

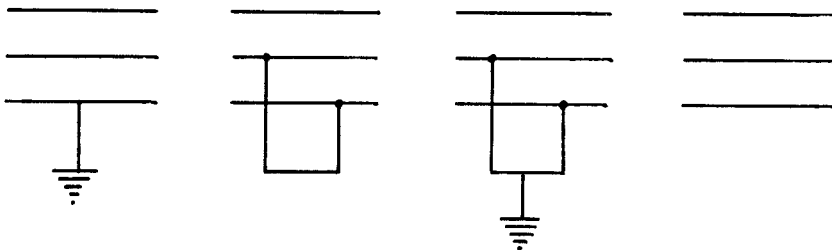
فصل هشتم

اتصال کوتاه نامتقارن

۸-۱ مقدمه

در اتصال کوتاه متقارن، سه فاز همزمان بیکدیگر وصل می‌شوند و سیستم حالت تقارن خود را حفظ می‌کند. بهمین دلیل در محاسبات مربوط به این نوع اتصال کوتاه، مدار معادل یک فاز سیستم را مورد مطالعه قرار دادیم. در یک سیستم متقارن جمع جریانهای سه فاز در همه زمانها برابر صفر بوده و جریانی بین نقاط صفر ژنراتورها و ترانسفورماتورها با زمین برقرار نمی‌شود. عدم وجود این جریان باعث می‌شود تا ولتاژ تمام نقاط صفر سیستم با پتانسیل زمین برابر باشند که این ولتاژها را برابر صفر فرض می‌کنیم. در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت در شرایط عادی سعی بر آن است تا بارهای برنامه‌ریزی شده شرایط تقارن را برای سیستم ایجاد کنند.

عدم تقارن در یک سیستم قدرت، بر اثر عواملی نظیر اتصال کوتاه‌های نامتقارن و یا گسیختگی هادیهای خطوط انتقال پدید می‌آید. در شکل (۸-۱) بعضی از این خطاهای نامتقارن نشان داده شده‌اند. در این شکل خطاها با امپدانس صفر در نظر گرفته شده‌اند، لیکن اغلب اتصال کوتاه‌ها در سیستم قدرت از طریق امپدانس‌های غیر صفر بوجود می‌آیند.



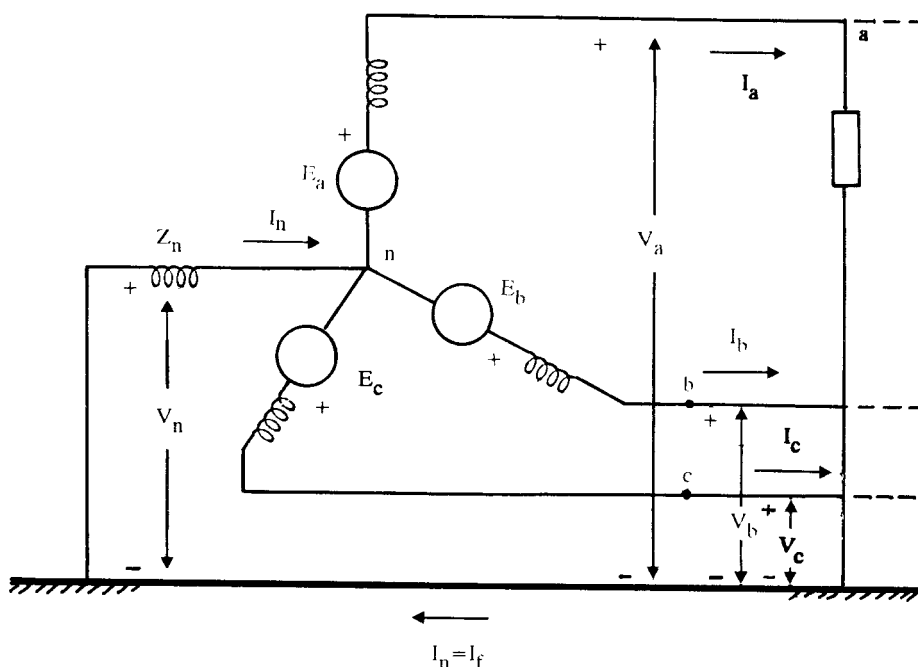
شکل ۸-۱: بعضی از انواع خطاهای نامتقارن

در یک سیستم نامتقارن، جریان‌ها در سه فاز و همچنین ولتاژها، دارای تقارن نیستند. بنابراین نمی‌توان سیستم را با یک فاز مطالعه نمود. جمع جریانهای نامتقارن سه فاز صفر نبوده و لذا جریان I_n بین نقاط صفر سیستم برقرار می‌گردد. بعنوان مثال یک ژنراتور سه فاز را در نظر بگیرید که اتصال کوتاه یک فاز به زمین^(۱) در آن منجر به عبور جریان اتصال کوتاه I_f در فاز a گردد (شکل ۸-۲). نقطه صفر ژنراتورها معمولاً با یک راکتانس به زمین وصل می‌شود که آنرا در شکل (۸-۲) با Z_n نشان داده‌ایم. جریان خطا در این شکل برابر است با:

$$I_f = I_n = I_a + I_b + I_c \quad (۸-۱)$$

با توجه به این که پتانسیل زمین برابر صفر منظور می‌شود، پتانسیل نقطه صفر ژنراتور برابر است با:

$$V_n = -Z_n I_n \quad (۸-۲)$$



شکل ۸-۲: عبور جریان بین نقاط صفر در سیستم نامتقارن

ولتاژهای هر فاز نسبت به نقطه صفر، که ولتاژهای فازی نامیده می‌شوند، با V_a ، V_b و V_c نشان داده شده‌اند. برای مثال برای فاز a داریم:

$$V_{an} = V_a - V_n = V_a + Z_n I_n$$

۲-۸ معرفی مؤلفه‌های متقارن

در سال ۱۹۱۸ یکی از قویترین ابزار محاسبات شبکه‌های متقارن توسط Fortesque معرفی گردید، و از آن بعد روش مؤلفه‌های متقارن از اهمیت خاصی در محاسبات شبکه‌ها برخوردار گردید.

در روش مؤلفه‌های متقارن اثبات می‌شود که یک سیستم سه‌فاز نامتقارن به سه سیستم برداری سه فاز متقارن قابل تجزیه است. مؤلفه‌های این سه سیستم متقارن عبارتند از: الف) مؤلفه‌های توالی مثبت^(۱) شامل سه بردار که از نظر قدر مطلق برابر بوده، زاویه‌های فاز آنها نسبت به یکدیگر ۱۲۰ درجه اختلاف داشته و توالی فاز این مؤلفه‌ها با سیستم اصلی یکسان است، یعنی توالی فاز بصورت abc می‌باشد. توالی فاز مثبت (abc) به این مفهوم است که V_b نسبت به V_a بمیزان ۱۲۰ درجه عقب‌تر است و بردار V_c نیز نسبت به V_b به اندازه ۱۲۰ درجه تأخیر فاز دارد.

ب) مؤلفه‌های توالی منفی^(۲) شامل سه بردار که از نظر قدر مطلق برابر بوده، زاویه‌های فاز آنها نسبت به یکدیگر ۱۲۰ درجه اختلاف داشته و توالی فاز این مؤلفه‌ها برعکس سیستم اصلی است، یعنی توالی فاز (acb) می‌باشد.

ج) مؤلفه‌های توالی صفر^(۳) شامل سه بردار که از نظر قدر مطلق برابر بوده و اختلاف زاویه فاز آنها نسبت به یکدیگر صفر است.

اگر بردارهای ولتاژهای یک سیستم نامتقارن را با V_a ، V_b و V_c نشان دهیم، این سه بردار نامتقارن را می‌توان به سه سیستم برداری متقارن سه‌فاز تبدیل نمود. بردارهای مؤلفه‌های متقارن سیستم‌های توالی مثبت، منفی و صفر را با اندیس اضافی نشان می‌دهیم. بردارهای V_{b+} ، V_{a+} و V_{c+} مربوط به سیستم توالی مثبت، بردارهای V_{b-} ، V_{a-} و V_{c-} مربوط به سیستم توالی منفی و بردارهای V_{a0} ، V_{b0} و V_{c0} مربوط به سیستم توالی صفر می‌باشند. برای اینکه بردارهای سیستم اصلی به مؤلفه‌های متقارن قابل تجزیه باشند، داریم:

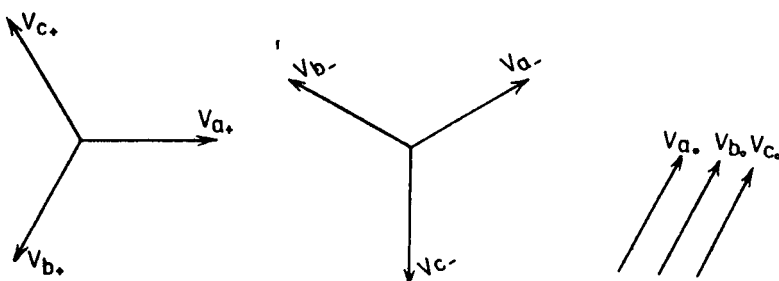
$$V_a = V_{a_0} + V_{a+} + V_{a-}$$

$$V_b = V_{b_0} + V_{b+} + V_{b-}$$

$$V_c = V_{c_0} + V_{c+} + V_{c-}$$

(۸-۳)

شکل (۸-۳) مؤلفه‌های این سه سیستم متقارن را نشان می‌دهد:



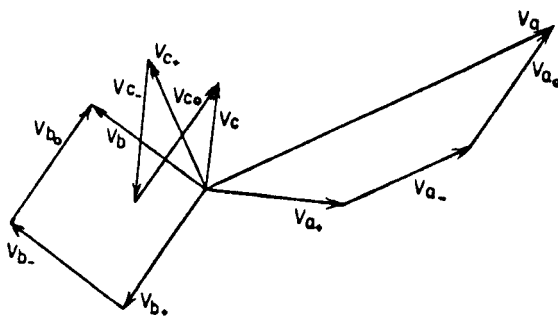
توالی مثبت

توالی منفی

توالی صفر

شکل ۸-۳: مؤلفه‌های سیستم‌های توالی مثبت، منفی و صفر

اگر بردارهای شکل (۸-۳) را ترکیب نمائیم، با توجه به معادله (۸-۳) بردارهای اصلی سیستم یعنی V_a ، V_b و V_c بدست می‌آیند. شکل (۸-۴) ترکیب بردارهای مؤلفه‌های متقارن را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۴: ولتاژهای اصلی سیستم و مؤلفه‌های آنها

برای نشان دادن رابطه بین بردارهای یک سیستم توالی، عدد مختلط $a = 1 \angle 120^\circ$ را معرفی می‌کنیم. a برداری است که در هر برداری ضرب شود آنرا 120° درجه جلو می‌اندازد. بنابراین فازهای b و c را در سیستم‌های توالی مثبت و منفی می‌توان برحسب فاز a آن توالی نوشت. روابط زیر اطلاعات بیشتری در مورد این عدد مختلط بدست می‌دهند:

$$a = 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = 1 \angle -120^\circ = -0.5 - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

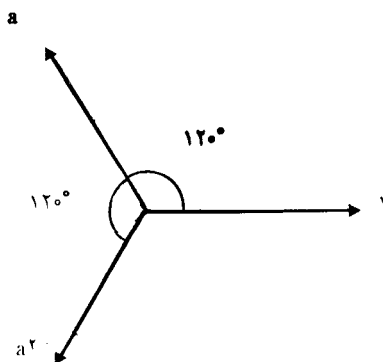
$$a^3 = 1 \angle 360^\circ = 1 \angle 0^\circ = 1$$

$$a^4 = a$$

$$a^* = a^2$$

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

شکل (۸-۵) نمایش بردارهای a ، a^2 و 1 را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۵: نمایش بردارهای a ، a^2 و 1

حال روابط ولتاژهای فازهای b و c را در سیستم‌های توالی برحسب ولتاژ فاز a بشرح زیر می‌توان نوشت:

$$V_{b+} = a^2 V_{a+} \quad V_{c+} = a V_{a+}$$

$$V_{b-} = a V_{a-} \quad V_{c-} = a^2 V_{a-}$$

$$V_{b0} = V_{a0} \quad V_{c0} = V_{a0}$$

(۸-۴)

روابط فوق را در معادله (۸-۳) جایگزین می‌کنیم تا V_a ، V_b و V_c برحسب V_{a+} ، V_{a-} و $V_{a\cdot}$ بدست آیند:

$$V_a = V_{a\cdot} + V_{a+} + V_{a-}$$

$$V_b = V_{a\cdot} + a^2 V_{a+} + a V_{a-}$$

$$V_c = V_{a\cdot} + a V_{a+} + a^2 V_{a-}$$

این سه رابطه را بصورت ماتریسی می‌نویسیم:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a\cdot} \\ V_{a+} \\ V_{a-} \end{bmatrix} \quad (8-5)$$

و یا:

$$V = AV_s \quad (8-6)$$

که در آن:

$$V = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad V_s = \begin{bmatrix} V_{a\cdot} \\ V_{a+} \\ V_{a-} \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (8-7)$$

اگر رابطه (۸-۶) را برحسب V_s حل کنیم، خواهیم داشت:

$$V_s = A^{-1} V \quad (8-8)$$

در این معادله A^{-1} از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (8-9)$$

بنابراین معادله (۸-۷) این چنین نوشته می‌شود:

$$\begin{bmatrix} V_{a\cdot} \\ V_{a+} \\ V_{a-} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (8-10)$$

معادلات (۸-۵) و (۸-۶) ولتاژهای اصلی سیستم را برحسب مؤلفه‌های متقارن، و معادلات (۸-۸) و (۸-۱۰) مؤلفه‌های متقارن را برحسب بردارهای اصلی سیستم نشان می‌دهند. اگر بجای ولتاژها، جریان‌های خطی سیستم را بکار ببریم، داریم:

$$I = AI_s \quad (۸-۱۱)$$

$$I_s = A^{-1}I \quad (۸-۱۲)$$

که در آنها:

$$I = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad I = \begin{bmatrix} I_{a+} \\ I_{a-} \end{bmatrix} \quad (۸-۱۳)$$

از این ببعد برای سهولت، در بردارهای I_s و V_s اندیس a را حذف می‌کنیم و آنها را به اینصورت نمایش می‌دهیم:

$$I_s = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix} \quad V_s = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_+ \\ V_- \end{bmatrix} \quad (۸-۱۴)$$

۸-۲-۱ بررسی وجود مؤلفه‌های توالی صفر

در بسیاری از موارد مؤلفه‌های توالی صفر وجود ندارند و سیستم برداری نامتقارن به دو سیستم متقارن توالی مثبت و توالی منفی تجزیه می‌شود. ابتدا مؤلفه‌های توالی صفر را در جریان‌های خطی یک سیستم سه فاز بررسی می‌کنیم. با توجه به رابطه (۸-۱۲) داریم:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

جریان توالی صفر (I_0) را از این معادله بدست می‌آوریم:

$$I_0 = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \quad (8-15)$$

این رابطه نشان می‌دهد که اگر مجموع جریان‌های خطی در یک سیستم نامتقارن صفر باشد مؤلفه‌های توالی صفر وجود نخواهند داشت. اگر برای سه فاز سیستم مسیر برگشت وجود نداشته باشد مجموع جریانهای سه فاز اجباراً صفر شده و جریان‌های توالی صفر وجود نخواهند داشت، ولی اگر از نقطه صفر سیستم مسیر برگشت وجود داشته باشد مجموع جریان سه فاز برابر جریان برگشت خواهد بود و لذا جریان توالی صفر وجود خواهد داشت. برای مثال در شکل (۸-۲) جمع جریانهای I_a ، I_b و I_c از مسیر برگشت Z_n عبور می‌کند که مقدار آن (I_n) با جمع جریان‌های سه فاز برابر است. بنابراین مؤلفه توالی صفر جریان عبارتست از:

$$I_0 = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3} I_n$$

حال به بررسی ولتاژهای خطی می‌پردازیم. ولتاژهای خطی سیستم اصلی عبارتند از:

$$V_L = \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix}$$

مؤلفه‌های متقارن این ولتاژها را می‌توان به این صورت نوشت:

$$V_{Ls} = \begin{bmatrix} V_{ab+} \\ V_{ab-} \end{bmatrix}$$

رابطه بین دو بردار اخیر عبارتست از:

$$V_{Ls} = A^{-1} V_L$$

$$\begin{bmatrix} V_{ab+} \\ V_{ab-} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad \text{و یا:}$$

و از آنجا:

$$V_{ab+} = \frac{1}{3} (V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}) \quad (8-16)$$

از آنجائیکه جمع ولتاژهای خطی یک سیستم همیشه برابر صفر است، لذا ولتاژهای خطی یک سیستم فاقد مؤلفه‌های توالی صفر می‌باشند.

۸-۲-۲ رابطه ولتاژها و جریان‌های خطی و فازی

قبلاً رابطه ولتاژهای خطی و فازی را در اتصال ستاره، و جریان‌های خطی و فازی را در اتصال مثلث برای سیستم اصلی (که دارای توالی مثبت است) دیده‌ایم. این روابط بشرح زیر می‌باشند:

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_a \angle 30^\circ \quad \text{اتصال ستاره} \quad (8-17)$$

$$I_a = \sqrt{3} I_{ab} \angle -30^\circ \quad \text{اتصال مثلث} \quad (8-18)$$

که در آنها V_{ab} و I_a بترتیب ولتاژ و جریان خطی، و V_a و I_{ab} ولتاژ و جریان فازی در اتصال مربوطه می‌باشند.

چون توالی فازها در سیستم توالی مثبت با سیستم اصلی یکسان است، لذا روابط مربوطه تغییری نمی‌نمایند. یعنی:

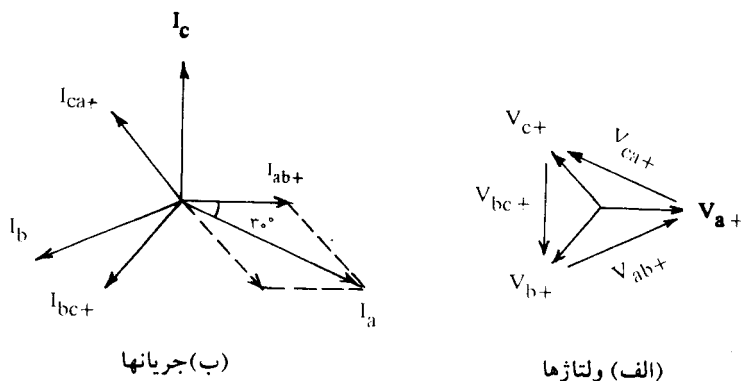
$$V_{ab+} = \sqrt{3} V_{a+} \angle 30^\circ \quad (8-19)$$

$$I_{a+} = \sqrt{3} I_{ab+} \angle -30^\circ \quad (8-20)$$

یعنی در سیستم توالی مثبت، ولتاژهای خطی $\sqrt{3}$ برابر ولتاژهای فازی بوده و 30° درجه نسبت به آنها تقدم فاز دارند. همچنین جریان‌های خطی $\sqrt{3}$ برابر جریان‌های فازی بوده و 30° درجه نسبت به آنها تأخیر دارند. شکل (۸-۶) دیاگرام بردارهای جریان‌ها و ولتاژها را برای سیستم توالی مثبت نشان می‌دهد.

در سیستم توالی منفی برای تعیین V_{ab-} داریم:

$$\begin{aligned} V_{ab-} &= V_{a-} - V_{b-} = V_{a-} - a V_{a-} = V_{a-} - V_{a-} \angle 120^\circ \\ &= V_{a-} (1 - \cos 120^\circ - j \sin 120^\circ) \\ V_{ab-} &= \sqrt{3} V_{a-} \angle -30^\circ \end{aligned} \quad (8-21)$$



شکل ۸-۶: دیاگرام بردارهای جریانها و ولتاژها در سیستم توالی مثبت

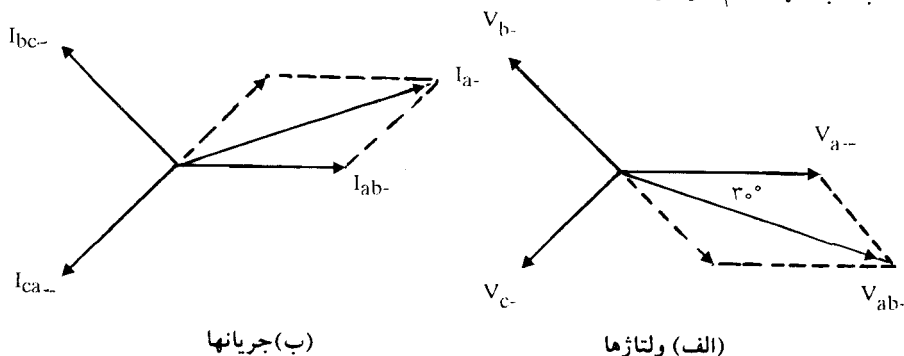
یعنی در سیستم توالی منفی، ولتاژهای خطی $\sqrt{3}$ برابر ولتاژهای فازي بوده و 30° درجه نسبت به آنها تأخیر فاز دارند. شکل (۷-۸ الف) این وضعیت را نشان می‌دهد. در مورد جریان‌های توالی منفی نیز می‌توان بهمین ترتیب عمل نمود. در این سیستم برای تعیین I_{a-} با توجه به شکل (۷-۸ ب) می‌توان نوشت:

$$I_{a-} = I_{ab-} - I_{ca-} = I_{ab-} - a^2 I_{ab-} = I_{ab-} - I_{ab-} \angle -120^\circ$$

و از آنجا:

$$I_{a-} = \sqrt{3} I_{ab-} \angle 30^\circ \quad (8-22)$$

بنابر این جریان‌های خطی سیستم توالی منفی $\sqrt{3}$ برابر جریان‌های فازي آنها بوده و 30° درجه نسبت به آنها تقدم فاز دارند.



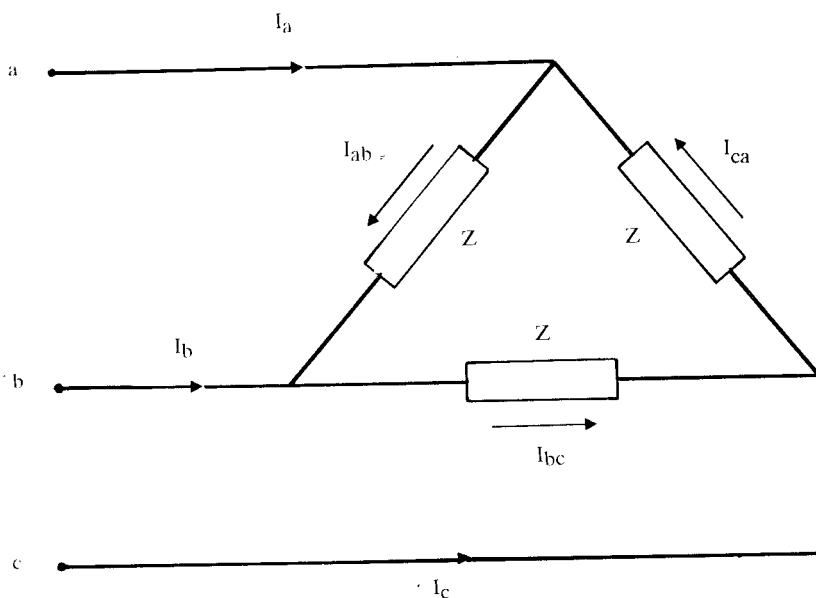
شکل ۸-۷: دیاگرام بردارهای جریانها و ولتاژها در سیستم توالی مثبت

مثال ۸-۱: در یک بار سه فاز متقارن با اتصال مثلث، مطابق شکل (۸-۸)، جریان‌های خطی عبارتند از:

$$I_a = 100 \angle 45^\circ \text{ A}$$

$$I_b = 150 \angle -60^\circ \text{ A}$$

الف) مؤلفه‌های متقارن جریان‌های خطی و جریان‌های فازی را بدست آورید.
ب) جریان‌های فازی را که از امپدانس Z عبور می‌کنند محاسبه کنید.



شکل ۸-۸: مربوط به مثال (۸-۱)

حل:

الف) ابتدا جریان I_c را محاسبه می‌کنیم:

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

$$I_c = -100 \angle 45^\circ - 150 \angle -60^\circ = 157.27 \angle 157.9^\circ \text{ A}$$

خال با استفاده از معادله (۸-۱۲) مؤلفه‌های متقارن جریان‌های خطی را بدست می‌آوریم:

$$I_s = A^{-1} I$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 100 \angle 45^\circ \\ 150 \angle -60^\circ \\ 157/27 \angle 157/9^\circ \end{bmatrix}$$

$$I_0 = 0$$

$$I_+ = 89/94 + j99/0.7 = 133/81 \angle 47/77^\circ \text{ A}$$

$$I_- = -19/22 - j28/36 = 34/26 \angle -124/13^\circ$$

بنابراین مؤلفه‌های سیستم توالی مثبت عبارتند از:

$$I_{a+} = 133/81 \angle 47/77^\circ \text{ A}$$

$$I_{b+} = a^2 I_{a+} = 133/81 \angle 47/77^\circ - 120^\circ = 133/81 \angle -72/23^\circ \text{ A}$$

$$I_{c+} = a I_{a+} = 133/81 \angle 47/77^\circ + 120^\circ = 133/81 \angle 167/77^\circ \text{ A}$$

به‌همین ترتیب مؤلفه‌های سیستم توالی منفی بشرح زیر نوشته می‌شوند:

$$I_{a-} = 34/26 \angle -124/13^\circ \text{ A}$$

$$I_{b-} = a I_{a-} = 34/26 \angle -124/13^\circ + 120^\circ = 34/26 \angle -4/13^\circ \text{ A}$$

$$I_{c-} = a^2 I_{a-} = 34/26 \angle -124/13^\circ - 120^\circ = 34/26 \angle 115/87^\circ \text{ A}$$

جریان‌های توالی نیز صفر هستند.

$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = I_0 = 0$$

در اینجا چون سیم برگشت وجود ندارد و $I_a + I_b + I_c = 0$ ، لذا مؤلفه‌های توالی صفر وجود ندارند.

حال می‌توانیم مؤلفه‌های متقارن جریان‌های فازی را با استفاده از معادلات (۸-۲۰) و

(۸-۲۲) محاسبه کنیم:

$$I_{ab+} = \frac{I_{a+}}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ = \frac{133/81}{\sqrt{3}} \angle 47/77^\circ + 30^\circ = 77/25 \angle 77/77^\circ \text{ A}$$

$$I_{bc+} = a^2 I_{ab+} = 77/25 \angle 77/77^\circ - 120^\circ = 77/25 \angle -42/23^\circ \text{ A}$$

$$I_{ca+} = a I_{ab+} = 77/25 \angle 77/77^\circ + 120^\circ = 77/25 \angle -162/23^\circ \text{ A}$$

$$I_{ab-} = \frac{I_{a-}}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ = \frac{34/26}{\sqrt{3}} \angle -124/13^\circ - 30^\circ = 19/78 \angle -154/13^\circ \text{ A}$$

$$I_{bc-} = a I_{ab-} = 19/78 \angle -154/13^\circ + 120^\circ = 19/78 \angle -34/13^\circ \text{ A}$$

$$I_{ca-} = a^2 I_{ab-} = 19/78 \angle -154/13^\circ - 120^\circ = 19/78 \angle -84/13^\circ \text{ A}$$

ب) جریان‌های فازي I_{ab} ، I_{bc} و I_{ca} با داشتن مقادير I_{ab+} ، I_{ab-} و I_{ab0} بدست می‌آیند:

$$I = A I_s$$

$$\begin{bmatrix} I_{ab} \\ I_{bc} \\ I_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ab0} \\ I_{ab+} \\ I_{ab-} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{ab} \\ I_{bc} \\ I_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 77/25 \angle 77/77^\circ \\ 19/78 \angle 54/13^\circ \end{bmatrix}$$

$$I_{ab} = 66/9 \angle 91/23^\circ \text{ A}$$

$$I_{bc} = 96/87 \angle 40/6^\circ \text{ A}$$

$$I_{ca} = 72/24 \angle -176/95^\circ \text{ A}$$

۳-۸ قدرت برحسب مؤلفه‌های متقارن

اگر مؤلفه‌های متقارن جریان و ولتاژ معلوم باشند، قدرت جاری در یک مدار سه فاز مستقیماً از این مؤلفه‌ها قابل تعیین است. قدرت مختلطی که از خطوط a ، b و c عبور میکند برابر است با:

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

و یا:

$$S = V^T I^*$$

اگر $V = AV_s$ و $I = AI_s$ را در رابطه اخیر جایگزین کنیم، داریم:

$$S = (AV_s)^T (AI_s)^* = V_s^T A^T A^* I_s^* \quad (۸-۲۳)$$

$$V_s = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_+ \\ V_- \end{bmatrix}, \quad I_s = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix} \quad \text{که در آن:}$$

حاصلضرب $A^T A^*$ را در رابطه (۸-۲۳) بدست می‌آوریم:

$$A^T A^* = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} = 3 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

با جایگزین کردن این مقدار در رابطه (۸-۲۳) خواهیم داشت:

$$S = \begin{bmatrix} V_0 & V_+ & V_- \end{bmatrix} 3 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix}^*$$

$$S = 3 \begin{bmatrix} V_0 & V_+ & V_- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix}^* = 3 V_s^T I_s^*$$

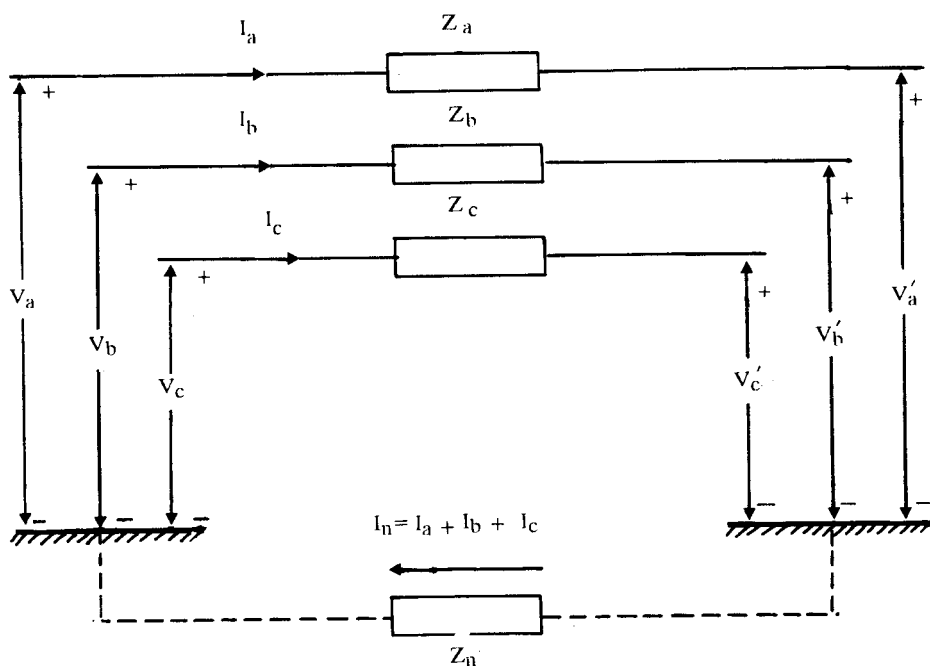
و یا:

$$S = 3 (V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^*) \quad (۸-۲۴)$$

بنابراین قدرت مختلط در یک سیستم نامتقارن را می‌توان برحسب مؤلفه‌های متقارن ولتاژ و جریان بدست آورد.

۴-۸ امپدانس‌های توالی^(۱)

عناصر سیستم‌های قدرت از امپدانس‌های متعادل (متقارن) تشکیل شده‌اند و فقط در شرایط وقوع خطاهای نامتقارن به امپدانس‌های نامتعادل برخورد می‌کنیم. شکل (۸-۹) قسمتی از سیستم با سه امپدانس Z_a ، Z_b و Z_c را نشان می‌دهد. امپدانس مسیر زمین Z_n می‌باشد.



شکل ۸-۹: قسمتی از سیستم قدرت با سه امپدانس نامتعادل

افت ولتاژ دو سر امپدانس‌ها را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$V_{aa'} = Z_a I_a + Z_n(I_a + I_b + I_c)$$

$$V_{bb'} = Z_b I_b + Z_n(I_a + I_b + I_c)$$

$$V_{cc'} = Z_c I_c + Z_n(I_a + I_b + I_c)$$

و یا به شکل ماتریسی:

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_b + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_c + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

و یا:

$$V = ZI$$

که در آن:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_a + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_b + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_c + Z_n \end{bmatrix}$$

با قرار دادن $V = AV_s$ و $I = AI_s$ در معادله $V = ZI$ خواهیم داشت:

$$AV_s = ZAI_s$$

و از آنجا V_s را بدست می‌آوریم:

$$V_s = A^{-1}ZAI_s \quad (۸-۲۵)$$

از طرفی بین V_s و I_s رابطه زیر برقرار است:

$$V_s = Z_s I_s \quad (۸-۲۶)$$

در اینجا Z_s ماتریس امپدانس مؤلفه‌های متقارن است که می‌خواهیم آنرا بدست آوریم. با

مقایسه روابط (۸-۲۵) و (۸-۲۶) داریم:

$$Z_s = A^{-1}ZA \quad (۸-۲۷)$$

این معادله، رابطه ماتریس امپدانس مؤلفه‌های متقارن (Z_s) را برحسب ماتریس امپدانس سیستم اصلی (Z) نشان می‌دهد. با استفاده از این معادله و جایگزینی مقادیر A ، A^{-1} و Z داریم:

$$Z_s = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_a + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_b + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_c + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

و یا:

$$Z_s = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_a + Z_b + Z_c + aZ_n & Z_a + a^2Z_b + aZ_c & Z_a + aZ_b + a^2Z_c \\ Z_a + aZ_b + a^2Z_c & Z_a + Z_b + Z_c & Z_a + a^2Z_b + aZ_c \\ Z_a + a^2Z_b + aZ_c & Z_a + aZ_b + a^2Z_c & Z_a + Z_b + Z_c \end{bmatrix} \quad (۸-۲۸)$$

اگر امپدانس‌ها مساوی باشند، داریم:

$$Z_a = Z_b = Z_c = Z$$

$$Z_s = \begin{bmatrix} Z + 3Z_n & \cdot & \cdot \\ \cdot & Z & \cdot \\ \cdot & \cdot & Z \end{bmatrix} \quad (۸-۲۹)$$

و لذا می‌توان نوشت:

$$V_s = Z_s I_s$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_+ \\ V_- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z + 3Z_n & \cdot & \cdot \\ \cdot & Z & \cdot \\ \cdot & \cdot & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix}$$

و از آنجا:

$$V_0 = (Z + 3Z_n) I_0 = Z \cdot I_0 \quad (۸-۳۰)$$

$$V_+ = ZI_+ = Z_+I_+ \quad (۸-۳۱)$$

$$V_- = ZI_- = Z_-I_- \quad (۸-۳۲)$$

امپدانس‌های Z_+ و Z_- به ترتیب به امپدانس‌های توالی صفر، مثبت و منفی موسومند. همانطوریکه ملاحظه شود سه رابطه اخیر از یکدیگر مستقل بوده و ولتاژ هر توالی فقط به جریان توالی مربوطه بستگی دارد، در صورتیکه در معادله ولتاژهای اصلی سیستم، ولتاژ هر فاز به جریان هر سه فاز بستگی دارد.

۵-۸ شبکه‌های توالی^(۱)

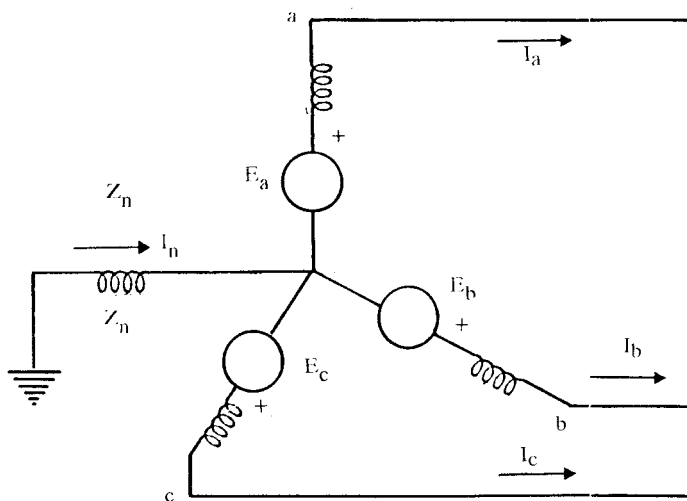
با تبدیل یک سیستم نامتقارن به سه سیستم متقارن، ابتدا بنظر می‌رسد که مطالعه سیستم پیچیده‌تر خواهد شد. لیکن روابط (۸-۳۰)، (۸-۳۱) و (۸-۳۲) نشان می‌دهند که جریان‌های توالی مثبت، منفی و صفر از یکدیگر مستقل بوده و لذا عناصر سیستم یعنی ژنراتورها، ترانسفورماتورها و خطوط انتقال با شبکه‌های توالی مربوط به خودشان تحلیل می‌گردند. استقلال جریان‌های توالی در رابطه قدرت، معادله (۸-۲۴)، نیز منعکس شده است و جملاتی که وابستگی سیستم‌های توالی را نشان دهد (نظیر $V.I^* +$) در آن وجود ندارد.

در بخش (۸-۴) دیدیم که اگر امپدانس‌های عنصری از سیستم، متقارن باشند رابطه افت ولتاژ هر توالی به جریان همان توالی بستگی داشته و امپدانس که در معادله افت ولتاژ و جریان ظاهر می‌شود امپدانس آن توالی نامیده می‌شود. خوشبختانه امپدانس همه عناصر سیستم، نظیر ژنراتورها، ترانسفورماتورها و خطوط انتقال متقارن می‌باشند. با توجه به استقلال روابط سه توالی از یکدیگر و متقارن بودن بردارهای هر توالی، می‌توان برای هر عنصر سیستم مدار معادل یک فاز هریک از توالی‌ها را در محاسبات منظور نمود. با ترکیب مدارهای معادل یک فاز عناصر سیستم برای هر توالی، شبکه آن توالی بدست می‌آید. به این ترتیب بجای دیاگرام امپدانس (که در فصول قبلی ملاک محاسبات بودند) سه شبکه توالی مثبت، منفی و صفر (سه دیاگرام امپدانس) مورد نیاز خواهند بود. هریک از این شبکه‌ها شامل کمیت‌های همان توالی می‌باشد. مثلاً شبکه توالی مثبت شامل ولتاژ توالی مثبت، جریان توالی مثبت، امپدانس توالی مثبت و ... می‌باشد.

لازم به تذکر است که بردارهای نیروهای محرکه الکتریکی ماشین‌های سنکرون دارای توالی مثبت بوده و فقط در شبکه‌های توالی مثبت ظاهر می‌شوند.

۸-۶ شبکه‌های توالی ژنراتور سنکرون بی‌بار

شکل (۸-۱۰) یک ژنراتور سنکرون را که نقطه صفر آن توسط یک راکتور زمین شده‌است نشان می‌دهد. هنگامی که اتصال کوتاه در سیستم بوقوع می‌پیوندد (در شکل نشان داده نشده‌است)، جریان‌های I_a ، I_b و I_c در ژنراتور ایجاد خواهند شد، و اگر اتصال کوتاه به زمین مربوط باشد جریانی که بطرف نقطه صفر ژنراتور جاری است با I_n مشخص می‌گردد. ممکن است در انواع اتصال کوتاه‌ها، یک یا دو خط خروجی ژنراتور دارای جریان صفر باشند، ولی در هر صورت بردار جریان‌ها قابل تجربه به مؤلفه‌های متقارن می‌باشند.



شکل ۸-۱۰: مدار معادل سه فاز ژنراتور سنکرون

ژنراتور سنکرون طوری طراحی می‌شود که ولتاژهای سه فاز متقارن ایجاد کند، لذا ولتاژهای داخلی تولید شده، دارای توالی مثبت هستند. بنابراین شبکه توالی مثبت شامل نیروی محرکه ژنراتور است که با امیدانس توالی مثبت آن سری می‌باشد. شبکه‌های توالی منفی و صفر فاقد نیروی محرکه بوده و بترتیب فقط شامل امیدانس‌های توالی منفی و صفر هستند. مسیر مؤلفه‌های توالی جریان، در دیاگرام‌های شکل (۸-۱۱ الف) نشان داده شده‌اند. هریک از این جریان‌ها فقط از توالی مربوط به خودشان عبور می‌کنند. شبکه‌های توالی مثبت، منفی و صفر این دیاگرام‌ها نیز در شکل (۸-۱۱ ب) رسم شده‌اند. این شکل مدارهای معادل یک فاز هر یک از شبکه‌های توالی را نشان می‌دهد.

شین مرجع^(۱) (نقطه صفر) برای شبکه‌های توالی مثبت و منفی، نقطه صفر ژنراتور (n) می‌باشد. از آنجائیکه شبکه‌های فوق متقارن هستند و جمع جریان‌های آنها صفر است، جریانی از راکتور Z_n عبور نمی‌کند و لذا نقطه n با زمین هم پتانسیل خواهد بود.

شکل (۸-۱۱ الف) نشان می‌دهد جریان عبوری از Z_n برابر $3I_0$ بوده و افت ولتاژ در امپدانس توالی صفر از نقطه a تا زمین برابر $I_0 Z_g - 3I_0 Z_n$ است، که در آن Z_g امپدانس توالی صفر ژنراتور می‌باشد. بنابراین شبکه توالی صفر که فقط باید حامل جریان توالی صفر باشد مطابق شکل (۸-۱۱ ب) دارای امپدانس $3Z_n + Z_g$ است. کل امپدانس توالی صفر که جریان I_0 از آن عبور می‌کند عبارتست از:

$$Z_0 = 3Z_n + Z_g \quad (۸-۳۳)$$

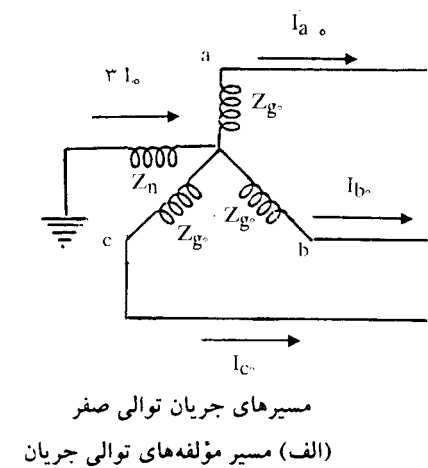
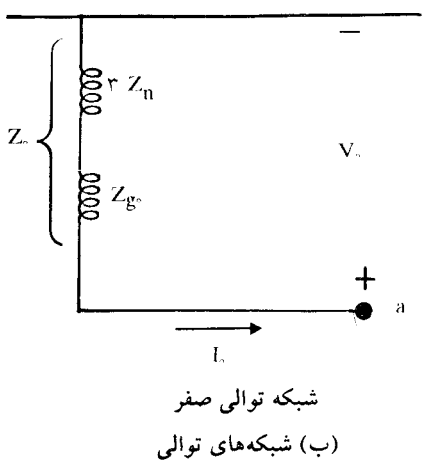
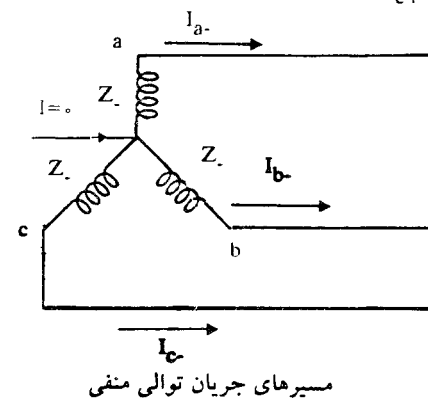
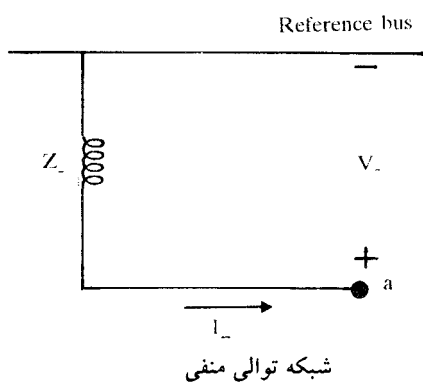
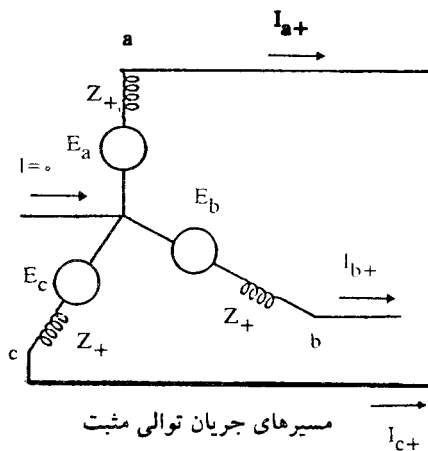
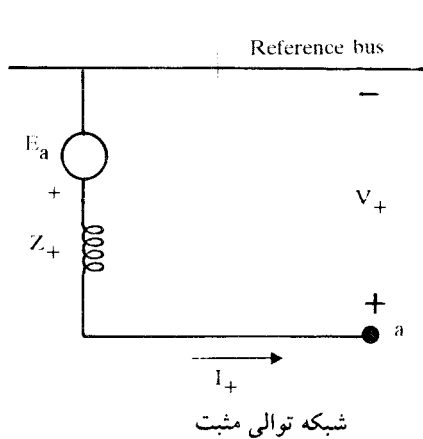
حال می‌توان معادلات مؤلفه‌های متقارن ولتاژها را برحسب جریان‌ها برای فاز a با توجه به شکل (۸-۱۱ ب) بصورت زیر نوشت:

$$V_+ = E_a - Z_+ I_+ \quad (۸-۳۴)$$

$$V_- = - Z_- I_- \quad (۸-۳۵)$$

$$V_0 = - Z_0 I_0 \quad (۸-۳۶)$$

که در آنها E_a ولتاژ بی‌باری توالی مثبت نسبت به نقطه صفر، Z_+ و Z_- بترتیب امپدانس‌های توالی مثبت و منفی ژنراتور، و Z_0 امپدانس کل توالی صفر، طبق رابطه (۸-۳۳) می‌باشند. معادلات فوق‌الذکر نقطه شروع محاسبات برای تعیین مؤلفه‌های جریان در انواع اتصال کوتاه‌ها می‌باشند.



شکل ۱۱-۸: مسیر مؤلفه‌های توالی جریان و شبکه‌های توالی مربوطه

اگر ژنراتور تحت شرایط متقارن کار کند، توالی ولتاژها و جریانهای سه فاز آن مثبت بوده و میدان دوار نسبت به رتور ساکن می باشد. بنابراین بر اثر عبور جریان توالی مثبت از ژنراتور امپدانس های توالی مثبت ماشین، بستگی به جریان اتصال کوتاه مورد نظر، عبارتند از:

$$Z_+ = jX_d \quad \text{حالت ماندگار}$$

$$Z_+ = jX'_d \quad \text{حالت گذرا}$$

$$Z_+ = jX''_d \quad \text{حالت زیرگذرا}$$

روش محاسبه و اندازه گیری امپدانس های توالی منفی و صفر در کتب ماشین های الکتریکی آمده است و از بحث این کتاب خارج است. جدول (۷-۱) مقادیر عمومی راکتانس های توالی منفی و صفر ماشین های الکتریکی را نشان می دهد. با کمی دقت در جدول مذکور ملاحظه می شود که راکتانس توالی منفی ماشین ها (X_-) تقریباً با راکتانس توالی مثبت آنها (X''_d) برابر است.

۷-۸ امپدانس های توالی در خطوط انتقال و ترانسفورماتورها

روابط (۸-۳۰)، (۸-۳۱) و (۸-۳۲) نشان می دهند که اگر بین فازهای یک عنصر غیر فعال^(۱) کوپلاژ مغناطیسی وجود نداشته باشد، رابطه بین جریان و ولتاژ هریک از توالی ها مستقل از توالی های دیگر است. در درس بررسی سیستم های قدرت ۱، هنگامی که اندوکتانس و کاپاسیتانس خطوط انتقال را با توجه به کوپلاژ مغناطیسی فازها بدست می آوریم، فقط از خاصیت متقارن بودن جریان ها استفاده کردیم و ترتیب خاصی برای توالی فازها مورد نظر نبوده است. بنابراین نتایج بدست آمده برای هر دو امپدانس توالی مثبت و منفی صدق می نماید. بعبارت دیگر امپدانس توالی منفی خط انتقال نیز همانند امپدانس توالی مثبت آن با امپدانس خط انتقال برابر است.

هنگامی که از خط انتقال فقط جریان توالی صفر عبور کند، جریان فازها یکسان بوده و جریان برگشت از طریق سیم های زمین^(۲)، خود زمین، و یا هر دو برقرار می گردد. از آنجائیکه جریان توالی صفر در هر سه فاز خط انتقال یکسان می باشد، میدان مغناطیسی ایجاد شده بر اثر آن کاملاً با میدان های مغناطیسی ایجاد شده بر اثر جریان های توالی مثبت و یا منفی متفاوت است. در نتیجه راکتانس القائی توالی صفر یک خط انتقال هوائی با راکتانس توالی مثبت آن متفاوت بوده و حدود ۲ الی ۳/۵ برابر آن است.

امپدانس توالی مثبت ترانسفورماتور همان امپدانس پراکندگی^(۱) آن می‌باشد، و چون ترانسفورماتور نیز مانند خط انتقال یک عنصر ساکن^(۲) (غیر دوار) است، اگر ترتیب فازها از abc به acb تغییر یابد، امپدانس پراکندگی آن تغییری نمی‌کند. در نتیجه امپدانس‌های توالی مثبت و منفی ترانسفورماتور مشابه‌اند، یعنی:

$$Z_{+} = Z_{-} = Z_L \quad (۸-۳۷)$$

اگر جریان‌های توالی صفر از هر دو سیم‌پیچ ترانسفورماتور عبور کنند، امپدانس توالی صفر ترانسفورماتور را خواهیم داشت. اگرچه براساس روابط (۸-۳۰) تا (۸-۳۲) برای یک عنصر غیرفعال سری، امپدانس توالی صفر با امپدانس‌های توالی مثبت و منفی آن متفاوت است، لیکن در محاسبات سیستم‌ها معمولاً امپدانس‌های توالی مثبت، منفی و صفر ترانسفورماتورها را یکسان فرض می‌کنند.

۸-۸ شبکه‌های توالی مثبت و منفی

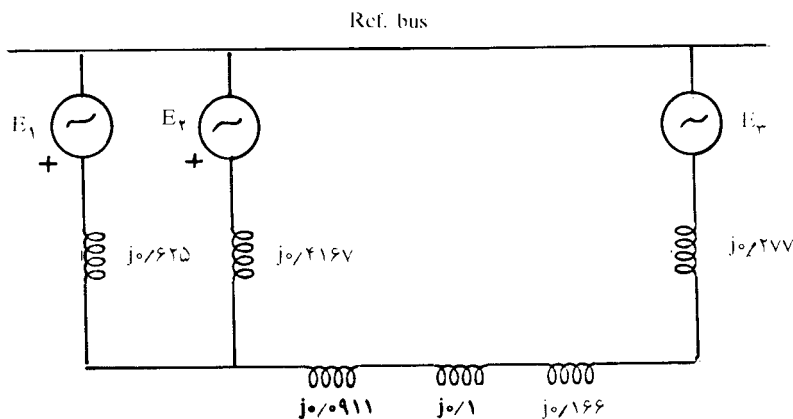
در فصل دوم، نحوه بدست آوردن دیاگرام امپدانس سیستم‌های قدرت را بررسی کردیم. ژنراتورها و موتورهای سنکرون سه فاز در این دیاگرام، با ولتاژ داخلی آنها سری با راکتانس ماشین، معادل‌سازی شده‌اند. نیروهای محرکه ماشینها فقط در شبکه توالی مثبت ظاهر می‌شوند، زیرا توالی آنها abc می‌باشد. راکتانس توالی مثبت ژنراتور و موتور سنکرون نیز همان راکتانس زیرگذرا است. بنابراین شبکه توالی مثبت ماشینهای سنکرون با مدار معادل یک فاز آنها در حالت متقارن کاملاً یکسان است. در بخش (۸-۷) دیدیم که امپدانس توالی مثبت ترانسفورماتورها و خطوط انتقال نیز با امپدانس سری آنها مشابه است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شبکه توالی مثبت یک سیستم قدرت همان دیاگرام امپدانس است که در فصل دوم برای سیستم‌ها بدست آوریم.

امپدانس‌های توالی منفی ژنراتورها، موتورها، ترانسفورماتورها و خطوط انتقال با امپدانس توالی مثبت این عناصر برابر است. لذا برای تعیین شبکه توالی منفی یک سیستم قدرت کافی است نیروهای محرکه را در شبکه توالی مثبت حذف کنیم.

امپدانس موجود بین نقطه صفر ماشینهای سنکرون و زمین در شبکه‌های توالی مثبت و منفی ظاهر نمی‌شود، زیرا جریان توالی مثبت و یا منفی در آن جاری نمی‌باشد.

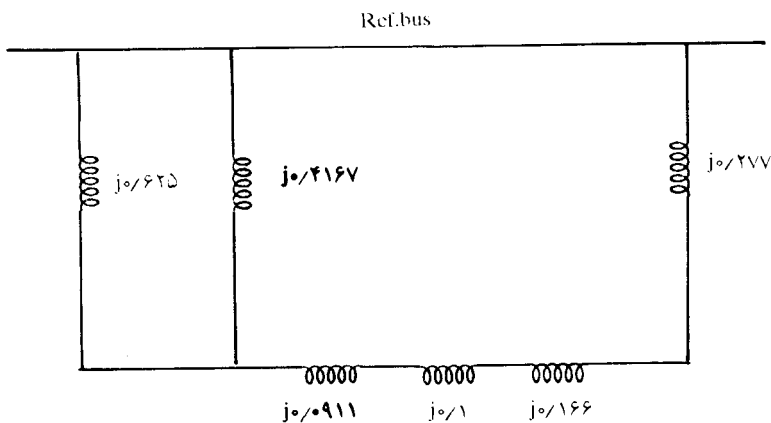
مثال ۸-۲: شبکه‌های توالی مثبت و منفی سیستم قدرت شکل (۲-۳۰)، فصل دوم، مثال (۲-۶)، را رسم کنید. راکتانس‌های توالی منفی هر ماشین را با راکتانس زیرگذرای آن مساوی در نظر بگیرید.

حل: برای قدرت مبنای ۵۰ مگاوات آمپر و راکتانس‌های بدست آمده در مثال (۲-۶)، شبکه توالی مثبت که همان دیاگرام امیدانس است در شکل (۸-۱۲) رسم شده است.



شکل ۸-۱۲: شبکه توالی مثبت مربوط به مثال (۸-۲)

شبکه توالی منفی مشابه شبکه توالی مثبت بوده و در آن نیروهای محرکه E_1 و E_2 و E_3 حذف شده‌اند. شکل (۸-۱۳) شبکه توالی منفی سیستم قدرت شکل (۲-۶) را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۱۳: شبکه توالی منفی مربوط به مثال (۸-۲)

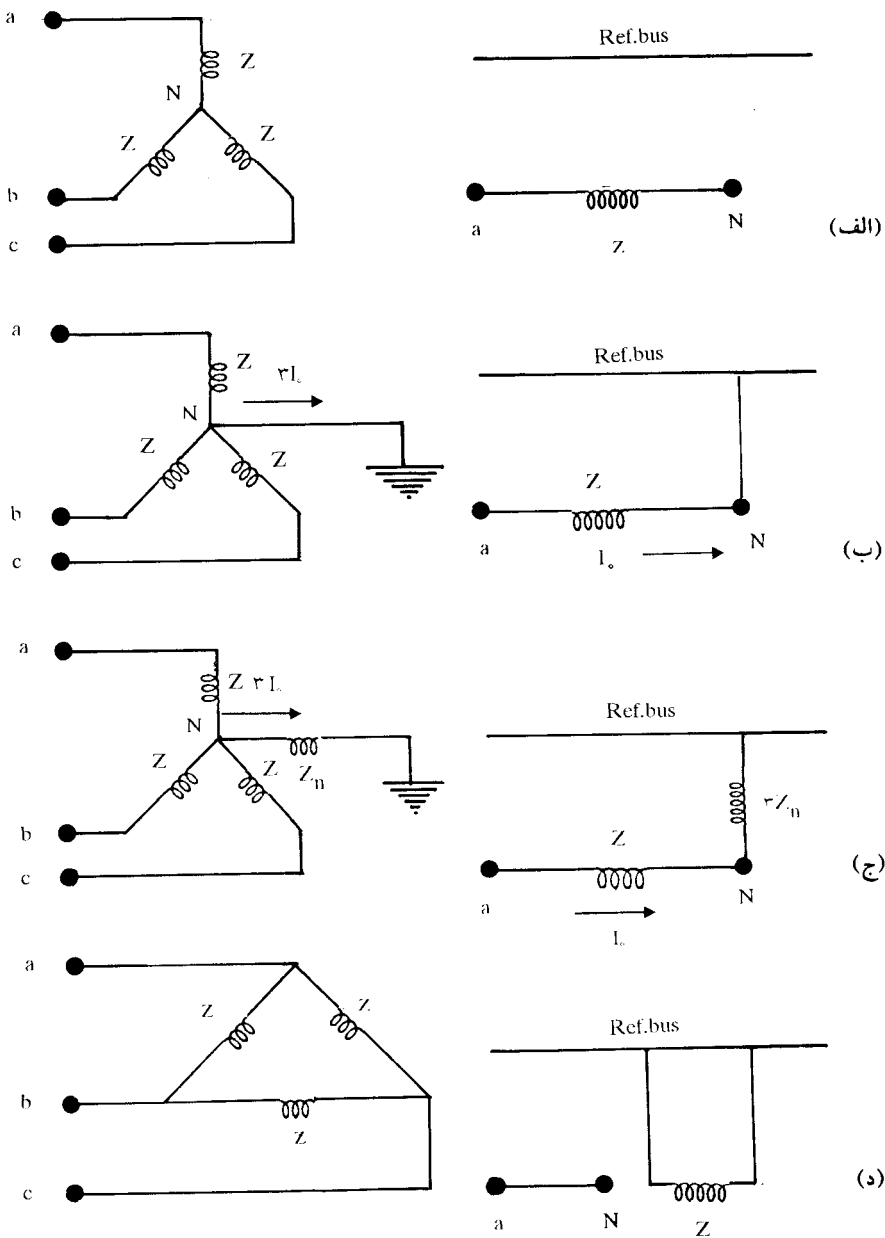
۹-۸ شبکه‌های توالی صفر^(۱)

همانطوریکه دیدیم مرجع ولتاژهای توالی صفر در هر نقطه از سیستم، پتانسیل زمین در آن نقطه می‌باشد. چون قسمتی از جریان توالی صفر از زمین عبور می‌کند، پتانسیل زمین در همه نقاط یکسان نمی‌باشد. امپدانس زمین و سیم‌های زمین در امپدانس توالی صفر خط انتقال منظور می‌شوند، لذا می‌توان ولتاژ همه نقاط سیستم را نسبت به یک شین مرجع (زمین) اندازه‌گیری نمود.

شکل (۸-۱۴ الف) یک مدار ساده با اتصال ستاره را نشان می‌دهد که نقطه صفر آن به زمین و یا نقطه صفر دیگری از سیستم متصل نمی‌باشد. چون جمع جریان‌های سه فاز برابر صفر است، لذا جریان توالی صفر وجود نخواهد داشت. شبکه توالی صفر چنین اتصالی بصورت مدار باز نسبت به زمین در شکل (۸-۱۴ الف) نشان داده شده‌است.

اگر نقطه صفر ستاره زمین شده‌باشد، جریان‌های توالی صفر وجود داشته و شبکه توالی صفر آن مطابق شکل (۸-۱۴ ب) می‌باشد. اگر نقطه صفر از طریق امپدانس Z_n زمین شده‌باشد، جریان عبوری از Z_n معادل $3I_0$ بوده و افت ولتاژ دو سر آن $3Z_n I_0$ خواهد بود. بنابراین در شبکه توالی صفر باید امپدانسی معادل $3Z_n$ بین نقطه صفر و شین مرجع قرار گیرد (شکل ۸-۱۴ ج). نقطه صفر ژنراتورها معمولاً از طریق یک راکتور زمین می‌شود. در اینصورت امپدانس مذکور مشابه این روش در شبکه توالی صفر منظور می‌گردد.

در یک مدار با اتصال مثلث، جریان‌های توالی صفر در داخل مثلث می‌توانند یک جریان گردشی داشته باشند، لیکن مؤلفه‌های توالی صفر جریان‌های خطی صفر بوده و در شبکه توالی صفر نسبت به شین مرجع، مدار باز خواهیم داشت. شبکه توالی صفر چنین اتصالی در شکل (۸-۱۴ د) نمایش داده شده‌است.



شکل ۱۴-۸: شبکه‌های توالی صفر اتصال‌های ستاره و مثلث

در رسم شبکه‌های توالی صفر ترانسفورماتورها باید دقت بیشتری نمود، زیرا شبکه‌های توالی صفر ترانسفورماتورها با اتصالات مختلف اولیه و ثانویه با یکدیگر تفاوت دارند. چنانچه از جریان مغناطیس کننده ترانسفورماتور صرفنظر کنیم، جریان اولیه و ثانویه با توجه به نسبت تبدیل ترانسفورماتور برحسب یکدیگر بدست می‌آیند، و اگر یکی از آنها صفر باشد، دیگری نیز صفر خواهد بود.

در شکل (۸-۱۵) انواع اتصالات ترانسفورماتورهای سه فاز و شبکه توالی صفر آنها نشان داده شده است. پیکان‌های نشان داده شده، نمایش وجود جریان‌های توالی صفر در سیم‌پیچ‌ها می‌باشند. حال به شرح هریک از این اتصالات می‌پردازیم:

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 می‌شود 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 سیم‌پیچ جریان‌های توالی صفر وجود داشته و لذا اولیه و ثانویه ترانسفورماتور در شبکه توالی صفر از طریق امیدانس توالی صفر بیکدیگر متصل می‌باشند. در این حالت شبکه توالی صفر دقیقاً مشابه شبکه‌های توالی 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 سیم‌پیچ وجود خواهند داشت. جریان‌های توالی صفر در داخل اتصال مثلث یک جریان گردشی را بوجود می‌آورند و مؤلفه‌های توالی صفر جریان‌های خطی این اتصال صفر خواهند بود. بنابراین امیدانس توالی صفر ترانسفورماتور طرف ستاره را به شین مرجع متصل می‌کند و بین طرف مثلث و شین مرجع مدار باز خواهد ماند.

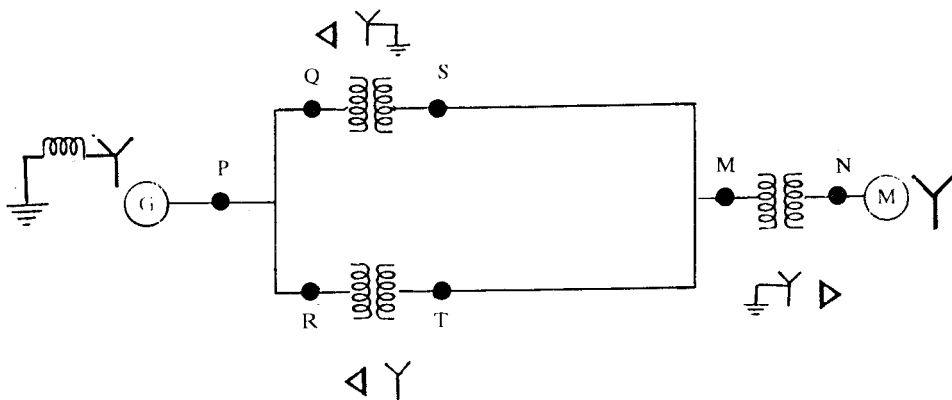
د) ترانسفورماتور $Y-\Delta$ بدون اتصال زمین: این اتصال حالت خاصی از قسمت (ج) بوده که در آن امیدانس بین نقطه صفر ستاره و زمین بجای صفر، بی‌نهایت می‌باشد. در اینصورت در هیچیک از سیم‌پیچ‌ها جریان توالی صفر وجود نخواهد داشت.

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 جریان گردشی توالی صفر وجود داشته باشد. بنابراین شبکه توالی صفر این ترانسفورماتور در هر دو طرف دارای مدار باز خواهد بود.

نوع اتصال	دیاگرام اتصال	شبکه توالی صفر
		<p>Ref. bus</p>
		<p>Ref. bus</p>
		<p>Ref. bus</p>
		<p>Ref. bus</p>
		<p>Ref. bus</p>

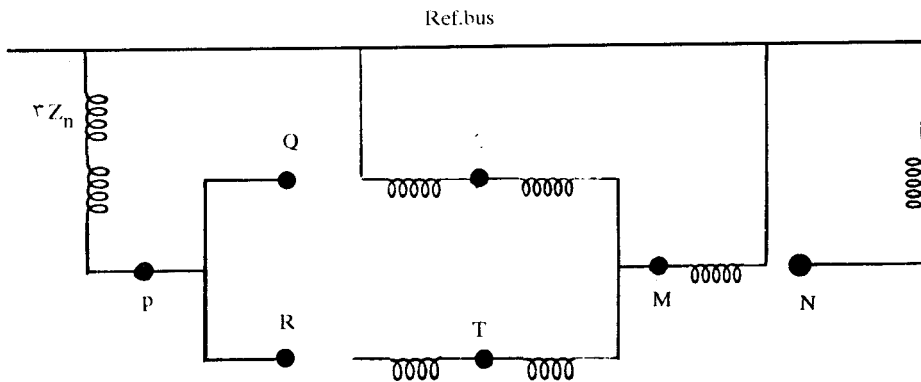
شکل ۱۵-۸: شبکه‌های توالی صفر ترانسفورماتورها

مثال ۸-۳: شبکه توالی صفر سیستم قدرت نشان داده شده در شکل (۸-۱۶) را رسم نمائید.



شکل ۸-۱۶: دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت مربوط به مثال (۸-۳)

حل: مدارهای معادل توالی صفر هریک از عناصر شبکه را رسم می‌کنیم و از ترکیب آنها شبکه توالی صفر سیستم را مطابق شکل (۸-۱۷) بدست می‌آوریم.



شکل ۸-۱۷: شبکه توالی صفر مربوطه به سیستم قدرت شکل (۸-۱۶)

مثال ۸-۴: شبکه توالی صفر سیستم قدرت شکل (۲-۳۳)، فصل دوم مثال (۲-۷)، را رسم کنید. راکتانس توالی صفر ژنراتور و موتورها 0.5 PU است. راکتورهای محدودکننده بین نقطه صفر ماشینها و زمین هرکدام 4Ω می‌باشند و راکتانس توالی صفر خط انتقال 96Ω است.

حل: راکتانس توالی صفر ترانسفورماتورها با راکتانس توالی صفر آنها برابر است. بنابراین در مورد ترانسفورماتورها داریم:

$$T_1 : X_{\bullet} = 0.0857 \text{ PU}$$

$$T_2 : X_{\bullet} = 0.0915 \text{ PU}$$

راکتانس توالی صفر ژنراتور و موتورها برابر است با:

$$G : X_{\bullet} = 0.05 \text{ PU}$$

$$M_1 : X_{\bullet} = 0.05 \times \frac{300}{200} \left(\frac{13/2}{13/8} \right)^2 = 0.0686 \text{ PU}$$

$$M_2 : X_{\bullet} = 0.05 \times \frac{300}{100} \left(\frac{13/2}{13/8} \right)^2 = 0.1372 \text{ PU}$$

در مدار ژنراتور، امپدانس مبنا را بدست می آوریم و متعاقب آن امپدانس $3Z_n$ را برحسب PU محاسبه می کنیم:

$$Z_b = \frac{20^2}{300} = 1/333 \Omega$$

$$3Z_n = \frac{3 \times 0/4}{1/333} = 0/9 \text{ PU}$$

بهمین ترتیب در موتور M_1 داریم:

$$Z_b = \frac{13/8^2}{300} = 0/635 \Omega$$

$$3Z_n = \frac{3 \times 0/4}{0/635} = 1/89 \text{ PU}$$

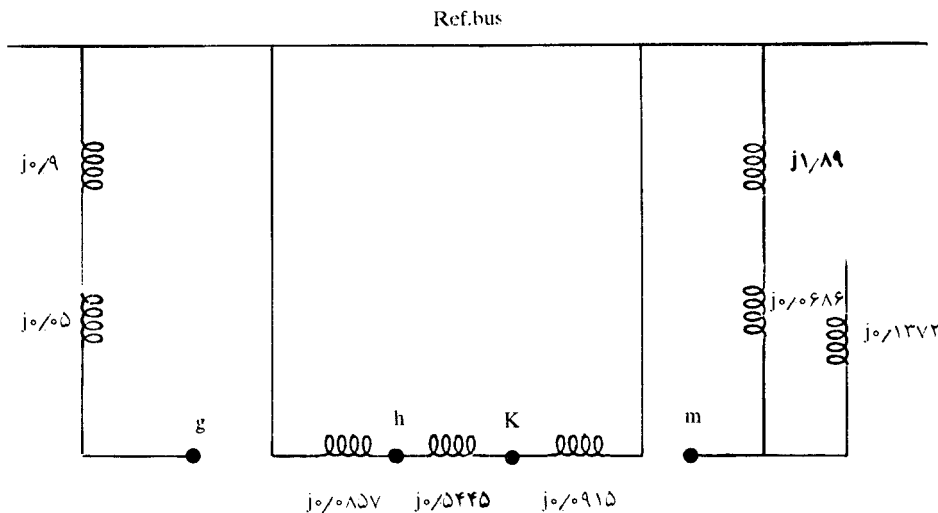
برای خط انتقال نیز راکتانس توالی صفر را برحسب PU محاسبه می کنیم. در مثال (۷-۲) مقدار امپدانس مبنا را در خط انتقال بدست آوردیم که مقدار آن برابر است با:

$$Z_b = 176/3 \Omega$$

بنابراین:

$$X = \frac{96}{176/3} = 0/5445 \text{ PU}$$

با توجه به مقادیر بدست آمده، شبکه توالی صفر سیستم در شکل (۱۸-۸) رسم شده است.



شکل ۱۸-۸: شبکه توالی صفر سیستم قدرت مثال (۴-۸)

۱۰-۸ کاربرد مؤلفه‌های متقارن در محاسبات اتصال کوتاه نامتقارن

اغلب خطاهایی که در سیستم قدرت بوجود می‌آیند نامتقارن هستند. این خطاها شامل اتصال کوتاه‌های نامتقارن، عدم تقارن بوجود آمده در امپدانس‌ها، و یا باز شدن هادیهای خطوط می‌باشند. اتصال کوتاه‌های نامتقارن بر اثر اتصال کوتاه یک فاز به زمین، دو فاز به زمین و یا دو فاز به یکدیگر بوجود می‌آیند. باز شدن یک یا دو هادی خط انتقال که منجر به خطای نامتقارن می‌گردد، ممکن است. بر اثر پاره شدن یک یا دو هادی بوجود آید و یا بواسطه عمل فیوزها و دیگر وسائل که سه فاز را همزمان قطع نکنند ایجاد شود.

از آنجائیکه خطاهای نامتقارن باعث عبور جریان‌های نامتقارن در سیستم می‌شوند، استفاده از روش مؤلفه‌های متقارن برای محاسبات جریان‌ها و ولتاژهای نقاط مختلف سیستم در خلال خطاها بسیار مفید است. در بخش‌های بعدی ابتدا اتصال کوتاه نامتقارن در ژنراتور سنکرون بی‌بار را بررسی می‌کنیم. سپس اتصال کوتاه نامتقارن در سیستم قدرت را با استفاده از مدار معادل تونن مورد تحلیل قرار می‌دهیم. آنگاه کاربرد ماتریس امپدانس شین (Z_{bus}) را در محاسبات اتصال کوتاه نامتقارن مطالعه خواهیم کرد.

هنگامی که اتصال کوتاه در ترمینالهای یک ژنراتور سنکرون اتفاق می‌افتد، می‌توان با استفاده از روابط (۸-۳۴) تا (۸-۳۶) جریان‌های مؤلفه‌های متقارن اتصال کوتاه را محاسبه نمود. روابط فوق‌الذکر به صورت ماتریس عبارتند از:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_+ \\ V_- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_+ & 0 \\ 0 & 0 & Z_- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix} \quad (۸-۳۸)$$

برای هریک از انواع اتصال کوتاه‌ها، معادله (۸-۳۸) را به‌مراه معادلاتی که شرایط اتصال کوتاه را بیان می‌کنند، حل خواهیم کرد تا جریان مؤلفه توالی مثبت (I_+) را برحسب Z_0 ، Z_+ و Z_- بدست آوریم.

۸-۱۱ اتصال کوتاه یک فاز به زمین (SLG)^(۱) در ژنراتور بی‌بار

شکل (۸-۱۹) اتصال کوتاه یک فاز به زمین در ژنراتور بی‌باری را نشان می‌دهد که نقطه صفر ستاره آن توسط یک راکتور زمین شده‌است. فاز a یکی از فازهایی است که ممکن است به زمین اتصال کوتاه شود. گرچه محاسبات برای فاز a انجام می‌شود، لیکن از آنجا که نام‌گذاری فازها اختیاری است، هریک از فازها می‌تواند بعنوان فاز a انتخاب شود و مشکلی در محاسبات پدید نخواهد آمد. برای اتصال کوتاه فاز a به زمین داریم:

$$I_b = I_c = 0 \quad V_{a0} = 0$$

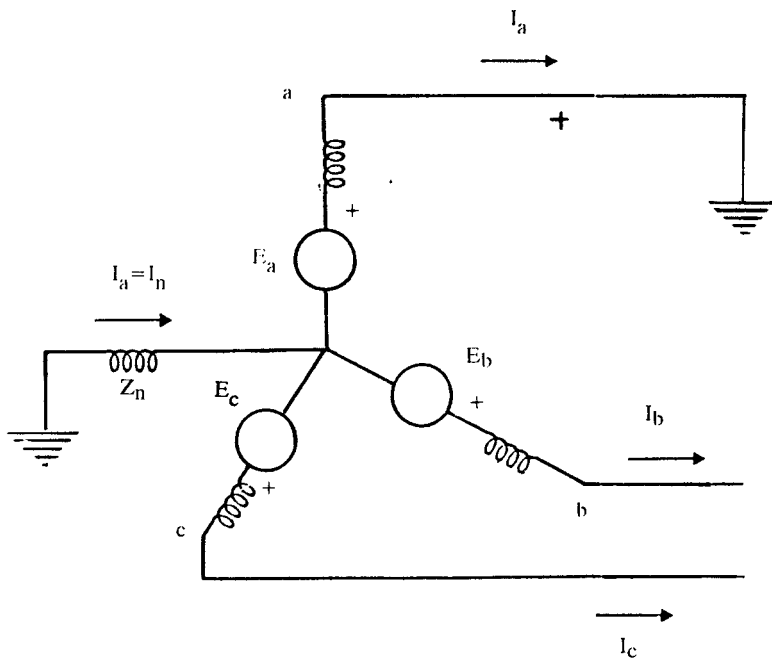
مؤلفه‌های متقارن جریان‌ها عبارتند از:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$I_+ = I_- = I_0 = \frac{1}{3} I_a \quad (۸-۳۹)$$

بعبارت دیگر جریان اتصال کوتاه سه برابر هریک از جریان‌های توالی مثبت، منفی و یا صفر می‌باشد، و ضمناً این سه مؤلفه با یکدیگر برابرند:

$$I_a = 3 I_+ \quad (۸-۴۰)$$



شکل ۸-۱۹: نمایش اتصال کوتاه یک فاز به زمین در ژنراتور بی بار

چنانچه در روابط (۸-۳۴) تا (۸-۳۶) به جای I_- و I_+ از I_+ استفاده کنیم، خواهیم داشت:

$$V_o = -Z_o I_+$$

$$V_+ = E_a - Z_+ I_+$$

$$V_- = -Z_- I_+$$

$$V_a = V_o + V_+ + V_- = -Z_o I_+ + E_a - Z_+ I_+ - Z_- I_+ = 0$$

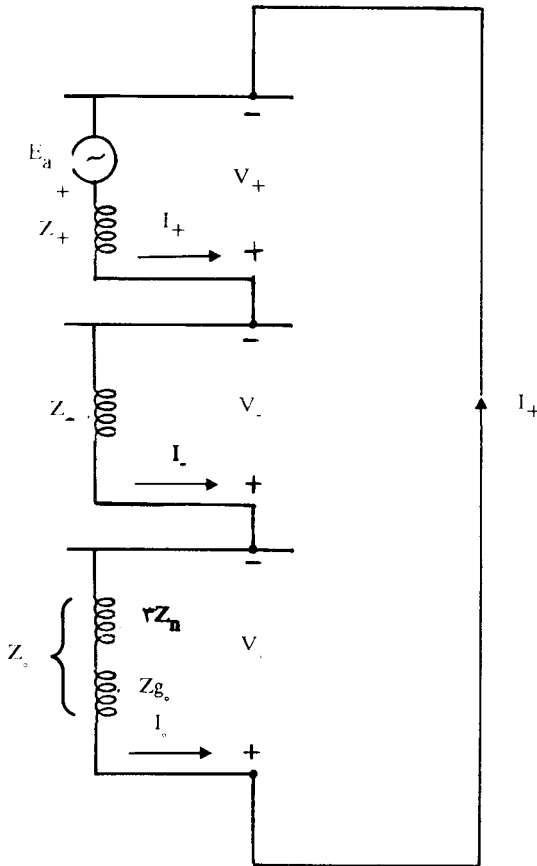
از رابطه اخیر I_+ را بدست می آوریم:

$$I_+ = \frac{E_a}{Z_+ + Z_- + Z_o} \quad (۸-۴۱)$$

که در آن امپدانس توالی صفر Z_o عبارتست از:

$$Z_o = Z_{g_o} + 3Z_n$$

معادلات (۸-۴۱) و (۸-۳۹) همراه با روابط تبدیل مؤلفه‌های متقارن به بردارهای سیستم اصلی، معادلات اصلی در محاسبات اتصال کوتاه یک فاز به زمین می‌باشند. با توجه به تساوی I_+ ، I_- و I_0 می‌توان چنین فرض نمود که در این نوع اتصال کوتاه، سه شبکه توالی با یکدیگر سری هستند. شکل (۸-۲۰) چنین اتصالی را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۲۰: اتصال شبکه‌های توالی در اتصال کوتاه یک فاز به زمین در ژنراتور بی‌بار

در اینجا می‌توانیم اثر زمین کردن نقطه صفر ژنراتور از طریق راکتور Z_n را بررسی کنیم. اگر این راکتور وجود نداشته باشد ($Z_n = \infty$)، جریان‌های توالی مثبت، منفی و صفر و جریان اتصال کوتاه برابر صفر خواهند بود:

$$I_+ = I_- = I_0 = 0$$

$$I_a = 3I_+ = 0$$

بنابر این:

$$V_+ = E_a - Z_+ I_+ = E_a$$

$$V_- = -Z_- I_+ = 0$$

$$V_0 = -V_+ - V_- = -E_a$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -E_a \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{3}E_a \angle -150^\circ \\ \sqrt{3}E_a \angle 150^\circ \end{bmatrix}$$

یعنی ولتاژی معادل $\sqrt{3}E_a$ روی هریک از فازهای b و c قرار خواهد گرفت. برای رفع این مشکل، نقطه صفر ژنراتور را به زمین متصل می‌کنیم تا جریان‌های توالی مثبت، منفی و صفر برقرار گردند. در اینصورت بهتر است نقطه صفر توسط یک راکتور به زمین وصل گردد تا جریان اتصال کوتاه نیز با توجه به معادله (۸-۴۱) محدود گردد.

مثال ۸-۵: ژنراتوری با مشخصات زیر را در نظر بگیرید:

$$X_+ = X_- = X'' = 0.2 \text{ PU}$$

$$X_g = 0.5 \text{ PU}$$

$$X_n = 0.25 \text{ PU}$$

$$S = 125 \text{ MVA}$$

$$V = 20 \text{ KV}$$

چنانچه اتصال کوتاه یک فاز به زمین در شرایط بی‌باری در این ژنراتور رخ دهد، جریان اتصال کوتاه و ولتاژهای خطی را در حین اتصال کوتاه بدست آورید.

حل: قدرت مبنا را ۱۲۵ MVA و ولتاژ مبنا را برای یک فاز $\frac{20}{\sqrt{3}}$ KV در نظر می‌گیریم. در بی‌باری

$E_a = 1 \text{ PU}$ بوده و داریم:

$$E_a = \frac{2.0}{\sqrt{3}} \text{ KV} = 1 \text{ PU}$$

$$Z_{\cdot} = Z_{g\cdot} + 3Z_n = j0.5 + j3(0.25) = j0.75 \text{ PU}$$

$$I_{+} = \frac{E_a}{Z_{+} + Z_{\cdot} + Z_{\cdot}} = \frac{1}{j(0.2 + 0.2 + 0.75)} = -j1.905 \text{ PU}$$

$$I_{+} = I_{-} = I_{\cdot} = -j1.905 \text{ PU}$$

$$I_a = 3I_{+} = -j5.714 \text{ PU}$$

$$I_b = I_c = 0$$

جریان مبنا در ژنراتور برابر است با:

$$I_{\text{base}} = \frac{125000}{\sqrt{3} \times 2.0} = 36.08 \text{ A}$$

بنابراین جریان زیرگذرای اتصال کوتاه بدست می‌آید:

$$|I_a| = 5.714 \times 36.08 = 206.18 \text{ A}$$

برای محاسبه ولتاژها، ابتدا مؤلفه‌های متقارن آنها را بدست می‌آوریم:

$$V_{+} = E_a - Z_{+}I_{+} = 1 - j0.2(-j1.905) = 0.619 \text{ PU}$$

$$V_{-} = -Z_{-}I_{-} = -j0.2(-j1.905) = -0.381 \text{ PU}$$

$$V_{\cdot} = -Z_{\cdot}I_{\cdot} = -j0.75(-j1.905) = -0.238 \text{ PU}$$

حال ولتاژهای فازی و خطی را محاسبه می‌کنیم:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.238 \\ 0.619 \\ -0.381 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.937 \angle -112/4^{\circ} \\ 0.937 \angle 112/4^{\circ} \end{bmatrix} \text{ PU}$$

$$V_{ab} = V_a - V_b = 0 - 0.937 \angle -112/4^\circ = 0.937 \angle 67/6^\circ \text{ PU}$$

$$V_{bc} = V_b - V_c = 1/\sqrt{3} \angle 27^\circ \text{ PU}$$

$$V_{ca} = V_c - V_a = 0.937 \angle 112/4^\circ \text{ PU}$$

برای تعیین ولتاژهای خطی برحسب KV باید دقت نمود که چون ولتاژ بی‌باری ژنراتور نسبت به نقطه صفر (ولتاژ فازی) معادل ۱ PU در نظر گرفته شده است، مقادیر ولتاژهای خطی برحسب PU باید در $\frac{2}{\sqrt{3}}$ ضرب شوند:

$$E_a = \frac{2}{\sqrt{3}} KV = 1 \text{ PU}$$

$$|V_{ab}| = |V_{ca}| = 0.937 \times \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.0/8 \text{ KV}$$

$$|V_{bc}| = 1/\sqrt{3} \times \frac{2}{\sqrt{3}} = 2.0 \text{ KV}$$

برای مقایسه ولتاژهای خطی را قبل از اتصال کوتاه بدست می‌آوریم. این ولتاژها متقارن بوده و هرکدام ۲.۰ KV هستند. با توجه به اینکه $V_{an} = E_a$ بعنوان بردار مرجع با زاویه صفر منظور شده‌است، داریم:

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_a \angle 30^\circ = 2.0 \angle 30^\circ \text{ KV}$$

$$V_{bc} = 2.0 \angle 270^\circ \text{ KV} = 2.0 \angle -90^\circ \text{ KV}$$

$$V_{ca} = 2.0 \angle 150^\circ \text{ KV}$$

۱۲-۸ اتصال کوتاه دوفاز بیکدیگر^(۱) (LL) در ژنراتور بی‌بار

مدار سه‌فاز در ژنراتور سنکرون بی‌بار در حالتی که دوفاز b و c از آنان به یکدیگر وصل شده‌اند در شکل (۸-۲۱) نشان داده شده‌است. برای این شکل می‌توان نوشت:

$$V_b = V_c$$

$$I_c = -I_b$$

$$I_a = 0$$

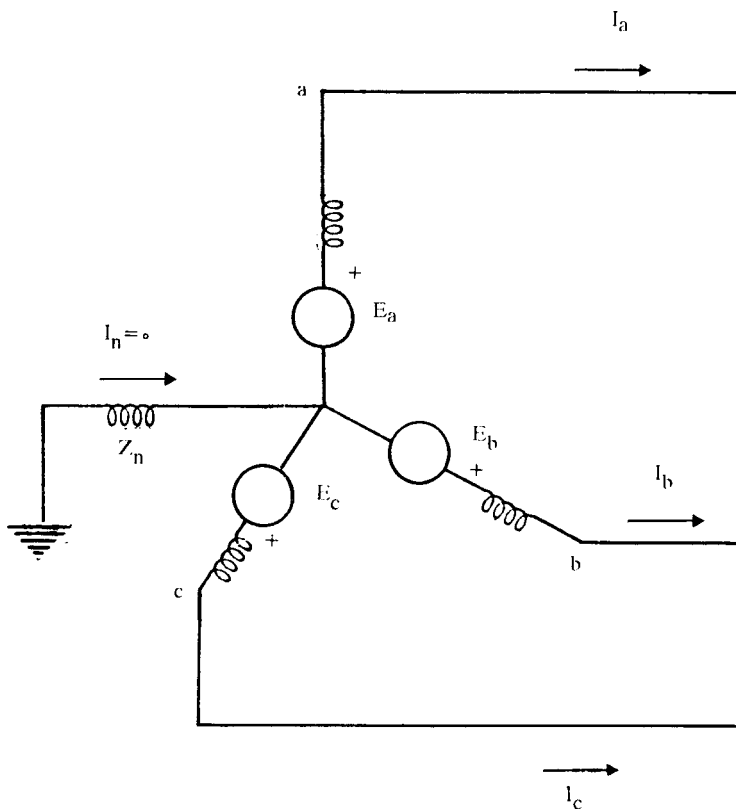
با توجه به تساوی V_b و V_c ، بردار مؤلفه‌ای متقارن ولتاژها به این ترتیب نوشته می‌شود:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_+ \\ V_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_b \end{bmatrix}$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$V_+ = V_- \quad (۸-۴۲)$$

حال مؤلفه‌های متقارن جریانها را بدست می‌آوریم:



شکل ۸-۲۱: نمایش اتصال کوتاه دوفاز بیکدیگر در ژنراتور بی‌بار

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix}$$

و از آنجا:

$$I_0 = 0 \quad (۸-۴۳)$$

$$I_+ = -I_- \quad (۸-۴۴)$$

اگر نقطه صفر ژنراتور زمین شده باشد V_0 برابر صفر خواهد بود:

$$V_0 = -Z_0 I_0 = 0 \quad (۸-۴۵)$$

با توجه به تساوی $I_- = -I_+$ داریم:

$$V_+ = E_a - Z_+ I_+$$

$$V_- = -Z_- I_- = Z_- I_+$$

با جایگزینی V_+ و V_- در معادله (۸-۴۲) خواهیم داشت:

$$V_+ = V_-$$

$$E_a - Z_+ I_+ = Z_- I_+$$

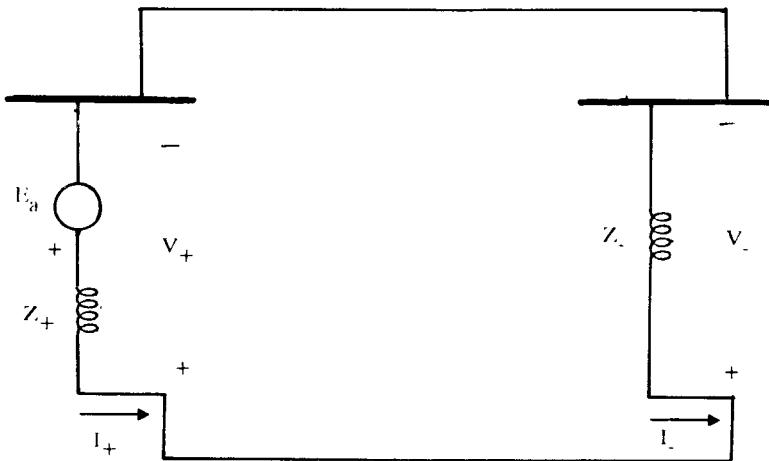
$$I_+ = \frac{E_a}{Z_+ + Z_-} \quad (۸-۴۶)$$

پس از محاسبه I_+ از معادله (۸-۴۶)، جریان اتصال کوتاه I_b به این ترتیب بدست می آید:

$$I_b = I_0 + a^2 I_+ + a I_- = a^2 I_+ - a I_+ = (a^2 - a) I_+$$

$$I_b = -j\sqrt{3}I_+ = -j\sqrt{3} \frac{E_a}{Z_+ + Z_-} \quad (۸-۴۷)$$

روابط (۸-۴۲) تا (۸-۴۷) معادلات اصلی در محاسبات اتصال کوتاه دوفاز بیکدیگر می‌باشند. تساوی V_+ و V_- نشان دهنده این است که در این نوع اتصال کوتاه می‌توان شبکه‌های توالی مثبت و منفی را موازی یکدیگر فرض نمود. شکل (۸-۲۲) این اتصال کوتاه را نشان می‌دهد. چون جریان توالی صفر در این نوع اتصال کوتاه صفر است، لذا Z_n در محاسبه جریان اتصال کوتاه نقشی ندارد. اگر نقطه صفر زمین شده باشد V_0 برابر صفر می‌باشد و در صورتیکه نقطه صفر زمین نشده باشد ($Z_n = \infty$)، مقدار V_0 نامعین خواهد بود.



شکل ۸-۲۲: اتصال شبکه‌های توالی در اتصال کوتاه دوفاز بیکدیگر در ژنراتور بی‌بار

مثال ۸-۶: در یک ژنراتور ۲۰ MVA، ۱۳/۸ KV داریم:

$$X_d'' = 0.25 \text{ PU}$$

$$X_- = 0.35 \text{ PU}$$

$$Z_0 = 0.1 \text{ PU}$$

$$X_n = 0$$

جریان‌های زیرگذرای اتصال کوتاه و ولتاژهای خطی ژنراتور را بر اثر اتصال کوتاه دوفاز بیکدیگر بدست آورید. ژنراتور را بی‌بار فرض کنید.

حل:

$$I_+ = \frac{E_a}{Z_+ + Z_-} = \frac{1}{j \cdot 0.25 + j \cdot 0.35} = -j 1/66 \text{ PU}$$

$$I_- = -I_+ = j 1/66 \text{ PU}$$

$$I_0 = 0$$

$$I_a = 0$$

$$I_b = -j\sqrt{3} I_+ = -j\sqrt{3} (-j 1/66) = -2/111 \text{ PU}$$

$$I_c = -I_b = 2/111 \text{ PU}$$

جریان مبنا در ژنراتور برابر است با:

$$I_{base} = \frac{2000}{\sqrt{3} \times 13.8} = 836/7 \text{ A}$$

بنابراین:

$$I_a = 0$$

$$I_b = -2/111 \times 836/7 = 24.16 \angle 180^\circ \text{ A}$$

$$I_c = 24.16 \angle 0^\circ \text{ A}$$

حال مؤلفه‌های متقارن ولتاژ را بدست می‌آوریم و توسط آنها ولتاژهای فازی ژنراتور را محاسب می‌کنیم:

$$V_+ = V_- = E_a - Z_+ I_+ = 1 - j \cdot 0.25 (-j 1/66) = 0.583 \text{ PU}$$

$$V_0 = -Z_0 I_0 = 0$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.583 \\ 0.583 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/166 \\ -0.583 \\ -0.583 \end{bmatrix} \text{ PU}$$

ولتاژهای خطی نیز برابرند با:

$$V_{ab} = V_a - V_b = 1/166 + 0/583 = 1/749 \angle 0^\circ \text{ PU}$$

$$V_{bc} = V_b - V_c = -0/583 + 0/583 = 0$$

$$V_{ca} = V_c - V_a = -0/583 - 1/166 = 1/749 \angle 180^\circ \text{ PU}$$

این مقادیر برحسب KV عبارتند از:

$$V_{ab} = 1/749 \times \frac{13/8}{\sqrt{3}} = 13/94 \angle 0^\circ \text{ KV}$$

$$V_{bc} = 0$$

$$V_{ca} = -1/749 \times \frac{13/8}{\sqrt{3}} = 13/94 \angle 180^\circ \text{ KV}$$

۱۳-۸ اتصال کوتاه دوفاز به زمین^(۱) (DLG) در ژنراتور بی بار

در شکل (۸-۲۳) اتصال کوتاه دوفاز به زمین در ژنراتور سنکرون بی بار نشان داده شده است. شرایط نشان داده شده را می توان به این ترتیب بیان نمود:

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

مولفه های متقارن ولتاژها با توجه به این شرایط عبارتند از:

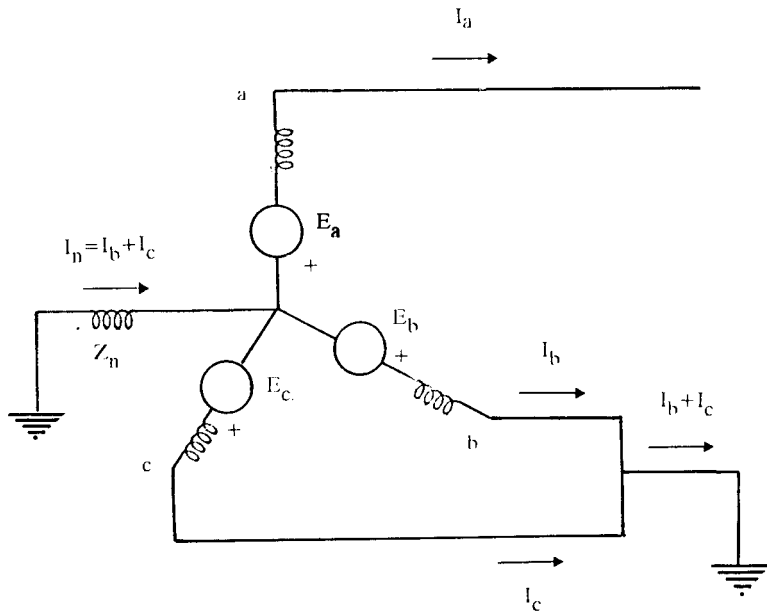
$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_+ \\ V_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

و از آنجا:

$$V_+ = V_- = V_0 = \frac{1}{3} V_a \quad (8-48)$$

چون $V_+ = E_a - Z_+ I_+$ ، بنابراین می توان نوشت:

$$V_+ = V_- = V_0 = E_a - Z_+ I_+$$



شکل ۲۳-۸: اتصال کوتاه دوفاز به زمین در ژنراتور بی‌بار

رابطه مؤلفه‌های متقارن ولتاژها در ژنراتور سنکرون بی‌بار را برحسب مؤلفه‌های متقارن جریان‌ها به این صورت داشتیم:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_+ \\ V_- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdot \\ E_a \\ \cdot \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & \cdot & \cdot \\ \cdot & Z_+ & \cdot \\ \cdot & \cdot & Z_- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix}$$

مقادیر V_0 ، V_+ و V_- را در این رابطه قرار می‌دهیم:

$$\begin{bmatrix} E_a - Z_+ I_+ \\ E_a - Z_+ I_+ \\ E_a - Z_+ I_+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdot \\ E_a \\ \cdot \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & \cdot & \cdot \\ \cdot & Z_+ & \cdot \\ \cdot & \cdot & Z_- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix}$$

و از آن‌جا بردار مؤلفه‌های متقارن جریان‌ها را بدست می‌آوریم:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 & \cdot & \cdot \\ \cdot & Z_+ & \cdot \\ \cdot & \cdot & Z_- \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} \cdot \\ E_a \\ \cdot \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_a - Z_+ I_+ \\ E_a - Z_+ I_+ \\ E_a - Z_+ I_+ \end{bmatrix} \right\}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_0} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \frac{1}{Z_+} & \cdot \\ \cdot & \cdot & \frac{1}{Z_-} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -E_a + Z_+ I_+ \\ Z_+ I_+ \\ -E_a + Z_+ I_+ \end{bmatrix}$$

$$I_0 = -\frac{E_a}{Z_0} + \frac{Z_+}{Z_0} I_+ \quad (۸-۴۹)$$

$$I_- = -\frac{E_a}{Z_-} + \frac{Z_+}{Z_-} I_+ \quad (۸-۵۰)$$

جریان فاز a صفر است. بنابراین:

$$I_a = I_0 + I_+ + I_- = 0$$

I_0 و I_- را بترتیب از معادلات (۸-۴۹) و (۸-۵۰) در معادله اخیر قرار می‌دهیم:

$$-\frac{E_a}{Z_0} + \frac{Z_+}{Z_0} I_+ + I_+ - \frac{E_a}{Z_-} + \frac{Z_+}{Z_-} I_+ = 0$$

با حل این معادله برحسب I_+ ، خواهیم داشت:

$$I_+ = \frac{E_a}{Z_+ + \frac{Z_- Z_0}{Z_- + Z_0}} \quad (۸-۵۱)$$

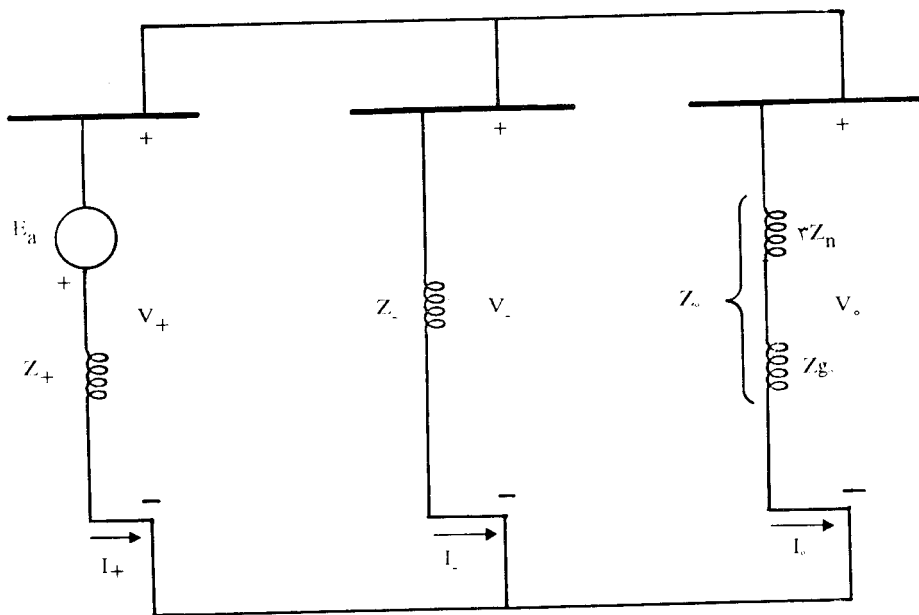
پس از تعیین I_+ می‌توان ولتاژهای توالی را بدست آورد:

$$V_+ = V_- = V_0 = E_a - Z_+ I_+ \quad (۸-۵۲)$$

و سپس I_+ و I_o با توجه به معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$I_- = -\frac{V_-}{Z_-} \quad I_o = -\frac{V_o}{Z_o} \quad (۸-۵۳)$$

جریان‌های I_- و I_o را از معادلات (۸-۴۹) و (۸-۵۰) نیز می‌توان محاسبه نمود.



شکل ۸-۲۴: اتصال شبکه‌های توالی در اتصال کوتاه دوفاز به زمین در ژنراتور بی‌بار

معادلات (۸-۴۸) تا (۸-۵۳) معادلات اصلی محاسبات اتصال کوتاه دوفاز به زمین می‌باشند. تساوی ولتاژهای توالی (رابطه ۸-۴۸) نشان می‌دهد که شبکه‌های توالی مثبت، منفی و صفر در این نوع اتصال کوتاه موازی هستند. شکل (۸-۲۴) این اتصال را نشان می‌دهد. اگر نقطه صفر ژنراتور به زمین وصل نشده باشد ($Z_n = \infty$)، در اینصورت شبکه توالی صفر وجود نداشته، دو شبکه توالی مثبت و منفی با یکدیگر موازیند و نتایج محاسبات مشابه اتصال کوتاه دوفاز بیکدیگر خواهد بود.

مثال ۸-۷: در ژنراتور سنکرون مثال (۸-۶) بر اثر اتصال کوتاه دوفاز به زمین در ترمینالهای ژنراتور، جریان زیرگذرای اتصال کوتاه و ولتاژهای خطی ژنراتور را بدست آورید.

حَل:

$$I_+ = \frac{E_a}{Z_{++} \frac{Z_- Z_0}{Z_- + Z_+}} = \frac{1}{j \cdot 0.25 + j \frac{0.35 \times 0.1}{0.35 + 0.1}} = -j3/0.5 \text{ PU}$$

$$V_+ = V_- = V_0 = E_a - Z_+ I_+ = 1 - j \cdot 0.25(-j3/0.5) = 0.237 \text{ PU}$$

$$I_- = -\frac{V_-}{Z_-} = -\frac{0.237}{j \cdot 0.35} = j \cdot 0.68 \text{ PU}$$

$$I_0 = -\frac{V_0}{Z_0} = -\frac{0.237}{j \cdot 0.1} = j2/37 \text{ PU}$$

$$I_a = I_0 + I_+ + I_- = j2/37 - j3/0.5 + j \cdot 0.68 = 0$$

$$I_b = I_0 + a^2 I_+ + a I_- = j2/37 + (-0.5 - j \frac{\sqrt{3}}{2})(-j3/0.5)$$

$$+ (-0.5 + j \frac{\sqrt{3}}{2})(j \cdot 0.68) = 4/8 \angle 132/3^\circ \text{ PU}$$

$$I_c = I_0 + a I_+ + a^2 I_- = j2/37 + (-0.5 + j \frac{\sqrt{3}}{2})(-j3/0.5)$$

$$+ (-0.5 - j \frac{\sqrt{3}}{2})(j \cdot 0.68) = 4/8 \angle 48/3^\circ \text{ PU}$$

$$I_n = 3 I_0 = 3 \times j2/37 = j6/37 \text{ PU}$$

$$I_n = I_b + I_c = 4/8 \angle 132/3^\circ + 4/8 \angle 48/3^\circ = j6/37 = 6/37 \angle 90^\circ \text{ PU}$$

$$V_a = V_0 + V_+ + V_- = 3 \times V_+ = 3 \times 0.237 = 0.711 \text{ PU}$$

$$V_b = V_c = 0$$

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

$$V_{bc} = V_b - V_c = 0$$

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

جریان‌ها و ولتاژهای بدست آمده بر حسب آمپر و کیلوولت عبارتند از:

$$I_a = 0$$

$$I_b = 836/\sqrt{3} \times 4/8 \angle 132/3^\circ = 40.16 \angle 132/3^\circ \text{ A}$$

$$I_c = 836/\sqrt{3} \times 4/8 \angle 47/7^\circ = 40.16 \angle 47/7^\circ$$

$$I_n = 836/\sqrt{3} \times 7/11 \angle 90^\circ = 5949 \angle 90^\circ \text{ A}$$

$$V_{ab} = 0/\sqrt{3} \times \frac{13/8}{\sqrt{3}} = 5/66 \angle 0^\circ \text{ KV}$$

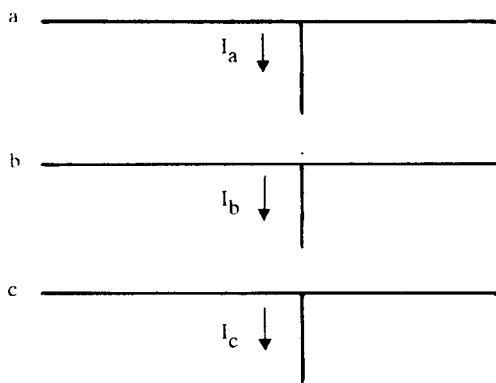
$$V_{bc} = 0$$

$$V_{ca} = -0/\sqrt{3} \times \frac{13/8}{\sqrt{3}} = 5/66 \angle 180^\circ \text{ KV}$$

۸-۱۴ اتصال کوتاه نامتقارن در سیستم قدرت

برای محاسبه جریان‌های اتصال کوتاه نامتقارن در هر نقطه از سیستم قدرت، ابتدا باید قبل از اتصال کوتاه جریان‌های عبوری از عناصر سیستم و بارها و همچنین ولتاژ محل اتصال کوتاه (V_f) را بدست آورد. پس از محاسبه جریان اتصال کوتاه در محل وقوع، می‌توان با استفاده از جمع آثار، جریان اتصال کوتاه هریک از عناصر را با توجه به جریان پیش از اتصال کوتاه بدست آورد.

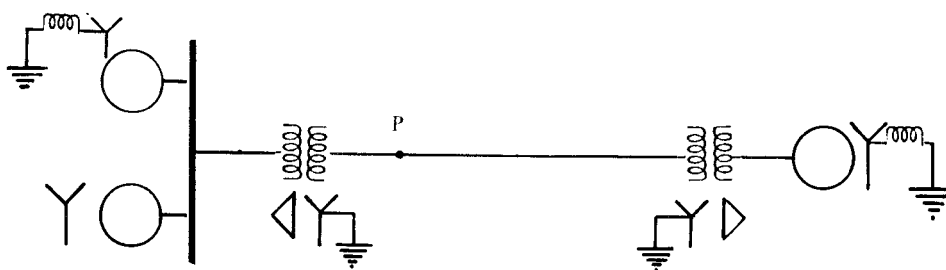
شکل (۸-۲۵) جریان‌های اتصال کوتاه را برای سه فاز a، b و c را در نقطه‌ای از یک سیستم قدرت باردار نشان می‌دهد.



شکل ۸-۲۵: نمایش جریان‌های اتصال کوتاه در یک نقطه از سیستم قدرت

ولتاژهای فازی در محل اتصال کوتاه قبل از وقوع با V_a ، V_b و V_c مشخص می‌شوند. در اینصورت ولتاژ فاز a که با V_f نشان داده می‌شود، ولتاژ توالی مثبت است، زیرا سیستم قدرت قبل از اتصال کوتاه متقارن بوده‌است.

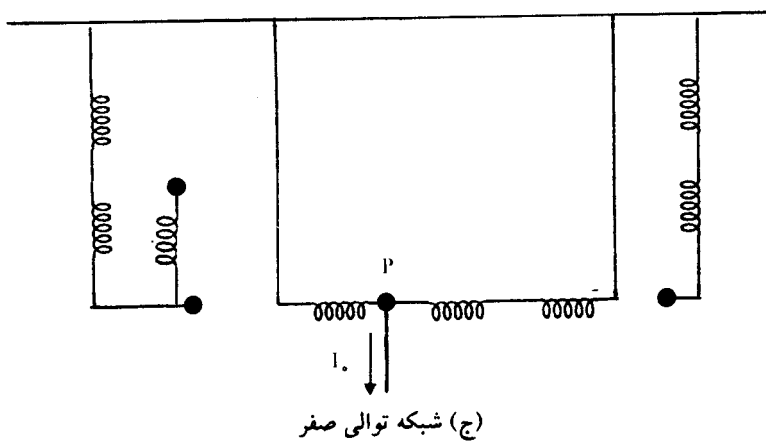
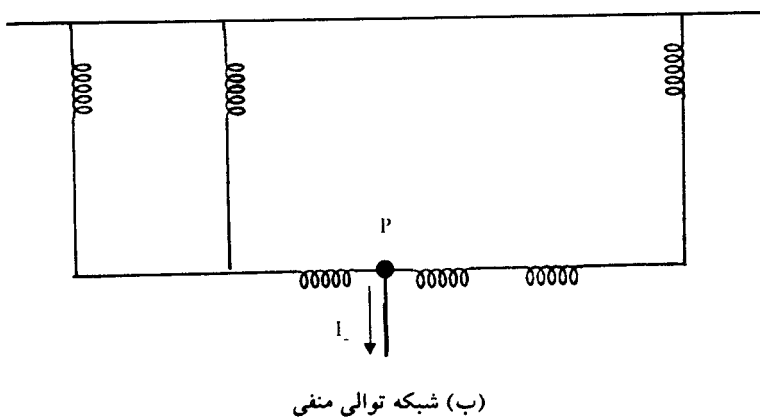
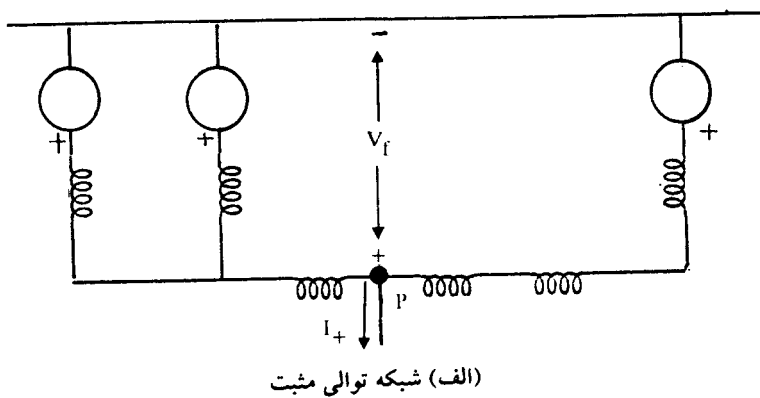
دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت با سه ماشین سنکرون در شکل (۸-۲۶) نشان داده شده‌است.



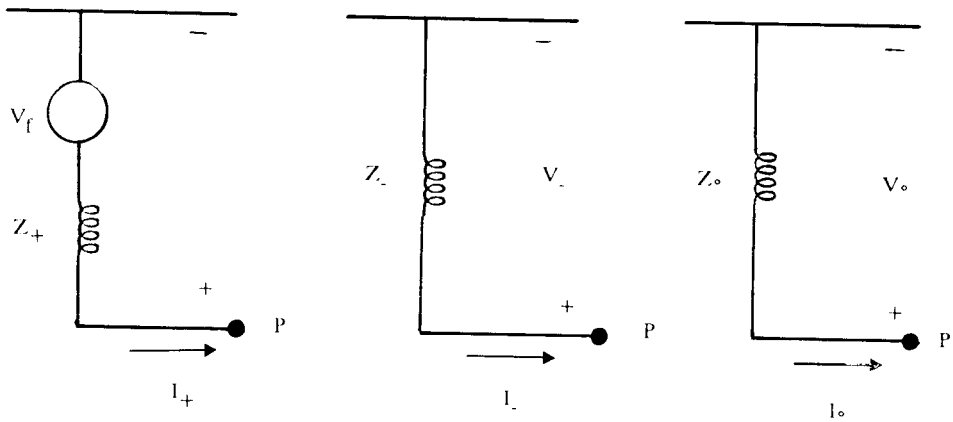
شکل ۸-۲۶: دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت با سه ماشین سنکرون

قدم اول در محاسبات اتصال کوتاه نامتقارن، رسم شبکه‌های توالی مثبت، منفی و صفر سیستم است. این سه شبکه در شکل (۸-۲۷) رسم شده‌اند. محل وقوع اتصال کوتاه نقطه P می‌باشد که در شکل‌های (۸-۲۶) و (۸-۲۷) مشخص شده‌است.

قدم بعدی تعیین مدار معادل تونن هریک از شبکه‌های توالی است. این مدارهای معادل باید از دیدگاه محل اتصال کوتاه (نقطه P) رسم شوند. ولتاژ محل اتصال کوتاه قبل از وقوع (V_f)، دارای توالی مثبت است و لذا فقط در شبکه توالی مثبت ظاهر می‌شود. بنابراین ولتاژ تونن در شبکه توالی مثبت برابر V_f بوده و ولتاژ تونن شبکه‌های توالی منفی و صفر برابر صفر است. شکل (۸-۲۸) مدارهای معادل تونن شبکه‌های توالی مثبت، منفی و صفر سیستم را از دیدگاه نقطه P نشان می‌دهد. در این شکل Z_+ ، Z_- و Z_0 بترتیب امپدانس‌های تونن شبکه‌های توالی مثبت، منفی و صفر سیستم از دیدگاه نقطه P می‌باشند.



شکل ۲۷-۸: شبکه‌های توالی سیستم قدرت شکل (۲۶-۸)



شکل ۲۸-۸: مدارهای معادل تونن شبکه‌های توالی مثبت، منفی و صفر سیستم قدرت

با توجه به شکل (۸-۲۸) و مقایسه آن با شکل (۸-۱۱) ب) درمی‌یابیم که مطالعه اتصال کوتاه یک سیستم قدرت در نقطه‌ای مانند P مشابه مطالعه اتصال کوتاه در ترمینالهای یک ژنراتور سنکرون بی‌بار است، با این تفاوت که V_f (ولتاژ محل اتصال کوتاه قبل از وقوع) جانشین E_a (ولتاژ داخلی ژنراتور سنکرون) شده‌است، و همچنین Z_+ ، Z_- و Z_o که بجای امپدانس‌های توالی ژنراتور جایگزین شده‌اند امپدانس‌های تونن هریک از شبکه‌های توالی می‌باشند. معادلات مربوط به مدارهای معادل تونن شکل (۸-۲۸) عبارتند از:

$$V_+ = V_f - Z_+ I_+ \quad (۸-۵۴)$$

$$V_- = -Z_- I_- \quad (۸-۵۵)$$

$$V_o = -Z_o I_o \quad (۸-۵۶)$$

و یا به صورت ماتریسی:

$$\begin{bmatrix} V_- \\ V_+ \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdot \\ V_f \\ \cdot \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_- & \cdot & \cdot \\ \cdot & Z_+ & \cdot \\ \cdot & \cdot & Z_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_- \\ I_+ \\ I_o \end{bmatrix} \quad (۸-۵۷)$$

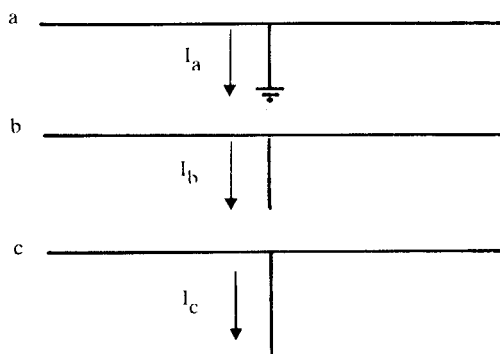
که کاملاً قابل مقایسه با معادله (۸-۳۸) می‌باشد.

۸-۱۴-۱ اتصال کوتاه یک فاز به زمین در سیستم قدرت

شکل (۸-۲۹) جریان‌های سه فاز را بر اثر اتصال کوتاه یک فاز به زمین در نقطه‌ای از سیستم قدرت باردار نشان می‌دهد. با مراجعه به این شکل داریم:

$$V_a = 0$$

$$I_b = I_c = 0$$



شکل ۸-۲۹: نمایش اتصال کوتاه یک فاز به زمین در سیستم قدرت

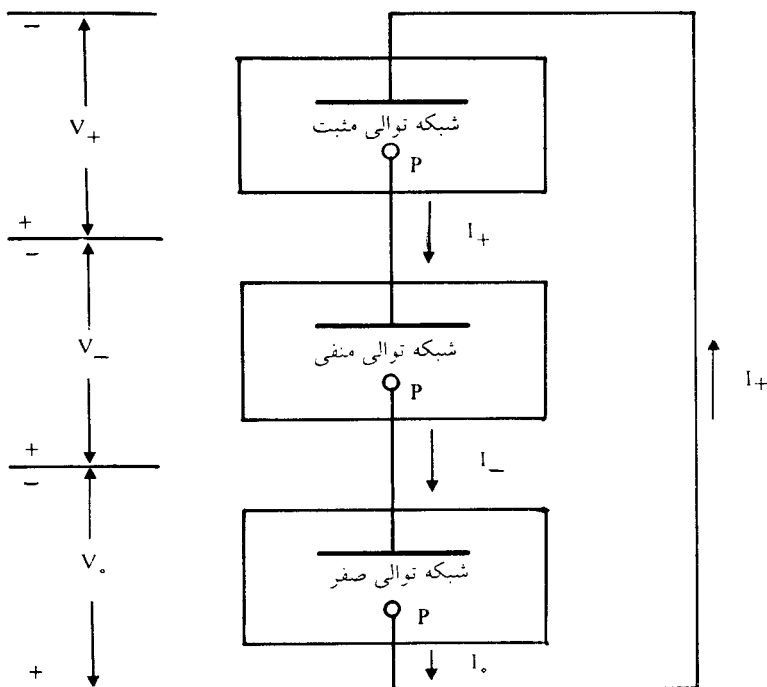
این معادلات کاملاً مشابه معادلاتی هستند که در محاسبه جریان اتصال کوتاه یک فاز به زمین در ژنراتور سنکرون بی‌بار بکار بردیم، با این تفاوت که V_f جایگزین E_a شده است. بنابراین نتایج کاملاً مشابهی را برای اتصال کوتاه یک فاز به زمین در سیستم قدرت خواهیم داشت که عبارتند از:

$$I_+ = I_- = I_0 \quad (۸-۵۸)$$

$$I_a = 3I_+ \quad (۸-۵۹)$$

$$I_+ = \frac{V_f}{Z_+ + Z_- + Z_0} \quad (۸-۶۰)$$

تساوی جریان‌های توالی در این اتصال کوتاه نشان می‌دهد که سه شبکه توالی، مثبت و منفی طبق شکل (۸-۳۰) با هم سری می‌باشند.



شکل ۳۰-۸: اتصال شبکه‌های توالی در اتصال کوتاه یک فاز به زمین

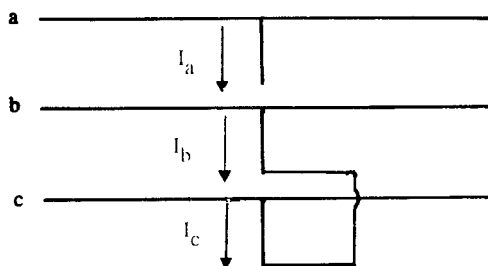
۲-۱۴-۸ اتصال کوتاه دوفاز بیکدیگر در سیستم قدرت

برای اتصال کوتاه دوفاز بیکدیگر در نقطه‌ای از یک سیستم باردار، با توجه به شکل (۸-۳۱) می‌توان نوشت:

$$I_a = 0$$

$$V_b = V_c$$

$$I_c = -I_b$$



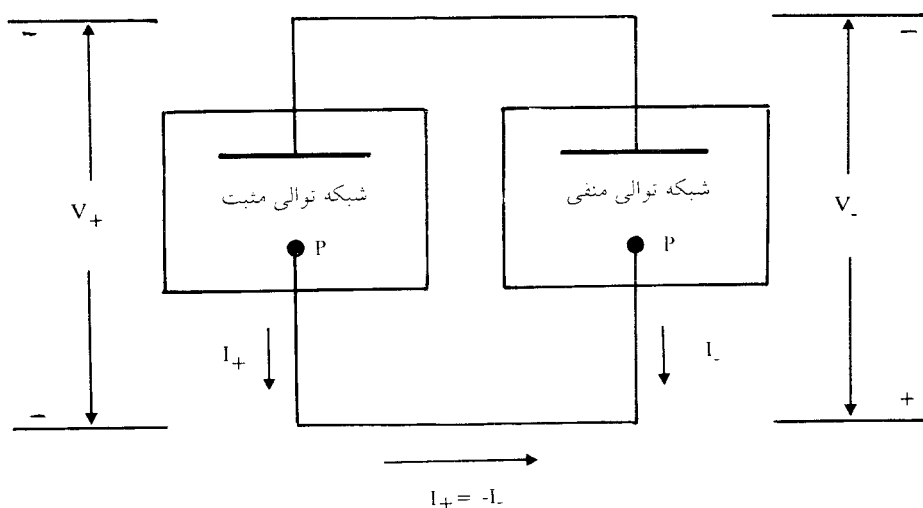
شکل ۳۱-۸: نمایش اتصال کوتاه دوفاز بیکدیگر در سیستم قدرت

این معادلات همانند معادلاتی هستند که در محاسبه جریان اتصال کوتاه دوفاز بیکدیگر در ژنراتور بی بار بکاربردیم. نتایج کاملاً مشابه بوده و داریم:

$$V_+ = V_- \quad (۸-۶۱)$$

$$I_+ = \frac{V_f}{Z_+ + Z_-} \quad (۸-۶۲)$$

برای مشابه سازی این نوع اتصال کوتاه، باید شبکه های توالی مثبت و منفی را موازی در نظر گرفت. شکل (۸-۳۲) این اتصال را نشان می دهد.



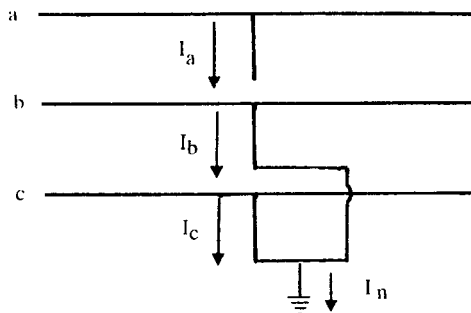
شکل ۸-۳۲: اتصال شبکه های توالی در اتصال کوتاه دوفاز بیکدیگر

۸-۱۴-۳ اتصال کوتاه دوفاز به زمین در سیستم قدرت

در بررسی اتصال کوتاه دوفاز به زمین در نقطه ای از سیستم قدرت باردار، مطابق شکل (۸-۳۳) داریم:

$$V_b = V_c = 0$$

$$I_d = 0$$



شکل ۸-۳۳: نمایش اتصال کوتاه دوفاز به زمین در سیستم قدرت

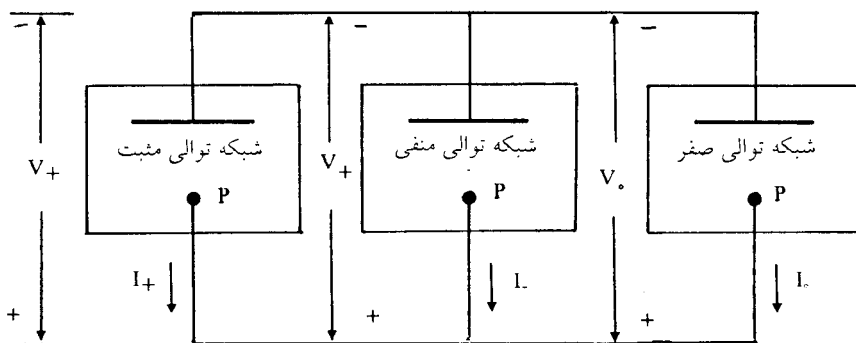
این معادلات نیز کاملاً مشابه معادلاتی هستند که در بخش (۸-۱۳) برای محاسبه جریان اتصال کوتاه دوفاز به زمین در ژنراتور سنکرون بی بار بکار بردیم. نتایج این بررسی عبارتند از:

$$V_+ = V_- = V_0 \quad (۸-۶۳)$$

$$V_a = 3V_+ \quad (۸-۶۴)$$

$$I_+ = \frac{V_f}{Z_+ + \frac{Z_- Z_0}{Z_- + Z_0}} \quad (۸-۶۵)$$

رابطه (۸-۶۳) نشان می دهد که در این نوع اتصال کوتاه، مطابق شکل (۸-۳۴) سه شبکه توالی با هم موازیند.



شکل ۸-۳۴: اتصال شبکه های توالی در اتصال کوتاه دوفاز به زمین

مثال ۸-۸: یک سیستم قدرت مطابق شکل (۸-۳۵) را در نظر بگیرید. مشخصات عناصر این سیستم بقرار زیر است:

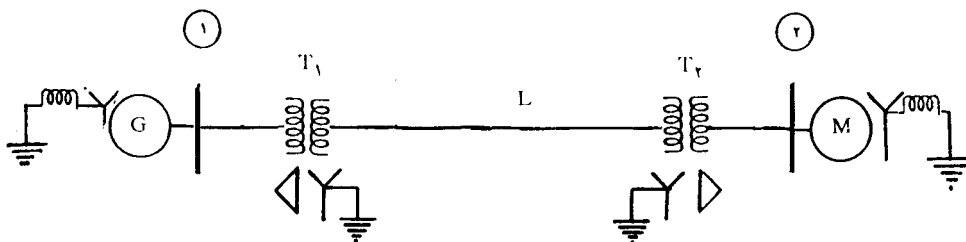
ژنراتور G: $X_n = 0.2$, $X_s = 0.4$, $X_d'' = 0.1$, $13/2 \text{KV}$, 20MVA

موتور M: $X_n = 0.2$, $X_s = 0.4$, $X_d'' = 0.2$, $6/6 \text{KV}$, 20MVA

ترانسفورماتور T_1 : $X = 0.12/5$, $132/13/2 \text{KV}$, 25MVA

ترانسفورماتور T_2 : $X = 0.12/5$, $132/6/6 \text{KV}$, 25MVA

خط انتقال L: $X_+ = 0.1$ PU و $X_- = 0.3$ PU در مبنای 20MVA و 132KV



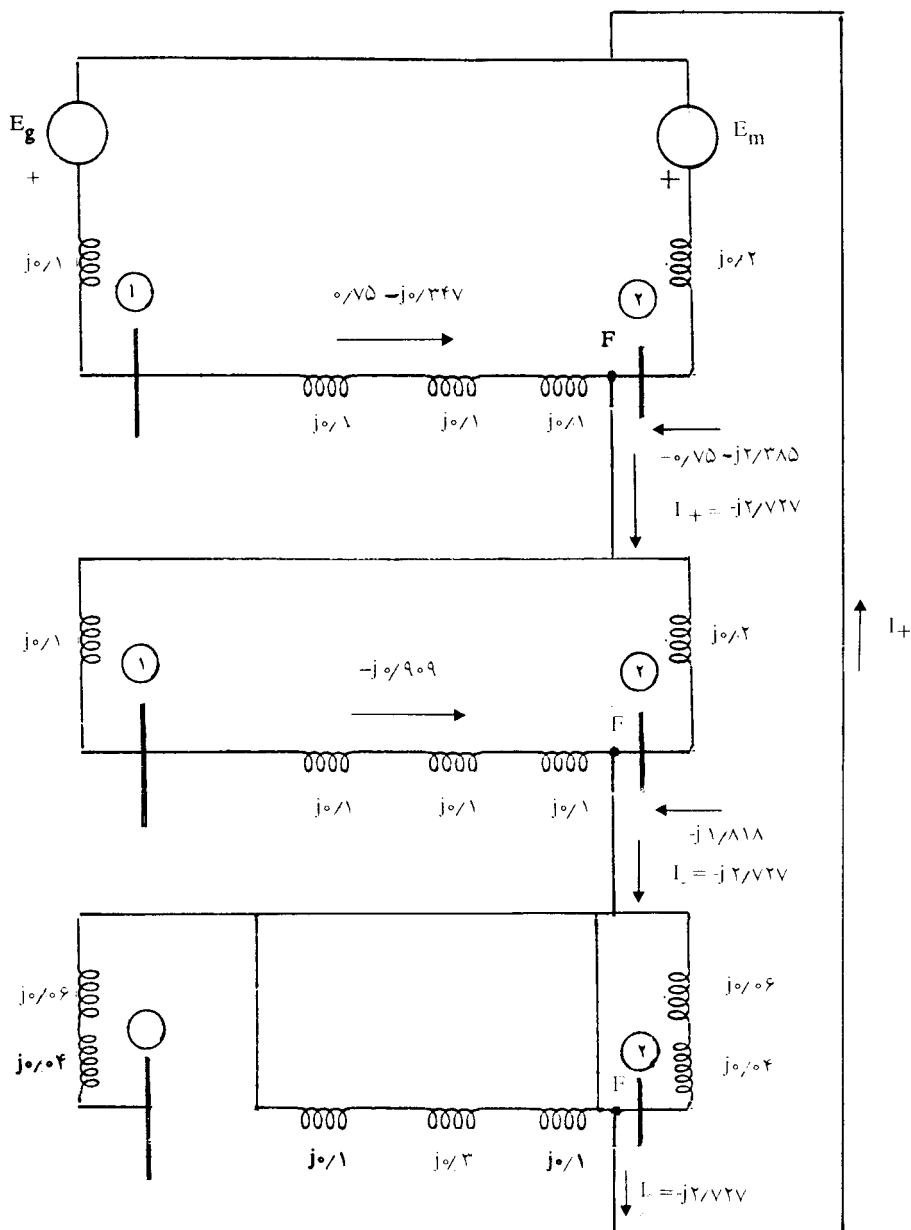
شکل ۸-۳۵: دیاگرام تک خطی سیستم قدرت مربوط به مثال (۸-۸)

قبل از اتصال کوتاه، موتور سنکرون قدرت 15MVA در ولتاژ $6/6 \text{KV}$ و ضریب قدرت 0.8 پیش فاز جذب می‌کند. اتصال کوتاه یک فاز به زمین را در نقطه F بررسی کنید.

حَلّ: قدرت مبنا را 20MVA و ولتاژ مبنا در مدار ژنراتور، موتور و خط انتقال را به ترتیب $13/2$ ، $6/6$ و 132 کیلوولت انتخاب می‌کنیم. راکتانس ترانسفورماتورها را به ترتیب زیر در مبنای 20MVA بدست می‌آوریم:

$$X = 0.125 \times \frac{20}{25} = 0.1 \text{ PU}$$

حال شبکه‌های توالی مثبت، منفی و صفر این سیستم را مطابق شکل (۸-۳۶) رسم می‌کنیم.



شکل ۳۶-۸: اتصال سری شبکه‌های توالی در اتصال کوتاه یک‌فاز به زمین در نقطه F

از سیستم قدرت شکل (۸-۳۵)

برای بررسی اتصال کوتاه یک فاز به زمین در نقطه F، این سه شبکه را با یکدیگر سری می‌کنیم. امپدانس‌های تونن شبکه‌های توالی از دیدگاه نقطه F بترتیب زیر بدست می‌آیند:

$$Z_+ = Z_- = j \frac{0.2 \times 0.4}{0.2 + 0.4} = j 0.133 \text{ PU}$$

حال جریان‌های توالی و جریان اتصال کوتاه I_a را محاسبه می‌کنیم:

$$V_f = 6/6 \text{ KV} = 1 \text{ PU}$$

$$I_+ = \frac{1}{j(0.133 + 0.133 + 0.1)} = -j2.727 \text{ PU}$$

$$I_+ = I_- = I_0 = -j2.727 \text{ PU}$$

$$I_a = 3I_+ = -j8.181 \text{ PU}$$

جریان اتصال کوتاه برحسب آمپر برابر است با:

$$|I_a| = 8.181 \times \frac{20000}{\sqrt{3} \times 6/6} = 14313 \text{ A}$$

برای تعیین جریان‌هایی که از دو طرف به محل اتصال کوتاه جاری می‌شوند، ابتدا ولتاژهای بی‌باری E_g و E_m را معادل صفر در نظر می‌گیریم و با تقسیم جریان‌های توالی، جریان هر طرف را بدست می‌آوریم. جریان‌هایی که از طرف ترانسفورماتور T_2 به طرف نقطه F جاری هستند عبارتند از:

$$I_+ = (-j 2.727) \frac{0.2}{0.2 + 0.4} = -j0.909 \text{ PU}$$

$$I_- = -j0.909 \text{ PU}$$

$$I_0 = 0$$

جریان‌های مذکور را برای سه فاز a، b و c محاسبه می‌کنیم:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -j0.909 \\ -j0.909 \end{bmatrix}$$

$$I_a = -j1/818 \text{ PU}$$

$$I_b = j0.909 \text{ PU}$$

$$I_c = j0.909 \text{ PU}$$

جریان‌هایی که از طرف موتور سنکرون بطرف نقطه F جاری می‌شوند به این ترتیب بدست می‌آیند:

$$I_+ = (-j2/727) \frac{0.4}{0.2 + 0.4} = -j1/818 \text{ PU}$$

$$I_- = -j1/818 \text{ PU}$$

$$I_0 = -j2/727 \text{ PU}$$

و برای فازهای a، b و c این جریان‌ها داریم:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -j2/727 \\ -j1/818 \\ -j1/818 \end{bmatrix}$$

$$I_a = -j6/363 \text{ PU}$$

$$I_b = -j0.909 \text{ PU}$$

$$I_c = -j0.909 \text{ PU}$$

اگر از جریان‌های بار قبل از اتصال کوتاه صرف‌نظر کنیم (سیستم را قبل از اتصال کوتاه بی‌بار فرض کنیم)، نتایج بدست آمده کفایت می‌کند. اگر بخواهیم جریان‌های بار را منظور کنیم، ابتدا در شرایط بارداری سیستم را حل کرده و جریان بار را بدست می‌آوریم:

$$|I_L| = \frac{15000}{\sqrt{3} \times 6/6 \times 0.8} = 1640 \text{ A}$$

$$I_{\text{base}} = \frac{20000}{\sqrt{3} \times 6/6} = 1750 \text{ A}$$

$$I_L = \frac{1640}{1750} \angle \cos^{-1} 0.8 = 0.937 \angle 36/87^\circ \text{ PU}$$

این جریان در شرایط بارداری از طرف ژنراتور بطرف موتور جاری بوده و فقط در توالی مثبت ظاهر می‌شود. با استفاده از اصل جمع اثرها، جریان‌های توالی که در شرایط اتصال کوتاه از طرف ترانسفورماتور T_2 به طرف نقطه F جاری هستند عبارتند از:

$$I_+ = -j0.909 + 0.937 \angle 36/87^\circ = 0.75 - j0.347 \text{ PU}$$

$$I_- = -j0.909 \text{ PU}$$

$$I_0 = 0$$

این جریان‌ها برای فازهای a, b و c این چنین محاسبه می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.75 - j0.347 \\ -j0.909 \end{bmatrix}$$

$$I_a = 0.75 - j1/256 = 1/463 \angle -59/16^\circ \text{ PU}$$

$$I_b = 0.112 - j0.22 = 0.114 \angle -11/11^\circ \text{ PU}$$

$$I_c = -0.861 + j1/277 = 1/54 \angle 124^\circ \text{ PU}$$

برای محاسبه جریان‌های توالی از طرف موتور سنکرون به طرف نقطه F داریم:

$$I_+ = -j1/818 + 0.937 \angle 36/87^\circ = -0.75 - j2/38 \text{ PU}$$

$$I_- = -j1/818 \text{ PU}$$

$$I_0 = -j2/727 \text{ PU}$$

به این ترتیب جریان‌های مذکور در فازهای a، b و c بدست می‌آیند:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -j2/727 \\ -0.75-j2/38 \\ -j1/818 \end{bmatrix}$$

$$I_a = -0.75 - j6/925 = 6/965 \angle -96/2^\circ \text{ PU}$$

$$I_b = -0.112 + j0.22 = 0.114 \angle 168/89^\circ \text{ PU}$$

$$I_c = 0.861 - j1/277 = 1/54 \angle -56^\circ \text{ PU}$$

۸-۱۵ تحلیل اتصال کوتاه نامتقارن با استفاده از ماتریس Z_{bus}

در فصل هفتم از ماتریس امپدانس شین، Z_{bus} ، برای محاسبه جریان‌ها و ولتاژهای سیستم در خلال اتصال کوتاه استفاده کردیم. در بررسی اتصال کوتاه‌های نامتقارن می‌توان از ماتریس‌های امپدانس در سه شبکه توالی مثبت، منفی و صفر استفاده نمود. در بخش (۸-۱۴) دیدیم که برای محاسبه انواع اتصال کوتاه‌های نامتقارن ابتدا باید مدار معادل تونن هریک از شبکه‌های توالی را بدست آوریم. سپس معادل‌سازی شبکه را برای انجام این محاسبات با اتصال‌های مختلف شبکه‌های توالی و معادلات مربوطه انجام دهیم. از آنجائیکه Z_{pp} نشان دهنده امپدانس تونن شبکه از دیدگاه شین شماره P می‌باشد، چنانچه ماتریس Z_{bus} را برای هر یک از شبکه‌های توالی مثبت، منفی و صفر بدست آوریم، انجام محاسبات آسان‌تر خواهد شد، اگر اتصال کوتاه در شین P اتفاق بیفتد، معادله تعیین I_+ در هریک از انواع اتصال کوتاه‌های نامتقارن بترتیب زیر خواهد بود:

$$I_+ = \frac{V_f}{Z_{pp+} + Z_{pp-} + Z_{pp0}} \quad \text{اتصال کوتاه یک فاز به زمین} \quad (8-66)$$

$$I_+ = \frac{V_f}{Z_{pp+} + Z_{pp-}} \quad \text{اتصال کوتاه دوفاز بیکدیگر} \quad (8-67)$$

$$I_+ = \frac{V_f}{Z_{pp+} + \frac{Z_{pp-} Z_{pp0}}{Z_{pp-} + Z_{pp0}}} \quad \text{اتصال کوتاه دوفاز به زمین} \quad (8-68)$$

که در آن Z_{pp+} امپدانس تونن از دیدگاه شین شماره P در شبکه توالی مثبت، Z_{pp-} امپدانس تونن از دیدگاه شین شماره P در شبکه توالی منفی، و Z_{pp0} امپدانس تونن از دیدگاه شین شماره P در شبکه توالی صفر می‌باشند. ضمناً هریک از این مقادیر، از عنصر سطر P و ستون P ماتریس Z_{bus} مربوط به شبکه توالی مربوطه بدست می‌آید.

مثال ۹-۸: جریان زیرگذرای اتصال کوتاه را بر اثر اتصال کوتاه یک فاز به زمین در شین ۲ (نقطه P) شبکه مربوط به مثال (۸-۸) بدست آورید. همچنین جریان زیرگذرای اتصال کوتاه را بر اثر اتصال کوتاه یک فاز به زمین در شین ۱ محاسبه کنید.

حل: ابتدا عناصر ماتریس ادمیتانس شین را برای شکل (۸-۳۶) بدست می‌آوریم. در شبکه توالی مثبت داریم:

$$Y_{11+} = \frac{1}{j0/3} + \frac{1}{j0/1} = -j13/33 \text{ PU}$$

$$Y_{22+} = \frac{1}{j0/3} + \frac{1}{j0/2} = -j8/33 \text{ PU}$$

$$Y_{12+} = Y_{21+} = -\frac{1}{j0/3} = j3/33 \text{ PU}$$

چون کلیه عناصر شبکه توالی منفی با شبکه توالی مثبت مشابه است، لذا خواهیم داشت:

$$Y_{11-} = Y_{11+} = -j13/33 \text{ PU}$$

$$Y_{22-} = Y_{22+} = -j8/33 \text{ PU}$$

$$Y_{12-} = Y_{21-} = j3/33 \text{ PU}$$

بنابراین ماتریس ادمیتانس شبکه‌های توالی مثبت و منفی عبارتند از:

$$Y_{bus+} = Y_{bus-} = j \begin{bmatrix} -13/33 & 3/33 \\ 3/33 & -8/33 \end{bmatrix} \text{ PU}$$

و از آنجا ماتریس امپدانس شبکه‌های فوق بدست می‌آیند:

$$Z_{bus+} = Z_{bus-} = Y_{bus+}^{-1} = j \begin{bmatrix} 0.083 & 0.033 \\ 0.033 & 0.133 \end{bmatrix} \text{ PU}$$

به‌همین ترتیب Z_{bus} و Y_{bus} شبکه توالی صفر را تعیین می‌کنیم:

$$Y_{11} = \frac{1}{j0.1} = -j10 \text{ PU}$$

$$Y_{22} = \frac{1}{j0.1} = -j10 \text{ PU}$$

$$Y_{12} = Y_{21} = 0$$

$$Y_{bus0} = j \begin{bmatrix} -10 & 0 \\ 0 & -10 \end{bmatrix} \text{ PU}$$

$$Z_{bus0} = Y_{bus0}^{-1} = j \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$$

برای محاسبه اتصال کوتاه یک فاز به زمین در شین ۲ داریم:

$$I_a = 3I_+ = \frac{3V_f}{Z_{22+} + Z_{22-} + Z_{220}} = \frac{3 \times 1}{j(0.133 + 0.133 + 0.1)}$$

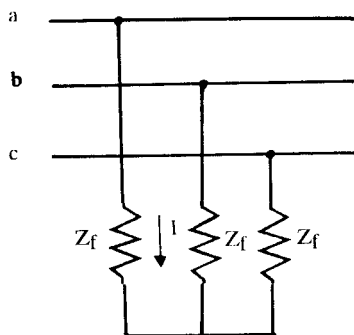
$$I_a = -j8.181 \text{ PU}$$

و اگر اتصال کوتاه در شین ۱ بوقوع پیوندد، خواهیم داشت:

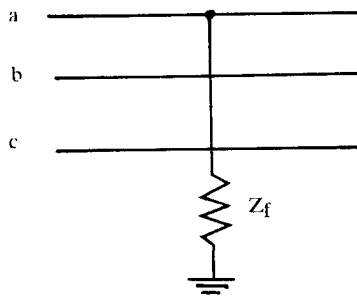
$$I_a = 3I_+ = \frac{3V_f}{Z_{11+} + Z_{11-} + Z_{110}} = \frac{3 \times 1}{j(0.083 + 0.083 + 0.1)} = -j11.28 \text{ PU}$$

۸-۱۶ اتصال کوتاه از طریق امپدانس

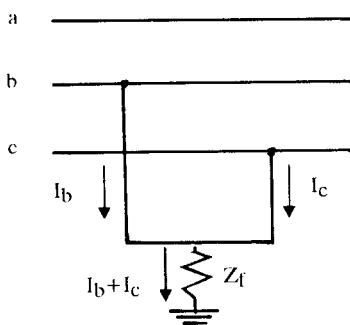
در بخش‌های گذشته جریان اتصال کوتاه را در حالتی که امپدانس خطا^(۱) (امپدانس اتصالی) صفر بوده بدست آوردیم. گرچه در محاسبات کلاسیک اتصال کوتاه بخاطر ضریب اطمینان بیشتر، این امپدانس برابر صفر منظور می‌شود، لیکن در عمل امپدانس خطا بندرت صفر می‌باشد. اغلب اتصال کوتاه‌ها از نوع یک فاز به زمین و براثر جرقه روی مقره‌ها بوجود می‌آیند که در اینصورت امپدانس بین فاز و زمین به مقاومت قوس الکتریکی، مقاومت دکل انتقال، مقاومت زمین و سیم‌های زمین بستگی دارد. امپدانس خطا را با Z_f نشان می‌دهیم. انواع اتصال کوتاه‌ها از طریق این امپدانس در شکل (۸-۳۷) نشان داده شده‌اند.



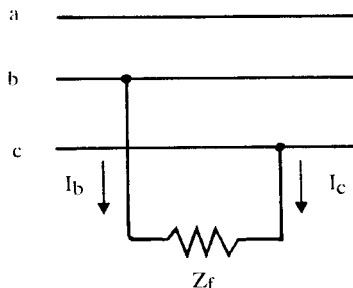
(الف)



(ب)



(ج)



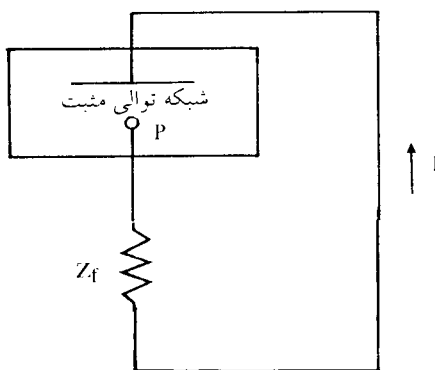
(د)

شکل ۸-۳۷: انواع اتصال کوتاه‌ها از طریق امپدانس

۸-۱۶-۱ اتصال کوتاه سه فاز (متقارن) از طریق امپدانس

چنانچه در سیستم قدرت هر سه فاز از طریق امپدانس خطا Z_f بیکدیگر (و یا به زمین) وصل شوند، مطابق شکل (۸-۳۷ الف)، در اینصورت سیستم قدرت تقارن خود را حفظ کرده و با توجه به شکل (۸-۳۸) جریان اتصال کوتاه به این طریق محاسبه می شود:

$$I = \frac{V_f}{Z_+ + Z_f} \quad (۸-۶۹)$$



شکل ۸-۳۸: اتصال کوتاه متقارن از طریق امپدانس Z_f

ولتاژ فاز a نیز برابر است با:

$$V_a = Z_f I = \frac{Z_f}{Z_f + Z_+} V_f \quad (۸-۷۰)$$

۸-۱۶-۲ اتصال کوتاه یک فاز به زمین از طریق امپدانس

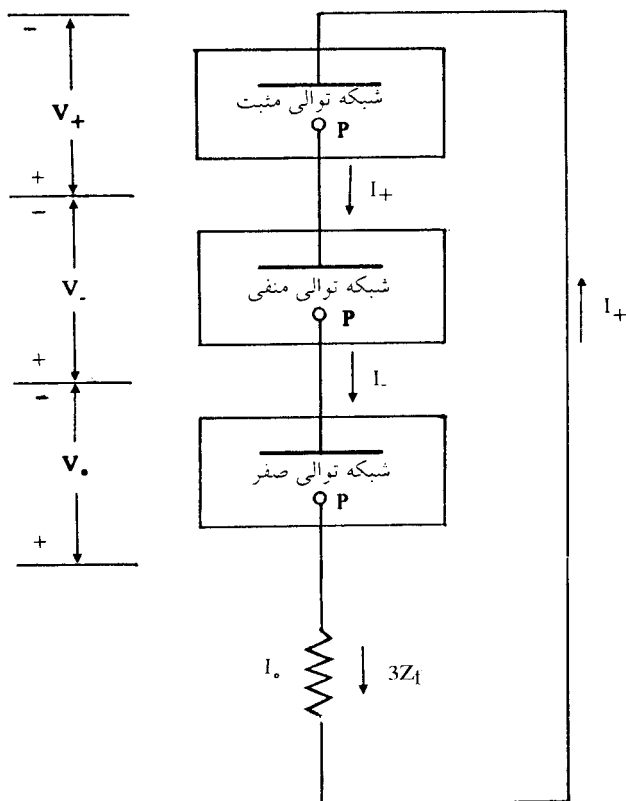
شکل (۸-۳۷ ب) اتصال کوتاه فاز a را به زمین از طریق امپدانس Z_f نشان می دهد. چون Z_f در مسیر زمین قرار دارد جریان $3I$ از آن عبور می کند. بنابراین باید امپدانس $3Z_f$ را بطور سری با شبکه توالی صفر در نظر گرفت. به این ترتیب معادله (۸-۶۰) برای تعیین جریان توالی مثبت بصورت زیر خواهد بود:

$$I_+ = \frac{V_f}{Z_+ + Z_- + Z_0 + 3Z_f} \quad (۸-۷۱)$$

همچنین داریم:

$$I_+ = I_- = I_0$$

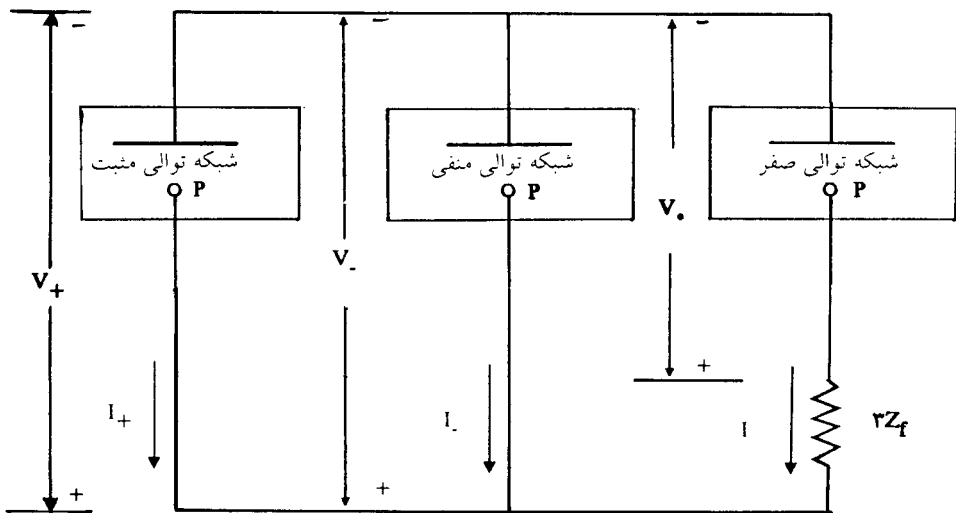
دیاگرام اتصال سری شبکه‌های توالی مثبت، منفی و صفر با امپدانس $3Z_f$ که جوابگوی معادله (۸-۷۱) باشد، در شکل (۸-۳۹) نشان داده شده‌است.



شکل ۸-۳۹: اتصال سری شبکه‌های توالی در اتصال کوتاه یک‌فاز به زمین از طریق امپدانس Z_f

۸-۱۶-۳ اتصال کوتاه دوفاز به زمین از طریق امپدانس

در این حالت نیز طبق شکل (۸-۳۷ ج) امپدانس Z_f در مسیر زمین بوده و جریان $3I_0$ از آن عبور می‌کند. بنابراین در اتصال شبکه‌های توالی، امپدانس $3Z_f$ با امپدانس توالی صفر سری خواهد شد. شکل (۸-۴۰) این اتصال را نشان می‌دهد.



شکل ۴۰-۸: اتصال شبکه‌های توالی در اتصال کوتاه دوفاز به زمین از طریق امپدانس Z_f

با توجه به شکل ۴۰-۸ ولتاژ توالی صفر با ولتاژهای توالی مثبت و منفی برابر نمی‌باشد. معادله زیر رابطه V_0 را با V_+ و V_- بیان می‌کند:

$$V_+ = V_- = V_0 - 3Z_f I_0 \quad (۸-۷۲)$$

و جریان توالی مثبت نیز این چنین محاسبه می‌شود:

$$I_+ = \frac{V_f}{Z_+ + \frac{Z_-(Z_0 + 3Z_f)}{Z_+ + Z_0 + 3Z_f}} \quad (۸-۷۳)$$

۴-۱۶-۸ اتصال کوتاه دوفاز به یکدیگر از طریق امپدانس

شکل (۳۷-۸ د) اتصال کوتاه دوفاز به یکدیگر از طریق امپدانس Z_f را نشان می‌دهد.

شرایط این اتصال کوتاه عبارتند از:

$$I_a = 0$$

$$I_c = -I_b$$

$$V_c = V_b - Z_f I_b$$

با توجه به شرایط فوق، خواهیم داشت:

$$I_s = A^{-1} I$$

$$\begin{bmatrix} I_o \\ I_+ \\ I_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix}$$

و از آنجا:

$$I_o = 0 \quad (۸-۷۴)$$

$$I_+ = -I_- \quad (۸-۷۵)$$

برای تعیین وضعیت ولتاژهای توالی مثبت و منفی داریم:

$$V_s = A^{-1} V$$

$$\begin{bmatrix} V_o \\ V_+ \\ V_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_b - Z_f I_b \end{bmatrix}$$

$$V_+ = \frac{1}{3} (V_a + aV_b + a^2V_b) - \frac{1}{3}a^2Z_f I_b$$

$$V_- = \frac{1}{3} (V_a + aV_b + a^2V_b) - \frac{1}{3}aZ_f I_b$$

$$V_+ - V_- = \frac{1}{3} (a - a^2) Z_f I_b = j \frac{1}{\sqrt{3}} Z_f I_b$$

از آنجا جریان اتصال کوتاه I_b برابر است با:

$$I_b = -j\sqrt{3} \frac{V_+ - V_-}{Z_f}$$

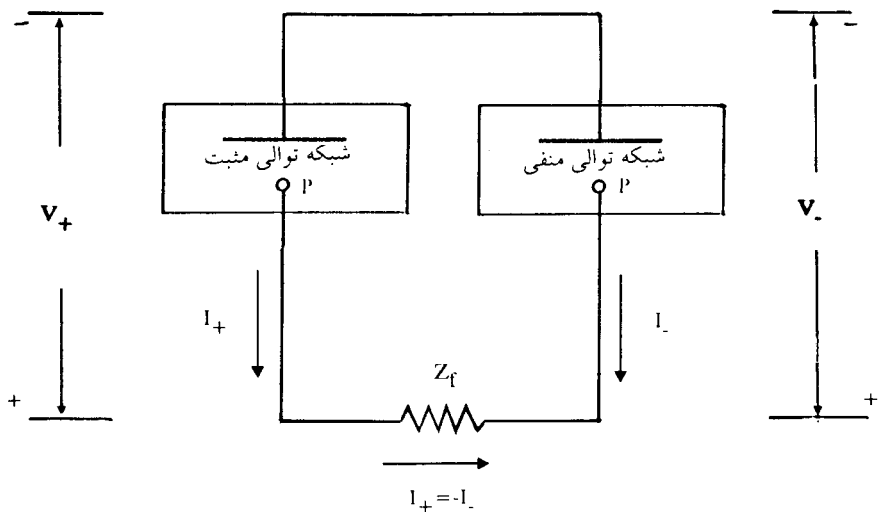
از طرف دیگر طبق معادله (۸-۴۷) می توان نوشت:

$$I_b = -j\sqrt{3} I_+$$

مقایسه دو رابطه اخیر نشان می دهد که :

$$I_+ = \frac{V_+ - V_-}{Z_f} \quad (8-76)$$

با توجه به این معادله می توان دیاگرام اتصال شبکه های توالی مثبت و منفی را در این اتصال کوتاه رسم نمود. شکل (۸-۴۱) دیاگرام این اتصال را نشان می دهد.



شکل ۸-۴۱: دیاگرام اتصال شبکه های توالی مثبت و منفی در اتصال کوتاه دوفاز بیدیگر
از طریق امپدانس Z_f

از روی شکل (۸-۴۱) می توان نوشت:

$$I_+ = \frac{V_f}{Z_+ + Z_- + Z_f} \quad (8-77)$$

همچنین داریم:

$$I_+ = -I_- \quad (8-78)$$

مسائل فصل هشتم

۸-۱ اگر $V_+ = 50 \angle 0^\circ$ ، $V_- = 20 \angle 90^\circ$ و $V_o = 10 \angle 180^\circ$ ولت، بترتیب مؤلفه‌های توالی مثبت، منفی و صفر ولتاژهای فازی یک سیستم باشند. مقادیر V_a ، V_b و V_c را از روش تحلیلی و همچنین ترسیمی بدست آورید.

۸-۲ بر اثر اتصال کوتاه دوفاز b و c به زمین در یک ژنراتور بی‌بار، جریان‌های توالی بترتیب زیر بدست آمده‌اند:

$$I_+ = 600 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$I_- = 250 \angle 90^\circ \text{ A}$$

$$I_o = 350 \angle 90^\circ \text{ A}$$

جریان اتصال کوتاه بطرف زمین، و جریان هر یک از فازهای ژنراتور را محاسبه کنید.

۸-۳ یک بار اهمی سه فاز متعادل با اتصال ستاره که مقاومت هر فاز آن 10Ω است به یک سیستم ولتاژ نامتقارن با ولتاژهای خطی زیر متصل شده‌است:

$$V_{ab} = 100 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$V_{bc} = 80/\sqrt{3} \angle -121/44^\circ \text{ V}$$

$$V_{ca} = 90 \angle 130^\circ \text{ V}$$

الف) مؤلفه‌های متقارن ولتاژهای خطی و ولتاژهای فازی را بدست آورید.

ب) ماتریس امپدانس توالی Z_f را تشکیل دهید.

ج) جریان‌های خطی بار را با استفاده از بندهای (الف) و (ب) فوق‌الذکر محاسبه نمایید.

د) آیا روش دیگری (بجز استفاده از روش مؤلفه‌های متقارن) برای محاسبه جریان‌های خطی فوق‌الذکر می‌شناسید. آنرا بررسی نموده و نتایج حاصله را با نتایج بند (ج) مقایسه نمایید.

۴-۸ قدرت مصرف شده در بار سه فاز مسأله (۳-۸) را با استفاده از مؤلفه‌های متقارن محاسبه نمائید. این قدرت را با استفاده از ولتاژها و جریان‌های فازی محاسبه کرده و نتایج دو روش را مقایسه نمائید.

۵-۸ ولتاژهای خطی سه فاز متقارن 400 ولت به یک بار اهمی با اتصال ستاره و مقاومت‌های $Z_c = 50\Omega$ و $Z_b = 40\Omega$ ، $Z_a = 25\Omega$ متصل شده‌اند. ولتاژ V_{ab} را بعنوان بردار مرجع در نظر گرفته و جریان فازها و ولتاژهای فازی را بدست آورید (ابتدا مؤلفه‌های متقارن ولتاژهای خطی را بدست آورید).

۶-۸ شبکه‌های توالی منفی و صفر سیستم قدرت مسأله (۶-۲) از فصل دوم را رسم کرده، مقادیر راکتانس‌ها را برحسب PU روی آن‌ها مشخص نمائید. نقطه صفر ژنراتور ۱ مستقیماً زمین شده‌است، و نقطه صفر ژنراتورهای ۲ و ۳ هریک از طریق راکتوری با راکتانس 2% به زمین وصل شده‌است. راکتانس‌های توالی منفی ماشین‌ها را با توالی مثبت آنها یکسان در نظر بگیرید. راکتانس توالی صفر هریک از ماشینها 5% است. امپدانس توالی صفر خطوط انتقال را ۳ برابر امپدانس توالی مثبت آنها منظور نمائید.

۷-۸ شبکه توالی صفر سیستم قدرت مسأله (۸-۲) از فصل دوم را رسم کرده، مقادیر راکتانس‌ها را برحسب PU روی آنها مشخص نمائید. نقطه صفر هریک از ماشینها از طریق راکتوری با راکتانس 5% زمین شده‌است و امپدانس توالی صفر خطوط انتقال $2/5$ برابر امپدانس توالی صفر آنها است.

۸-۸ یک ژنراتور 250MVA ، 50Hz و 20KV که نقطه صفر آن مستقیماً زمین شده‌است، در شرایط بی‌باری با ولتاژ نامی کار می‌کند. راکتانس‌های آن $X_+ = X_- = X_d = 0.12\text{PU}$ و $X_0 = 0.06\text{PU}$ هستند.

الف) نسبت جریان اتصال کوتاه یک فاز به زمین را به جریان اتصال کوتاه سه‌فاز (متقارن) محاسبه کنید.

ب) می‌خواهیم نقطه صفر ژنراتور را با یک راکتور زمین کنیم بطوریکه جریان زیرگذرای اتصال کوتاه یک فاز به زمین معادل جریان زیرگذرای اتصال کوتاه سه فاز گردد. مقدار راکتانس این راکتور را برحسب اهم بدست آورید.

۸-۹ سیستم قدرت شکل (۸-۴۲) را در نظر بگیرید. مشخصات عناصر بقرار زیر است:

$$X''_d = X_- = \%/10, 13/2KV, 125MVA : G_1 \text{ ژنراتور}$$

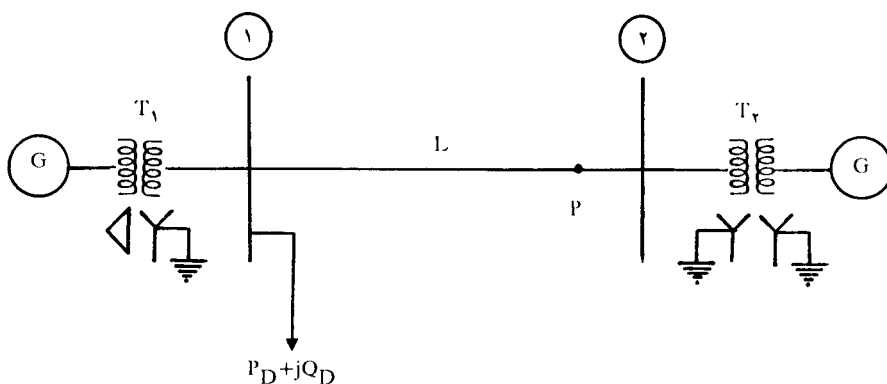
$$X''_d = X_- = \%/20, 6/6KV, 100MVA : G_2 \text{ ژنراتور}$$

$$X = \%/10, 132/13/2KV, 125MVA : T_1 \text{ ترانسفورماتور}$$

$$X = \%/10, 132/6/6KV, 100MVA : T_2 \text{ ترانسفورماتور}$$

$$\text{خط انتقال } L : X_+ = 0/04 \text{ PU و } X_- = 0/12 \text{ PU در مبنای } 132KV \text{ و } 100MVA$$

راکتانس توالی صفر هریک از ژنراتورها ۶٪ است. نقطه صفر هریک از ژنراتورها نیز از طریق راکتانس ۳٪ Z_0 زمین شده است.



شکل ۸-۴۲: مربوط به مسأله (۸-۹)

الف) سیستم را قبل از اتصال کوتاه بی بار فرض کنید. ولتاژ شین ۲ قبل از اتصال کوتاه در شرایط بی باری ۱PU بوده است. بر اثر اتصال کوتاه یک فاز به زمین در نقطه P، جریان اتصال کوتاه در محل وقوع، جریانهای که از دو طرف به نقطه P جاری می شوند، و همچنین ولتاژهای فازی و خطی را در محل وقوع اتصال کوتاه محاسبه نمایید.

ب) مجهولات فوق را با استفاده از ماتریس امپدانس شین برای سه شبکه توالی مثبت، منفی و صفر بدست آورید. همچنین مجهولات مذکور را برای حالتی که اتصال کوتاه دوفاز به زمین در شین ۲ بوقوع می پیوندد بدست آورید.

۸-۱۰ در مسأله (۸-۹)، محاسبه پخش بار نشان می‌دهد که برای $P_D = ۱۵۰ \text{ MW}$ و $Q_D = ۵۰ \text{ Mvar}$ ولتاژهای زیر بدست می‌آید:

$$V_1 = ۱\angle 0^\circ \text{ PU}$$

$$V_2 = ۱/۰۱\angle 2^\circ \text{ PU}$$

مجهولات مسأله (۸-۹) را با در نظر گرفتن جریان‌های بار قبل از اتصال کوتاه و با استفاده از مدار معادل تونن سیستم و اصل جمع آثار بدست آورید.

۸-۱۱ امپدانس‌های توالی یک ژنراتور سنکرون عبارتند از:

$$X_+ = X_- = ۰/۲ \text{ PU}$$

$$X_0 = X_+$$

$$X_0 = ۰/۱ \text{ PU}$$

می‌خواهیم نقطه صفر ستاره ژنراتور را توسط راکتانس X_n به زمین متصل کنیم. مقدار X_n چقدر باشد تا بر اثر اتصال کوتاه یک فاز به زمین، ولتاژ هریک از دو فاز دیگر حداکثر $۱/۱$ برابر ولتاژ این فازها در حالت $X_n = ۰$ گردد. در اینصورت جریان اتصال کوتاه یک فاز به زمین چند درصد کاهش می‌یابد؟ در محاسبات $E_n = ۱ \text{ PU}$ در نظر گرفته شود.

۸-۱۲ در مسأله (۷-۳) از فصل هفتم، ژنراتورهای نشان داده شده دارای اتصال ستاره می‌باشند. نقطه صفر ژنراتور ۱ از طریق راکتور $۰/۰۲ \text{ PU}$ به زمین شده است و نقطه صفر ژنراتور ۲ به زمین متصل نشده است. ترانسفورماتورها در دو انتهای هریک از خطوط انتقال دارای اتصال $Y-Y$ بوده که نقطه صفر ستاره‌های هر دو طرف زمین شده است، بجز ترانسفورماتورهائی که خطوط را به شین ۳ متصل می‌نمایند که اتصال این ترانسفورماتور $Y-\Delta$ می‌باشد. نقطه صفر ستاره این ترانسفورماتورها زمین شده و اتصال Δ در طرف شین ۳ قرار دارد. راکتانسهائی که در شکل (۷-۳) بین شین‌ها نشان داده شده اند شامل راکتانس خطوط و ترانسفورماتورها می‌باشند. راکتانس توالی صفر خطوط شامل ترانسفورماتورها ۲ برابر راکتانس‌های نشان داده شده در شکل است. راکتانس‌های توالی صفر ژنراتورهای ۱ و ۲ بترتیب $۰/۰۴$ و $۰/۰۸$ پریونیت هستند.

الف) ماتریس‌های Z_{bus+} ، Z_{bus-} و Z_{bus0} را تشکیل دهید.

ب) جریان‌های اتصال کوتاه دوفاز به یکدیگر و یک فاز به زمین در شین ۲ را از طریق امپدانس $Z_f = j0.5 \text{ PU}$ محاسبه کنید.

۸-۱۳ ماتریس‌های ادمیتانس شین برای شبکه‌های توالی مثبت، منفی و صفر یک سیستم قدرت مطابق زیر معلوم هستند. همه ژنراتورهای موجود در سیستم از طریق ترانسفورماتورهای با راکتانس القایی پراکندگی 0.2 PU به شین‌های مربوط متصل می‌باشند. نقطه صفر هریک از ژنراتورها بطور مستقیم و با امپدانس صفر به زمین وصل شده‌است.

$$Y_{bus+} = Y_{bus-} = j \begin{bmatrix} -20 & 5 & 0 & 5 \\ 5 & -15 & 10 & 0 \\ 0 & 10 & -40 & 10 \\ 5 & 0 & 10 & -14/5 \end{bmatrix} \text{ PU}$$

$$Y_{bus0} = j \begin{bmatrix} -54 & 2 & 0 & 2 \\ 2 & -7 & 5 & 0 \\ 0 & 5 & -35 & 5 \\ 2 & 0 & 5 & -6/5 \end{bmatrix} \text{ PU}$$

الف) شبکه‌های توالی مثبت، منفی و صفر این سیستم را رسم نموده و ادمیتانس هریک از عناصر (ژنراتور، ترانسفورماتور، خط انتقال، بار، خازن و ...) را روی آن مشخص کنید.
ب) دیاگرام تک خطی سیستم را رسم نموده و اتصال اولیه و ثانویه هریک از ترانسفورماتورها را روی شکل دقیقاً مشخص نمایید.

۸-۱۴ در سیستم قدرت شکل (۷-۱۸)، مسأله ۶-۷ از فصل هفتم، راکتانس‌های توالی منفی کلیه عناصر نشان داده شده را با راکتانس‌های توالی مثبت آنها یکسان فرض کنید.
الف) بر اثر اتصال کوتاه دوفاز بیکدیگر در شین ۲ جریان زیرگذرای اتصال کوتاه را بدست آورید.
ب) جریان خطوط ۱-۲ و ۳-۲ را محاسبه کنید.