. شرایط عیب، با معادله‌های زیر بیان می‌شود

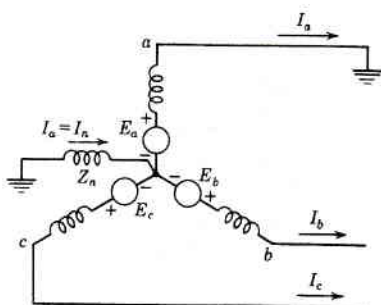
$$I_b = 0 \quad I_c = 0 \quad V_a = 0$$

با $I_b = 0$ و $I_c = 0$ مؤلفه‌های متقارن جریان چنین خواهند بود

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

بنابراین I_{a0} ، I_{a1} و I_{a2} هر کدام مساوی $I_a/3$ اند و

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} \quad (2-12)$$



شکل ۱-۱۲ نمودار مداری عیب تک خط-به-زمین در فاز a از سرهای یک ژنراتور بی بار که نقطه خنثایش از طریق یک رئکتانس، زمین شده است.

با گذاشتن I_{a1} به جای I_{a2} و I_{a0} در معادله (۱۲-۱) به دست می آوریم:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a1} \\ I_{a1} \end{bmatrix} \quad (۱۲-۳)$$

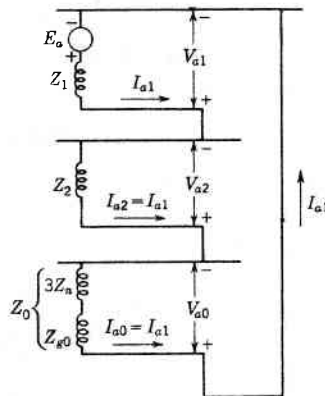
انجام دادن ضرب و تفریق ماتریسی بالا به تساوی دو ماتریس ستونی منجر می شود. با پیش ضرب کردن هر دو ماتریس ستونی در ماتریس سطری $[1 \quad 1 \quad 1]$ داریم:

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = -I_{a1}Z_0 + E_a - I_{a1}Z_1 - I_{a1}Z_2 \quad (۱۲-۴)$$

از آنجا که $V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 0$ ، از معادله (۱۲-۴)، I_{a1} چنین به دست می آید:

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (۱۲-۵)$$

معادله های (۱۲-۲) و (۱۲-۵)، معادله های ویژه برای عیب تک خط-به-زمین اند. این معادله ها به همراه معادله (۱۲-۱) و روابط مؤلفه متقارن، در تعیین همه ولتاژها و جریانهای عیب به کار می روند اگر هر سه شبکه ترتیبی ژنراتور به صورت شکل ۱۲-۲، متوالی به هم وصل شوند می بینیم که ولتاژهای حاصل از آن، در معادله های بالا صدق می کنند زیرا سه امپدانس ترتیبی با ولتاژ E_a متوالی اند. با این اتصال شبکه های ترتیبی و ولتاژ دوسر هر شبکه ترتیبی، برابر مؤلفه متقارن همان ترتیب است. اتصال شبکه های ترتیبی به صورت شکل ۱۲-۲، راه مناسبی برای به خاطر سپردن معادله های لازم برای حل عیب تک خط-به-زمین است زیرا همه معادله های لازم از روی اتصال شبکه ترتیبی قابل تعیین اند.



شکل ۱۲-۲ اتصال شبکه های ترتیبی يك ژنراتور بی بار به ازای عیب تک خط-به-زمین در فاز a از سرهای ژنراتور.

اگر نقطه خنثای ژنراتور زمین نشده باشد شبکه ترتیب-صفر، مدار-بازو Z_0 بی نهایت است. از آنجا که بنا بر معادله (۵-۱۲)، به ازای Z_0 بی نهایت، برابر صفر است پس I_{a2} و I_{a0} نیز باید برابر صفر باشند. به این ترتیب از خط a ، جریانی عبور نمی کند زیرا I_a مساوی مجموع مؤلفه هایش است و مؤلفه ها همگی صفرند. بدون استفاده از مؤلفه های متقارن نیز همین نتیجه به دست می آید. زیرا ملاحظه مدار نشان می دهد که مسیری برای عبور جریان در عیب وجود ندارد مگر اینکه نقطه خنثای ژنراتور، زمین شده باشد.

مثال ۱۲-۱ یک ژنراتور قطب برجسته بدون میراکن، بامقادیر نامی 20 MVA ، 13.8 kV دارای رثکتانس زیرگذرای طولی 25 pu است. رثکتانسهای در-یکی ترتیب-منفی و صفر نیز به ترتیب عبارت انداز 35 pu و 10 pu . نقطه خنثای ژنراتور مستقیماً زمین شده است. وقتی عیب تک خط - به - زمین در سرهای ژنراتور رخ می دهد، جریان زیرگذرای ژنراتور و ولتاژهای خط-به-خط را در شرایط زیر گذرا تعیین کنید. ژنراتور با ولتاژ نامی به صورت بی بار کار می کند. از مقاومت صرف نظر کنید.

حل: با مبنای 20 MVA و 13.8 kV داریم $E_a = 1.0\text{ pu}$ زیرا در حالت بی باری ولتاژ داخلی برابر ولتاژ سر ژنراتور است. پس

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{1.0 + j0}{j0.25 + j0.35 + j0.10} = -j1.43 \text{ در-یک}$$

$$I_a = 3I_{a1} = -j4.29 \text{ در-یک}$$

$$\text{جریان } a = \frac{20000}{\sqrt{3} \times 13.8} = 837 \text{ A}$$

جریان زیر گذرا در خط a عبارت است از

$$I_a = -j4.29 \times 837 = -j3590 \text{ A}$$

مؤلفه های متقارن ولتاژ از نقطه a تا زمین عبارت انداز

$$V_{a1} = E_a - I_{a1}Z_1 = 1.0 - (-j1.43)(j0.25) \\ = 1.0 - 0.357 = 0.643 \text{ در-یک}$$

$$V_{a2} = -I_{a2}Z_2 = -(-j1.43)(j0.35) = -0.50 \text{ در-یک}$$

$$V_{a0} = -I_{a0}Z_0 = -(-j1.43)(j0.10) = -0.143 \text{ در-یک}$$

ولتاژهای خط-به-زمین عبارت انداز:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = 0.643 - 0.50 - 0.143 = 0$$

$$V_b = a^2V_{a1} + aV_{a2} + V_{a0}$$

$$\begin{aligned}
 &= 0.0643(-0.05 - j0.0866) - 0.050(-0.05 + j0.0866) - 0.0143 \\
 &= -0.0322 - j0.0557 + 0.025 - j0.0433 - 0.0143 \\
 &= -0.0215 - j0.0990 \text{ در-يك}
 \end{aligned}$$

$$V_c = aV_{a1} + a^2V_{a2} + V_{a0}$$

$$\begin{aligned}
 &= 0.0643(-0.05 + j0.0866) - 0.050(-0.05 - j0.0866) - 0.0143 \\
 &= -0.0322 + j0.0557 + 0.025 + j0.0433 - 0.0143 \\
 &= -0.0215 + j0.0990 \text{ در-يك}
 \end{aligned}$$

ولتاژهای خط-به-خط عبارت انداز:

$$V_{ab} = V_a - V_b = 0.0215 + j0.0990 = 1.01 \angle 77.7^\circ \text{ در-يك}$$

$$V_{bc} = V_b - V_c = 0 - j1.980 = 1.980 \angle 270^\circ \text{ در-يك}$$

$$V_{ca} = V_c - V_a = -0.0215 + j0.0990 = 1.01 \angle 102.3^\circ \text{ در-يك}$$

از آنجا که ولتاژ تولیدی E_a نسبت به نقطه خنثی، pu ۱.۰ انتخاب شده بود ولتاژهای خط-به-خط فوق، برحسب در-يك و با ولتاژ مبنای نسبت به نقطه خنثی بیان شده اند. ولتاژ خطها پس از عیب، بر حسب ولت عبارت انداز:

$$V_{ab} = 1.01 \times \frac{13.8}{\sqrt{3}} \angle 77.7^\circ = 805 \angle 77.7^\circ \text{ kV}$$

$$V_{bc} = 1.980 \times \frac{13.8}{\sqrt{3}} \angle 270^\circ = 1578 \angle 270^\circ \text{ kV}$$

$$V_{ca} = 1.01 \times \frac{13.8}{\sqrt{3}} \angle 102.3^\circ = 805 \angle 102.3^\circ \text{ kV}$$

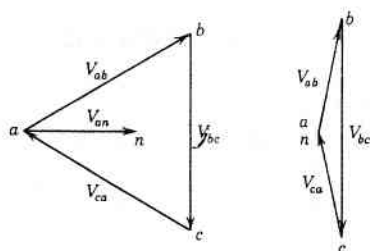
پیش از عیب، ولتاژ خطها، متعادل و برابر ۱۳۸۸ kV است. برای مقایسه با ولتاژهای پس از عیب، ولتاژهای پیش از عیب خطها با $V_{an} = E_a$ به عنوان مرجع به صورت زیرند

$$V_{ab} = 1388 \angle 30^\circ \text{ kV} \quad V_{bc} = 1388 \angle 270^\circ \text{ kV}$$

$$V_{ca} = 1388 \angle 150^\circ \text{ kV}$$

نمودارهای فازبرداری ولتاژهای پیش از عیب و پس از آن، در شکل ۱۲-۳ نشان داده شده اند.

□



(الف) پیش از عیب

(ب) پس از عیب

شکل ۱۲-۳ نمودارهای فازبرداری ولتاژ خطها در مثال ۱۲-۱، پیش از عیب و پس از آن.

۱۲-۲ عیب خط-به-خط در ژنراتور بارشده

نمودارمداری يك عیب خط-به-خط در فازهای b و c از يك ژنراتور اتصال-ستاره ای بی بار در شکل ۱۲-۴ نشان داده شده است. شرایط عیب با معادله های زیر بیان می شوند:

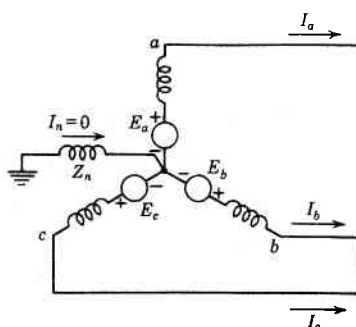
$$V_b = V_c \quad I_a = 0 \quad I_b = -I_c$$

یا $V_b = V_c$ مؤلفه های متقارن ولتاژ عبارت اند از:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

که از آن به دست می آید

$$V_{a1} = V_{a2} \quad (۱۲-۶)$$



شکل ۱۲-۴ نمودار مداری برای عیب خط-به-خط بین فازهای b و c از سرهای يك ژنراتور بی بار که نقطه خنثایش از طریق يك رکتانس، زمین شده است.

از آنجا که $I_b = -I_c$ و $I_a = 0$ ، مؤلفه‌های متقارن جریان عبارت انداز:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -I_c \\ I_c \end{bmatrix}$$

و بنابراین

$$I_{a0} = 0 \quad (7-12)$$

$$I_{a2} = -I_{a1} \quad (8-12)$$

هرگاه نقطه خنثای ژنراتور به زمین متصل باشد، Z_0 محدود است و به این ترتیب:

$$V_{a0} = 0 \quad (9-12)$$

زیرا I_{a0} طبق معادله (7-12) برابر صفر است.

باتوجه به معادله‌های (12-6) تا (12-9)، معادله (12-1) به شکل زیر درمی آید:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ V_{a1} \\ V_{a1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_{a1} \\ -I_{a1} \end{bmatrix} \quad (10-12)$$

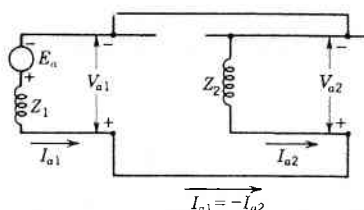
با انجام دادن عملیات ماتریسی نشان داده شده و بیش ضرب کردن معادله ماتریسی حاصل در ماتریس سطری $[1 \quad 1 \quad -1]$ نتیجه می گیریم

$$0 = E_a - I_{a1}Z_1 - I_{a1}Z_2 \quad (11-12)$$

که از آن، چنین به دست می آید

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2} \quad (12-12)$$

معادله‌های (12-6) تا (12-8) و (12-12) معادله‌های ویژه برای عیب خط-به-خط اند. این معادله‌ها به همراه معادله (12-1) و روابط مؤلفه متقارن، در تعیین همه ولتاژها و جریانهای عیب به کار می روند. معادله‌های ویژه، چگونگی اتصال شبکه‌های ترتیبی را برای نمایش عیب، نشان می دهند. از آنجا که Z_0 وارد معادله نمی شود، شبکه ترتیب-صفر به کار نمی رود. شبکه‌های ترتیب-مثبت و منفی باید با هم موازی باشند زیرا $V_{a1} = V_{a2}$. اتصال موازی شبکه‌های ترتیب-مثبت و منفی، بدون شبکه ترتیب-صفر، ایجاب می کند که $I_{a1} = -I_{a2}$ باشد همان طور که از معادله (12-8) مشخص شد. اتصال شبکه‌های ترتیبی برای عیب خط-به-خط در شکل ۵-۱۲ رسم شده است. جریانها و



شکل ۱۲-۵ اتصال شبکه‌های ترتیبی یک ژنراتور بی‌بار برای عیب خط-به-خط بین فازهای b و c از سرهای ژنراتور.

ولتاژهای شبکه‌های ترتیبی-وقتی چنین وصل می‌شوند-همه معادله‌های به‌دست آمده برای عیب خط-به-خط را ارضا می‌کنند.

به‌علت عدم اتصال زمین در عیب، فقط یک اتصال زمین در مدار وجود دارد (در نقطه خنثای ژنراتور) و هیچ جریانی نمی‌تواند از اتصال زمین بگذرد. در به‌دست آوردن روابط عیب خط-به-خط دیدیم که $I_{a0} = 0$. این، منطبق با این واقعیت است که هیچ جریانی نمی‌تواند از اتصال زمین بگذرد زیرا جریان زمین، I_n ، برابر $3I_{a0}$ است. وجود یا عدم وجود نقطه خنثای زمین شده در ژنراتور، در جریان عیب تأثیر ندارد. اگر نقطه خنثای ژنراتور زمین نشده باشد، Z_0 بی‌نهایت و V_{a0} نامعین است. اما ولتاژهای خط-به-خط پیدا می‌شوند زیرا آنها شامل مؤلفه‌های ترتیب-صفر نیستند.

مثال ۱۲-۲ وقتی یک عیب خط-به-خط در سرهای ژنراتور توصیف شده در مثال ۱۲-۱ رخ می‌دهد، جریانهایی زیر گذرا و ولتاژهای خط-به-خط عیب را در شرایط زیر گذرا تعیین کنید. فرض کنید که به‌هنگام وقوع عیب، ژنراتور بی‌بار است و ولتاژ نامی را دارد. از مقاومت صرف نظر کنید.

حل:

$$I_{a1} = \frac{120 + j0}{j0.25 + j0.35} = -j1667 \text{ در-یک}$$

$$I_{a2} = -I_{a1} = j1667 \text{ در-یک}$$

$$I_{a0} = 0$$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = -j1667 + j1667 = 0$$

$$I_b = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0}$$

$$= -j1667(-0.5 - j0.866) + j1667(-0.5 + j0.866)$$

$$= j0.833 - 1443 - j0.833 - 1443 = -2886 + j0 \text{ در-یک}$$

$$I_c = -I_b = 2886 + j0 \text{ در-یک}$$

همانند مثال ۱۲-۱، جریان مبنا $837 A$ است و به این ترتیب:

$$I_a = 0$$

$$I_b = -28886 \times 837 = 2416 \angle 180^\circ A$$

$$I_c = 28886 \times 837 = 2416 \angle 0^\circ A$$

مؤلفه‌های متقارن ولتاژ a به زمین عبارت اند از:

$$V_{a1} = V_{a2} = 1 - (-j1667)(j0.25) = 1 - 0.417 = 0.583 \text{ در-يك}$$

$$V_{a0} = 0 \text{ (نقطه خنثای ژنراتور زمین شده است)}$$

ولتاژهای خط-به-خط زمین عبارت اند از

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = 0.583 + 0.583 = 1.166 \angle 0^\circ \text{ در-يك}$$

$$V_b = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_c = V_b = 0.583(-0.5 - j0.866) + 0.583(-0.5 + j0.866)$$

$$= -0.583 \text{ در-يك}$$

ولتاژهای خط-به-خط عبارت اند از

$$V_{ab} = V_a - V_b = 1.166 + 0.583 = 1.749 \angle 0^\circ \text{ در-يك}$$

$$V_{bc} = V_b - V_c = -0.583 + 0.583 = 0 \text{ در-يك}$$

$$V_{ca} = V_c - V_a = -0.583 - 1.166 = 1.749 \angle 180^\circ \text{ در-يك}$$

ولتاژهای خط-به-خط بر حسب ولت عبارت اند از:

$$V_{ab} = 1.749 \times \frac{1328}{\sqrt{3}} = 1329.4 \angle 0^\circ \text{ kV}$$

$$V_{bc} = 0 \text{ kV}$$

$$V_{ca} = -1.749 \times \frac{1328}{\sqrt{3}} = 1329.4 \angle 180^\circ \text{ kV}$$

۱۲-۳ عیب دوخط-به-زمین در ژنراتور بی بار

نمودار مدارای عیب دوخط-به-زمین در يك ژنراتور اتصال-ستاره‌ای بی بار که دارای نقطه

خنثای زمین شده است در شکل ۶-۱۲ نشان داده شده است. فازهای عیب کرده b و c اند. شرایط عیب بامعادله‌های زیر بیان می‌شوند

$$V_b = 0 \quad V_c = 0 \quad I_a = 0$$

باتوجه به $V_b = 0$ و $V_c = 0$ ، مؤلفه‌های متقارن و لثا از رابطه زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

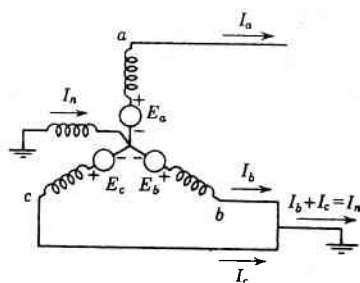
بنابراین، V_{a0} ، V_{a1} و V_{a2} مساوی‌اند با $V_a/3$ و داریم

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} \quad (۱۳-۱۲)$$

از گذاشتن $E_a - I_{a1}Z_1$ به جای V_{a1} ، V_{a2} و V_{a0} در معادله (۱۲-۱) و پیش ضرب کردن طرفین در Z^{-1} باتوجه به اینکه

$$Z^{-1} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_0} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Z_2} \end{bmatrix}$$

نتیجه می‌شود



شکل ۶-۱۲ مدار برای عیب دوخط به زمین در فازهای b و c از سرهای یک ژنراتور بی بار که نقطه خنثایش از طریق یک رئکتانس، زمین شده است.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{Z_o} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Z_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a - I_{a1}Z_1 \\ E_a - I_{a1}Z_1 \\ E_a - I_{a1}Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_o} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Z_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (۱۴-۱۲)$$

پاییش ضرب کردن طرفین معادله (۱۴-۱۲) در ماتریس سطری [۱ ۱ ۱] و در نظر گرفتن اینکه $I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = I_a = 0$ داریم

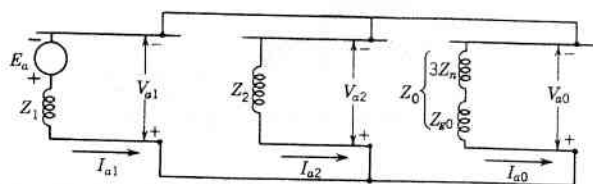
$$\frac{E_a}{Z_o} - I_{a1}\frac{Z_1}{Z_o} + \frac{E_a}{Z_1} - I_{a1} + \frac{E_a}{Z_2} - I_{a1}\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{E_a}{Z_1} \quad (۱۵-۱۲)$$

$$I_{a1} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_o} + \frac{Z_1}{Z_2} \right) = \frac{E_a(Z_2 + Z_o)}{Z_2 Z_o} \quad (۱۶-۱۲)$$

و

$$I_{a1} = \frac{E_a(Z_2 + Z_o)}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_o + Z_2 Z_o} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 Z_o / (Z_2 + Z_o)} \quad (۱۷-۱۲)$$

معادله‌های (۱۳-۱۲) و (۱۷-۱۲)، معادله‌های ویژه برای عیب دوخط-به-زمین‌اند. این معادله‌ها همراه معادله (۱-۱۲) و روابط مؤلفه متقارن در تعیین همه ولتاژها و جریانهای عیب به کار می‌روند. معادله (۱۳-۱۲) نشان می‌دهد که شبکه‌های ترتیبی باید همانند شکل ۷-۱۲ موازی به هم وصل شوند زیرا ولتاژهای ترتیب-مثبت، منفی، و صفر در محل عیب مساوی‌اند. بررسی شکل ۷-۱۲ نشان می‌دهد که همه شرایط به دست آمده پیش برای عیب دوخط-به-زمین، با این اتصال ارضا می‌شوند. نمودار اتصال شبکه‌ها نشان می‌دهد که با اعمال ولتاژ E_a بر امپدانس حاصل از توالی Z_1 با ترکیب موازی Z_2 و Z_o جریان ترتیب-مثبت I_{a1} تعیین می‌شود. همین رابطه با معادله (۱۷-۱۲) داده می‌شود. اگر مولد، اتصال زمین نداشته باشد هیچ جریانی نمی‌تواند از عیب به طرف زمین بگذرد. در این حالت، Z_o بی‌نهایت و I_{a0} صفر است. تا جایی که مربوط به جریان می‌شود،



شکل ۷-۱۲ اتصال شبکه‌های ترتیبی یک ژنراتور بی بار برای عیب دو خط-به-زمین در فازهای b و c از سرهای ژنراتور.

نتیجه‌ها مانند عیب خط-به-خط است. در عیب دوخط-به-زمین، وقتی Z_0 به سمت بی‌نهایت میل می‌کند معادله (۱۷-۱۲) به سمت معادله عیب خط-به-خط یعنی (۱۲-۱۲) میل می‌کند، این مطلب با تقسیم صورت و مخرج جمله دوم مخرج معادله (۱۷-۱۲) به Z_0 و بی‌نهایت شدن Z_0 روشن می‌شود.

مثال ۱۲-۳ وقتی عیب دوخط-به-زمین در سرهای ژنراتور توصیف شده در مثال ۱۲-۱ رخ می‌دهد، جریانهای زیر گذرا و ولتاژهای خط-به-خط را در شرایط زیر گذرا در محل عیب بیابید. فرض کنید ژنراتور بی‌بار است و به‌هنگام وقوع عیب، ولتاژ نامی را دارد. از مقاومت صرف نظر کنید.

حل:

$$\begin{aligned} I_{a1} &= \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)} \\ &= \frac{100 + j0}{j0.25 + (j0.35 \times j0.10) / (j0.35 + j0.10)} \\ &= \frac{100}{j0.25 + j0.0778} = \frac{1}{j0.3278} = -j305 \quad \text{در-يك} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{a1} &= V_{a2} = V_{a0} = E_a - I_{a1} Z_1 = 1 - (-j305)(j0.25) \\ &= 100 - 0.763 = 0.237 \quad \text{در-يك} \end{aligned}$$

$$I_{a2} = -\frac{V_{a2}}{Z_2} = -\frac{0.237}{j0.35} = j0.68 \quad \text{در-يك}$$

$$I_{a0} = -\frac{V_{a0}}{Z_0} = -\frac{0.237}{j0.10} = j2.37 \quad \text{در-يك}$$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = -j305 + j0.68 + j2.37 = 0$$

$$I_b = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0}$$

$$\begin{aligned} &= (-0.5 - j0.866)(-j305) + (-0.5 + j0.866)(j0.68) \\ &\quad + j2.37 \end{aligned}$$

$$= j1.525 - 2.641 - j0.34 - 0.589 + j2.37$$

$$= -3.230 + j3.555 = 4.80 \angle 132.3^\circ \quad \text{در-يك}$$

$$\begin{aligned}
 I_c &= aI_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0} \\
 &= (-0.05 + j0.866)(-j30.5) + (-0.05 - j0.866)(j0.68) \\
 &\quad + j2037 \\
 &= j10525 + 2641 - j0.34 + 0.589 + j2037 = 30230 + j30555 \\
 &= 4080 \angle 47.7^\circ \text{ در-يك}
 \end{aligned}$$

$$I_n = 3I_{a0} = 3 \times j2037 = j7011 \text{ در-يك}$$

$$\begin{aligned}
 I_n &= I_b + I_c = -30230 + j30555 + 30230 + j30555 \\
 &= j7011 \text{ در-يك}
 \end{aligned}$$

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = 2V_{a1} = 3 \times 0.227 = 0.711 \text{ در-يك}$$

$$V_b = V_c = 0$$

$$V_{ab} = V_a - V_b = 0.711 \text{ در-يك}$$

$$V_{bc} = 0$$

$$V_{ca} = V_c - V_a = -0.711 \text{ در-يك}$$

بیان شده بر حسب آمپر و ولت:

$$I_a = 0$$

$$I_b = 837 \times 4080 \angle 132.3^\circ = 4017 \angle 132.3^\circ \text{ A}$$

$$I_c = 837 \times 4080 \angle 47.7^\circ = 4017 \angle 47.7^\circ \text{ A}$$

$$I_n = 837 \times 7011 \angle 90^\circ = 5951 \angle 90^\circ \text{ A}$$

$$V_{ab} = 0.711 \times \frac{13.8}{\sqrt{3}} = 566 \angle 0^\circ \text{ kV}$$

$$V_{bc} = 0$$

$$\square V_{ca} = -0.711 \times \frac{13.8}{\sqrt{3}} = 566 \angle 180^\circ \text{ kV}$$

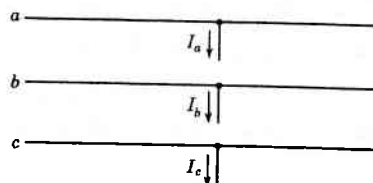
۱۲-۲ عیبهای نامتقارن در سیستمهای قدرت

در به دست آوردن معادله‌های مؤلفه‌های متقارن جریانه‌ها و ولتاژهای حین عیب يك شبکه‌کلی، جریانهایی را که در سیستم متعادل پیشین در محل عیب از فازهای a ، b ، و c خارج می‌شوند به ترتیب با I_a ، I_b ، و I_c نشان می‌دهیم. شکل ۱۲-۸ که سه خط سیستم سه فاز را در محل عیب کرده شبکه نشان می‌دهد جریانهایی I_a ، I_b ، و I_c را نیز به نمایش می‌گذارد. پیکانهایی روی نمودار در کنار زائده‌های فرضی متصل به هر خط در محل عیب، عبور جریان خط را به طرف عیب نشان می‌دهند. اتصال مناسب زائده‌ها، انواع مختلف عیبها را نمایش می‌دهد. برای مثال اتصال زائده b به c عیب خط-به-خط از طریق امپدانس صفر را تولید می‌کند. به این ترتیب جریان زائده a برابر صفر و I_b مساوی I_c است.

ولتاژهای خط-به-زمین در محل عیب با V_a ، V_b ، و V_c مشخص خواهند شد. ولتاژ پیش از وقوع عیب فاز a در محل عیب - از خط تا نقطه خنثی - V_f نامیده خواهد شد که چون سیستم متعادل فرض می‌شود ولتاژ نامبرده ولتاژ ترتیب-مثبت است. پیش از این در فصل ۱۰ در محاسبات تعیین جریانهایی سیستم قدرت به هنگام وقوع يك عیب سه فاز متقارن، با ولتاژ پیش از عیب V_f برخورد کردیم.

نمودار تك-خطی يك سیستم قدرت حاوی سه ماشین سنکرون در شکل ۱۲-۹ رسم شده است. يك چنین سیستمی برای معادله‌های به دست آمده به اندازه کافی کلی است زیرا برای هر سیستم متعادلی صرف نظر از پیچیدگی آن قابل کاربرد است. شکل ۱۲-۹، شبکه‌های ترتیبی سیستم را نیز نشان می‌دهد. نقطه در نظر گرفته شده برای وقوع عیب، روی نمودار تك-خطی و روی شبکه‌های ترتیبی با P علامتگذاری شده است. همان طور که در فصل ۱۰ دیدیم صرف نظر از اینکه ماشینها با ولتاژهای داخلی زیر گذرا و رثکتانسهای زیر گذرا یا با ولتاژهای داخلی گذرا و رثکتانسهای گذرا یا با ولتاژهای بی‌باری و رثکتانسهای سنکرون خود نمایش داده شوند، جریان بار گذرنده از شبکه ترتیب-مثبت فرق نمی‌کند و ولتاژهای نسبت به زمین قسمت خارجی تا ماشینها نیز فرق نمی‌کنند.

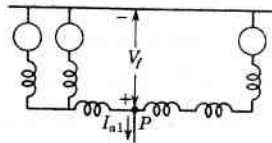
از آنجاکه خطی بودن از فرضهای رسم شبکه‌های ترتیبی است به جای هریک از شبکه‌ها می‌توان معادل توننش را بین دوسر متشکل از شینه مرجعش و نقطه بروز عیب، گذاشت. در شکل ۱۲-۹، مدار معادل تونن هر شبکه ترتیبی در کنار نمودار همان شبکه ترتیبی رسم



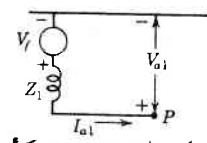
شکل ۱۲-۸ سه‌گانه‌ای از يك سیستم سه فاز-زائده‌های حامل جریانهایی I_a ، I_b ، و I_c ممکن است برای نمایش انواع مختلف عیب به هم وصل شوند.



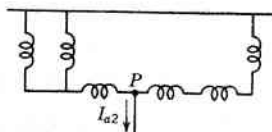
(الف) نمودار تک خطی سیستم سه فاز متعادل



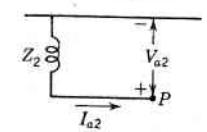
(ب) شبکه ترتیب مثبت



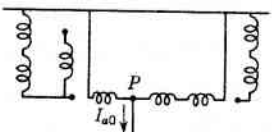
(ه) معادل تونن شبکه ترتیب مثبت



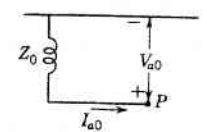
(ج) شبکه ترتیب منفی



(و) معادل تونن شبکه ترتیب منفی



(د) شبکه ترتیب صفر



(ز) معادل تونن شبکه ترتیب صفر

شکل ۹-۱۲ نمودار تک خطی یک سیستم سه فاز، سه شبکه ترتیبی سیستم، و معادل تونن هر شبکه به ازای عیبی در P .

شده است. ولتاژ داخلی تک ژنراتور مدار معادل شبکه ترتیب مثبت، برابر است با V_f که عبارت است از ولتاژ پیش از عیب نسبت به نقطه خنثی - در نقطه بروز عیب. امپدانس Z_1 در مدار معادل برابر امپدانس اندازه گیری شده، بین نقطه P و شینه مرجع شبکه ترتیب مثبت است در حالی که همه محرکه های الکتریکی داخلی اتصال کوتاه شده اند. مقدار Z_2 وابسته به رئکتانسهای به کار رفته در شبکه است. برای مثال یادآور می شود که مقادیر مورد استفاده در محاسبه جریان مقارنی که باید قطع شود عبارت اند از رئکتانسهای زیر گذرای ژنراتورها و ۱۵ برابر رئکتانسهای زیر گذرای موتورهای همزمان یا رئکتانسهای گذرای موتورهای.

از آنجا که پیش از وقوع عیب، جریانهای ترتیب منفی یا صفر وجود ندارند در شبکه های ترتیب منفی و صفر ولتاژ پیش از عیب بین نقطه P و شینه مرجع صفر است.

بنابراین در مدارهای معادل شبکه‌های ترتیب-منفی و صفر، هیچ محرک الکتریکی ظاهر نمی‌شود. امپدانسهای Z_p و Z_o در شبکه‌های مربوط به آنها نیز بین نقطه P و شینه مرجع اندازه‌گیری می‌شوند و بستگی به محل عیب دارند.

چون I_a ، جریان گذرنده از سیستم به طرف عیب است مؤلفه‌های آن یعنی I_{a1} ، I_{a2} و I_{a0} چنانکه در شکل ۹-۱۲ دیده می‌شود از شبکه‌های ترتیبی مربوط به آنها از مدار معادل شبکه‌ها در نقطه P به خارج می‌گذرند. معادله‌های تونن شبکه‌های ترتیب-مثبت، منفی، و صفر سیستم همانند شبکه‌های يك تك ژنراتورند. بنابراین معادله‌های ماتریسی مؤلفه‌های متقارن ولتاژها در محل عیب باید همانند معادله (۱۲-۱) باشند جز اینکه V_f جانشین E_a می‌شود، یعنی:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_f \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_o & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (12-18)$$

البته مقدار امپدانسهای ترتیبی را باید مطابق قضیه تونن به درستی تعیین کنیم و بدانیم که جریانه‌ها همان مؤلفه‌های ترتیبی در زائده‌های فرضی‌اند.

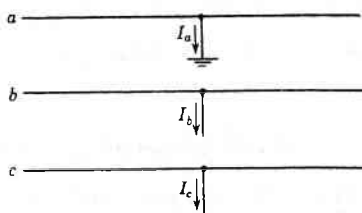
۱۲-۵ عیب يك خط-به-زمین در سیستم قدرت

به ازای عیب يك خط-به-زمین، زائده‌های فرضی روی سه خط، به صورت شکل ۱۲-۱۰ وصل می‌شوند. روابط زیر در محل عیب برقرارند:

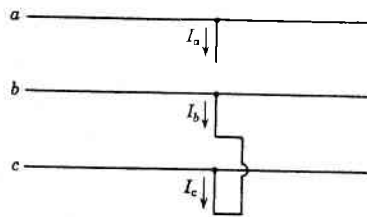
$$I_b = 0 \quad I_c = 0 \quad V_a = 0$$

این سه معادله، همان معادله‌های عیب خط-به-زمین در يك تك ژنراتورند. پس پاسخ این معادله‌ها به همراه معادله (۱۲-۱۸) و روابط مؤلفه‌های متقارن باید همان پاسخهای معادله‌های همانند در بخش ۱۲-۱ باشد جز اینکه V_f جانشین E_a می‌شود. پس برای عیب خط-به-زمین داریم

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} \quad (12-19)$$



شکل ۱۲-۱۰ نمودار اتصال زائده‌های فرضی برای عیب يك خط-به-زمین.



شکل ۱۱-۱۲ نمودار اتصال زائده‌های فرضی برای عیب خط-به-خط.

و

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (20-12)$$

معادله‌های (۱۹-۱۲) و (۲۰-۱۲) نشان می‌دهند که برای شبیه‌سازی عیب تک خط-به-زمین باید سه شبکه‌ی ترتیبی از طریق نقطه‌ی عیب، متوالی به هم وصل شوند.

۱۲-۶ عیب خط-به-خط در سیستم قدرت

به ازای عیب خط-به-خط زائده‌های فرضی سه خط در محل عیب به صورت شکل ۱۱-۱۲ وصل می‌شوند. روابط زیر در محل عیب برقرارند:

$$V_b = V_c \quad I_a = 0 \quad I_b = -I_c$$

معادله‌های بالا همان صورت معادله‌های عیب خط-به-خط در یک تک ژنراتور را دارند. از حل آنها به روش بخش ۱۲-۲ ضمن گذاشتن معادله (۱۸-۱۲) به جای معادله (۱۱-۱۲) نتیجه می‌شود

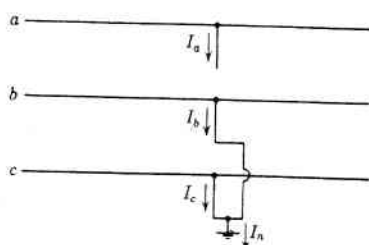
$$V_{a1} = V_{a2} \quad (21-12)$$

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2} \quad (22-12)$$

معادله‌های (۲۱-۱۲) و (۲۲-۱۲) نشان می‌دهند که برای شبیه‌سازی عیب خط-به-خط باید شبکه‌های ترتیب-مثبت و منفی در نقطه‌ی عیب، موازی به هم وصل شوند.

۱۲-۷ عیب دو خط-به-زمین در سیستم قدرت

به ازای عیب دو خط-به-زمین، زائده‌ها به صورت شکل ۱۲-۱۲ وصل می‌شوند. روابط زیر در عیب برقرارند:



شکل ۱۲-۱۲ نمودار اتصال زائده‌های فرضی برای عیب دو خط-به-زمین.

$$V_b = V_c = 0$$

$$I_a = 0$$

در قیاس با نتیجه به دست آمده در بخش ۱۲-۳ داریم

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} \quad (12-23)$$

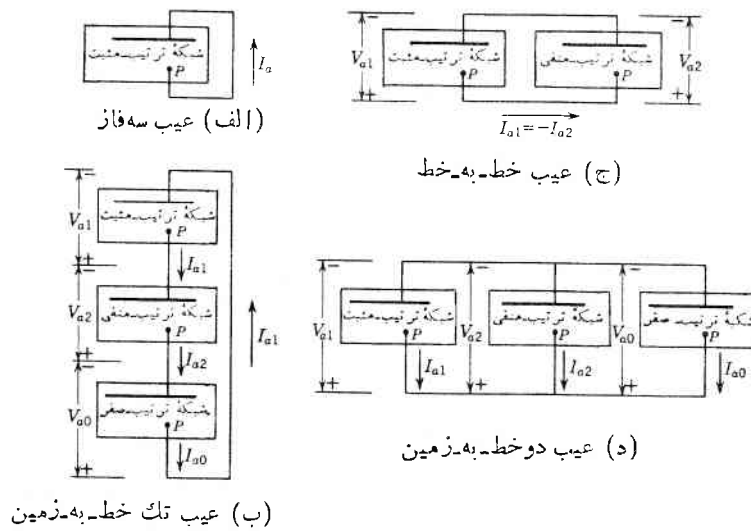
$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)} \quad (12-24)$$

معادله‌های (۱۲-۲۳) و (۱۲-۲۴) نشان می‌دهند که برای شبیه‌سازی عیب دو خط-به-زمین، باید سه شبکه ترتیبی در نقطه عیب به توافقی یکدیگر وصل شوند.

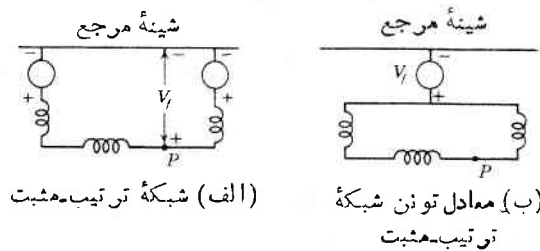
۱۲-۸ تغییر شبکه‌های ترتیبی به هم پیوسته

در بخش‌های پیش دیدیم که شبکه‌های ترتیبی سیستم قدرت را می‌توان طوری به هم وصل کرد که با حل شبکه بر آیند، مؤلفه‌های متقارن جریان و ولتاژ عیب به دست آیند. اتصال‌های شبکه‌های ترتیبی برای شبیه‌سازی انواع عیبها از جمله عیب سه فاز متقارن، در شکل ۱۲-۱۳ دیده می‌شوند. شبکه‌های ترتیبی را طرح وار با مستطیلهایی نشان داده‌ایم که در برگیرنده يك خط و يك نقطه P اند. خط، نماینده شینه مرجع شبکه است و نقطه، نماینده محل وقوع عیب در شبکه. شبکه ترتیب-مثبت، محرکه‌هایی الکتریکی را شامل می‌شود که ولتاژهای داخلی ماشینها را نمایش می‌دهند.

اگر محرکه‌های الکتریکی يك شبکه ترتیب-مثبت به صورتی که در شکل ۱۲-۱۴ (الف) می‌بینیم اتصال کوتاه شوند امیدانس بین نقطه عیب P و شینه مرجع، امیدانس ترتیب-مثبت Z_1 ، در معادله‌های به دست آمده برای عیبهای سیستم قدرت، برابر امیدانس متوالی معادل تون مدار بین P و شینه مرجع است. اگر به شبکه ترتیب-مثبت تغییر یافته اخیر، ولتاژ V_r را متوالی وصل کنیم مدار نتیجه به صورت شکل ۱۲-۱۴ (ب)، معادل تون شبکه ترتیب-مثبت ابتدایی است. معادل بودن مدارهای شکل ۱۲-۱۴ فقط از نظر تأثیری است که بر



شکل ۱۲-۱۳ اتصالات شبکه‌های ترتیبی برای شبیه‌سازی انواع مختلف عیبا. شبکه‌های ترتیبی با مستطیل نشان داده شده‌اند. P نقطه‌ای است که در آن عیب رخ می‌دهد.



شکل ۱۲-۱۴ شبکه ترتیب مثبت و معادل تونن آن.

روی هر نوع اتصال خارجی انجام شده بین P و شینه مرجع شبکه‌های ابتدایی دارند. در صورت نبودن اتصال خارجی می‌توانیم به سادگی ببینیم که هیچ جریانی از شاخه‌های مدار معادل نمی‌گذرد. اما اگر اختلافی در فاز یا اندازه دو محرکه الکتریکی شبکه، موجود باشد جریان از شاخه‌های شبکه ترتیب مثبت ابتدایی خواهد گذشت. در شکل ۱۲-۱۴ (الف)، جریان گذرنده از شاخه‌ها، در صورت نبودن اتصال خارجی، جریان بار پیش از عیب است. وقتی شبکه‌های ترتیبی دیگر به شبکه ترتیب مثبت شکل ۱۲-۱۴ (الف) یا به معادل نشان داده شده‌اش در شکل ۱۲-۱۴ (ب) وصل شوند جریان گذرنده به طرف خارج شبکه یا معادل آن برابر I_{a1} و ولتاژ بین P و شینه مرجع برابر V_{a1} است. بسا يك چنین اتصال خارجی، جریان هر شاخه از شبکه ترتیب مثبت ابتدایی، برابر جریان ترتیب مثبت در فاز a آن شاخه در طی عیب است. مؤلفه پیش از عیب این جریان نیز به حساب آمده است.

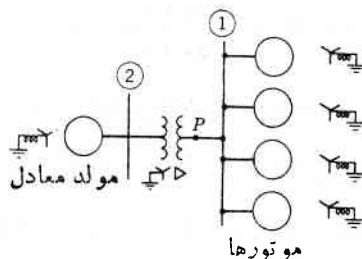
اما جریان هر شاخه از معادل تونن شکل ۱۲-۱۴ (ب)، فقط آن بخش از جریان ترتیب مثبت واقعی است، از تقسیم جریان عیب I_{a1} ، بین شاخه‌ها براساس امیدانشان به دست می‌آید. ومؤلفه پیش از عیب را در بر نمی‌گیرد.

روش دیگر برای برای بررسی عیبهای نامتقارن، مساتریس امیدانس شینه است و درباره آن پس از مثال زیر که مراد از آن، آشنایی بیشتر با شبکه‌های ترتیبی است، بحث خواهیم کرد.

مثال ۱۲-۴ يك گروه موتورسنكرون يكسان از طریق ترانسفورماتور به شینه ۴۱۶ kV - واقع در مجلسی دور از نیروگاههای يك سیستم قدرت - وصل شده‌اند. موتورها در حالت بار کامل با ضریب توان يك، ولتاژ نامی ۶۰۰ V و بازدهی ۸۹۵ درصد کار می‌کنند. مجموع خروجی نامی آنها ۴۷۶ kW (۶۰۰ hp) است. رثکتانسهای در-یکي هر موتور براساس kVA نامی ورودیش عبارت‌اند از $X'' = ۰.۲۵$ ، $X_p = ۰.۲۵$ و $X_0 = ۰.۰۴$ در-يك و هر موتور از طریق يك رثکتانس ۰.۲ pu به زمین شده است. موتورها از طریق يك گسروه ترانسفورماتور، متشکل از سه واحد تکفاز با مقادیر نامی ۶۰۰ V/۲۴۰۰ kVA، به شینه ۴۱۶ kV وصل شده‌اند. سیم پیچهای ۶۰۰ V-، مثلی به موتورها وصل شده‌اند و سیم پیچهای ۲۴۰۰ V-، اتصال ستاره‌ای دارند. رثکتانس نش هر ترانسفورماتور ۱۰٪ است.

سیستم قدرتی که شینه ۴۱۶ kV را تغذیه می‌کند با يك ژنراتور معادل تونن دارای مقادیر نامی و رثکتانسهای در-یکي ۷۵۰۰ kVA، ۴۱۶ kV، $X'' = X_p = ۰.۱۰$ ، $X_0 = ۰.۰۵$ از نقطه خنثی تا زمین برابر ۰.۰۵، نمایش داده می‌شود. هنگامی که عیب تک خط-به-زمین در طرف فشار-ضعیف گروه ترانسفورماتور رخ می‌دهد موتورهای یکسان، سهم مساوی در بار کل ۳۷۳۰ kW (۵۰۰۰ hp) دارند و با ولتاژ نامی، ضریب توان پس‌افتی ۸۵٪ و بازدهی ۸۸٪ کار می‌کنند. گسروه موتورها را به صورت يك تک موتور معادل بررسی کنید. شبکه‌های ترتیبی را با ذکر امیدانشان رسم کنید. با صرف نظر کردن از جریان پیش از عیب، جریان زیر گذرای خط را در همه قسمت‌های سیستم تعیین کنید:

حل: نمودار تک-خطی سیستم در شکل ۱۲-۱۵ دیده می‌شود. شینه ۶۰۰ V و شینه



شکل ۱۲-۱۵ نمودار تک-خطی سیستم مثال ۱۲-۴.

۴۱۶ kV به ترتیب شماره ۱ و ۲ دارند. مقادیر نامی ژنراتور معادل یعنی ۷۵۰۰ kVA و ۴۱۶ kV در شینه سیستم را مبنا انتخاب کنید. از آنجا که

$$\sqrt{3} \times 2200 = 4160 \text{ V}$$

و

$$3 \times 2500 = 7500 \text{ kVA}$$

مقادیر نامی سه فاز ترانسفورماتور عبارتند از ۷۵۰۰ kVA، ۶۰۰۰ V/۴۱۶۰ V. بنابراین مبناى مدار موتور ۷۵۰۰ kVA، ۶۰۰۰ V است. ورودی نامی تك موتور معادل عبارت است از:

$$\frac{6000 \times 0.746}{0.895} = 5000 \text{ kVA}$$

ورثکتناسهای موتور معادل بر حسب درصد - بر اساس مجموع مقادیر نامی - مساوی رثکتناسهای موتورهای جداگانه - بر اساس مقدار نامی هر موتور - است. رثکتناسهای موتور معادل با مبناى انتخاب شده عبارتند از:

$$X'' = 0.2 \frac{7500}{5000} = 0.3 \text{ در-يك}$$

$$X_r = 0.2 \frac{7500}{5000} = 0.3 \text{ در-يك}$$

$$X_o = 0.4 \frac{7500}{5000} = 0.6 \text{ در-يك}$$

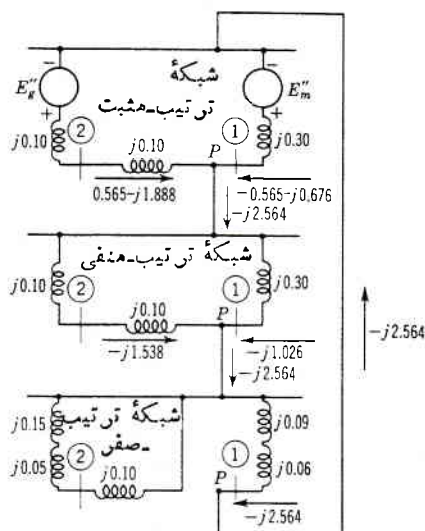
رثکتناس شبکه ترتیب-صفری که رثکتناس بین نقطه خنثی و زمین موتور معادل را به حساب می آورد عبارت است از

$$3X_n = 3 \times 0.2 \frac{7500}{5000} = 0.9 \text{ در-يك}$$

برای مولد معادل، رثکتناس خنثی به زمین در شبکه ترتیب-صفرو برابر است با

$$3X_n = 3 \times 0.05 = 0.15 \text{ در-يك}$$

شکل ۱۲-۱۶، اتصال شبکههای ترتیبی را نشان می دهد. رثکتناسها بر حسب در-يك داده شده اند.



شکل ۱۲-۱۶ اتصال شبکه‌های ترتیبی مثال ۱۲-۴ به ازای عیب تک خط به زمین در P ، جریانهای زیرگذرا برحسب در-یک، ذکر شده اند. جریان پیش از عیب به حساب آمده است.

از آنجا که موتورها در ولتاژی نامی برابر با ولتاژ مبنای مدار موتور کار می کنند، ولتاژ پیش از عیب فاز a در محل عیب عبارت است از:

$$V_f = 100 \text{ در-یک}$$

جریان مبنای مدار موتور عبارت است از

$$\frac{7500000}{\sqrt{3} \times 600} = 7217 \text{ A}$$

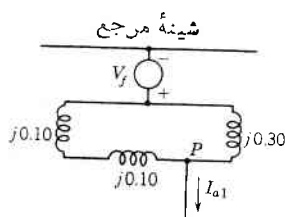
و جریان واقعی موتور برابر است با:

$$\frac{746 \times 5000}{0.888 \times \sqrt{3} \times 600 \times 0.885} = 2798 \text{ A}$$

جریانی که موتور پیش از وقوع عیب از خط a می کشد برحسب در-یک عبارت است از

$$\frac{2798}{7217} \angle -\cos^{-1} 0.885 = 0.388 \angle -31.8^\circ = 0.388 - j0.256 \text{ در-یک}$$

اگر جریان پیش از عیب نادیده گرفته شود E_g'' و E_m'' برابر $100 \angle 0^\circ$ می شوند، یا



شکل ۱۲-۱۷ معادل توتن شبکه ترتیب-مثبت مثال ۱۲-۴.

به جای شبکه ترتیب-مثبت، مدار معادل توننش که در شکل ۱۲-۱۷ دیده می شود می نشیند. محاسبات در زیر می آیند:

$$Z_1 = \frac{(j0.1 + j0.1)(j0.3)}{j(0.1 + 0.1 + 0.3)} = j0.12 \quad \text{در-یک}$$

$$Z_2 = \frac{(j0.1 + j0.1)(j0.3)}{j(0.1 + 0.1 + 0.3)} = j0.12 \quad \text{در-یک}$$

$$Z_0 = j0.15 \quad \text{در-یک}$$

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{1.0}{j0.12 + j0.12 + j0.15} = \frac{1.0}{j0.39} = -j2.564$$

$$I_{a2} = I_{a1} = -j2.564$$

$$I_{a0} = I_{a1} = -j2.564$$

$$\text{جریان عیب} = 3I_{a0} = 3(-j2.564) = -j7.692 \text{ pu}$$

مؤلفه آینده از ترانسفورماتور به سوی P عبارت است از

$$\frac{-j2.564 \times j0.3}{j0.5} = -j1.538$$

و مؤلفه I_{a1} رونده از P به طرف موتور عبارت است از

$$\frac{-j2.564 \times j0.2}{j0.5} = -j1.026$$

همچنین مؤلفه I_{a2} آینده از طرف ترانسفورماتور عبارت است از $-j1.538$ و مؤلفه I_{a2} رونده از طرف موتور برابر است با $-j1.026$. همه I_{a0} از موتور به طرف P می گذرد. جریانهایی خطها در محل عیب عبارت اند از:

از ترانسفورماتور به سوی P بر حسب در-یک

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^\vee & a \\ 1 & a & a^\vee \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -j1538 \\ -j1538 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j3076 \\ j1538 \\ j1538 \end{bmatrix}$$

از موتورها به سوی P بر حسب در-یک

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^\vee & a \\ 1 & a & a^\vee \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -j2564 \\ -j1026 \\ -j1026 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j4616 \\ -j1538 \\ -j1538 \end{bmatrix}$$

روش ما در علامت گذاری خطها طوری است که جریانهای $I_{A\vee}$ و $I_{A\gamma}$ در طرف فشار-قوی ترانسفورماتور با روابط زیر به جریانهای $I_{a\vee}$ و $I_{a\gamma}$ در طرف فشار ضعیف مربوط می شوند:

$$I_{a\vee} = jI_{A\vee} \quad I_{a\gamma} = -jI_{A\gamma} \quad (25-12)$$

به این ترتیب

$$I_{A\vee} = -j(-j1538) = -1538$$

$$I_{A\gamma} = j(-j1538) = 1538$$

و

$$I_{A0} = 0$$

چون جریانهای ترتیب-صفر در طرف پراولتاژ ترانسفورماتور وجود ندارند پس:

$$I_A = I_{A\vee} + I_{A\gamma} = 0$$

$$I_{B\vee} = a^\vee I_{A\vee} = (-0.5 - j0.866)(-1538) = 0.769 + j1332$$

$$I_{B\gamma} = a I_{A\gamma} = (-0.5 + j0.866)(1538) = -0.769 + j1332$$

$$I_B = I_{B\vee} + I_{B\gamma} = 0 + j2664 \text{ در-یک}$$

$$I_{C\vee} = a I_{A\vee} = (-0.5 + j0.866)(-1538) = 0.769 - j1332$$

$$I_{C\gamma} = a^\vee I_{A\gamma} = (-0.5 - j0.866)(1538) = -0.769 - j1332$$

$$I_C = I_{C\vee} + I_{C\gamma} = 0 - j2664 \text{ در-یک}$$

اگر ولتاژهای سراسر سیستم پیدا شوند مؤلفه‌های آنها در هر نقطه می‌توانند از روی جریانها و رئکتانسهای شبکه‌های ترتیبی محاسبه شوند. مؤلفه‌های ولتاژهای طرف پر ولتاژ ترانسفورماتور ابتدا بدون ملاحظه تغییر فاز پیدا می‌شوند. سپس تأثیر تغییر فاز باید تعیین شود.

با تعیین جریانهای مبنای طرفین ترانسفورماتور می‌توانیم جریانهای در-یکی بالا را به آمپر تبدیل کنیم. جریان مبنای مدار موتور را پیش از این برابر $7217A$ به دست آوریم. جریان مبنای مدار پر ولتاژ عبارت است از:

$$\frac{7500000}{\sqrt{3} \times 4160} = 1041 \text{ A}$$

جریان عیب برابر است با:

$$7692 \times 7217 = 55500 \text{ A}$$

جریان خطها بین ترانسفورماتور و عیب عبارت اند از:

$$\text{در خط } a: 3076 \times 7217 = 22200 \text{ A}$$

$$\text{در خط } b: 1838 \times 7217 = 11100 \text{ A}$$

$$\text{در خط } c: 1838 \times 7217 = 11100 \text{ A}$$

جریان خطها بین موتور و عیب عبارت اند از:

$$\text{در خط } a: 4616 \times 7217 = 33300 \text{ A}$$

$$\text{در خط } b: 1838 \times 7217 = 11100 \text{ A}$$

$$\text{در خط } c: 1838 \times 7217 = 11100 \text{ A}$$

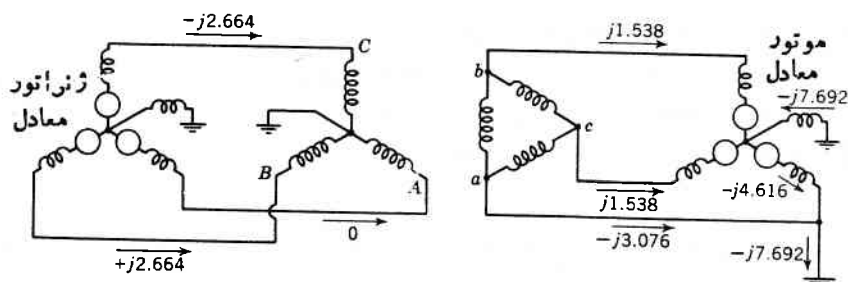
جریان خطها بین شینه 416 kV و ترانسفورماتور عبارت اند از:

$$\text{در خط } A: 0$$

$$\text{در خط } B: 2664 \times 1041 = 2773 \text{ A}$$

$$\text{در خط } C: 2664 \times 1041 = 2773 \text{ A}$$

جریانهایی که محاسبه کرده‌ایم آنها می‌هستند که به محض وقوع عیب-وقتی که باری روی موتورها نیست-خواهند گذشت. این جریانها تنها زمانی درست اند که موتورها هیچ گونه جریانی نکشند. اما بیان مسئله، شرایط بار را در لحظه عیب مشخص می‌کند و بار می‌تواند در نظر گرفته شود. برای به حساب آوردن بار، جریان در-یکی را که موتور، پیش از



شکل ۱۲-۱۸ مقادیر در-یکی جریان خطها در همه قسمت‌های سیستم مثال ۱۲-۴، با نندیده گرفتن جریان پیش از عیب.

وقوع عیب از خط a می‌کشد به مؤلفه I_{a1} آینده از ترانسفورماتور به طرف P می‌افزاییم و همان جریان را از مؤلفه I_{a1} آینده از موتور به طرف P کم می‌کنیم. مقدار جدید جریان ترتیب-مثبت آینده از ترانسفورماتور به طرف عیب در فاز a عبارت است از:

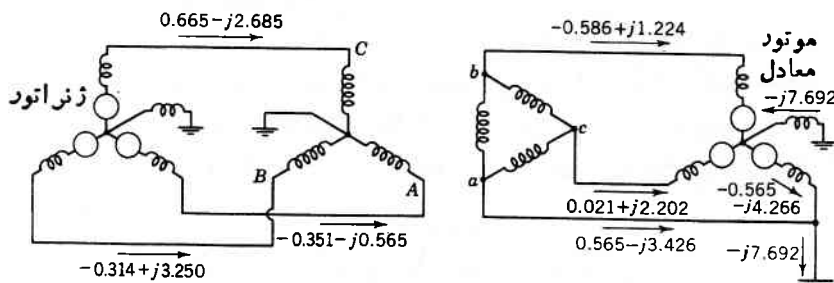
$$0.565 - j2.664 = 0.565 - j1.888$$

و مقدار جدید جریان ترتیب-مثبت آینده از موتور به طرف عیب در فاز a برابر است با:

$$-0.565 + j2.664 = -0.565 + j0.776$$

این مقادیر در شکل ۱۲-۱۶ نشان داده شده‌اند. باقی مانده محاسبه با استفاده از این مقادیر جدید مطابق مثال انجام می‌شود.

وقتی که عیب در حالت بی‌باری رخ می‌دهد، شکل ۱۲-۱۸ مقادیر در-یکی جریان زیر گذرای خطها را در همه قسمت‌های سیستم به دست می‌دهد. وقتی که بار مشخص شده در مثال در نظر گرفته می‌شود شکل ۱۲-۱۹ مقادیر را به ازای وقوع عیب در سیستم نشان می‌دهد.



شکل ۱۲-۱۹ مقادیر در-یکی جریان زیر گذرای خطها در همه قسمت‌های سیستم مثال ۱۲-۴، با در نظر گرفتن جریان پیش از عیب.

در يك سیستم بزرگتر که جریان عیب در مقایسه با جریان بار بسیار بیشتر است تأثیر صرف نظر کردن از جریان بار، کمتر از چیزی است که از مقایسه شکل‌های ۱۲-۱۸ و ۱۲-۱۹ دیده می‌شود. البته در سیستم بزرگ می‌توان جریان‌های پیش از عیب را به کمک بررسی پخش بار تعیین کرد و به سادگی به جریان عیبی که با صرف نظر کردن از بار پیدا شده است افزود. □

۹-۱۲ تحلیل عیبهای نامتقارن با استفاده از ماتریس امیدانس شینه

در فصل ۱۰ از ماتریس امیدانس شینه متشکل از امیدانسه‌های ترتیب-مثبت استفاده کردیم تا جریان‌ها و ولتاژها را به هنگام وقوع يك عیب سه-فاز تعیین کنیم. با توجه به اینکه شبکه‌های ترتیب-منفی و صفر نیز می‌توانند درست مانند شبکه ترتیب-مثبت باشک‌های معادل امیدانس شینه نمایش داده شوند، روش مذکور می‌تواند به سادگی برای کاربرد در مورد عیبهای نامتقارن تعمیم یابد. شکل ۱۲-۲۰ متناظر با شکل ۱۲-۱۳ است و به هم پیوستگی شبکه‌های امیدانس شینه را برای يك سیستم سه-شینه‌ای در حالی نشان می‌دهد که عیب در شینه ۳ روی می‌دهد. به جای شبکه‌های واقعی، صرفاً شبکه معادل امیدانس شینه نشان داده شده است. زیر نویسه‌های اضافی ۱، ۲، و ۵ به این جهت به امیدانسه‌ها ضمیمه شده‌اند تا شبکه‌های ترتیبی‌ای را که به آنها تعلق دارند نشان دهند.

به ازای عیب تك خط-به-زمین روی شینه ۳، بررسی شکل ۱۲-۲۰ نشان می‌دهد:

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_{33-1} + Z_{33-2} + Z_{33-0}} \quad (12-26)$$

که باید با معادله (۱۲-۲۰) مقایسه شود. اگر عیب روی شینه ۳ باشد واضح است که Z_{33-0} ، Z_{33-2} ، و Z_{33-1} با مقادیر Z_0 ، Z_2 ، و Z_1 معادل (۱۲-۲۰) برابرند. ماتریسه‌های امیدانس شینه ترتیب-مثبت، منفی، و صفر فوراً مقادیر مورد استفاده برای Z_0 ، Z_2 ، و Z_1 در معادله‌های (۱۲-۲۰) و (۱۲-۲۲) و (۱۲-۲۴) را نشان می‌دهند. ادمیتانسه‌های انتقالی (رسم نشده در شکل ۱۲-۲۰) امکان می‌دهند تا ولتاژ شینه‌های نامعیوب را محاسبه کنیم که از روی آنها جریان خط‌ها پیدا می‌شوند.

مثال ۵-۱۲ جریان زیرگذر را در يك عیب تك خط-به-زمین ابتدا در شینه ۱ و سپس در شینه ۲ از شبکه مثال ۴-۱۲ بیابید. از ماتریسه‌های امیدانس شینه استفاده کنید. همچنین با در نظر گرفتن عیب در شینه ۱، ولتاژهای شینه ۲ را نسبت به نقطه خنثی بیابید.

حل: عناصر ماتریسه‌های ادمیتانس گره سه شبکه ترتیبی با مراجعه به شکل ۱۲-۱۶

چنین به دست می‌آیند

$$Y_{11-1} = Y_{11-2} = \frac{1}{j0.1} + \frac{1}{j0.3} = -j13.33$$

$$Y_{12-1} = Y_{12-2} = \frac{-1}{j0.1} = j10$$

$$Y_{۲۲-۱} = \frac{1}{j0.۰۱} + \frac{1}{j0.۰۱} = -j20$$

$$Y_{۱۱-0} = \frac{1}{j0.۰۱۵} = -j6.۶۷ \quad Y_{۱۲-0} = 0$$

$$Y_{۲۲-0} = \frac{1}{j0.۰۲} + \frac{1}{j0.۰۱} = -j15.0$$

$$Y_{bus-1} = Y_{bus-2} = j \begin{bmatrix} -13.3 & 10.0 \\ 10.0 & -20.0 \end{bmatrix}$$

$$Y_{bus-0} = j \begin{bmatrix} -6.67 & 0.0 \\ 0.0 & -15.0 \end{bmatrix}$$

معکوس ساختن سه ماتریس بالا سه ماتریس امپدانس شینه را به دست می دهد:

$$Z_{bus-1} = Z_{bus-2} = j \begin{bmatrix} 0.۰۱۲ & 0.006 \\ 0.006 & 0.008 \end{bmatrix}$$

$$Z_{bus-0} = j \begin{bmatrix} 0.۰۱۵ & 0.0 \\ 0.0 & 0.067 \end{bmatrix}$$

جریان عیب روی شینه ۱ عبارت است از:

$$I_f'' = \frac{30 \times 1.0}{j0.۰۱۲ + j0.۰۱۲ + j0.۰۱۵} = -j7.۶۹۲ \text{ در-یک}$$

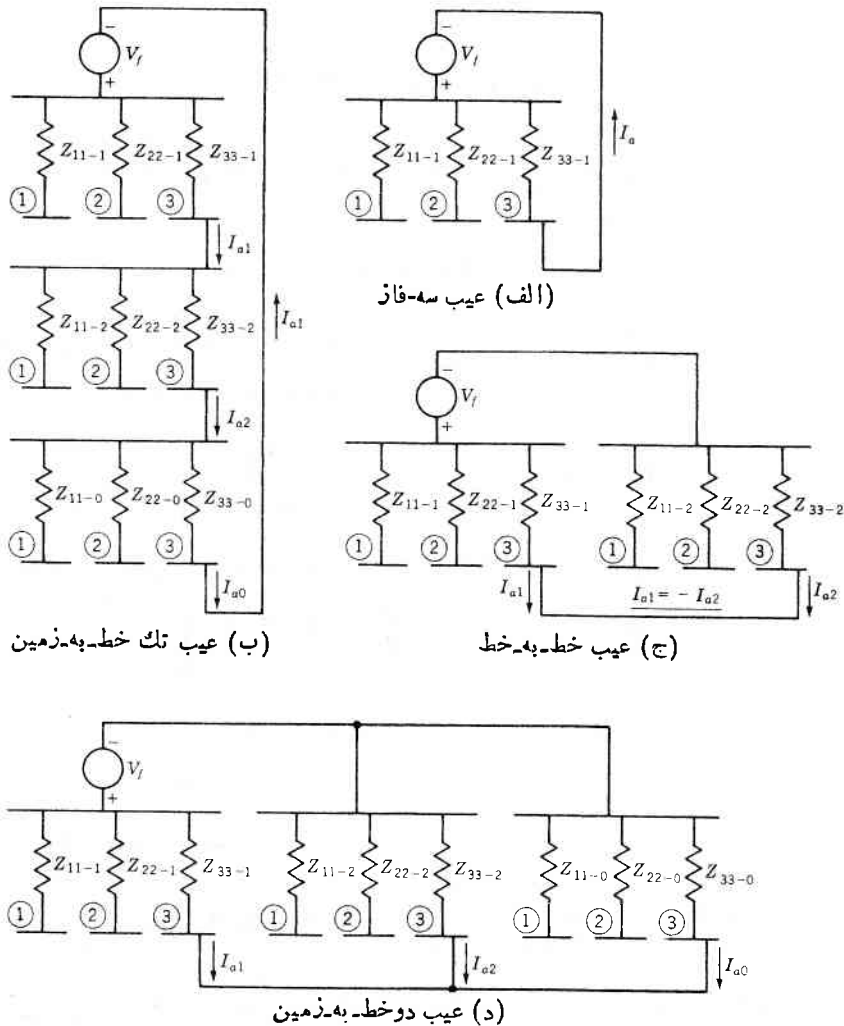
که با مقدار به دست آمده در مثال ۱۲-۴ مطابقت دارد. اگر عیب روی شینه ۲ باشد

$$I_f'' = \frac{3 \times 1.0}{j0.008 + j0.008 + j0.0067} = -j13.۲۱۶ \text{ در-یک}$$

برای یافتن ولتاژهای شینه ۲- نسبت به نقطه خنثی- درحالی که عیب روی شینه ۱ واقع است، ابتدا مشاهده می کنیم که:

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{-j7.692}{3} = -j2.564$$

با بررسی شکل ۱۲-۲۰ و توجه به وجود امپدانسهای انتقالی، درمی یابیم که اگر عیب روی شینه ۱ باشد و از تغییر فاز صرف نظر شود، مؤلفه های ترتیبی ولتاژ شینه ۲ عبارت اند از:



شکل ۲۵-۱۳ اتصالات شبکه‌های ترتیبی معادل امپدانس شینه یک سوئچ سه-شینه برای شبیه سازی انواع مختلف عیبه‌ها. امپدانسه‌ای انتقالی نشان داده نشده‌اند.

$$V_{a1} = V_f - I_{a1} Z_{11-1} = 1 - (-j2.564)(j0.06) = 0.8462$$

$$V_{a2} = -I_{a2} Z_{11-2} = -(-j2.564)(j0.06) = -0.1538$$

و از آنجا که Z_{11-0} صفر است:

$$V_{a0} = 0$$

با منظور کردن تغییر فاز، از معادله‌های (۱۱-۲۳) داریم:

$$V_{A1} = -jV_{a1} = -j0.08462$$

$$V_{A2} = jV_{a2} = -j0.01538$$

$$V_A = V_{A1} + V_{A2} = -j0.08462 - j0.01538 = 0 - j0.1000 \quad \text{در-يك}$$

$$V_B = a^2 V_{A1} + a V_{A2} = j0.04231 - 0.07328 + j0.00769 + 0.01332 \\ = -0.0600 + j0.0500 \quad \text{در-يك}$$

$$V_C = a V_{A1} + a^2 V_{A2} = j0.04231 + 0.07328 + j0.00769 - 0.01332 \\ = 0.0600 + j0.0500 \quad \text{در-يك}$$

همه مقادیر در-یکی بر مبنای خط-به-نقطه خنثی هستند. بررسی شکل ۱۲-۱۸ نشان خواهد داد که چرا اندازه V_A برابر ۱۰۰ است. □

اگرچه در این شبکه بسیار ساده مشهود نیست که روش حل با استفاده از ماتریس امپدانس شینه دارای مزیت بزرگی نسبت به روش مثال ۱۲-۴ باشد با این حال این روش جریان عیب به ازای عیب روی هر کدام از شینه‌ها به ما می‌دهد. در مورد یک سیستم بزرگ این روش برای کامپیوتر که می‌تواند ماتریس امپدانس شینه را مستقیماً بسازد و سطرهای معینی را کاملاً به آسانی اضافه یا کم کند بسیار مناسب است. به این ترتیب با داشتن ماتریس امپدانس شینه برای هر شبکه ترتیبی، همه جنبه‌های روش حل کامپیوتری در مورد عیبهای سه فاز متقارن می‌تواند به عیبهای نامتقارن نیز تعمیم یابد.

۱۰-۱۲ عیبهای از طریق امپدانس

همه عیبهای مورد بحث در بخشهای قبل عبارت بودند از اتصال کوتاههای مستقیم بین خطها و از یک یا دو خط به زمین. اگرچه اتصال کوتاههای مستقیم، مقادیر جریان عیب بزرگتری را تولید می‌کنند و بنابراین به هنگام تعیین تأثیرات عیبهای مورد انتظار بیشترین اهمیت را دارند با این حال امپدانس عیب به ندرت صفر است. اغلب عیبها نتیجه شعله‌کشی بر روی مقره‌ها هستند که در آن امپدانس بین خط و زمین بستگی دارد به مقاومت قوس، دکل، و نیز پای دکل اگر سیم زمین به کار نرفته باشد. مقاومت‌های پای دکل قسمت اصلی مقاومت بین خط و زمین را تشکیل می‌دهند و به شرایط خاک بستگی دارند. مقاومت زمین خشک ۱۰ تا ۱۰۰ برابر مقاومت زمین باتلاقی است. با به دست آوردن معادله‌هایی نظیر معادله‌های عیبهای از طریق امپدانس صفر، تأثیر امپدانس در عیب مشخص می‌شود. اتصال زائده‌های فرضی برای عیبهای از طریق امپدانس در شکل ۱۲-۲۱ دیده می‌شود. پس از وقوع عیب سه‌فاز که بین هر خط و یک نقطه مشترک، امپدانس یکسانی دارد

سیستم متعادل، متقارن باقی می ماند. فقط جریانهای ترتیب-مثبت عبور می کنند. اگر امپدانس عیب Z_f چنانکه در شکل ۲۱-۱۲ (الف) دیده می شود در همه فازها یکسان باشد و لذا عیب عبارت است از:

$$V_a = I_a Z_f$$

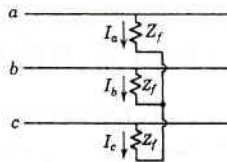
و چون فقط جریانهای ترتیب-مثبت می گذرند،

$$V_{a1} = I_{a1} Z_f = V_f - I_{a1} Z_1$$

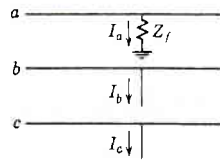
و

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f} \quad (۲۷-۱۲)$$

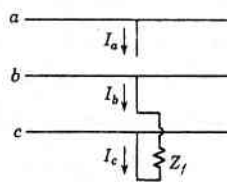
اتصال شبکه ترتیبی در شکل ۲۲-۱۲ (الف) دیده می شود. می توان برای عیبهای از طریق امپدانس تک خط-به-زمین و دو خط-به-زمین نشان داده شده در شکل ۲۱-۱۲ (ب)، اتصال درست شبکههای ترتیبی را از طریق مرسوم به دست آورد اما با مقایسه با عیبهای بدون امپدانس، به اتصال درست شبکههای ترتیبی خواهیم رسید. ژنراتوری را در نظر بگیریم که همه سرهای آن باز است و نقطه خنثای آن زمین شده است. در چنین ژنراتوری از نقطه نظر مقدار جریان عیب، عیب تک یا دو خط-به-زمین از طریق Z_f مشابه است با همان نوع عیب بدون امپدانس به این شرط که Z_f در اتصال بین نقطه خنثای ژنراتور و زمین قرار گرفته باشد. برای منظور کردن امپدانس Z_f در نقطه خنثای ژنراتور، به شبکه ترتیب-صفر Z_{f0} اضافه می کنیم. با قضیه تونن برای عیبهای روی سیستمهای قدرت نیز



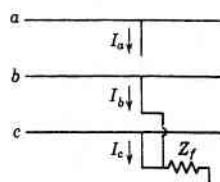
(الف) عیب سه فاز



(ب) عیب تک خط-به-زمین

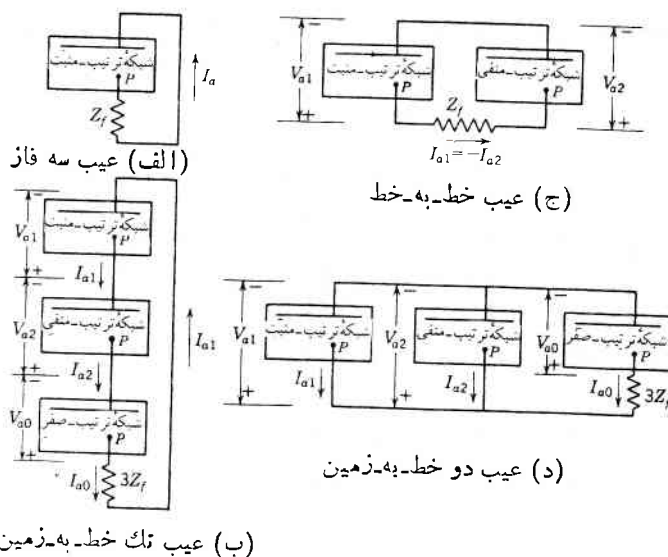


(ج) عیب خط-به-خط



(د) عیب دو خط-به-زمین

شکل ۲۱-۱۲ نمودارهای اتصال زائدههای فرضی برای عیبهای مختلف از طریق امپدانس.



شکل ۲۲-۱۲ اتصالات شبکه‌های ترتیبی برای شبیه سازی انواع مختلف عیبهای از طریق امپدانس واقع در نقطه P .

همین استدلال به کار می‌رود و به این ترتیب، اتصال شبکه‌های ترتیبی برای عیب تک خط-به-زمین و عیب دوخط-به-زمین مطابق شکل ۲۲-۱۲ (ب) و (د) است از روی این شکلها، برای عیب تک خط به زمین از طریق Z_f :

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$$

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (28-12)$$

و برای عیب دوخط-به-زمین از طریق Z_f :

$$V_{a1} = V_{a2}$$

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2(Z_0 + 3Z_f)/(Z_2 + Z_0 + 3Z_f)} \quad (29-12)$$

شکل ۲۱-۱۲ (ج)، عیب خط-به-خط از طریق امپدانس را نشان می‌دهد. شرایط عیب عبارت‌اند از

$$I_a = 0 \quad I_b = -I_c \quad V_c = V_b - I_b Z_f$$

I_a ، I_b ، و I_c نسبت به یکدیگر همان روابط عیب خط-به-خط بدون امپدانس، را دارند. بنا بر این:

$$I_{a1} = -I_{a2}$$

مؤلفه‌های ترتیبی ولتاژ را معادله زیر به دست می‌دهد.

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_b - I_b Z_f \end{bmatrix} \quad (30-12)$$

یا

$$3V_{a1} = V_a + (a + a^2)V_b - a^2 I_b Z_f \quad (31-12)$$

$$3V_{a2} = V_a + (a + a^2)V_b - a I_b Z_f \quad (32-12)$$

بنا بر این

$$3(V_{a1} - V_{a2}) = (a - a^2)I_b Z_f = j\sqrt{3}I_b Z_f \quad (33-12)$$

$$I_{a1} = -I_{a2} \quad \text{از آنجا که}$$

$$I_b = a^2 I_{a1} + a I_{a2} = (a^2 - a)I_{a1} = -j\sqrt{3}I_{a1} \quad (34-12)$$

و با گذاردن I_b از معادله (۳۴-۱۲) در معادله (۳۳-۱۲)، به دست می‌آوریم:

$$V_{a1} - V_{a2} = I_{a1} Z_f \quad (35-12)$$

معادله (۳۵-۱۲) مستلزم قرار دادن Z_f بین نقاط عیب در شبکه‌های ترتیب مثبت و منفی است تا شرایط لازم برای عیب را برآورده کند. شکل ۱۲-۲۲ (ج)، اتصالات شبکه‌های ترتیبی برای عیب خط-به-خط از طریق امپدانس را نشان می‌دهد. البته مزیت استفاده از ماتریس امپدانس شینه، یافتن Z_0 ، Z_1 ، و Z_2 برای معادله‌های (۱۲-۲۷)، (۱۲-۲۸)، (۱۲-۲۹)، و (۱۲-۳۵) است.

عیبهای از طریق امپدانس، شینه بارهای تکفازند. امپدانس Z_f در عیب تک خط-به-زمین، معادل اتصال بار تکفاز Z_f از خط a تا نقطه خنثی است. امپدانس Z_f در عیب خط-به-خط معادل اتصال بار تکفاز Z_f از خط b به خط c است.

۱۱-۱۲ محاسبات کامپیوتری جریان عیبها

برنامه‌های امروزی جریان عیب برای کامپیوتر رقمی معمولاً بر اساس ماتریس امپدانس شینه پایه‌ریزی می‌شوند. تنها عیبهای مورد بررسی معمولاً عبارت‌اند از عیبهای سه‌فاز و

تك خط-به-زمین. از آنجا که کاربرد مدار شکنها بر پایه جریان اتصال-کوتاه نامتقارنی است که باید قطع شود این جریان برای دو نوع عیب محاسبه می شود. برون نوشت کامپیوتر، جریان کل عیب و سهم هر خط را در بر می گیرد. نتایج همچنین کمیات را هنگامی که هر خط متصل به شینه عیب کرده به نوبت بازمی شود- در حالی که همه خطهای دیگر در حال کارند- در فهرست می آورند.

برنامه از داده های فهرست شده برای خطها و امپدانسهای آنها به صورتی که برای برنامه بخش بار تهیه شده است استفاده می کند و در تشکیل ماتریسهای امپدانس شینه ترتیب-مثبت وصفی، رئکتانس مناسب هر ماشین را دخالت می دهد. تا جایی که مربوط به امپدانسها می شود شبکه ترتیب-منفی همان شبکه ترتیب-مثبت است. به این ترتیب برای عیب تك خط-به-زمین واقع در شینه ۱، محاسبه I_{a1} بر حسب در-یککی، به صورت ۱۲۵ تقسیم بر مجموع Z_{11-0} و Z_{11-1} انجام می شود.

در صورت نیاز ولتاژ شینه ها و نیز جریان خطها غیر از خطهای متصل به شینه عیب کرده در برون نوشت کامپیوتر گنجانده می شود. زیرا این اطلاعات می تواند از روی ماتریس امپدانس شینه به سادگی به دست آید.

مسائل

۱-۱۲ يك ژنراتور توریینی 60 Hz که دارای مقادیر نامی 500 MVA ، 22 kV است و اتصال-ستاره ای دارد، مستقیماً زمین شده است و در حالت بی باری در ولتاژ نامی کار می کند. ژنراتور از بقیه سیستم جدا شده است. رئکتانسهای در-یککی آن عبارت اند از $X'' = X' = 0.15$ و $X_0 = 0.05$. نسبت جریان زیر گذرای خط در عیب تك خط-به-زمین را به جریان زیر گذرای خط در عیب سه فاز متقارن بیا بید.

۲-۱۲ برای ژنراتور مسئله ۱-۱۲ نسبت جریان زیر گذرای خط در عیب خط-به-خط را به جریان زیر گذرا در عیب سه فاز متقارن بیا بید.

۳-۱۲ مقدار رئکتانسی القایی را که باید در اتصال نقطه خنثای ژنراتور مسئله ۱-۱۲ قرار داد تا جریان زیر گذرای خط را در عیب تك خط-به-زمین تا حد جریان عیب سه فاز محدود کند بیا بید.

۴-۱۲ رئکتانس القایی پیدا شده در مسئله ۳-۱۲، در نقطه خنثای ژنراتور مسئله ۱-۱۲ نهاده شده است. نسبت جریان زیر گذرای خط به ازای عیبهای زیر را به جریان زیر گذرای خط به ازای عیب سه فاز بیا بید: (الف) عیب تك خط-به-زمین، (ب) عیب خط-به-خط، (ج) عیب دو خط-به-زمین.

۵-۱۲ چه مقاومت اهمی در اتصال نقطه خنثای ژنراتور مسئله ۱-۱۲، جریان زیر گذرای خط در عیب تك خط-به-زمین را تا حد جریان عیب سه فاز محدود خواهد کرد؟

۶-۱۲ مقادیر نامی و رئکتانسهای يك ژنراتور عبارت اند از 100 MVA ، 20 kV ، $X_0 = 5\%$ ، $X'' = X_1 = 20\%$. نقطه خنثای آن از طریق يك رئکتانس 32Ω به زمین شده است. ژنراتور بی بار در ولتاژ نامی کار می کند و هنگامی که عیب تک خط-به-زمین در سرهای آن رخ می دهد از سیستم جدا می شود. جریان زیر گذرای فاز معیوب را بیابید.

۷-۱۲ يك ژنراتور توربینی 100 MVA ، 18 kV دارای $X'' = X_1 = 20\%$ و $X_0 = 5\%$ در شرف اتصال به يك سیستم قدرت است. ژنراتور در نقطه خنثی دارای رئکتانس محدود کننده جریان 162Ω است. پیش از اتصال ژنراتور به سیستم وقتی ولتاژش در 16 kV تنظیم می شود عیب دو خط-به-زمین در سرهای b و c روی می دهد. جریان مؤثر متقارن ابتدایی در زمین و در خط b بیابید.

۸-۱۲ رئکتانسهای يك ژنراتور با مقادیر نامی 100 MVA ، 20 kV عبارت اند از $X_0 = 5\%$ ، $X'' = X_1 = 20\%$. ژنراتور به يك ترانسفورماتور مثلث-ستاره ای با مقادیر نامی 100 MVA ، $20 \text{ kV} / 230 \text{ Y kV}$ ، و رئکتانس 10% وصل شده و نقطه خنثای ترانسفورماتور مستقیماً زمین شده است. وقتی عیب تک خط-به-زمین در طرف مدار باز و فشار قوی ترانسفورماتور رخ می دهد، ولتاژ سر ژنراتور برابر 20 kV است. جریان مؤثر متقارن ابتدایی همه فازهای ژنراتور را بیابید.

۹-۱۲ يك ژنراتور، موتوری را از طریق يك ترانسفورماتور ستاره-مثلثی تغذیه می کند. ژنراتور به طرف ستاره ای ترانسفورماتور وصل شده است. عیبی بین ترانسفورماتور و سرهای موتور رخ می دهد. مؤلفه های متقارن جریان زیر گذرای موتور و ترانسفورماتور - گذرنده به طرف عیب - بر حسب در-يك، به ترتیب عبارت اند از

$$I_{a1} = -0.8 - j2.6 \quad I_{a2} = -j2.0 \quad I_{a0} = -j3.0$$

$$I_{a1} = 0.8 - j0.4 \quad I_{a2} = -j1.0 \quad I_{a0} = 0$$

هم برای موتور و هم برای ژنراتور فرض کنید $X'' = X_1$. نوع عیب را توصیف کنید. جریان پیش از عیب خط a ، جریان زیر گذرای عیب، و جریان زیر گذرای هر فاز ژنراتور را بر حسب در-يك بیابید.

۱۰-۱۲ جریانهای زیر گذرای همه قسمت های سیستم مثال ۶-۱۲ را با صرف نظر کردن از جریان پیش از عیب هر گاه نوع عیب در طرف فشار-ضعیف ترانسفورماتور، عیب خط-به-خط باشد حساب کنید.

۱۱-۱۲ مسئله ۱۰-۱۲ را برای عیب دو خط-به-زمین تکرار کنید.

۱۲-۱۲ مقادیر نامی و رئکتانسهای ماشینهای متصل به دو شینه فشار-قوی نشان داده شده در نمودار تک خطی شکل ۱۲-۲۳ عبارت اند از: 100 MVA ، 20 kV ، $X'' = X_1 = 20\%$.

و $X_0 = 4\%$. هر ترانسفورماتور سه فاز دارای مقادیر نامی 100 MVA ، $345 \text{ Y}/20 \Delta \text{ kV}$ و رثکتانس نشت 8% است. رثکتانسهای خط انتقال بر مبنای 100 MVA ، 345 kV عبارت اند از $X_1 = X_2 = 5\%$ و $X_0 = 15\%$. ماتریس 2×2 امپدانس شینه را برای هر کدام از سه شبکه ترتیبی بیابید. اگر جریانی از شبکه نمی گذرد، جریان زیر گذر را به سه طرف زمین برای عیب دو خط به زمین در خطهای C و B شینه (۱) بیابید. کار را برای عیب در شینه ۲ تکرار کنید. وقتی عیب در شینه ۲ است اگر خطوط طوری نامگذاری شوند که V_{A1} و V_{A2} به اندازه 90° اختلاف فاز داشته باشند، جریان فاز b ماشین ۲ را بیابید. اگر فازها طوری نامگذاری شوند که I_{A1} نسبت به I_{A2} به اندازه 30° پیش افت داشته باشد، کدام فاز (a ، یا b ، یا c) ماشین ۲، جریان به دست آمده فوق را برای فاز b را از خود عبور می دهد؟



شکل ۱۲-۲۳ مدار مسئله ۱۲-۱۲.

۱۲-۱۳ دو ژنراتور G_1 و G_2 از طریق ترانسفورماتورهای T_1 و T_2 به یک شینه فشار قوی که یک خط انتقال را تغذیه می کند، وصل شده اند. خط در نقطه F واقع در انتهای خود که عیب در آن رخ می دهد، مدار باز است. ولتاژ پیش از عیب در نقطه F برابر 515 kV است. مقادیر نامی و رثکتانسها عبارت اند از:

$$G_1 : 1000 \text{ MVA}, 20 \text{ kV}, X_s = 10\%, X'' = X_r = 1\%, X_0 = 5\%$$

$$G_2 : 800 \text{ MVA}, 22 \text{ kV}, X_s = 12\%, X'' = X_r = 15\%, X_0 = 8\%$$

$$T_1 : 1000 \text{ MVA}, 500 \text{ Y}/20 \Delta \text{ kV}, X = 17.5\%$$

$$T_2 : 800 \text{ MVA}, 500 \text{ Y}/22 \text{ Y kV}, X = 16.0\%$$

$$\text{خط} : (500 \text{ kV}, 1500 \text{ MVA}) \quad X_1 = 15\%, X_0 = 40\%$$

نقطه خنثای G_1 از طریق رثکتانس 0.4Ω به زمین شده و نقطه خنثای G_2 زمین نشده است. نقاط خنثای همه ترانسفورماتورها مستقیماً زمین شده اند. در خط انتقال، مبنای 1000 MVA ، 500 kV را به کار ببرید. از جریان پیش از عیب صرف نظر کنید و به فرض آنکه در T_1 ، V_{A1} نسبت به V_{A2} به اندازه 90° پیش افت داشته باشد مطلوب است تعیین مقدار زیر گذرای (الف) جریان فاز c ژنراتور G_1 به ازای عیب سه فاز در F ، (ب) جریان فاز B در محل F به ازای عیب خط به خط در خطهای B و C ، (ج) جریان فاز

A در محل F به ازای عیب خط-به-زمین در خط A، و (د) جریان فاز c از G_p به ازای عیب خط-به-زمین در خط A.

۱۲-۱۴ برای شبکه شکل ۱۵-۱۸، جریان زیر گذرا را بر حسب در-یک (الف) در عیب تک خط-به-زمین در شینه ۲ و (ب) در فاز معیوب خط ۱-۲ بیابید. فرض کنید پیش از عیب، هیچ جریانی نمی گذرد و ولتاژ پیش از عیب همه شینه ها 100 pu است. هر دو ژنراتور اتصال ستاره دارند. ترانسفورماتورها در دو انتهای خط انتقالهای سیستم واقع اند و اتصال آنها Y/Y با نقطه خنثای زمین شده است. به استثنای اینکه ترانسفورماتورهای وصل کننده خطها به شینه ۳، اتصال ستاره-مثلثی دارند که نقطه خنثای ستاره مستقیماً زمین شده و طرف مثلثی آنها به شینه ۳ وصل شده است. رثکتانس همه خطوطی که در شکل ۱۵-۱۸ بین شینه ها دیده می شوند رثکتانس ترانسفورماتورها را نیز شامل اند. مقدار رثکتانسهای ترتیب-صفر این خطها به انضمام ترانسفورماتورها، 20 برابر مقدار شکل ۱۵-۱۸ است. رثکتانسهای ترتیب-صفر ژنراتورهای متصل به شینه های ۱ و ۳ به ترتیب $pu \ 0.04$ و $pu \ 0.08$ است. نقطه خنثای ژنراتور شینه ۱ از طریق یک رثکتانس $pu \ 0.02$ به زمین وصل شده است و نقطه خنثای ژنراتور شینه ۳ زمین شده نیست.

۱۲-۱۵ جریان زیر گذرا را برای عیب خط-به-خط در شینه ۲ از شبکه مثال ۸-۱، بر حسب در-یک بیابید. از مقاومت و جریان پیش از عیب صرف نظر کنید، ولتاژ همه شینه ها را پیش از وقوع عیب 100 در نظر بگیرید، و از محاسبات مثال ۱۵-۴ استفاده کنید. جریان خطهای ۱-۲ و ۲-۳ را نیز بیابید. فرض کنید خطهای ۱-۲ و ۲-۳ نه از طریق ترانسفورماتور بلکه مستقیماً به شینه ۲ وصل شده اند و رثکتانسهای ترتیب-مثبت و منفی را نیز مساوی بگیرید.