

## فصل سوم : اتصال کوتاه متقارن

حالاتی بررسی عملکرد سیستم قدرت:

1- حالت پایدار (ایستا): اختلال در سیستم نداریم و بارها نسبت به زمان ثابت اند. معادلات سیستم جبری غیرخطی اند. توسط بخش بار می توان سیستم را تحلیل نمود.

2- حالت دینامیک (پویا) : اختلالات کوچک داریم. اختلالات شامل تغییرات جزئی بار حول نقطه کار سیستم هستند. معادلات سیستم دیفرانسیل خطی هستند که می توان توسط تبدیل لاپلاس آنها را حل نمود.

3- حالت گذرا : اختلالات بزرگ سیستم قدرت را شامل می شوند و به سه گروه تقسیم می شوند:

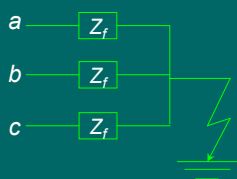
## انواع اتصال کوتاه ها بترتیب شدت خطرناکی:

- 1- اتصال کوتاه سه فاز متقارن
- 2- اتصال کوتاه دوفاز
- 3- اتصال کوتاه تکفاز به زمین (SLG)
- 4- از هم گسیختگی و یا پاره شدن هادیهای خطوط انتقال

93

## اتصال کوتاه سه فاز متقارن :

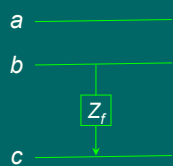
- احتمال وقوع آن کم است (حدود 5 درصد) ولی بسیار خطرناک است زیرا انتقال قدرت بکلی قطع می شود و بالاترین جریانهای اتصالی را بوجود می آورد.
- محل اتصالی باید سریعاً از سیستم قدرت جدا شود.
- کاربرد مطالعه این اتصال کوتاه :
- در حفاظت سیستم و تعیین مقادیر نامی کلیدهای قدرت و رله ها می باشد.
- بررسی پایداری گذرای سیستم قدرت



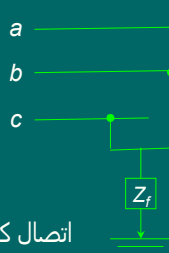
94

## اتصال کوتاه دوفاز :

- دو نوع است:
- دوفاز به هم ( $LL$ )
- دوفاز به هم و به زمین ( $DLG$ )
- توان انتقالی از خط کم می شود.
- باعث نامتقارنی سیستم قدرت می شود.



اتصال کوتاه  $LL$

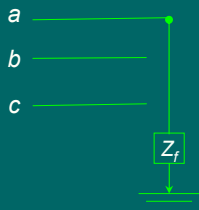


اتصال کوتاه  $DLG$

95

## اتصال یکفاز به زمین ( $SLG$ ):

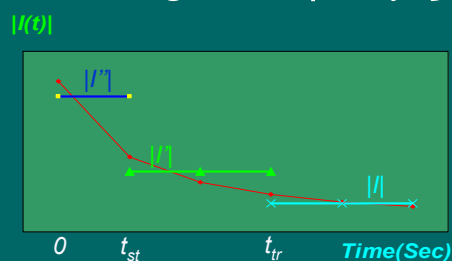
- معمولا بر اثر شکست الکتریکی و ایجاد جرقه روی مقره ها پدید می آید.
- احتمال وقوع آن حدود 75 درصد است.



- تذکر : تعداد زیادی از اتصال کوتاه ها خود به خود برطرف می شوند. یعنی با کاهش جریان خطا، یونیزاسیون مسیر اتصالی از بین می رود و عایق وضعیت عادی خود را باز می یابد. لذا از ریکلوزرها استفاده می شود.

96

## تغییرات مقدار موثر جریان اتصال کوتاه سنکرون و تقریبهای پله ای آن :



-  $|I''|$  تقریب پله ای جریان اتصال کوتاه زیر گذرا

-  $|I'|$  تقریب پله ای جریان اتصال کوتاه گذرا

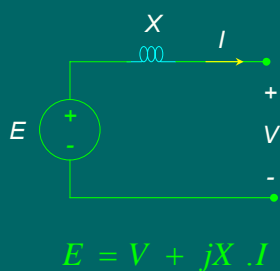
-  $|I|$  تقریب پله ای جریان اتصال کوتاه پایدار

-  $t_{st}$  زمان دوره زیر گذرا که حدود 2 سیکل (0.04 ثانیه) است.

-  $t_{tr}$  زمان دوره گذرا که حدود 25 سیکل (0.5 ثانیه) است.

97

## مدل ژنراتور سنکرون در اتصال کوتاه :



- مدل ژنراتور سنکرون در حالت های زیرگذرا، گذرا و پایدار به شکل بالا است. فقط

در حالت گذرا به جای X باید  $X'$  و به جای E باید  $E'$  را قرار داد. و در حالت زیرگذرا به جای X باید  $X''$  و به جای E باید  $E''$  را قرار داد.

98

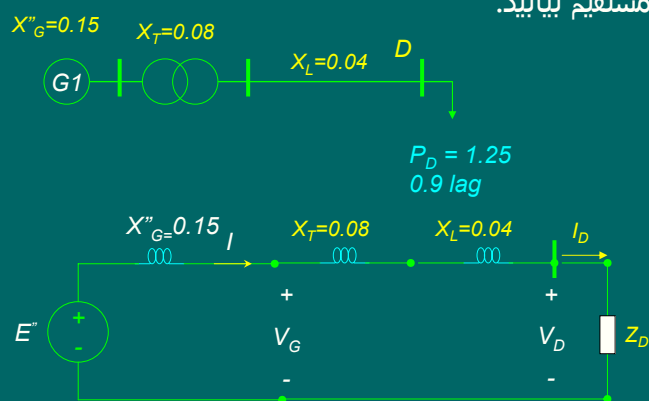
## روش مستقیم محاسبه اتصال کوتاه متقارن سه فاز:

مراحل روش:

- 1- محاسبه ولتاژهای ترمینالها و جریانهای ژنراتورها و موتورهای سنکرون با استفاده از پخش بار در **قبل اتصال کوتاه**
- 2- محاسبه ولتاژهای **داخلی** ژنراتورها ( $E''$ ,  $E'$ ,  $E$ ) با استفاده از مدل ژنراتور سنکرون و فرمول آن
- 3- اتصال نقطه مورد نظر به نقطه صفر سیستم و محاسبه جریانهای لازم با ثابت نگه داشتن  $E''$ ,  $E'$ ,  $E$

### مثال 3-1: روش مستقیم اتصال کوتاه

در سیستم قدرت شکل زیر، ولتاژ بار در لحظه اتصال کوتاه  $1.02 < 0$  بوده است. اتصال کوتاه سه فاز در نقطه  $D$  اتفاق می افتد. جریان اتصال کوتاه را به روش مستقیم بیابید.



حل:

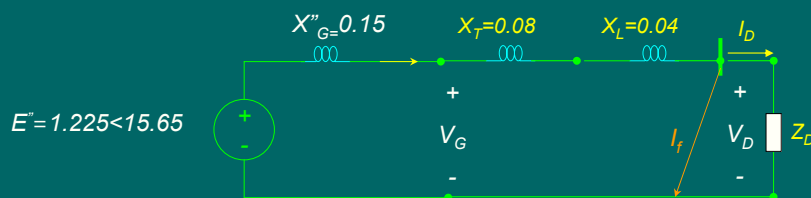
101

### ادامه حل مثال 3-1

$$|I_D| = \frac{P_D}{|V_D| \cos \phi} = \frac{1.25}{1.02 \times 0.9} = 1.361$$

$$I_D = 1.361 \angle -\cos^{-1} 0.9 = 1.361 \angle -25.84^\circ$$

$$E_G'' = V_D + j(X_G'' + X_T + X_L)I_D = 1.02 \angle 0 + j(0.15 + 0.08 + 0.04) \times (1.361 \angle -25.84^\circ) = 1.225 \angle 15.65^\circ$$



$$I_f = \frac{E_G''}{j(X_G'' + X_T + X_L)} = \frac{1.225 \angle 15.65^\circ}{j(0.15 + 0.08 + 0.04)} = 4.537 \angle -74.32^\circ$$

102

## فصل چهارم : اتصال کوتاه نامتقارن

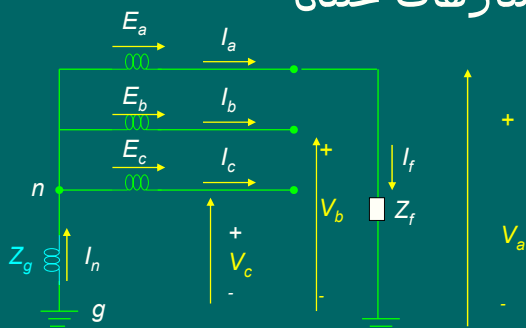
مشخصات سیستم دارای **تقارن فاز**:

- امپدانس بارها در هر سه فاز برابرند.
- امپدانس خطا در هر سه فاز برابر است.
- ولتاژها، جریانها و نیرومحرکه دارای تقارن سه فاز بودند.
- مجموع جبری جریانهای سه فاز صفر بودند در نتیجه بین نقاط خنثی ژنراتور و یا ترانسفورماتور جریان نداریم و افت ولتاژ نداریم. بنابراین تمام نقاط خنثی در سیستم متعادل با زمین هم پتانسیل هستند.

**نتایج :**

- سیستم یک فاز تحلیل می شود.
- جریانها و ولتاژهای فازهای دیگر از روی فاز اول دست می آیند.
- توان سه فاز از سه برابر کردن توان یکفاز بدست می آید.
- **سیستم نامتعادل: یا بار نامتعادل داریم و یا اتصال کوتاه نامتقارن رخ داده است.**

## معرفی جریانها و ولتاژهای خنثی



در سیستم نامتقارن نقطه مبنا، زمین (نقطه  $g$ ) فرض می شود. بنابراین منظور از ولتاژ هر فاز، ولتاژ آن فاز نسبت به زمین است.

$$I_n = I_a + I_b + I_c$$

$$V_n = V_{ng} = -Z_g I_n = -Z_g (I_a + I_b + I_c)$$

$$I_a = I_f \quad I_b = 0 \quad I_c = 0$$

$$V_a = V_{ag} = Z_f I_f$$

$$V_{an} = V_{ag} - V_{ng} = V_a - V_n = V_a + Z_g (I_a + I_b + I_c)$$

117

## تعریف $\alpha$

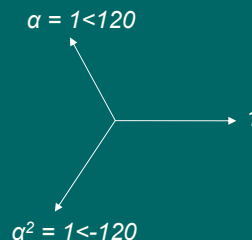
تعریف می کنیم:  $\alpha = e^{j120} = 1 < 120^\circ$   
اگر  $\alpha$  در یک فازور ضرب شود فقط فاز آنرا به اندازه 120 درجه اضافه می کند (در جهت مثلثاتی می چرخاند).  
می توان نشان داد:

$$\alpha^2 = \alpha^* = 1 < -120^\circ$$

$$\alpha^3 = 1$$

$$(\alpha^2)^* = \alpha$$

$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0$$

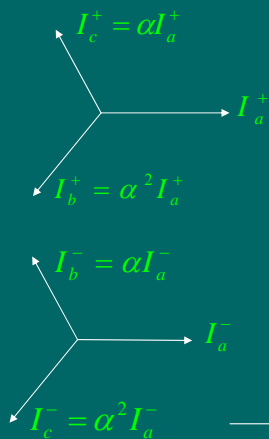


118



## مولفه های متقارن

می توان نشان داد که هر مجموعه فازور سه فاز **نامتقارن** را می توان به سه مجموعه مولفه **متقارن** زیر تجزیه نمود:



الف) مجموعه توالی **مثبت**  $(abc)$ : فاز  $a$  از فاز  $b$  120 جلوتر است و فاز  $c$  از فاز  $b$  120 درجه جلوتر است.

ب) مجموعه توالی **منفی**  $(acb)$ : فاز  $a$  از فاز  $b$  120 عقب تر است و فاز  $c$  از فاز  $b$  120 درجه عقب تر است.

ج) مجموعه توالی **صفر**: هر سه فاز هم فاز و مساویند.

119

## تجزیه به مولفه های متقارن

$$\begin{cases} I_a = I_a^+ + I_a^- + I_a^0 \\ I_b = I_b^+ + I_b^- + I_b^0 = \alpha^2 I_a^+ + \alpha I_a^- + I_a^0 \\ I_c = I_c^+ + I_c^- + I_c^0 = \alpha I_a^+ + \alpha^2 I_a^- + I_a^0 \end{cases}$$

شکل ماتریسی:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^+ \\ I_a^- \\ I_a^0 \end{bmatrix} \rightarrow \vec{I}_p = T \vec{I}_s \rightarrow I_s = T^{-1} I_p$$

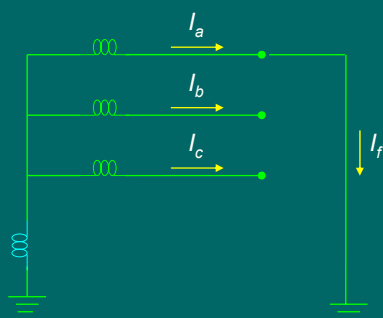
$I_p$  جریانهای فازی و  $I_s$  مولفه های متقارن جریانها هستند.

ماتریس تبدیل فورتنسکیو و معکوس آن:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \quad T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

120

## مثال 1-4



در ژنراتور بی بار شکل مقابل، یکفاز به زمین اتصال کوتاه شده است. مولفه های متقارن جریان را بر حسب جریان اتصال کوتاه  $I_f$  بیابید.

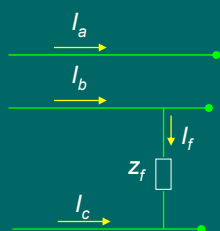
حل:

$$I_s = T^{-1} I_p \rightarrow \begin{bmatrix} I_a^+ \\ I_a^- \\ I_a^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a = I_f \\ I_b = 0 \\ I_c = 0 \end{bmatrix} \rightarrow I_a^+ = I_a^- = I_a^0 = \frac{1}{3} I_f$$

نتیجه: اگر یکی از خطوط سه فاز به زمین اتصال کند، دامنه مجموعه مولفه های مثبت، منفی و صفر مساوی خواهند بود.

121

## مثال 2-4



در شبکه شکل مقابل، دو فاز به هم توسط امپدانس  $Z_f$  اتصال کوتاه شده اند. مولفه های متقارن جریان را بر حسب جریان اتصال کوتاه  $I_f$  بیابید.

حل:

$$I_s = T^{-1} I_p \rightarrow \begin{bmatrix} I_a^+ \\ I_a^- \\ I_a^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a = 0 \\ I_b = I_f \\ I_c = -I_f \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} I_a^+ = \frac{j}{\sqrt{3}} I_f \\ I_a^- = \frac{-j}{\sqrt{3}} I_f \\ I_a^0 = 0 \end{cases}$$

نتیجه: در اتصال کوتاه خط به خط، دامنه مولفه های مثبت و منفی جریان مساویند و جریان مولفه صفر ندارد.

122

### مثال 3-4

ثابت کنید ولتاژهای خط به خط هیچگاه مولفه توالی صفر ندارند.

حل:

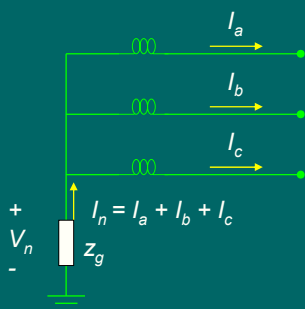
$$V_s = T^{-1}V_p \rightarrow \begin{bmatrix} V_{ab}^+ \\ V_{ab}^- \\ V_{ab}^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix}$$

$$\rightarrow V_{ab}^0 = \frac{1}{3}(V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}) = \frac{1}{3}(V_a - V_b + V_b - V_c + V_c - V_a) = 0$$

123

### مثال 4-4

نشان دهید سیم نول فقط وقتی جریان دارد که جریانه‌ها مولفه صفر داشته باشند.



حل:

$$I_s = T^{-1}I_p \rightarrow \begin{bmatrix} I_a^+ \\ I_a^- \\ I_a^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

$$\rightarrow I_a^0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3}I_n \rightarrow \text{If } I_a^0 = 0 \Rightarrow \begin{cases} I_n = 0 \\ V_n = -Z_g I_n = 0 \end{cases}$$

نتیجه: تنها جریان توالی صفر، جریان و ولتاژ نول را پدید می آورد.

124

## مثال 4-5

نشان دهید توان کل در یک سیستم نامتعادل برابر با مجموع مولفه های متقارن توان می باشد.  
حل:

$$\begin{aligned}
 S &= P + jQ = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* = [V_a \quad V_b \quad V_c] \begin{bmatrix} I_a^* \\ I_b^* \\ I_c^* \end{bmatrix} = \\
 V_p^T I_p^* &= (TV_s)^T (TI_s)^* = V_s^T T^T T^* I_s^* = V_s^T (3U) I_s^* = 3V_s^T I_s^* \\
 &= 3[V_a^+ \quad V_a^- \quad V_a^0] \begin{bmatrix} I_a^+ \\ I_a^- \\ I_a^0 \end{bmatrix}^* = 3V_a^+ I_a^{+*} + 3V_a^- I_a^{-*} + 3V_a^0 I_a^{0*} \\
 &= S^+ + S^- + S^0
 \end{aligned}$$

125

## ادامه مثال 4-5

$$\begin{aligned}
 T^T T^* &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix}^* = \begin{bmatrix} 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} 1+\alpha^3+\alpha^3 & 1+\alpha^4+\alpha^2 & 1+\alpha^2+\alpha \\ 1+\alpha^4+\alpha^2 & 1+\alpha^3+\alpha^3 & 1+\alpha^2+\alpha \\ 1+\alpha^2+\alpha & 1+\alpha^2+\alpha & 1+1+1 \end{bmatrix} = 3 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = 3U
 \end{aligned}$$

126

## معادلات کار ژنراتور سنکرون در بار نامتقارن

شکل کلی معادلات کار ژنراتور سنکرون :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

چون هر سه فاز شبیه هم هستند و بعلاقتقارن دوره ای فازها عناصر ماتریس امپدانس ژنراتور عبارتند از:

$$Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc} = Z_1$$

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z_2$$

$$Z_{ac} = Z_{cb} = Z_{ba} = Z_3$$

$$Z_p = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 & Z_3 \\ Z_3 & Z_1 & Z_2 \\ Z_2 & Z_3 & Z_1 \end{bmatrix}$$

شکل ماتریسی معادلات کار ژنراتور :

$$V_p = E_p - Z_p I_p$$

127

## بیان معادلات کار ژنراتور بر حسب مولفه ها

$$V_p = E_p - Z_p I_p$$

$$TV_s = E_p - Z_p (TI_s)$$

$$V_s = \underbrace{T^{-1}E_p}_{E_s} - \underbrace{(T^{-1}Z_pT)}_{Z_s} I_s$$

$$V_s = E_s - Z_s I_s$$

$$E_s = T^{-1}E_p = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ \alpha^2 E_a \\ \alpha E_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$Z_s = T^{-1}Z_pT = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 & Z_3 \\ Z_3 & Z_1 & Z_2 \\ Z_2 & Z_3 & Z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^+ & 0 & 0 \\ 0 & Z^- & 0 \\ 0 & 0 & Z^0 \end{bmatrix}$$

$$Z^+ = Z_1 + \alpha^2 Z_2 + \alpha Z_3 \quad Z^- = Z_1 + \alpha Z_2 + \alpha^2 Z_3 \quad Z^0 = Z_1 + Z_2 + Z_3$$

128

## نتیجه معادلات کار ژنراتور بر حسب مولفه ها

$$V_s = E_s - Z_s I_s \Rightarrow \begin{bmatrix} V_{an}^+ \\ V_{an}^- \\ V_{an}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z^+ & 0 & 0 \\ 0 & Z^- & 0 \\ 0 & 0 & Z^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^+ \\ I_a^- \\ I_a^0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} V_{an}^+ = E_a - Z^+ I_a^+ \\ V_{an}^- = -Z^- I_a^- \\ V_{an}^0 = -Z^0 I_a^0 \end{cases}$$

نتایج :

- 1- چون  $Z_s$  قطری است بین سه مولفه متقارن هیچ گونه تزویجی وجود ندارد. یعنی ولتاژ هر مولفه فقط به جریان همان مولفه بستگی دارد.
- 2- تنها مولفه توالی مثبت دارای نیرو محرکه القایی  $E_a$  است.
- 3- مولفه توالی  $Z^+$ ،  $Z^-$  و  $Z^0$  با هم مساوی نیستند. بنابراین نمی توان فقط یک مولفه را بدست آورد و سایر مولفه ها را از روی آن محاسبه کرد.

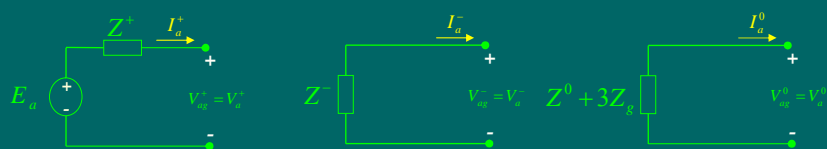
129

## شبکه های توالی معادل ژنراتور سنکرون

زمین (g) مبنا می باشد:

$$V_{ag} = V_{an} + V_{ng} = V_{an} - Z_g (I_a + I_b + I_c)$$

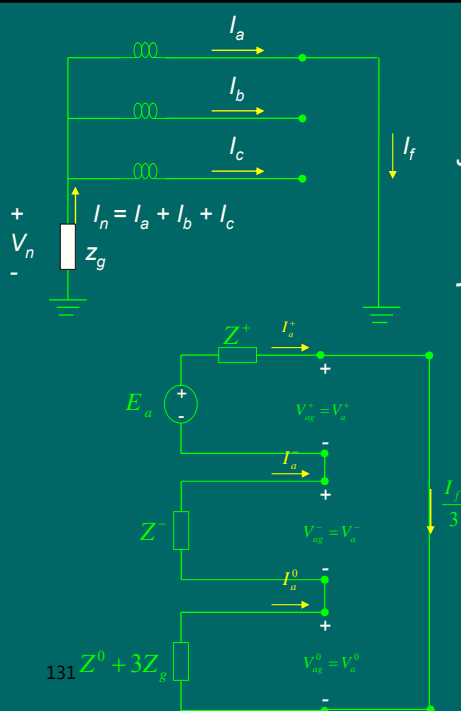
$$\begin{cases} V_{ag}^+ = V_{an}^+ - Z_g (I_a^+ + I_b^+ + I_c^+) = V_{an}^+ - Z_g \times 0 = V_{an}^+ = E_a - Z^+ I_a^+ \\ V_{ag}^- = V_{an}^- - Z_g (I_a^- + I_b^- + I_c^-) = V_{an}^- - Z_g \times 0 = V_{an}^- = -Z^- I_a^- \\ V_{ag}^0 = V_{an}^0 - Z_g (I_a^0 + I_b^0 + I_c^0) = V_{an}^0 - 3Z_g I_a^0 = -(Z^0 + 3Z_g) I_a^0 \end{cases}$$



130

## مثال 6-4

یک اتصال کوتاه تکفاز به زمین در فاز  $a$  یک ژنراتور سنکرون بی بار رخ داده است. **جریان اتصال کوتاه و ولتاژ فاز  $b$**  را بدست آورید. در صورتیکه  $Z_g = \infty$  شود، دامنه ولتاژ فاز  $b$  را تعیین کنید.



**حل:** قبلاً در اتصال یکفاز به زمین مشاهده شد که  $I^+ = I^- = I^0 = I_f / 3$  و از طرفی  $V_a = V^+ + V^- + V^0 = 0$  بنابراین شبکه های توالی با یکدیگر سری بوده و دو سر آن به هم متصل است.

## ادامه حل مثال 6-4

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

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^+ \\ V_a^- \\ V_a^0 \end{bmatrix} \Rightarrow V_b = \alpha^2 V_a^+ + \alpha V_a^- + V_a^0$$

$$V_b = \alpha^2 (E_a - Z^+ I_a^+) + \alpha (-Z^- I_a^+) + (-Z^0 - 3Z_g) I_a^0$$

$$V_b = \alpha^2 (E_a - Z^+ I_a^+) + \alpha (-Z^- I_a^+) + (-Z^0 - 3Z_g) I_a^+$$

$$V_b = \alpha^2 E_a - (\alpha^2 Z^+ + \alpha Z^- + Z^0 + 3Z_g) I_a^+$$

$$V_b = \alpha^2 E_a - (\alpha^2 Z^+ + \alpha Z^- + Z^0 + 3Z_g) \frac{E_a}{(Z^+ + Z^- + Z^0 + 3Z_g)}$$

$$\lim_{Z_g \rightarrow \infty} |V_b| = |\alpha^2 - 1| |E_a| = \sqrt{3} |E_a|$$

نتیجه: در اتصال کوتاه یک فاز ژنراتور به زمین، وقتی نقطه نول به زمین اتصال باز باشد، دامنه ولتاژ فازهای سالم برابر ولتاژ خط می شود.

132

## امپدانسهای توالی خطوط

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{ag} \\ \Delta V_{bg} \\ \Delta V_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 & Z_2 \\ Z_2 & Z_1 & Z_2 \\ Z_2 & Z_2 & Z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

می توان نشان داد که شکل کلی معادلات افت ولتاژ خطوط در حالت نامتقارن بصورت زیر است :

شکل ماتریسی و تبدیل به مولفه های متقارن :

$$\Delta V_p = Z_p I_p \Rightarrow T \Delta V_s = Z_p (T I_s) \Rightarrow \Delta V_s = \underbrace{(T^{-1} Z_p T)}_{Z_s} I_s \Rightarrow \Delta V_s = Z_s I_s$$

$$Z_s = T^{-1} Z_p T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 & Z_2 \\ Z_2 & Z_1 & Z_2 \\ Z_2 & Z_2 & Z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^+ & 0 & 0 \\ 0 & Z^- & 0 \\ 0 & 0 & Z^0 \end{bmatrix}$$

$$Z^+ = Z^- = Z_1 - Z_2 = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{R_s}\right) \quad Z^0 = Z_1 + 2Z_2 = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_s^2}{R_s^2 R_s' D^2}\right)$$

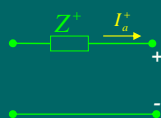
نتایج:

1- ماتریس  $Z_s$  قطری است.

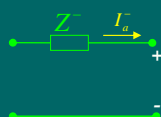
2-  $Z^+ = Z^-$  زیرا خط انتقال عنصر پسو (غیرفعال) است.

133

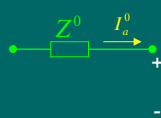
## مدل توالی خط انتقال



مدل توالی مثبت خط انتقال:



مدل توالی منفی خط انتقال:



مدل توالی صفر خط انتقال:

134



## امپدانسهای توالی مثبت و منفی ترانسفورماتورها

چون ترانس عنصر پسیو و ایستا است در صورت تغییر توالی ولتاژها، امپدانس ناشی آن تغییر نخواهد کرد یعنی :

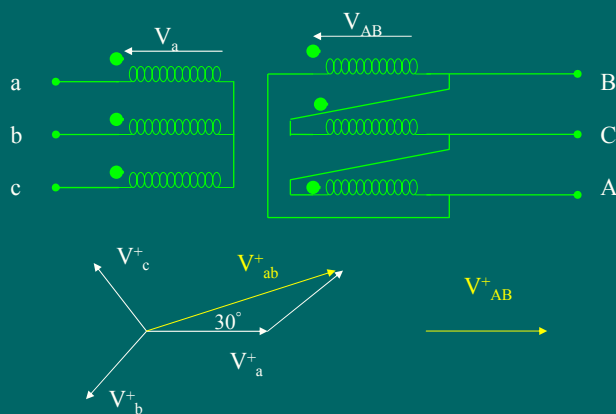
$$Z^{+} = Z^{-} = Z_{Leakage}$$

تذکر: اگر یک ترانسفورماتور سه فاز مولفه های توالی مثبت ولتاژ و جریان را به اندازه  $\alpha$  درجه جابجا کند، مولفه های توالی منفی ولتاژ و جریان را به اندازه  $-\alpha$  درجه جابجا خواهد کرد.

135

## تحقیق جهت جابجائی فاز در ترانسفورماتورها

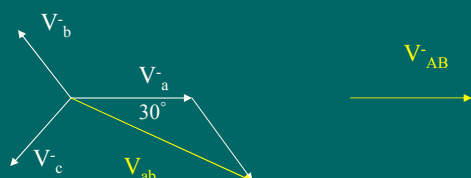
به یک ترانس  $Y\Delta$  یکبار ولتاژ توالی مثبت و بار دیگر ولتاژ توالی منفی اعمال کنید و مقدار و جهت جابجائی فاز بین اولیه و ثانویه را بدست آورید و با هم مقایسه کنید.



- مشاهده می شود که با اعمال ولتاژ توالی مثبت به ترانس، به اندازه  $+30$  درجه جابجائی فاز داریم.

136

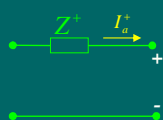
## ادامه تحقیق جهت جابجائی فاز در ترانسفورماتورها



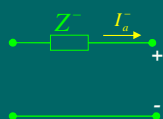
- مشاهده می شود که با اعمال ولتاژ توالی منفی به ترانس، به اندازه  $30^\circ$  درجه جابجائی فاز داریم.

137

## مدل توالی مثبت و منفی ترانسفورماتور



مدل توالی مثبت ترانسفورماتور:



مدل توالی منفی ترانسفورماتور :

$$Z^+ = Z^- = Z_{Leakage}$$

138

## نکاتی در مورد توالی صفر ترانسها

1- امپدانس مغناطیس کنندگی یک ترانس بسیار بزرگ است. بنابراین در عمل آن را اتصال باز می گیرند یعنی از جریان مغناطیس کنندگی صرف نظر می شود:

2- چون از جریان مغناطیس کنندگی صرف نظر می شود، هر گاه از یک طرف جریان نگذرد از دیگر نیز جریان نمی گذرد.

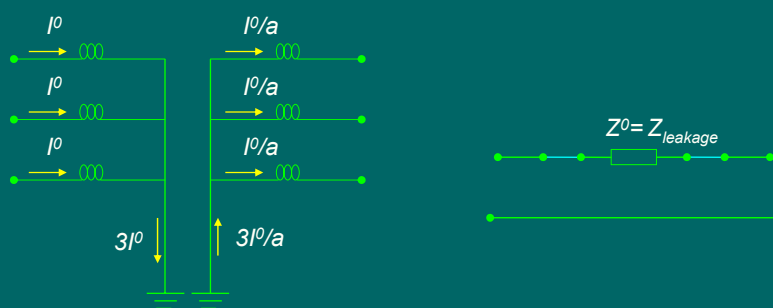
3- در اتصال Y، وقتی جریانهای هم فاز  $I^0$  می توانند جاری شوند که نقطه خنثی زمین شده باشد.

4- در اتصال  $\Delta$ ، جریانهای توالی صفر  $I^0$  بصورت گردشی هستند و در خطوط خروجی، این جریانها وجود ندارند زیرا مسیر برگشت ندارند.

139

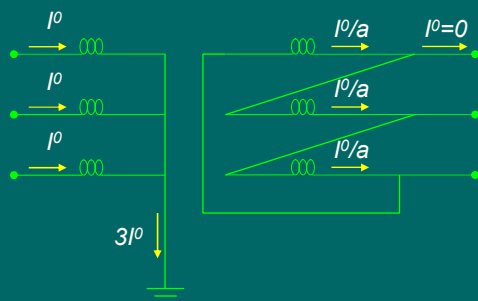
## مدل توالی صفر ترانس ستاره زمین شده-ستاره زمین شده

جریانهای  $I^0$  تنها بوسیله امپدانس نشتی آنها محدود می شوند.

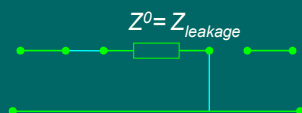


140

### مدل توالی صفر ترانس ستاره زمین شده - مثلث

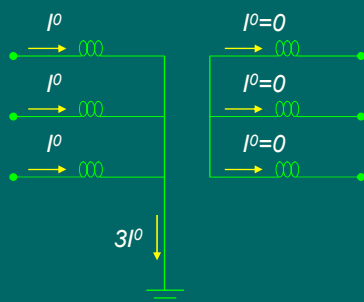


امکان عبور جریان در هر دو طرف وجود دارد ولی در طرف مثلث جریانه گردش اند و در خط جریان توالی صفر وجود ندارد.

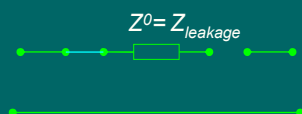


141

### مدل توالی صفر ترانس ستاره زمین شده - ستاره



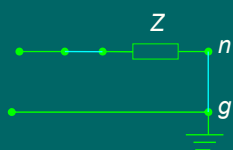
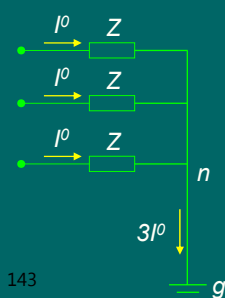
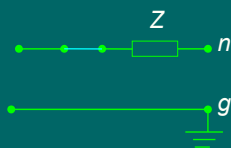
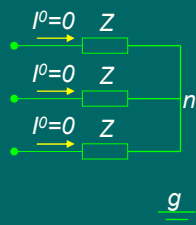
چون در طرف ستاره جریان توالی صفر نمی توانند جریان یابند، در طرف ستاره زمین شده هم جریان نداریم.



142

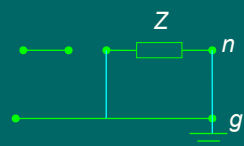
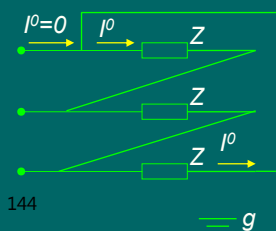
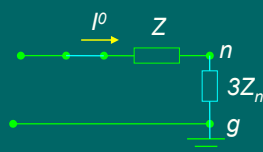
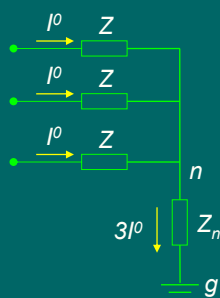
## شبکه های توالی صفر در مدارها

مینا زمین است.



143

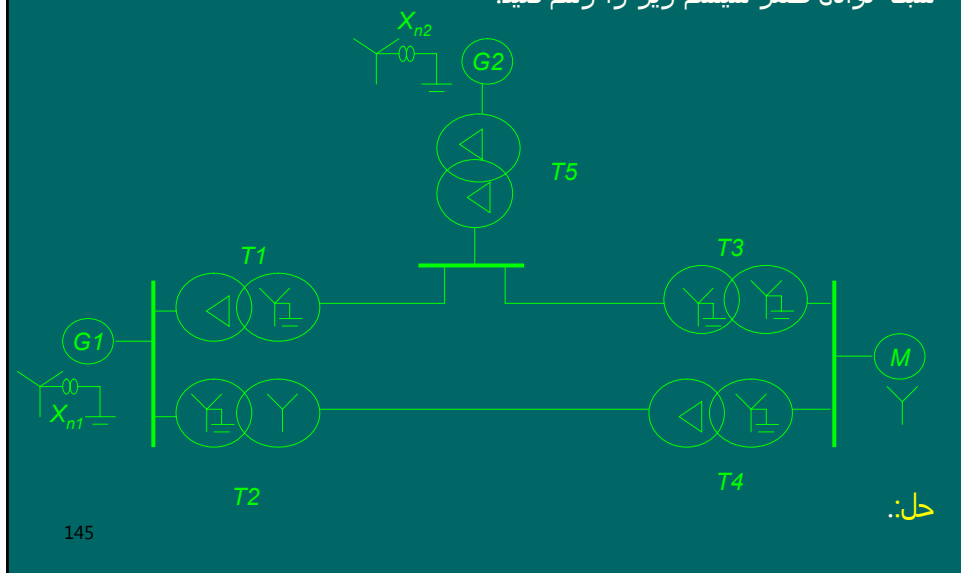
## ادامه شبکه های توالی صفر در مدارها



144

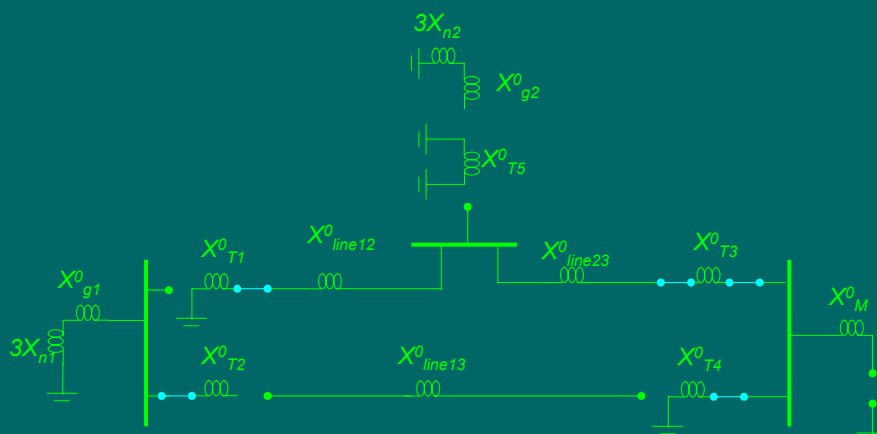
## مثال 7-4

شبکه توالی صفر سیستم زیر را رسم کنید.



145

## حل مثال 7-4



146

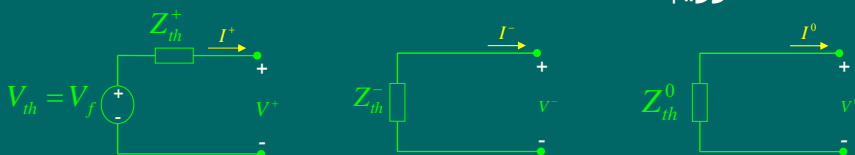
## روشهای حل اتصال کوتاه نامتقارن

- 1- روش حل با استفاده از مدار معادل تونن شبکه های توالی و اتصال آنها برای فالتهای متداول
- 2- روش حل با استفاده از فرمولهای کلی برای فالتهای غیرمتداول و سیستمهای بزرگ

147

## مراحل روش اتصال شبکه های توالی

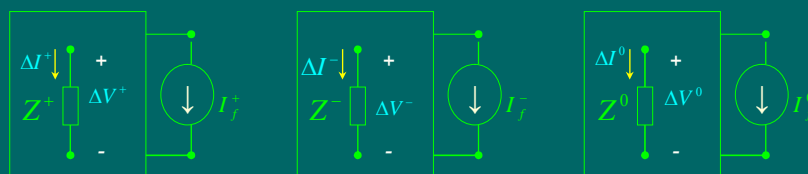
- 1- جریانهای عناصر سیستم و ولتاژ محل اتصال کوتاه ( $V_f$ ) را در قبل از اتصال کوتاه محاسبه می کنیم.
- 2-  $V_f$  را بعنوان ولتاژ تونن شبکه از دیدگاه نقطه اتصال کوتاه شده در نظر می گیریم که فقط در مدار معادل مثبت ظاهر می شود.
- 3- شبکه های توالی مثبت، منفی و صفر سیستم را رسم می کنیم.
- 4- امپدانس معادل تونن هر یک از شبکه های توالی را از دیدگاه نقطه اتصال کوتاه شده تعیین می کنیم و مدارهای معادل تونن شبکه های توالی را بدست می آوریم.



148

## ادامه مراحل روش اتصال شبکه های توالی

- 5- با توجه به نوع اتصال کوتاه، شبکه های تونن توالی را بصورت مناسب به هم وصل می کنیم و از اتصال آنها مولفه های جریان اتصال کوتاه یعنی  $I_f^+$ ،  $I_f^-$  و  $I_f^0$  را بدست می آوریم.
- 6- منابع جریان با اندازه های  $I_f^+$ ،  $I_f^-$  و  $I_f^0$  را به شبکه های توالی سیستم با منابع داخلی صفر شده اعمال نموده و مولفه های تغییرات ولتاژها و جریانهای عناصر مورد نیاز سیستم را محاسبه می کنیم.



149

## ادامه مراحل روش اتصال شبکه های توالی

- 7- تغییرات ولتاژ و جریانهای فازها را در عناصر مورد نیاز از تبدیل فورتنسکیو بدست می آوریم:

$$\Delta V_p = T \Delta V_s = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V^+ \\ \Delta V^- \\ \Delta V^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} \quad \Delta I_p = T \Delta I_s = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I^+ \\ \Delta I^- \\ \Delta I^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta I_a \\ \Delta I_b \\ \Delta I_c \end{bmatrix}$$

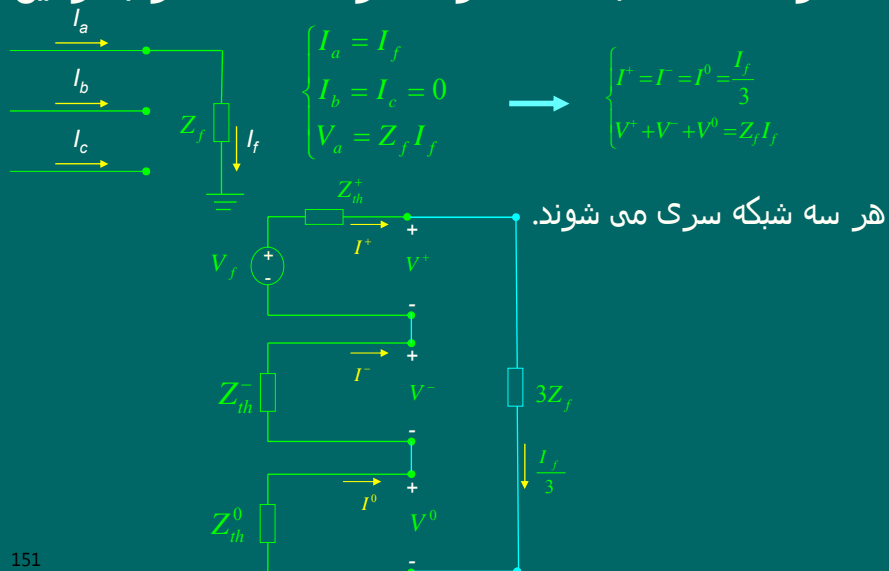
- 8- با جمع ولتاژ و جریانهای فازها در قبل از اتصال کوتاه و تغییرات ولتاژ و جریانهای ناشی از اتصال کوتاه، ولتاژ و جریانهای بعد از اتصال کوتاه را بدست می آوریم:

$$V_p^f = V_p^0 + \Delta V_p = \begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_b^0 \\ V_c^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a^f \\ V_b^f \\ V_c^f \end{bmatrix} \quad I_p^f = I_p^0 + \Delta I_p = \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_b^0 \\ I_c^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta I_a \\ \Delta I_b \\ \Delta I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a^f \\ I_b^f \\ I_c^f \end{bmatrix}$$

150

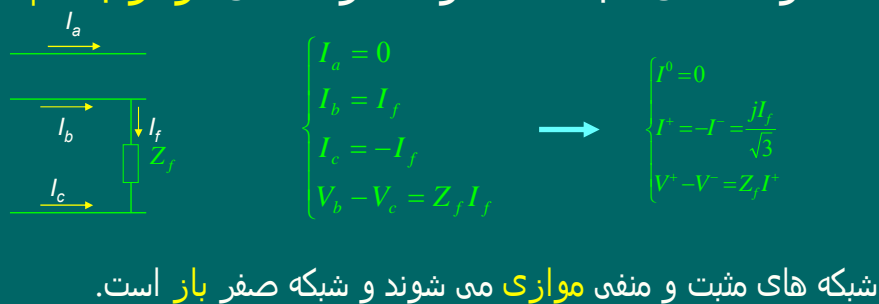


## نحوه اتصال شبکه های توالی در اتصال تکفاز به زمین



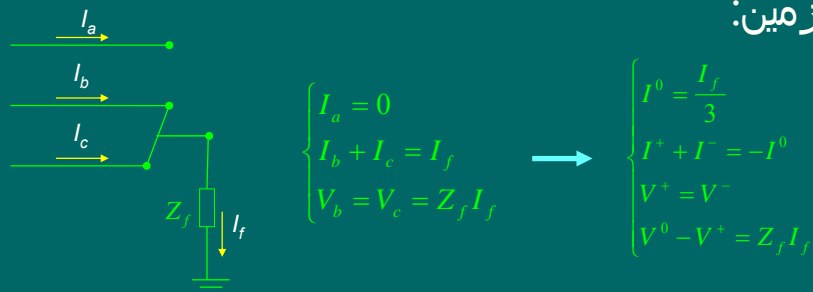
151

## نحوه اتصال شبکه های توالی در اتصال دوفاز به هم

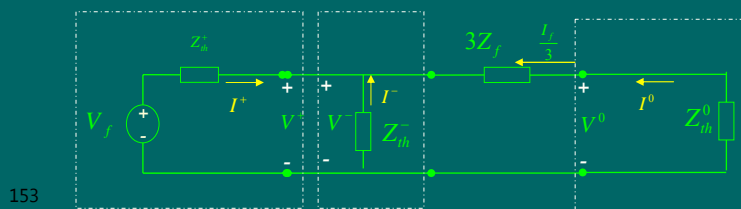


152

نحوه اتصال شبکه های توالی در اتصال دوفاز به هم و به زمین:



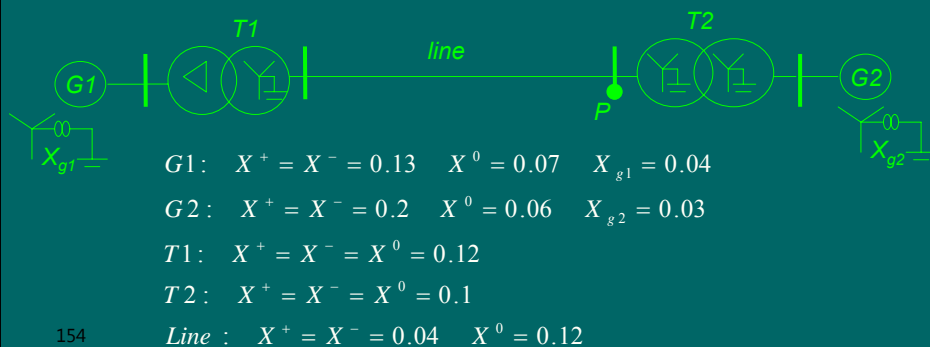
هر سه شبکه توالی موازی می شوند.



153

## مثال 8-4

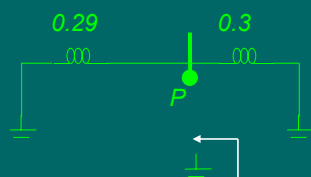
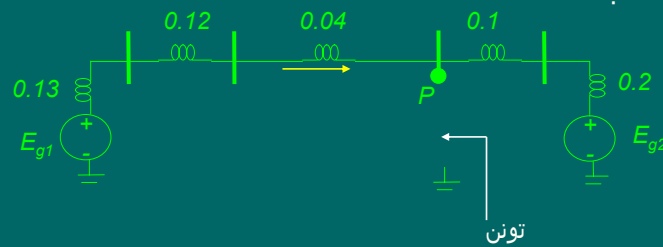
در سیستم قدرت شکل فوق، در نقطه  $P$  یک اتصال کوتاه دوفاز به هم و به زمین با امپدانس  $Z_f = j0.02$  رخ می دهد. شبکه در قبل از اتصال کوتاه بی بار و ولتاژ تمامی باسها  $1 < 0$  فرض می شود. جریان خط انتقال را در بعد از اتصال کوتاه برای هر فاز محاسبه کنید.



154

#### حل مثال 8-4

مدل توالی مثبت شبکه:

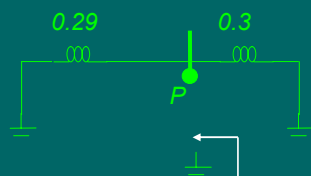
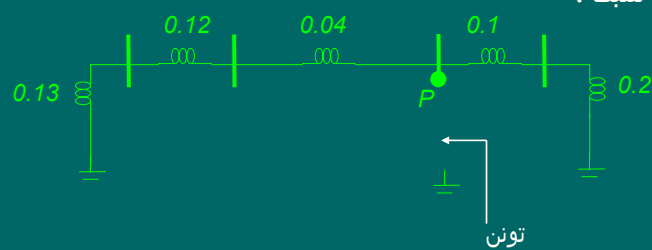


$$X_{th}^+ = 0.29 \parallel 0.3 = 0.147$$

155

#### ادامه حل مثال 8-4

مدل توالی منفی شبکه:

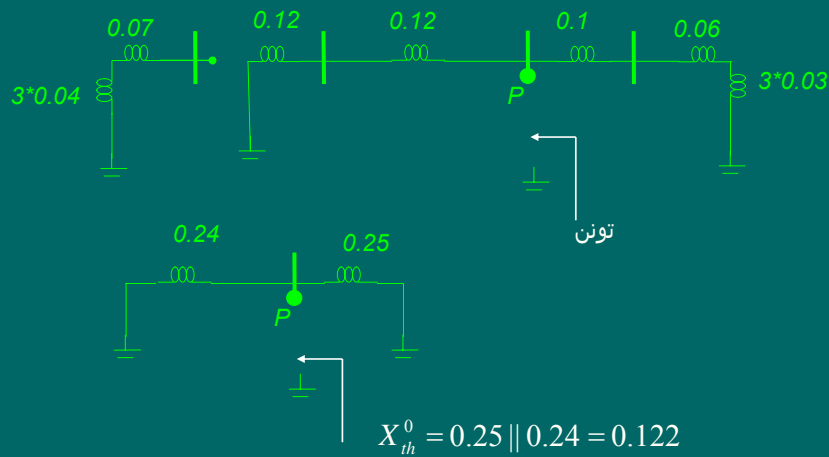


$$X_{th}^- = 0.29 \parallel 0.3 = 0.147$$

156

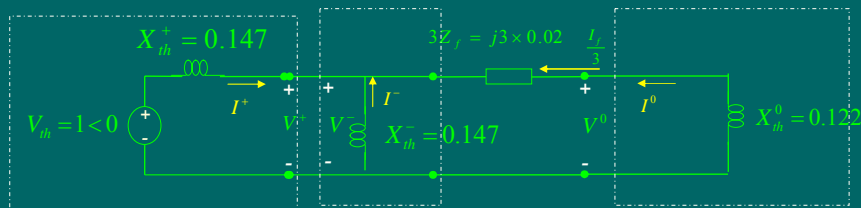
#### ادامه حل مثال 8-4

مدل توالی صفر شبکه:



157

#### ادامه حل مثال 8-4



$$I^+ = \frac{V_{th}}{j[X_{th}^+ + (X_{th}^- \parallel (3Z_f + X_{th}^0))]} = \frac{1 < 0}{j[0.147 + (0.147 \parallel (3 \times 0.02 + 0.122))]} = -j4.38$$

$$I^- = -\frac{(3Z_f + X_{th}^0)}{j[X_{th}^- + (3Z_f + X_{th}^0)]} I^+ = -\frac{j(3 \times 0.02 + 0.122)}{j[0.147 + (3 \times 0.02 + 0.122)]} (-j4.38) = j2.423$$

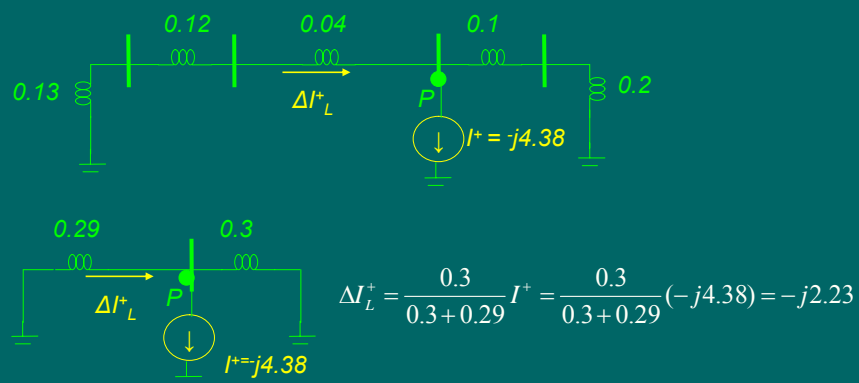
$$I^0 = -(I^+ + I^-) = -(-j4.38 + j2.423) = j1.957$$

$$I_f = 3I^0 = 3 \times j1.957 = j5.871$$

158

#### ادامه حل مثال 8-4

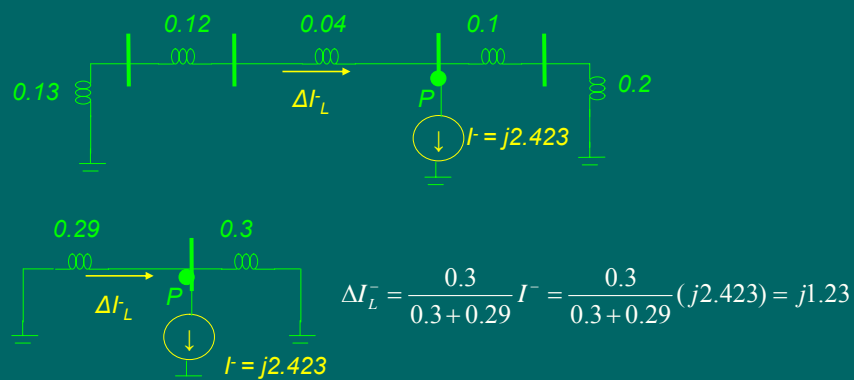
محاسبه مولفه **مثبت** جریان خط :



159

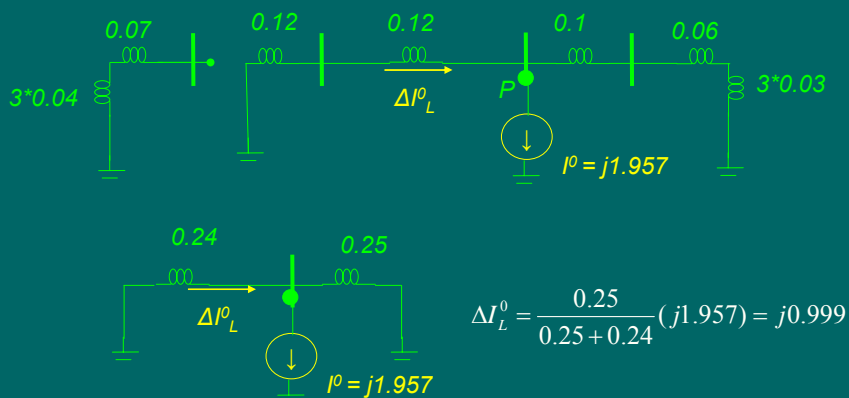
#### ادامه حل مثال 8-4

محاسبه مولفه **منفی** جریان خط :



160

ادامه حل مثال 8-4 : محاسبه مولفه **صفر** جریان خط



161

ادامه حل مثال 8-4 : محاسبه جریان فازي خط

**تغییرات** جریان فازهای خط ناشی از اتصال کوتاه:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{La} \\ \Delta I_{Lb} \\ \Delta I_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_L^+ = -j2.23 \\ \Delta I_L^- = j1.23 \\ \Delta I_L^0 = j0.999 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0.001 \\ -2.996 + j1.499 \\ 2.996 + j1.499 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.001 < -90^\circ \\ 3.35 < 153.4^\circ \\ 3.35 < 26.58^\circ \end{bmatrix}$$

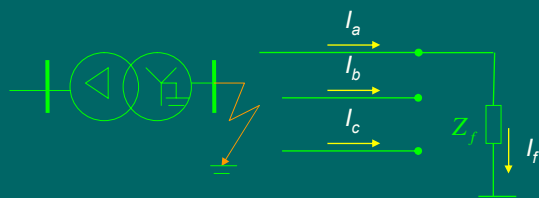
جریان فازهای خط در **بعد** از اتصال کوتاه:

$$\begin{bmatrix} I_a^f \\ I_b^f \\ I_c^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_b^0 \\ I_c^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta I_a \\ \Delta I_b \\ \Delta I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.001 < -90^\circ \\ 3.35 < 153.4^\circ \\ 3.35 < 26.58^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.001 < -90^\circ \\ 3.35 < 153.4^\circ \\ 3.35 < 26.58^\circ \end{bmatrix}$$

162

## مثال 9-4

در ثانویه یک ترانسفورماتور مثلث-ستاره زمین شده یک اتصال کوتاه تکفاز به زمین رخ داده است و جریان اتصال کوتاه  $-j0.9 \text{ pu}$  برقرار است. جریانه‌های خط در هر فاز اولیه ترانسفورماتور را حساب کنید؟



حل:

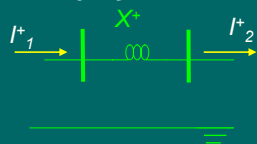
محاسبه مولفه های جریان اتصال کوتاه در ثانویه:

$$I_s = T^{-1} I_p \rightarrow \begin{bmatrix} I_2^+ \\ I_2^- \\ I_2^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a2} = I_f = -j0.9 \\ I_{b2} = 0 \\ I_{c2} = 0 \end{bmatrix}$$

$$I_2^+ = I_2^- = I_2^0 = \frac{1}{3}(-j0.9) = -j0.3$$

163

مدل مثبت ترانس:



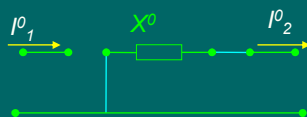
$$I_1^+ = I_2^+ = -j0.3$$

مدل منفی ترانس:



$$I_1^- = I_2^- = -j0.3$$

ادامه حل:



$$I_1^0 = 0$$

مدل صفر ترانس:

$$\begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1^+ = -j0.3 \\ I_1^- = -j0.3 \\ I_1^0 = 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} I_{a1} = -j0.6 \\ I_{b1} = 0.3 \angle (-120-90) + 0.3 \angle (120-90) = j0.3 \\ I_{c1} = 0.3 \angle (120-90) + 0.3 \angle (-120-90) = j0.3 \end{cases}$$

164