

به نام مهربانترین مهربانان

بررسی سیستمهای قدرت ۲

(بخش دوم)

مدرس: دکتر امیر نیک بخش

فصل سوم : اتصال کوتاه متقارن

حالت‌های 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 **پخش 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:

الف) حالت‌های گذرای فوق سریع

ب) حالت‌های گذاری نیمه سریع

ج) حالت‌های گذرای کند

حالت‌های گذرای فوق سریع :

- ناشی از تخلیه الکتریکی **صاعقه** بر روی خط انتقال و **کلید زنی** هستند و به آنها **surge** گویند.
- فقط در خطوط انتقال اتفاق می افتند و منجر به یک **موج** الکترومغناطیس می شوند که با سرعتی نزدیک به سرعت نور منتشر می شوند.
- **اثرات این امواج:**
 - در طول خط **رفت و برگشت** می کنند و بر اثر **مقاومت** خطوط به سرعت **مستهک** شده و پس از چند رفت و برگشت از بین می روند.
 - **اندوکتانس بزرگ ترانسفورماتورها** مانع از ورود آنها به سیم پیچ‌های ژنراتورها می شوند و **سبب برگشت** آنها می شوند ولی دامنه ولتاژهای برگشتی آنها بزرگ است.
 - **برقگیرها** این ولتاژهای زیاد را **زمین می کنند** ولی در صورت عمل نکردن برقگیرها، عایق‌های خطوط تحمل این ولتاژهای بالا را ندارند و لذا در خط اتصال کوتاه بوجود می آورند.
- هدف از مطالعه حالت‌های گذرای فوق سریع، یافتن سطح عایق بندی تجهیزات خط است.

حالت‌های گذرای نیمه سریع (اتصال کوتاه ها):

- ناشی از تغییرات ساختاری سریع و غیرعادی سیستم هستند که به آنها خطا (*Fault*) یا **اتصال کوتاه** می گوئیم.

- **علل پیدایش خطاها** عبارتند از:

- **صاعقه**

- **سالم نبودن تجهیزات و لوازم سیستم**

- **شرایط جوی** مانند باد و برف و یخبندان شدید و غیره

- **برخورد وسائل نقلیه زمینی** با دکلها و برخورد وسائل نقلیه هوایی با هادیهای خطوط انتقال

- **برخورد پرندگان** با هادیهای خطوط انتقال و یا **ورود حیوانات** به پستها و کلید خانه ها

- **سقوط درختان** بر روی هادیهای خطوط انتقال

- **عوامل تصادفی و اتفاقات غیرقابل پیش بینی**

حالت‌های گذرای کند :

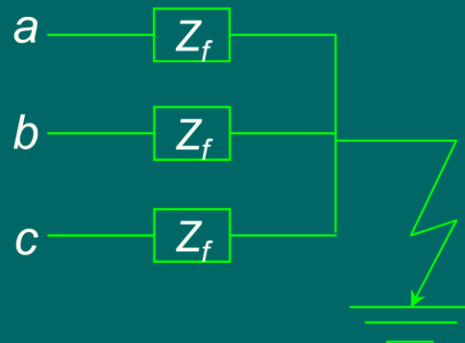
- اتصال کوتاه‌ها باعث کاهش ولتاژ ژنراتورها و کاهش سریع توان خروجی آنها می‌شوند ولی گاورنر توان مکانیکی ورودی به ژنراتور را کاهش نداده است. بنابراین ژنراتورها تحت گشتاور شتاب دهنده واقع می‌شوند که در صورت تداوم، سبب نوسانات مکانیکی رتور ماشین سنکرون می‌شوند.

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

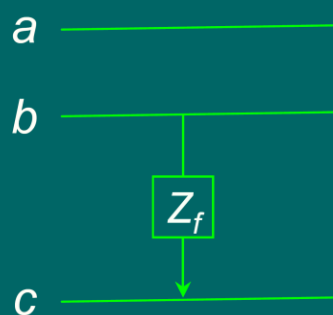
اتصال کوتاه سه فاز متقارن :

- **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

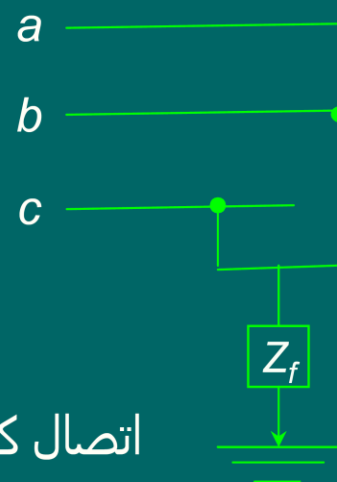


اتصال کوتاه دوفاز :

- 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

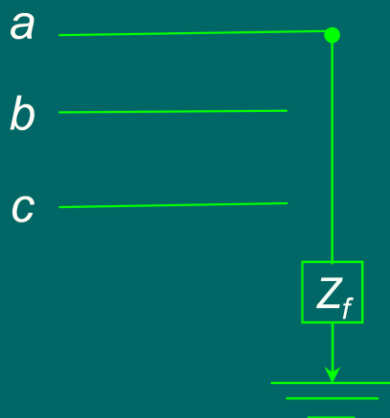


اتصال کوتاه DLG

اتصال یکفاز به زمین (SLG):

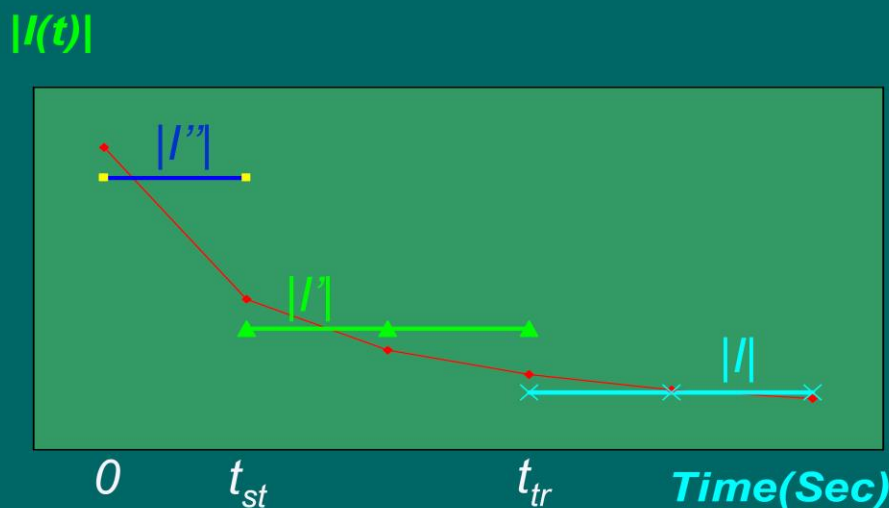
- معمولا بر اثر شکست الکتریکی و ایجاد جرقه روی مقره ها پدید می آید.

- 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.

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

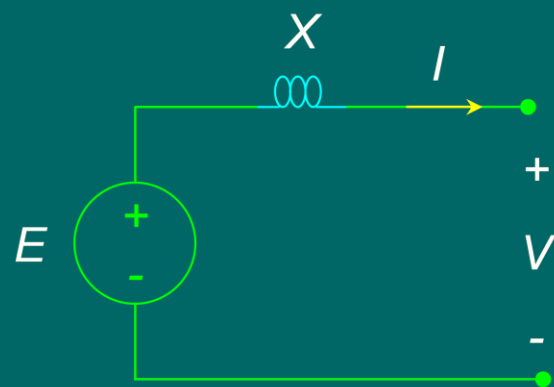


- $|I''|$ تقریب پله ای جریان اتصال کوتاه زیر گذرا
- $|I'|$ تقریب پله ای جریان اتصال کوتاه گذرا
- $|I|$ تقریب پله ای جریان اتصال کوتاه پایدار

- 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.

مدل ژنراتور سنکرون در اتصال کوتاه :



$$E = V + jX \cdot I$$

- مدل ژنراتور سنکرون در حالت‌های 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.

روشهای محاسبه اتصال کوتاه متقارن سه فاز در سیستم قدرت :

دو روش وجود دارد:

- 1- روش مستقیم
- 2- روش استفاده از قضیه تونن

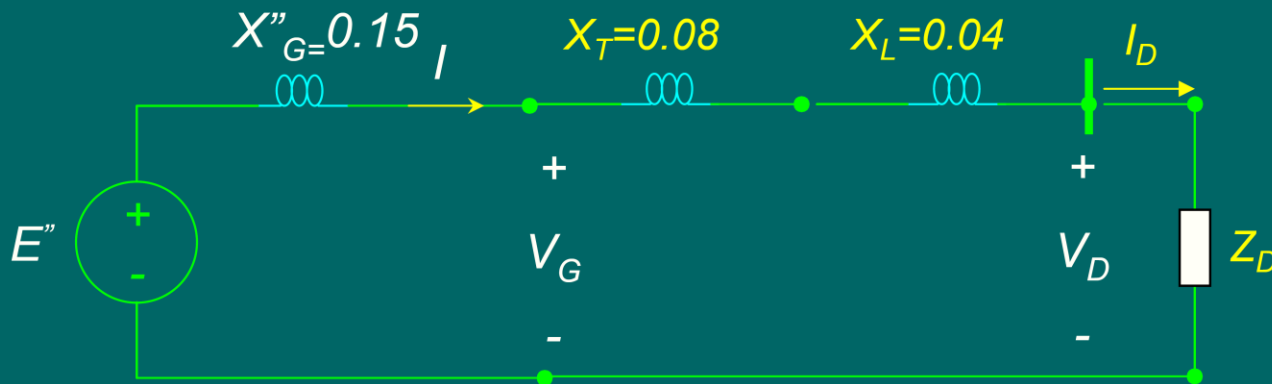
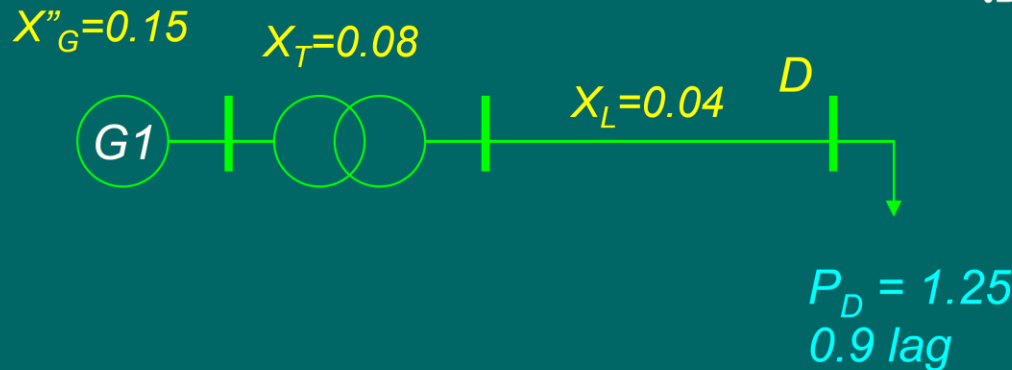
روش مستقیم محاسبه اتصال کوتاه متقارن سه فاز:

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 $0 < 1.02$ بوده است. اتصال کوتاه سه فاز در نقطه D اتفاق می افتد. جریان اتصال کوتاه را به روش مستقیم بیابید.



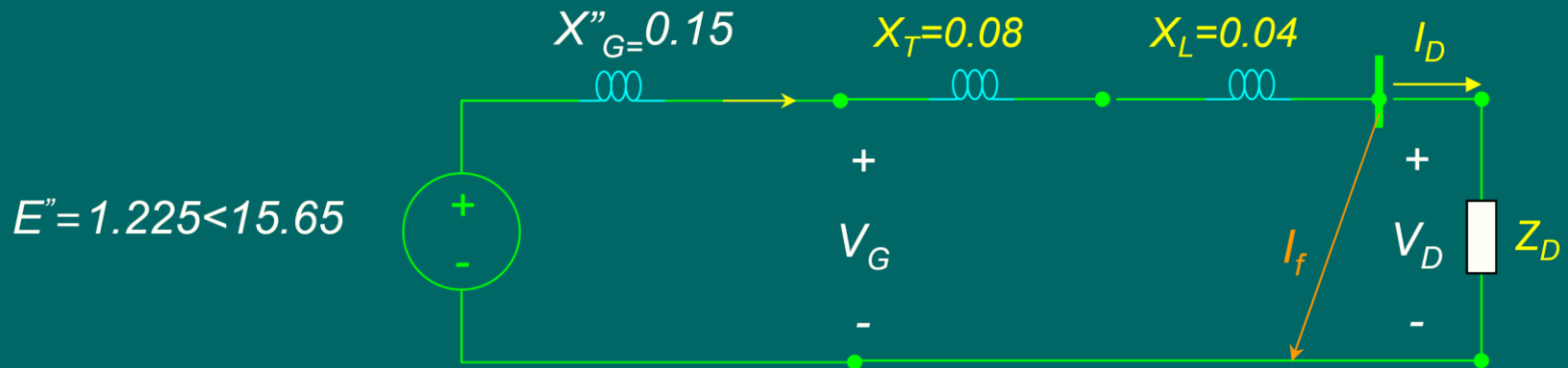
حل:

ادامه حل مثال 1-3

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

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

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



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

روش قضیه تونن برای محاسبه اتصال کوتاه متقارن سه فاز :

مراحل روش:

1- محاسبه کلیه ولتاژها و جریانها در **قبل** از اتصال کوتاه با استفاده از پخش بار در قبل اتصال کوتاه

2- پیدا کردن مدار **معادل تونن** از دید نقطه اتصال کوتاه

3- اعمال اتصال کوتاه به مدار معادل تونن و محاسبه **جریان اتصال کوتاه** I_f

4- قرار دادن منبع جریان I_f در مدار اولیه و محاسبه **اثر اتصال کوتاه** در کلیه جریانها و ولتاژها

5- محاسبه جریانها و ولتاژها در **بعد** از اتصال کوتاه:

$$V^f = V^0 + \Delta V$$

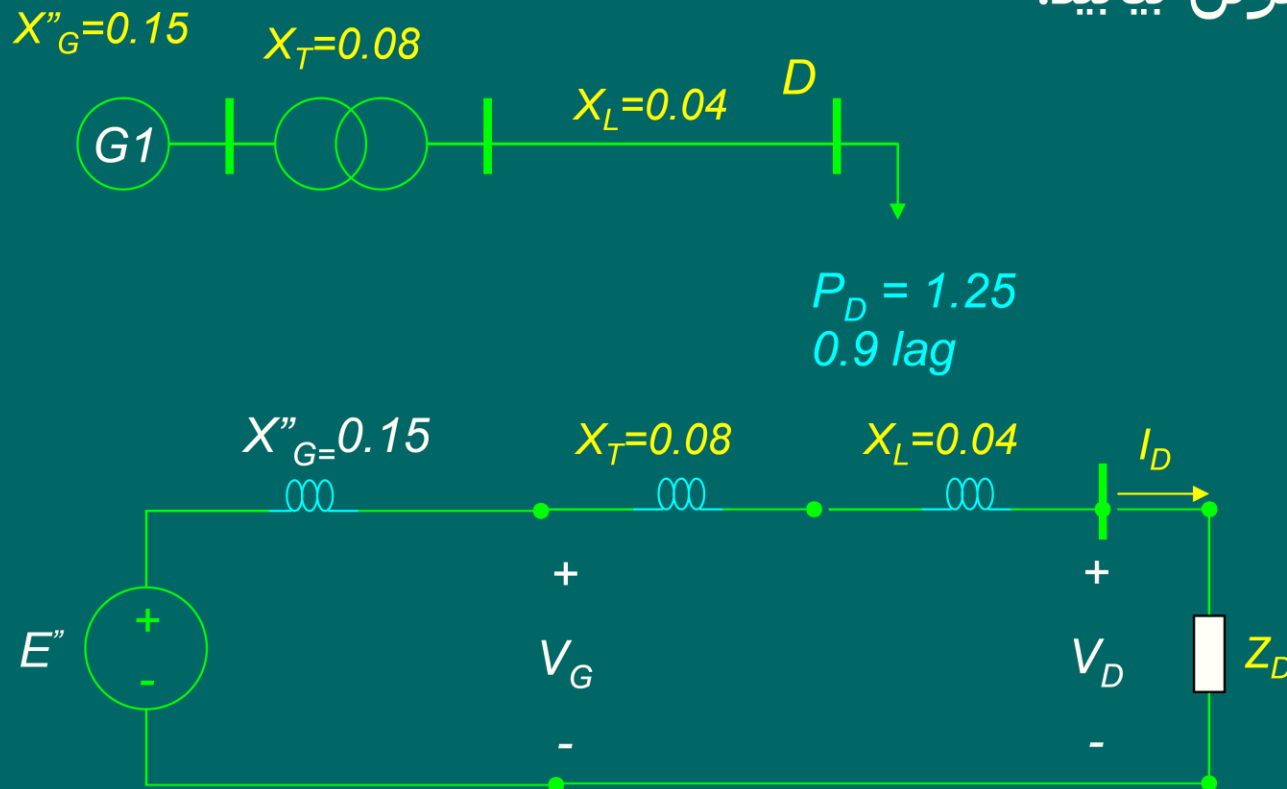
V^f ولتاژ بعد از اتصال کوتاه

V^0 ولتاژ قبل از اتصال کوتاه

ΔV تغییرات ولتاژ ناشی از اتصال کوتاه

مثال 3-2: روش تونن 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 تونن بیابید.

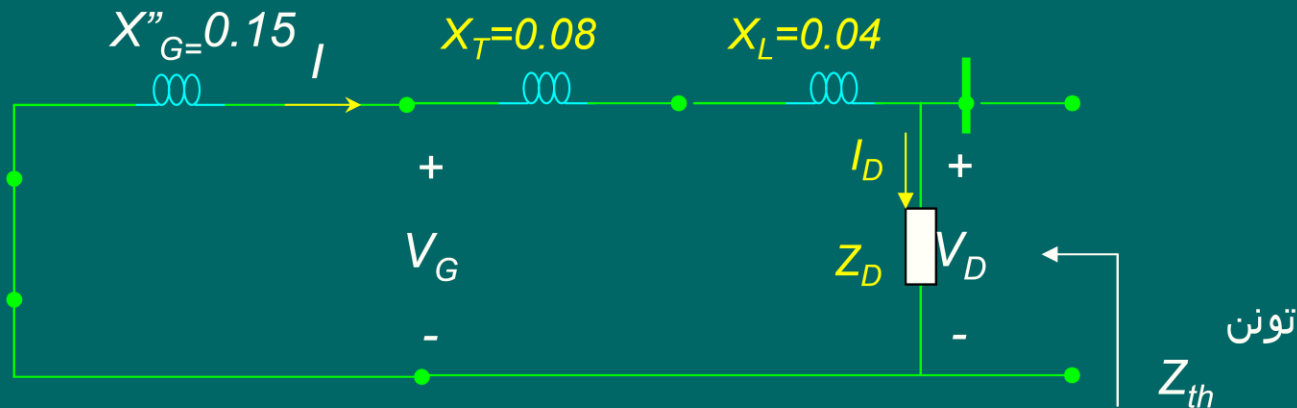
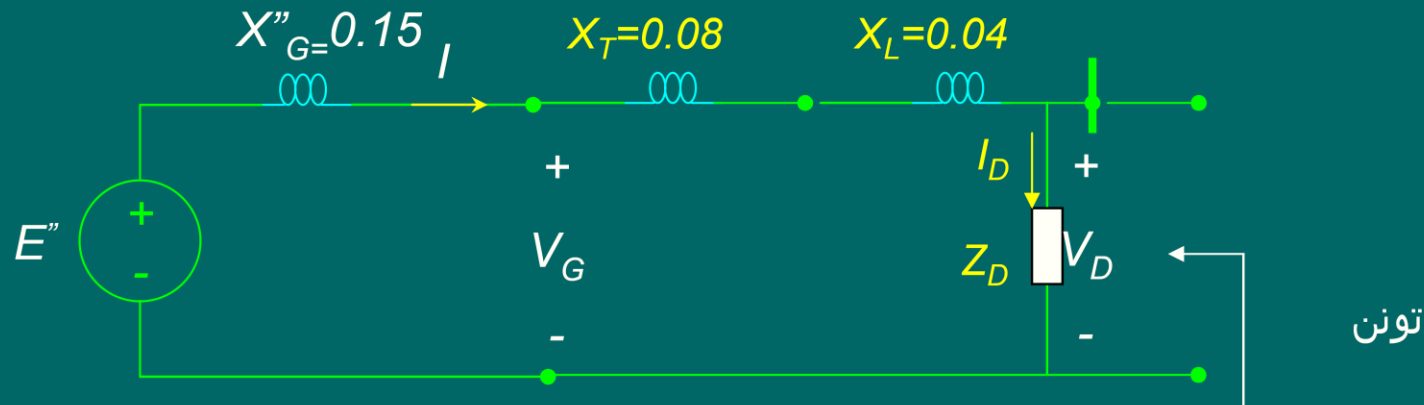


حل:

ادامه حل مثال 2-3

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

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

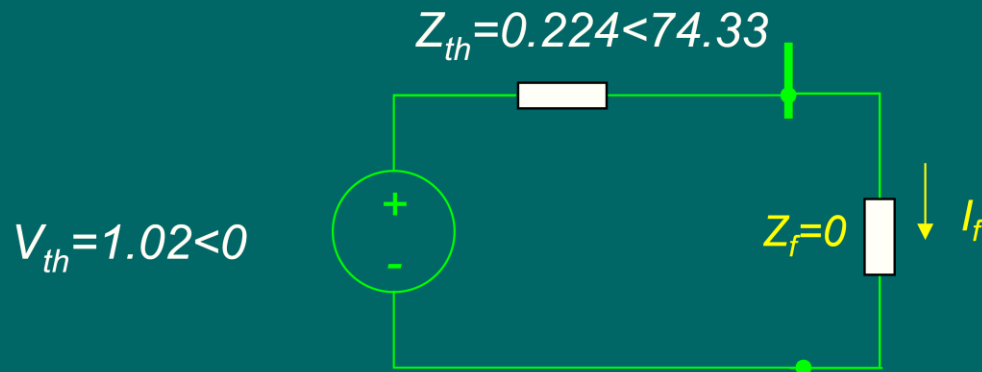


$$Z_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{1.02 \angle 0}{1.361 \angle -25.84^\circ} = 0.749 \angle 25.84^\circ$$

$$Z_{th} = j(X''_G + X_T + X_L) \parallel Z_D = (j0.27) \parallel (0.749 \angle 25.84^\circ) = 0.224 \angle 74.33^\circ$$

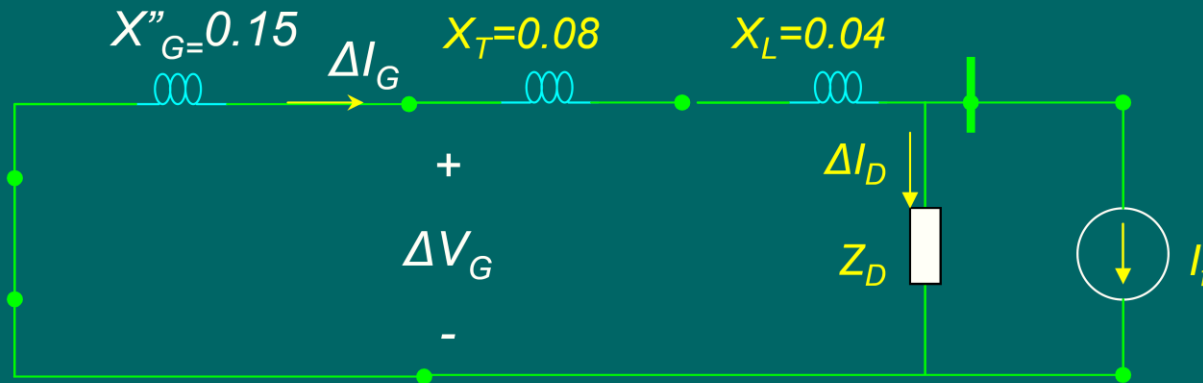
$$V_{th} = V_D = 1.02 \angle 0$$

ادامه حل مثال 2-3



$$I_f = \frac{V_{th}}{(Z_{th} + Z_f)} = \frac{1.02 \angle 0^\circ}{(0.224 \angle 74.33^\circ + 0)} = 4.55 \angle -74.33^\circ$$

می خواهیم جریان ژنراتور را در بعد اتصال محاسبه کنیم:



$$\Delta I_G = \frac{Z_D}{Z_D + j(X_G + X_T + X_L)} I_f = \frac{0.749 \angle 25.84^\circ}{0.749 \angle 25.84^\circ + j0.27} \times (4.55 \angle -74.33^\circ) = 3.786 \angle -89.99^\circ$$

$$I_G = I_G^0 + \Delta I_G = 1.361 \angle -25.84^\circ + 3.786 \angle -89.99^\circ = 3.419 \angle 69.02^\circ$$

محاسبات قانونمند اتصال کوتاه متقارن

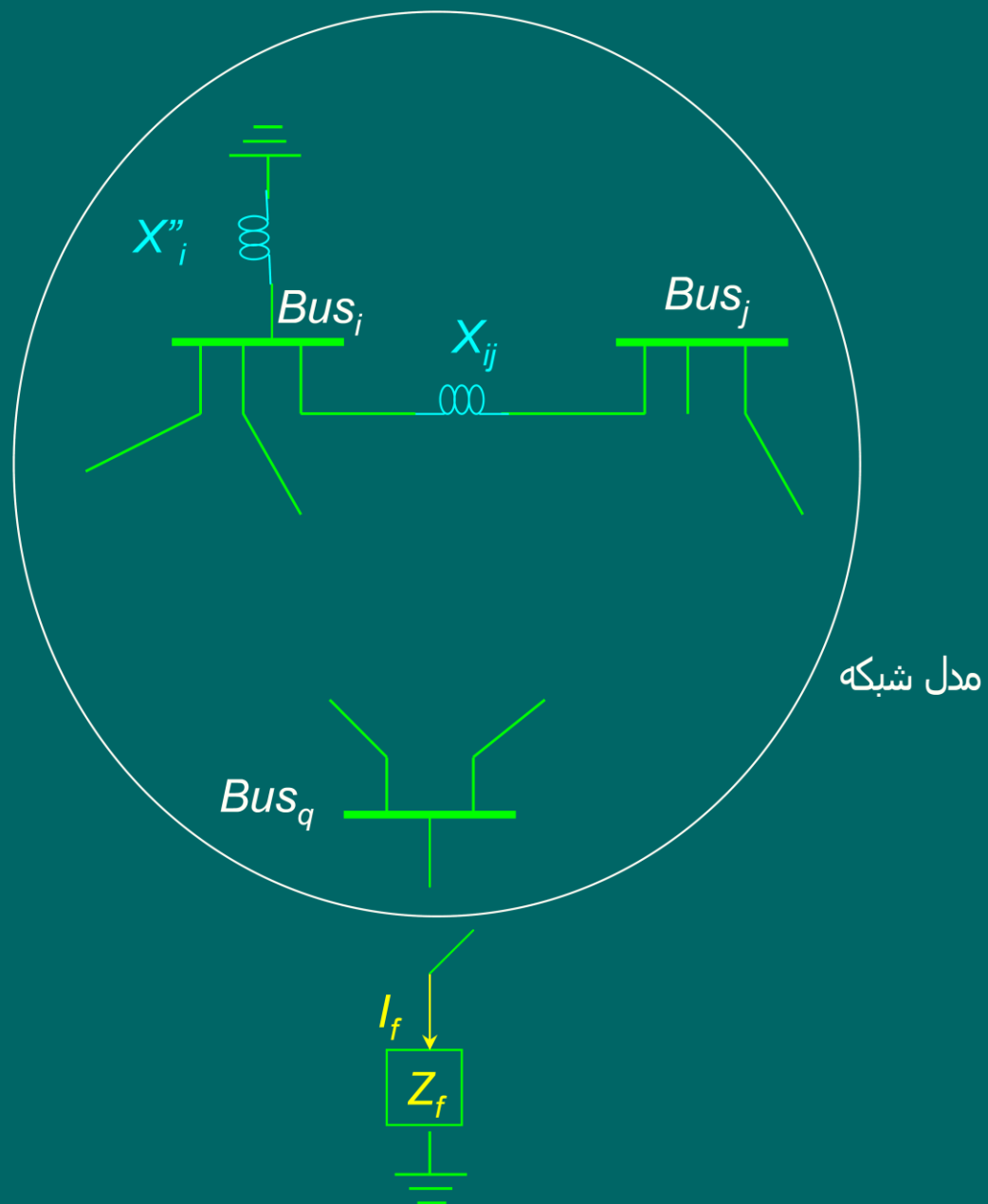
یک شبکه قدرت با n **باس** در نظر می گیریم و فرض می کنیم در **باس** q یک اتصال کوتاه متقارن سه فاز با **امپدانس** Z_f رخ داده است. می خواهیم ولتاژ باسها و جریانهای خطوط را در بعد از اتصال کوتاه بدست آوریم. **مراحل زیر** را انجام می دهیم:

1- فرض می کنیم **ولتاژ باسها در قبل از اتصال کوتاه**

مشخص باشند. ولتاژ باسها در قبل از اتصال کوتاه یا بوسیله **پخش بار** بدست می آیند و یا با **تقریب** ولتاژ تمام باسها در قبل از اتصال کوتاه را $0 < 1$ فرض می کنیم. در صورت اخیر جریان کلیه خطوط هم در قبل از اتصال کوتاه صفر خواهند بود.

$$V^0 = \begin{bmatrix} V_1^0 \\ \vdots \\ V_i^0 \\ \vdots \\ V_n^0 \end{bmatrix}$$

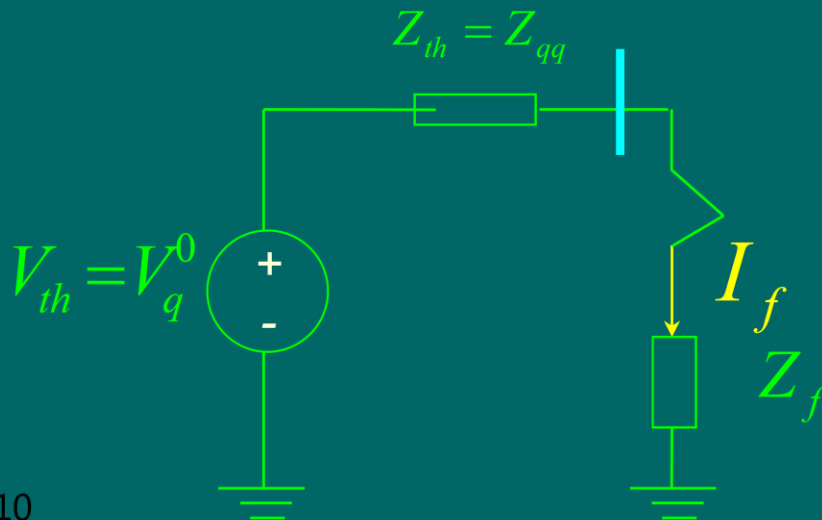
- 2- **مدار معادل** تمام ژنراتورها، خطوط و بارها را با امپدانسهای معادل جایگذاری می کنیم. معمولا ساده سازیهای زیر را اعمال می کنیم:
- معمولا از ادمیتانس خازنی خطوط و همچنین مقاومتهای اهمی ژنراتورها، خطوط و بارها صرف نظر می کنیم.
 - چون جریانهای اتصال کوتاه نسبت به جریانهای بارها بسیار بزرگتر هستند، عموما از جریانهای **بارها صرف نظر** می کنیم یعنی امپدانس بارها را اتصال باز در نظر می گیریم.
 - ولتاژ داخلی ژنراتورها را صفر می کنیم و بسته به اینکه جریانهای زیرگذرا، گذرا و یا پایدار اتصال کوتاه را بخواهیم از X_g'' ، X_g' و یا X_g برای مدل امپدانس ژنراتور استفاده می کنیم.
 - نمونه مدل در شکل زیر :



3- ماتریس امپدانس Z_{bus} را برای سیستم مدل شده به طریق فوق بدست می آوریم.

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix}$$

4- مدار معادل تونن را از دید باس q تشکیل می دهیم. ولتاژ تونن برابر V_q^0 و امپدانس تونن برابر Z_{qq} خواهد بود. سپس جریان اتصال کوتاه I_f را از روی مدل تونن بطریق زیر محاسبه می کنیم :



$$I_f = \frac{V_q^0}{Z_f + Z_{qq}}$$

5- با توجه به قضیه تونن تغییرات ولتاژ ناشی از اتصال کوتاه را بصورت زیر محاسبه می کنیم:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_i \\ \vdots \\ \Delta V_q \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1q} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{i1} & \cdots & Z_{iq} & \cdots & Z_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{q1} & \cdots & Z_{qq} & & Z_{qn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{nq} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ -I_f \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \Delta V_i = Z_{iq}(-I_f) = -\frac{Z_{iq} \cdot V_q^0}{Z_f + Z_{qq}}$$

6- ولتاژ تمام باسها در بعد از اتصال کوتاه را از جمع ولتاژهای قبل از اتصال کوتاه و تغییرات ولتاژ ناشی از اتصال کوتاه بدست می آوریم :

$$V_i^f = V_i^0 + \Delta V_i = V_i^0 - \frac{Z_{iq} \cdot V_q^0}{Z_f + Z_{qq}}$$

7- جریانهای خطوط در بعد از اتصال کوتاه با استفاده از ولتاژ باسهای دو انتهای آن محاسبه می شوند. مثلاً برای خط L_{ik} داریم :

$$I_{ik}^f = \frac{V_i^f - V_k^f}{jX_{ik}}$$

8- ظرفیت اتصال کوتاه (قدرت قطع) باس q را با توجه به تعریف آن بدست می آوریم.

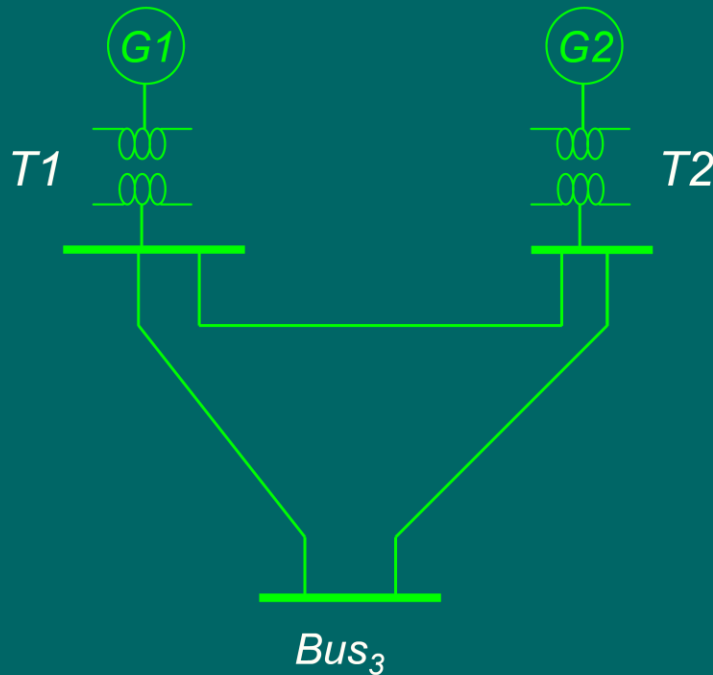
طبق تعریف ظرفیت اتصال کوتاه (SCC) یک باس برابر حاصلضرب ولتاژ باس در قبل از اتصال کوتاه در جریان اتصال کوتاه آن باس می باشد.

چون معمولاً حداکثر ظرفیت اتصال کوتاه مد نظر است بایست حداکثر جریان اتصال کوتاه را در نظر گرفت یعنی باید $Z_f = 0$ و برای ژنراتورها از مدل " X_g " استفاده نمود. ضمناً دامنه ولتاژ باس در قبل از اتصال کوتاه یک پریونیت فرض می شود.

$$SCC_q = |V_q^0| \cdot |I_q^f| = |V_q^0| \cdot \frac{|V_q^0|}{|Z_{th}|} \approx 1 \frac{1}{X_{th}} = \frac{1}{X_{th}}$$

مثال 3-2: روش قضیه تونن اتصال کوتاه

در سیستم قدرت شکل زیر، در باس 3 یک اتصال کوتاه سه فاز متقارن بی واسطه رخ می دهد. ولتاژ کلیه باسها و جریان خطوط در بعد از اتصال کوتاه و ظرفیت اتصال کوتاه باس 3 را بیابید. ولتاژ باسها در قبل از اتصال کوتاه را $1 < 0$ فرض نموده و از جریان بارها صرف نظر کنید.

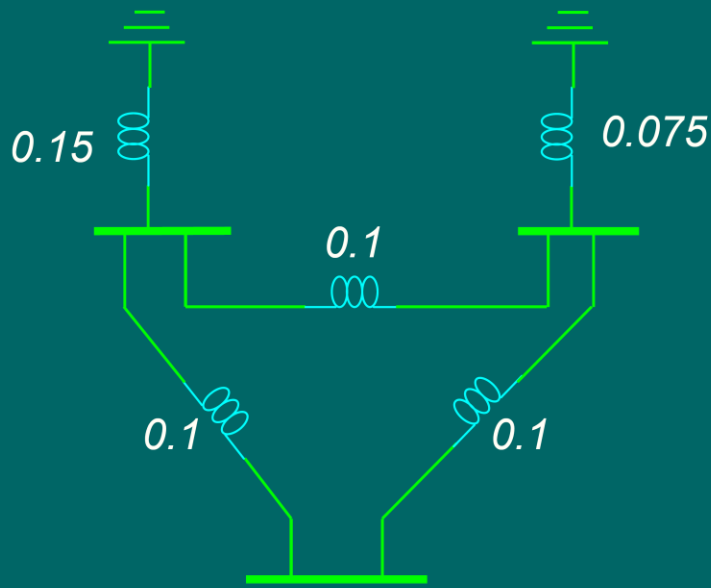


$$X_{g1} + X_{T1} = 0.15 \text{ pu}$$

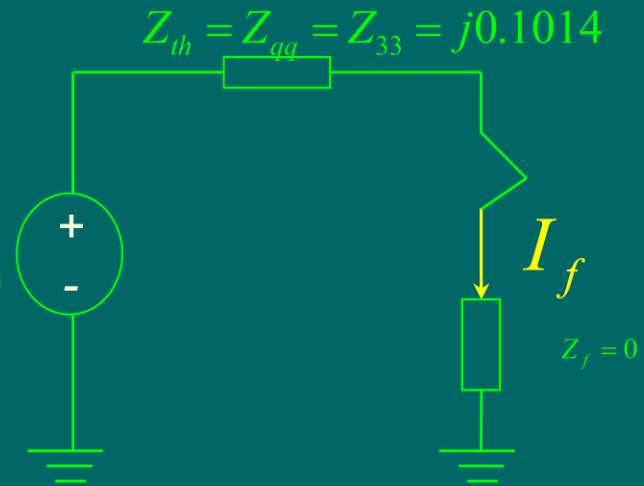
$$X_{g2} + X_{T2} = 0.075 \text{ pu}$$

$$X_{L12} = X_{L13} = X_{L23} = 0.1 \text{ pu}$$

حل مثال 2-3 :



$$V_{th} = V_q^0 \\ = V_3^0 = 1 < 0$$



$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} \frac{1}{j0.15} + \frac{1}{j0.1} + \frac{1}{j0.1} & \frac{-1}{j0.1} & \frac{-1}{j0.1} \\ \frac{-1}{j0.1} & \frac{1}{j0.075} + \frac{1}{j0.1} + \frac{1}{j0.1} & \frac{-1}{j0.1} \\ \frac{-1}{j0.1} & \frac{-1}{j0.1} & \frac{1}{j0.1} + \frac{1}{j0.1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j2667 & j10 & j10 \\ j10 & -j3333 & j10 \\ j10 & j10 & -j20 \end{bmatrix}$$

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} = \begin{bmatrix} j0.073 & j0.0386 & j0.0558 \\ j0.0386 & j0.0558 & j0.0472 \\ j0.0558 & j0.0472 & j0.1014 \end{bmatrix}$$

$$I_f = \frac{V_q^0}{Z_f + Z_{qq}} = \frac{V_3^0}{Z_f + Z_{33}} = \frac{1 < 0}{0 + j0.1014} = -j9.862 = 9.862 < -90^\circ$$

$$\Delta V_i = Z_{iq} (-I_f)$$

$$\Delta V_1 = Z_{13} (-I_f) = (j0.0558)(j9.862) = -0.5368$$

$$\Delta V_2 = Z_{23} (-I_f) = (j0.0472)(j9.862) = -0.4541$$

$$\Delta V_3 = Z_{33} (-I_f) = (j0.1014)(j9.862) = -1$$

$$V_i^f = V_i^0 + \Delta V_i$$

$$V_1^f = V_1^0 + \Delta V_1 = 1 < 0 + (-0.5368) = 0.4632$$

$$V_2^f = V_2^0 + \Delta V_2 = 1 < 0 + (-0.4541) = 0.5459$$

$$V_3^f = V_3^0 + \Delta V_3 = 1 < 0 + (-1) = 0$$

$$I_{ij}^f = \frac{V_i^f - V_j^f}{jX_{ij}}$$

$$I_{12}^f = \frac{V_1^f - V_2^f}{jX_{12}} = \frac{0.4632 - 0.5459}{j0.1} = j0.8270$$

$$SCC_q = |V_q^0| \cdot |I_q^f| = |V_q^0| \frac{|V_q^0|}{|Z_{th}|} \approx 1 \frac{1}{X_{th}} = \frac{1}{X_{th}}$$

$$SCC_3 = |V_3^0| \cdot |I_3^f| = \frac{1}{X_{33}} = \frac{1}{0.1014} = 9.8616$$

$$SCC_3 = |V_3^0| \cdot |I_3^f| = 1 \times 9.862 = 9.862$$

فصل چهارم : اتصال کوتاه نامتقارن

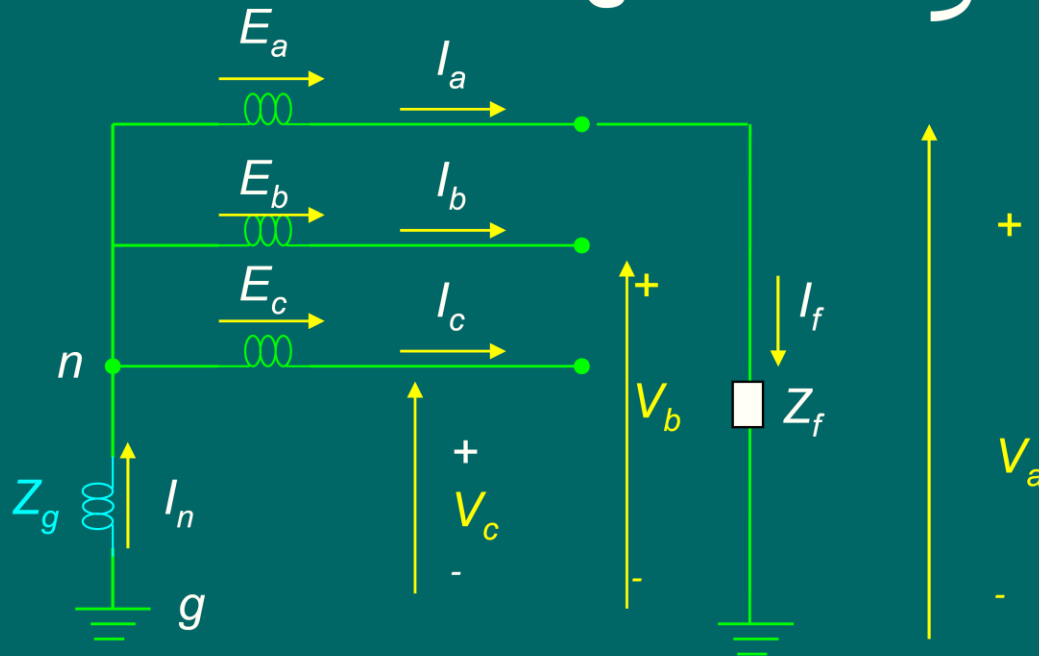
مشخصات سیستم دارای **تقارن فاز**:

- 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.

$$I_n = I_a + I_b + I_c$$

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

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

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

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

تعریف α

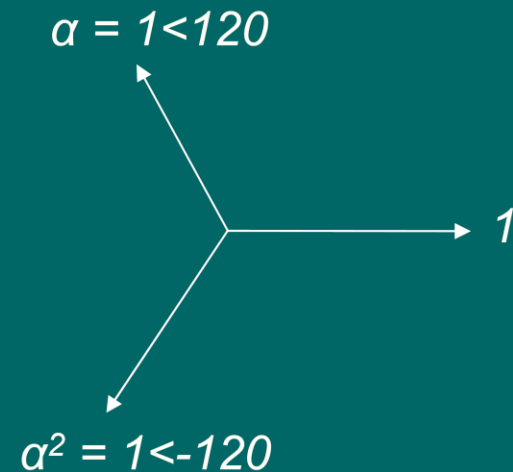
تعریف می کنیم : $\alpha = e^{j120} = 1 \angle 120^\circ$
اگر α در یک فازور ضرب شود فقط فاز آنرا به اندازه 120 درجه اضافه می کند (در جهت مثلاثی می چرخاند).
می توان نشان داد:

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

$$\alpha^3 = 1$$

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

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



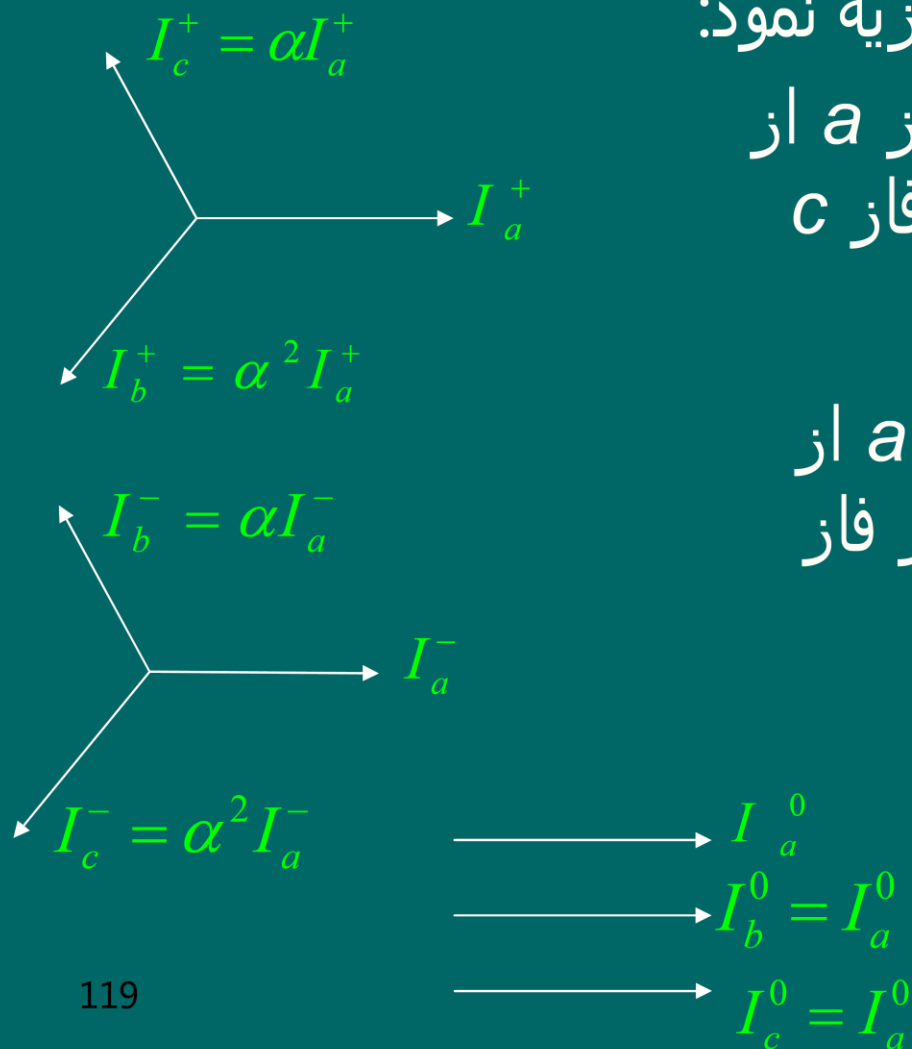
مولفه های متقارن

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 b از فاز c 120 درجه جلوتر است.

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

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



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 :

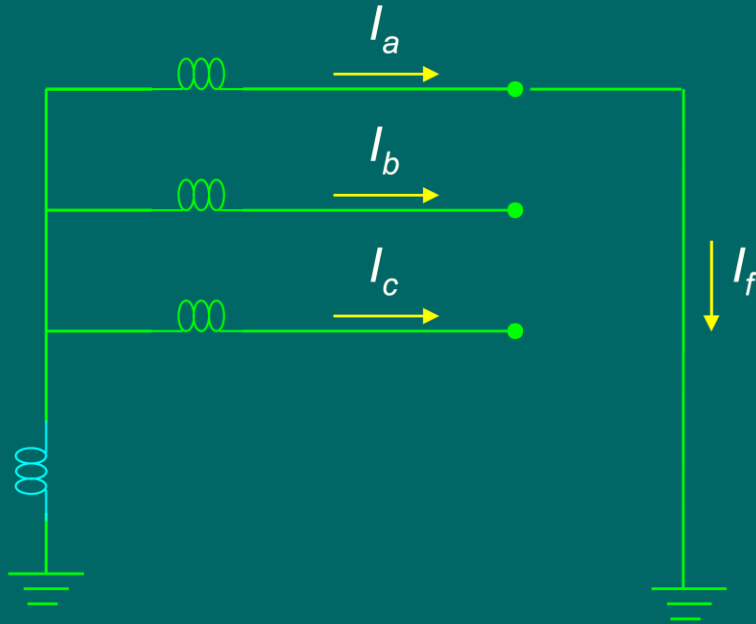
$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^+ \\ I_a^- \\ I_a^0 \end{bmatrix} \longrightarrow \vec{I}_p = T \cdot \vec{I}_s \longrightarrow I_s = T^{-1} I_p$$

I_p جریانهای فازی و I_s مولفه های متقارن جریانها هستند.

ماتریس تبدیل فورسکیو و معکوس آن :

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

مثال 1-4



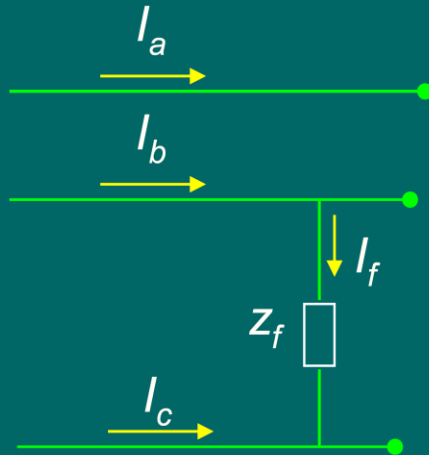
در ژنراتور بی بار شکل مقابل، یکفاز به زمین اتصال کوتاه شده است. مولفه های متقارن جریان را بر حسب جریان اتصال کوتاه I_f بیابید.

حل:

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

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

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.

مثال 3-4

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

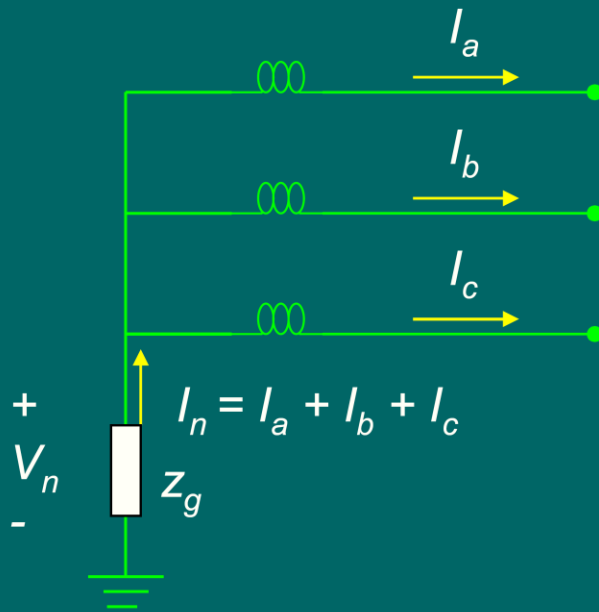
حل:

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

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

مثال 4-4

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



حل:

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

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

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

مثال 4-5

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

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

$$V_p^T I_p^* = (TV_s)^T (TI_s)^* = V_s^T T^T T^* I_s^* = V_s^T (3U) I_s^* = 3V_s^T I_s^*$$

$$= 3[V_a^+ \quad V_a^- \quad V_a^0] \begin{bmatrix} I_a^+ \\ I_a^- \\ I_a^0 \end{bmatrix}^* = 3V_a^+ I_a^{+*} + 3V_a^- I_a^{-*} + 3V_a^0 I_a^{0*}$$

$$= S^+ + S^- + S^0$$

ادامه مثال 4-5

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

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 بعلت تقارن 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 :

$$V_p = E_p - Z_p I_p$$

بیان معادلات کار ژنراتور بر حسب مولفه ها

$$V_P = E_P - Z_P I_P$$

$$TV_s = E_P - Z_P (TI_s)$$

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

$$V_s = E_s - Z_s I_s$$

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

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

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

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 :

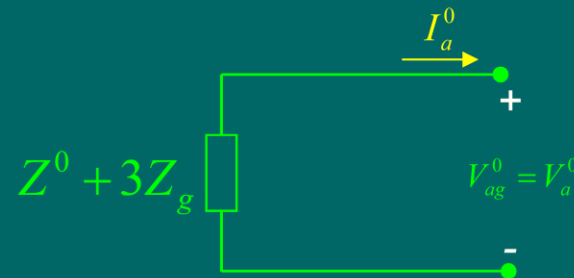
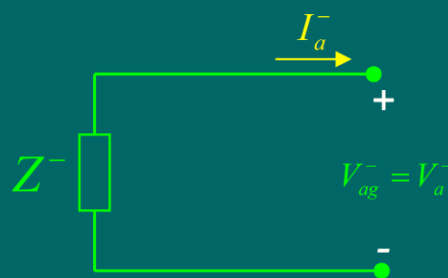
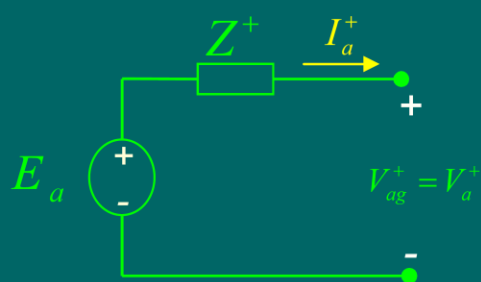
- 1- چون Z_s **قطری** است بین سه مولفه متقارن هیچ گونه **تزویدی** وجود **ندارد** یعنی ولتاژ هر مولفه فقط به جریان همان مولفه بستگی دارد.
- 2- تنها مولفه توالی **مثبت** دارای نیرو محرکه القایی E_a است.
- 3- مولفه توالی Z^+ ، Z^- و Z^0 با هم **مساوی نیستند**. بنابراین نمی توان فقط یک مولفه را بدست آورد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

شبکه های توالی معادل ژنراتور سنکرون

زمین (g) مبنا می باشد:

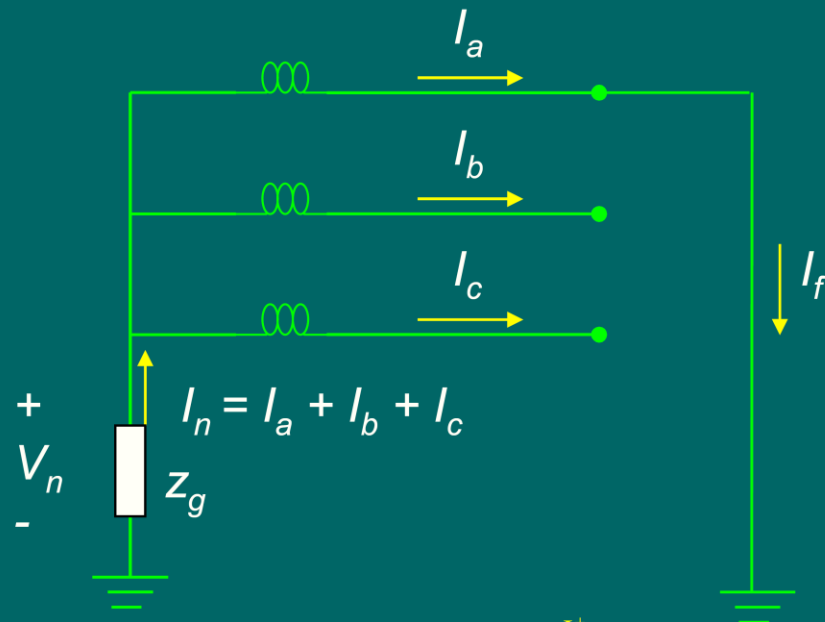
$$V_{ag} = V_{an} + V_{ng} = V_{an} - Z_g (I_a + I_b + I_c)$$

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

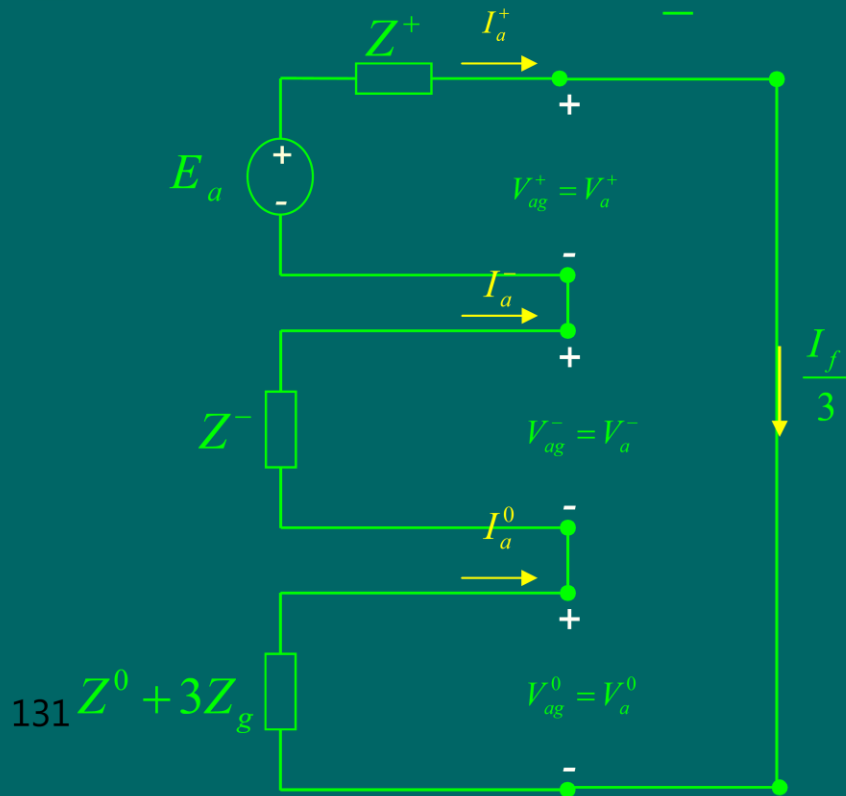


مثال 4-6

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

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

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

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

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

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

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

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

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.

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 :

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

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

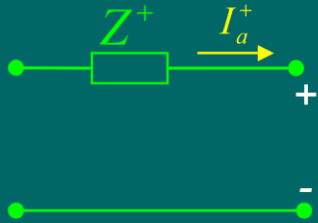
$$Z^+ = Z^- = Z_1 - Z_2 = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{R_a}\right) \quad Z^0 = Z_1 + 2Z_2 = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_n^6}{R_a R_n^3 D^2}\right)$$

نتایج:

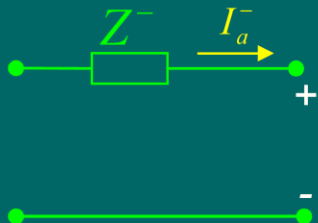
1- ماتریس Z_s قطری است.

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

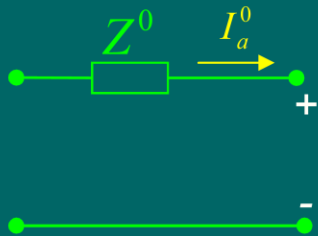
مدل توالی خط انتقال



مدل توالی مثبت خط انتقال:



مدل توالی منفی خط انتقال:



مدل توالی صفر خط انتقال:

امپدانسهای توالی مثبت و منفی ترانسفورماتورها

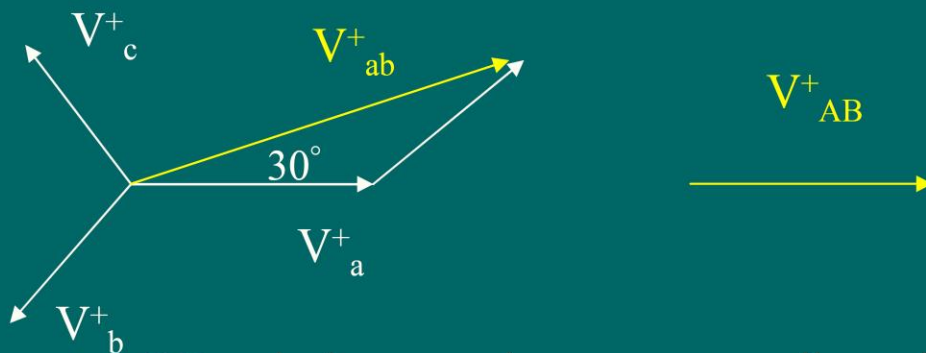
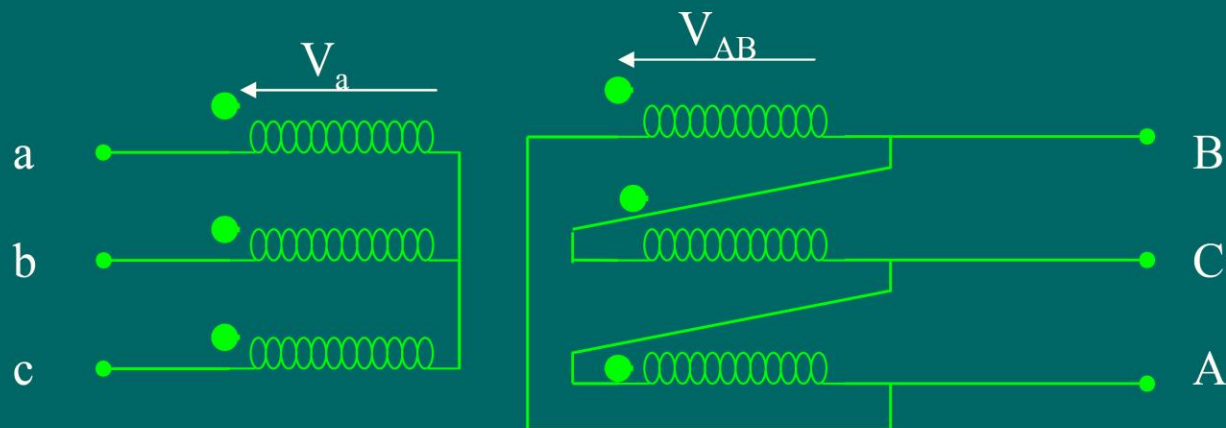
چون ترانس عنصر پسیو و ایستا است در صورت تغییر توالی ولتاژها، امپدانس
نشستی آن تغییر نخواهد کرد یعنی :

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

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

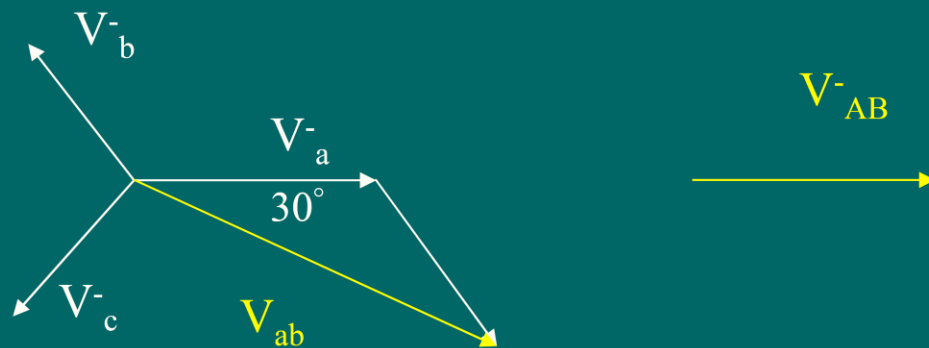
تحقیق جهت جابجائی فاز در ترانسفورماتورها

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.



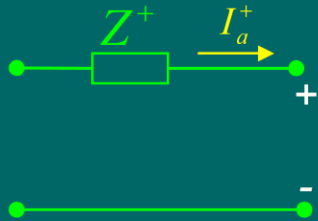
- مشاهده می شود که با اعمال ولتاژ توالی مثبت به ترانس، به اندازه $30^\circ +$ درجه جابجائی فاز داریم.

ادامه تحقیق جهت جابجائی فاز در ترانسفورماتورها

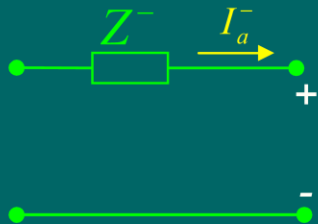


- مشاهده می شود که با اعمال ولتاژ توالی منفی به ترانس، به اندازه 30° درجه جابجائی فاز داریم.

مدل توالی مثبت و منفی ترانسفورماتور



مدل توالی مثبت ترانسفورماتور:



مدل توالی منفی ترانسفورماتور :

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

نکاتی در مورد توالی صفر ترانسها

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

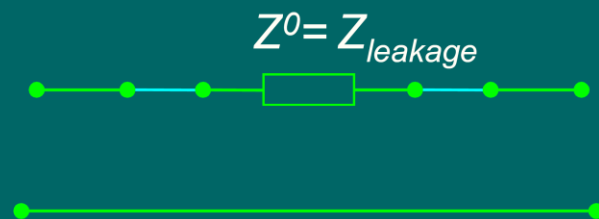
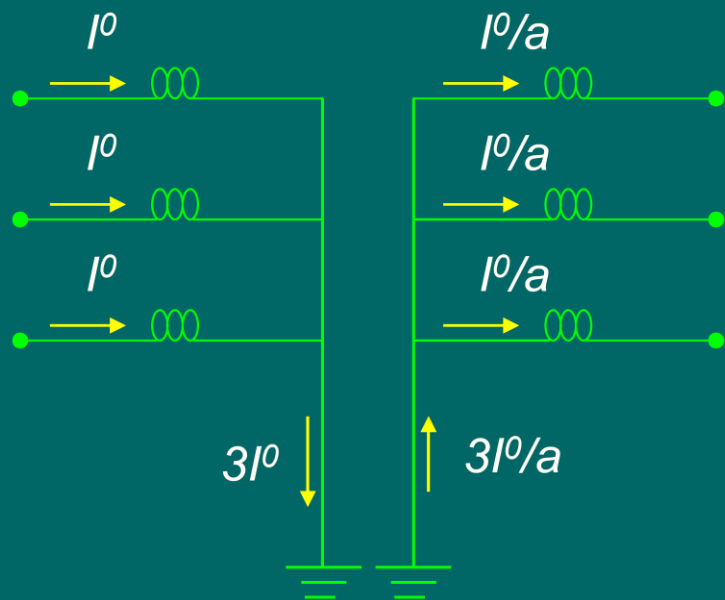
2- چون از جریان مغناتیس کنندگی صرفنظر می شود، هر گاه از یک طرف جریان نگذرد از دیگر نیز جریان نمی گذرد.

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

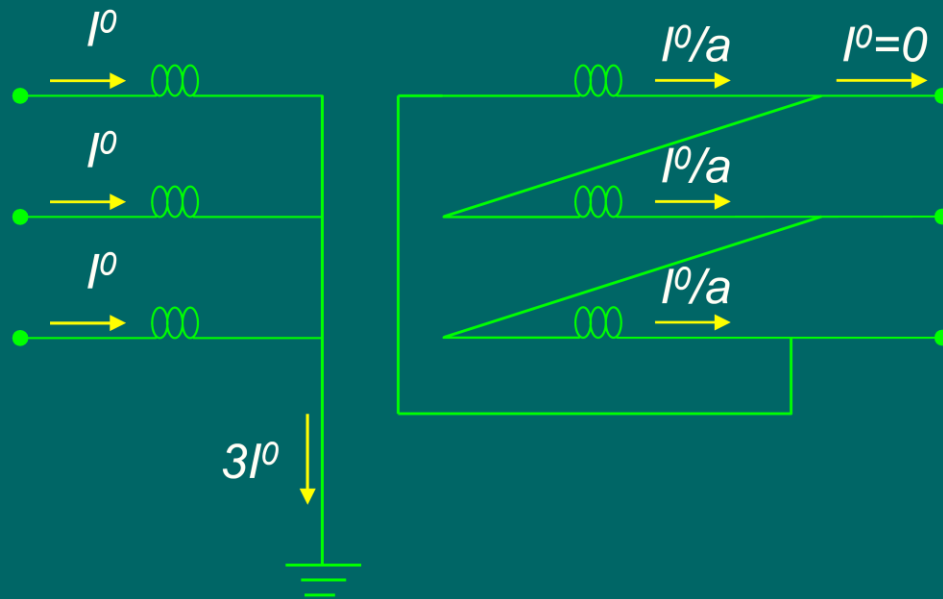
4- در اتصال Δ ، جریانهای توالی صفر I^0 بصورت گردشی هستند و در خطوط خروجی، این جریانها وجود ندارند زیرا مسیر برگشت ندارند.

مدل توالی صفر ترانس ستاره زمین شده-ستاره زمین شده

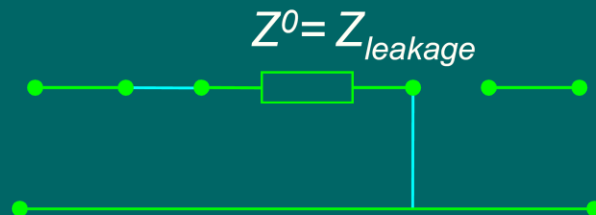
جریانهای I^0 تنها بوسیله امپدانس نشتی آنها محدود می شوند.



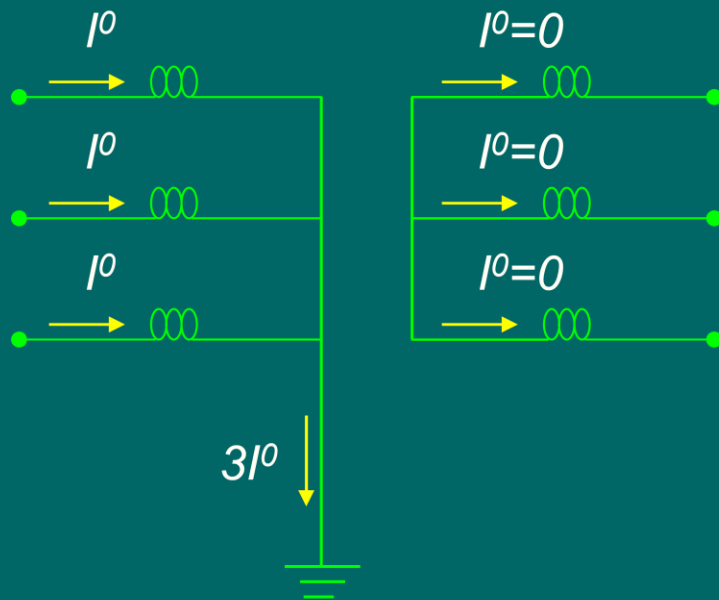
مدل توالی صفر ترانس ستاره زمین شده - مثلث



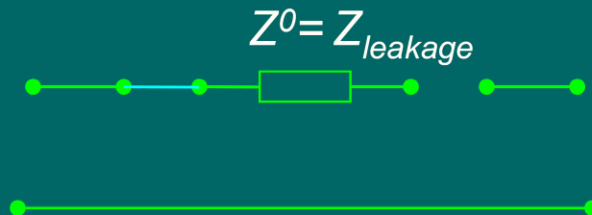
امکان عبور جریان در هر دو طرف وجود دارد ولی در طرف مثلث جریانها گردشی اند و در خط جریان توالی صفر وجود ندارد.



مدل توالی صفر ترانس ستاره زمین شده - ستاره

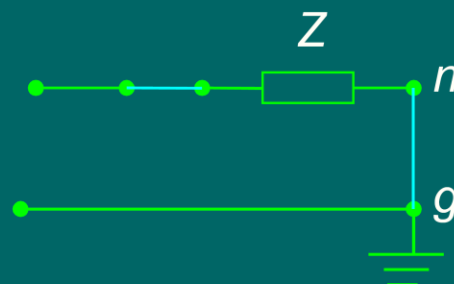
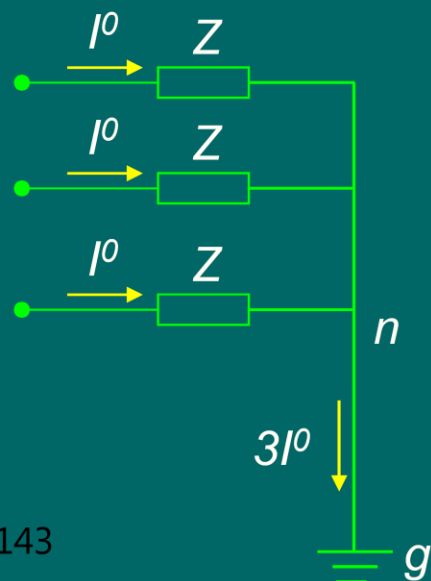
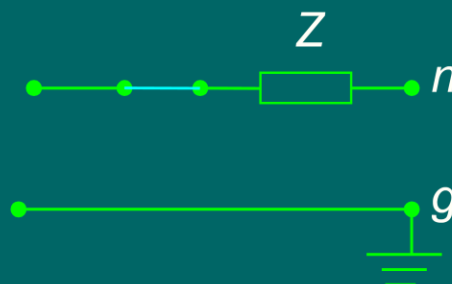
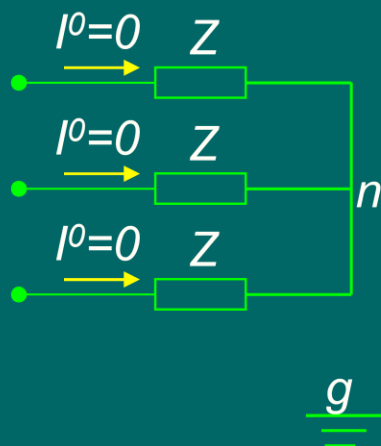


چون در طرف ستاره جریان توالی صفر نمی توانند جریان یابند، در طرف ستاره زمین شده هم جریان نداریم.

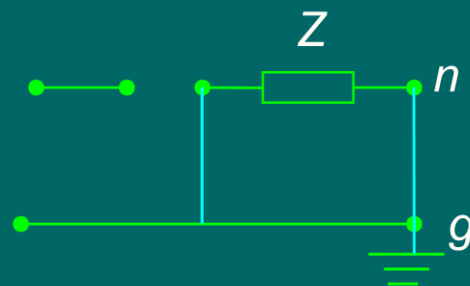
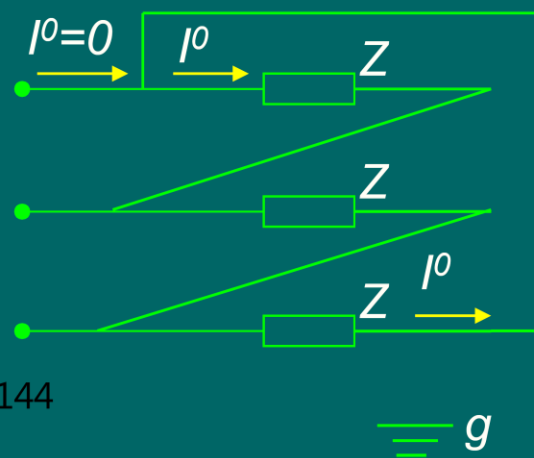
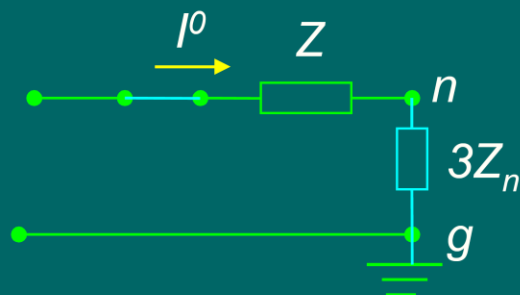
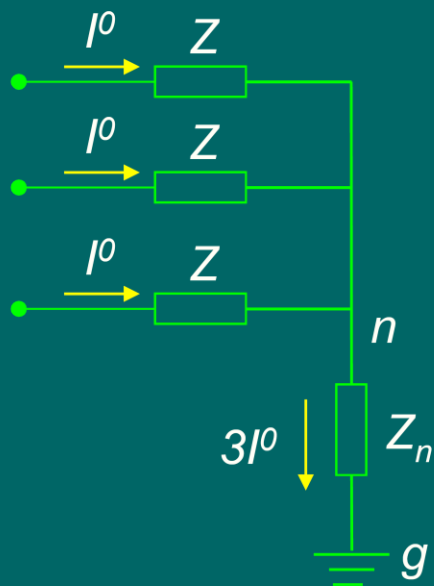


شبکه های توالی صفر در مدارها

مبنا زمین است.

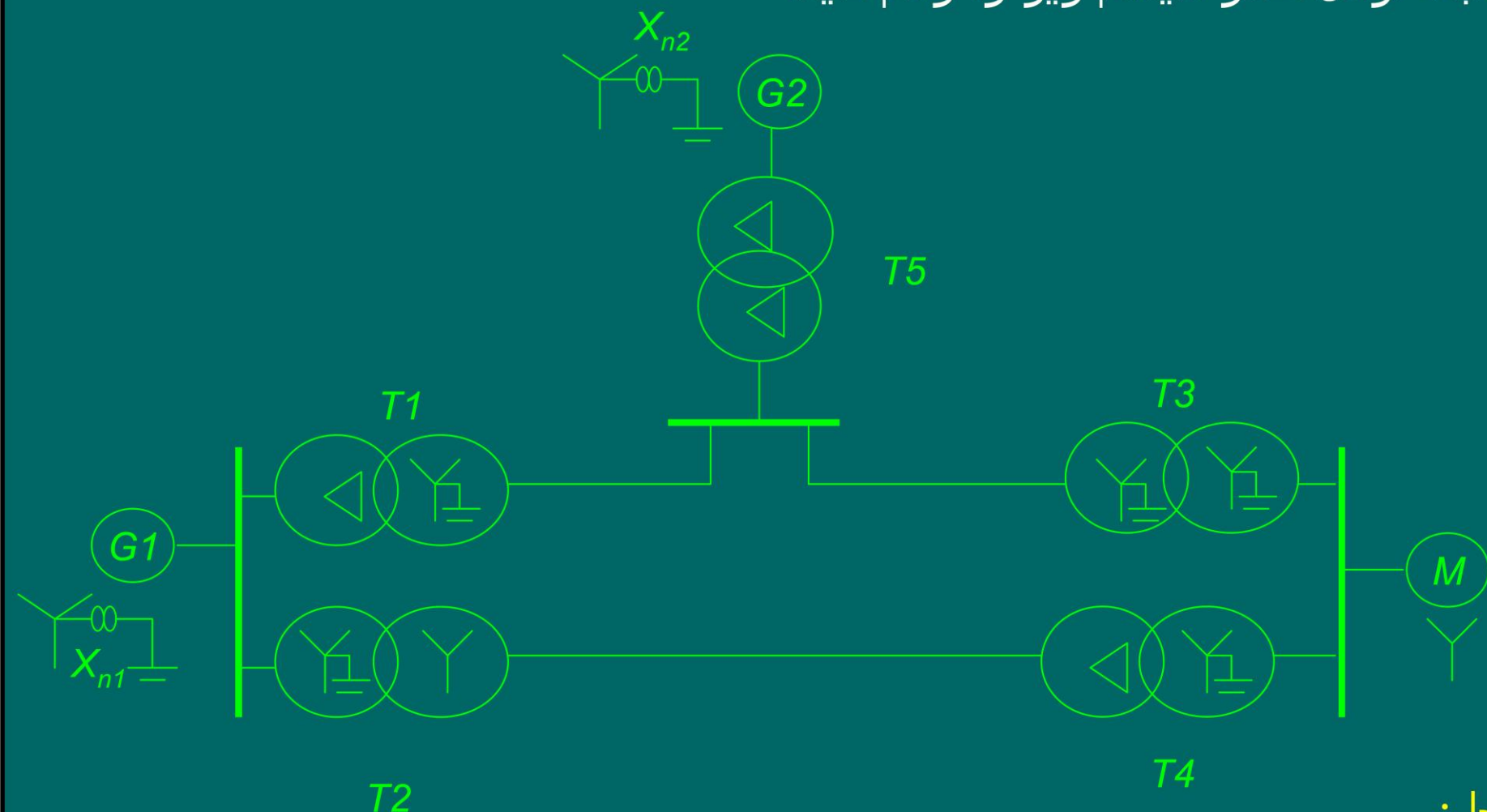


ادامه شبکه های توالی صفر در مدارها



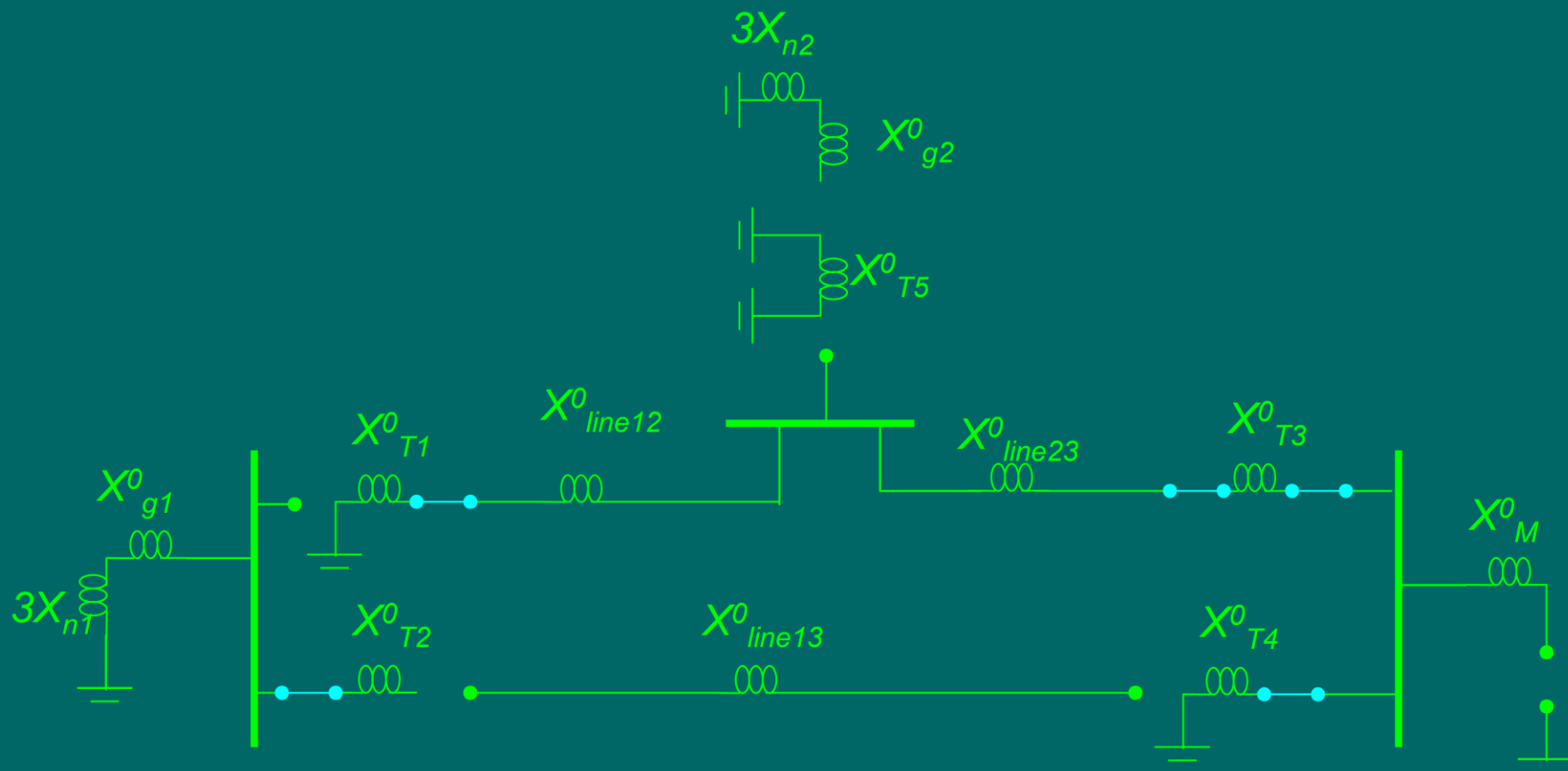
مثال 7-4

شبکه توالی صفر سیستم زیر را رسم کنید.



حل:.

حل مثال 7-4

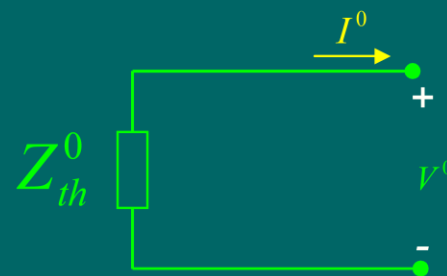
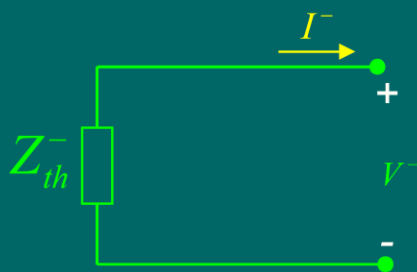
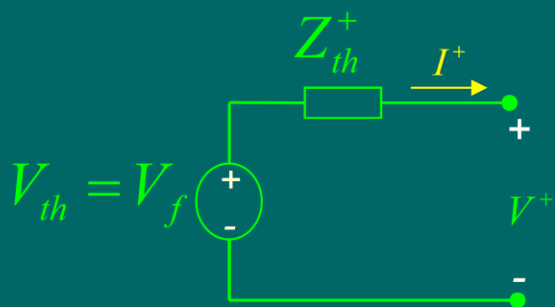


روشهای حل اتصال کوتاه نامتقارن

- 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

مراحل روش اتصال شبکه های توالی

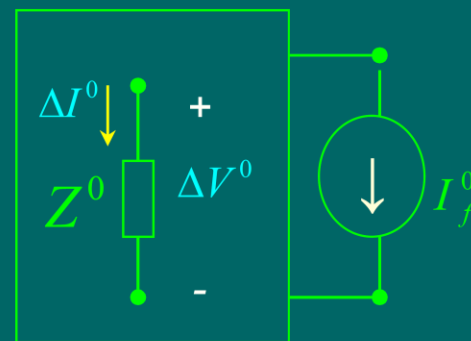
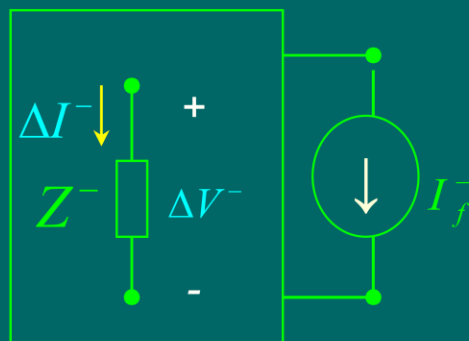
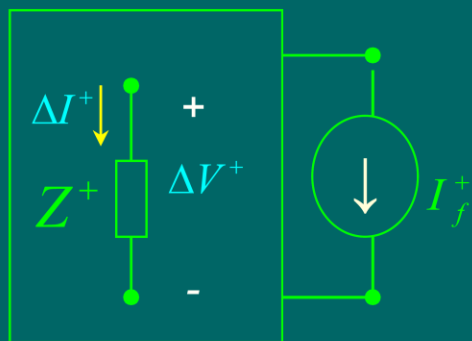
- 1- جریانهای عناصر سیستم و ولتاژ محل اتصال کوتاه (V_f) را در **قبل** از اتصال کوتاه محاسبه می کنیم.
- 2- V_f را بعنوان ولتاژ **تونن** شبکه از دیدگاه نقطه اتصال کوتاه شده در نظر می گیریم که فقط در مدار معادل **مثبت** ظاهر می شود.
- 3- **شبکه های توالی** مثبت، منفی و صفر سیستم را رسم می کنیم.
- 4- **امپدانس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



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 صفرشده اعمال نموده و مولفه های تغییرات ولتاژها و جریانهای عناصر مورد نیاز سیستم را محاسبه می کنیم.



ادامه مراحل روش اتصال شبکه های توالی

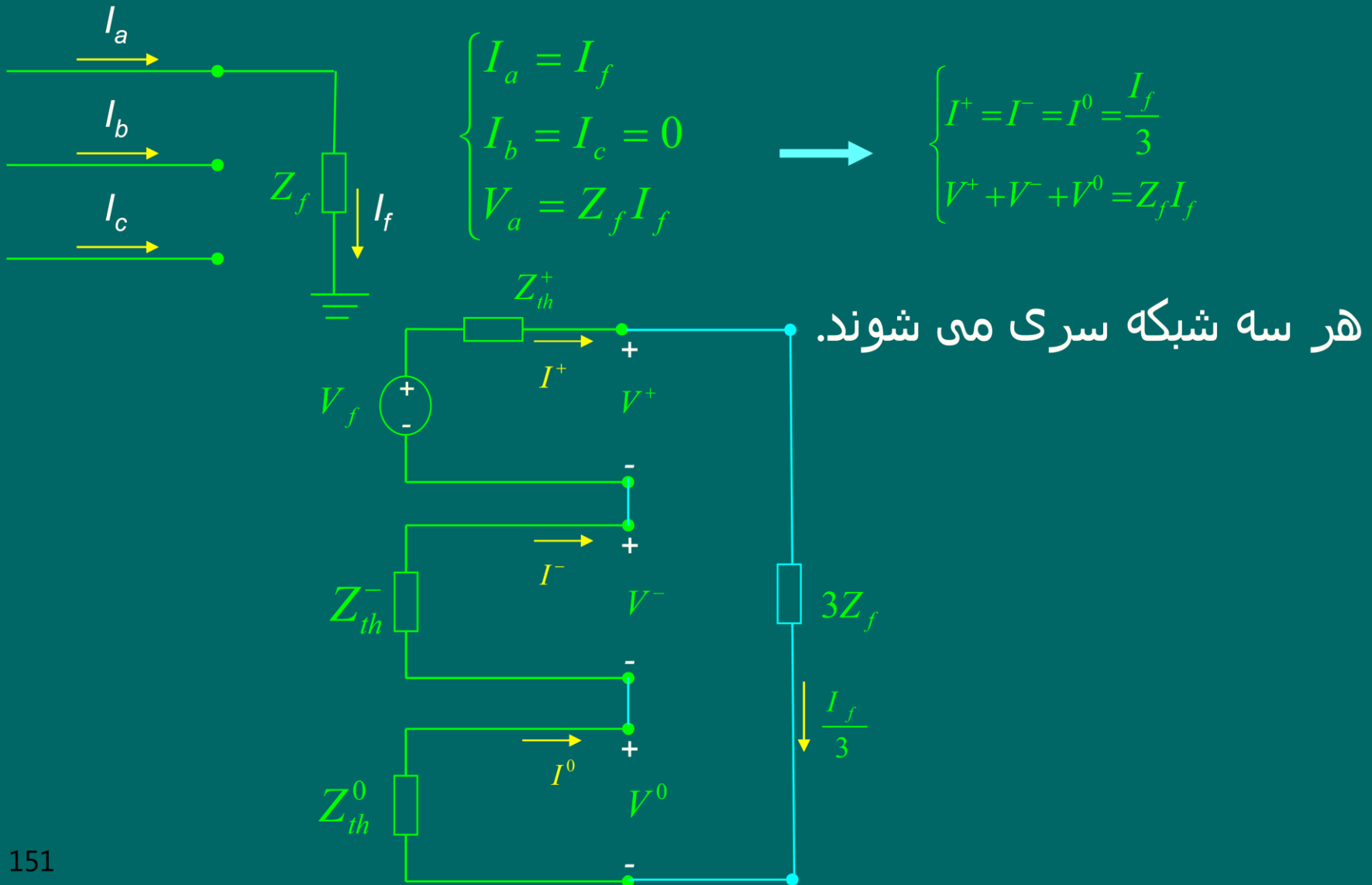
7- تغییرات ولتاژ و جریانهای فازها را در عناصر مورد نیاز از تبدیل فورسکیو بدست می آوریم:

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

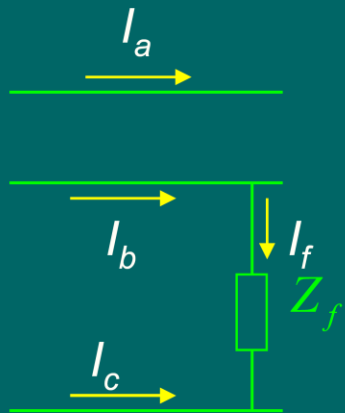
8- با جمع ولتاژ و جریانهای فازها در قبل از اتصال کوتاه و تغییرات ولتاژ و جریانهای ناشی از اتصال کوتاه، ولتاژ و جریانهای بعد از اتصال کوتاه را بدست می آوریم:

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

نحوه اتصال شبکه های توالی در اتصال تکفاز به زمین



نحوه اتصال شبکه های توالی در اتصال دوفاز به هم

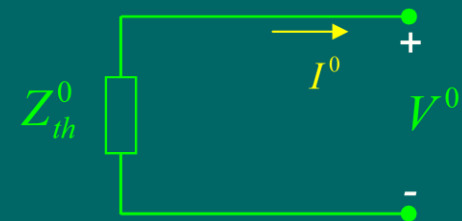
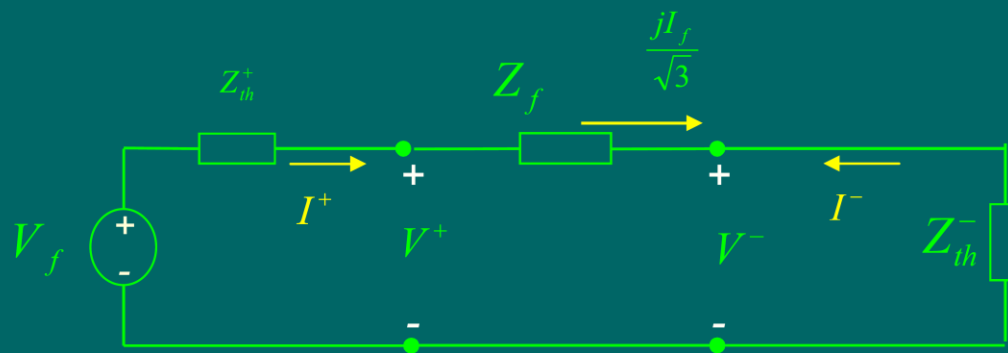


$$\begin{cases} I_a = 0 \\ I_b = I_f \\ I_c = -I_f \\ V_b - V_c = Z_f I_f \end{cases}$$

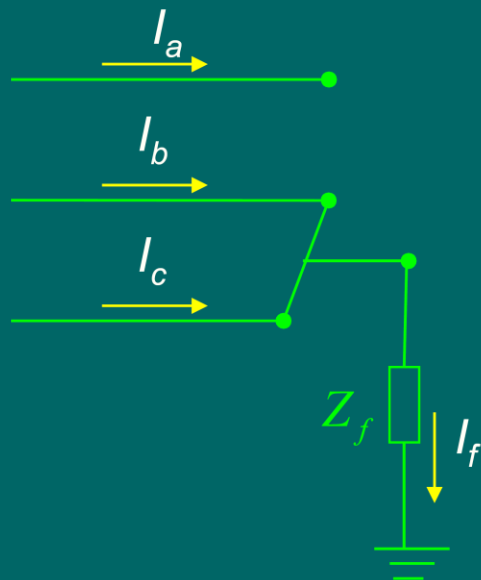


$$\begin{cases} I^0 = 0 \\ I^+ = -I^- = \frac{jI_f}{\sqrt{3}} \\ V^+ - V^- = Z_f I^+ \end{cases}$$

شبکه های مثبت و منفی موازی می شوند و شبکه صفر باز است.



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

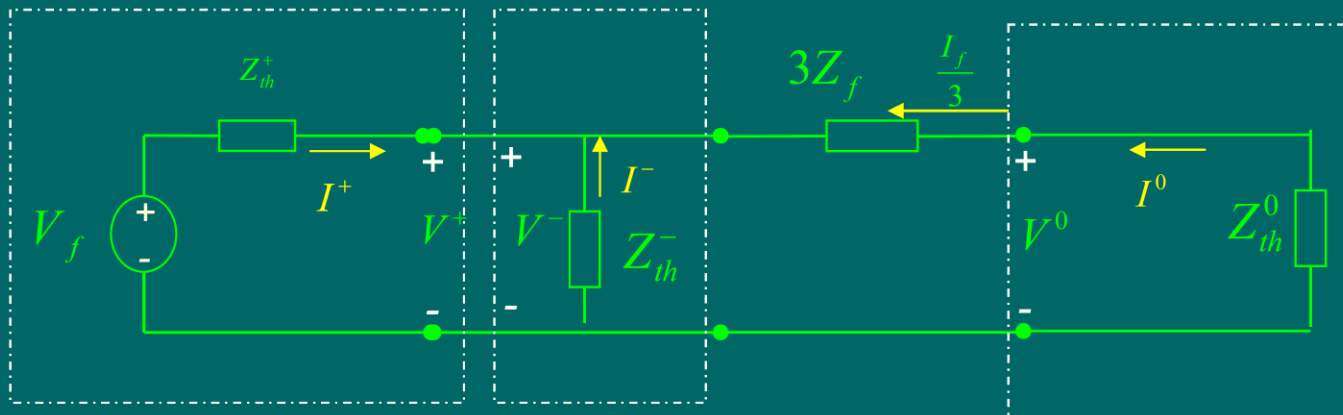


$$\begin{cases} I_a = 0 \\ I_b + I_c = I_f \\ V_b = V_c = Z_f I_f \end{cases}$$



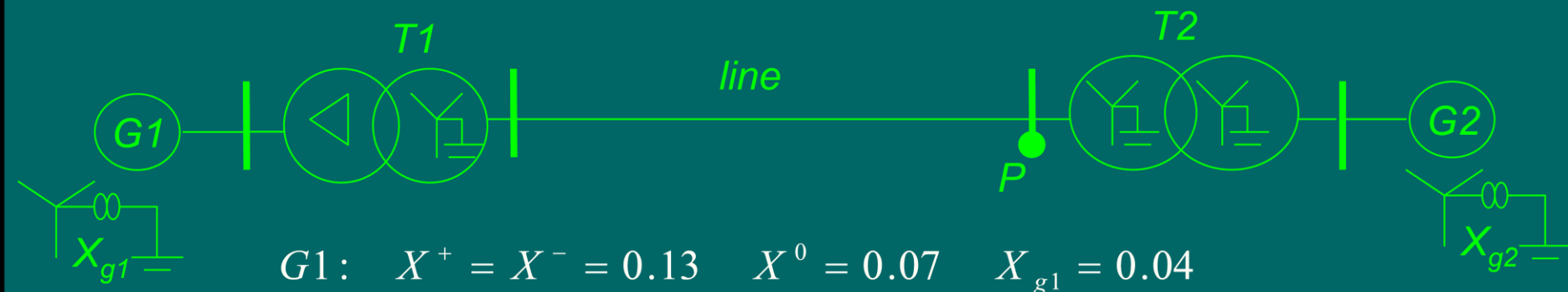
$$\begin{cases} I^0 = \frac{I_f}{3} \\ I^+ + I^- = -I^0 \\ V^+ = V^- \\ V^0 - V^+ = Z_f I_f \end{cases}$$

هر سه شبکه توالی موازی می شوند.



مثال 4-8

-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 $1 \angle 0$ فرض می شود. جریان خط انتقال را در بعد از اتصال کوتاه برای هر فاز محاسبه کنید.



$$G1: \quad X^+ = X^- = 0.13 \quad X^0 = 0.07 \quad X_{g1} = 0.04$$

$$G2: \quad X^+ = X^- = 0.2 \quad X^0 = 0.06 \quad X_{g2} = 0.03$$

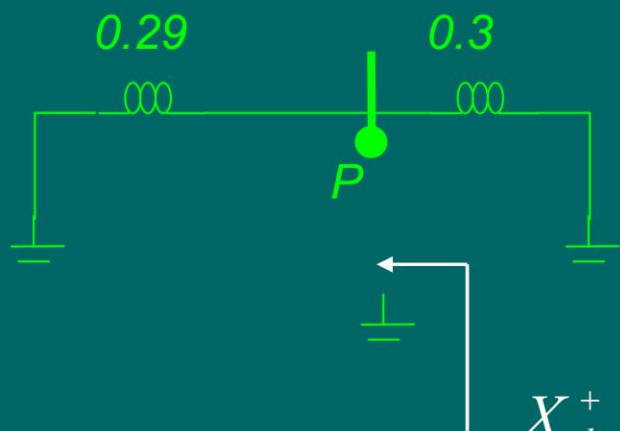
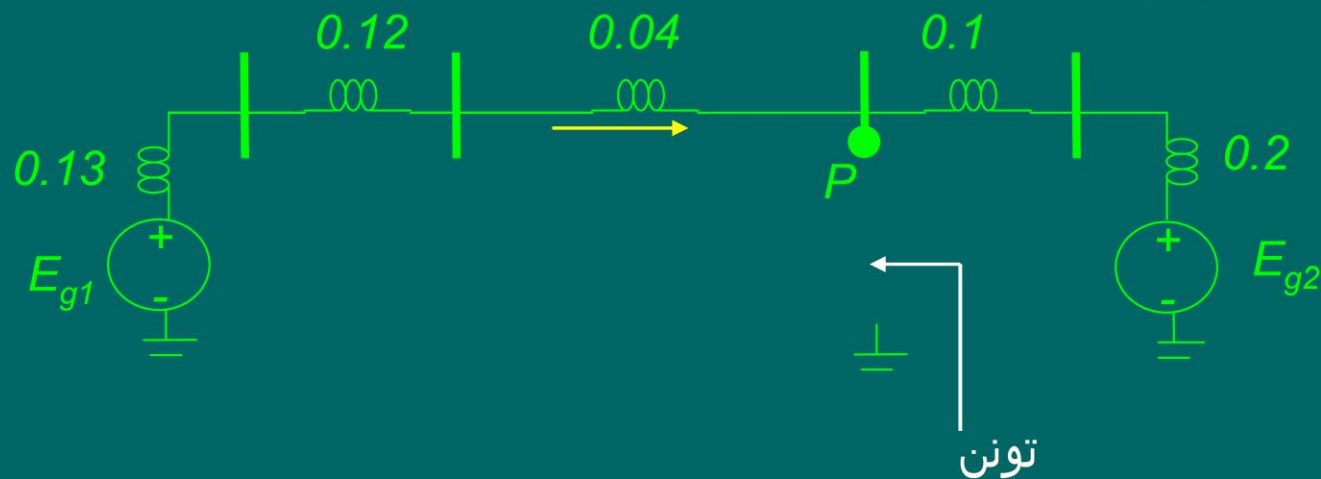
$$T1: \quad X^+ = X^- = X^0 = 0.12$$

$$T2: \quad X^+ = X^- = X^0 = 0.1$$

$$Line: \quad X^+ = X^- = 0.04 \quad X^0 = 0.12$$

حل مثال 8-4

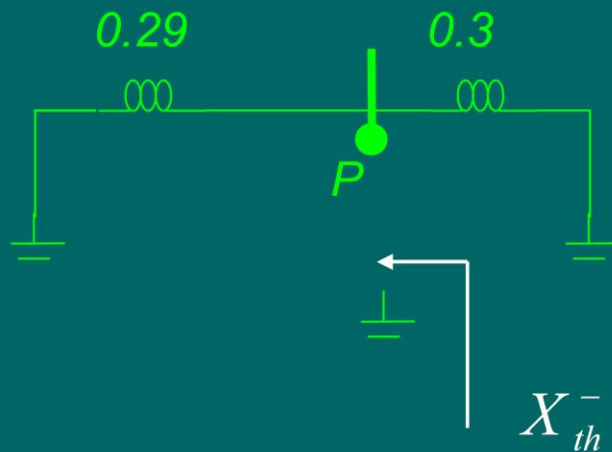
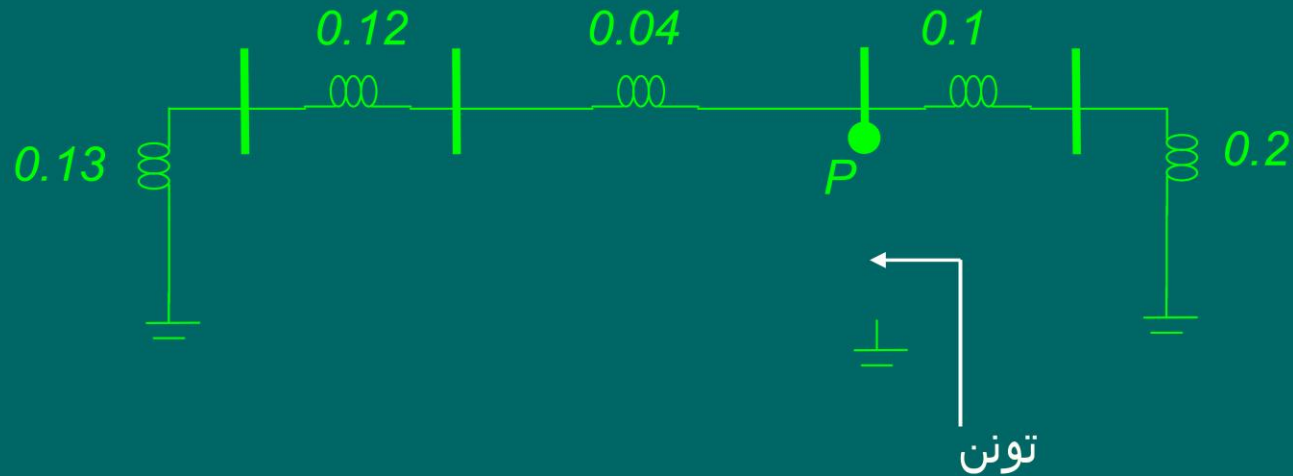
مدل توالی مثبت شبکه:



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

ادامه حل مثال 8-4

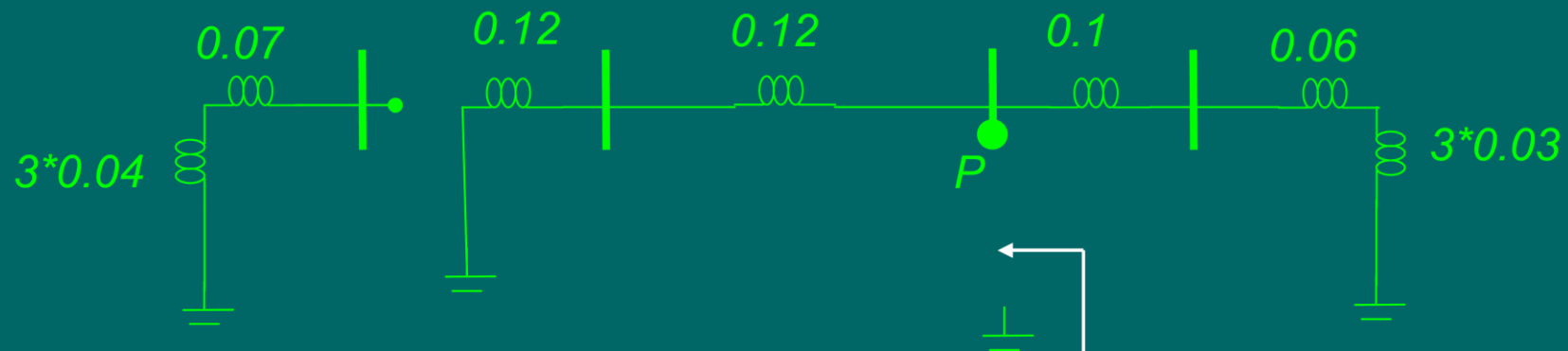
مدل توالی منفی شبکه:



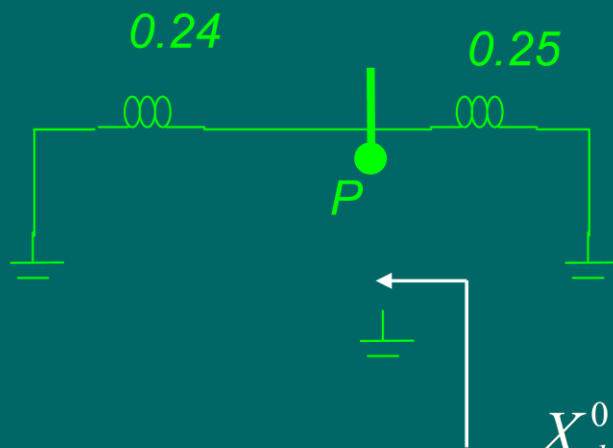
$$X_{th}^{-} = 0.29 \parallel 0.3 = 0.147$$

ادامه حل مثال 8-4

مدل توالی صفر شبکه:

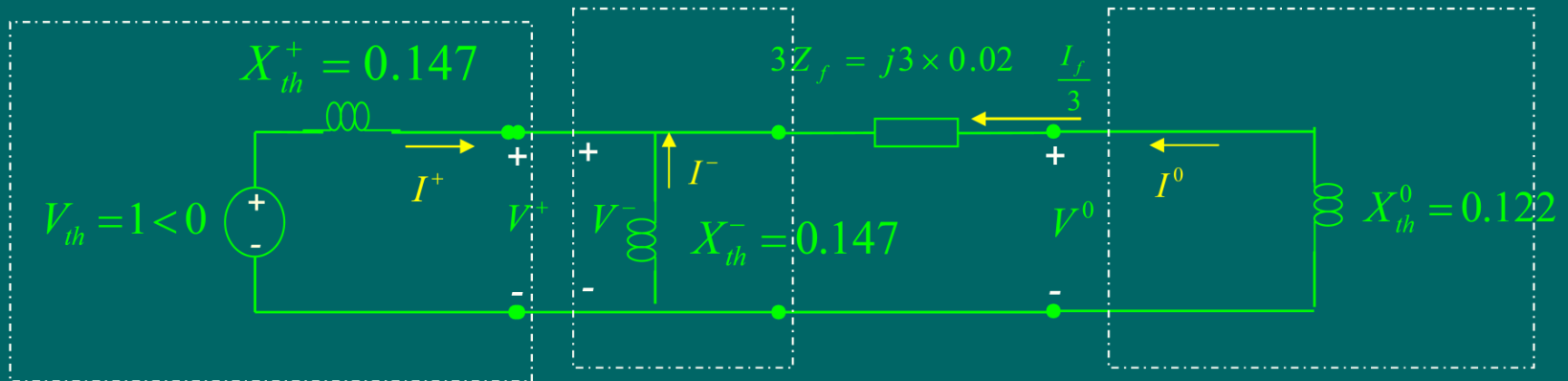


تونن



$$X_{th}^0 = 0.25 \parallel 0.24 = 0.122$$

ادامه حل مثال 8-4



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

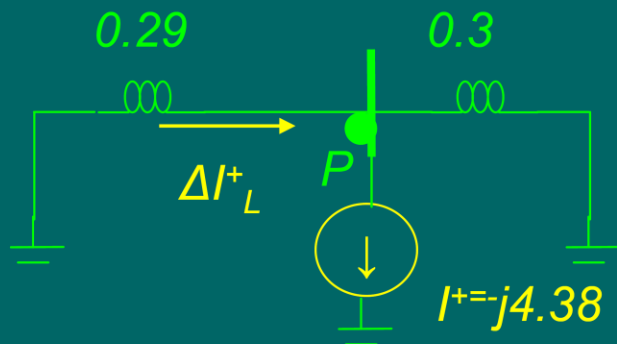
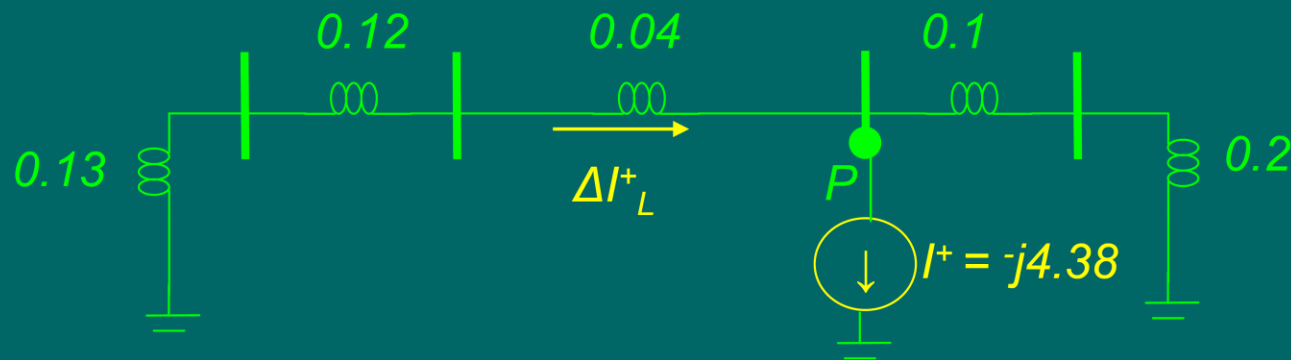
$$I^- = -\frac{(3Z_f + X_{th}^0)}{j[X_{th}^- + (3Z_f + X_{th}^0)]} I^+ = -\frac{j(3 \times 0.02 + 0.122)}{j[0.147 + (3 \times 0.02 + 0.122)]} (-j4.38) = j2.423$$

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

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

ادامه حل مثال 8-4

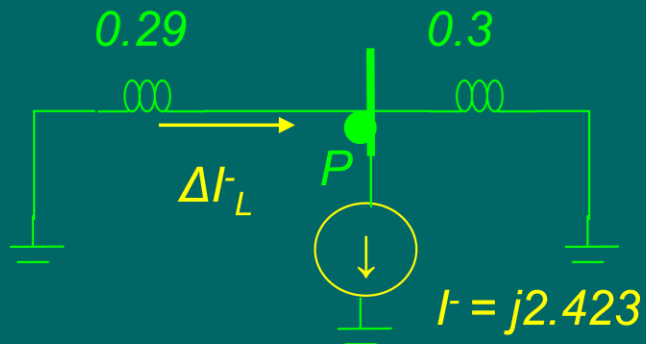
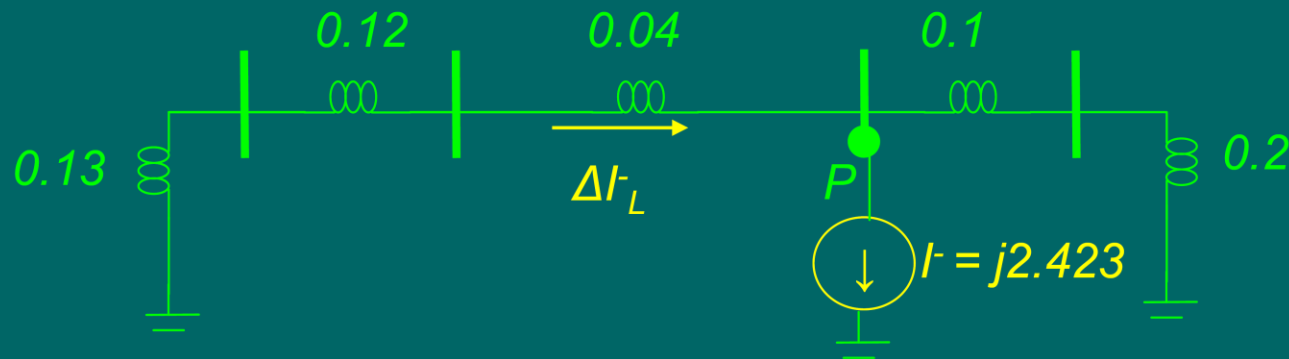
محاسبه مولفه **مثبت** جریان خط :



$$\Delta I_L^+ = \frac{0.3}{0.3 + 0.29} I^+ = \frac{0.3}{0.3 + 0.29} (-j4.38) = -j2.23$$

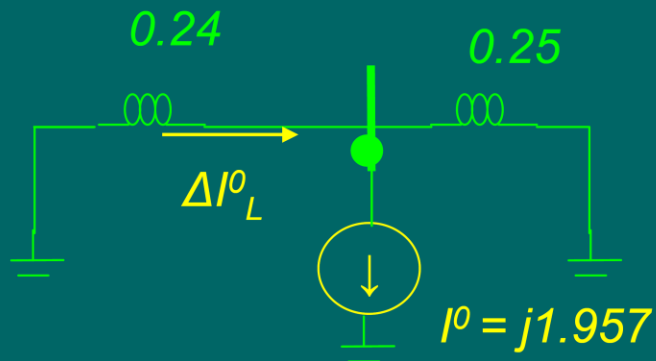
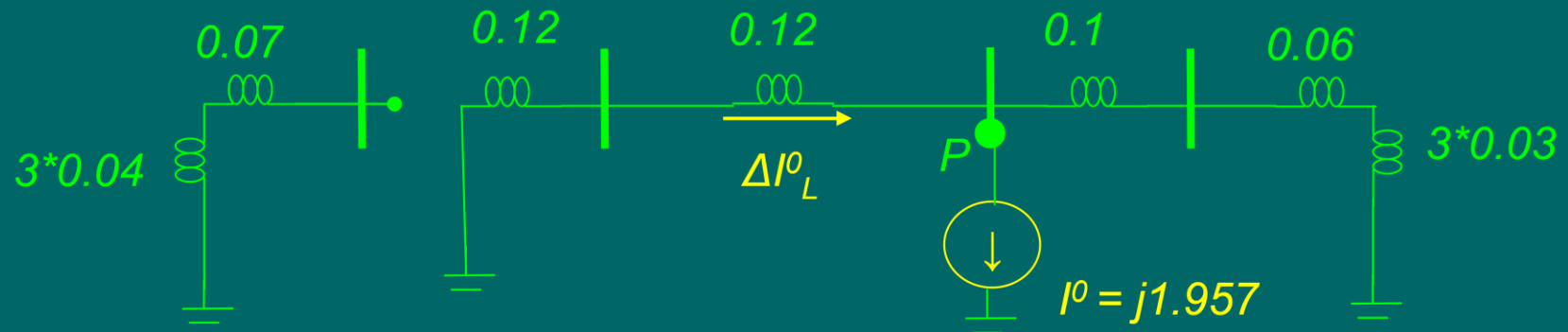
ادامه حل مثال 8-4

محاسبه مولفه منفی جریان خط:



$$\Delta I_L^- = \frac{0.3}{0.3 + 0.29} I^- = \frac{0.3}{0.3 + 0.29} (j2.423) = j1.23$$

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



$$\Delta I_L^0 = \frac{0.25}{0.25 + 0.24} (j1.957) = j0.999$$

ادامه حل مثال 4-8 : محاسبه جریان فازی خط

تغییرات جریان فازهای خط ناشی از اتصال کوتاه:

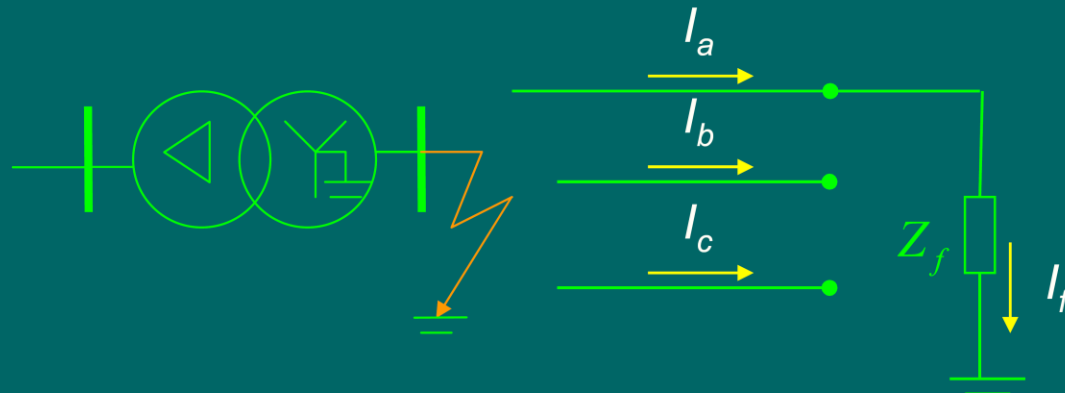
$$\begin{bmatrix} \Delta I_{La} \\ \Delta I_{Lb} \\ \Delta I_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_L^+ = -j2.23 \\ \Delta I_L^- = j1.23 \\ \Delta I_L^0 = j0.999 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0.001 \\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

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

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

مثال 4-9

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. جریانهای خط در هر فاز اولیه ترانسفورماتور را حساب کنید؟



حل:

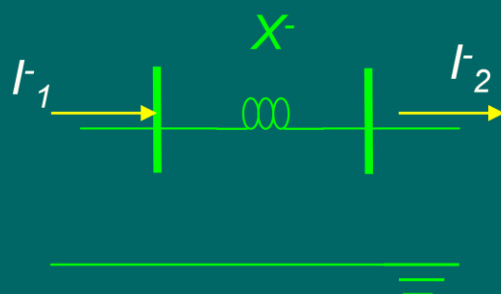
محاسبه مولفه های جریان اتصال کوتاه در ثانویه:

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

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

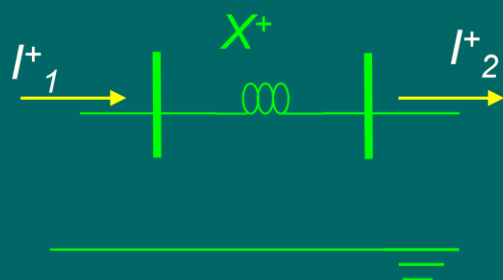
ادامه حل:

مدل منفی ترانس:



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

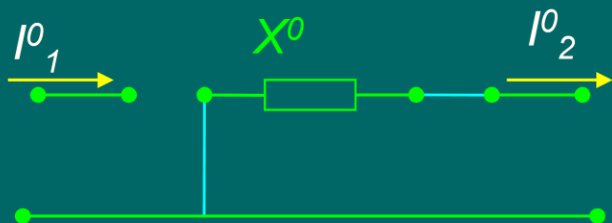
مدل مثبت ترانس:



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

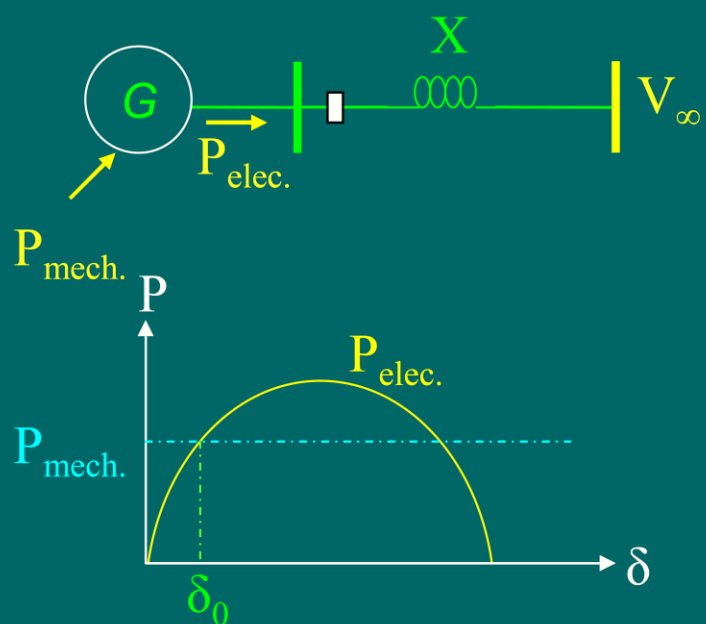
مدل صفر ترانس:

$$I_1^0 = 0$$



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

فصل پنجم : پایداری گذرای سیستم قدرت



- اتصال یک ژنراتور به یک باس بی نهایت از طریق یک خط به راکتانس X (سیستم دومنطقه ای):

- در حالت **عادی** : توان الکتریکی و توان مکانیکی در یک زاویه قدرت مشخص δ_0 برابراند:

- چون اکثر خطا (اتصال کوتاه)ها **گذرا** هستند و خود به خود از بین می روند اگر خطائی در خط رخ دهد، **ریکلوزر** (رله های) خط، خطا را تشخیص داده و فرمان به قطع خط می دهند و مجددا پس از چند سیکل فرمان به وصل خط می دهند.

- درحین خطا چون توان الکتریکی خروجی کمتر از توان مکانیکی ورودی است، ژنراتور سرعت می گیرد.

سنکرونیزم

- اگر فرمان وصل مجدد ریکلوزرها خیلی **زود** باشد ممکن است اتصال کوتاه از بین نرفته باشد (زیرا مثلاً عایق هوای بین خطوط که یونیزه شده، هنوز ترمیم نیافته باشد).
- اگر فرمان وصل مجدد **دیر** باشد، ژنراتور آنقدر سرعت گرفته که دیگر حتی با وصل به شبکه و قرار گرفتن بار بر روی آن، سرعت آن کم نشده و اصطلاحاً نمی تواند **سنکرونیزم** خود را با شبکه حفظ کند و **ناپایدار** می شود.
- مدت زمان قطع خط چقدر باشد تا ژنراتور پس از وصل پایدار بماند؟

تعریف زاویه قدرت

- اگر ω سرعت زاویه ای ژنراتور

- θ موقعیت زاویه ای رتور

- ω_0 سرعت زاویه ای سنکرون ژنراتور و

- $\Delta\omega$ اختلاف سرعت رتور نسبت به سرعت سنکرون باشد.

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \Rightarrow d\theta = \omega dt \Rightarrow \int_{\theta_0}^{\theta} d\theta = \int_0^t \omega dt$$

$$\theta = \int_0^t \omega dt + \theta_0 = \int_0^t (\omega_0 + \Delta\omega) dt + \theta_0 = \omega_0 t + \underbrace{\int_0^t \Delta\omega dt}_{\delta} + \theta_0 = \omega_0 t + \delta$$

$$\delta = \theta - \omega_0 t = \int_0^t \Delta\omega dt + \theta_0$$

- بنابراین δ انتگرال سرعت نسبی رتور نسبت به سرعت سنکرون است.

مشتق اول زاویه قدرت

$$\delta = \theta - \omega_0 t = \int_0^t \Delta \omega . dt + \theta_0$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \dot{\delta} = \Delta \omega$$

بحث در مورد زاویه قدرت

- در حالت کار عادی ژنراتور:

$$P_{elec} = P_{mech} \Rightarrow \omega = \omega_0 \Rightarrow \Delta\omega = 0 \Rightarrow \delta = \int_0^t \Delta\omega \cdot dt + \theta_0 = \theta_0 = \text{constant}$$

- اگر سرعت ژنراتور **بیشتر** از سرعت سنکرون باشد:

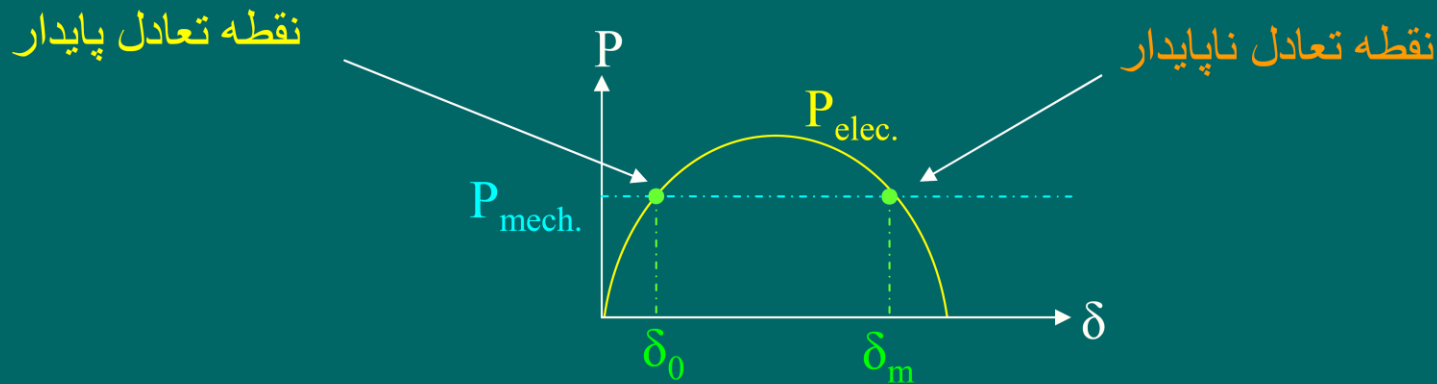
$$\omega > \omega_0 \Rightarrow \Delta\omega > 0 \Rightarrow \delta \uparrow = \int_0^t \Delta\omega \cdot dt + \theta_0$$

- اگر سرعت ژنراتور **کمتر** از سرعت سنکرون باشد:

$$\omega < \omega_0 \Rightarrow \Delta\omega < 0 \Rightarrow \delta \downarrow = \int_0^t \Delta\omega \cdot dt + \theta_0$$

نقاط تعادل پایدار و ناپایدار

- در حالت کار عادی ژنراتور:



- اگر $\delta > \delta_m$ شود، توان مکانیکی از توان الکتریکی بیشتر شده و ژنراتور ناپایدار می شود.

- اگر $\delta < \delta_m$ شود، توان مکانیکی کمتر شده و ژنراتور به نقطه تعادل پایدارش برمی گردد.

تعریف ثابت اینرسی

ثابت اینرسی به صورت نسبت انرژی جنبشی در فرکانس سنکرون به توان ظاهری ژنراتور تعریف می شود. بنابراین:

$$H = \frac{W_{Kin}^0}{S} \Rightarrow W_{Kin}^0 = H . S$$

دیمانسیون ثابت اینرسی **ثانیه** است.

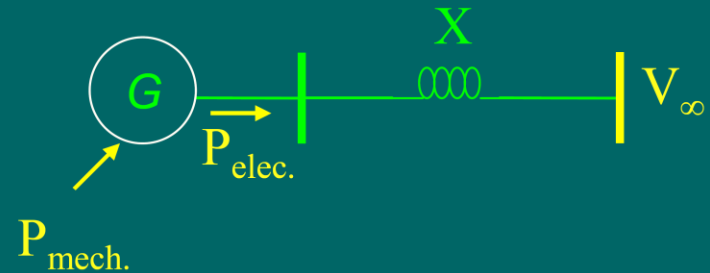
انرژی جنبشی در یک ژنراتور :

$$\frac{W_{kin}}{W_{Kin}^0} = \frac{\frac{1}{2}I\omega^2}{\frac{1}{2}I\omega_0^2} = \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = \left(\frac{\omega_0 + \Delta\omega}{\omega_0}\right)^2 = \left(1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2 = 1 + 2\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right) + \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2 \approx 1 + 2\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)$$

$$W_{kin} = W_{Kin}^0 \left(1 + 2\frac{\overbrace{\dot{\delta}}^{\Delta\omega}}{\omega_0}\right) = W_{Kin}^0 \left(1 + 2\frac{\dot{\delta}}{\omega_0}\right)$$

$$\frac{dW_{kin}}{dt} = \frac{d\left[W_{Kin}^0 \left(1 + 2\frac{\dot{\delta}}{\omega_0}\right)\right]}{dt} = \frac{\overbrace{2W_{Kin}^0}^{H.S}}{\underbrace{\omega_0}_{2\pi f_0}} \frac{d\dot{\delta}}{dt} = \frac{W_{Kin}^0}{\pi f_0} \frac{d\dot{\delta}}{dt} = \frac{H.S}{\pi f_0} \ddot{\delta}$$

معادله نوسان :



$$P_m - P_e = \frac{dW_{kin}}{dt} = \frac{H.S}{\pi f_0} \ddot{\delta}$$

معادله نوسان را پریونیت می کنیم:

$$P_m - P_e = \frac{H}{\pi f_0} \ddot{\delta}$$

$$\ddot{\delta} = \frac{\pi f_0}{H} (P_m - P_e)$$

شرط پایدار شدن ژنراتور

- اگر بر اثر یک خطا، با گذشت چندین ثانیه زمان δ همواره افزایش یابد، ژنراتور **ناپایدار** خواهد شد ولی اگر δ پس از یک دوره افزایش، شروع به کاهش نماید، ژنراتور **پایدار** خواهد شد.

- تغییرات δ نسبت به زمان را می توان با حل معادله نوسان مشاهده نمود.

- اگر ژنراتور پایدار شود در یک نقطه **مشتق δ صفر** خواهد بود.

معیار سطوح مساوی

$$\ddot{\delta} = \frac{\pi f_0}{H} (P_m - P_e)$$

$$\ddot{\delta} = \frac{d \dot{\delta}}{dt} = \frac{d \dot{\delta}}{d \delta} \frac{d \delta}{dt} = \dot{\delta} \frac{d \dot{\delta}}{d \delta} = \frac{\pi f_0}{H} (P_m - P_e)$$

$$\dot{\delta} d \dot{\delta} = \frac{\pi f_0}{H} (P_m - P_e) d \delta$$

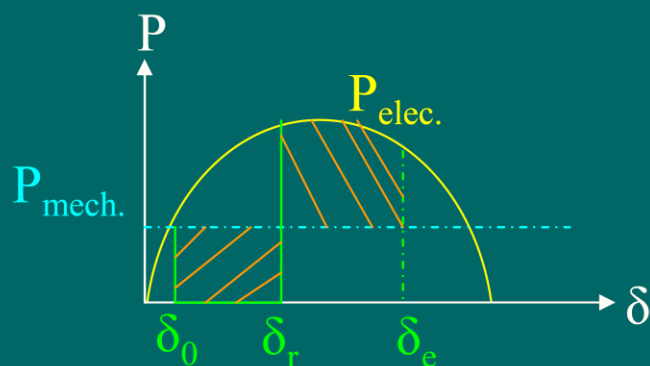
$$\int_{\dot{\delta}(0)=0}^{\dot{\delta}(t)} \dot{\delta} d \dot{\delta} = \int_{\delta_0}^{\delta(t)} \frac{\pi f_0}{H} (P_m - P_e) d \delta$$

$$\frac{1}{2} \dot{\delta}^2 = \int_{\delta_0}^{\delta(t)} \frac{\pi f_0}{H} (P_m - P_e) d \delta$$

$$\dot{\delta} = \sqrt{2 \frac{\pi f_0}{H} \int_{\delta_0}^{\delta(t)} (P_m - P_e) d \delta}$$

$$\text{if } \dot{\delta} = 0 \Rightarrow \int_{\delta_0}^{\delta(t)} (P_m - P_e) d \delta = 0$$

ادامه معیار سطوح مساوی



$$\int_{\delta_0}^{\delta_e} (P_m - P_e) d\delta = 0$$

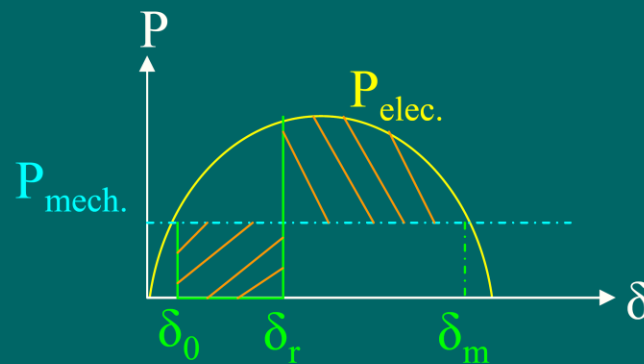
$$\int_{\delta_0}^{\delta_r} (P_m - P_e) d\delta + \int_{\delta_r}^{\delta_e} (P_m - P_e) d\delta = 0$$

$$\underbrace{\int_{\delta_0}^{\delta_r} (P_m - P_e) d\delta}_{A_{acc}} = \underbrace{\int_{\delta_r}^{\delta_e} (P_e - P_m) d\delta}_{A_{dec}}$$

$$A_{acc} = A_{dec}$$

نتیجه : اگر سطح شتاب دهنده مساوی سطح شتاب گیرنده باشد، ژنراتور پایدار می ماند.

بررسی پایداری بوسیله معیار سطوح مساوی



δ_r زاویه وصل است.

$$A_{acc} = \int_{\delta_0}^{\delta_r} (P_m - P_e) d\delta \quad A_{dec}^{\max} = \int_{\delta_r}^{\delta_m} (P_e - P_m) d\delta$$

$$\text{if } A_{acc} < A_{dec}^{\max} \Rightarrow \text{Stable}$$

$$\text{if } A_{acc} > A_{dec}^{\max} \Rightarrow \text{Unstable}$$

$$\text{if } A_{acc} = A_{dec}^{\max} \Rightarrow \text{Critical}$$