

به نام خدا

# بررسی سیستم های قدرت الکتریکی ۲

مدرس: مینا حشمتی

بهمن ۹۸

## سرفصل ها و منابع:

- ۱- یادآوری مفاهیم اساسی سیستم های انرژی الکتریکی و محاسبات ماتریس های امپدانس و admittances  
⇨ جزوه بررسی ۱ خودمان، کتاب بررسی سیستم های قدرت ۱ احد کاظمی
- ۲- پخش بار DC ⇨ جزوه بررسی ۲ خودمان
- ۳- پخش بار AC ⇨ جزوه بررسی ۲ خودمان، کتاب بررسی سیستم های قدرت ۱ احد کاظمی
- ۴- پخش بار اقتصادی ELD ⇨ جزوه بررسی ۲ خودمان
- ۵- اتصال کوتاه متقارن و نامتقارن ⇨ جزوه بررسی ۲ خودمان
- ۶- پایداری و کنترل سیستم های قدرت ⇨ جزوه بررسی ۲ خودمان، کتاب بررسی سیستم های قدرت ۲ هادی سعادت

## ارزشیابی:

امتحان پایان ترم ⇨ ۱۷ نمره

تمرین ها ⇨ ۳ نمره

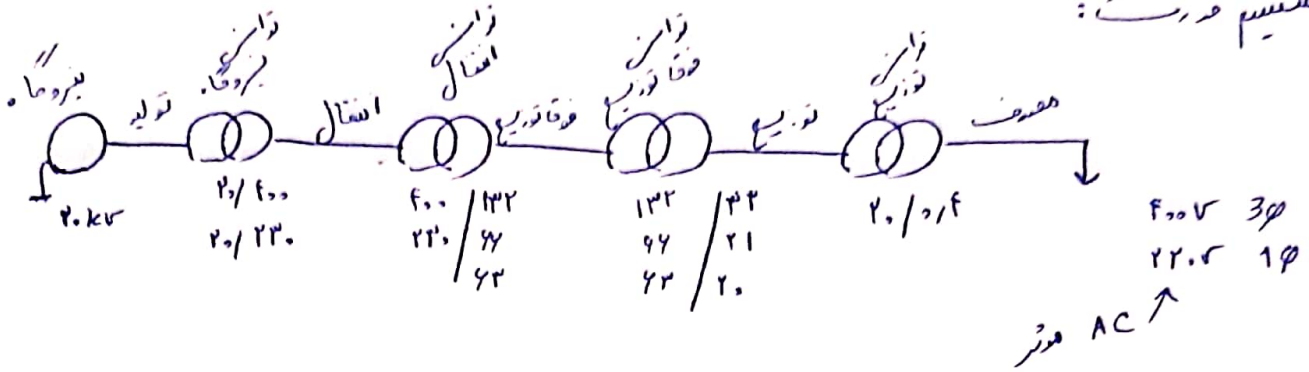
ارتباط با من :

[m.heshmati.znu@gmail.com](mailto:m.heshmati.znu@gmail.com)

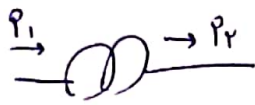
# PART 1

مفاهیم اساسی سیستم‌های انرژی

سیستم قدرت:



دلیل استفاده از ترانس: افزایش ولتاژ و کاهش تلفات



طبق قانون بقای انرژی:  $P_1 = P_2$

$P = VI$   $V \uparrow \Rightarrow I \downarrow \Rightarrow R I^2 \downarrow \Rightarrow$  کاهش تلفات

تولید و مصرف عملی بدون نیاز به ترانس ← micro grid

معرفی مفاهیم اساسی:

$$Z = R + jX$$

$$R = \text{real}(Z)$$

$$X = \text{imag}(Z)$$

$$X_L = j\omega L$$

$$X_C = \frac{1}{j\omega C}$$

یا، به عبارت دیگر:  $X_L = \omega L$  و  $X_C = \frac{1}{\omega C}$

$$Y = G + jB$$

$$G = \text{real}(Y)$$

$$B = \text{imag}(Y)$$

$$\omega = 2\pi f$$

سرعت زاویه‌ای

$$Y = \frac{1}{Z}$$

$$G = \frac{1}{R}$$

$$B = \frac{1}{X}$$

(۱)  $Z$ : امپدانس

(۲)  $R$ : رزیستانس

(۳)  $X$ : راکتانس

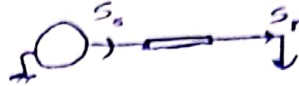
(۴)  $Y$ : ادmittانس

(۵)  $G$ : کانداکتانس

(۶)  $B$ : سوسپتانس

(۷)  $X_L$ : راکتانس القایی

(۸)  $X_C$ : راکتانس خازنی



$$S = P + jQ$$

$S$ : توان واقعی یا مفید  $mVA$

$$P = \text{real}(S) = S \cos \phi$$

$P$ : توان حقیقی یا تلف  $mW$

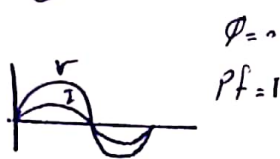
$$Q = \text{Imag}(S) = S \sin \phi$$

$Q$ : توان تلف  $mVar$

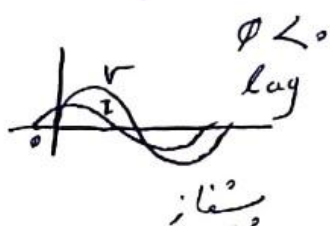
ضریب توان =  $\cos \phi$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{Q}{P}$$

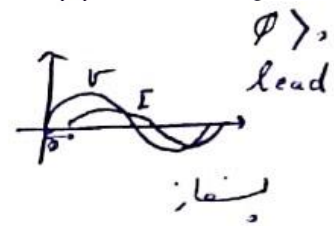
تا، اعمی



تا، خازنی



تا، سلفی



$$S_{1\phi} = \sqrt{3} V_L I_L^*$$

$$\rightarrow \begin{cases} P = |V| |I| \cos \phi \\ Q = |V| |I| \sin \phi \end{cases}$$

$$S_{3\phi} = 3 V_{\phi} I_{\phi}^* = \sqrt{3} V_L I_L^*$$

↓  
ولتاژ و جریان فاز

↓  
ولتاژ و جریان فاز

(۳) **پروپوزیت**: سیستم نسبت به واحد را بدون واحد

بدون تقاسم مقادیر در یک مقدار است

که اعداد کوچک و بزرگ

که از بین رفتن اختلاف سطح ناشی از ترانسها

$$O_{pu} = \frac{O_{\text{واقعی}}}{O_{\text{مقدار است}}}$$

$V_b, I_b$

$$V_{pu} = \frac{V}{V_b}$$

$$I_{pu} = \frac{I}{I_b}$$

$$S_b = V_b I_b \Rightarrow S_{pu} = \frac{S}{S_b}$$

$$P_{pu} = \frac{P}{S_b}$$

$$Q_{pu} = \frac{Q}{S_b}$$

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b} = \frac{V_b^2}{S_b}$$

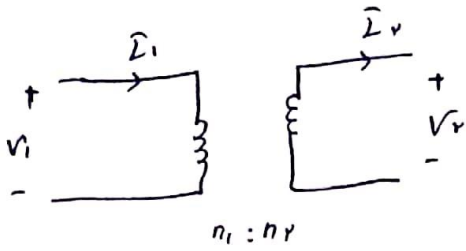
$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_b}$$

$$S_{pu} = \frac{\sqrt{3} V_L I_L^*}{\sqrt{3} V_b I_b^*} = V_{pu} \times I_{pu}^*$$

۲۹

$$\sum p_{u_{new}} = \sum p_{u_{old}} \left( \frac{S_{b_{new}}}{S_{b_{old}}} \right) \left( \frac{V_{b_{old}}}{V_{b_{new}}} \right)^2$$

۴. تطبیق امپدانس (انتقال امپدانس) در ترانس



در حالت ایده آل،  $P_1 = P_2$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\propto \frac{n \text{ مبداء}}{n \text{ مقصد}}$$

انتقال  $L$

$$\propto \frac{n \text{ مقصد}}{n \text{ مبداء}}$$

انتقال  $C$

$$\propto \left( \frac{n \text{ مقصد}}{n \text{ مبداء}} \right)^2$$

انتقال  $Z, R, a$

$$\propto \left( \frac{n \text{ مبداء}}{n \text{ مقصد}} \right)^2$$

انتقال  $Y, G, B$



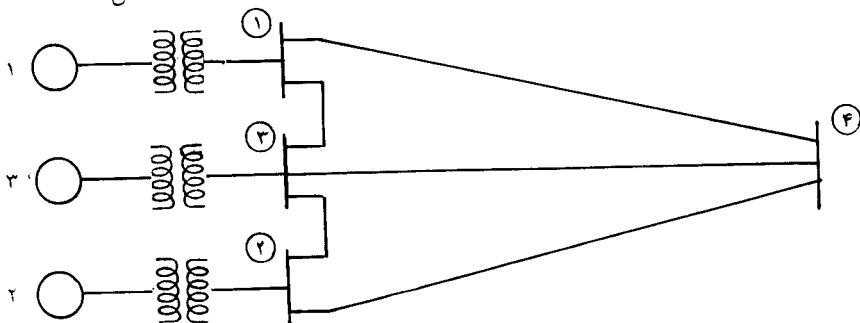
## ماتریس‌های ادمیتانس و امپدانس شبکه

### ۱-۳ مقدمه

امروزه یک سیستم قدرت شامل تعداد زیادی از ژنراتورها، ترانسفورماتورها، خطوط انتقال و شین‌ها می‌باشد و لذا استفاده از کامپیوتر در محاسبات مختلف سیستم‌ها امری اجتناب ناپذیر است. برای تهیه برنامه‌های کامپیوتری باید معادلات شبکه با توجه به عملکرد عناصر سیستم و مدار معادل آنها بررسی و آماده گردد. در این فصل، ماتریس‌های اصلی ادمیتانس و امپدانس شبکه که نشان دهنده نقش امپدانس‌های عناصر سیستم است معرفی شده و بعضی از کاربردهای آنها مورد بحث قرار می‌گیرد. در فصول بعدی از این ماتریس‌ها در تشکیل معادلات مورد نیاز برای محاسبات مختلف سیستم استفاده خواهد شد.

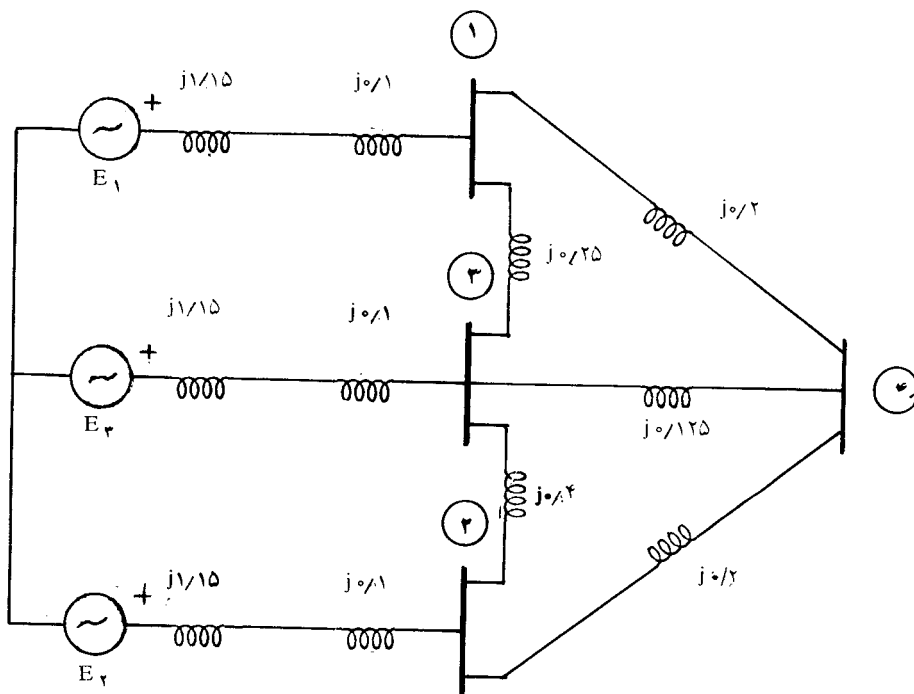
### ۲-۳ ماتریس‌های ادمیتانس و امپدانس شین

شکل (۱-۳) دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت با چهار شین را نشان می‌دهد. ژنراتورهای  $G_1$  و  $G_2$  و  $G_3$  از طریق ترانسفورماتورهای افزاینده به شین‌های ۱ و ۲ و ۳ متصل هستند.



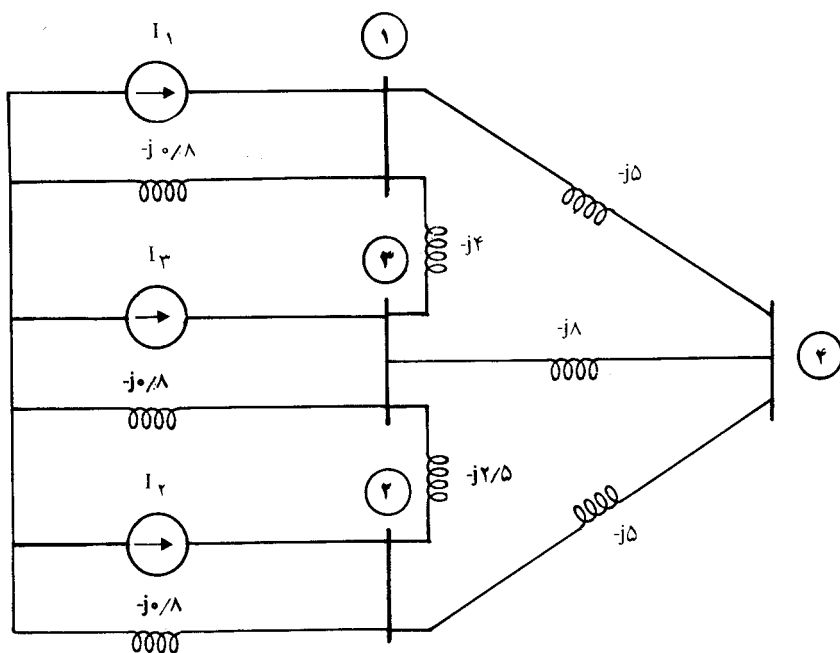
شکل ۱-۳: دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت

دیاگرام امپدانس این سیستم در شکل (۳-۲) رسم شده است. در این دیاگرام هر ژنراتور با نیروی محرکه و راکتانس سری، هر ترانسفورماتور با راکتانس پراکندگی و هر خط انتقال با راکتانس سری آن مشخص شده است. همه مقادیر راکتانس ها در این شکل برحسب PU هستند. ولتاژ مبنا در خطوط انتقال ۱۳۲KV و قدرت مبنای سیستم ۱۰۰MVA است. روش معمول در محاسبات سیستم های قدرت روش تحلیل نقطه ای<sup>(۱)</sup> می باشد.



شکل ۳-۲: دیاگرام امپدانس سیستم قدرت شکل (۳-۱)

در شکل (۳-۲) می توان مدار معادل شامل نیروی محرکه ژنراتور و امپدانس سری با آن را به یک منبع جریان و ادمیتانس موازی با آن جایگزین نمود. شکل (۳-۳) دیاگرام امپدانس مذکور را با این جایگزینی نشان می دهد. در این شکل عناصر سیستم با مقادیر ادمیتانس برحسب PU مشخص شده اند. جریانهای  $I_1$  و  $I_2$  و  $I_3$  از روابط زیر بدست می آیند:



شکل ۳-۳: دیاگرام امپدانس سیستم قدرت شکل (۳-۱) برحسب مقادیر ادمیتانس

$$I_1 = \frac{E_1}{j(1/15 + 0/1)} = \frac{E_1}{j1/25}$$

$$I_3 = \frac{E_3}{j(1/15 + 0/1)} = \frac{E_3}{j1/25}$$

$$I_2 = \frac{E_2}{j(1/15 + 0/1)} = \frac{E_2}{j1/25}$$

حال می توان معادلات گره را برای شین های ۱ و ۲ و ۳ و ۴ بترتیب زیر نوشت:

$$I_1 = V_1(-j0/8) + (V_1 - V_3)(-j4) + (V_1 - V_2)(-j5)$$

$$I_2 = V_2(-j0/8) + (V_2 - V_3)(-j2/5) + (V_2 - V_1)(-j5)$$

$$I_r = (V_r - V_1) (-j4) + (V_r - V_r) (-j2/5) + V_r(-j0/8) + (V_r - V_r) (-j8)$$

$$0 = (V_r - V_1) (-j5) + (V_r - V_r) (-j5) + (V_r - V_r) (-j8)$$

این معادلات را مرتب کرده و به صورت ماتریس می‌نویسیم:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_r \\ I_r \\ 0 \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} -9/8 & 0 & 4 & 5 \\ 0 & -8/3 & 2/5 & 5 \\ 4 & 2/5 & -15/3 & 8 \\ 5 & 5 & 8 & -18 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_r \\ V_r \\ V_r \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

این معادله را در حالت کلی می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_r \\ I_r \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{1r} & Y_{1r} & Y_{1r} \\ Y_{r1} & Y_{rr} & Y_{rr} & Y_{rr} \\ Y_{r1} & Y_{rr} & Y_{rr} & Y_{rr} \\ Y_{r1} & Y_{rr} & Y_{rr} & Y_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_r \\ V_r \\ V_r \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

و یا می‌توان نوشت:

$$I = Y_{bus} V \quad (3-3)$$

که در آن داریم:

$$I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_r \\ I_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_r \\ V_r \\ V_r \end{bmatrix} \quad Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{1r} & Y_{1r} & Y_{1r} \\ Y_{r1} & Y_{rr} & Y_{rr} & Y_{rr} \\ Y_{r1} & Y_{rr} & Y_{rr} & Y_{rr} \\ Y_{r1} & Y_{rr} & Y_{rr} & Y_{rr} \end{bmatrix}$$

در اینجا  $I$  بردار جریانهای تزریق شده به شین‌ها است که آنرا بردار جریان شین می‌نامیم.  $V$  نیز

بردار ولتاژ شین می‌باشد. ماتریس  $Y_{bus}$  که ارتباط بردار جریان شین و بردار ولتاژ شین را نشان می‌دهد به ماتریس ادمیتانس شین<sup>(۱)</sup> موسوم است. با کمی دقت ملاحظه می‌شود که در یک سیستم قدرت که دارای  $n$  شین می‌باشد، عناصر ماتریس  $Y_{bus}$  بصورت زیر قابل محاسبه هستند:

$Y_{ii}$  = جمع مقادیر ادمیتانس‌های عناصری که مستقیماً به شین  $i$  متصل هستند.

$Y_{ij}$  = جمع مقادیر ادمیتانس‌های عناصری که بین دو شین  $i$  و  $j$  قرار دارند در علامت منفی.

هریک از عناصر  $Y_{ij}$  به سلف ادمیتانس<sup>(۲)</sup> و هر یک از عناصر  $Y_{ij}$  به ادمیتانس متقابل<sup>(۳)</sup>

معروف هستند. همانطوریکه در رابطه (۳-۱) دیده می‌شود ماتریس  $Y_{bus}$  نسبت به قطر اصلی خود متقارن می‌باشد.

رابطه (۳-۳) را می‌توان بصورت زیر نیز بیان نمود:

$$V = Y_{bus}^{-1} I$$

$$V = Z_{bus} I \quad (3-4)$$

در این رابطه داریم:

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} \quad (3-5)$$

رابطه (۳-۳) بردار جریان شین را برحسب بردار ولتاژ شین و رابطه (۳-۴) بردار ولتاژ شین را برحسب بردار جریان شین نشان می‌دهند. ماتریس  $Z_{bus}$  را که از معکوس کردن ماتریس  $Y_{bus}$  بدست می‌آید، ماتریس امپدانس شین<sup>(۴)</sup> می‌نامیم. از آنجائیکه ماتریس  $Y_{bus}$  متقارن است، ماتریس  $Z_{bus}$  نیز نسبت به قطر اصلی خود متقارن خواهد بود.

مثال ۳-۱: در شکل (۳-۲) ماتریس‌های  $Y_{bus}$  و  $Z_{bus}$  را بدست آورید و چنانچه مقادیر نیروهای محرکه بترتیب زیر داده شده باشند ولتاژ شین‌ها را محاسبه کنید.

$$E_1 = 1/5 \angle 0^\circ \text{ PU}$$

$$E_r = 1/5 \angle -36/87^\circ \text{ PU}$$

$$E_r = 1/5 \angle 0^\circ \text{ PU}$$

حل: ابتدا ماتریس‌های  $Y_{bus}$  و  $Z_{bus}$  را تشکیل می‌دهیم:

$$Y_{bus} = j \begin{bmatrix} -9/8 & 0 & 4 & 5 \\ 0 & -8/3 & 2/5 & 5 \\ 4 & 2/5 & -15/3 & 8 \\ 5 & 5 & 8 & -18 \end{bmatrix} \text{ PU}$$

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} = j \begin{bmatrix} 0/4774 & 0/3706 & 0/4020 & 0/4142 \\ 0/3706 & 0/4872 & 0/3922 & 0/4126 \\ 0/4020 & 0/3922 & 0/4558 & 0/4232 \\ 0/4142 & 0/4126 & 0/4232 & 0/4733 \end{bmatrix} \text{ PU}$$

با تعیین مقادیر  $I_1$ ،  $I_r$  و  $I_r$  ولتاژ شین‌ها را بترتیب زیر محاسبه می‌کنیم:

$$I_1 = \frac{E_1}{j \, 1/25} = \frac{1/5 \angle 0^\circ}{j \, 1/25} = -j \, 1/2 \text{ PU}$$

$$I_r = \frac{E_r}{j \, 1/25} = \frac{1/5 \angle -36/87^\circ}{j \, 1/25} = 1/2 \angle -126/87^\circ = -0/72 - j0/96 \text{ PU}$$

$$I_r = \frac{E_r}{j \, 1/25} = \frac{1/5 \angle 0^\circ}{j \, 1/25} = -j \, 1/2 \text{ PU}$$

$$I_r = 0$$

$$V = Z_{\text{bus}} I$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_r \\ V_r \\ V_r \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} 0.4774 & 0.3706 & 0.4020 & 0.4142 \\ 0.3706 & 0.4872 & 0.3922 & 0.4126 \\ 0.4020 & 0.3922 & 0.4558 & 0.4232 \\ 0.4142 & 0.4126 & 0.4232 & 0.4733 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -j1/2 \\ -0.72-j0.96 \\ -j1/2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V_1 = 1/436 \angle -10/71^\circ \text{ PU}$$

$$V_r = 1/427 \angle -14/24^\circ \text{ PU}$$

$$V_r = 1/434 \angle -11/36^\circ \text{ PU}$$

$$V_r = 1/432 \angle -11/97^\circ \text{ PU}$$

## مطالعه پخش بار

## ۱-۷ مقدمه

هدف از طراحی و بهره برداری از یک سیستم قدرت، تامین بارهای مورد نیاز شبکه می باشد. همانطوریکه قبلاً گفته شد بارها را بصورت متمرکز روی شین ها در نظر می گیریم. در اینصورت مشخصات بارها را با توان اکتیو و توان راکتیو مصرفی آنها نشان می دهیم. مطالعه پخش بار<sup>۱</sup> به محاسبه کمیت های الکتریکی سیستم قدرت در حالت ماندگار<sup>۲</sup> به ازاء بارهای مشخص و معلوم می پردازد. این کمیت ها شامل ولتاژ شین ها، قدرت های اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتورها و قدرت های اکتیو و راکتیو جاری در خطوط انتقال می باشد. بنابراین بطور خلاصه می توان گفت که محاسبه پخش بار بطور کلی حل یک سیستم قدرت در حالت ماندگار و متقارن است.

در حقیقت طراحی و توسعه آینده سیستم با توجه به رشد بار و لزوم اضافه کردن ژنراتورها، ترانسفورماتورها و خطوط جدید در سیستم بدون مطالعه پخش بار امکان پذیر نمی باشد. همچنین مطالعه پخش بار نقش اساسی را در بررسی وضعیت فعلی یک سیستم و تصمیم گیری در مورد بهترین شرایط بهره برداری از آن را بعهدہ دارد. در این فصل ابتدا به تشریح مساله پخش بار پرداخته و پس از تعیین معادلات مربوطه، روش های عددی برای حل این معادلات را مورد بررسی قرار می دهیم و در نهایت چگونگی استفاده از کامپیوتر در حل مساله پخش بار را مطالعه خواهیم نمود.

---

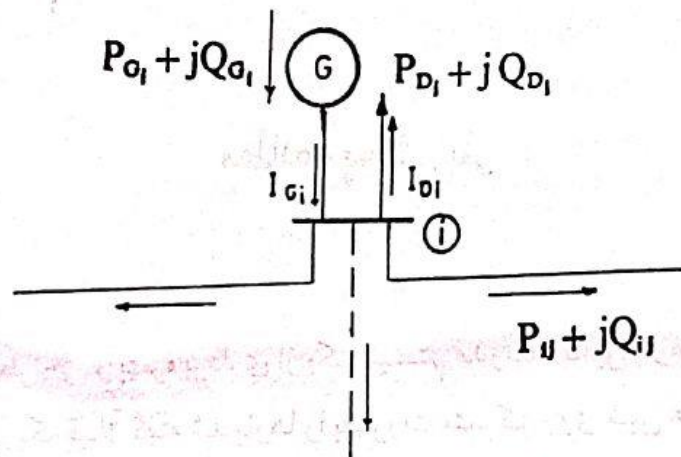
1. Load Flow Study

2. Steady State



## ۷-۲ رابطه کمیت های الکتریکی در یک شین

در شکل (۷-۱) شین شماره  $i$  از یک سیستم قدرت در حالت کلی نشان داده شده است. در این شکل  $P_{Gi}$  و  $Q_{Gi}$  قدرت های اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتور،  $P_{Di}$  و  $Q_{Di}$  قدرت های اکتیو و راکتیو مصرفی بار و  $V_i$  ولتاژ شین  $i$  می باشند. هر شین از سیستم قدرت در حالت کلی می تواند دارای ژنراتور و بار، فاقد هر دو و یا فاقد یکی از آن دو باشد.



شکل ۷-۱ قدرتهای تولیدی و مصرفی در یک شین

قدرت تولیدی این شین عبارتست از:

$$S_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Gi}$$

همچنین قدرت مختلط مصرفی این شین را به صورت زیر نشان می دهیم:

$$S_{Di} = P_{Di} + jQ_{Di}$$

قدرت های اکتیو و راکتیو و مختلط شین  $i$  طبق روابط زیر تعریف می شوند:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di}$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad (۷-۱)$$

$$S_i = P_i + jQ_i$$

جریان شین  $i$  نیز از رابطه زیر بدست می آید:

$$I_i = I_{Gi} - I_{Di} \quad (۷-۲)$$

که در آن  $I_{G_i}$  جریان تولیدی شین،  $I_{D_i}$  جریان مصرفی شین و  $I_i$  جریان شین  $i$  می باشند. بین  $P_i$ ،  $Q_i$ ،  $V_i$  و  $I_i$  معادله زیر برقرار است:

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i I_i^*$$

$$I_i^* = \frac{P_i + jQ_i}{V_i}$$

و از آنجا:

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (۷-۳)$$

در این معادله  $V_i = |V_i| \angle \delta_i$  می باشد که در آن  $\delta_i$  زاویه ولتاژ شین  $i$  نسبت به شین اصلی (مرجع) می باشد.

### ۷-۳ انواع شین ها از دید مساله پخش بار

برای شروع بررسی مساله پخش بار، شین های سیستم قدرت را به سه دسته تقسیم می کنیم.

**الف - شین اصلی (شین اسلک):** از آنجا که ولتاژ و جریان شین ها اعداد مختلط هستند لذا یکی از شین های سیستم را بعنوان مرجع در نظر گرفته و اختلاف زاویه بقیه کمیت ها را با آن می سنجیم. این شین را شین اصلی<sup>۱</sup> یا اسلک<sup>۲</sup> نامیده و معمولاً آنرا بعنوان شین شماره ۱ در نظر می گیریم.

زاویه ولتاژ شین اصلی ( $\delta_1$ ) برابر صفر منظور می گردد. از طرف دیگر با توجه به جمع بارهای مصرفی یک شبکه، قدرت تولیدی ژنراتورها ( $P_{G_i}$ ) معلوم است. لیکن قبل از محاسبه پخش بار، تلفات سیستم مجهول بوده و لذا ضروری است که در یکی از شین ها قدرت های تولیدی  $P_{G_i}$  و  $Q_{G_i}$  نامعلوم فرض شوند تا پس از حل شبکه، کمبود تولید و تلفات سیستم برای ایجاد توازن قدرت توسط این شین که همان شین اصلی است جبران گردد. بنابراین شین اصلی باید یکی از شین های دارای ژنراتور در سیستم باشد. در یک ژنراتور  $P_{G_i}$  و  $|V_i|$  قابل کنترل هستند (روش های کنترل در فصول بعدی مورد بررسی قرار

1. Main Bus

2. Slack Bus (or Swing Bus)



خواهد گرفت). در نتیجه با کنترل و تثبیت  $|V_i|$  این کمیت برای شین اصلی معلوم است.  
 بطور خلاصه در شین اصلی دو کمیت  $|V_i|$  و  $\delta_i = 0$  معلوم بوده و دو کمیت  $P_{G_i}$  و  $Q_{G_i}$  (و در نتیجه  $P_i$  و  $Q_i$ ) مجهول می باشند.

ب- شین های کنترل شده<sup>1</sup>: بجز شین اصلی بقیه شین هایی که دارای ژنراتور هستند به شین های کنترل شده یا شین های PV موسومند. در این شین ها  $P_{G_i}$  معلوم است. با توجه به اینکه  $P_{D_i}$  و  $Q_{D_i}$  برای کلیه شین ها معلوم بوده و از روش های پیش بینی بار<sup>2</sup> قابل دستیابی هستند لذا  $P_i = P_{G_i} - P_{D_i}$  نیز معلوم می باشد. بنابراین در شین های کنترل شده دو کمیت  $|V_i|$  و  $P_i$  معلوم بوده و دو کمیت  $\delta_i$  و  $Q_i$  (و در نتیجه  $Q_{G_i}$ ) مجهول می باشند.

ج- شین های بار<sup>3</sup>: این شین ها که به شین های PQ نیز موسومند دارای ژنراتور نمی باشند. بنابراین:

$$P_{G_i} = Q_{G_i} = 0$$

با توجه به معلوم بودن قدرت های مصرفی  $P_{D_i}$  و  $Q_{D_i}$ ، کمیت های  $P_i$  و  $Q_i$  در این شین ها بترتیب زیر معلوم می باشند:

$$P_i = P_{G_i} - P_{D_i} = 0 - P_{D_i} = -P_{D_i}$$

$$Q_i = Q_{G_i} - Q_{D_i} = 0 - Q_{D_i} = -Q_{D_i}$$

بنابراین در شین های بار  $P_i$  و  $Q_i$  معلوم و  $|V_i|$  و  $\delta_i$  مجهول هستند.

#### ۴-۷ معادلات پخش بار<sup>4</sup>:

همانطوریکه در تقسیم بندی شین ها ملاحظه می شود، در هر شین چهار کمیت

1. Controlled Bus (or PV Bus)

2. Load Forecasting

3. Load Bus

4. Load Flow Equations

اصلی  $P_i$ ،  $Q_i$  و  $|V_i|$  و  $\delta_i$  مورد نظر هستند. در هر یک از شین ها دو کمیت معلوم و دو کمیت مجهول می باشند. با توجه به تعداد شین ها ( $n$ )، تعداد معلومات  $2n$  و تعداد مجهولات نیز  $2n$  می باشد، و لذا برای بدست آوردن مجهولات باید  $2n$  معادله تشکیل گردد. مساله پخش بار، روش تشکیل و حل این معادلات است که منجر به تعیین مجهولات فوق الذکر می گردد. اطلاعاتی که پس از حل معادلات و محاسبه پخش بار بدست می آید شامل موارد زیر است:

- (الف) ولتاژ شین ها  $|V_i|$
  - (ب) زاویه ولتاژ شین ها  $\delta_i$
  - (ج) قدرت های اکتیو و راکتیو شین ها  $P_i$  و  $Q_i$
  - (د) قدرت های اکتیو و راکتیو تولیدی در شین های کنترل شده و اصلی  $P_{Gi}$  و  $Q_{Gi}$
  - (هـ) قدرت های اکتیو و راکتیو جاری در خطوط انتقال  $P_{ij}$  و  $Q_{ij}$
  - (و) تلفات هر خط و تلفات کل شبکه
- برای تعیین معادلات پخش بار، ابتدا بردار جریان شین بر حسب بردار ولتاژ شین را براساس معادله (۳-۳) بصورت زیر می نویسیم:

$$I = Y_{bus} V$$

و یا:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

از این رابطه جریان شین  $i$  بدست می آید که عبارتست از:

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{in}V_n = \sum_{j=1}^n Y_{ij}V_j \quad (۷-۴)$$

از طرف دیگر طبق رابطه (۷-۳) جریان شین  $i$  بر حسب قدرت اکتیو و راکتیو این شین



عبارتست از:

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (7-5)$$

با مقایسه روابط (7-4) و (7-5) داریم:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (7-6)$$

و یا:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7-7)$$

با قرار دادن  $(i = 1, 2, \dots, n)$  می توان رابطه (7-7) را برای یک یک شین ها نوشت و به  $n$  معادله مختلط دست یافت. چون مقادیر  $V_i$  و  $Y_{ij}$  مختلط هستند، با تفکیک قسمت های حقیقی و موهومی رابطه (7-7) تعداد معادلات به  $2n$  می رسد و چون در هر شین دو مجهول وجود دارد، تعداد مجهولات این معادلات نیز  $2n$  می باشد.

معادله (7-7) شکل کلی معادله پخش بار را نشان می دهد. این معادلات را بصورت های دیگری نیز می توان بیان نمود. اگر کمیت های رابطه (7-7) را مطابق زیر بصورت قطبی نشان دهیم:

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i, \quad Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \phi_{ij}$$

با جایگزینی این مقادیر در رابطه (7-7) شکل قطبی معادلات پخش بار را بصورت زیر خواهیم داشت:

$$P_i = |V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \cos(\delta_i - \delta_j - \phi_{ij}) \quad (7-8)$$

$$Q_i = |V_i| \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \sin(\delta_i - \delta_j - \phi_{ij}) \quad (7-9)$$

اگر  $V_i$  و  $Y_{ij}$  را بر حسب قسمت های حقیقی و موهومی آنها (فرم دکارتی) بنویسیم:

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = e_i + jf_i \quad (7-10)$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (7-11)$$

و این مقادیر را در رابطه (۷-۷) جایگزینی کنیم، خواهیم داشت:

$$P_i = e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)$$

$$Q_i = f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)$$

این روابط را می توان بصورت زیر نوشت:

$$P_i = e_i \sum_{j=1}^n a_{ij} + f_i \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad (۷-۱۲)$$

$$Q_i = f_i \sum_{j=1}^n a_{ij} - e_i \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad (۷-۱۳)$$

در اینجا  $a_{ij}$  و  $b_{ij}$  طبق معادلات زیر تعریف می شوند:

$$a_{ij} = G_{ij}e_j - B_{ij}f_j \quad (۷-۱۴)$$

$$b_{ij} = G_{ij}f_j + B_{ij}e_j \quad (۷-۱۵)$$

روابط (۷-۱۲) و (۷-۱۳) شکل دیگری از معادلات پخش بار را نشان می دهند که در آنها از قسمت های حقیقی و موهومی ولتاژها و عناصر  $Y_{bus}$  استفاده شده است (فرم دکارتی معادلات پخش بار). معادلات پخش بار غیر خطی بوده و لذا فقط از روش های آنالیز عددی قابل حل هستند. در ادامه بحث به حل این معادلات از روش های عددی می پردازیم.

## معادلات پخش بار AC (AC Load Flow): ACLF


در فرمولبندی پخش بار، در هر باس مانند  $i$ ، ۴ متغیر مجهول وجود دارد:

۱-  $P_i$  : توان اکتیو خالص تزریقی

۲-  $Q_i$  : توان راکتیو خالص تزریقی

۳-  $|V_i|$  : اندازه ولتاژ

۴-  $\theta_i$  : زاویه ولتاژ

توانهای اکتیو و راکتیو خالص تزریقی بصورت زیر میباشند: 

$$\begin{cases} P_i = P_{Gi} - P_{Di} \\ Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \end{cases}$$

$P_{Gi}$  و  $Q_{Gi}$  : توانهای اکتیو و راکتیو تولیدی در باس  $i$   
 $P_{Di}$  و  $Q_{Di}$  : توانهای اکتیو و راکتیو مصرفی (بار) در باس  $i$

قوانین کیرشلف را در هر باس میتوان بصورت زیر نوشت:

$$\begin{cases} I = YV & (1) \\ I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{|V_i|} e^{j\theta_i} & (2) \end{cases}$$

$I$  بردار جریانهای تزریقی در باسها

$V$  بردار ولتاژ باسها

$V_i$  ولتاژ باس  $i$ ام

$I_i$  جریان خالص تزریقی در باس  $i$ ام

$Y$  ماتریس ادمیتانس شبکه که در آن عناصر قطری مانند  $Y_{ii}$  برابر مجموع ادمیتانسهای متصل به باس  $i$ ام و عناصر غیرقطری مانند  $Y_{ij}$  برابر با منفی ادمیتانس مشترک بین باس  $i$  و  $j$  میباشند.

عناصر  $Y$ ،  $V$ ، و  $I$  مقادیر مختلط هستند و ماتریس  $Y$  یک ماتریس متقارن است.

$$V_i = |V_i| e^{j\theta_i}$$

کندوکتانس (رسانایی)

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| e^{j\delta_{ij}} = G_{ij} + jB_{ij}$$

سوسپتانس

$$\begin{cases} P_i = \sum_{j=1}^N |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) \\ Q_i = -\sum_{j=1}^N |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) \end{cases}$$

با جاگذاری رابطه (۲) در (۱) خواهیم داشت:

که  $N$  تعداد باسها (شین ها) میباشد. همانطور که میبینیم در هر باس ۲ معادله حاکم بوده و ۴ مجهول داریم. در کل  $2N$  معادله و  $4N$  مجهول داریم. برای حل این دستگاه غیر خطی، باید در هر باس ۲ متغیر معلوم باشند طوری که بتوانیم  $2N$  معادله  $2N$  مجهولی را حل کنیم. همانطور که قبلا در درس بررسی ۲ یاد گرفته ایم، بسته به اینکه در هر باس کدام دو متغیر معلوم باشند، ۳ نوع باس در معادلات پخش بار خواهیم داشت:

نوع باس	$ V $	$\theta$	$P$	$Q$
باس PQ	مجهول	مجهول	معلوم	معلوم
باس مرجع (Slack)	معلوم	معلوم	مجهول	مجهول
باس PV	معلوم	مجهول	معلوم	مجهول

## پخش بار DC

### پخش بار DC (DCLF):

پخش بار DC توانهای جاری در خطوط را در یک سیستم قدرت AC بطور تقریبی محاسبه می نماید. این پخش بار فقط توانهای اکتیو (P) را در نظر گرفته و از توانهای راکتیو (Q) صرفنظر می نماید. برخلاف پخش بار AC که با استفاده از روشهای مبتنی بر تکرار مانند گوس-سایدل، نیوتن-رافسون و ... حل میشدند، پخش بار DC نیازی به تکرار نداشته و در یک مرحله جواب را بدست می آورد. اما جوابهای آن دارای دقت کمتری نسبت به ACLF میباشد. DCLF معمولا در مطالعاتی که نیاز به محاسبه سریع پخش بار دارند (از جمله مطالعات برنامه ریزی توسعه) کاربرد فراوان دارد. در پخش بار DC مدل غیر خطی سیستم AC با لحاظ کردن فرضیات زیر تبدیل به یک مدل خطی ساده میگردد:

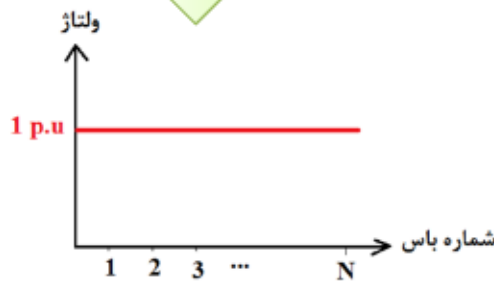


۱- مقاومت ( $R$ ) خطوط (یا عبارتی تلفات اکتیو) خیلی ناچیز بوده و صفر فرض میشود.  $\delta_{ij} = 90^\circ \leftarrow (R \ll X)$

۲- اختلاف زاویه ولتاژ باسها ( $\theta_i - \theta_j$ ) کوچک میباشد:

۳- اندازه ولتاژ تمامی باسها 1 p.u میباشد. عبارتی پروفیل ولتاژ شبکه تخت میباشد.

۴- تنظیمات تپ ترانسفورماتورها در نظر گرفته نمیشود.



**با توجه به فرضیات بالا:**

$$P_i = \sum_{j=1}^N |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij})$$

$\downarrow$        $\downarrow$        $\downarrow$   
 1      1

$$\cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) = \cos(\theta_i - \theta_j - \frac{\pi}{2}) = \sin(\theta_i - \theta_j) \approx \theta_i - \theta_j$$

$$\Rightarrow P_i = \sum_{j=1}^N |Y_{ij}| (\theta_i - \theta_j) \Rightarrow P_i = \sum_{j=1}^N B_{ij} (\theta_i - \theta_j)$$

$\downarrow$   
 $B_{ij}$

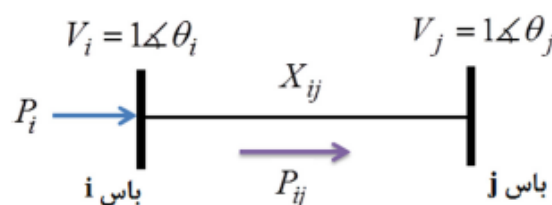
که در آن  $B_{ij}$  قسمت موهومی  $Y_{ij}$  میباشد ( $X_{ij}$ ).

با توجه به موارد بالا، زاویه ولتاژ باسها مجهولات DCLF میباشدند. توانهای تزریقی باسها ( $P_i$ ) معلوم میباشدند.

$$P = B\theta \quad \leftarrow \quad \theta = [B]^{-1} P$$

ماتریس  $B$  وارنپذیر نیست. برای وارنپذیر شدن، سطر و ستون مربوط به شین مرجع (Slack) از این ماتریس حذف میشود. بطور متناظر، سطر مربوط به شین Slack از ماتریس  $P$  نیز حذف میشود و زاویه  $\theta$  برای شین Slack صفر در نظر گرفته میشود.

پس از بدست آمدن زوایا از معادله بالا، توانهای جاری در خطوط بصورت زیر بدست می آیند:



$$P_{ij} = \frac{1}{X_{ij}} (\theta_i - \theta_j)$$

## خلاصه روند و فرمول‌های DCLF:

۱- تشکیل ماتریس خالص توان تزریقی:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di}$$

۲- تشکیل ماتریس ادمیتانس  $Y$  ( که با صرف نظر از  $R$  ها ماتریس  $B$  می‌شود ).

$$Y_{ij} = B_{ij} = \begin{cases}$$

مجموع ادمیتانس‌های متصل به باس  $i$  اگر  $i=j$  باشد.

منفی مجموع ادمیتانس‌های بین باس  $i$  و  $j$  اگر  $i \neq j$

$$Y=1/Z$$

$$B=1/X$$

۳- تشکیل معادلات ماتریسی  $P=B\theta$

۴- حذف سطر و ستون مربوط به باس اسلک

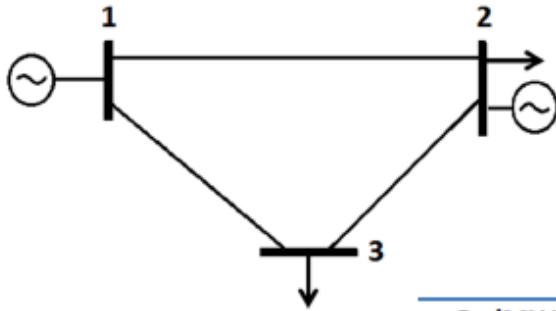
۵- محاسبه  $\theta$  از رابطه  $\theta=B^{-1}P$

۶- محاسبه توان‌های جاری در خطوط از رابطه  $P_{ij}=(\theta_i-\theta_j)/X_{ij}$

۷- محاسبه یا چک صحت میزان توان تولیدی باس اسلک

## یک مثال ساده از پخش بار DC:

در سیستم سه شینه شکل زیر نتایج پخش بار DC را بدست آورید.



مشخصات باسها

شماره باس	نوع باس	$P_D$ (MW)	$Q_D$ (MW)	$P_G$ (MW)
1	Slack	0	0	مجهول
2	PV	10	5	63
3	PQ	90	30	0

$S_b = 100 \text{ MVA}$  توان مبنا

مشخصات خطوط

شماره خط	باس ابتدا	باس انتها	$X$ (p.u)	ظرفیت (MVA)
1	1	2	0.0576	250
2	2	3	0.0920	250
3	1	3	0.1700	150

محاسبه عناصر ماتریس ادمیتانس ( $Y$ ):

$$Y_{11} = \frac{1}{0.0576} + \frac{1}{0.17} = 23.24$$

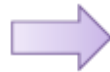
$$Y_{22} = \frac{1}{0.0576} + \frac{1}{0.092} = 28.23$$

$$Y_{33} = \frac{1}{0.17} + \frac{1}{0.092} = 16.75$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -\frac{1}{0.0576} = -17.36$$

$$Y_{13} = Y_{31} = -\frac{1}{0.17} = -5.88$$

$$Y_{23} = Y_{32} = -\frac{1}{0.092} = -10.87$$



$$B = Y = \begin{bmatrix} 23.24 & -17.36 & -5.88 \\ -17.36 & 28.23 & -10.87 \\ -5.88 & -10.87 & 16.75 \end{bmatrix}$$

$$P_1 = ?$$

$$P_2 = P_{g2} - P_{d2} = 63 - 10 = 53 \text{ MW} = 0.53 \text{ pu}$$

$$P_3 = P_{g3} - P_{d3} = 0 - 90 = -90 \text{ MW} = -0.90 \text{ pu}$$



$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ 0.53 \\ -0.90 \end{bmatrix}$$

$$\theta = \begin{bmatrix} 0 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix}$$

حذف سطر و  
ستون مربوط به  
شین اسلک

$$\theta' = \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix}$$

$$B' = \begin{bmatrix} 28.23 & -10.87 \\ -10.87 & 16.75 \end{bmatrix}$$

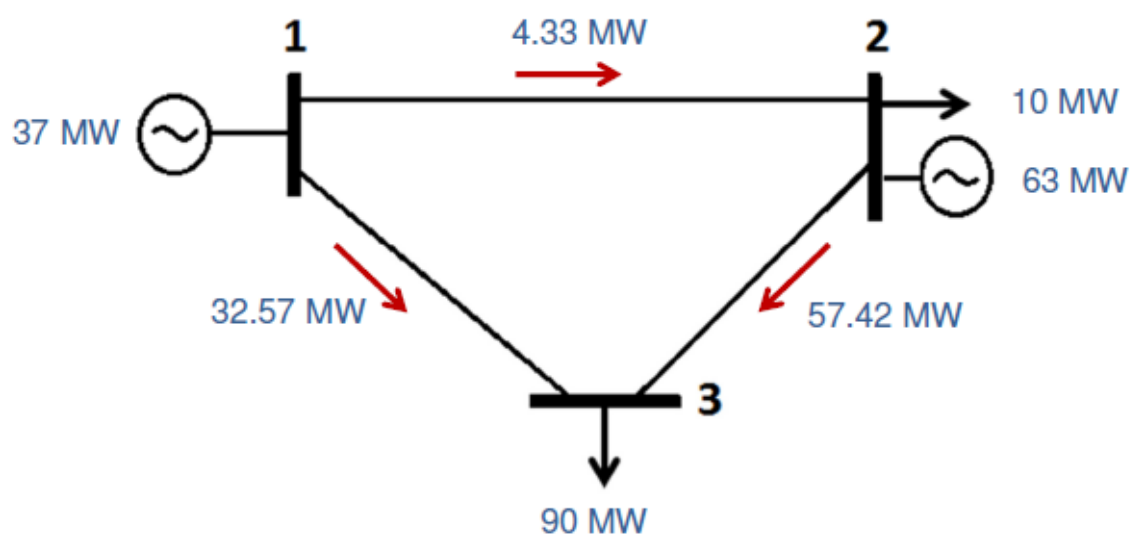
$$P' = \begin{bmatrix} 0.53 \\ -0.92 \end{bmatrix}$$

$$\theta = [B']^{-1} \times P' = \begin{bmatrix} 28.23 & -10.87 \\ -10.87 & 16.75 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0.53 \\ -0.92 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0025^{rad} \\ -0.0554^{rad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.146^\circ \\ -3.173^\circ \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.146 \\ -3.173 \end{bmatrix}$$

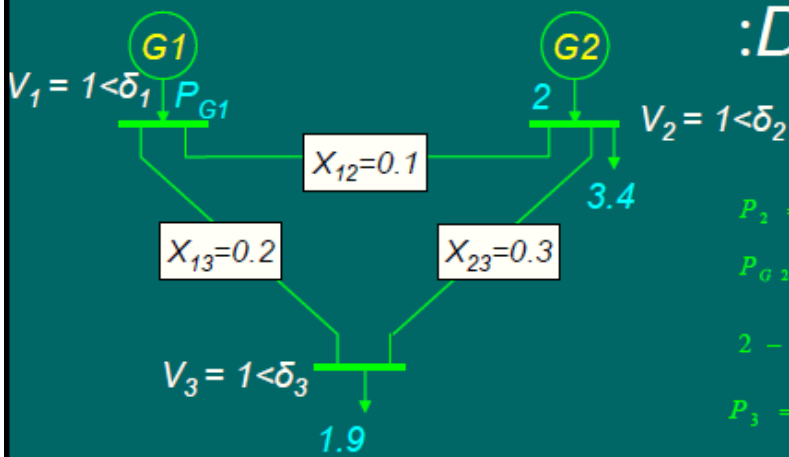
توانهای جاری در خطوط

$$\left\{ \begin{aligned} P_{12} &= \frac{\theta_1 - \theta_2}{X_{12}} = \frac{0 + 0.0025}{0.0576} = 0.0433 pu = 4.33 MW \\ P_{13} &= \frac{\theta_1 - \theta_3}{X_{13}} = \frac{0 + 0.0554}{0.17} = 0.3257 pu = 32.57 MW \\ P_{23} &= \frac{\theta_2 - \theta_3}{X_{23}} = \frac{-0.0025 + 0.0554}{0.092} = 0.5742 pu = 57.42 MW \end{aligned} \right.$$

نتایج پخش بار:



## مثال 1-7: پخش بار DC



حل:

$$P_2 = P_{21} + P_{23}$$

$$P_{G2} - P_{D2} = \frac{\delta_2 - \delta_1}{X_{21}} + \frac{\delta_2 - \delta_3}{X_{23}}$$

$$2 - 3.4 = \frac{\delta_2 - 0}{0.1} + \frac{\delta_2 - \delta_3}{0.3}$$

$$P_3 = P_{31} + P_{32}$$

$$P_{G3} - P_{D3} = \frac{\delta_3 - \delta_1}{X_{31}} + \frac{\delta_3 - \delta_2}{X_{32}}$$

$$0 - 1.9 = \frac{\delta_3 - 0}{0.2} + \frac{\delta_3 - \delta_2}{0.3}$$

$$\begin{bmatrix} -1.4 \\ -1.9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{0.1} + \frac{1}{0.3} & -\frac{1}{0.3} \\ -\frac{1}{0.3} & \frac{1}{0.2} + \frac{1}{0.3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{0.1} + \frac{1}{0.3} & -\frac{1}{0.3} \\ -\frac{1}{0.3} & \frac{1}{0.2} + \frac{1}{0.3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -1.4 \\ -1.9 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13.333 & -3.333 \\ -3.333 & 8.333 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -1.4 \\ -1.9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.18 \\ -0.30 \end{bmatrix}$$

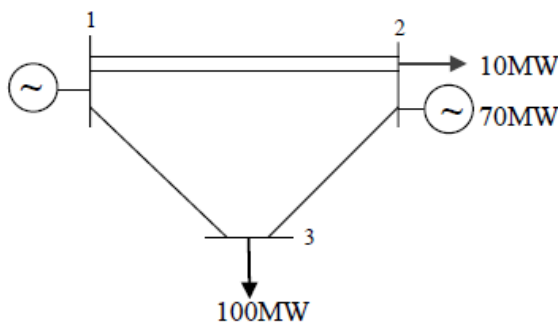
$$P_{21} = \frac{\delta_2 - \delta_1}{X_{21}} = \frac{-0.18 - 0}{0.1} = -1.8 \quad P_{13} = \frac{\delta_1 - \delta_3}{X_{13}} = \frac{0 - (-0.30)}{0.2} = 1.5 \quad P_{23} = \frac{\delta_2 - \delta_3}{X_{23}} = \frac{-0.18 - (-0.30)}{0.3} = 0.4$$

$$P_1 = P_{12} + P_{13} = 1.8 + 1.5 = 3.3$$

65

تمرین ۱:

در شبکه‌ی زیر پخش بار DC (محاسبه‌ی توان عبوری از خطوط، زاویه‌ی ولتاژها، توان اکتیو تولیدی باس مرجع) انجام دهید. باس ۱ به عنوان باس مرجع انتخاب شود. راکتانس تمامی خطوط برابر  $X_{p.u} = 0.25$  است. دقت کنید که خط بین باس ۱ و باس ۲، دومداره است.



مساله را برای حالتی که خط بین باس ۱ و ۲ تک مداره شود تکرار کنید.  
مساله را برای حالتی که خط بین باس ۲ و ۳ حذف شود تکرار کنید.

ارسال پاسخ به [m.heshmati.znu@gmail.com](mailto:m.heshmati.znu@gmail.com)

# PART 3

فصل سوم: بخش بار AC

انواع روش‌های بخش بار AC

✓ روش سایل

✓ روش دایسون

Decoupled

Fast-Decoupled

✓ DC

✓ بخش بار AC: روش سایل

روش عددی مبتنی بر تکرار برای معادلات غیر خطی

$$\begin{cases} S = V \bar{I}^* \\ \bar{I} = Y V \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \bar{I}_i = \frac{P_i - j Q_i}{V_i^*} \\ \bar{I}_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \end{cases} \Rightarrow P_i - j Q_i = V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j$$

$$\Rightarrow P_i - j Q_i = V_i^* \left[ Y_{ii} V_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} V_j \right]$$

$V_i = |V_i| \angle \theta_i$   
 $Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \phi_{ij}$

$$\Rightarrow V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[ \frac{P_i - j Q_i}{V_i^*} - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} V_j \right]$$

در بخش  $G_{SLF}$  در بخش ما  
PP

در بخش ما  $PV$  ابتدا  $P$  را بررسی می‌کنیم:

$$P_{G_{min}} \leq P_{G_i} \leq P_{G_{max}}$$

$$P_i = -\text{Imag} \left[ V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \right]$$

$$P_{i_{min}} \leq P_i = P_{G_i} - P_{D_i} \leq P_{i_{max}}$$

اگر این نامعادله برقرار باشد و لذا فرد بخش  $PV$  را بررسی می‌دهیم.

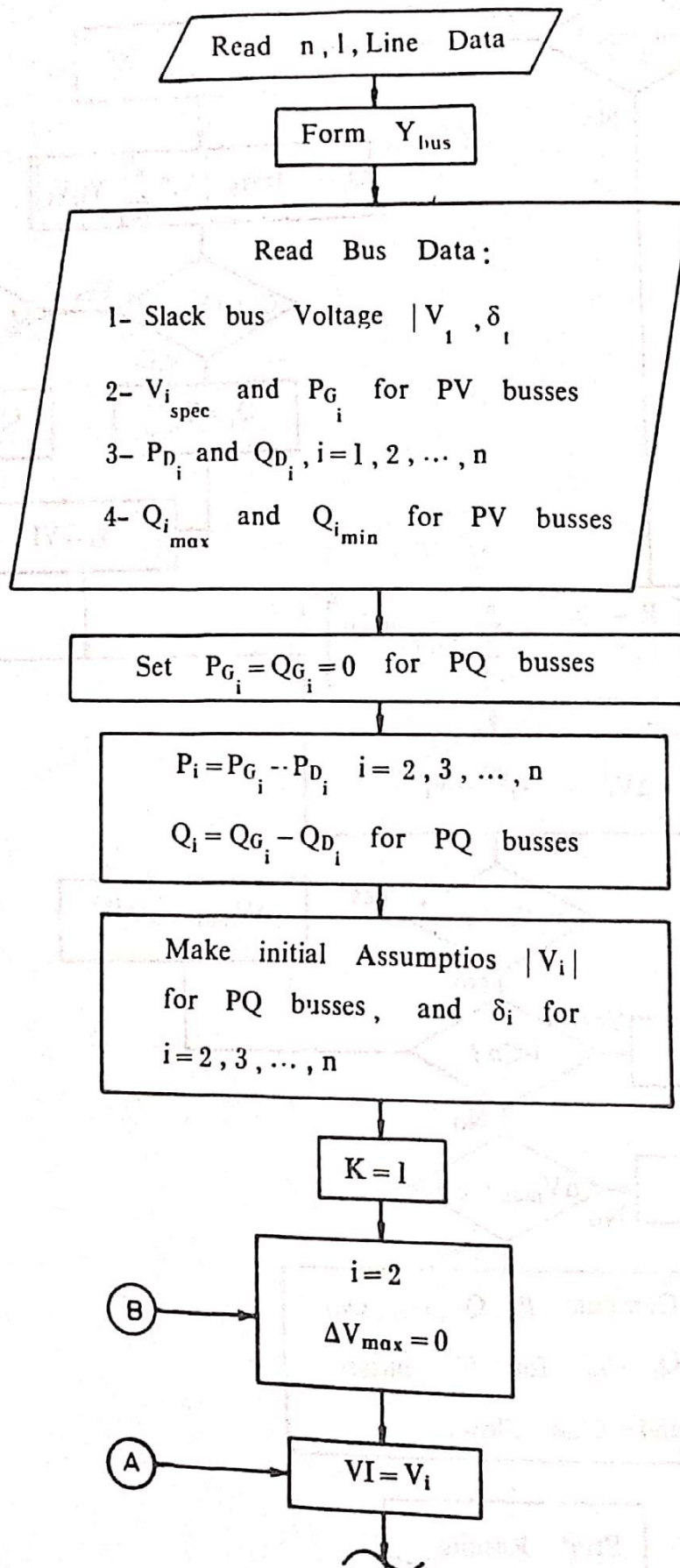
با معادله شدن  $P$  مانند بخش  $PP$

معادله شده  $V_i$  را بدست می‌آوریم.

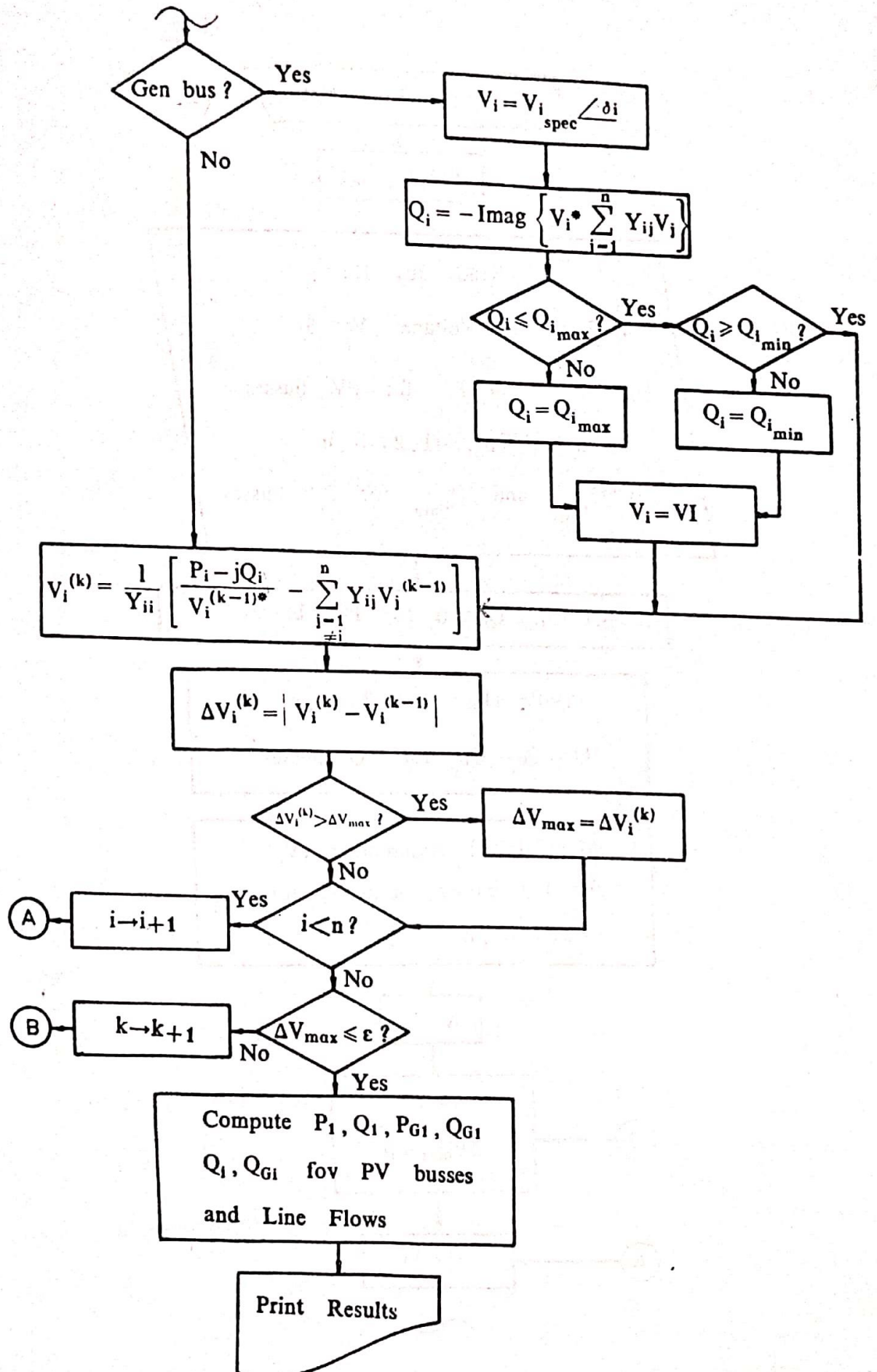
تکرار محاسبات تا جایی که  $|V_i| < \epsilon$  در هر بار بین ۲ تکرار

اگر  $P_i > P_{i_{max}} \rightarrow P_i = P_{i_{max}}$

اگر  $P_i < P_{i_{min}} \rightarrow P_i = P_{i_{min}}$









## نحوه انتخاب مقادیر پیش فرض اولیه ولتاژ برای هر دو روش GS و NR :

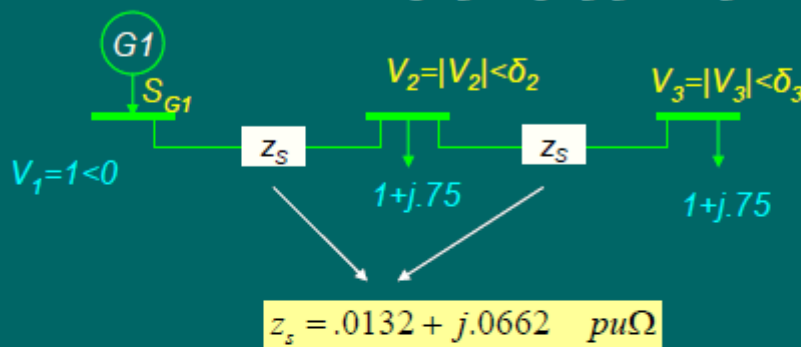
برای باس مبنا :  $V_1 = |V_1|^{spec} < 0$

برای باسهای کنترل ولتاژ (PV):  $V_i = |V_i|^{spec} < 0$

برای باسهای مصرفی (PQ):  $V_i = 1 < 0$

مثال:

### مثال 2-1 : پخش بار به روش گوس-سایدل



ولتاژ باسهای 2 و 3 را پس از دو مرحله تکرار به روش گوس-سایدل پیدا کنید؟

حل:

محاسبه توانهای تزریقی باسها:

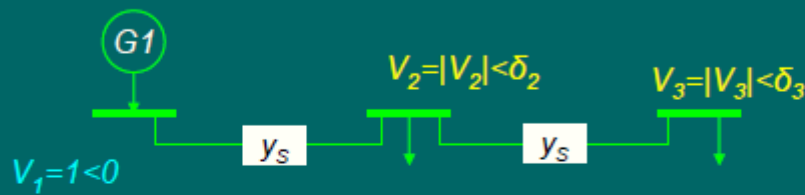
$$P_2^{sch} = P_{G2} - P_{D2} = 0 - 1 = -1$$

$$P_3^{sch} = P_{G3} - P_{D3} = 0 - 1 = -1$$

$$Q_2^{sch} = Q_{G2} - Q_{D2} = 0 - .75 = -.75$$

$$Q_3^{sch} = Q_{G3} - Q_{D3} = 0 - .75 = -.75$$

## ادامه حل مثال 1-2 (محاسبه ماتریس ادمیتانس باسها) :



$$y_s = 1 / z_s = 1 / (.0132 + j.0662) = 14.81 \angle -78.7$$

عناصر قطری:

$$y_{11} = y_{33} = y_s = 14.81 \angle -78.7$$

$$y_{22} = 2 y_s = 29.62 \angle -78.7$$

عناصر غیر قطری:

$$y_{12} = y_{21} = y_{23} = y_{32} = -y_s = 14.81 \angle (-78.7 + 180) = 14.81 \angle 101.3$$

$$y_{13} = y_{31} = 0$$

27

## ادامه حل مثال 1-2 (تکرار اول) :

$$V_1 = |V_1|^{spec} \angle 0 = 1 \angle 0 \quad V_2 = V_3 = 1 \angle 0 \quad \text{مقادیر پیش فرض ولتاژ:}$$

$$V_i = \frac{1}{y_{ii}} \left( \frac{P_i^{sch} - jQ_i^{sch}}{V_i^*} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n y_{ik} V_k \right)$$

$$V_2 = \frac{1}{y_{22}} \left( \frac{P_2^{sch} - jQ_2^{sch}}{V_2^*} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq 2}}^3 y_{2k} V_k \right) = \frac{1}{y_{22}} \left( \frac{P_2^{sch} - jQ_2^{sch}}{V_2^*} - y_{21} V_1 - y_{23} V_3 \right)$$

$$V_2 = \frac{1}{29.64 \angle -78.69} \left( \frac{-1 - j(-.75)}{(1 \angle 0)^*} - (14.81 \angle 101.3)(1 \angle 0) - (14.81 \angle 101.3)(1 \angle 0) \right) = 0.96897 \angle -1.66$$

$$V_3 = \frac{1}{y_{33}} \left( \frac{P_3^{sch} - jQ_3^{sch}}{V_3^*} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq 3}}^3 y_{3k} V_k \right) = \frac{1}{y_{33}} \left( \frac{P_3^{sch} - jQ_3^{sch}}{V_3^*} - y_{31} V_1 - y_{32} V_2 \right)$$

$$V_3 = \frac{1}{14.81 \angle -78.71} \left( \frac{-1 - j(-.75)}{(1 \angle 0)^*} - (0 \times (1 \angle 0) - (14.81 \angle 101.3)(0.96897 \angle -1.66)) \right) = 0.909616 \angle -5.32$$

28

## ادامه حل مثال 2-1 :

$$\Delta V_2 = |V_2^{new}| - |V_2^{old}| = 0.96897 - 1 = -0.03103$$

بررسی همگرایی:

$$\Delta V_3 = |V_3^{new}| - |V_3^{old}| = 0.909616 - 1 = -0.09038$$

$$\|\Delta V\| = 0.09038 > \varepsilon = 0.0005$$

## تکرار دوم :

$$V_1 = |V_1|^{spec} < 0 = 1 < 0$$

$$V_2 = 0.96897 < -1.66$$

مقادیر ولتاژها:

$$V_3 = 0.909616 < -5.32$$

## جواب های نهائی بعد از 22 تکرار :

$$V_1 = |V_1|^{spec} < 0 = 1 < 0$$

$$V_2 = 0.8214 \angle -7.8779^\circ$$

$$V_3 = 0.7319 \angle -13.2509^\circ$$

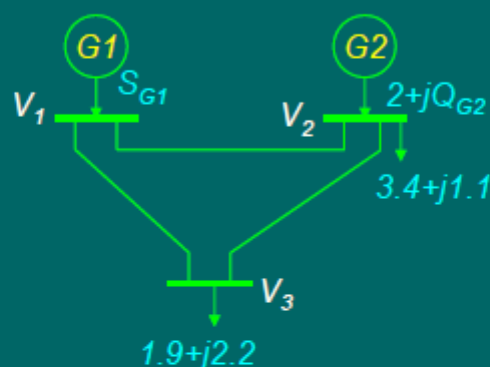
29

تمرین ۲:

این مثال را با فرض دو برابر شدن مقدار امپدانس خطوط و نصف شدن توان مصرفی بارها (هم P هم Q) تکرار کنید.

ارسال پاسخ به [m.heshmati.znu@gmail.com](mailto:m.heshmati.znu@gmail.com)

## مثال 3-1: پخش بار به روش گوس-سایدل با باس PV



در سیستم قدرت فوق ادمیتانسهای مدل پی تمام خطوط عبارتند از :  
 $y_s = -j8.7$     $y_p = 0$

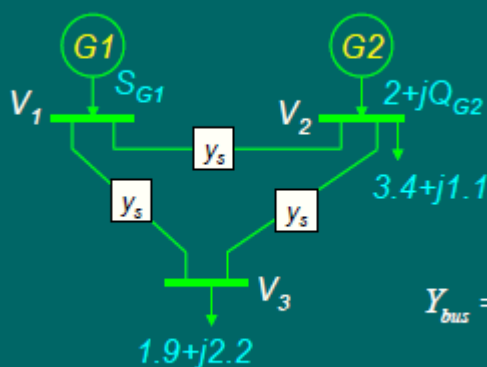
باس 1، باس مبنا با ولتاژ  $V_1 = 1.02 < 0$   
 باس 2، از نوع PV با  $|V_2|^{spec} = 1.01$  برای  $1 \leq Q_{G2} \leq 2$

ولتاژ باسهای 2 و 3 را پس از یک مرحله تکرار به روش گوس-سایدل پیدا کنید؟

32

## حل مثال 3-1 :

محاسبه ماتریس ادمیتانس باسها:



$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 2y_s & -y_s & -y_s \\ -y_s & 2y_s & -y_s \\ -y_s & -y_s & 2y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j17.4 & j8.7 & j8.7 \\ j8.7 & -j17.4 & j8.7 \\ j8.7 & j8.7 & -j17.4 \end{bmatrix}$$

محاسبه توانهای تزریقی باسها:

$$P_2^{sch} = P_{G2} - P_{D2} = 2 - 3.4 = -1.4$$

$$P_3^{sch} = P_{G3} - P_{D3} = 0 - 1.9 = -1.9$$

$$Q_3^{sch} = Q_{G3} - Q_{D3} = 0 - 2.2 = -2.2$$

$$1 \leq Q_{G2} \leq 2$$

$$1 - 1.1 \leq Q_2^{Sch} = Q_{G2} - Q_{D2} \leq 2 - 1.1$$

$$-0.1 \leq Q_2^{Sch} \leq 0.9$$

33

### ادامه حل مثال 3-1 : تکرار اول:

$$V_1 = 1.02 < 0 \quad V_2 = |V_2|^{spec} < 0 = 1.01 < 0 \quad V_3 = 1 < 0$$

$$\begin{aligned} f_{q2}^{(0)} &= \sum_{k=1}^n |y_{2k}| |V_2| |V_k| \sin(\delta_2 - \delta_k - \theta_{2k}) \\ &= |y_{21}| |V_2| |V_1| \sin(\delta_2 - \delta_1 - \theta_{21}) + |y_{22}| |V_2| |V_2| \sin(\delta_2 - \delta_2 - \theta_{22}) + |y_{23}| |V_2| |V_3| \sin(\delta_2 - \delta_3 - \theta_{23}) \\ &= 8.7 \times 1.01 \times 1.02 \times \sin(0 - 0 - 90) + 17.4 \times 1.01 \times 1.01 \times \sin(0 - 0 + 90) + 8.7 \times 1.01 \times 1 \times \sin(0 - 0 - 90) \\ &= 0 \end{aligned}$$

چون  $-0.1 < f_{q2} = 0 < 0.9$  در بازه  $Q_2^{sch}$  قرار دارد بنابراین:  $Q_2^{sch} = f_{q2}^{(0)} = 0$

$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{1}{y_{22}} \left( \frac{P_2^{sch} - jQ_2^{sch}}{V_2^*} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq 2}}^3 y_{2k} V_k \right) \\ &= \frac{1}{y_{22}} \left( \frac{P_2^{sch} - jQ_2^{sch}}{V_2^*} - y_{21} V_1 - y_{23} V_3 \right) \\ &= \frac{1}{-j17.4} \left( \frac{-1.4 - j0}{1.01 < 0} - (j8.7)(1.02 < 0) - (j8.7)(1 < 0) \right) = 1.0131 < -4.51^\circ \end{aligned}$$

### ادامه حل مثال 3-1 :

$$V_2 = |V_2|^{spec} < -4.51 = 1.01 < -4.51 \quad \text{بنابراین}$$

$$\begin{aligned} V_3 &= \frac{1}{y_{33}} \left( \frac{P_3^{sch} - jQ_3^{sch}}{V_3^*} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq 3}}^3 y_{3k} V_k \right) \\ &= \frac{1}{y_{33}} \left( \frac{P_3^{sch} - jQ_3^{sch}}{V_3^*} - y_{31} V_1 - y_{32} V_2 \right) \\ &= \frac{1}{-j17.4} \left( \frac{-1.9 - j(-2.2)}{1.0 < 0} - (j8.7)(1.02 < 0) - (j8.7)(1.01 < -4.51) \right) = 0.8896 < -9.64^\circ \end{aligned}$$

ولتاژ باسها پس از یک مرحله تکرار:

$$V_1 = 1.02 < 0 \quad V_2 = 1.01 < -4.51 \quad V_3 = 0.8896 < -9.64$$



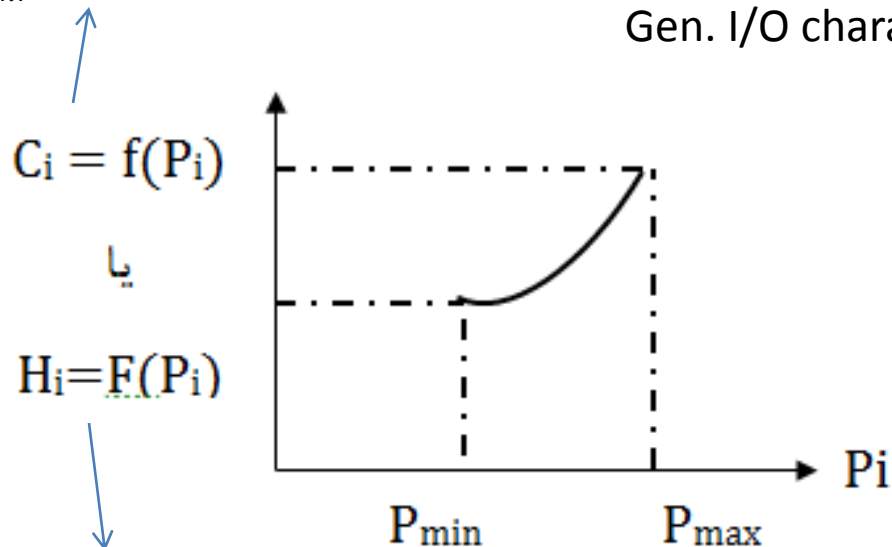
# PART 4



## بخش بار اقتصادی ELD (Economic Load Dispatch)

تابع هزینه با واحد پول بر ساعت ( $\frac{\$}{hr}$ )

مشخصه ورودی - خروجی واحد های حرارتی Gen. I/O characteristic



تابع سوخت با واحد انرژی بر ساعت

( $\frac{MBTU}{hr}$ )

در مورد واحدهای بزرگ حرارتی  $\Leftrightarrow P_{min} \neq 0$  است. چرا؟

معمولاً هزینه ی مربوط به تولید توان  $P_i$  بصورت تابع درجه دوم از  $P_i$  نمایش داده می شود:

$$c_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + C_i \quad \left(\frac{\$}{h}\right)$$



هزینه افزایشی (IC): بیانگر میزان افزایش هزینه به ازای تولید ۱ مگاوات بیشتر انرژی

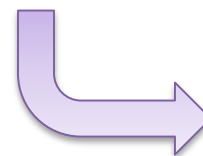
$$\text{Incremental Cost (IC)} = \frac{dC_i(P_i)}{dp_i} = 2a_i P_i + b_i \quad (\$/\text{MWh})$$

تابع هدف تعریف شده توسط اپراتور سیستم: حداقل کردن هزینه کل سیستم هدف اصلی می باشد. (اپراتور سیستم در ایران مرکز مدیریت شبکه (IGMC) می باشد که کل سیستم را Dispatch میکند و هدفش حداقل کردن هزینه کل سیستم است).

تابع هدف  $J = c_1(P_1) + c_2(P_2) + \dots + c_N(P_N)$

قید تساوی  $\text{Equatity constraint: } P_1 + P_2 + \dots + P_N = P_D + P_{Loss}$

یعنی اینکه مجموع توان تولیدی توسط ژنراتورها باید برابر تقاضا و تلفات سیستم باشد

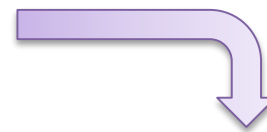


$$\sum_{i=1}^N P_i = P_D + P_{loss}$$



قید نامساوی Inequality constraint:

$$P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max}$$



یعنی توان تولیدی هر ژنراتور باید بین حداقل و حداکثر مقدار مجاز آن باشد.





شکل کلی مسائل بهینه سازی بصورت زیر قابل بیان است:

$\text{Min } f(x)$   $\longrightarrow$  حداقل سازی تابع هدف (Minimization)

$\text{Subject to: } g(x) = 0$   $\longrightarrow$  قید مسئله

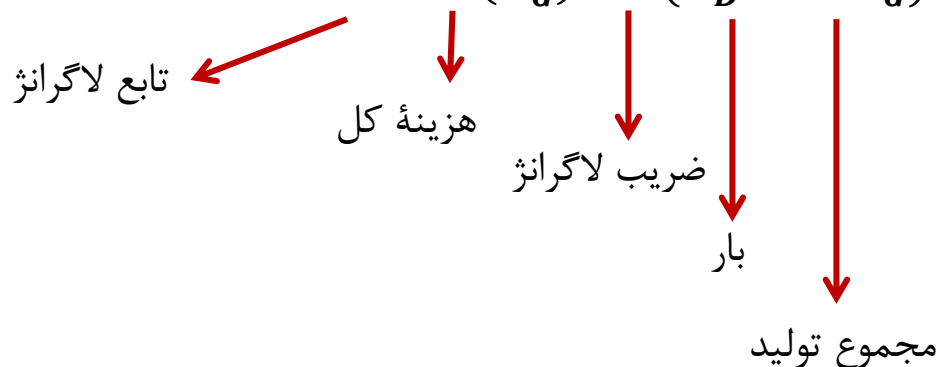
$F = f(x) + \lambda g(x)$   $\longrightarrow$  تابع لاگرانژ

$\longrightarrow$  ضریب لاگرانژ



این تابع لاگرانژ در مسئله ELD بصورت زیر خواهد بود که در آن هدف حداقل سازی هزینه تولید نیروگاهها با شرط برابری مجموع تولید با توان مصرفی بار می باشد.

**Lagrangian Function:**  $F = C(P_G) + \lambda(P_D - e^T P_G)$



جهت رسیدن به شرایط بهینه، باید مشتق تابع نسبت به هریک از متغیرهای آن برابر صفر باشد:

شرایط بهینه سازی

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F}{\partial P_{Gi}} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} = 0 \end{array} \right. \longrightarrow P_D - e^T P_G = 0 \longrightarrow e^T P_G = P_D \quad \text{همان قید تساوی مسئله}$$



$$\frac{\partial F}{\partial P_{Gi}} = 0 \Rightarrow \frac{d C(P_{Gi})}{d P_{Gi}} - \lambda = 0 \Rightarrow \frac{d C(P_{Gi})}{d P_{Gi}} = \lambda \xrightarrow{\text{بصورت برداری}} a + B P_G = \lambda e$$

$$P_G = \lambda B^{-1} e - B^{-1} a \quad \text{I}$$

داشتیم

$$e^T P_G = P_D \quad \text{II}$$

$$\lambda = \frac{P_D + e^T B^{-1} a}{e^T B^{-1} e} \quad \text{III}$$

با جایگذاری III در I، رابطه توان تولیدی می تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$P_G = \alpha P_D + \beta$$

که در آن ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  عبارتند از:

$$\alpha = \frac{B^{-1} e}{e^T B^{-1} e}$$

$$\beta = \frac{B^{-1} e (e^T B^{-1} a)}{e^T B^{-1} e} - B^{-1} a$$



$$P_G = \alpha P_D + \beta$$



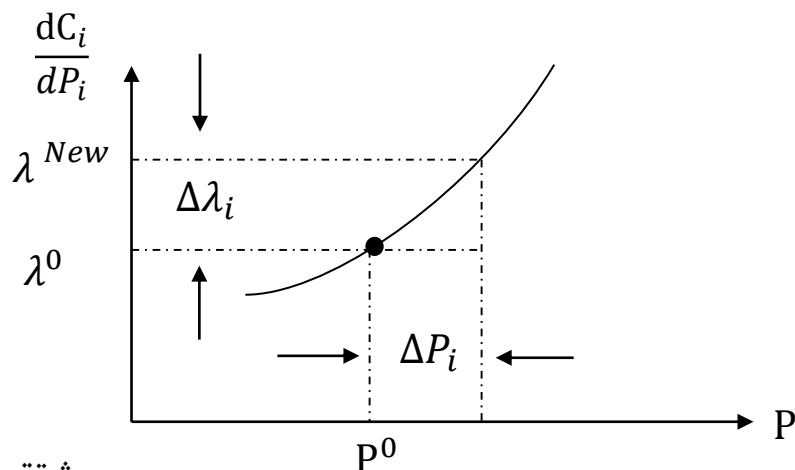
$\alpha$  ضریب مشارکت بار توسط ژنراتورها (Participation Factors) نامیده میشود.

طبق رابطه بالا اگر تقاضا به میزان  $dP_D$  تغییر کند توان خروجی ژنراتورها به میزان  $dP_G = \alpha dP_D$  تغییر خواهند نمود.

توجه شود که به خاطر شرط توازن توان  $e^T \alpha = 1$  یا  $\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1$  خواهد بود.



فرض کنید در یک نقطه کار مشخص ( $P^0$  و  $\lambda^0$ ) هستیم و می خواهیم به ازای تغییری کوچک در توان مصرفی ( $P_D$ )، نقطه بهینه جدید را به دست آوریم:



مشتق مرتبه ۲

$$\frac{\Delta \lambda_i}{\Delta P_i} = \frac{d}{dP_i} \left( \frac{dC_i}{dP_i} \right) \Rightarrow \Delta \lambda_i = C_i''(P_i) \Delta P_i \Rightarrow \Delta P_i = \frac{\Delta \lambda}{C_i''} \quad \text{I}$$

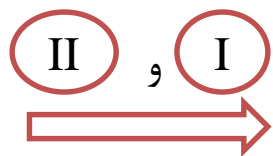
قید تعادل توان

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots + \Delta P_N = \Delta P_D \quad \text{II}$$




با توجه به اینکه  $\lambda^{New}$  برای کل سیستم برابر خواهد بود، لذا  $\Delta\lambda$  برای کل سیستم و تمام واحدها برابر است:

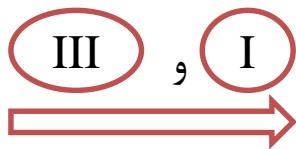
$$\Delta\lambda = \lambda^{New} - \lambda^0$$



$$\Delta P_D = \frac{\Delta\lambda}{C_1''} + \frac{\Delta\lambda}{C_2''} + \dots + \frac{\Delta\lambda}{C_N''} = \Delta\lambda \sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{C''_i} \right)$$



$$\Delta\lambda = \frac{\Delta P_D}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{C''_i}} \quad \text{III}$$



$$\Delta P_i = \frac{\frac{1}{C''_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{C''_i}} \Delta P_D$$



مقدار اولیه توان تولیدی ژنراتور  $i$ ام

$$P_{new\ i} = P_{base\ i} + \left( \frac{\Delta P_i}{\Delta P_D} \right) \Delta P_D \Rightarrow P_{new\ i} = P_{base\ i} + \Delta P_i$$

مقدار جدید توان تولیدی ژنراتور  $i$ ام

$$P_{new\ i} = P_{base\ i} + \frac{\frac{1}{C''_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{C''_i}} \Delta P_D$$

**مثال:** یک سیستم شامل سه نیروگاه با توابع هزینه زیر است:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1(P_1) = 561 + 7.92P_1 + 0.001562P_1^2 \\ C_2(P_2) = 310 + 7.85P_2 + 0.00194P_2^2 \\ C_3(P_3) = 78 + 7.97P_3 + 0.00482P_3^2 \end{array} \right.$$

فرض کنید که  $P_D = 850\text{MW}$  و  $P_{Dnew} = 900\text{MW}$  باشد.



حل مسئله بهینه سازی با ازای توان بار  $P_D=850\text{MW}$

$$\frac{dC_1}{dP_1} = 7.92 + 0.003124P_1 = \lambda$$

$$\frac{dC_2}{dP_2} = 7.85 + 0.00388P_2 = \lambda$$

$$\frac{dC_3}{dP_3} = 7.97 + 0.00964P_3 = \lambda$$

$$P_1 + P_2 + P_3 = 850$$



۴ معادله ۴ مجهولی





پس از حل ELD (حل ۴ معادله ۴ مجهولی) به ازای  $P_D=850MW$ ، توانهای تولیدی سه واحد بصورت زیر بدست می آیند:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = 393.2MW \\ P_2 = 334.6MW \\ P_3 = 122.2MW \\ \lambda = 9.147 \end{array} \right.$$

حال بدون حل دوباره ELD، توانهای تولیدی جدید را به ازای  $P_D=900MW$  بصورت زیر بدست می آوریم:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta P_1}{\Delta P_D} = \frac{\frac{1}{C''_1}}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{C''_i}} = \frac{(2 \times 0.001562)^{-1}}{(2 \times 0.001562)^{-1} + (2 \times 0.00194)^{-1} + (2 \times 0.00482)^{-1}} \Rightarrow \frac{\Delta P_1}{\Delta P_D} = 0.47 \\ \frac{\Delta P_2}{\Delta P_D} = \frac{\frac{1}{C''_2}}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{C''_i}} = \frac{(2 \times 0.00194)^{-1}}{(2 \times 0.001562)^{-1} + (2 \times 0.00194)^{-1} + (2 \times 0.00482)^{-1}} \Rightarrow \frac{\Delta P_2}{\Delta P_D} = 0.38 \\ \frac{\Delta P_3}{\Delta P_D} = \frac{\frac{1}{C''_3}}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{C''_i}} = \frac{(2 \times 0.00482)^{-1}}{(2 \times 0.001562)^{-1} + (2 \times 0.00194)^{-1} + (2 \times 0.00482)^{-1}} \Rightarrow \frac{\Delta P_3}{\Delta P_D} = 0.15 \end{array} \right.$$



$$\Delta P_D = 50 \text{ MW}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{new1}} = P_{\text{base1}} + \frac{\Delta P_1}{\Delta P_D} \Delta P_D = 393.2 + 0.47 \times 50 = 416.7 \text{ MW} \\ P_{\text{new2}} = P_{\text{base2}} + \frac{\Delta P_2}{\Delta P_D} \Delta P_D = 353.6 \text{ MW} \\ P_{\text{new3}} = P_{\text{base3}} + \frac{\Delta P_3}{\Delta P_D} \Delta P_D = 129.7 \text{ MW} \end{array} \right.$$

در واقع چون تغییرات توان کوچک بود (50MW) بدون اینکه دوباره مساله بهینه سازی را حل کنیم نقاط کار جدید را بر حسب نقاط کار قبلی بدست آوردیم. این کار وقتی درست است که تغییرات حول نقطه کار ( $\Delta P_D$ ) زیاد نباشد.



تابع لاگرانژ بصورت مجموع تابع هدف و قیود مسئله است که البته قیود در ضرایبی به نام ضرایب لاگرانژ ضرب شده اند.

The Lagrangian Function:

$$\text{تابع لاگرانژ} \quad F(P_i, \lambda, \mu_i, \gamma_i) = J(P_i) + \lambda \Phi(P_i) + \sum_{i=1}^N \mu_i g_i(P_i) + \sum_{i=1}^N \gamma_i h_i(P_i)$$

ضرایب لاگرانژ

Diagram: Red arrows point from the text 'ضرایب لاگرانژ' to the coefficients  $\lambda$ ,  $\mu_i$ , and  $\gamma_i$  in the equation above.

شرایط بهینه سازی کوهن-تاکر Kuhn- Tucker(KT)

شرایط اصلی	{	<div style="background-color: #f8d7da; border-radius: 50%; width: 40px; height: 40px; display: flex; align-items: center; justify-content: center; margin: 0 auto;">A</div>	$\frac{\partial F}{\partial P_{Gi}} = 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, N$
		<div style="background-color: #f8d7da; border-radius: 50%; width: 40px; height: 40px; display: flex; align-items: center; justify-content: center; margin: 0 auto;">B</div>	$\frac{\partial F}{\partial \lambda} = 0$
شرایط مکمل	{	<div style="background-color: #f8d7da; border-radius: 50%; width: 40px; height: 40px; display: flex; align-items: center; justify-content: center; margin: 0 auto;">C</div>	$\begin{cases} \mu_i g_i = 0 \\ \mu_i \geq 0 \end{cases}$
		<div style="background-color: #f8d7da; border-radius: 50%; width: 40px; height: 40px; display: flex; align-items: center; justify-content: center; margin: 0 auto;">D</div>	$\begin{cases} \gamma_i h_i = 0 \\ \gamma_i \geq 0 \end{cases}$



□ اگر متغیری به حد خود برسد  $\leftarrow g_i(P_i) = 0$  و در این صورت:  $\mu_i \neq 0$

□ اگر متغیری در محدوده خود باشد  $\leftarrow g_i(P_i) < 0$  و در این صورت:  $\mu_i = 0$

□ قیود می توانند قیود پایین یا بالا باشند (حداقل و حداکثر)

در مسئله ELD تابع هدف و قیود مساوی و نامساوی بصورت زیر است:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } J = \sum_{i=1}^N C_i(P_i) \\ \text{s.t.} \\ \Phi(P_i) = P_D - \sum_{i=1}^N P_i = 0 \\ g_i(P_i) = P_i^{\min} - P_i \leq 0 \\ h_i(P_i) = P_i - P_i^{\max} \leq 0 \end{array} \right.$$



با توجه به تابع هدف و قیود بیان شده، تابع لاگرانژ بصورت زیر خواهد بود:

$$F = \sum_{i=1}^N C_i(P_i) + \lambda[P_D - \sum_{i=1}^N P_i] + \mu_1[P_1^{min} - P_1] + \mu_2[P_2^{min} - P_2] + \dots + \mu_N[P_N^{min} - P_n] + \gamma_1[P_1 - P_1^{max}] + \gamma_2[P_2 - P_2^{max}] + \dots + \gamma_N[P_n - P_N^{max}]$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{شرایط اصلی KT} \\ \frac{\partial F}{\partial P_i} = 0 \Rightarrow \frac{dc_i(P_i)}{dP_i} - \lambda - \mu_i + \gamma_i = 0 \quad \forall i = 1 \dots N \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow P_D - \sum_{i=1}^N P_i = 0 \end{array} \right\}$$



شرایط بعدی همان شرایط مکمل هستند که بایستی حدود مربوط به مقدار تولید هر ژنراتور را چک کنیم که آیا در محدودهٔ مینیم و ماکزیمم خودش هست یا نه.

ضرایب لاگرانژ مربوط به حد پایین متغیرها

مینیمم

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_1 [P_1^{min} - P_1] = 0 \quad ; \mu_1 \geq 0 \\ \mu_2 [P_2^{min} - P_2] = 0 \quad ; \mu_2 \geq 0 \\ \vdots \\ \mu_N [P_N^{min} - P_N] = 0 \quad ; \mu_N \geq 0 \end{array} \right.$$

ضرایب لاگرانژ مربوط به حد بالای متغیرها

ماکزیمم

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_1 [P_1 - P_1^{max}] = 0 \quad ; \gamma_1 \geq 0 \\ \gamma_2 [P_2 - P_2^{max}] = 0 \quad ; \gamma_2 \geq 0 \\ \vdots \\ \gamma_N [P_N - P_N^{max}] = 0 \quad ; \gamma_N \geq 0 \end{array} \right.$$



چند حالت مختلف را برای برقراری قیود در نظر می گیریم:

### حالت اول

فرض کنید که هیچ ژنراتوری به حد خود (بالا و پایین) نرسد؛ یعنی تولید تمامی ژنراتورها مابین ماکزیمم و مینیمم خودشان باشند، بنابراین:

$$\mu_i = \gamma_i = 0 \quad \longrightarrow \quad \frac{dc_i(P_i)}{dP_i} = \lambda \quad \forall i$$



یعنی همه ژنراتورها در نقطه ای کار خواهند کرد که مشتق هزینه‌ی همه آن‌ها با هم برابر باشد. در نتیجه هزینه افزایشی همه آن‌ها با هم برابر خواهد بود.



## حالت دوم

فقط یک ژنراتور به حد بالای خود رسیده و تمامی ژنراتورهای دیگر داخل محدوده خود هستند

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = P_1^{max} \\ \text{all other } P_i \text{ are within their limits} \end{array} \right. \Rightarrow \gamma_1 > 0$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{dC_1(P_1)}{dP_1} = \lambda - \gamma_1 \leq \lambda \quad \&\& \quad \frac{dc_i(P_i)}{dP_i} = \lambda \quad \forall i \neq 1}$$

**نتیجه:** هزینه افزایشی ژنراتوری که به حداکثر خود رسیده از همه ژنراتورهای دیگر کمتر است، به عبارت دیگر این ژنراتور ارزانترین ژنراتور سیستم است.





### حالت سوم

فرض کنید یک ژنراتور به حداقل خود برسد و بقیه ژنراتورها داخل حدود خود می باشند.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = P_1^{min} \\ \text{all other } P_i \text{ are within their limits} \end{array} \right. \Rightarrow \mu_1 > 0$$



$$\frac{dc_1(P_1)}{dP_1} = \lambda + \mu_1 \geq \lambda \quad \&\& \quad \frac{dc_i(P_i)}{dP_i} = \lambda \quad \forall i \neq 1$$

**نتیجه:** هزینه افزایشی ژنراتوری که به حداقل خود رسیده از همه ژنراتورهای دیگر بیشتر است، به عبارت دیگر این ژنراتور گرانتین ژنراتور سیستم است.



## مفهوم ضرایب لاگرانژ

- $\lambda$  : هزینه افزایشی سیستم برای برآورده کردن یک MW توان بیشتر
- $\mu_i$  : تغییر در هزینه افزایشی ژنراتور  $i$ ام وقتی این ژنراتور به حد پایین خود رسیده است.
- $\nu_i$  : تغییر در هزینه افزایشی ژنراتور  $i$ ام وقتی این ژنراتور به حد بالای خود رسیده است.



**مثال:** پخش بار اقتصادی را برای سیستم زیر که شامل سه ژنراتور با مشخصات زیر است حل کنید.

$$\left\{ \begin{array}{ll} C_2(P_1) = 0.00128P_1^2 + 6.48P_1 + 459 & 150^{MW} \leq P_1 \leq 600^{MW} \\ C_2(P_2) = 0.00194P_2^2 + 7.85P_2 + 310 & 100^{MW} \leq P_2 \leq 400^{MW} \\ C_3(P_3) = 0.00482P_3^2 + 7.97P_3 + 78 & 50^{MW} \leq P_3 \leq 600^{MW} \end{array} \right.$$

$$Total Load = 850MW \Rightarrow P_1 + P_2 + P_3 = 850MW$$

ابتدا فرض می کنیم که تمامی ژنراتورها بین حدود خود باشند، مگر اینکه بعد از حل، خلاف این موضوع مشخص شود.  
پس ابتدا تابع لاگرانژ بصورت زیر می باشد:

$$F = \sum_{i=1}^3 c_i(P_i) + \lambda(850 - P_1 - P_2 - P_3)$$



$$F = \sum_{i=1}^3 c_i(P_i) + \lambda(850 - P_1 - P_2 - P_3)$$

$$\frac{\partial F}{\partial P_1} = 0.00256P_1 + 6.48 - \lambda = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial P_2} = 0.00388P_2 + 7.85 - \lambda = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial P_3} = 0.00964P_3 + 7.97 - \lambda = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda} = 850 - P_1 - P_2 - P_3 = 0$$

۴ معادله ۴ مجهولی



$$P_1 = 707.15MW$$

$$P_2 = 112.16MW$$

$$P_3 = 32.7MW$$

$$\lambda = 8.285 \frac{\$}{MW}$$

ژنراتور  $G_1$  حد بالا و  $G_3$  حد پایین خود را نقض کرده است. بنابراین تابع لاگرانژ را بایستی با توجه به ژنراتورهایی که از حد خود خارج شده اند دوباره بنویسیم. برای ژنراتور اولی که به حد بالای خود رسیده  $\gamma_1$  و برای ژنراتور سومی که به حد پایین خود رسیده  $\mu_3$  را لحاظ میکنیم.



$$F = \sum_{i=1}^3 c_i(P_i) + \lambda(850 - P_1 - P_2 - P_3) + \gamma_1(P_1 - P_1^{max}) + \mu_3(P_3^{min} - P_3)$$

شرایط مکمل  $\mu_3, \gamma_1 \neq 0$   $\rightarrow$

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_1(P_1 - P_1^{max}) = 0 \rightarrow P_1 = P_1^{max} = 600\text{MW} \\ \mu_3(P_3^{min} - P_3) = 0 \rightarrow P_3 = P_3^{min} = 50\text{MW} \end{array} \right.$$

$\rightarrow P_2 = 850 - 600 - 50 = 200\text{MW}$   $\rightarrow$  P2 در محدوده خودش است

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F}{\partial P_1} = 0.00256P_1 + 6.48 - \lambda + \gamma_1 = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial P_2} = 0.00388P_2 + 7.85 - \lambda = 0 \xrightarrow{P_2 = 200} \lambda = 8.626 \frac{\$}{\text{MWh}} \\ \frac{\partial F}{\partial P_3} = 0.00964P_3 + 7.97 - \lambda - \mu_3 = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} = 850 - P_1 - P_2 - P_3 = 0 \end{array} \right.$$



حالا باید چک کنیم که ژنراتوری که به ماکزیمم خود رسیده آیا ارزان ترین بوده و ژنراتوری که به مینیمم رسیده آیا گران ترین بوده یا خیر؟

$$\frac{dC(P_1)}{dP_1} |_{P_1=600MW} = 8.016 < \lambda \rightarrow \text{ok}$$



$$\frac{dC(P_3)}{dP_3} |_{P_3=50MW} = 8.452 \not< \lambda \rightarrow \text{not ok}$$

بنابراین خروجی G3 نباید 50MW در نظر گرفته شود، بلکه به صرفه تر خواهد بود که ژنراتور سوم توان بیشتری تولید نماید.

حال که مطمئن شدیم که ژنراتور اول ok است پس آن را در ماکزیمم خود در نظر می گیریم و حالا هدف مساله مینیمم سازی هزینه توان باقی مانده بین دو ژنراتور دیگر (G2 و G3) است.





بازنویسی مسئله

$$\text{Min } f = C_2(P_2) + C_3(P_3)$$

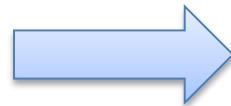
$$\text{s.t } P_2 + P_3 = 250\text{MW}$$

$$F = C_2 + C_3 + \lambda(250 - P_2 - P_3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F}{\partial P_2} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial P_3} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} = 0 \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{l} P_2 = 187.1\text{MW} \\ P_3 = 62.9\text{MW} \\ \lambda = \frac{dC_2}{dP_2} = 8.576 \frac{\$}{\text{MWh}} \end{array} \right.$$



✓ هر دوی G2 و G3 در محدوده خود می باشند.



## پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن تلفات:

قید تعادل توان

$$F = \sum_{i=1}^N C_i(P_i) + \lambda \left[ P_D + \underbrace{P_{Loss}(P_1, P_2, \dots, P_N)}_{\downarrow} - \sum_{i=1}^N P_i \right]$$

تابع لاگرانژ

تلفات شبکه وابسته به تولید ژنراتورهاست، چون با تغییر تولید ژنراتورها، توانهای جاری در خطوط تغییر می کنند.

شرایط بهینه سازی KT

$$\frac{\partial F}{\partial P_i} = \frac{dC_i(P_i)}{dP_i} + \lambda \left( \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_i} - 1 \right) = 0 \quad \forall_i$$

$$\Rightarrow \left[ \frac{1}{1 - \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_i}} \right] \frac{dC_i(P_i)}{dP_i} = \lambda$$



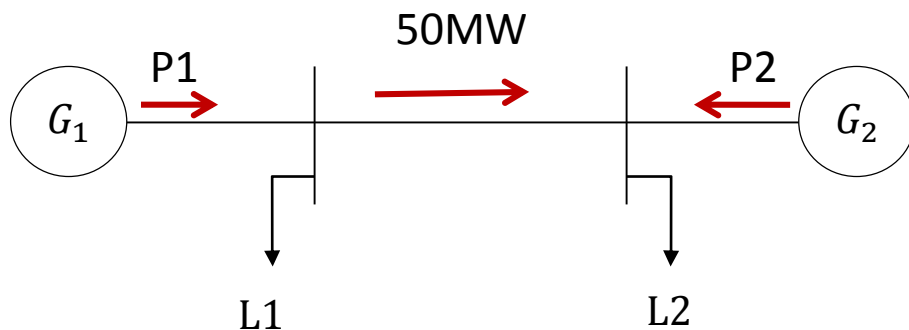
$$\left[ \frac{1}{1 - \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_i}} \right] \frac{dC_i(P_i)}{dP_i} = \lambda$$

$$\frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_i} \rightarrow \text{تلفات افزایشی در باس } i \text{ (Incremental Loss)}$$

$$\text{Penalty Factor} = PF_i = \frac{1}{1 - \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i}} \rightarrow PF_i \frac{dc_i}{dP_i} = \lambda$$

اگر تلفات سیستم با افزایش  $P_i$  بیشتر شود،  $PF_i > 1$   
 اگر تلفات سیستم با افزایش  $P_i$  کمتر شود،  $PF_i < 1$

یک مثال ساده:



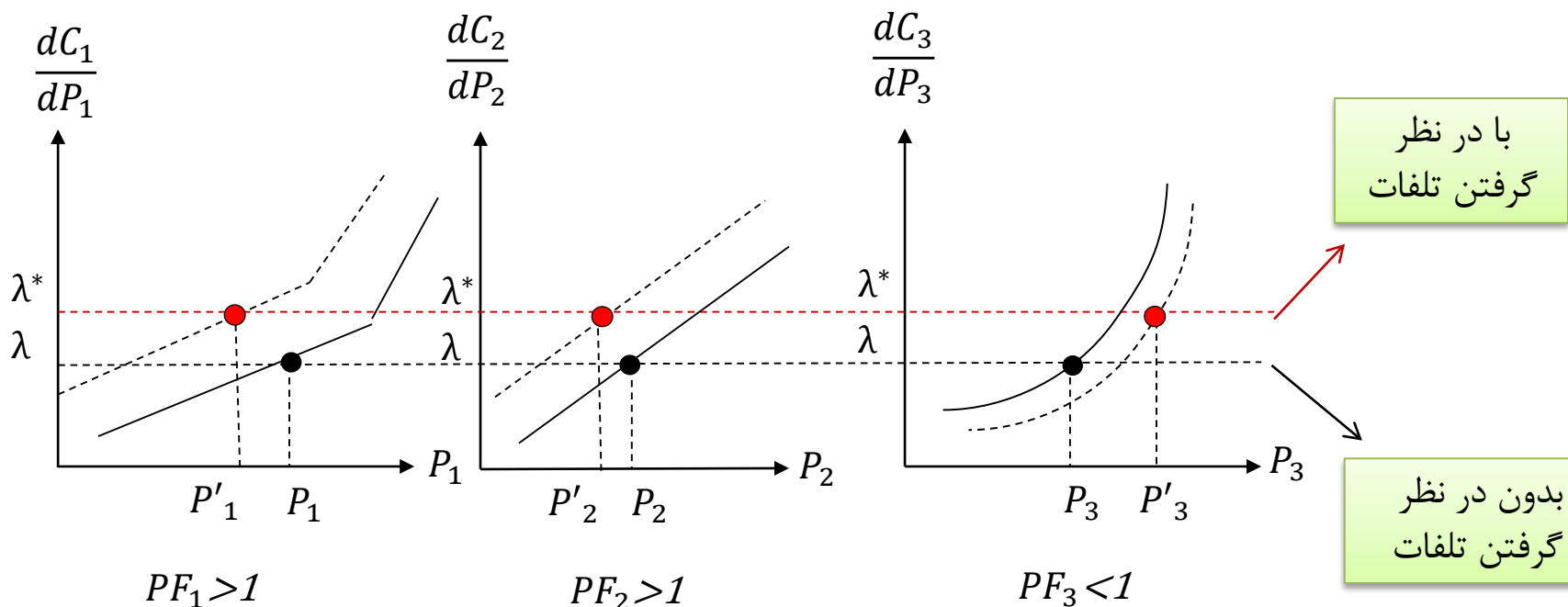
با فرض ثابت بودن بار، با افزایش توان خروجی ژنراتور  $G_1$  (یعنی  $P_1$ )، توان عبوری از خط زیاد می شود. برعکس با زیاد شدن  $P_2$  توان عبوری کمتر می گردد.

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_1} > 0 \rightarrow PF_1 > 1$$

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_2} < 0 \rightarrow PF_2 < 1$$



فرض کنید که ۳ ژنراتور با توابع هزینه زیر داریم:



۱-  $\lambda$  برای هر سه ژنراتور برابر است

۲- با لحاظ نمودن تلفات، ژنراتوری که باعث افزایش تلفات می شود کمتر Dispatch شده خروجی آن کمتر میگردد. ژنراتوری که باعث کاهش تلفات می گردد، بیشتر Dispatch شده و خروجی اش بیشتر میگردد.

۳- در کل چون تلفات داریم،  $\lambda$  بزرگتر شده و در ضمن  $\lambda^*$  برای هر سه ژنراتور یکسان است.



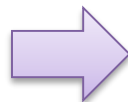
$\lambda$  برای تمامی ژنراتورهای سیستم یکسان است. مگر زمانی که یک ژنراتور به حد بالا یا پایین خودش برسد

چون تلفات معمولاً رابطه غیر خطی با توان ژنراتورها دارد، لذا تشکیل تابع لاگرانژ و حل آن با استفاده از مشتق و ... به راحتی انجام پذیر نیست و مجبور هستیم از روش تکرار استفاده کنیم.



**مثال:** در سیستم زیر پخش بار اقتصادی را با در نظر گرفتن تلفات بدست آورید.

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1(P_1) = P_1^2 + 8.5P_1 + 5 \\ C_2(P_2) = 3.4P_2^2 + 25.5P_2 + 4 \\ P_D = 700 \\ P_{Loss} = 0.00009P_1^2 + 0.00003P_2^2 \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_1} = 0.00018P_1 \\ \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_2} = 0.00006P_2 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} PF_1 = \frac{1}{1 - \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_1}} = \frac{1}{1 - 0.00018P_1} \\ PF_2 = \frac{1}{1 - 0.00006P_2} \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{l} PF_1 \frac{dC_1}{dP_1} = \lambda \Rightarrow P_1 = \frac{\lambda - 8.5}{2 + 0.00018\lambda} \\ PF_2 \frac{dC_2}{dP_2} = \lambda \Rightarrow P_2 = \frac{\lambda - 25.5}{6.8 + 0.00006\lambda} \end{array} \right.$$

A

B



ابتدا از تلفات صرفنظر میکنیم تا مقادیر اولیه ای برای  $P_i$  ها بدست آوریم:

$$F = C_1 + C_2 + \lambda(700 - P_1 - P_2) \quad \left\{ \begin{array}{l} IC_1 = IC_2 = \frac{dC_1}{dP_1} = \frac{dC_2}{dP_2} = \lambda \\ P_1 + P_2 = 700 \end{array} \right.$$

➡  $P_1 = 542.84 \text{ MW} ; P_2 = 157.16 \text{ MW} ; \lambda = 1094.18 ; P_{Loss} = 27.26 \text{ MW}$

برای جبران  $P_{Loss}$  باید مجموع خروجی ژنراتور ها بیشتر شود، لذا  $\lambda$  را بزرگتر فرض می کنیم:

$\lambda = 1200 \frac{\$}{\text{MWh}}$  B و A ➡  $P_1 = 537.68 ; P_2 = 170.91$  ➡  $P_{Loss} = 26.9 \text{ MW}$

بررسی تعادل توان  $P_1 + P_2 - (700 + P_{Loss}) = -18.3 \text{ MW}$  ➡ لذا  $\lambda$  باید بزرگتر باشد





$$\lambda = 1240 \Rightarrow P_1 = 553.93 ; P_2 = 176.67 \Rightarrow P_{loss} = 28.55MW$$

بررسی تعادل توان  $P_1 + P_2 - (700 + P_{Loss}) = +2.05MW$

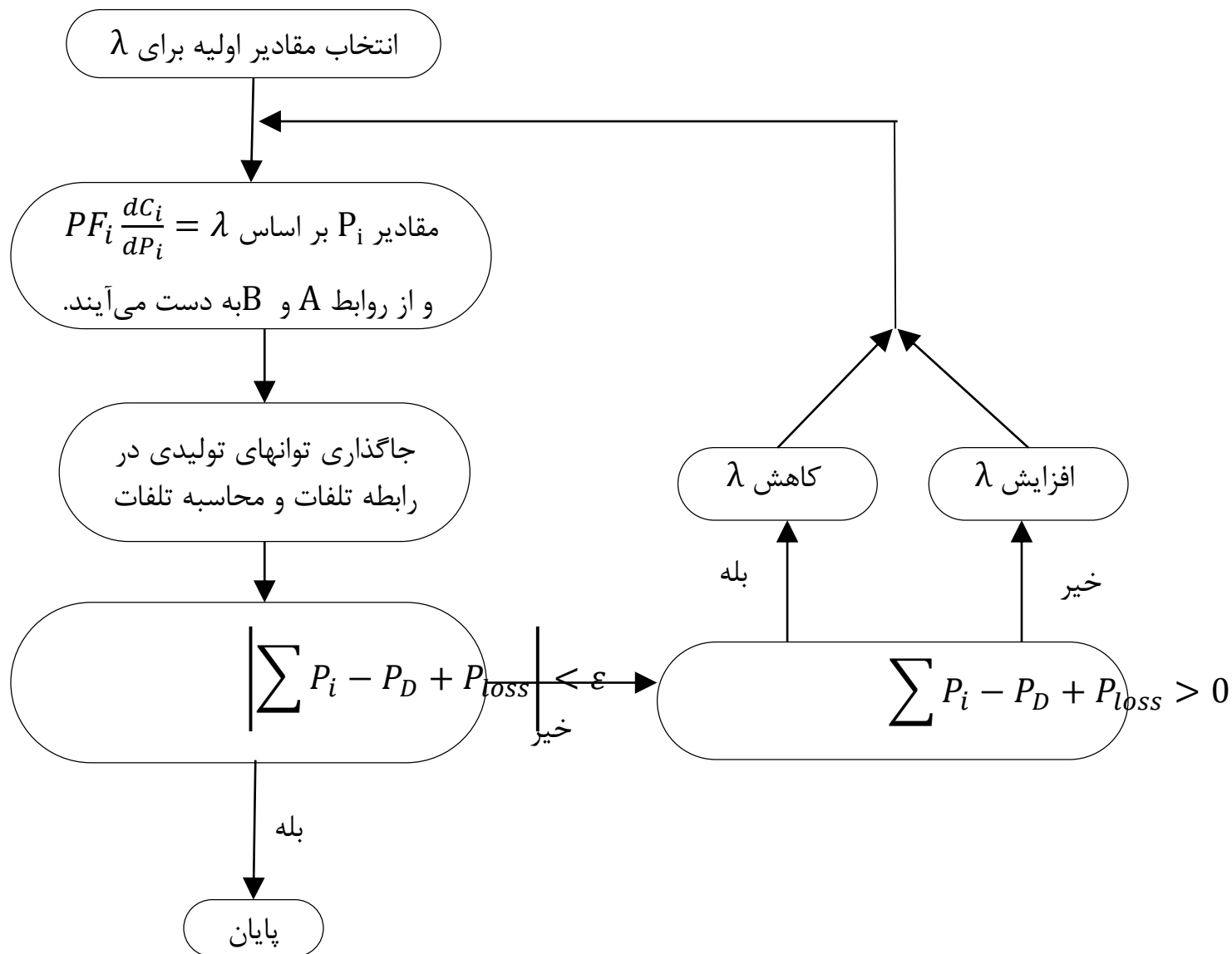
لذا  $\lambda$  را باید کمی کوچکتر کرد:

$$\lambda = 1235 \Rightarrow P_1 = 551.91MW ; P_2 = 175.95MW \rightarrow P_{Loss} = 28.34MW$$

بررسی تعادل توان  $P_1 + P_2 - (700 + P_{loss}) = -0.48 < (\varepsilon = 0.5)$  توقف تکرار



## روش حل مساله با در نظر گرفتن تلفات به طریق تکرار:



## تمرین ۳

یک سیستم دارای دو واحد نیروگاهی به شرح زیر است:

$$\begin{cases} C_1(P_1) = 0.00128P_1^2 + 6.48P_1 + 459 \\ C_2(P_2) = 0.00194P_2^2 + 7.85P_2 + 310 \end{cases}$$

الف- به ازای بار  $P_D=850\text{MW}$  پخش بار اقتصادی (ELD) انجام دهید.  $(P_1, P_2, \lambda)$

ب- اگر بار 50MW افزایش یابد  $(P_D=900\text{MW})$ ، بدون حل مجدد ELD تولید جدید نیروگاه‌ها چقدر می‌شود؟

ج- به ازای بار 850MW و حدود بالا و پایین تولید زیر مجدداً ELD را حل کنید.

$$150\text{MW} \leq P_1 \leq 600\text{MW}$$

$$100\text{MW} \leq P_2 \leq 400\text{MW}$$

د- به ازای بار 850MW، بدون در نظر گرفتن حدود و با لحاظ کردن تابع تلفات زیر مجدداً ELD را حل کنید.

$$P_{Loss} = 0.00009P_1 + 0.00003P_2$$

ارسال پاسخ به:

[m.heshmati.znu@gmail.com](mailto:m.heshmati.znu@gmail.com)

## 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 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:

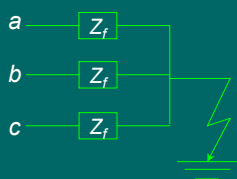
## انواع اتصال کوتاه ها بترتیب شدت خطرناکی:

- 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 :

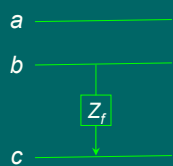
- احتمال وقوع آن کم است (حدود 5 درصد) ولی بسیار خطرناک است زیرا انتقال قدرت بکلی قطع می شود و بالاترین جریانهای اتصالی را بوجود می آورد.
- محل اتصالی باید سریعاً از سیستم قدرت جدا شود.
- کاربرد مطالعه این اتصال کوتاه :
- در حفاظت سیستم و تعیین مقادیر نامی کلیدهای قدرت و رله ها می باشد.
- بررسی پایداری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



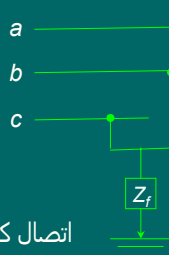
94

## 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  $LL$

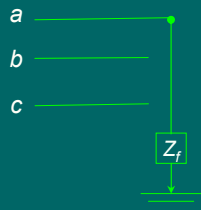


اتصال کوتاه  $DLG$

95

## اتصال یکفاز به زمین ( $SLG$ ):

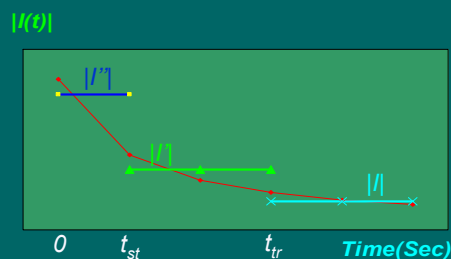
- معمولا بر اثر شکست الکتریکی و ایجاد جرقه روی مقره ها پدید می آید.
- احتمال وقوع آن حدود 75 درصد است.



- 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

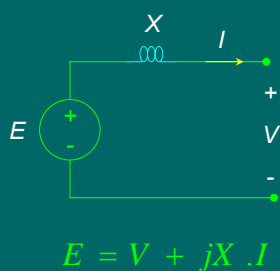
-  $|I|$  تقریب پله ای جریان اتصال کوتاه پایدار

-  $t_{st}$  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



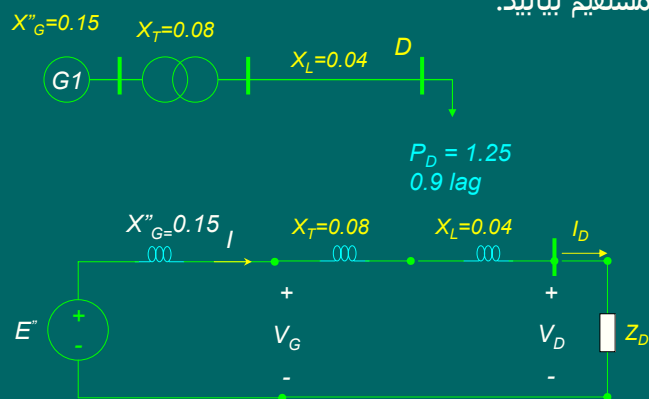
## روش مستقیم محاسبه اتصال کوتاه متقارن سه فاز:

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:

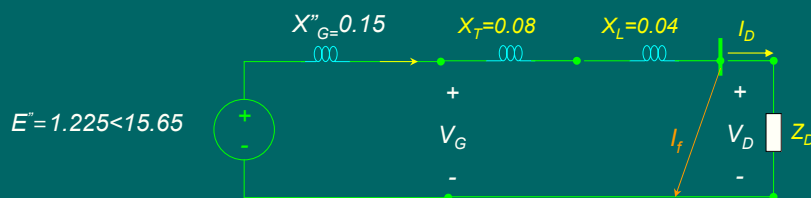
101

### 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**:

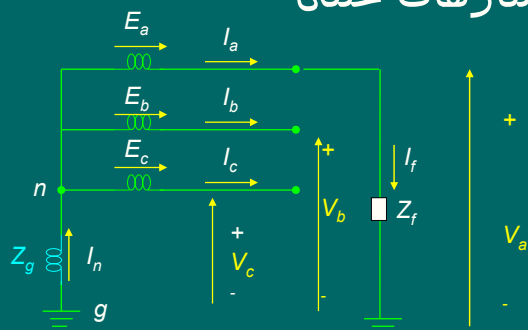
- امپدانس بارها در هر سه فاز برابرند.
- امپدانس خطا در هر سه فاز برابر است.
- ولتاژها، جریانها و نیرومحرکه دارای تقارن سه فاز بودند.
- مجموع جبری جریانهای سه فاز صفر بودند در نتیجه بین نقاط خنثی ژنراتور و یا ترانسفورماتور جریان نداریم و افت ولتاژ نداریم. بنابراین تمام نقاط خنثی در سیستم متعادل با زمین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

116

## 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.

$$\begin{aligned} I_n &= I_a + I_b + I_c \\ V_n &= V_{ng} = -Z_g I_n = -Z_g (I_a + I_b + I_c) \\ I_a &= I_f \quad I_b = 0 \quad I_c = 0 \\ V_a &= V_{ag} = Z_f I_f \\ V_{un} &= V_{ag} - V_{ng} = V_a - V_n = V_a + Z_g (I_a + I_b + I_c) \end{aligned}$$

117

## تعریف $\alpha$

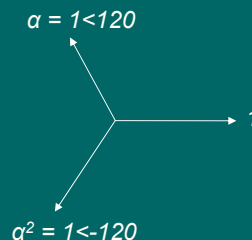
تعریف می کنیم:  $\alpha = e^{j120} = 1 < 120^\circ$   
اگر  $\alpha$  در یک فازور ضرب شود فقط فاز آنرا به اندازه 120 درجه اضافه می کند (در جهت مثباتی می چرخاند).  
می توان نشان داد:

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

$$\alpha^3 = 1$$

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

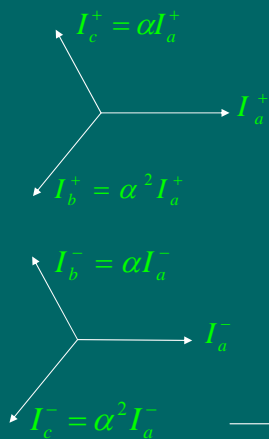
$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0$$



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:

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

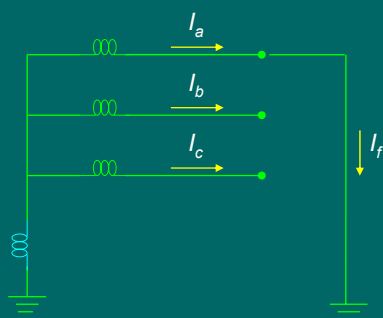
$I_p$  جریانهای فازی و  $I_s$  مولفه های متقارن جریانها هستند.

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.

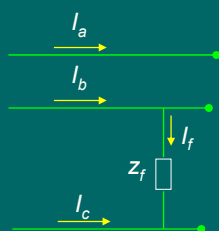
حل:

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

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:

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

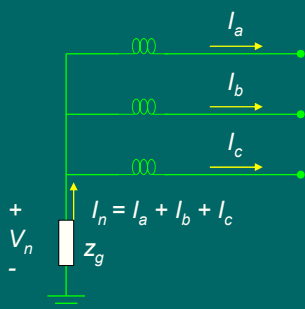
$$\rightarrow V_{ab}^0 = \frac{1}{3}(V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}) = \frac{1}{3}(V_a - V_b + V_b - V_c + V_c - V_a) = 0$$

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.

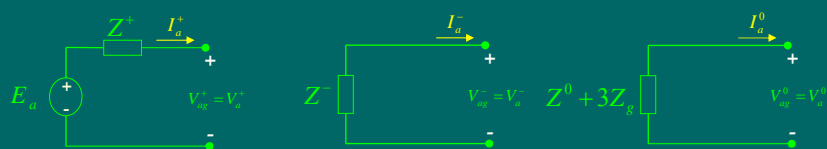
129

## شبکه های توالی معادل ژنراتور سنکرون

زمین (g) مبنا می باشد:

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

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

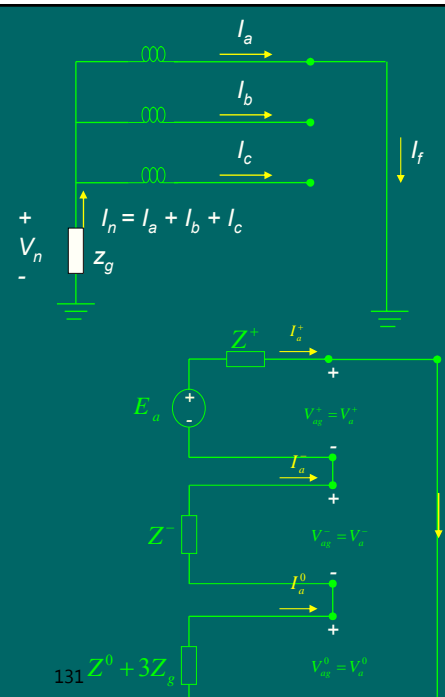


130

### 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.

## 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 :

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

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

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

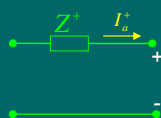
نتایج:

1- ماتریس  $Z_s$  قطری است.

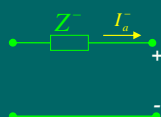
2-  $Z^+ = Z^-$  زیرا خط انتقال عنصر پسو (غیرفعال) است.

133

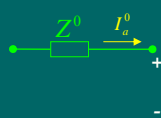
## مدل توالی خط انتقال



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 :

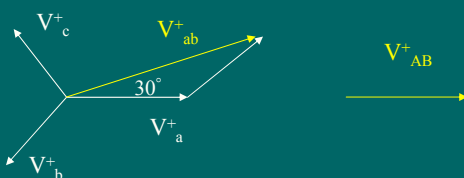
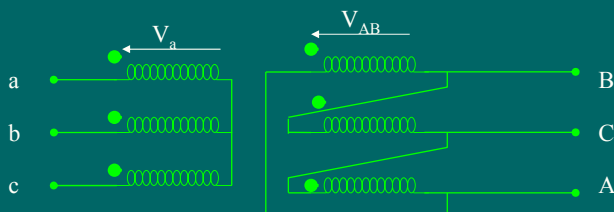
$$Z^{+} = Z^{-} = Z_{Leakage}$$

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

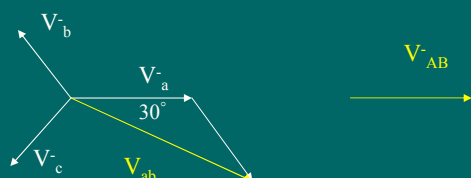
به یک ترانس  $Y\Delta$  یکبار ولتاژ توالی مثبت و بار دیگر ولتاژ توالی منفی اعمال کنید و مقدار و جهت جابجائی فاز بین اولیه و ثانویه را بدست آورید و با هم مقایسه کنید.



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

136

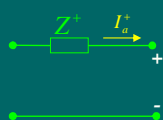
## ادامه تحقیق جهت جابجائی فاز در ترانسفورماتورها



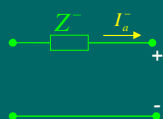
- مشاهده می شود که با اعمال ولتاژ توالی منفی به ترانس، به اندازه  $30^\circ$  درجه جابجائی فاز داریم.

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.

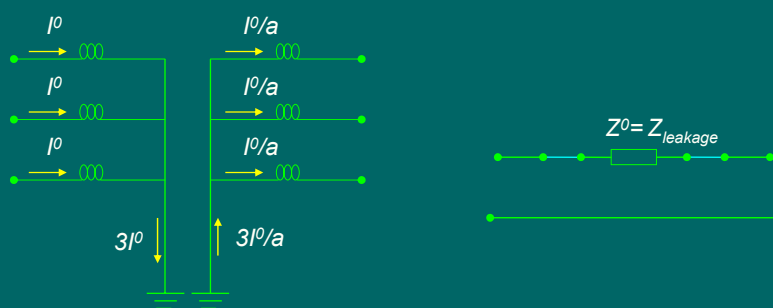
3- در اتصال Y، وقتی جریانهای هم فاز  $I^0$  می توانند جاری شوند که نقطه خنثی زمین شده باشد.

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

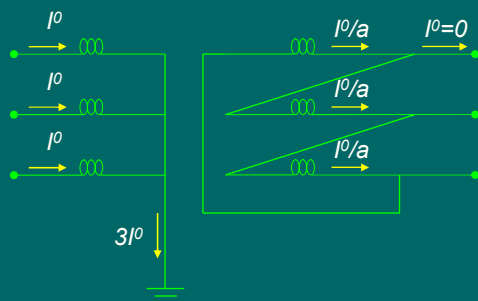
## مدل توالی صفر ترانس ستاره زمین شده-ستاره زمین شده

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

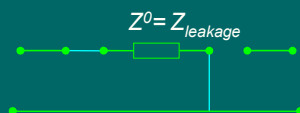


140

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

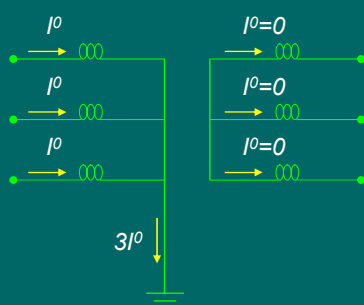


امکان عبور جریان در هر دو طرف وجود دارد ولی در طرف مثلث جریانه گردش اند و در خط جریان توالی صفر وجود ندارد.

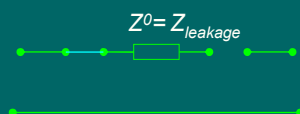


141

### 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.

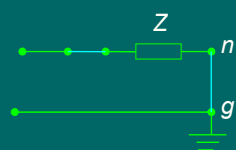
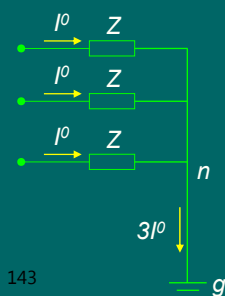
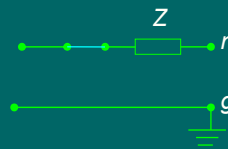
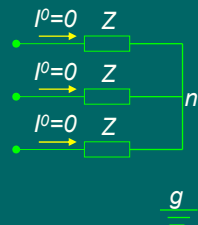


142



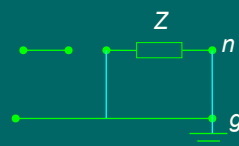
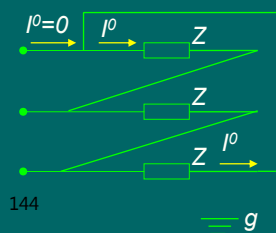
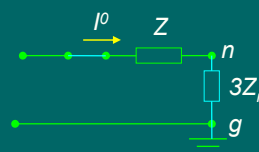
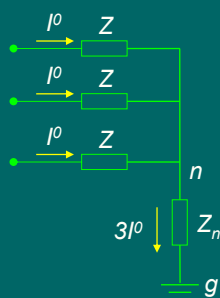
## شبکه های توالی صفر در مدارها

مینا زمین است.



143

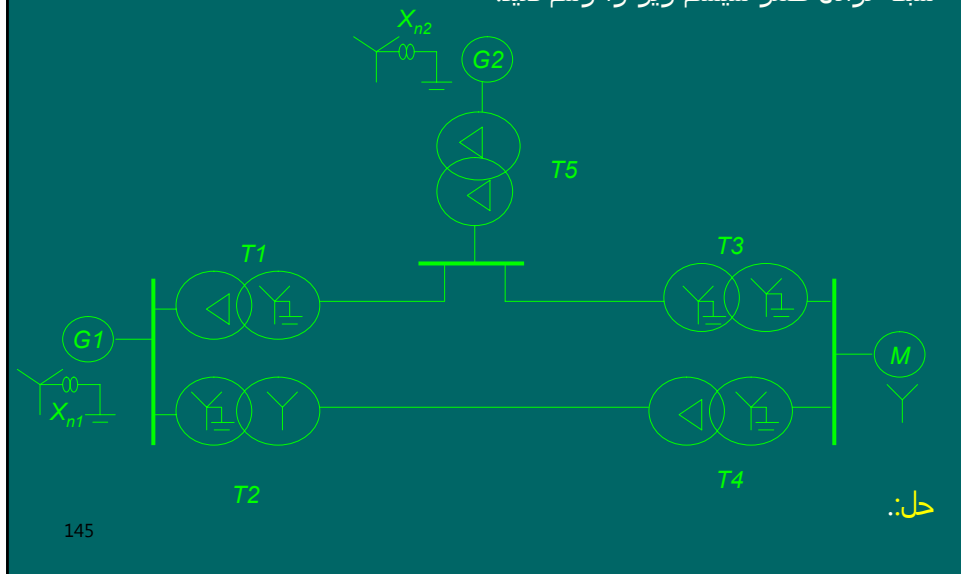
## ادامه شبکه های توالی صفر در مدارها



144

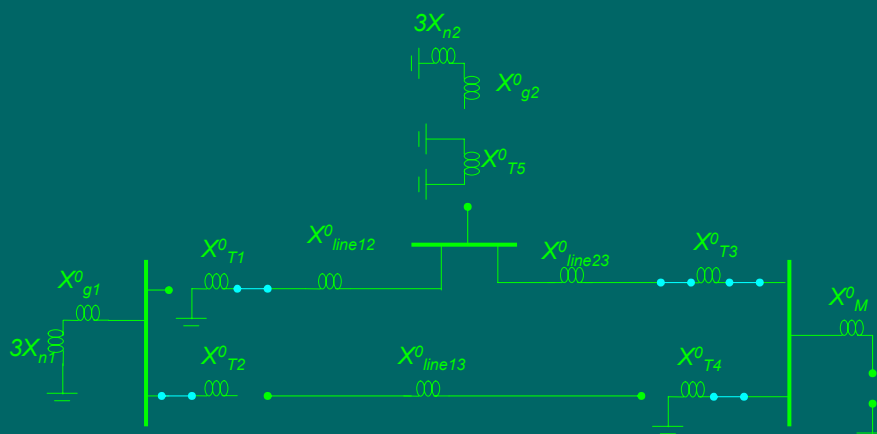
## مثال 7-4

شبکه توالی صفر سیستم زیر را رسم کنید.



145

## حل مثال 7-4



146

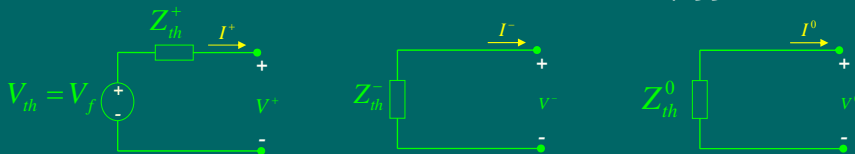
## روشهای حل اتصال کوتاه نامتقارن

- 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

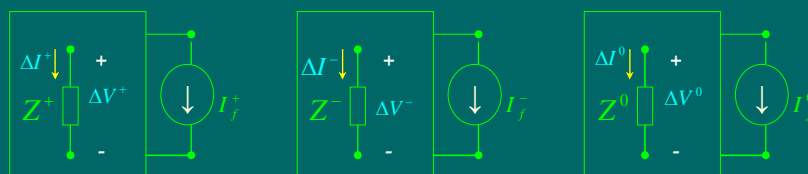
- 1- جریانهایی عناصر سیستم و ولتاژ محل اتصال کوتاه ( $V_f$ ) را در قبل از اتصال کوتاه محاسبه می کنیم.
- 2-  $V_f$  را بعنوان ولتاژ تونن شبکه از دیدگاه نقطه اتصال کوتاه شده در نظر می گیریم که فقط در مدار معادل مثبت ظاهر می شود.
- 3- شبکه های توالی مثبت، منفی و صفر سیستم را رسم می کنیم.
- 4- امپدانس معادل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

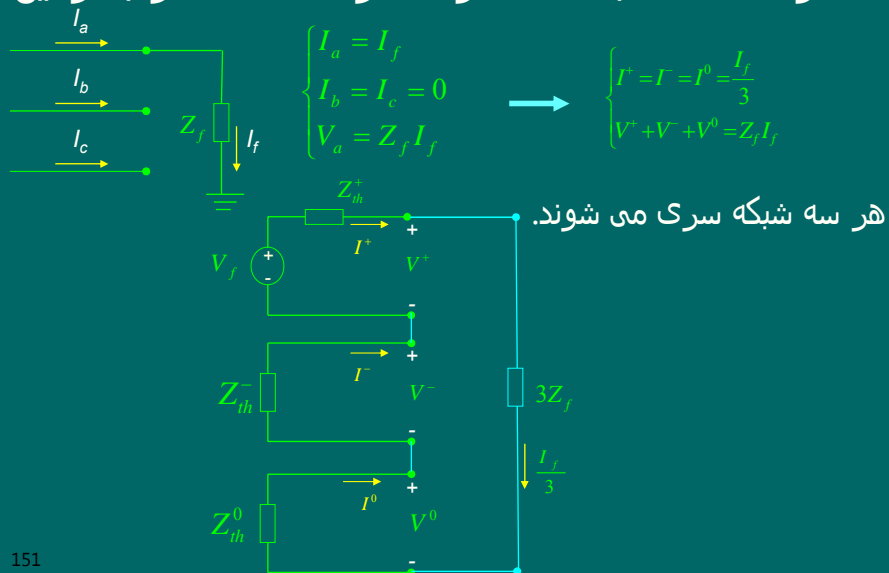
$$\Delta V_p = T \Delta V_s = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V^+ \\ \Delta V^- \\ \Delta V^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} \quad \Delta I_p = T \Delta I_s = \begin{bmatrix}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

- 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:

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

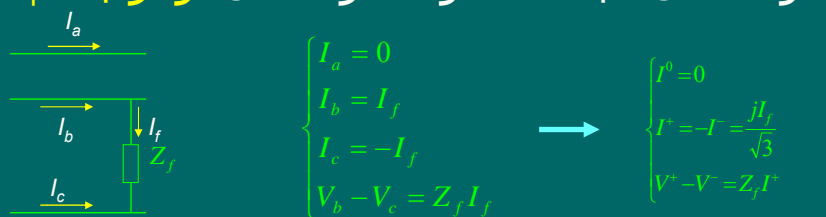
150

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

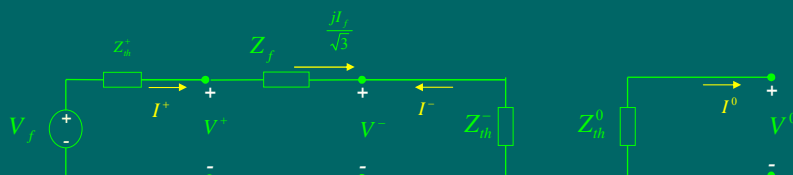


151

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

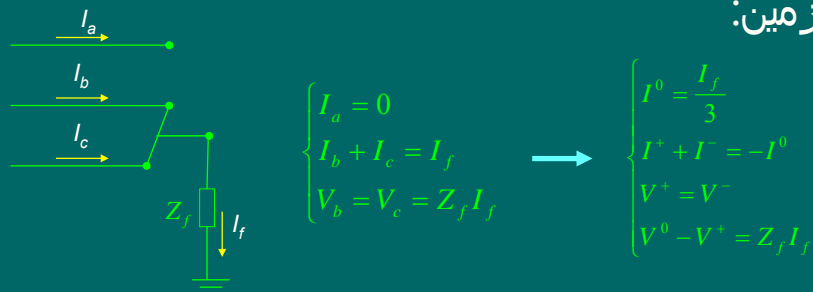


شبکه های مثبت و منفی موازی می شوند و شبکه صفر باز است.

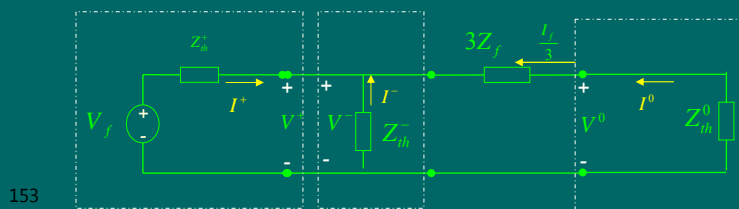


152

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



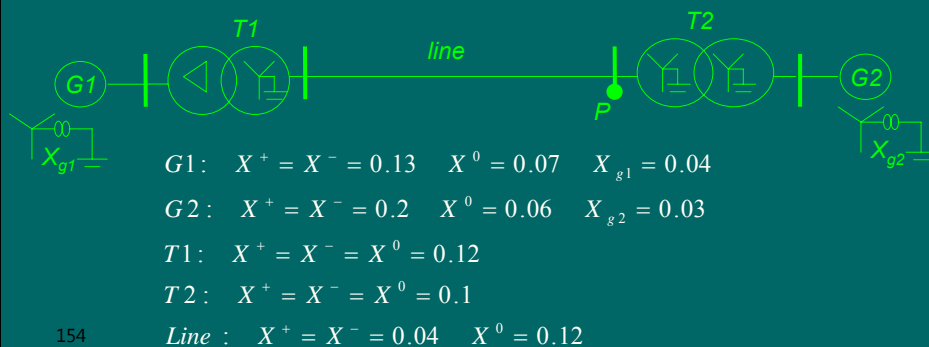
هر سه شبکه توالی موازی می شوند.



153

## مثال 8-4

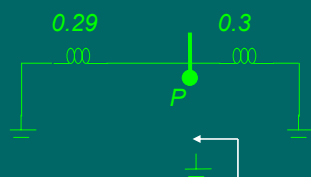
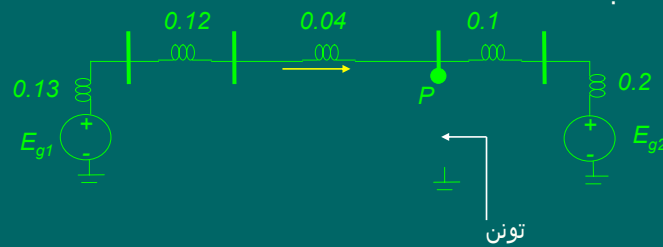
در سیستم قدرت شکل فوق، در نقطه  $P$  یک اتصال کوتاه دوفاز به هم و به زمین با امپدانس  $Z_f = j0.02$  رخ می دهد. شبکه در قبل از اتصال کوتاه بی بار و ولتاژ تمامی باسها  $1 < 0$  فرض می شود. جریان خط انتقال را در بعد از اتصال کوتاه برای هر فاز محاسبه کنید.



154

#### حل مثال 8-4

مدل توالی مثبت شبکه:

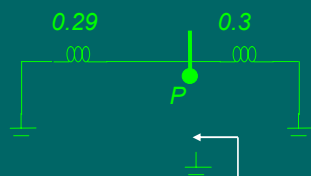
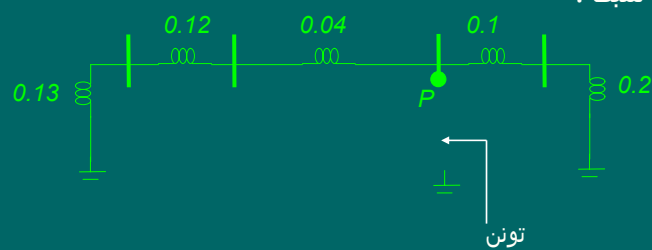


$$X_{th}^+ = 0.29 \parallel 0.3 = 0.147$$

155

#### ادامه حل مثال 8-4

مدل توالی منفی شبکه:

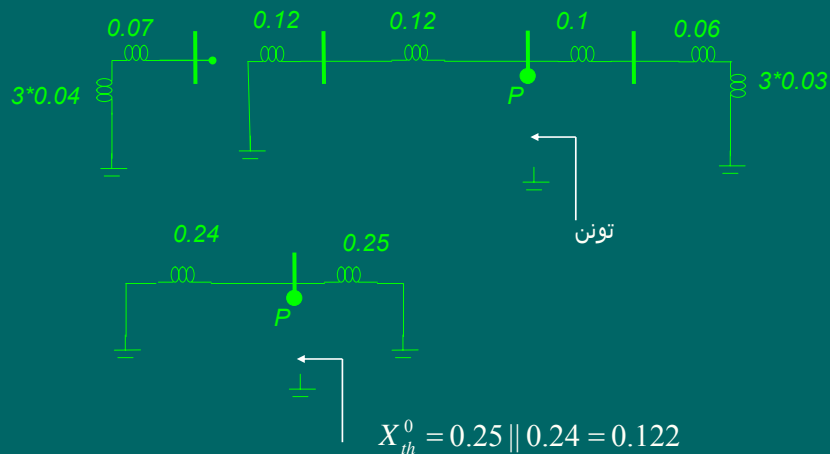


$$X_{th}^- = 0.29 \parallel 0.3 = 0.147$$

156

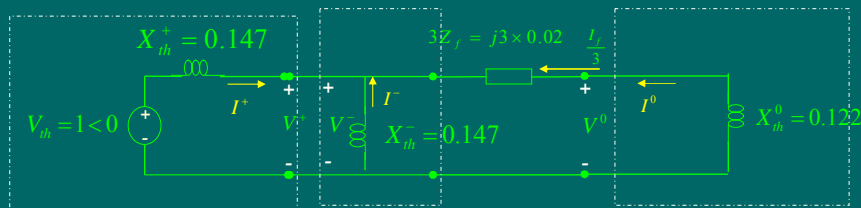
#### ادامه حل مثال 8-4

مدل توالی صفر شبکه:



157

#### ادامه حل مثال 8-4



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

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

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

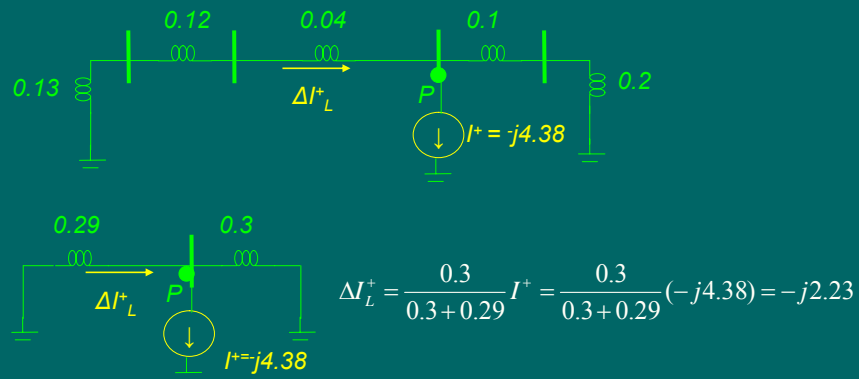
$$I_f = 3I^0 = 3 \times j1.957 = j5.871$$

158



#### ادامه حل مثال 8-4

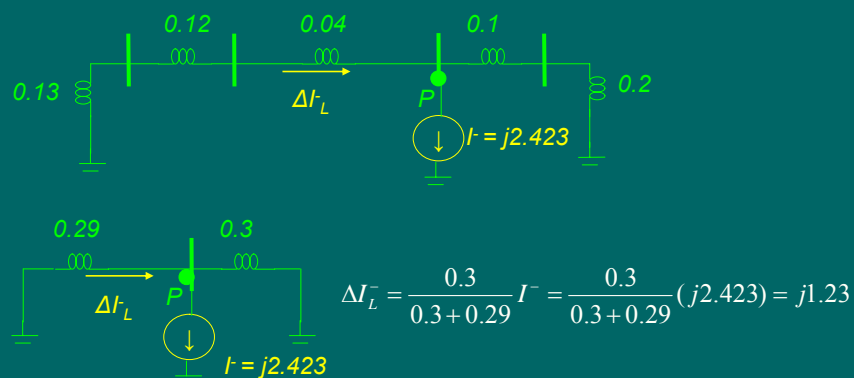
محاسبه مولفه **مثبت** جریان خط :



159

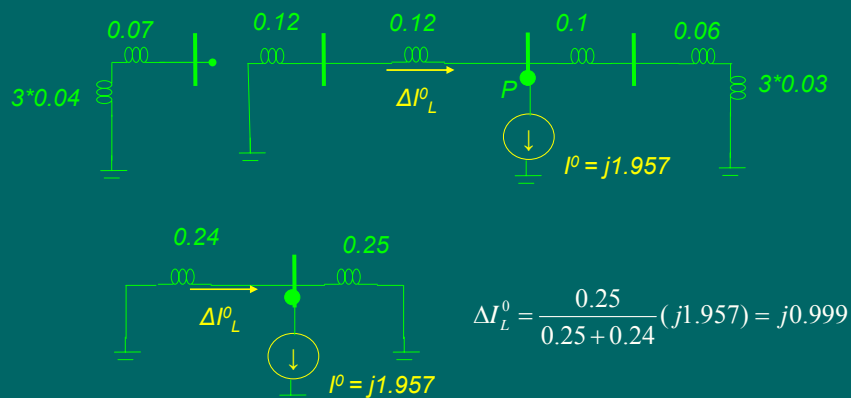
#### ادامه حل مثال 8-4

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:

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

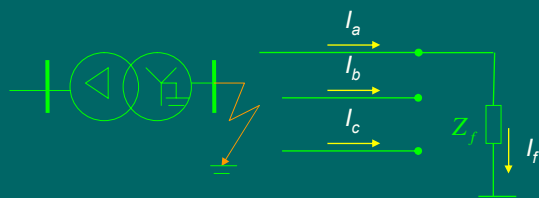
جریان فازهای خط در **بعد** از اتصال کوتاه:

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

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:

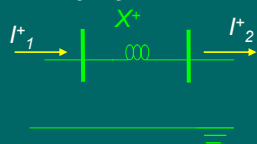
محاسبه مولفه های جریان اتصال کوتاه در ثانویه:

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

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

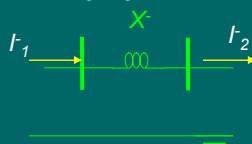
163

مدل مثبت ترانس:



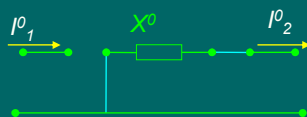
$$I_1^+ = I_2^+ = -j0.3$$

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

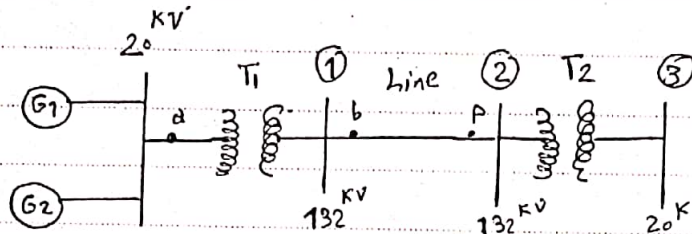
①

# ★ مثالهای مربوط به انتقال توان متقارن

Subject:

Year: Month: Day: ( )

## ★ مثال ۱:



دیالگرام خطی یک سیستم قدرت

مطابق شکل مقابل است. همه

رانتانسها در مبای  $S_{base} = 100 \text{ MVA}$  و

ولتاژ نامی خط ترانسها بریونیت شده اند.

$$T_1: 132^k / 20^k \quad X = 0.08 \text{ P.u}$$

$$T_2: 132^k / 20^k \quad X = 0.0457 \text{ P.u}$$

$$G_1, G_2: 20^k, \quad X'' = 0.2 \text{ P.u}$$

$$\text{line: } 132^k, \quad X = 0.02 \text{ P.u}$$

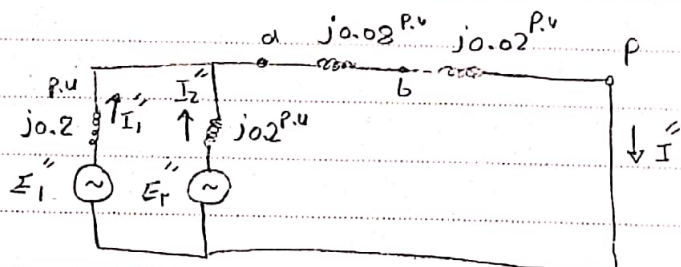
زیر گذرا

در شرایط بار یابی سیستم، ولتاژ انتهای خط انتقال (نقطه P) برابر  $128 \text{ kV}$  می باشد. در این

شرایط، انتقال کوانته سه فاز به زمین در نقطه P رخ می دهد. جریان زیر گذرای اتصال کوانته

در محل وقوعی و در هر یک از ژنراتورها را بدست آورید.

$$\text{حل: } V_{base a} = 20^kV, \quad V_{base b} = V_{base p} = 132^kV, \quad V_{base c} = 20^kV, \quad S_{base} = 100 \text{ MVA}$$



دیالگرام امپدانی در حین

اتصال کوانته

برای یافتن جریان های  $I_1''$ ،  $I_2''$ ،  $I_3''$  (جریان های بر گذرا در حین خطا) باید ابتدا  $E_1''$  و  $E_2''$  را

پیدا کنیم.

با توجه به اینکه قبل از خطا، شرایط بار یابی بوده و ولتاژ محل خطا برابر  $128 \text{ kV}$  بوده است لذا

$$\Rightarrow E_1'' = E_2'' = 128^kV = \frac{128}{132} \text{ P.u} = 0.97$$

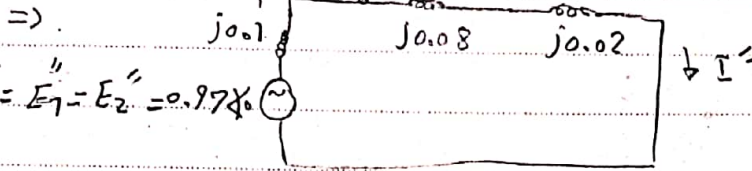
PATCO

Subject:

Year: Month: Day: ( )

$$\frac{j0.2 \times j0.2}{j0.2 + j0.2} = j0.1$$

برای محاسبه جریان  $I''$  به صورت زیر عمل می‌کنیم:



$$I'' = \frac{0.97 \angle 0^\circ}{j0.1 + j0.08 + j0.02} = \frac{0.97 \angle 0^\circ}{j0.2} = 4.85 \angle -90^\circ \text{ P.u.}$$

جریان زیر مدار در محل خط

$$V_a = (j0.08 + j0.02) I'' = j0.1 \times 4.85 \angle -90^\circ = 0.485 \angle 0^\circ \text{ P.u.}$$

$$I_1'' = I_2'' = \frac{E'' - V_a}{j0.2} = \frac{0.97 \angle 0^\circ - 0.485 \angle 0^\circ}{j0.2} = 2.425 \angle -90^\circ \text{ P.u.}$$

جریان زیر مدار در شش‌گوشه در محل خط

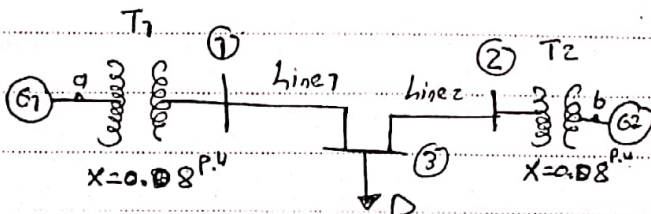
$$* I_1'' = 4.85 \text{ P.u.} = 4.85 \times I_{base p} = 4.85 \times \frac{S_{base}}{\sqrt{3} V_{base p}} = 4.85 \times \frac{100 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 132 \times 10^3} = 2.127 \text{ kA}$$

جریان زیر مدار در شش‌گوشه

$$* |I_1''| = |I_2''| = 2.425 \times I_{base d} = 2.425 \times \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \times V_{base d}} = 2.425 \times \frac{100 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 20 \times 10^3} = 7 \text{ kA}$$

جریان زیر مدار در شش‌گوشه در محل خط

★ مثال ۲ ★



دیگرام تک خطی یک سیستم قدرت مطابق شکل

مقابل است. همه رانتهای ها در مبای

$$V_{base a} = 13.8 \text{ kV}, S_{base} = 20 \text{ MVA}$$

$$V_{base b} = 13.8 \text{ kV}, V_{base c} = 66 \text{ kV}$$

برپوشیده اند.



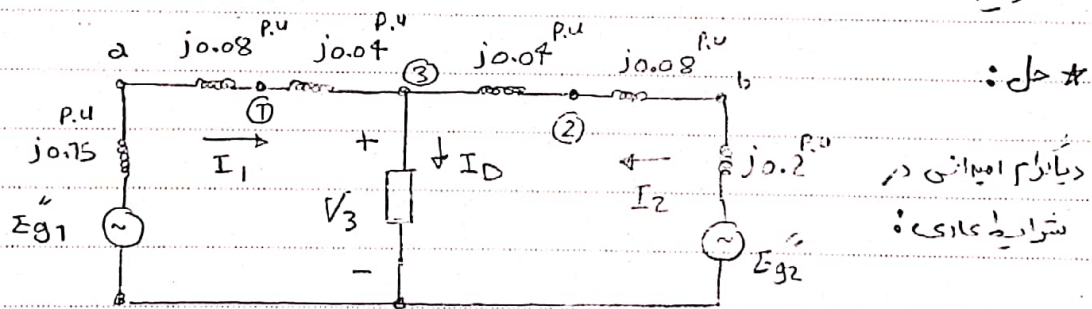
(3)

Subject:

Year : Month : Day : ( )

$$\begin{aligned}
 T_1: 66^k / 13.8^k, X=0.08^{P.u} & \quad G_1: 13.8^{KV}, X_d'=0.15^{P.u} \\
 T_2: 66^k / 13.8^k, X=0.08^{P.u} & \quad G_2: 13.8^k, X_d'=0.2^{P.u} \\
 Line 1, Line 2: X=0.04^{P.u}
 \end{aligned}$$

در شرایط کاری سیم، ولتاژ ژنراتور  $G_2$  برابر  $14.07 \angle 5^\circ$  KV بوده و قدرت جذب شده توسط بار سینک ۳ در ولتاژ  $V_3 = 65 \angle 0^\circ$  KV و ضریب توان ۰.۹ بهفاز، برابر با  $P_D = 25$  MW است.  
 در این شرایط، اتصال کوتاه سه فاز به زمین در سینک ۳ رخ می دهد. جریان اتصال کوتاه در محل خط ۱ و جریانهای اتصال کوتاه مجاور از ترانسفورمورها، مدارها و خطوط انتقال را به دست آورید.



$$\begin{aligned}
 \text{قبل از خطا: } V_3 &= 65^{KV} \angle 0^\circ = \frac{65}{66} \angle 0^\circ = 0.985 \angle 0^\circ^{P.u} \\
 P_D &= \frac{25^{MW}}{20^{MVA}} = 1.25^{P.u} \\
 |I_D|^{P.u} &= \frac{P^{P.u}}{V_3^{P.u} \cdot PF} = \frac{1.25}{0.985 \times 0.9} = 1.41^{P.u} \\
 I_D &= |I_D| \angle V_3 - \cos^{-1} PF \\
 &= 1.41 \angle -25.84^\circ
 \end{aligned}$$

$$V_b = 14.07 \angle 5^\circ = \frac{14.07}{13.8} \angle 5^\circ = 1.02 \angle 5^\circ^{P.u}$$

— حال به محاسبات اتصال کوتاه می پردازیم:

\* در مرحله اول: در این ردیف ابتدا  $E_g1$  و  $E_g2$  را به است ادیم

بنا به شرایط عادی قبل خطا داریم:

Payco

Subject:

Year: Month: Day: ( )

$$E_{g2}'' = V_b + (j0.2) I_2 \quad , \quad E_{g1}'' = V_3 + (j0.75 + j0.08 + j0.04) I_1 \\ = V_3 + (j0.27) I_1$$

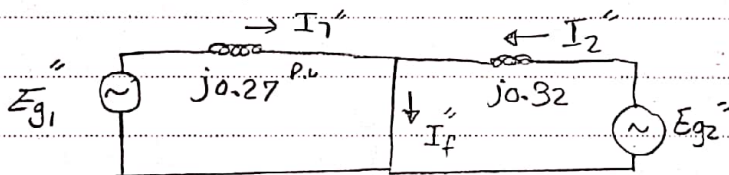
$$I_2 = \frac{V_b - V_3}{j0.08 + j0.04} = \frac{1.02 \angle 5^\circ - 0.985 \angle 0^\circ}{j0.12} = 0.785 \angle -19.28^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_1 = I_D - I_2 = 1.47 \angle -25.84^\circ - 0.785 \angle -19.28^\circ = 0.637 \angle -34^\circ \text{ p.u.}$$

$$\Rightarrow E_{g1}'' = 0.985 \angle 0^\circ + (j0.27) \times 0.637 \angle -34^\circ = 1.09 \angle 7.54^\circ \text{ p.u.}$$

$$E_{g2}'' = 1.02 \angle 5^\circ + (j0.2) \times 0.785 \angle -19.28^\circ = 1.094 \angle 12.51^\circ \text{ p.u.}$$

حال ما، معادل در حین اتصال کوتاه فاز را با س (۳)، را رسم می‌کنیم:



$$I_1'' = \frac{E_{g1}''}{j0.27} = \frac{1.09 \angle 7.54^\circ}{j0.27} = 4.037 \angle -82.46^\circ \text{ p.u.} \quad \text{حسابات:}$$

$$I_2'' = \frac{E_{g2}''}{j0.32} = \frac{1.094 \angle 12.51^\circ}{j0.32} = 3.419 \angle -77.49^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_f'' = I_1'' + I_2'' = 1.27 \angle -80.17^\circ \text{ p.u.}$$

$$* I_{base_{G1}} = I_{base_{G2}} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} V_{base_2}} = \frac{20 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 138 \times 10^3} = 836.74 \text{ A}$$

$$I_{base_3} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} V_{base_3}} = \frac{20 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 66 \times 10^3} = 174.95 \text{ A}$$

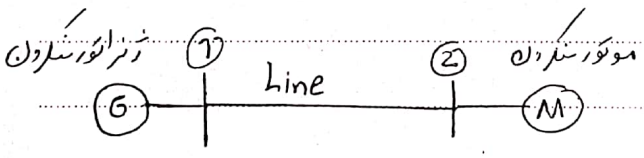
$$\Rightarrow |I_{G1}''| = |I_1''| = 4.037 \text{ p.u.} \Rightarrow |I_{G1}''| = 4.037 \times 836.74 = 3.378 \text{ KA}$$

$$|I_{G2}''| = |I_2''| = 3.419 \text{ p.u.} \Rightarrow |I_{G2}''| = 3.419 \times 836.74 = 2.867 \text{ KA}$$

$$|I_f''| = 1.27 \text{ p.u.} \Rightarrow |I_f''| = 1.27 \times 174.95 = 2.22 \text{ KA}$$

در محل اتصال کوتاه  
در محل اتصال کوتاه  
در محل اتصال کوتاه

★ مثال ۴ :



سیستم مثلاً مقابل را در نظر بگیرید.

G:  $30^{MVA}$ ,  $13.2^{KV}$ ,  $X_d' = 20\%$

M:  $30^{MVA}$ ,  $13.2^{KV}$ ,  $X_d' = 20\%$

PAYCO

line:  $X = 1.0\%$  ←  $S_{base} = 30^{MVA}$  در مبدا  
 $V_{base} = 13.2^{KV}$

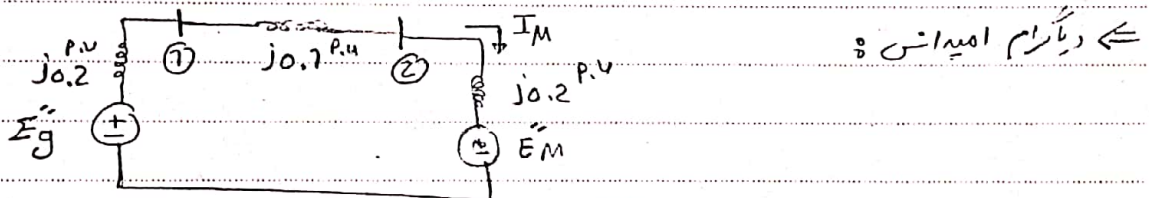


Subject:

Year:      Month:      Day:      ( )

ولتاژ مبنای سیستم را  $73.2 \text{ kV}$  را در نظر بگیرید.  $S_{base}$  را نیز برابر  $30 \text{ MVA}$  می‌گذاشتیم.  
 در شرایط عادی، موتور قدرت  $20 \text{ MW}$  را در ولتاژ  $12.8 \text{ kV}$  و ضریب توان  $0.8$  پیش‌فاز دریافت می‌کند. اگر در این شرایط، اتصال کوتاه سه فاز در باس موتور (باس ۱) رخ دهد، جریان زیر گذر از عبور از ژنراتور و موتور را به دست آورید.

\* حل:  $V_{base}$  و  $S_{base}$  سیستم به ترتیب برابر با  $73.2 \text{ kV}$  و  $30 \text{ MVA}$  (توانی می‌باشد)



در شرایط عادی داریم:

$$V_2 = 12.8 \text{ kV} = \frac{12.8 \text{ k}}{73.2 \text{ k}} \text{ P.U.} = 0.9740$$

$$I_M = \frac{P_M}{\sqrt{3} V_2 \text{ PF}} = \frac{20 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 12.8 \times 10^3 \times 0.8} = 1.128 \text{ kA}$$

↪ پیش‌فاز

$$\angle I_M = \angle V_2 + 0.5^\circ \text{ PF} = 0 + 0.5^\circ \times 0.8 = 36.87^\circ$$

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} V_{base}} = \frac{30 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 73.2 \times 10^3} = 7.312 \text{ kA}$$

↪ بر حسب سازه

$$\Rightarrow I_M = \frac{1.128 \text{ k} \angle 36.87^\circ}{7.312 \text{ k}} = 0.86 \angle 36.87^\circ \text{ P.U.}$$

$$E_m'' = V_2 - (j0.2) I_M = 0.9740 - (j0.2) \times 0.86 \angle 36.87^\circ$$

$$= 1.0732 - j0.1376 = 1.082 \angle -7.31^\circ$$

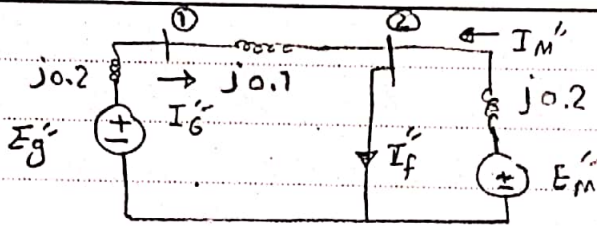
$$E_g'' = V_2 + (j0.2 + j0.1) I_M = 0.9740 + (j0.3) \times 0.86 \angle 36.87^\circ$$

$$= 0.815 + j0.206 = 0.841 \angle 14.2^\circ$$

9

Subject:

Year: Month: Day: ( )



حاله به محاسبه در حین اتصال کوتاه

می پردازیم: <=>

در حین اتصال کوتاه موتور به میل

داشتن  $I_M''$  (دست زدن) مانده ژنراتور، فکارت کرده به باس 1 توان می دهد.

$$I_M'' = \frac{E_M''}{j0.2} = \frac{1.082 \angle -7.31^\circ}{j0.2} = 5.41 \angle -97.31^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_g'' = \frac{E_g''}{j0.3} = \frac{0.847 \angle 14.2^\circ}{j0.3} = 2.803 \angle -75.8^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_f'' = I_M'' + I_g'' = 5.41 \angle -97.31^\circ + 2.803 \angle -75.8^\circ = 8.083 \angle -9^\circ \text{ p.u.}$$

$$|I_f''| = 8.083 \times I_{base} = 8.083 \times 1.312 \text{ kA} = 10.605 \text{ kA}$$

7.1 ثان در محل خط

$$|I_g''| = 2.803 \times I_{base} = 2.803 \times 1.312 \text{ kA} = 3.678 \text{ kA}$$

7.1 ثان در محل ژنراتور

$$|I_M''| = 5.41 \times I_{base} = 5.41 \times 1.312 \text{ kA} = 7.098 \text{ kA}$$

7.1 ثان در محل موتور

اتصال کوتاه به فاز مقابله در باس 1 پس 58

★ مثال 5: ✓

$$Z_{bus} = \begin{bmatrix} j0.4 & j0.7 & j0.3 \\ j0.7 & j0.8 & j0.5 \\ j0.3 & j0.5 & j1.2 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$$

ماتریس امپدانس باس یک سیستم قدرت به فاز به صورت مقابل است.

در تشکیل این  $Z_{bus}$ ، از رانکهای زیر گذرا استفاده شده

است. یک اتصال کوتاه به فاز به زمینه در باس 1 رخ

می دهد. با صرف نظر کردن از جریان بار قبل از خط، ولتاژها را در حین خط به دست آورید.

(به صورت تقریبی)

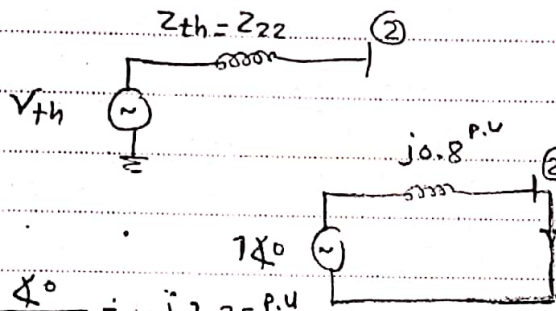


Subject:

Year: Month: Day: ( )

★ حل:

در محاسبات تقریبی اتصال کوتاه، سیستم را قبل از خط به صورت بی بار فرض کرده و ولتاژها را  $1 \text{ pu}$  در نظر می گیریم



مدار معادل تونین از دید بوس ①

اتصال کوتاه در بوس ②

$$I_f'' = \frac{140}{j0.8} = -j1.25 \text{ pu}$$

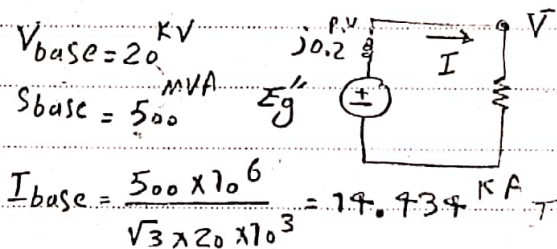
$$V_2 = 0$$

$$V_1 = V_1 - Z_{12} I_f'' = 140 - (j0.1)(-j1.25) = 0.875 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$V_3 = V_3 - Z_{32} I_f'' = 140 - (j0.5)(-j1.25) = 0.375 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

★ مثال ۵:

یک ژنراتور 60 Hz، 500 MVA، 20 KV با  $X_d'' = 0.2 \text{ pu}$ ، یک بار مقاومتی 400 MW را در ولتاژ 20 KV تغذیه می کند. بار مستقیماً به تمینالهای ژنراتور متصل است. اگر سه فاز به طور همزمان اتصال کوتاه شوند، جریان ژنراتور را اولی را محاسبه کنید.



★ حل: قبل از اتصال کوتاه

$$V_{base} = 20 \text{ KV}$$

$$S_{base} = 500 \text{ MVA}$$

$$I_{base} = \frac{500 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 20 \times 10^3} = 14.434 \text{ KA}$$

$$V = 20 \angle 0^\circ \text{ KV} = \frac{20 \angle 0^\circ}{20 \text{ KV}} = 1 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$P = 400 \text{ MW} = \frac{400 \text{ M}}{500 \text{ M}} = 0.8 \text{ pu}$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{0.8}{1} = 0.8 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

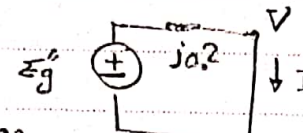
$$\Rightarrow E_g'' = (j0.2)I + V = (j0.2)(0.8 \angle 0^\circ) + 1 \angle 0^\circ = 1 + j0.16 = 1.013 \angle 9.1^\circ$$

۱۷)

Subject:

Year :      Month :      Day :      ( )

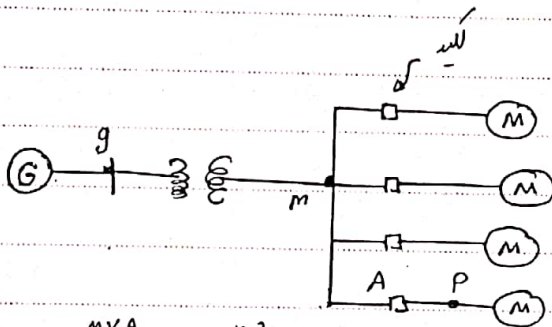
$$I'' = \frac{E_g''}{j0.2} = \frac{1.013 \angle 9.1^\circ}{j0.2} = 5.065^{pu} \angle -80.9^\circ$$



چنین اتصال کوتاه =

$$|I''| = 5.065^{pu} \times I_{base} = 5.065 \times 14.434^{KA} = 73.108^{KA}$$

★ مثال ۷ :



سیستم مقابل را در نظر بگیرید. سیستم سه فاز است.  
هر چهار موتور مشابهند.  
یک اتصال کوتاه سه فاز در نقطه P رخ می دهد. به صورت تقریبی،

$G: 25^{MVA}, 13.8^{KV}, X'' = 15\%$

$T: 25^{MVA}, 13.8^{KV} / 6.9^{KV}, X = 70\%$

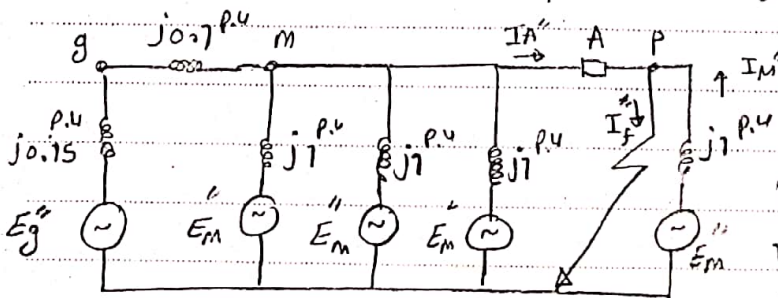
$M: 5^{MVA}, 6.9^{KV}, X'' = 20\%$

الف) جریان زیربنه را برای لکته A محاسبه کنید.  
ب) محاسبه کنید که در صورت وقوع اتصال کوتاه سه فاز در نقطه P، جریان زیربنه را در لکته A محاسبه کنید.

ج) تاثیر وقوع اتصال کوتاه را در نتایج (الف و ب) بررسی کنید.

د) اگر اتصال کوتاه در باس M رخ دهد، جریان زیربنه را در لکته A محاسبه کنید. چقدر می شود؟

ه) به طور تقریبی، اسی توان  $E_g''$  و  $E_M''$  را برابر با ۱ در نظر بگیرید.



داده های مسئله =

$S_{base} = 25^{MVA}$

$V_{baseg} = 13.8^{KV}$

$V_{basem} = 6.9^{KV}$

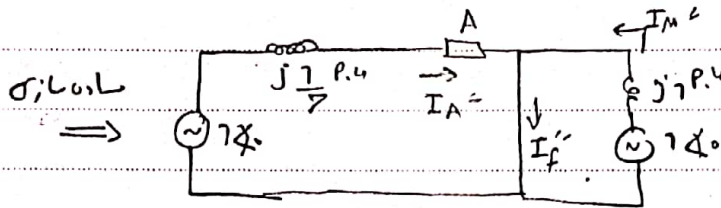
$X_M'' = 0.2 \times \frac{25^M}{5^M} = 1^{pu}$

PAYCO



Subject:

Year:      Month:      Day:      ( )



$$I_A'' = \frac{140}{j\frac{1}{7}} = -j7^{P.u.} \quad \text{(الف)}$$

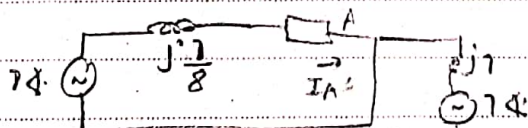
$$|I_A|' = 7^{P.u.} = 7 \times I_{base} = 7 \times \frac{25 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 6.9 \times 10^3} = 14.643 \text{ KA}$$

$$I_M'' = \frac{140}{j1^{P.u.}} = -j1^{P.u.} \Rightarrow |I_M|' = 1 \times I_{base} = 2.092 \text{ KA} \quad \text{(ب)}$$

ج) مقدار مبرکورها در  $I_M''$  تاثیر ندارد و  $I_M$  همچنان برابر با  $1^{P.u.}$  می باشد.

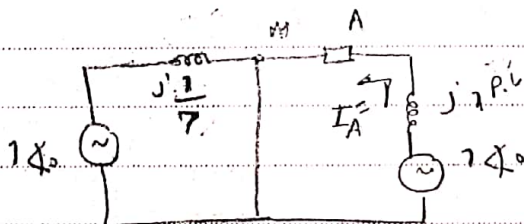
د) در  $I_A''$  تاثیر دارد. افزایش مقدار مبرکور موجب کاهش امپدانس معادل می شود.

شده از سمت چپ A می شود و این موجب افزایش  $I_A''$  می گردد.



برای مثال اگر منبع مبرکور را بشیم به

$$\Rightarrow I_A'' = \frac{140}{j\frac{1}{8}} = -j8^{P.u.}$$



د) اگر خط در نقطه M رخ دهد:

$$I_A'' = -j1^{P.u.}$$

در این حالت مقدار مبرکورها تاثیر در جریان  $I_A''$  ندارد.

## PART 6

فصل ششم: «بایداری مسلم قدرت»

۱- مقدمه: بایداری مسلم قدرت خاصیتی است در مسلم قدرت که مانعهای مستلزم در مسلم را قادر می سازد.

به دنبال وقوع اختلال «Disar banoe» در شرایط خاص، به دلیل شرایطی که در آن قرار می گیرد، نمی تواند مستلزم

خود را با تسلیه حفظ نماید.

۲- اختلالات زیادی نیز وجود دارند که خیلی نادر هستند و در هر یک از این موارد، اختلال که نام آن ۱۱ یا خارج از این

خیلی از موارد و اختلالاتی مانند تغییر تولید در آن وجود دارند.

۳- در این اختلال، نوعی بین مردم و خروجی بهم می خورد و از امتیاز و کمبود و منافع و دست ۵۵ در نتیجه آن

که در این صورت، تفاوتی بین مردم و هم این است که در این مورد، از شرایطی که چون نامش، ایران



ماستیک به این اختلال به گونه ای پاسخ دهد پس از طی گذر از شرایط عادی باز در «به نقطه» کار مایلی با نقطه

کار جدید و در این صورت می توانیم به سیستم پایدار است. ولی برعکس آن، یعنی اگر ماسین همچنان متناوب

دائمه باشد افتاد سیستم ناپایدار است. اصطلاحاً به این پایداری را پایداری زامویر و کو رفته می گویند.

این پایداری نسبی است یعنی مثلاً اگر چه ماسین حا با هم افزایش سرعت دهند باز هم می توانیم سیستم پایدار

است ولی اگر ماسین ها نسبت به هم تغییر سرعت دهند افتاد ناپایدار رخ داده است.

طالعه پایداری سیستم قدرت با توجه به نوع اختلال و دافعه اختلال به 3 دسته عمده تقسیم می شود:

الف) پایداری ماندگار: «steady state stability»

جد پایداری ماندگار عبارت است از حالت قدرت بارگذاری در ماسین قبل از اینکه ماسین از حالت سنکرون

نیز خارج شود «حداکثر قابل انتقال»

در این حالت اثر تغییرات تدریجی و کم دافعه مورد بررسی قرار گیرد «اگر توان در زمانی از ماسین بیش از  $P_{max}$

باشد می تواند ناپایداری رخ دهد»

ب) پایداری دینامیکی: «Dynamic stability» مساله پایداری دینامیکی نیز مانند پایداری ماندگار مربوط به

تغییرات تدریجی و اختلالات جزئی در سیستم می شود. تفاوت عمده مطالقه بایاری دینامیکی و بایاری ماندگار

مدل سازی ماس است. در مطالعه بایاری ماندگار، ریزانور را با منبع ولتاژ ثابت مدل می کنیم ولی در مطالعه بایاری

دینامیکی اثرات سیستم تحریک و داور و ..... و کنترل کننده ها را نیز مدل می کنیم.

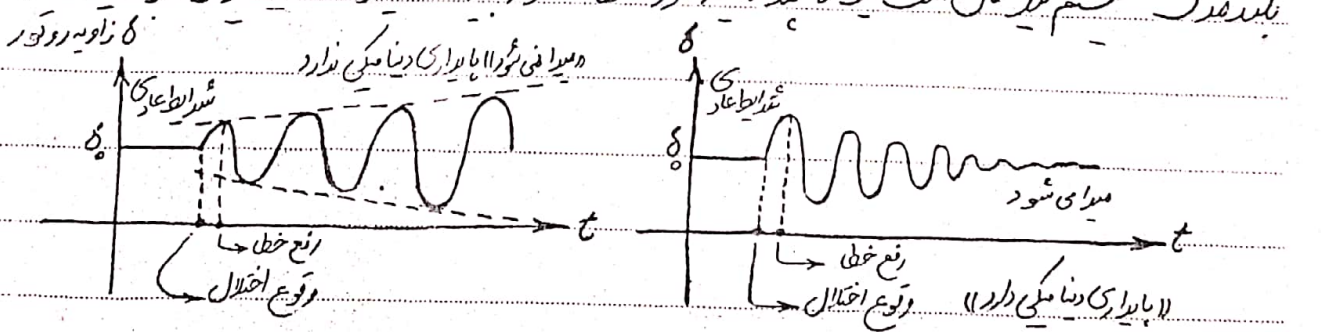
حجت بایاری دینامیکی سیستم به قطب های تابع تبدیل مربوط است. اگر قطب های سیستم پایدار باشند «تست حقیقی

منفی داشته باشند» و سیستم دارای بایاری دینامیکی بوده و در اثر اختلالات مبنی، نوسان پدیدارده داین نوسانات

میدر می شوند. اگر قطب های سیستم ناپایدار باشند نوسانات سیستم مدت زمان طولانی ادامه می یابد و سیستم

ناپایدار می گردد. معمولاً مطالعه بایاری دینامیکی برای حدود 30 ثانیه بعد از وقوع اختلال انجام می شود و دینامیک

بلند مدت سیستم نیز همان است یک تا چند دقیقه مورد مطالعه قرار بگیرد تا نوسانات میرایی شوند یا نه و



برای افزایش بایاری دینامیکی می توان از بایار ساز «PSS» یا کنترل کننده رانسوا استفاده نمود.

ج) بایاری گذرا Transient stability: این نوع بایاری شامل اختلالات ناگهانی و شدید مانند اتصال



کوتاه و خروجی کامل بار و باز شدن ناگهانی خط انتقال، خروج ریز تور و... می باشد. در این اختلال ها،

سرعت ماسین ها توان الکتریکی نقاط مختلف سیستم و زاویه قدرت «۱۱۵» ماسین ها تغییراتی شدید می کند.

اگر این اختلال به موقع کنترل و برطرف نشود، سیستم قطعی ناایدار خواهد شد و حتی اگر قطعی ناایدار داشته باشد ۱۱

اگر این اختلال به موقع کنترل و برطرف شود ماسین ها حالت سنگین تر نمی شود و حفظ کرده و سیستم دارای پایداری

گذرا خواهد بود و اگر چند ماسین است سیستم به قطعی می رسد، پایداری دینامیکی را داشته باشد و در نهایت ناایدار گردد ۱۱

برای مطالعه پایداری گذرا، دوره زمانی پایداری لغایت می گذرد و در این دوره، توان هائیک ماسین ها ثابت فرض

می شود. اگر در مدت این زمان، سیستم دارای پایداری باشد، آنگاه برای مطالعه پایداری گذرا در چند ثانیه بعدی، باید

سیستم کنترل ماسین ها را لحاظ کنیم.

از نظر پایداری گذرا، بیشترین نوع اختلال، اتصال کوتاه و بدترین محل وقوع اختلال، خطوط انتقال

نزدیک به ریز تورهای می باشد.

حد پایداری گذرا از حد پایداری ماندگار کمتر بوده و به نوع و مدت اختلال، محل وقوع بستگی دارد.

در تحلیل پایداری دینامیکی که اختلالات کوچک است، می توان معادلات غیر خطی سیستم را حول نقطه کار

Subject:

Year.

Month.

Day.

(85)

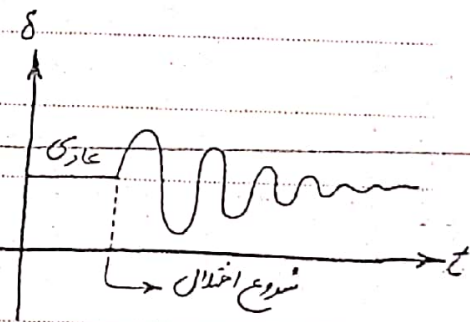
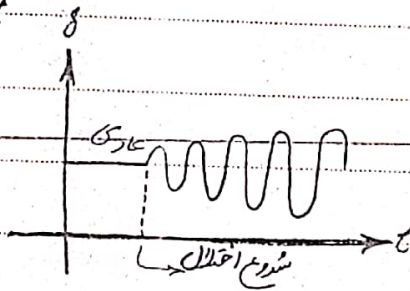
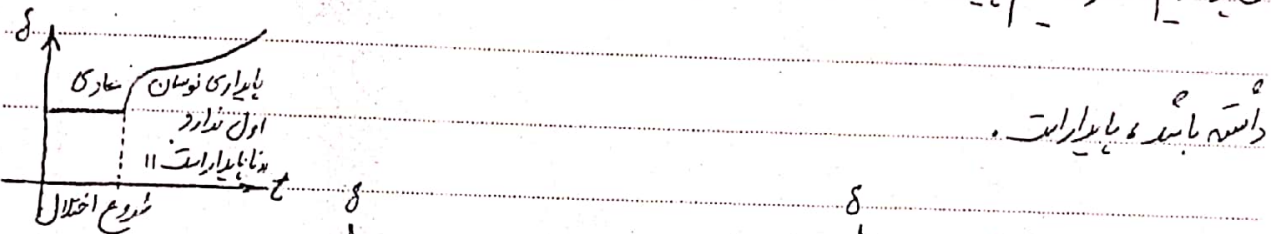
PAYA

خطی نموداری در تحلیل پایداری گذرا، باید خود محاسبات اصلی را به کار ببریم.

در این فصل، محروف مطالعه اختلالات بزرگ و لذا مطالعه پایداری گذرا یا به عبارتی مطالعه پایداری سکندون

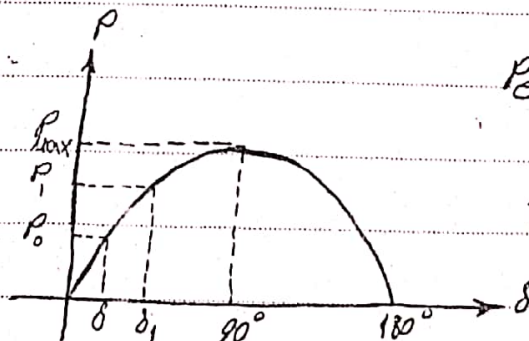
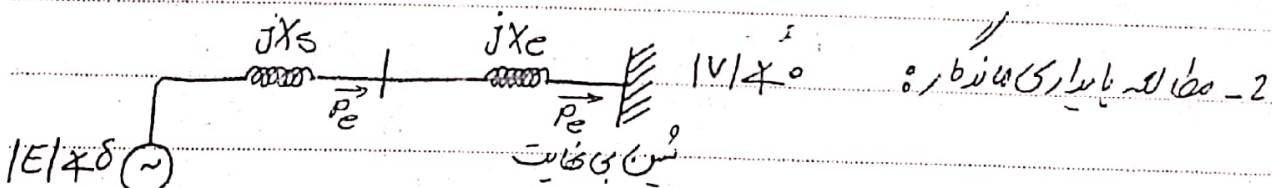
گذرا «مربوط به زاویه رتور» می باشد. در این مطالعه فقط به پایداری نوسان اول First swing از مجموعه نوسانات

می پردازیم. اگر سیستم پایداری نوسان اول نداشته باشد، باید بررسی کرد که آیا سیستم پایداری دینامیکی نیز



«پایداری نوع اول دارد» پایداری دینامیکی ندارد «دینامیکی نیست»

«پایداری است»



$$P_e = \frac{|E||V|}{X_s + X_e} \sin \delta$$

$$X_s = X_d \leftarrow \text{درمانده}$$





Subject:

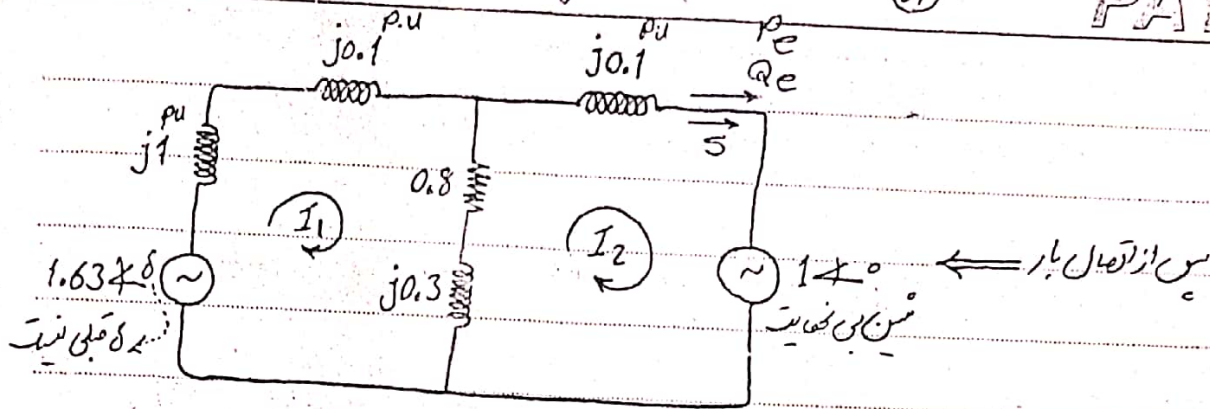
Year.

Month.

Day.

(87)

PAYA



$$I_2 = 1.305 \angle (8 - 95.6^\circ) - 1.509 \angle -55.9^\circ$$

$$S = V I_2^* = 1 \angle 0^\circ [1.305 \angle (95.6^\circ - 8^\circ) - 1.509 \angle 55.9^\circ]$$

pu

$$P_e = \text{Real}(S) = 1.305 \cos(95.6^\circ - 8^\circ) - 0.846$$

$$\max \{P_e\} : \delta = 95.6^\circ \Rightarrow P_{e_{\max}} = 1.305 - 0.846 = 0.459 \text{ pu}$$

مساعد می شود در این شرایط نمی توان، توان  $P = 0.75$  را به سیستم بی نهایت تحویل داد. لذا با اتصال

کلید K و وصل بار D، سیستم نابایاری شود «بایداری مانده نداریم»

3- دینامیک روتور و مداره نوسان:

\* وقوع اختلال ناگهانی در شبکه  $\leftarrow P_a$  الکتریکی حرماش تغییر کند ولی هنوز  $P_m$  مکانیکی فرصت

تغییر نیافته است



- فرض کنید اختلال قطری باشد  $p_m < p_e$  « با صرف نظر از تلفات ماشین »:

کدرت اضافی «  $p_m - p_e$  » باعث ایجاد شتاب در ماشین می شود  $\leftarrow$  سرعت  $\omega$  و زاویه  $\theta$  از آن بزرگتر می شود و برعکس.

\* در دوره زمانی مطالعه بایداری نذر و معمولاً  $p_m$  مکانیکی ثابت فرض می شود و  $p_e$  الکتریکی حاصل از اختلال

تغییر است. مقدار نوسان  $T_a = T_m - T_e$  رابطه تقسیم  $p_a = p_m - p_e$  توان شتاب دهنده  $\leftarrow$  گشتاور الکتریکی و مکانیکی  $\leftarrow$  گشتاور مکانیکی در دوری « وابسته به جریان الکتریکی و توان الکتریکی »

شتاب زاویه ای  $\frac{rad}{s^2}$   $\leftarrow$  شتاب زاویه ای  $\frac{rad}{s^2}$   $\leftarrow$  سرعت زاویه ای  $\frac{rad}{s}$   $\leftarrow$   $p_a = T_a \omega_m = J \alpha \omega$   $\leftarrow$   $\left( \frac{M \cdot J \cdot s^2}{rad^2} \right)$   $\leftarrow$   $\left( \frac{M \cdot J \cdot s}{rad} \right) \mu = J \omega_m$   $\leftarrow$   $\left( \frac{M \cdot J \cdot s}{rad} \right) \mu = J \omega_m$   $\leftarrow$   $\left( \frac{M \cdot J \cdot s}{rad} \right) \mu = J \omega_m$

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} \mu \omega_m^2 \quad \leftarrow \text{انرژی جنبی ردار}$$

$$H = \frac{\text{انرژی جنبی ذخیره شده در سرعت استاندارد}}{\text{توان نامی ماشین}} \quad \leftarrow \text{توان نامی ماشین}$$

« خروجی  $H$  بزرگتر  $\leftarrow$  حتی ماشین بیشتر بوده و از لحاظ مکانیکی در یک پاسخ می دهد »

$$W_k = \frac{1}{2} \mu \omega_s^2 = H_{mach} \frac{\omega_s^2}{\omega_s} \quad \leftarrow \text{انرژی جنبی ماشین}$$

$$H = H_{mach} \frac{\omega_s}{\omega_b} \quad \leftarrow \text{در مبنا}$$

$$\omega_s = \frac{p}{2} \text{ rad} \quad \leftarrow \text{مکانیکی} \quad \Rightarrow \quad \omega_s = \frac{p}{2} \omega_s \quad \leftarrow \text{مکانیکی} \quad \Rightarrow \quad \mu = \frac{S_b H}{\pi f_e}$$

$$p_a = p_m - p_e = \mu a = \frac{S_b H}{\pi f_e} a \quad \Rightarrow \quad \frac{p_m - p_e}{S_b} = \frac{H}{\pi f_e} a \quad \Rightarrow \quad a = \frac{d^2 \delta(t)}{dt^2}$$

زاویه الکتریکی در توی  
زاویه E نسبت به V

$$\frac{d^2 \delta(t)}{dt^2} = \frac{\pi f_e}{H} (P_m - P_e)$$

نسبت ثابت اندیسی

- معادله نوسان (نمود تغییر نسبت به زمان در دوره گذرا):

- این معادله اساسی حاکم بر دینامیک درونی ماشین سنکرون در مطالعات پایداری انرژی می باشد.

- این معادله دیفرانسیل مرتبه دوم و به دو معادله دیفرانسیل مرتبه اول قابل بیان می باشد:

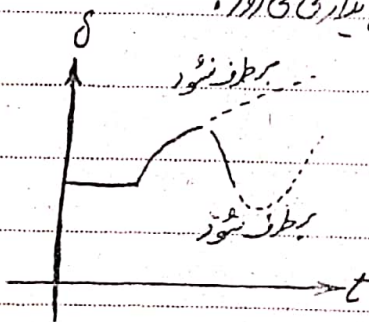
$$\begin{cases} \frac{2H}{\omega_s} \frac{d}{dt} \omega = P_m - P_e \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H} (P_m - P_e) \\ \frac{d}{dt} \delta = \omega - \omega_s \Rightarrow \frac{d\delta}{dt} = \omega (\text{rad/s}) - \omega_s (\text{rad/s}) \end{cases}$$

معادله نوسان:

- تازمانی که در سیستم اختلال نرسانه باشیم «برای عادی شدن»  $P_m = P_e \Leftrightarrow \omega = \omega_s, a = 0$  و  $\delta$  ثابت  
تقابل برقرار است

- وقوع اختلال ناشی از تغییر  $P_e$  الکتریکی  $\Leftrightarrow$  ایجاد شتاب  $a = \frac{d\omega}{dt}$  تغییر  $\omega$  و  $\delta$  پس معادله نوسان  
«ثابت  $P_m$ » «تغییری یا مثبت»

$\Leftrightarrow$  اگر این اختلال شدید بوده و برطرف نشود  $\Leftrightarrow$  سیستم به سمت ناپایداری می رود.



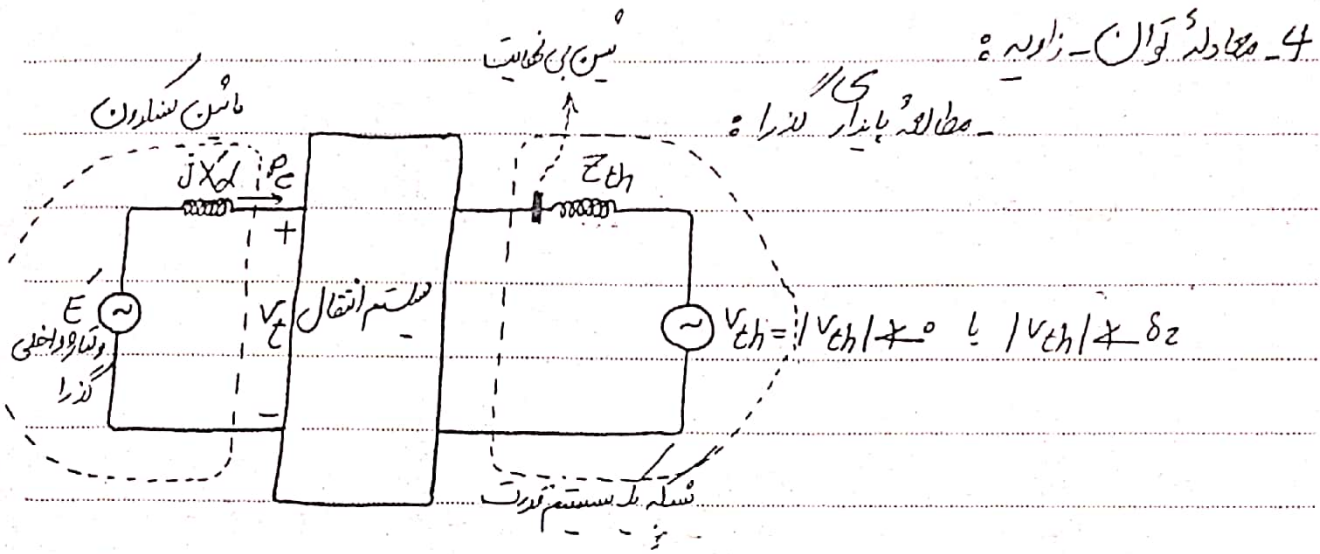
- خطه ژنراتورهای موجود در یک نیروگاه را می توان در میاسات

پایداری گذرا و باید ماشین الکتریکی سنکرون مدل نمود:

مجموع  $P_e$  ها =  $P_m$  معادل و  $H = H_{\text{mech}} \frac{s_1}{s_b} + H_{\text{mech}} \frac{s_2}{s_b} + \dots$

نسبت اندیسی ماشین ① در فضای خود





$$E' = |E| \cos \delta_1 \text{ یا } |E| \cos \delta_2, \quad V_L = |V_L| \cos \delta$$

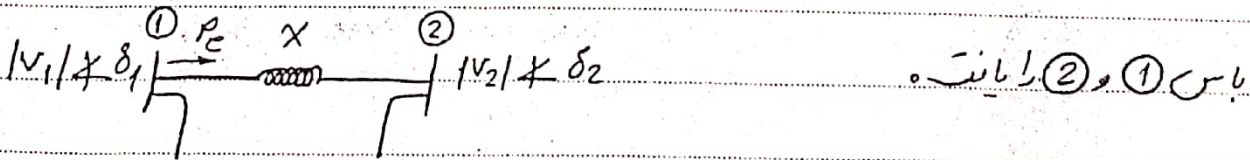
$$\delta = \delta_1 - \delta_2$$

در کل هدف این است که بسته به ساختار شبکه بین  $E$  و  $V_L$  «یعنی باس 1» و «2» یک رابطه بین  $P$  و  $\delta$

در  $\delta_1 - \delta_2$  استخراج کنیم. به این رابطه معادله  $\delta$  گفته می شود.

اگر ساختار به گونه ای باشد که بین  $E$  و  $V_L$  مدار پیچیده ای حاکم می باشد می توان ما ترسین  $V_L$  سیستم را شکل داده

و با قاعده حذف سین «در فصل اول» فقط 2 باس 1 و 2 را نگه داریم. انچه می توان اید این کل بین



$$P = \frac{|V_1| |V_2|}{X} \sin \delta$$

معنی  $\delta$  در رابطه  $P$  بر حسب «در مطالعه پایداری» لذا در هر حالت «حالت قبل

Subject:

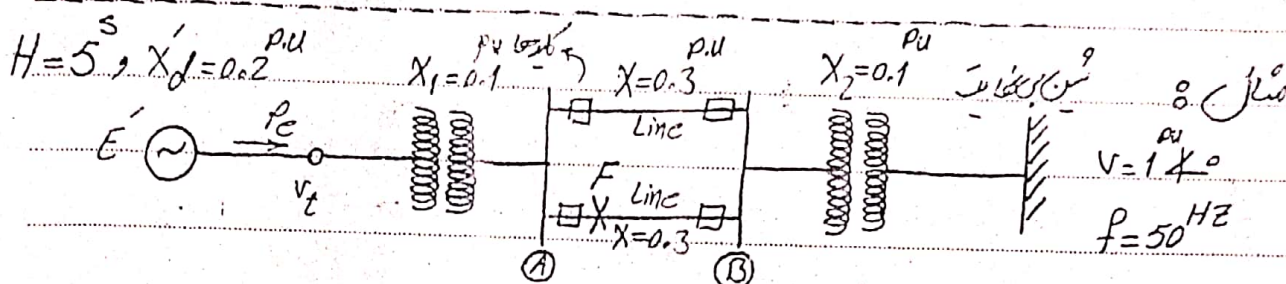
Year.

Month.

Day.

PAYA

از اختلال، حین اختلال، و بعد از رفع اختلال // این بخشی را با دستخط اچ بنویس. (3 مدار مختلف خواهم داشت)



در حین شرایط عادی و در نقطه F:  $P_e = 1$  و  $|V_t| = 1.02$  pu. شرایط عادی قبل از خط

اتصال کوتاه 3 فاز رخ دهد //  $BF = 2AF$ . پس از گذشت  $t_c = 0.1$  s از شروع اختلال، با عملکرد

کلیدهای A و B در زمان متوسط به خط مشیوب از مدار خارج شده و لذا اختلال رفع می گردد.

- مدار نه توان را برای همه زمانها بدست آورید.

$t < 0$  قبل از خط -  $t_c < t < 0$  حین خط -  $t > t_c$  بعد از رفع خط

قبل از اختلال:  $P_m = 1 \leftarrow P_e = 1$  pu برای کل 3 حالت تکیان است.

حل: 1) قبل از اتصال کوتاه:  $t < 0$

$|V_t|$  داده شده است ولی  $|E'|$  باید بیابیم:

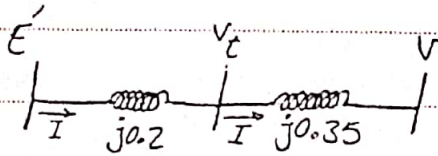
$$X = 0.1 + \frac{0.3}{2} + 0.1 = 0.35 \text{ pu}$$

$$|V_t| = 1.02$$

$$P_e = \frac{|V_t| |V|}{X} \sin(\delta - 0)$$



$$P_e = 1 \Rightarrow \frac{1.02 \times 1}{0.35} \sin(\delta - \delta_t) = 1 \Rightarrow \delta - \delta_t = 20.07^\circ \Rightarrow \delta_t = 1.02 \times 20.07^\circ$$



$$E' = (j0.2)I + V_t$$

$$I = \frac{V_t - V}{j0.35} = \frac{1.02 \times 20.07^\circ - 1 \angle 0^\circ}{j0.35} = 1.007 \angle 6.83^\circ$$

$$\Rightarrow E' = (j0.2)(1.007 \angle 6.83^\circ) + 1.02 \angle 20.07^\circ \Rightarrow E' = 1.084 \angle 30.5^\circ$$

معادل بین از خطی

در یک مدار با  $|E'| = 1.084$  و  $\delta = 30.5^\circ$  را ثابت فرض می‌کنیم. در زیر با استفاده از AVR ثابت داده شده است.

$$|E'| = 1.084 \angle \delta \quad \xrightarrow{P_e} \quad V = 1 \angle 0^\circ$$

شرایط عادی

$$X = 0.2 + 0.1 + \frac{0.3}{2} + 0.1 = 0.55$$

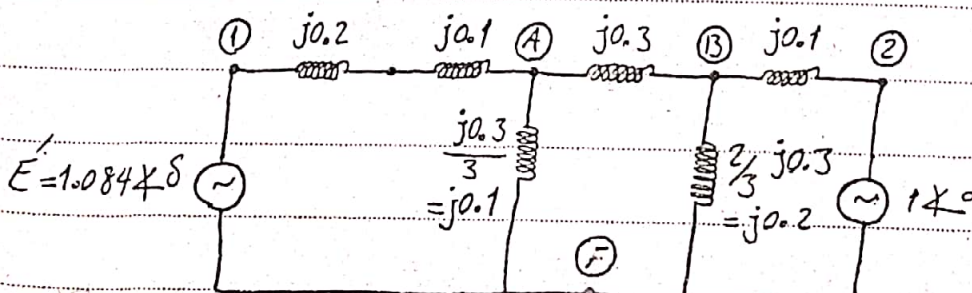
$$\Rightarrow P_e = \frac{|E'| |V|}{X} \sin(\delta - 0) = \frac{1.084 \times 1}{0.55} \sin \delta = 1.971 \sin \delta \Rightarrow P_e = 1.971 \sin \delta$$

$$\text{معادله توان: } \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi P}{H} (P_m^{P.u} - P_e^{P.u}) \Rightarrow \frac{d^2 \delta}{dt^2} = 31.42 (1 - 1.971 \sin \delta)$$

معادله توان در حالت ①

$$\delta = 30.5^\circ, P_e = 1, \frac{d^2 \delta}{dt^2} = 0, \frac{dw}{dt} = 0, w = w_0, \frac{d\delta}{dt} = 0$$

② حین اختلال:



Subject:

Year.

Month.

Day.

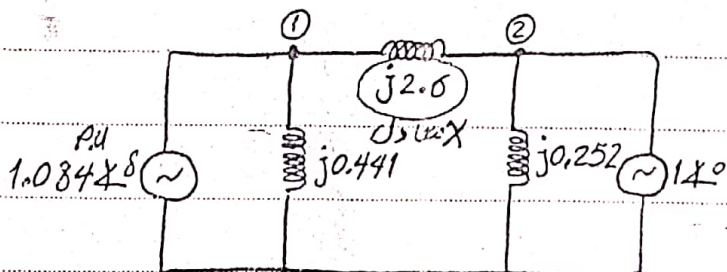
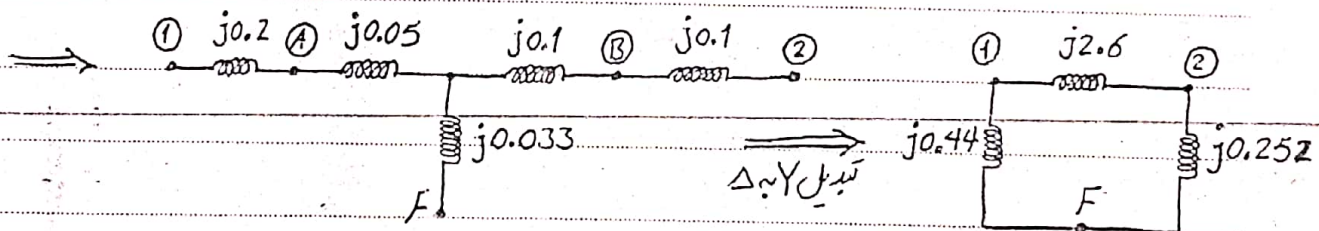
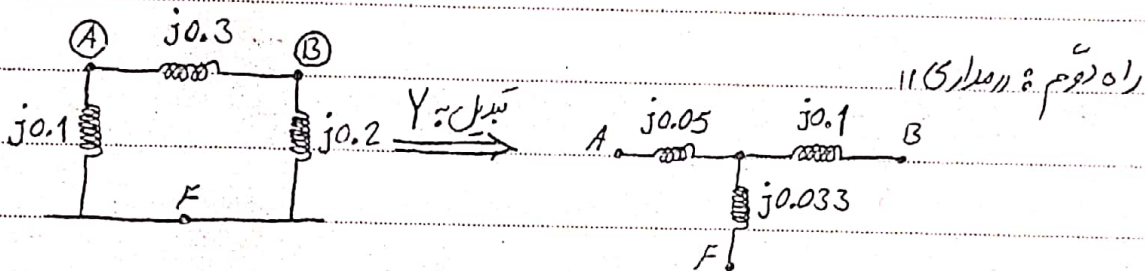
93

PAYA

حذف برای کردن  $X_{eq}$  بین ① و ② است. یک راه این است که  $Y_{bus}$  (④ و ③ و ① و ②) تبدیل

داره سده طبق اصل حذف سسین با بکهای ④ و ③ حذف شوند  $\leftarrow Y_{bus}$  ① و ② از این  $Y_{bus}$   $2 \times 2$

جدیدی توان را نشان می‌دهد بین ① و ② را مشخص دارد.



$$\Rightarrow P_e = \frac{1.084 \times 1}{0.26} \sin \delta \Rightarrow P_e = 0.4076 \sin \delta$$

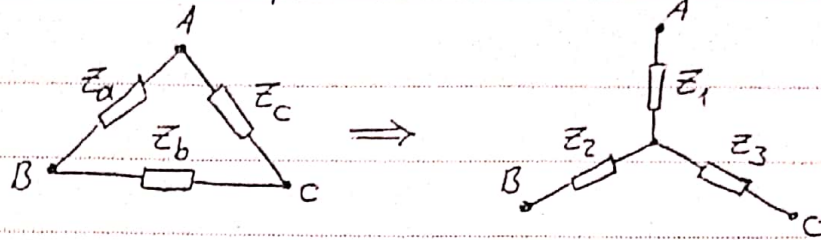
معادله  $P-\delta$  در حالت 2 در عین اختلال

$$\Rightarrow \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi F}{H} (1 - P_e) \Rightarrow \frac{d^2 \delta}{dt^2} = 31.416 (1 - 0.4076 \sin \delta)$$

معادله نوسان



نکته:  $\Delta \Rightarrow Y$



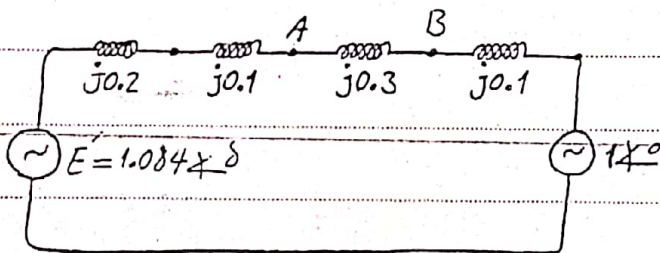
$$Z_1 = \frac{Z_a Z_c}{Z_a + Z_b + Z_c}, \quad Z_2 = \frac{Z_a Z_b}{Z_a + Z_b + Z_c}, \quad Z_3 = \frac{Z_b Z_c}{Z_a + Z_b + Z_c}$$

تبدیل  $Y \Rightarrow \Delta$   $Z_a = \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3}{Z_3}, \quad Z_b = \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3}{Z_1}$

$$Z_c = \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3}{Z_2}$$

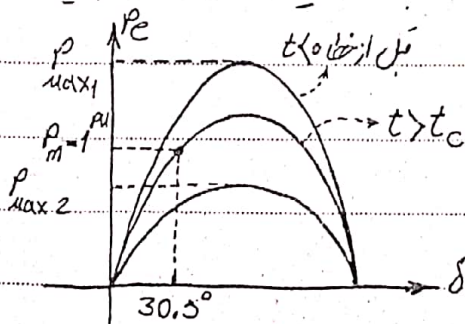
3- پس از رفع خط: «خط عبور قطع شده است»

$t > t_c$



$$\Rightarrow P_e = \frac{1.084 \times 1}{0.7} \sin \delta \Rightarrow P_e = 1.548 \sin \delta \Rightarrow \frac{d^2 \delta}{dt^2} = 31.416 (1 - 1.548 \sin \delta)$$

- با حل این معادلات، منحنی تغییرات  $\delta$  و  $W$  و  $P$  بر حسب زمان بدست می آید و می توان (در مورد پایداری)



$$P_{max2} = 0.4076 < P_{max3} = 1.548 < P_{max1} = 1.971$$

قبل از خط      به از خط      حین خط

5- معیار سطوح برابر:

معیار سطوح برابر روشی است که بواسطه آن در یک سیستم یک ماسه در برابر تغییرات

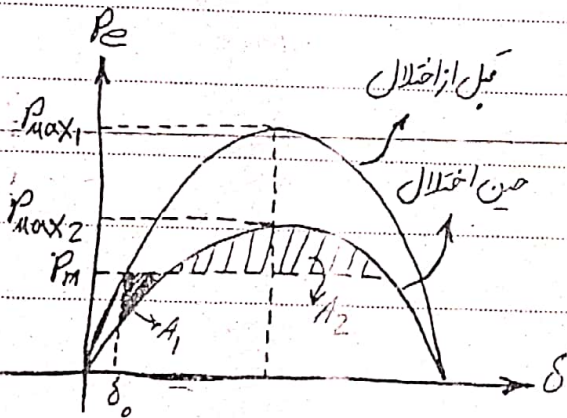
بهترین بی نهایت می توان بدون حل معادله نوسان، پایداری گذرا را تحلیل نمود. در این روش از

منحنی  $p-\delta$  بدست آمده برای هر حالت «قبل از اختلال» و «در حین اختلال» و «بعد از اختلال» استفاده می شود.

- فرض کنید قبل از اختلال،  $p-\delta$  بصورت  $p_e = p_{\max_1} \sin \delta$  باشد:

$$p_e = p_{\max_1} \sin \delta_0 \Rightarrow p_m = p_{\max_1} \sin \delta_0$$

- فرض کنید حین اختلال منحنی  $p-\delta$  بصورت  $p_e = p_{\max_2} \sin \delta$  باشد در حین اختلال ثابت و



برابر با همان  $p_m = p_{\max_1} \sin \delta_0$  می باشد.

در حالت اول  $p_m > p_e \leftarrow A_1$

در حالت دوم  $p_m < p_e \leftarrow A_2$

- در حین اختلال، نقطه کار جدید عبارت است از:

$$p_m = p_{\max_2} \sin \delta \Rightarrow \delta_1 = \sin^{-1} \frac{p_m}{p_{\max_2}}$$

«محل تلاقی  $p_m$  با  $p_{e2}$ »

\* عبارت  $(p_m - p_e)$  در فاصله  $\delta_0$  تا  $\delta_1$

سطح شتاب دهنده بوده و عبارت « $p_e - p_m$ » در فاصله  $\delta_1$  تا  $\delta_{\max}$ ، سطح گیرنده شتاب «سطح اندک شده» است.

است. در  $\delta = \delta_{\max}$  سطح  $A_2$  با سطح  $A_1$  برابر می شود و لذا  $\delta$  به  $\delta_1$  برمی گردد.



$$A_1 = A_2 \Rightarrow \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_{\max 2} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_{\max}} (P_{\max 2} \sin \delta - P_m) d\delta$$

- با توجه به اینکه  $\delta_1$  و  $\delta_{\max}$  یعنی مکان‌های هم‌نوسان که از این رابطه بدست آورد.

- معیار سطح برابر:

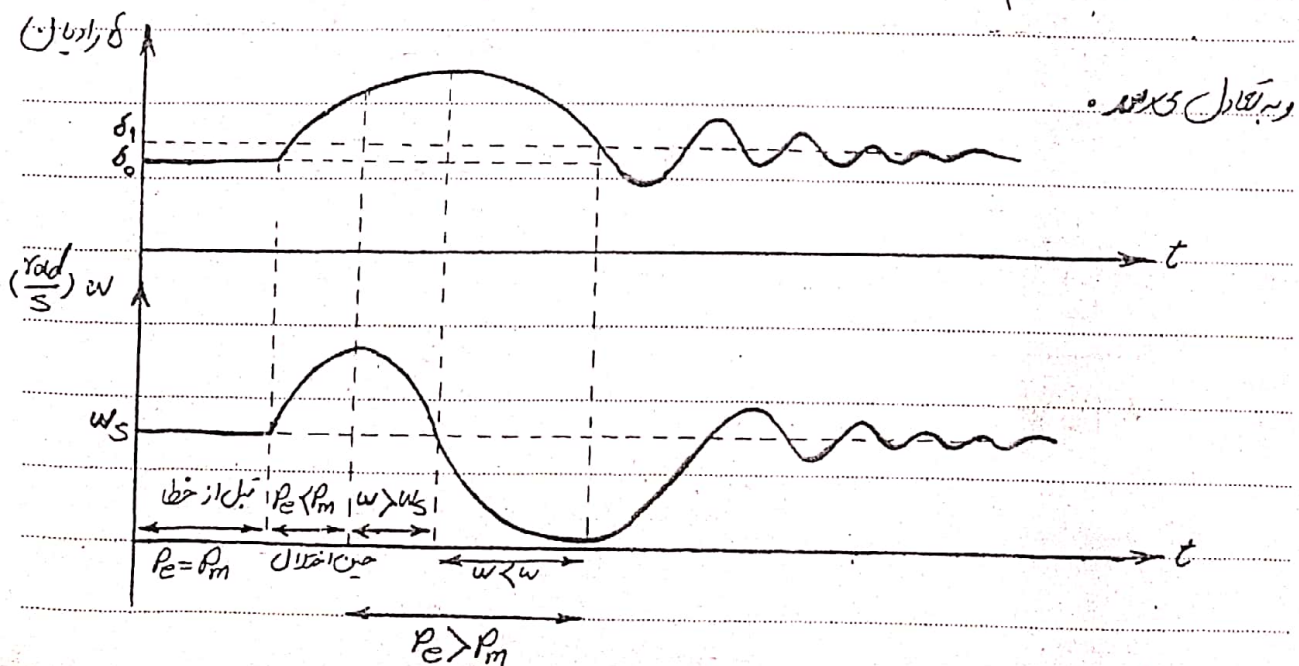
لذا اگر  $A_2$  بتواند با  $A_1$  برابر شود، پایداری گذرا حاصل می‌گردد. یعنی آنکه در روند افزایش

که در حین اختلال، اگر سطح  $A_2$  با  $A_1$  برابر باشد، پایداری گذرا بدست می‌آید. ولی اگر با افزایش  $\delta$  سطح

$A_2$  هیچ وقت با  $A_1$  برابر نشود، آنگاه که همچنان افزایش و در نهایت ماس‌ن نا پایداری شود.

- اگر به ازای یک  $\delta_{\max}$   $A_2 = A_1$  شد آنگاه که از این به بعد کاش می‌باید و به سمت  $\delta_1$  می‌رود و تحول یک نوسان

می‌کند. اگر سیستم دارای دینامیکی شد در نهایت در یک پهنای نوسان و نوسانات میرایی شوند و سیستم در نهایت پایداری شود

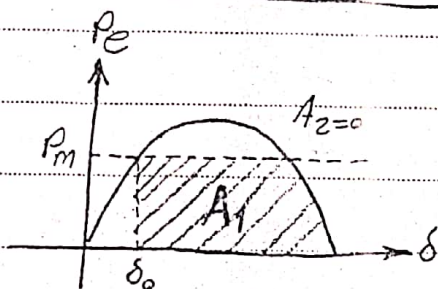


$$\begin{cases} \frac{dw}{dt} = \frac{w_s}{2H} (P_m - P_e) \\ \frac{d\delta}{dt} = w - w_s \end{cases}$$

بررسی برخی از اختلالات:

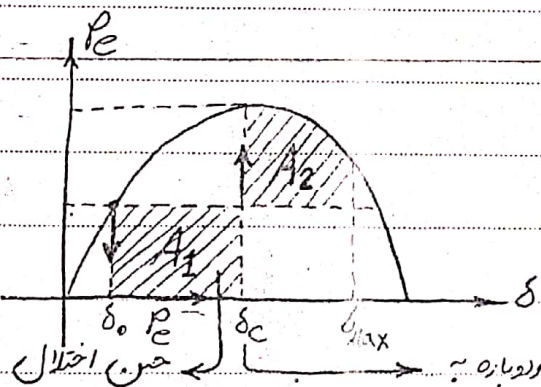
1- قطع ناگهانی توان انتقالی: فرض کنید در شرایط کاری  $P_e = P_m$ ،  $\delta = \delta_0$  هستیم.

خط انتقال قطع شود و  $P_e = 0$  گردد. اگر این اختلال رفع شود، سیستم ناپایدار گردد:



- فرض کنید در  $\delta = \delta_c$  اختلال برطرف شود

خط به مدار باز گردد:



- حال در  $\delta = \delta_{max}$ ،  $A_2 = A_1$  شده

و پایداری آنرا حاصل می گردد.

خط به مدار باز نشود و دوباره به  
نقطه بازی گردد

برای یافتن  $\delta_{max}$ :

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_m - 0) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_{max}} (P_{max} \sin \delta - P_m) d\delta$$

$$\Rightarrow P_m (\delta_c - \delta_0) = \int_{\delta_c}^{\delta_{max}} (P_{max} \sin \delta - P_m) d\delta \quad \leftarrow \text{لذا از رابطه مقابل  $\delta_{max}$  حاصل می شود}$$

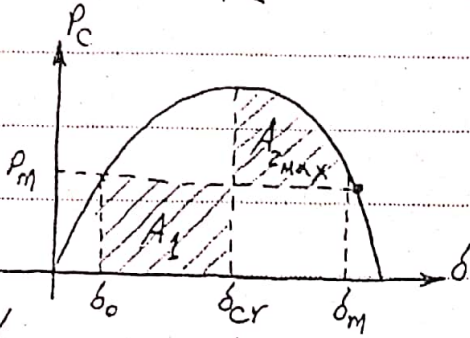
\* حال فرض کنید بخوانیم حد اکثر  $\delta$  را در حد اکثر  $\delta$  ای که به ازای آن باید خط رفع شود تا سیستم پایداری



خود کو از دست ندر « رابا سیم » ہے  $\delta_{cr}$  : زاویہ بحرانی رنغ خطا

- یعنی اگر در تراز این کو اھم خطا رنغ کنیم، فائدہ ای نداشتہ و سستم با پایداری ندر نخواھد داشت

و  $A_2$  صیغہ  $\delta_0$  با  $A_1$  برابر نخواھد شد.



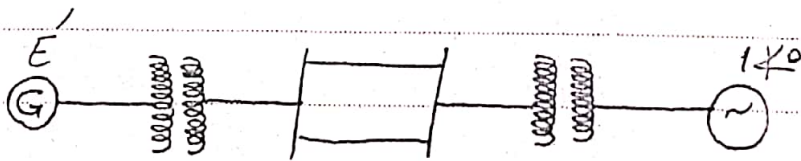
$$\delta_c = \delta_{cr} \Rightarrow A_2 = A_{2_{max}}$$

لہذا زاویہ بحرانی رنغ خطا « ماکزیمم  $\delta_{cr}$  » مجاز

$$\delta_{cr} \text{ : نقطہ مائیں } A_1 = A_{2_{max}} \Rightarrow \begin{cases} \underbrace{P_m(\delta_{cr} - \delta_0)}_{A_1} = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_m} (P_{max} \sin \delta - P_m) d\delta \\ \delta_m = \pi - \delta_0 \end{cases}$$

- بر زمان متناظر با  $\delta_{cr}$  رنغان بحرانی رنغ خطا کفہ میں نمود از محادہ نوسان درست می آید «  $t_{cr}$  »

مثال : « رحمان مثال قبلی اتصال کوتاه در نقطہ F »



$$P_c = 1.971 \sin \delta \text{ : قبل خطاها : راستیم} \quad P_c = 0.4076 \sin \delta \text{ : حين خطا}$$

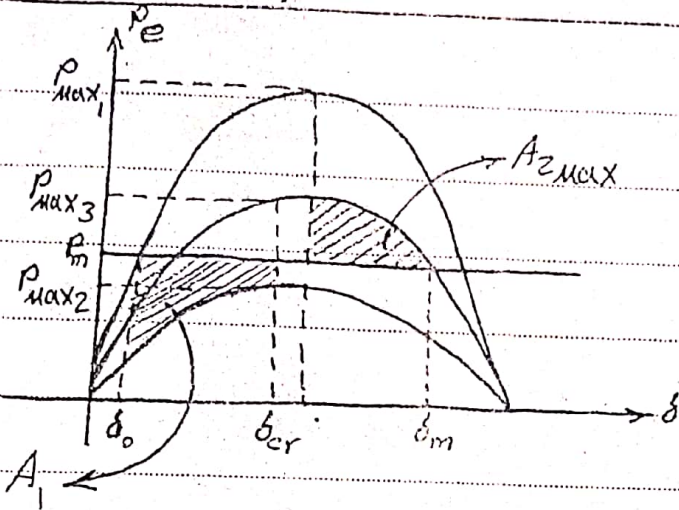
$$P_c = 1.548 \sin \delta \text{ : بعد از خطا}$$

Subject:

Year Month Day.

99

PAYA



$$\delta_0 = 30.5^\circ$$

الف) زاویه بحرانی رافع خط؟

$$A_1 = A_{\max 2}$$

$$\Rightarrow \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (1 - 0.4076 \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_m} (1.548 \sin \delta - 1) d\delta$$

$$\delta_m = \pi - \sin^{-1} \left( \frac{P_m}{P_{\max 3}} \right) = 139.76^\circ = 2.439 \text{ rad} \Rightarrow \delta_{cr} = 70.84^\circ$$

ب) فرض کنید در  $\delta_c = 50^\circ$  خط رافع شود  $\delta_{\max}$ ؟

$$A_1 = A_2 \Rightarrow \int_{\delta_0}^{\delta_c} (1 - 0.4076 \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_c=50}^{\delta_{\max}} (1.548 \sin \delta - 1) d\delta$$

$$\Rightarrow \delta_{\max} \text{ بدست می آید}$$



## فصل دوازدهم

### کنترل سیستم‌های قدرت



۱-۱۲ مقدمه

تاکنون در مطالب ارائه شده در فصول گذشته تمرکز روی مسائل عملکرد عادی و برنامه‌ریزی بهینه تولید برای یک سیستم قدرت بوده است. این فصل به کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو برای حفظ سیستم در حالت ماندگار می‌پردازد. افزون بر آن، مدل‌های ساده عناصر ضروری بکار گرفته شده در سیستم‌های کنترل نیز ارائه شده‌اند. هدف از خط‌مشی کنترل، تولید و تحویل توان در یک سیستم بهم پیوسته به نحوی است که تا حد امکان اقتصادی و قابل اعتماد بوده و همزمان با آن تغییرات ولتاژ و فرکانس در یک محدوده مجاز نگهداشته شود.

تغییر در توان اکتیو به‌طور عمده بر روی فرکانس سیستم اثر می‌گذارد، در حالی که توان راکتیو به تغییر فرکانس حساسیت کمتری داشته و به‌طور عمده به تغییر در اندازه ولتاژ بستگی دارد. بنابراین، می‌توان توان‌های اکتیو و راکتیو را به‌صورت جداگانه کنترل کرد. حلقه کنترل بار فرکانس (LFC)<sup>۱</sup>، توان حقیقی و فرکانس را کنترل کرده و حلقه تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ (AVR)<sup>۲</sup>، توان راکتیو و اندازه ولتاژ را تنظیم می‌کند. با رشد و توسعه سیستم‌های بهم پیوسته، کنترل بار فرکانس اهمیت زیادی کسب نموده و بهره‌برداری از سیستم بهم پیوسته را میسر نموده است. در حال حاضر نیز این موضوع اساس بیشتر مفاهیم پیشرفته را برای کنترل سیستم‌های قدرت بزرگ تشکیل می‌دهد. روش‌هایی که برای کنترل ژنراتورها به‌صورت منفرد و در نهایت کنترل سیستم‌های بزرگ بهم پیوسته ارائه شده‌اند، نقشی حیاتی در مراکز پیشرفته کنترل انرژی ایفا می‌کنند. مراکز پیشرفته کنترل انرژی (ECC)<sup>۳</sup> به رایانه‌های در حین کار<sup>۴</sup> مجهز شده‌اند که تمامی علائم دریافت شده از طریق

1- Load Frequency Control ( LFC )

2- Automatic Voltage Regulator ( AVR )

3- Energy Control Centers ( ECC )

4- On - line

سیستم‌های کسب اطلاعات از راه دور را که سیستم‌های کنترل نظارتی و کسب اطلاعات (SCADA)<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند پردازش می‌کنند. در اینجا فقط کنترل سیستم‌های قدرت معرفی شده است. این فصل از بعضی مفاهیم سیستم‌های کنترل پس‌خور<sup>۲</sup> استفاده می‌کند. برخی از دانشجویان ممکن است با نظریه کنترل پس‌خور به‌طور کامل آشنا نباشند. بنابراین، یک مرور خلاصه از مفاهیم اصلی تجزیه و تحلیل سیستم‌های کنترل خطی و طراحی آنها در پیوست (ب) ارائه شده است. نحوه استفاده از توابع موجود در جعبه‌ابزار کنترل در MATLAB<sup>۳</sup> و برخی از توابع مفید در این پیوست تشریح شده است.

ابتدا نقش کنترل خودکار تولید (AGC)<sup>۴</sup> در بهره‌برداری سیستم قدرت با توجه به کنترل توان خط ارتباطی<sup>۵</sup> در شرایط کارکرد عادی، تجزیه و تحلیل می‌شود. پاسخ‌های نوعی<sup>۶</sup> به تقاضای توان حقیقی با استفاده از جدیدترین روش‌های شبیه‌سازی موجود با بسته نرم‌افزاری SIMULINK در MATLAB تشریح شده است. در نهایت، نیاز به توان راکتیو و تنظیم ولتاژ و تأثیر آنها بر پایداری سرعت و کنترل تحریک با استفاده از علائم مناسب پس‌خور مورد بررسی قرار می‌گیرند.

## ۱۲-۲ حلقه‌های اصلی کنترل ژنراتور

در یک سیستم قدرت بهم پیوسته، تجهیزات کنترل بار فرکانس (LFC) و تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ (AVR) روی هر ژنراتور نصب شده‌اند. شکل ۱۲-۱ نمایش ساده‌ای از حلقه کنترل بار فرکانس و حلقه تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ را نشان می‌دهد. این کنترل‌کننده‌ها برای شرایط عملکرد ویژه‌ای تنظیم شده و اثر تغییرات جزئی در تقاضای بار را برای نگهداری فرکانس و اندازه ولتاژ در محدوده مشخصی خنثی می‌کنند. تغییرات کوچک در توان حقیقی به تغییرات زاویه رتور ( $\delta$ ) و در نتیجه فرکانس بستگی دارد. در حالی که توان راکتیو در واقع به‌طور عمده به اندازه ولتاژ (یعنی جریان تحریک

1-Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)

2-Feedback control

3-Matlab control toolbox

4-Automatic Generation Control (AGC)

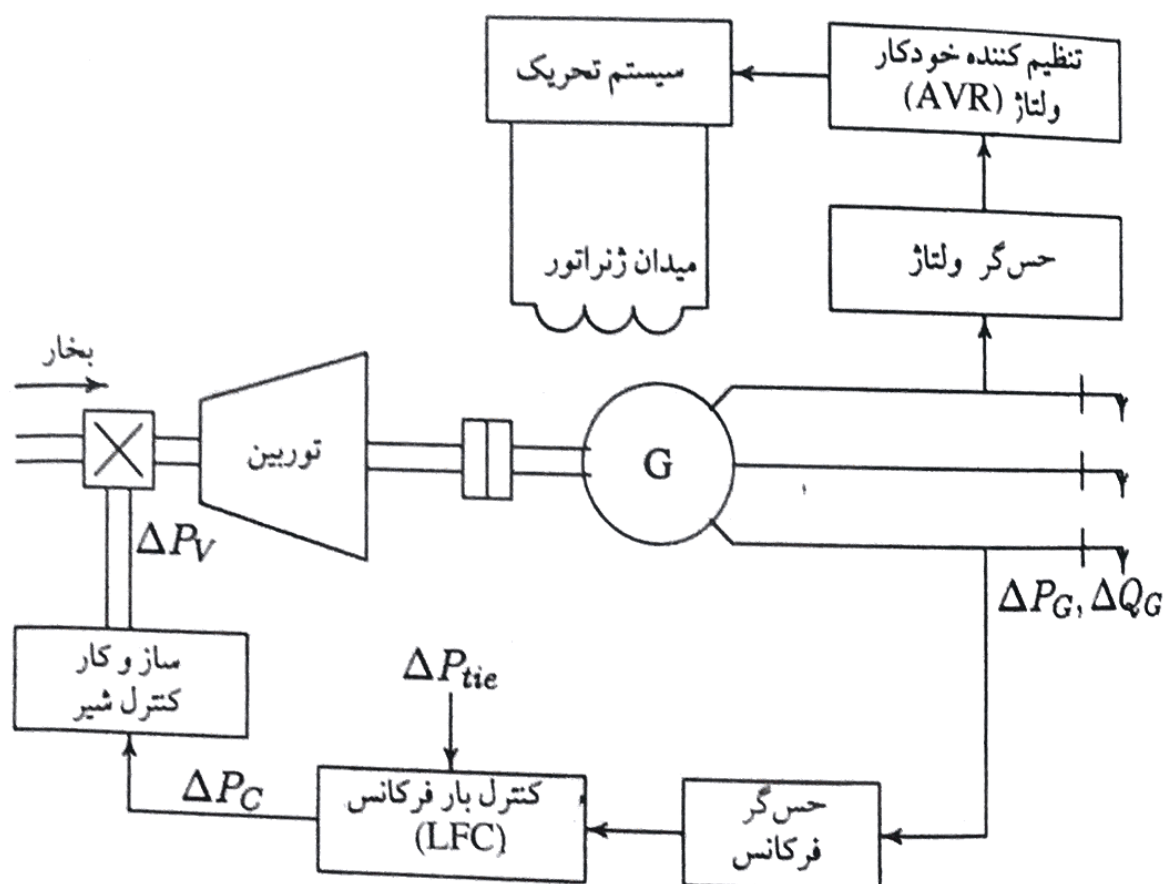
5-Tie - line

6-Typical responses

ژنراتور) بستگی دارد. ثابت زمانی سیستم تحریک خیلی کمتر از ثابت زمانی محرک اولیه است و نوسانات گذرای آن خیلی سریع مستهلک شده و اثری روی دینامیک LFC ندارد. بنابراین، اثرات متقابل بین حلقه LFC و حلقه AVR قابل چشم‌پوشی بوده و تجزیه و تحلیل کنترل بار فرکانس و کنترل ولتاژ تحریک به‌طور مستقل انجام می‌شود.

## ۱۲-۳ کنترل بار فرکانس

اهداف عملکرد سیستم LFC، حفظ فرکانس در حد مجاز و قابل قبول، تقسیم بار بین ژنراتورها و کنترل برنامه‌های تبادل توان در خطوط ارتباطی است. تغییرات در فرکانس و توان حقیقی در خط ارتباطی اندازه‌گیری می‌شود که تغییر در زاویه رتور ( $\delta$ )، یعنی خطای  $\Delta\delta$  است که باید اصلاح شود. علائم خطا  $\Delta f$  و  $\Delta P_{tie}$  تقویت و ترکیب شده و به سیگنال فرمان توان حقیقی  $\Delta P_V$  تبدیل می‌شود که به محرک اولیه برای افزایش گشتاور ورودی ارسال می‌گردد. بنابراین، محرک اولیه موجب تغییر در خروجی ژنراتور به میزان  $\Delta P_G$  شده که این خود باعث تغییر در مقادیر  $\Delta f$  و  $\Delta P_{tie}$  در حد دقت از پیش تعریف شده می‌گردد.



شکل ۱۲-۱ نمایش ساده AVR و LFC یک ژنراتور سنکرون



اولین مرحله در تجزیه و تحلیل و طراحی سیستم کنترل، مدل‌سازی ریاضی آن است. دو روش مرسوم عبارتند از :

- روش تابع تبدیل<sup>۱</sup>
- روش متغیرهای حالت<sup>۲</sup>

روش متغیرهای حالت را می‌توان برای سیستم خطی و غیرخطی بکار برد. برای استفاده از تابع تبدیل و معادلات حالت خطی، باید ابتدا سیستم را خطی کرد. فرضیات و تقریب‌های مناسب برای خطی‌سازی معادلات ریاضی بیان‌کننده رفتار سیستم در نظر گرفته شده و سپس مدل تابع تبدیل برای هر یک از عناصر زیر بدست می‌آید.

### ۱۲-۳-۱ مدل ژنراتور

با اعمال معادله نوسان ماشین سنکرون (۱۱-۲۱) به یک اختلال کوچک داریم:

$$\frac{\gamma H}{\omega_s} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (1-12)$$

یا بر حسب انحراف کوچک در سرعت، خواهیم داشت:

$$\frac{d\Delta \omega}{dt} = \frac{1}{\gamma H} (\Delta P_m - \Delta P_e) \quad (2-12)$$

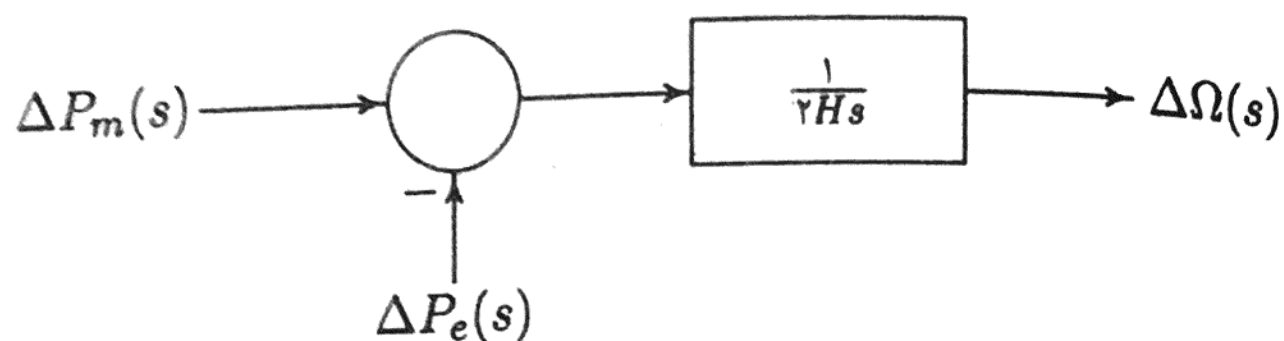
با استفاده از سرعت بر حسب pu (بدون ذکر pu) می‌توان نوشت :

$$\frac{d\Delta \omega}{dt} = \frac{1}{\gamma H} (\Delta P_m - \Delta P_e) \quad (3-12)$$

با بدست آوردن تبدیل لاپلاس طرفین رابطه (۳-۱۲)، داریم :

$$\Delta \Omega(s) = \frac{1}{\gamma H s} [\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)] \quad (4-12)$$

معادله بالا به صورت نمایش بلوکی در شکل ۱۲-۲ نشان داده شده است.



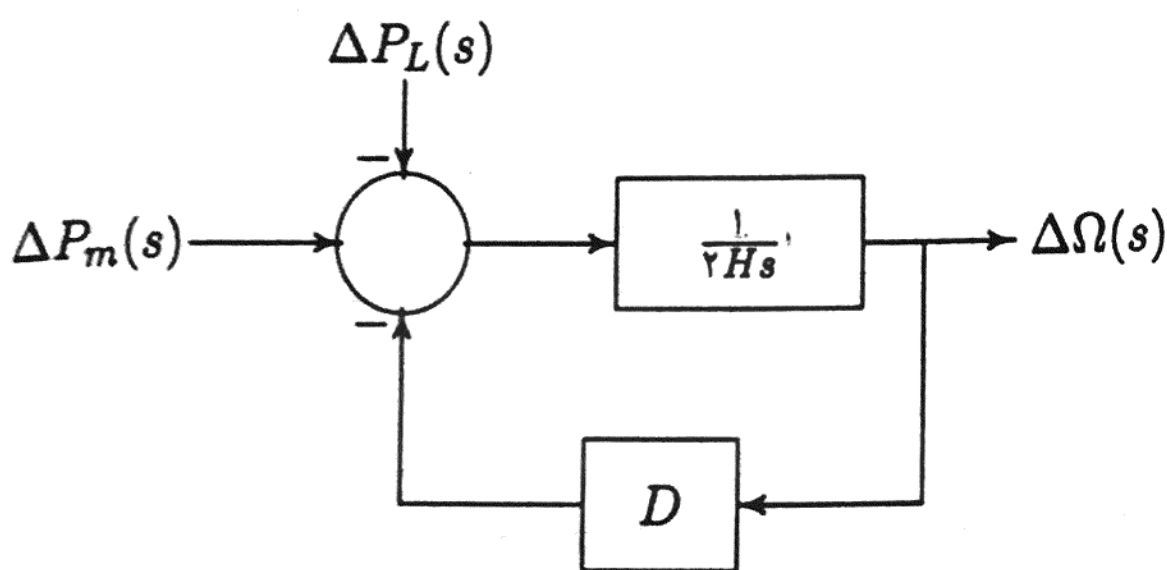
شکل ۱۲-۲ نمایش بلوکی ژنراتور سنکرون

### ۱۲-۳-۲ مدل بار

بار در سیستم قدرت شامل وسایل الکتریکی مختلفی است. در بارهای مقاومتی مانند روشنایی و بارهای حرارتی، توان الکتریکی به فرکانس بستگی ندارد. بارهای موتوری به تغییرات فرکانس حساس هستند. چگونگی حساسیت به فرکانس به ترکیب مشخصه‌های بار- سرعت در تمام وسیله‌های با محرک موتوری بستگی دارد. مشخصه بار- سرعت یک بار ترکیبی به صورت زیر تقریب زده می‌شود:

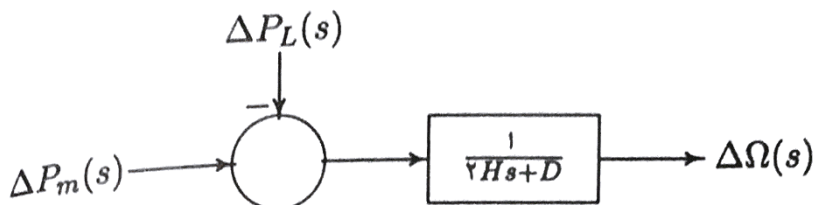
$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega \quad (۱۲-۵)$$

که در آن  $\Delta P_L$  به تغییرات فرکانس حساس نبوده اما جمله  $D\Delta\omega$  به تغییر فرکانس حساس است. کمیت  $D$  عبارتست از نسبت درصد تغییر بار به درصد تغییر فرکانس. برای مثال اگر بر اثر ۱ درصد تغییر در فرکانس، بار به میزان ۱/۶ درصد تغییر کند، آنگاه  $D = ۱/۶$  است. با در نظر گرفتن مدل بار در نمایش بلوکی ژنراتور، شکل ۱۲-۳ بدست می‌آید.



شکل ۱۲-۳ نمایش بلوکی ژنراتور و بار

حذف حلقه پس‌خور در شکل ۳-۱۲ منجر به نمایش بلوکی نشان داده شده در شکل ۴-۱۲ می‌شود.



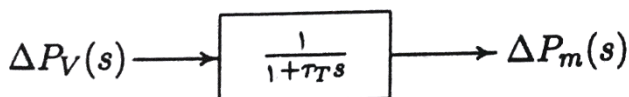
شکل ۴-۱۲ نمایش بلوکی ژنراتور و بار با حذف حلقه پس‌خور

### ۳-۳-۱۲ مدل محرک اولیه

منبع تولید توان مکانیکی که به‌عنوان محرک اولیه شناخته می‌شود، ممکن است توربین‌های هیدرولیکی در سدها، توربین‌های گازی و توربین‌های بخاری که انرژی آنها از سوزاندن زغال سنگ، گاز و سوخت هسته‌ای تأمین می‌شود باشد. این مدل برای توربین تغییرات در توان مکانیکی خروجی  $\Delta P_m$  را به تغییرات موقعیت شیر بخار  $\Delta P_v$  مرتبط می‌سازد. توربین‌های مختلف دارای مشخصه‌های متفاوتی هستند. ساده‌ترین مدل محرک توربین بخار بدون بازگرمایش<sup>۱</sup> دارای ساده‌ترین مدل محرک اولیه است که می‌توان آنرا فقط با یک ثابت زمانی  $\tau_T$  تقریب زد که تابع تبدیل آن به‌صورت زیر است:

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_v(s)} = \frac{1}{1 + \tau_T s} \quad (۶-۱۲)$$

نمایش بلوکی برای این توربین ساده در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است.

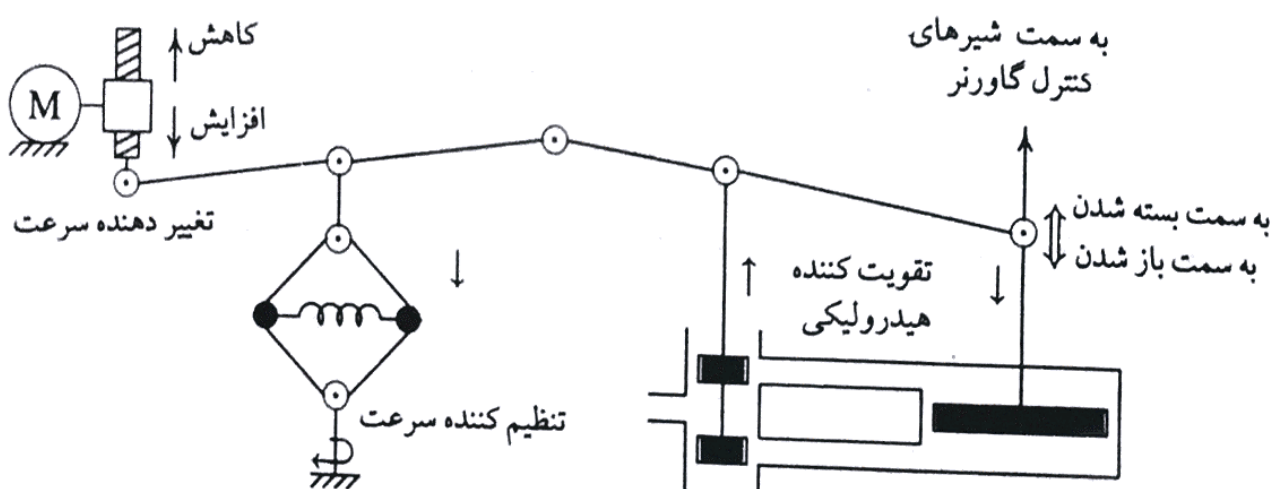


شکل ۵-۱۲ نمایش بلوکی برای یک توربین بخار ساده بدون بازگرمایش

ثابت زمانی  $\tau_T$  در محدوده زمانی  $0/2$  تا  $2$  ثانیه می‌باشد.

### ۱۲-۳-۴ مدل سیستم تنظیم کننده سرعت<sup>۱</sup>

هنگامی که بار الکتریکی ژنراتور به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد، توان الکتریکی از توان مکانیکی ورودی بیشتر می‌شود. این کمبود توان توسط انرژی جنبشی ذخیره شده در سیستم گردان تأمین گردد. کاهش در انرژی جنبشی موجب افت سرعت توربین و در نتیجه فرکانس ژنراتور می‌شود. این تغییر در سرعت توسط گاورنر توربین حس شده و شیر ورودی توربین را برای تغییر توان مکانیکی خروجی تنظیم می‌نماید تا سرعت را به حالت ماندگار جدید برساند. گاورنرهای اولیه از نوع گاورنرهای وات بوده که با کمک گوی‌های چرخان<sup>۲</sup>، تغییرات سرعت را حس نموده و حرکت مکانیکی لازم را برای پاسخ به تغییرات سرعت فراهم می‌کنند. با وجود این، بیشتر گاورنرهای پیشرفته از وسایل الکترونیکی برای حس کردن تغییرات سرعت استفاده می‌نمایند. شکل ۱۲-۶ نمایش ساده‌ای از قسمت‌های اصلی یک گاورنر متداول وات را نشان می‌دهد که از بخش‌های اصلی زیر تشکیل شده است:



شکل ۱۲-۶ سیستم تنظیم کننده سرعت

۱- تنظیم کننده سرعت گاورنر<sup>۳</sup>: بخش‌های اصلی آن گوی‌های چرخان گریز از مرکز

1- Governor model

2- Flyballs

3- Speed governor



هستند که به‌طور مستقیم یا از طریق چرخ‌دنده توسط محور توربین به حرکت در می‌آیند. این ساز و کار، یک حرکت عمودی در جهت بالا و پائین را متناسب با تغییر سرعت ایجاد می‌کند.

۲- ساز و کار ارتباطی: این ساز و کار شامل رابط‌هایی است که برای انتقال حرکت گوی‌های چرخان به شیرهای توربین از طریق یک تقویت‌کننده هیدرولیکی به کار می‌روند و همچنین یک پس‌خور از حرکت شیر توربین فراهم می‌سازد.

۳- تقویت‌کننده هیدرولیکی<sup>۱</sup>: نیروهای مکانیکی بسیار بزرگی برای عمل کردن شیرهای بخار مورد نیاز است. بنابراین، حرکت گاورنر از طریق یک تقویت‌کننده چند طبقه هیدرولیکی به یک نیروی بزرگ‌تر تبدیل می‌شود.

۴- تغییردهنده سرعت<sup>۲</sup>: تغییردهنده سرعت از یک موتور قابل تنظیم<sup>۳</sup> تشکیل می‌شود که می‌تواند به‌طور دستی یا خودکار برای برنامه‌ریزی بار در فرکانس نامی عمل نماید. با انتخاب این نقطه تنظیم، توزیع بار دلخواه می‌تواند در فرکانس نامی برنامه‌ریزی شود.

برای عملکرد پایدار، گاورنر طوری طراحی می‌شود که اجازه دهد با افزایش بار، سرعت کاهش یابد. مشخصه‌های حالت ماندگار این نوع گاورنر در شکل ۷-۱۲ نشان داده شده است.

شیب این منحنی نشان‌دهنده ضریب تنظیم سرعت<sup>۴</sup>  $R$  است. این گاورنرها دارای ضریب تنظیم سرعت ۵ تا ۶ درصد از صفر تا بار کامل هستند. ساز و کار تنظیم‌کننده سرعت به‌عنوان یک مقایسه‌کننده عمل می‌کند که خروجی آن  $\Delta P_g$  اختلاف بین توان تنظیم شده مرجع  $\Delta P_{ref}$  و توان  $\frac{1}{R} \Delta \omega$  است که از طریق مشخصه‌های سرعت گاورنر تعیین می‌شود، یعنی:

$$\Delta P_g = \Delta P_{ref} - \frac{1}{R} \Delta \omega \quad (7-12)$$

یا در حوزه  $s$  داریم:

$$\Delta P_g(s) = \Delta P_{ref}(s) - \frac{1}{R} \Delta \Omega(s) \quad (8-12)$$

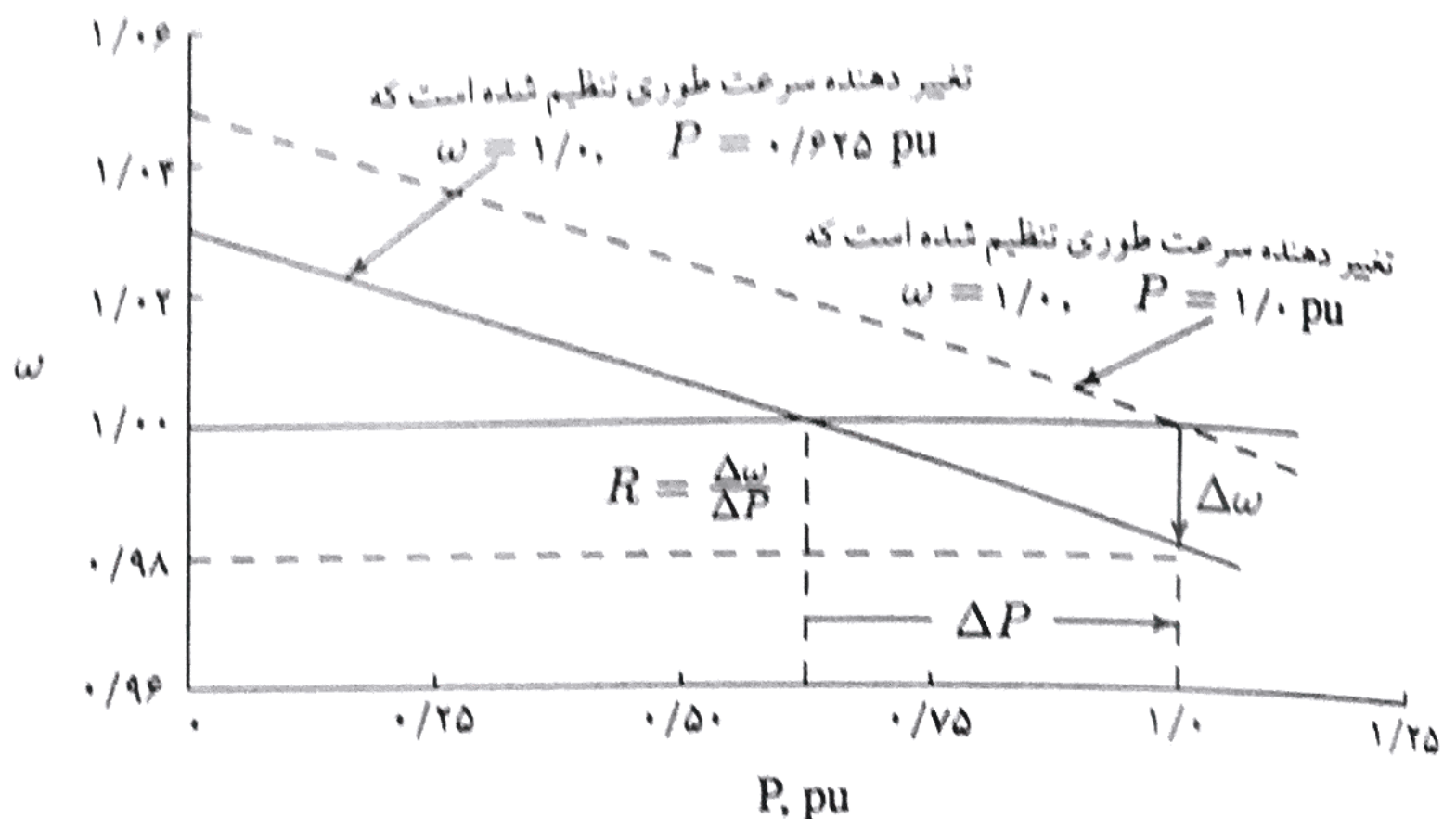
1- Hydraulic amplifier

2- Speed changer

3- Servomotor

4- Speed regulation





شکل ۷-۱۲ مشخصه‌های سرعت حالت ماندگار گاورنر

این فرمان ( $\Delta P_g$ ) از طریق تقویت‌کننده هیدرولیکی به فرمان موقعیت شیربخار ( $\Delta P_v$ ) تبدیل می‌شود. با فرض یک رابطه خطی و در نظر گرفتن یک ثابت زمانی ساده  $\tau_g$ ، رابطه زیر در حوزه  $s$  بدست می‌آید:

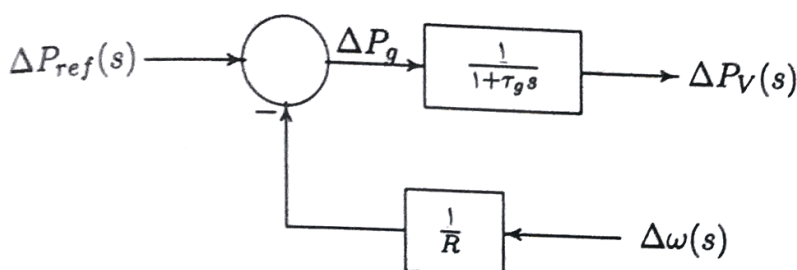
$$\Delta P_v(s) = \frac{1}{1 + \tau_g s} \Delta P_g(s) \quad (9-12)$$

معادلات (۸-۱۲) و (۹-۱۲) به صورت نمایش بلوکی در شکل ۸-۱۲ نشان داده شده است. ترکیب نمایش‌های بلوکی در شکل‌های ۴-۱۲، ۵-۱۲ و ۸-۱۲ منجر به نمایش بلوکی کامل کنترل بار فرکانس مربوط به یک سیستم قدرت مجزا شده (یک ناحیه‌ای) مطابق شکل ۹-۱۲ می‌شود. با انتخاب  $\Delta P_L(s)$  به عنوان ورودی و  $\Delta \Omega(s)$  به عنوان خروجی نمایش بلوکی شکل ۱۰-۱۲ بدست می‌آید. تابع تبدیل حلقه باز در نمایش بلوکی شکل ۱۰-۱۲ عبارتست از:

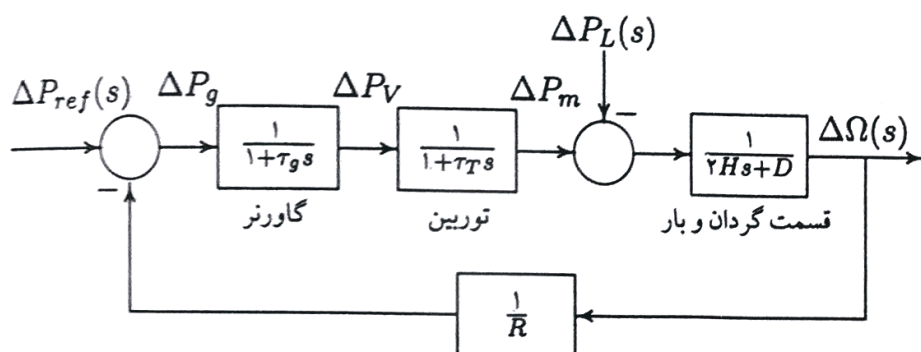
$$KG(s)H(s) = \frac{1}{R} \frac{1}{(\tau Hs + D)(1 + \tau_g s)(1 + \tau_T s)} \quad (10-12)$$

و تابع تبدیل حلقه بسته که نسبت تغییرات بار  $\Delta P_L$  به انحراف فرکانس  $\Delta \Omega$  می‌باشد، برابر است با:

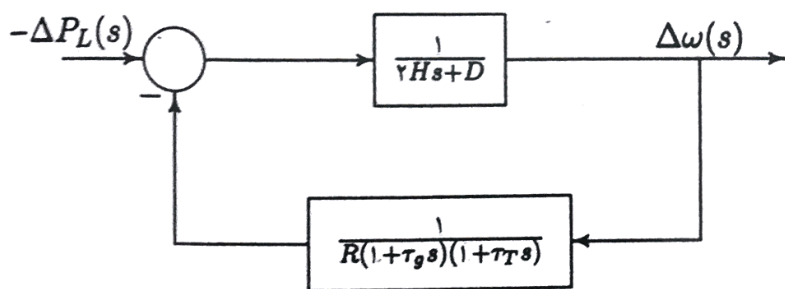
$$\frac{\Delta\Omega(s)}{-\Delta P_L(s)} = \frac{(1 + \tau_g s)(1 + \tau_T s)}{(\tau H s + D)(1 + \tau_g s)(1 + \tau_T s) + \frac{1}{R}} \quad (11-12)$$



شکل ۱۲-۸ نمایش بلوکی سیستم تنظیم کننده سرعت برای توربین بخار



شکل ۱۲-۹ نمایش بلوکی کنترل بار فرکانس یک سیستم قدرت مجزا شده



شکل ۱۲-۱۰ نمایش بلوکی LFC با ورودی  $-\Delta P_L(s)$  و خروجی  $\Delta\Omega(s)$

با

$$\Delta\Omega(s) = -\Delta P_L(s)T(s)$$

(۱۲-۱۲)

تغییر بار یک ورودی پله است، یعنی:

$$\Delta P_L(s) = \frac{\Delta P_L}{s}$$

با استفاده از قضیه مقدار نهائی، مقدار حالت ماندگار  $\Delta\omega$  برابر است با:

$$\Delta\omega_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s\Delta\Omega(s) = (-\Delta P_L) \frac{1}{D + \frac{1}{R}} \quad (۱۳-۱۲)$$

واضح است در حالتی که بار به فرکانس حساس نمی‌باشد ( $D = 0$ )، انحراف حالت ماندگار در فرکانس با ضریب تنظیم سرعت گاورنر تعیین می‌شود و عبارتست از:

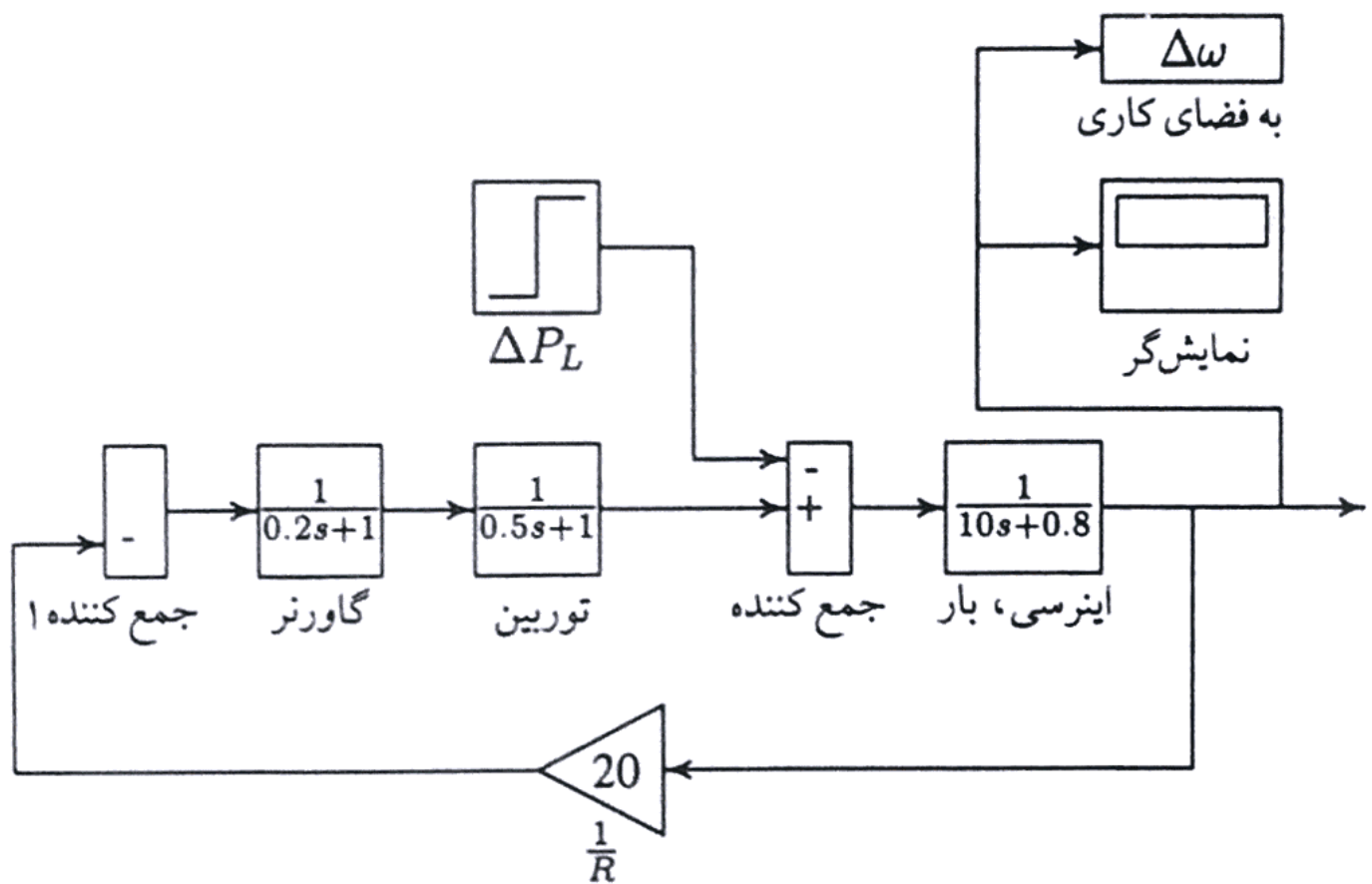
$$\Delta\omega_{ss} = (-\Delta P_L)R \quad (۱۴-۱۲)$$

هنگامی که چندین ژنراتور با ضرایب تنظیم سرعت گاورنر  $R_1, R_2, \dots, R_n$  به سیستم قدرت متصل شوند، انحراف فرکانس در حالت ماندگار از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta\omega_{ss} = (-\Delta P_L) \frac{1}{D + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad (۱۵-۱۲)$$

## مثال ۱۲-۲ (chp12ex2)

مشخصات یک سیستم یک ناحیه‌ای شامل دو واحد تولید در جدول ۱۲-۱ نشان داده شده است. این واحدها به صورت موازی و به طور مشترک توان  $900 \text{ MW}$  را در فرکانس نامی تأمین می‌کنند. واحد ۱ توان  $500 \text{ MW}$  و واحد ۲ توان  $400 \text{ MW}$  را در فرکانس  $60 \text{ Hz}$  تحویل می‌دهند. بار به اندازه  $90 \text{ MW}$  افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲-۱۴ نمایش بلوکی شبیه‌سازی برای مثال ۱۲-۱

جدول ۱۲-۱ مشخصات سیستم یک ناحیه‌ای برای مثال ۱۲-۲

شماره واحد	ظرفیت نامی (MVA)	ضریب تنظیم سرعت ( $R$ ) بر حسب pu در مبنای MVA واحد
۱	۶۰۰	۰/۰۶
۲	۵۰۰	۰/۰۴

(الف) با فرض اینکه هیچ بار وابسته به فرکانسی وجود ندارد ( $D = 0$ )، انحراف فرکانس در حالت ماندگار و تولید جدید هر واحد را حساب کنید.

(ب) چنانچه بار برای هر ۱ درصد تغییر در فرکانس به اندازه ۱/۵ درصد تغییر کند ( $D = 1/5$ )، انحراف فرکانس در حالت ماندگار و تولید جدید هر واحد را بدست آورید.

ابتدا باید ضریب تنظیم سرعت گاورنر هر واحد را در مبنای MVA مشترک بدست آورد. با انتخاب قدرت ظاهری MVA ۱۰۰۰ به عنوان مبنا، داریم:



$$R_1 = \frac{1000}{600} (0.06) = 0.1 \text{ pu}$$

$$R_2 = \frac{1000}{500} (0.05) = 0.1 \text{ pu}$$

تغییر بار بر حسب pu برابر است با:

$$\Delta P_L = \frac{90}{1000} = 0.09 \text{ pu}$$

(الف) با استفاده از رابطه (۱۲-۱۵) و با فرض  $D = 0$ ، انحراف فرکانس در حالت ماندگار بر حسب pu عبارتست از:

$$\Delta \omega_{ss} = \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{-0.09}{10 + 12/5} = -0.004 \text{ pu}$$

بنابراین، انحراف فرکانس در حالت ماندگار بر حسب Hz به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\Delta f = (-0.004)(60) = -0.24 \text{ Hz}$$

و فرکانس جدید برابر است با:

$$f = f_0 + \Delta f = 60 - 0.24 = 59.76 \text{ Hz}$$

تغییر در تولید برای هر واحد عبارتست از:

$$\Delta P_1 = -\frac{\Delta \omega}{R_1} = -\frac{-0.004}{0.1} = 0.04 \text{ pu}$$

$$= 40 \text{ MW}$$

$$\Delta P_2 = -\frac{\Delta \omega}{R_2} = -\frac{-0.004}{0.1} = 0.05 \text{ pu}$$

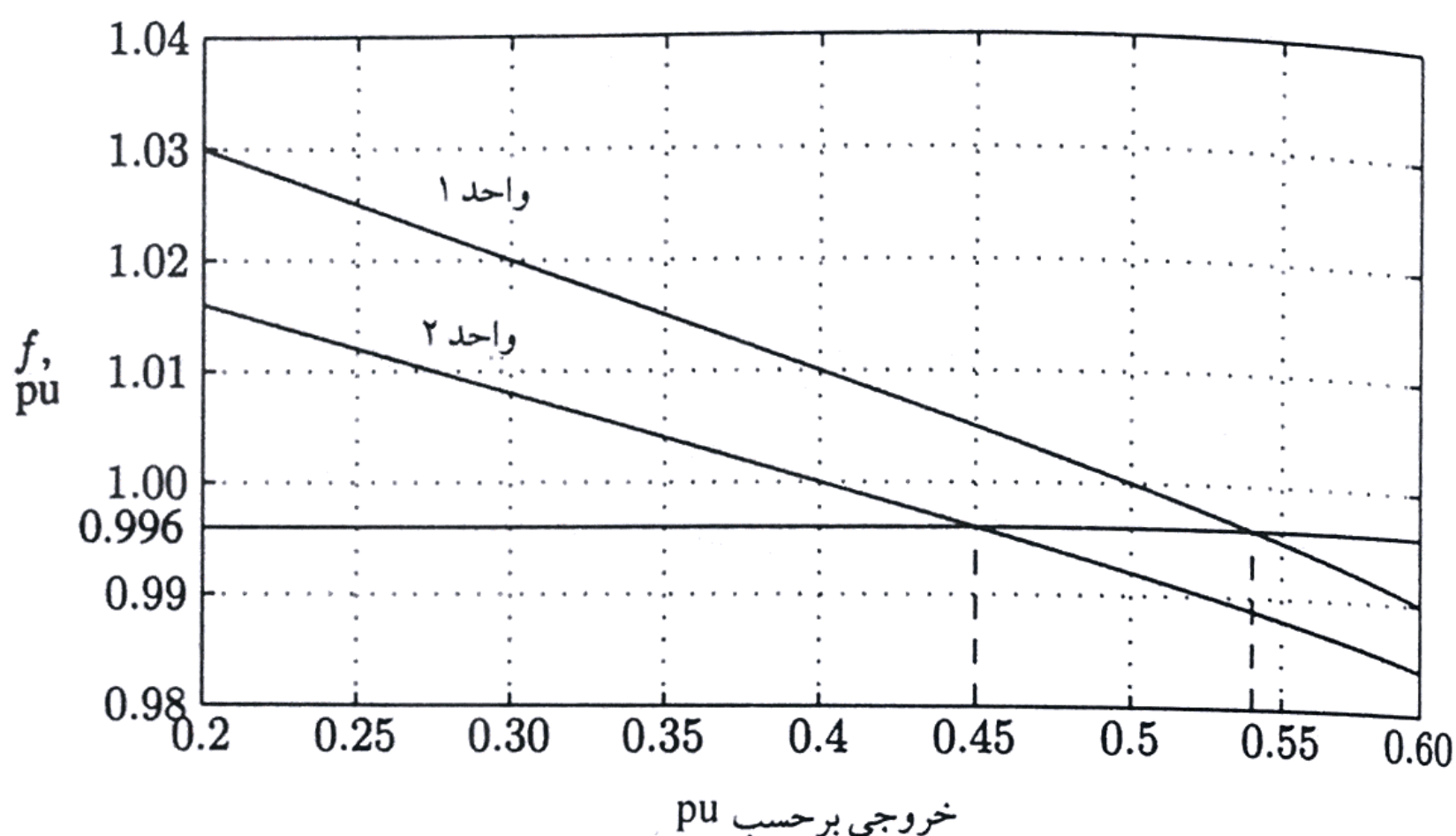
$$= 50 \text{ MW}$$

بنابراین، واحد ۱ توان ۵۴۰ MW و واحد ۲ توان ۴۵۰ MW را در فرکانس جدید ۵۹/۷۶ Hz تحویل



می‌دهند.

نرم‌افزار MATLAB برای رسم مشخصه‌های سرعت بر حسب pu هر گاورنر مورد استفاده قرار گرفته و نتیجه در شکل ۱۲-۱۵ نشان داده شده است. از این شکل مشاهده می‌شود که تولید اولیه در فرکانس نامی ۱ pu برابر ۰/۵ pu و ۰/۴ pu است. با افزودن توان ۰/۰۹ pu، سرعت به ۰/۹۹۶ pu کاهش یافته و تولید واحدها به ۰/۵۴ pu و ۰/۴۵ pu رسیده‌اند.



شکل ۱۲-۱۵ تقسیم بار بین دو واحد برای مثال ۱۲-۲

(ب) برای  $D = 1/5$ ، انحراف فرکانس در حالت ماندگار بر حسب pu برابر است با:

$$\Delta\omega_{ss} = \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D} = \frac{-0.09}{10 + 12/5 + 1/5} = -0.00375 \text{ pu}$$

بنابراین، انحراف فرکانس در حالت ماندگار بر حسب Hz عبارتست از:

$$\Delta f = (-0.00375)(60) = -0.225 \text{ Hz}$$

و فرکانس جدید به صورت زیر بدست می‌آید:

$$f = f_0 + \Delta f = 60 - 0.225 = 59.775 \text{ Hz}$$

تغییر در تولید برای هر واحد برابر است با:

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= -\frac{\Delta \omega}{R_1} = -\frac{-0.00375}{0.1} = 0.0375 \text{ pu} \\ &= 5.625 \text{ MW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_2 &= -\frac{\Delta \omega}{R_2} = -\frac{-0.00375}{0.08} = 0.046875 \text{ pu} \\ &= 46.875 \text{ MW} \end{aligned}$$

بنابراین، واحد ۱ توان ۵۳۷/۵ MW و واحد ۲ توان ۴۴۶/۸۷۵ MW را در فرکانس بهره‌برداری جدید ۵۹/۷۷۵ Hz تحویل می‌دهند. کل تغییر در تولید ۸۴/۳۷۵ MW است که ۵/۶۲۵ MW کمتر از تغییر بار ۹۰ MW است. این مسأله به دلیل تغییر بار ناشی از کاهش فرکانس است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} \Delta \omega D &= (-0.00375)(1/5) = -0.00075 \text{ pu} \\ &= -5.625 \text{ MW} \end{aligned}$$

## ۱۲-۴ کنترل خودکار تولید

هنگامی که بار یک سیستم قدرت افزایش یابد، سرعت توربین قبل از اینکه گاورنر بتواند ورودی بخار را با بار جدید تطبیق دهد، کاهش می‌یابد. هر چه تغییر در مقدار سرعت کم شود، سیگنال خطا کوچکتر شده و وضعیت گوی‌های چرخان گاورنر به نقطه لازم جهت حفظ سرعت ثابت نزدیک می‌شوند. به هر حال سرعت ثابت همان نقطه تنظیم شده نخواهد بود و انحرافی وجود خواهد داشت. یک روش بازگرداندن سرعت یا فرکانس به مقدار نامی خود، افزودن یک انتگرال‌گیر به سیستم است. واحد انتگرال‌گیر مقدار متوسط خطا را در یک دوره زمانی مشاهده و بر انحراف غلبه خواهد نمود به علت توانایی انتگرال‌گیر برای بازگرداندن سیستم به نقطه تنظیم اولیه، این کار به عمل تکمیلی

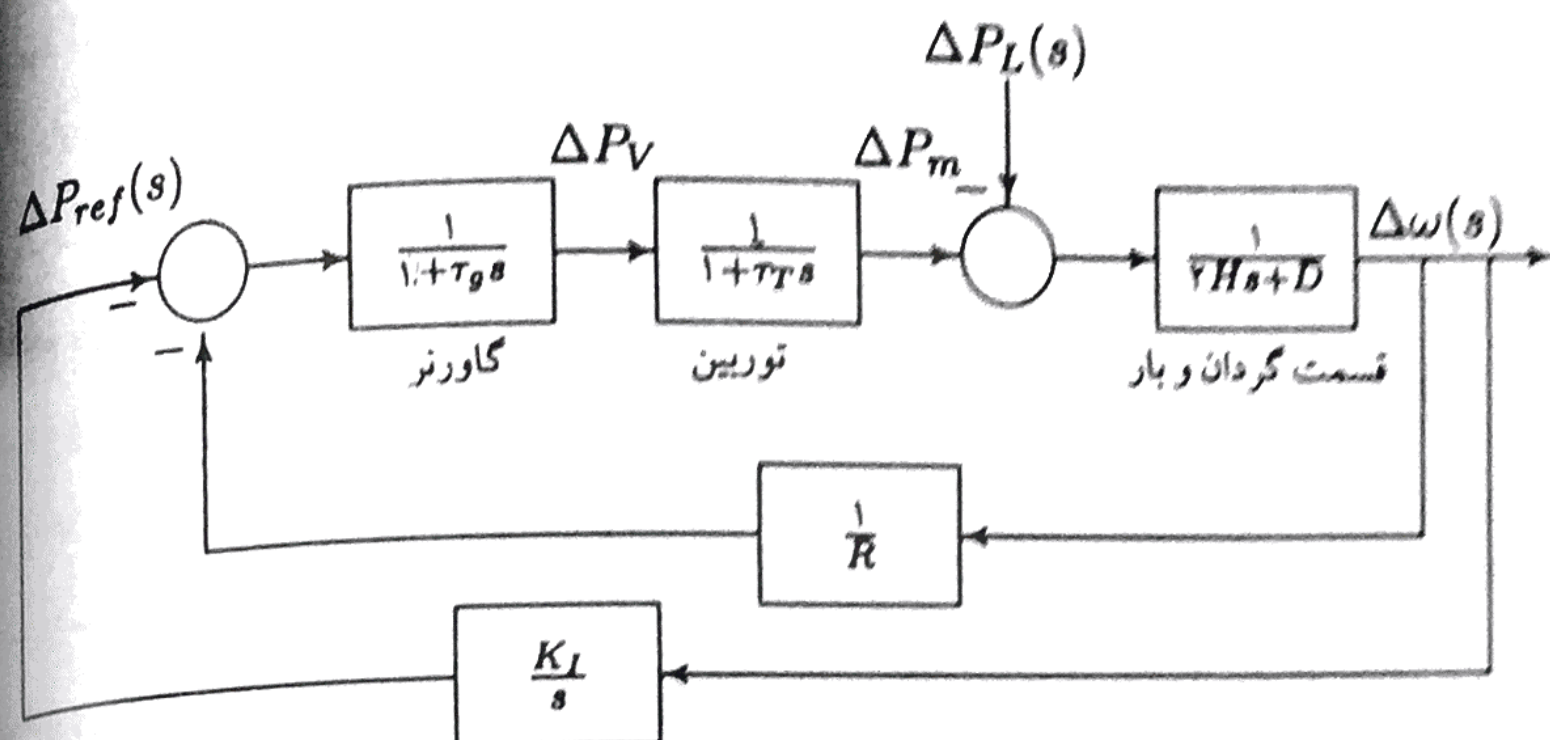
موسوم است. بنابراین، به علت پیوسته بودن تغییرات بار در سیستم، تولید به صورت خودکار برای بازگرداندن فرکانس به مقدار نامی تنظیم می‌شود. این روش، کنترل خودکار تولید (AGC) نامیده می‌شود. در یک سیستم بهم پیوسته که دارای تسهیلات اشتراکی متعددی می‌باشد، نقش AGC تقسیم بارها در بین سیستم، نیروگاه‌ها و ژنراتورهاست به نحوی که به یک حالت اقتصادی بهینه رسیده و به صورت صحیح تبادل توان برنامه‌ریزی شده از طریق خطوط رابط را با حفظ فرکانس بکخواخت در حد قابل قبول، کنترل کرد. البته به طور ضمنی فرض می‌شود که سیستم پایدار است، یعنی دستیابی به حالت ماندگار امکان‌پذیر است. در حین اختلال‌های بزرگ گذرا و حالت‌های اضطراری، از سیستم کنترل AGC استفاده نشده و کنترل‌های اضطراری دیگر به کار گرفته می‌شود. در ادامه این بخش، سیستم کنترل AGC در یک سیستم یک ناحیه‌ای و در یک سیستم قدرت چند ناحیه‌ای مورد بررسی قرار داده می‌شود.

#### ۱۲-۴-۱ کنترل AGC در یک سیستم یک ناحیه‌ای

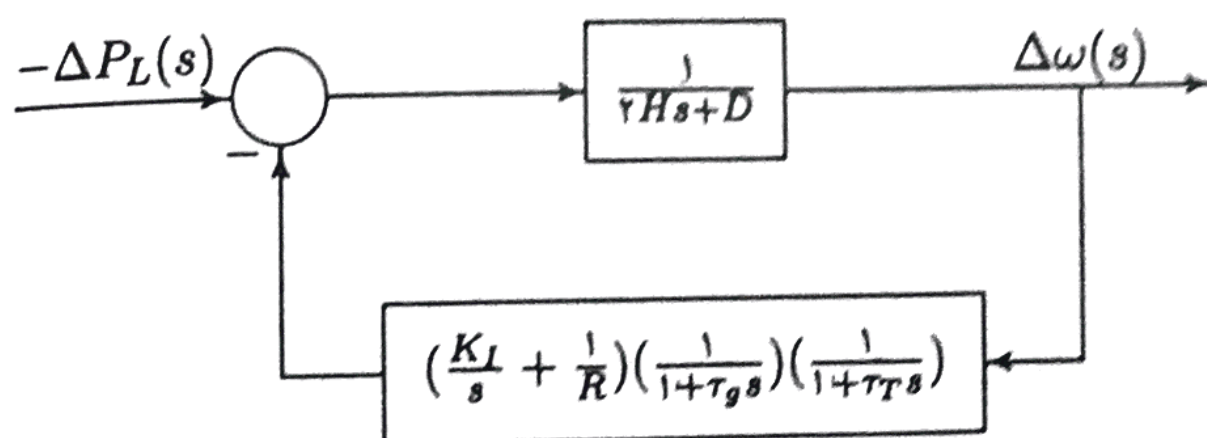
با توجه به حلقه اولیه LFC، یک تغییر در بار سیستم منجر به انحراف فرکانس در حالت ماندگار خواهد شد که مقدار انحراف فرکانس به ضریب تنظیم سرعت گاورنر بستگی دارد. برای کاهش انحراف فرکانس به سمت صفر باید عمل تکمیلی انجام شود که این عمل را می‌توان با اضافه کردن یک کنترل‌کننده انتگرالی به قسمت تنظیم بار مرجع، برای تغییر نقطه تنظیم سرعت انجام داد. کنترل‌کننده انتگرالی نوع سیستم را یک مرتبه افزایش داده که این خود انحراف فرکانس نهایی را به صفر می‌رساند. سیستم LFC با افزودن حلقه دوم در شکل ۱۲-۱۶ نشان داده شده است. بهره کنترل‌کننده انتگرالی ( $K_I$ ) باید برای پاسخ‌گذاری مطلوب تنظیم شود. از ترکیب شاخه‌های موازی در شکل ۱۲-۱۶، نمایش بلوکی معادل که در شکل ۱۲-۱۷ نشان داده شده است، حاصل می‌شود. تابع تبدیل حلقه بسته سیستم کنترل نشان داده شده در شکل ۱۲-۱۷ با در نظر گرفتن  $\Delta P_L$  به عنوان ورودی عبارتست از:

$$\frac{\Delta \Omega(s)}{-\Delta P_L(s)} = \frac{s(1 + \tau_g s)(1 + \tau_T s)}{s(2Hs + D)(1 + \tau_g s)(1 + \tau_T s) + K_I + \frac{s}{R}} \quad (12-16)$$





شکل ۱۶-۱۲ کنترل AGC برای یک سیستم قدرت یک ناحیه‌ای



شکل ۱۷-۱۲ نمایش بلوکی معادل AGC برای یک سیستم قدرت یک ناحیه‌ای

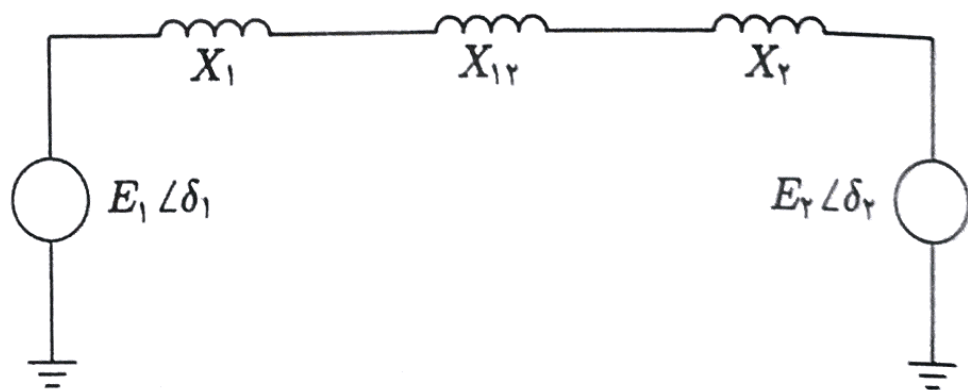
## ۱۲-۴-۲ کنترل خودکار تولید (AGC) در یک سیستم چند ناحیه‌ای

در بیشتر حالات، یک گروه از ژنراتورها وابستگی نزدیکی به یکدیگر داشته و با هم نوسان می‌کنند. افزون بر آن، توربین‌های ژنراتورها تمایل دارند که مشخصه‌های پاسخ یکسانی داشته باشند. چنین گروهی از ژنراتورها همسان<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند. در این صورت می‌توان حلقه LFC را برای نمایش تمام

---

<sup>۱</sup>- Coherent

سیستم در نظر گرفت که موسوم به ناحیه کنترل<sup>۱</sup> است. این کنترل خودکار تولید (AGC) برای یک سیستم چند ناحیه‌ای را می‌توان ابتدا با مطالعه آن برای سیستم دو ناحیه‌ای بررسی کرد. دو ناحیه نمایش داده شده با واحدهای تولید معادل را که توسط یک خط ارتباطی بدون تلفات و با راکتانس  $X_{tie}$  بهم متصل شده‌اند، در نظر بگیرید. هر ناحیه با یک منبع ولتاژ سری شده با یک راکتانس معادل مطابق شکل ۱۲-۲۰ نمایش داده می‌شود.



شکل ۱۲-۲۰ شبکه معادل برای یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای

در حین عملکرد عادی، توان حقیقی انتقال داده شده از طریق خط ارتباطی از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$P_{12} = \frac{|E_1||E_2|}{X_{12}} \sin \delta_{12} \quad (12-17)$$

که در آن:

$$X_{12} = X_1 + X_{tie} + X_2$$

$$\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$$

معادله (۱۲-۱۷) را می‌توان برای انحراف کوچک در توان عبوری از خط ارتباطی ( $\Delta P_{12}$ ) نسبت به



مقدار نامی آن به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned}\Delta P_{12} &= \left. \frac{dP_{12}}{d\delta_{12}} \right|_{\delta_{12_0}} \Delta\delta_{12} \\ &= P_s \Delta\delta_{12}\end{aligned}\quad (18-12)$$

کمیت  $P_s$  با شیب منحنی زاویه توان در زاویه عملکرد اولیه یعنی  $\delta_{12_0} = \delta_{1_0} - \delta_{2_0}$  برابر است. این کمیت در رابطه (۱۱-۳۹) به عنوان ضریب توان همگام‌ساز تعریف شده است. بنابراین، داریم:

$$P_s = \left. \frac{dP_{12}}{d\delta_{12}} \right|_{\delta_{12_0}} = \frac{|E_1||E_2|}{X_{12}} \cos \Delta\delta_{12_0} \quad (19-12)$$

در نتیجه انحراف توان خط ارتباطی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta P_{12} = P_s (\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2) \quad (20-12)$$

توان عبوری از خط ارتباطی به صورت یک افزایش بار در یک ناحیه و یک کاهش بار در ناحیه دیگر ظاهر می‌شود و به جهت عبور توان بستگی دارد. جهت عبور توان بوسیله اختلاف زاویه فاز تعیین می‌شود؛ اگر  $\Delta\delta_1 > \Delta\delta_2$  باشد، توان از ناحیه ۱ به ناحیه ۲ جاری می‌شود. نمایش بلوکی برای یک سیستم دو ناحیه‌ای در حالتی که سیستم LFC تنها شامل حلقه اولیه می‌باشد در شکل ۱۲-۲۱ نمایش داده شده است.

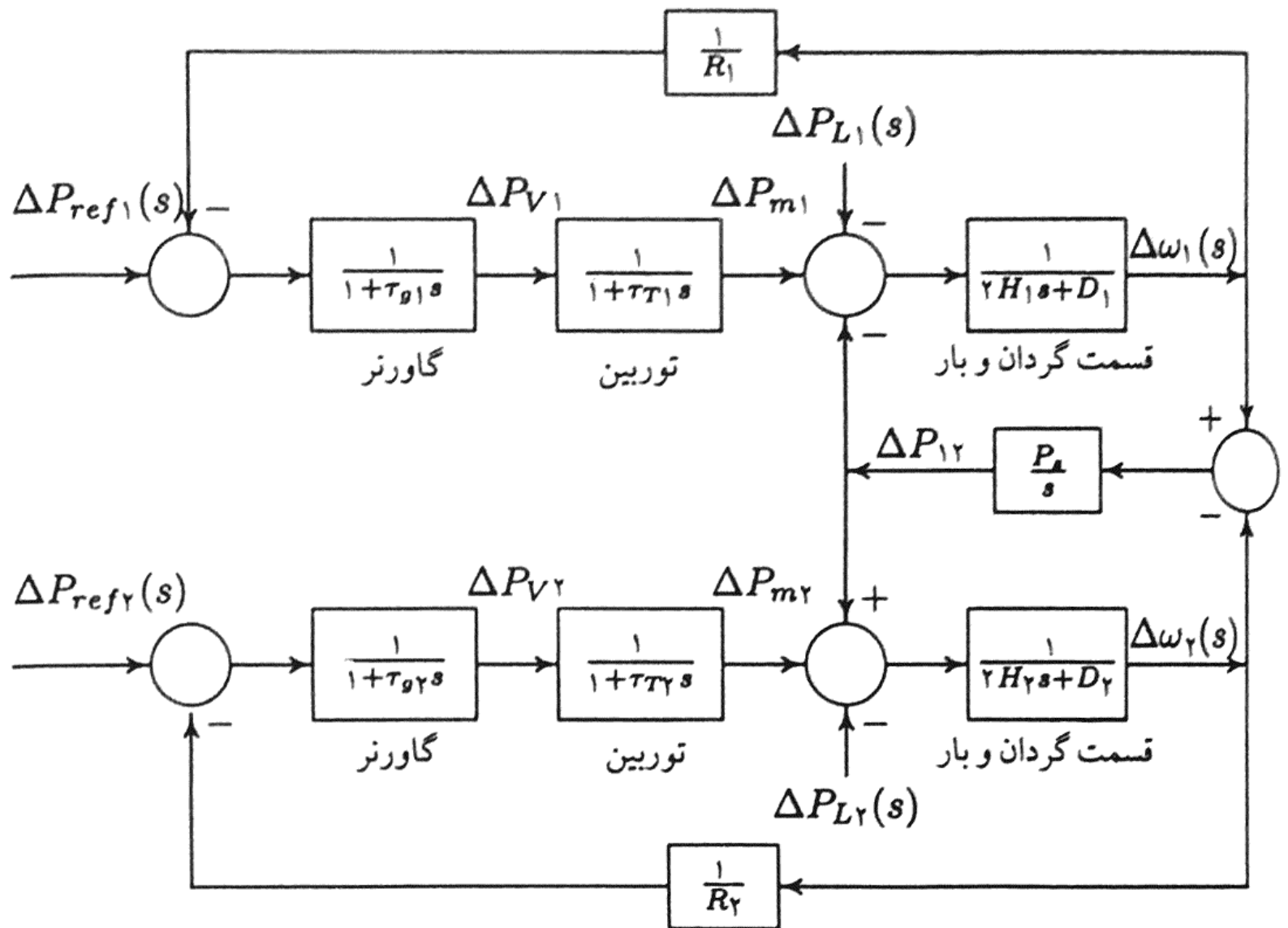
حال تغییر بار  $\Delta P_{L1}$  در ناحیه ۱ را در نظر بگیرید. در حالت ماندگار، هر دو ناحیه انحراف فرکانس یکسانی خواهند داشت، یعنی:

$$\Delta\omega = \Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 \quad (21-12)$$

و

$$\Delta P_{m1} - \Delta P_{12} - \Delta P_{L1} = \Delta\omega D_1 \quad (22-12)$$

$$\Delta P_{m2} + \Delta P_{12} = \Delta\omega D_2$$



شکل ۱۲-۲۱ سیستم دو ناحیه‌ای فقط با حلقه LFC اولیه

تغییر در توان مکانیکی توسط مشخصه‌های سرعت گاورنر تعیین می‌شود، یعنی:

$$\Delta P_{m1} = \frac{-\Delta \omega}{R_1} \quad (۲۳-۱۲)$$

$$\Delta P_{m2} = \frac{-\Delta \omega}{R_2}$$

با جایگزینی رابطه (۲۳-۱۲) در رابطه (۲۲-۱۲) و حل آن برای  $\Delta \omega$ ، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \Delta \omega &= \frac{-\Delta P_{L1}}{(\frac{1}{R_1} + D_1) + (\frac{1}{R_2} + D_2)} \\ &= \frac{-\Delta P_{L1}}{B_1 + B_2} \end{aligned} \quad (۲۴-۱۲)$$

که در آن:

$$B_1 = \frac{1}{R_1} + D_1 \quad (۲۵-۱۲)$$

$$B_2 = \frac{1}{R_2} + D_2$$

کمیات  $B_1$  و  $B_2$  موسوم به ضرایب گرایش فرکانس<sup>۱</sup> می‌باشند. تغییر در توان خط ارتباطی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} \Delta P_{12} &= - \frac{(\frac{1}{R_2} + D_2) \Delta P_{L1}}{(\frac{1}{R_1} + D_1)(\frac{1}{R_2} + D_2)} \\ &= \frac{B_2}{B_1 + B_2} (-\Delta P_{L1}) \end{aligned} \quad (۲۶-۱۲)$$

مثال ۱۲-۴ (chp12ex4), (sim12ex4.mdl)

یک سیستم دو ناحیه‌ای توسط یک خط ارتباطی مطابق داده‌های جدول ۱۲-۲ در مبنای مشترک ۱۰۰۰ MVA به یکدیگر وصل شده‌اند. این واحدها به صورت موازی و در فرکانس نامی ۶۰ Hz کار می‌کنند. ضریب توان هنگام‌ساز از شرایط عملکرد اولیه بدست آمده و مقدار آن  $P_s = 2$  pu می‌باشد. یک تغییر بار به اندازه ۱۸۷/۵ MW در ناحیه ۱ رخ می‌دهد.

(الف) فرکانس جدید حالت ماندگار و تغییر در توان جاری در خط ارتباطی را بدست آورید.

(ب) نمایش بلوکی SIMULINK را تشکیل داده و پاسخ انحراف فرکانس را برای شرایط بند (الف) تعیین کنید.

(الف) تغییر بار برحسب pu در ناحیه ۱ برابر است با:

$$\Delta P_{L1} = \frac{187.5}{1000} = 0.1875 \text{ pu}$$

جدول ۲-۱۲ داده‌های مثال ۴-۱۲

ناحیه	۱	۲
ضریب تنظیم سرعت	$R_1 = 0.05$	$R_2 = 0.0625$
ضریب حساسیت بار به تغییرات فرکانس	$D_1 = 0.6$	$D_2 = 0.9$
ثابت اینرسی	$H_1 = 5$	$H_2 = 4$
قدرت مبنای	۱۰۰۰ MVA	۱۰۰۰ MVA
ثابت زمانی گاورنر	$\tau_{g1} = 0.2 \text{ s}$	$\tau_{g2} = 0.3 \text{ s}$
ثابت زمانی توربین	$\tau_{T1} = 0.5 \text{ s}$	$\tau_{T2} = 0.6 \text{ s}$

انحراف فرکانس حالت ماندگار برحسب pu عبارتست از:

$$\Delta \omega_{ss} = \frac{-\Delta P_{L1}}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} = \frac{-0.1875}{(20 + 0.6) + (16 + 0.9)} = -0.005 \text{ pu}$$

بنابراین، مقدار انحراف فرکانس حالت ماندگار برحسب Hz به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\Delta f = (-0.005) \times 60 = -0.3 \text{ Hz}$$

و فرکانس جدید برابر است با:

$$f = f_0 + \Delta f = 60 - 0.3 = 59.7 \text{ Hz}$$

تغییر توان مکانیکی در هر ناحیه عبارتست از:

$$\Delta P_{m1} = -\frac{\Delta \omega}{R_1} = -\frac{-0.005}{0.05} = 0.1 \text{ pu} = 100 \text{ MW}$$



$$\Delta P_{m2} = -\frac{\Delta \omega}{R_2} = -\frac{-0.005}{0.0625} = 0.08 \text{ pu} = 8.0 \text{ MW}$$

بنابراین، ناحیه ۱ افزایش توانی برابر ۱۰۰ MW و ناحیه ۲ افزایشی برابر ۸۰ MW در فرکانس عملکرد جدید ۵۹/۷ Hz خواهند داشت. کل تغییر در تولید ۱۸۰ MW است که به مقدار ۷/۵ MW کمتر از مقدار اولیه تغییر بار ۱۸۷/۵ MW است. این اختلاف به دلیل تغییر در بارهای دو ناحیه ناشی از افت فرکانس می‌باشد.

تغییر در بار ناحیه ۱ برابر  $\Delta \omega D_1 = (-0.005) \times 0.6 = -0.003 \text{ pu}$  یا ۳ MW- بوده و تغییر در بار ناحیه ۲ برابر  $\Delta \omega D_2 = (-0.005) \times 0.9 = -0.0045 \text{ pu}$  یا ۴/۵ MW- می‌باشد. بنابراین، تغییر در بار کل ۷/۵ MW- است. توان عبوری از خط ارتباطی برابر است با:

$$\Delta P_{12} = \Delta \omega \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right) = -0.005 \times (16/9) = -0.0845 \text{ pu}$$

$$= -84/5 \text{ MW}$$

یعنی توان ۸۴/۵ MW از ناحیه ۲ به ناحیه ۱ جاری می‌شود که ۸۰ MW آن از افزایش تولید در ناحیه ۲ حاصل شده و ۴/۵ MW آن به خاطر کاهش بار در ناحیه ۲ ناشی از افت فرکانس است.

(ب) مدل SIMULINK با نام `sim12ex4.mdl` تهیه شده و در شکل ۱۲-۲۲ نشان داده شده است. این پرونده باز شده و در پنجره SIMULINK اجرا می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۲-۲۳، ارائه شده است. نمایش بلوکی این شکل بردار DP را که شامل  $P_{m1}$ ،  $P_{m2}$  و  $P_{12}$  می‌باشد بر می‌گرداند. منحنی تغییرات پاسخ توان بر حسب pu توسط نرم‌افزار MATLAB بدست آمده و در شکل ۱۲-۲۴ نمایش داده شده است.

## ۱۲-۶ کنترل ولتاژ و توان راکتیو

سیستم تحریک ژنراتور حفظ ولتاژ و کنترل توان راکتیو جاری را به عهده دارد. تحریک ژنراتور سیستم‌های قدیمی‌تر ممکن است از طریق حلقه‌های لغزشی و جاروبک‌ها توسط ژنراتورهای dc نصب شده روی محور رتور ماشین‌های سنکرون فراهم شود. با وجود این، سیستم‌های تحریک پیشرفته معمولاً از ژنراتورهای ac با یکسوسازهای گردان که سیستم‌های تحریک بدون جاروبک نامیده می‌شوند، استفاده می‌کنند.

همان‌طوری که دیده شد، تغییر در تقاضای توان حقیقی در اساس روی فرکانس اثر می‌گذارد، در حالی که تغییر در توان راکتیو به‌طور عمده روی اندازه ولتاژ مؤثر است. اثرات متقابل بین حلقه‌های کنترل ولتاژ و فرکانس معمولاً آن‌قدر ضعیف است که تجزیه و تحلیل جداگانه آنها را توجیه می‌کند. منابع تولید توان راکتیو عبارتند از : ژنراتورها، خازن‌ها و راکتورها. توان راکتیو ژنراتورها توسط

---

1- State estimation

2- Linear regulator

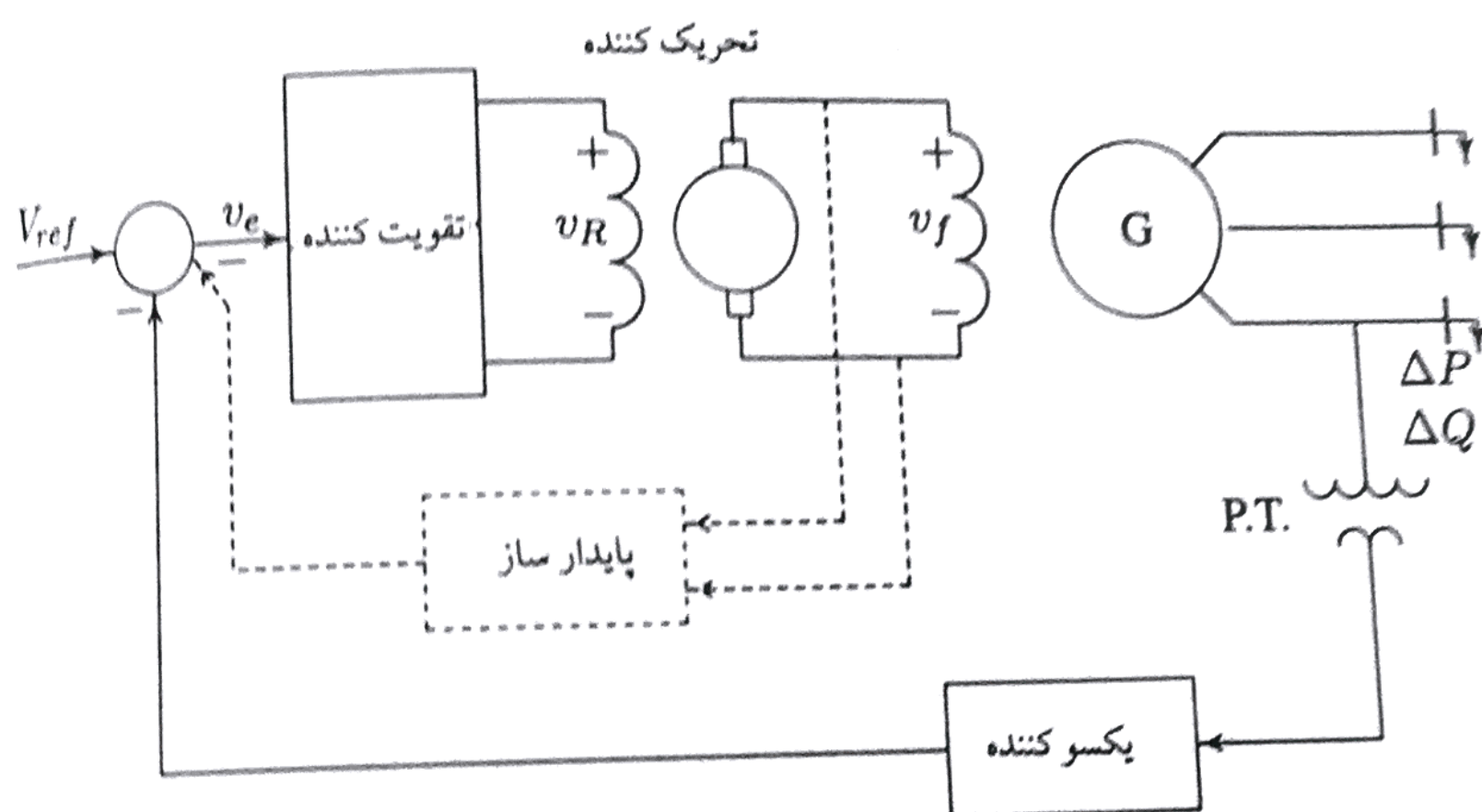
3- Deterministic

4 - Stochastic

5- Kalman filter



میدان‌های تحریک آنها کنترل می‌شود. دیگر روش‌های کمکی بهبود پروفیل ولتاژ در سیستم‌های انتقال الکتریکی عبارتند از: ترانسفورماتورهای با تغییردهنده تپ زیر بار، خازن‌های قابل قطع و وصل، تنظیم‌کننده‌های پله‌ای ولتاژ و تجهیزات کنترل استاتیکی توان راکتیو. منبع اصلی کنترل توان راکتیو ژنراتور، کنترل تحریک آن با استفاده از تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ (AVR) که در این فصل شرح داده شد، می‌باشد. نقش یک AVR نگهداشتن اندازه ولتاژ پایانه ژنراتور سنکرون در سطح تعیین شده است. نمایش بلوکی یک سیستم AVR ساده در شکل ۱۲-۲۹ نشان داده شده است.



شکل ۱۲-۲۹ نمایش نوعی یک سیستم AVR ساده

افزایش در توان راکتیو بار یک ژنراتور با کاهش اندازه ولتاژ پایانه آن همراه است. اندازه ولتاژ از طریق یک ترانسفورماتور ولتاژ در یک فاز حس می‌شود. این ولتاژ یکسو شده و با سیگنال نقطه تنظیم dc مقایسه می‌شود. سیگنال خطای تقویت شده، میدان تحریک را کنترل کرده و ولتاژ پایانه تحریک را افزایش می‌دهد. بنابراین، جریان تحریک ژنراتور افزایش یافته که منجر به افزایش مقدار emf تولید شده می‌شود. تولید توان راکتیو به نقطه تعادل جدیدی افزایش یافته که باعث افزایش ولتاژ پایانه به مقدار دلخواه می‌گردد. حال به‌طور مختصر، مدل‌های ساده عناصر تشکیل دهنده یک سیستم AVR مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

## ۱۲-۶-۱ مدل تقویت کننده

تقویت کننده سیستم تحریک ممکن است تقویت کننده مغناطیسی، تقویت کننده گردان یا تقویت کننده الکترونیکی پیشرفته باشد. تقویت کننده با یک بهره  $K_A$  و یک ثابت زمانی  $\tau_A$  نمایش داده می شود و تابع تبدیل آن به صورت زیر است:

$$\frac{V_R(s)}{V_e(s)} = \frac{K_A}{1 + \tau_A s} \quad (12-29)$$

مقادیر نوعی  $K_A$  در حدود ۱۰ تا ۴۰۰ است. ثابت زمانی تقویت کننده خیلی کوچک بوده و در محدوده ۰/۰۲ تا ۰/۱ ثانیه قرار دارد و اغلب از آن چشم پوشی می شود.

## ۱۲-۶-۲ مدل تحریک

تنوع زیادی در انواع سیستم های تحریک مختلف وجود دارد. با وجود این، سیستم های تحریک پیشرفته از منابع توان ac که از طریق یکسو کننده های نیمه هادی (SCR)<sup>۱</sup> یکسو می شوند، استفاده می کنند. به علت پدیده اشباع در مدار مغناطیسی ولتاژ خروجی تحریک یک تابع غیر خطی از ولتاژ میدان است. بنابراین، هیچ گونه رابطه ساده ای بین ولتاژ پایانه و ولتاژ میدان تحریک وجود ندارد. چندین مدل با درجات پیچیدگی متفاوت توسعه یافته و در نشریات IEEE توصیه شده اند. یک مدل مناسب از تحریک کننده پیشرفته مدل خطی شده ای است که ثابت زمانی اصلی را در نظر گرفته و از پدیده اشباع و سایر عوامل غیر خطی چشم پوشی می کند. در ساده ترین شکل، تابع تبدیل یک تحریک کننده پیشرفته را می توان با یک ثابت زمانی  $\tau_E$  و یک بهره  $K_E$  به صورت زیر نمایش داد:

$$\frac{V_F(s)}{V_R(s)} = \frac{K_E}{1 + \tau_E s} \quad (12-30)$$

ثابت های زمانی تحریک کننده های پیشرفته خیلی کوچک هستند.

1- Silicon Controlled Rectifier (SCR)

نیروی محرکه الکتریکی (emf) تولید شده توسط ماشین‌های سنکرون تابعی از منحنی مغناطیس‌کنندگی<sup>۱</sup> ماشین بوده و ولتاژ پایانه آن به بار ژنراتور بستگی دارد. در مدل خطی شده، تابع تبدیل که ولتاژ پایانه ژنراتور را به ولتاژ میدان آن مربوط می‌سازد می‌توان با بهره  $K_G$  و ثابت زمانی  $\tau_G$  به صورت زیر نمایش داد:

$$\frac{V_t(s)}{V_f(s)} = \frac{K_G}{1 + \tau_G s} \quad (۱۲-۳۱)$$

این ثابت‌ها به بار وابسته هستند. مقدار  $K_G$  می‌تواند بین ۰/۷ تا ۱ و مقدار  $\tau_G$  بین ۱ و ۲ ثانیه از حالت بار کامل تا حالت بی‌باری تغییر کند.

### ۱۲-۶-۴ مدل حس‌گر

ولتاژ از طریق ترانسفورماتور ولتاژ حس شده و بوسیله یک پل یکسوساز یکسو می‌شود. حس‌گر توسط یک تابع تبدیل ساده مرتبه اول مدل‌سازی می‌شود که به صورت زیر است:

$$\frac{V_S(s)}{V_t(s)} = \frac{K_R}{1 + \tau_R s} \quad (۱۲-۳۲)$$

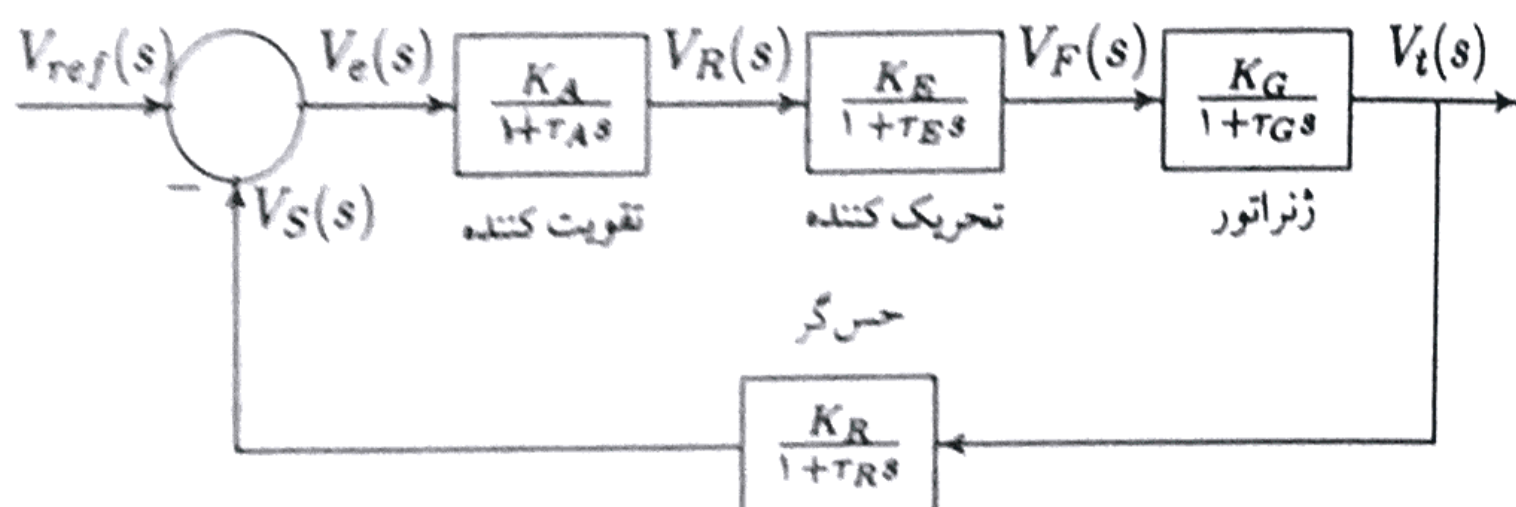
ثابت زمانی  $\tau_R$  خیلی کوچک بوده و می‌توان آن را در محدوده ۰/۰۱ تا ۰/۰۶ ثانیه فرض کرد. با استفاده از مدل‌های بالا، نمایش بلوکی یک AVR مطابق شکل ۱۲-۳۰ است. تابع تبدیل حلقه باز نمایش بلوکی شکل ۱۲-۳۰ برابر است با:

$$KG(s)H(s) = \frac{K_A K_E K_G K_R}{(1 + \tau_A s)(1 + \tau_E s)(1 + \tau_G s)(1 + \tau_R s)} \quad (۱۲-۳۳)$$

و تابع تبدیل حلقه بسته که ولتاژ پایانه  $V_t(s)$  را به ولتاژ مرجع  $V_{ref}(s)$  مربوط می‌سازد به صورت زیر است:



$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_A K_E K_G K_R (1 + \tau_R s)}{(1 + \tau_A s)(1 + \tau_E s)(1 + \tau_G s)(1 + \tau_R s) + K_A K_E K_G K_R} \quad (34-12)$$



شکل ۱۲-۳۰ نمایش بلوکی ساده شده یک تنظیم کننده خودکار ولتاژ (AVR)

یا

$$V_t(s) = T(s)V_{ref}(s) \quad (35-12)$$

برای ورودی پله داریم :

$$V_{ref}(s) = \frac{1}{s}$$



با استفاده از قضیه مقدار نهائی ، پاسخ ماندگار برابر است با :

$$V_{tss} = \lim_{s \rightarrow 0} sV_t(s) = \frac{K_A}{1 + K_A} \quad (36-12)$$

مثال ۱۲-۶ (chp12ex6), (sim12ex6.mdl)

سیستم AVR یک ژنراتور دارای پارامترهائی مطابق جدول ۱۲-۳ است.

جدول ۱۲-۳ داده‌های مثال ۱۲-۶

عنصر	بهره	ثابت زمانی
تقویت کننده	$K_A$	$\tau_A = 0.1$
تحریک کننده	$K_E = 1$	$\tau_E = 0.4$
ژنراتور	$K_G = 1$	$\tau_G = 1.0$
حس گر	$K_R = 1$	$\tau_R = 0.05$

(الف) با استفاده از آرایه روت - هرولتز (پیوست ب ۲-۱)، محدوده تغییرات  $K_A$  را برای پایداری سیستم کنترل بدست آورید.

(ب) با استفاده از تابع `rlucos` در MATLAB مکان هندسی ریشه‌ها را رسم کنید.

(پ) چنانچه بهره تقویت کننده در  $K_A = 10$  تنظیم شود:

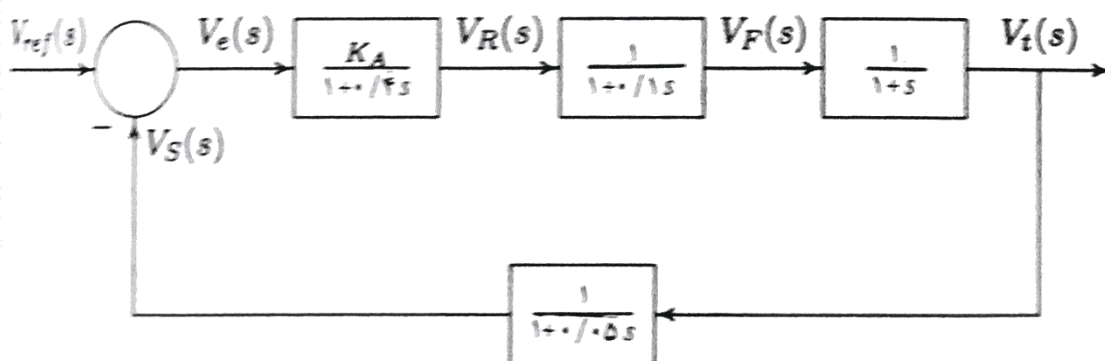
(پ-۱) پاسخ پله حالت ماندگار را تعیین کنید.

(پ-۲) با استفاده از MATLAB پاسخ پله و مشخصات عملکرد را در حوزه زمان بدست

آورید.

(ت) نمایش بلوکی SIMULINK را ساخته و پاسخ پله را رسم کنید.

با جایگزینی پارامترهای سیستم در نمایش بلوکی AVR که در شکل ۱۲-۳۰ نشان داده شده است، نمایش بلوکی شکل ۱۲-۳۱ حاصل می‌شود.



شکل ۱۲-۳۱ نمایش بلوکی AVR برای مثال ۱۲-۶

تابع تبدیل حلقه باز سیستم AVR نشان داده شده در شکل ۱۲-۳۱ به صورت زیر است:



$$\begin{aligned}
 KG(s)H(s) &= \frac{K_A}{(1 + 0.1s)(1 + 0.4s)(1 + s)(1 + 0.5s)} \\
 &= \frac{50 \cdot K_A}{(s + 10)(s + 2.5)(s + 1)(s + 20)} \\
 &= \frac{50 \cdot K_A}{s^4 + 33/5 s^3 + 307/5 s^2 + 775s + 500}
 \end{aligned}$$

(الف) معادله مشخصه برابر است با :

$$1 + KG(s)H(s) = 1 + \frac{50 \cdot K_A}{s^4 + 33/5 s^3 + 307/5 s^2 + 775s + 500} = 0$$

که منجر به معادله چند جمله‌ای زیر می‌شود :

$$s^4 + 33/5 s^3 + 307/5 s^2 + 775s + 500 + 50 \cdot K_A = 0$$

آرایه روت - هرویتز برای این چند جمله‌ای به صورت زیر است (پیوست ب ۲-۱ ملاحظه شود) :

$s^4$	۱	$307/5$	$500 + 50 \cdot K_A$
$s^3$	$33/5$	$775$	۰
$s^2$	$284/365$	$500 + 50 \cdot K_A$	۰
$s^1$	$58/9 K_A - 716/1$	۰	۰
$s^0$	$500 + 50 \cdot K_A$		

در سطر<sup>۱</sup>  $s$  مشاهده می‌شود که برای پایداری سیستم کنترل،  $K_A$  باید کمتر از  $12/16$  باشد و همچنین از سطر<sup>۰</sup>  $s$  می‌توان نتیجه گرفت که  $K_A$  باید بزرگتر از  $-1$  باشد. بنابراین، با مقادیر مثبت  $K_A$ ، برای پایداری سیستم کنترل بهره کنترل کننده باید به صورت زیر باشد:

$$K_A < 12/16$$

برای  $K_A = 12/16$ ، معادله کمکی از سطر<sup>۲</sup>  $s$  برابر است با:

$$284/365 s^2 + 6580 = 0$$

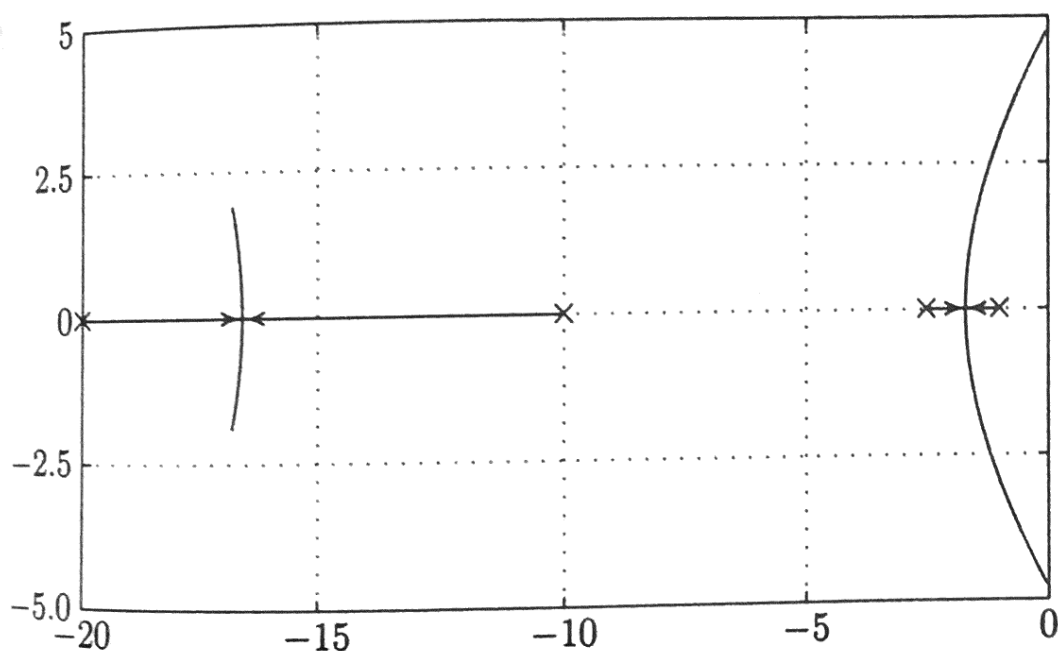
$$s = \pm j4/81$$

یعنی برای  $K_A = 12/16$  یک جفت قطب مزدوج روی محور  $j\omega$  خواهیم داشت و سیستم کنترل پایدار حدی است.

(ب) برای رسم مکان هندسی ریشه‌ها در محدوده  $K_A$  از ۰ تا  $12/16$ ، فرامین زیر در MATLAB اجرا می‌شوند:

```
num=500;
den=[1 33.5 307.5 775 500];
figure(1), rlocus(num, den);
```

نتیجه در شکل ۱۲-۳۲ نشان داده شده است. این مکان‌های هندسی محور  $j\omega$  را در نقاط  $s = \pm j4/81$  بازای  $K_A = 12/16$  قطع می‌کنند بنابراین، این سیستم برای  $K_A = 12/16$  پایدار حدی است.



شکل ۱۲-۳۲ نمودار مکان هندسی ریشه‌ها برای مثال ۱۲-۶

(پ) تابع تبدیل حلقه بسته سیستم که در شکل ۱۲-۳۱ نشان داده شده است به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{25K_A(s+20)}{s^4 + 33/5s^3 + 307/5s^2 + 775s + 500 + 500K_A}$$

(پ-۱) پاسخ حالت ماندگار برابر است با:

$$V_{tss} = \lim_{s \rightarrow 0} sV_t(s) = \frac{K_A}{1 + K_A}$$

بازای بهره تقویت‌کننده  $K_A = 10$  ، پاسخ حالت ماندگار عبارتست از:

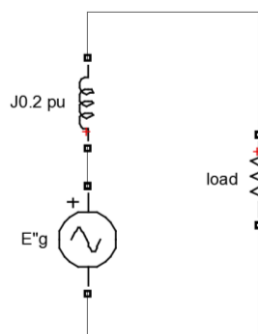
$$V_{tss} = \frac{10}{1+10} = 0.909$$

و خطای حالت ماندگار به صورت زیر بدست می‌آید:

$$V_{e_{ss}} = 1 - 0.909 = 0.091$$

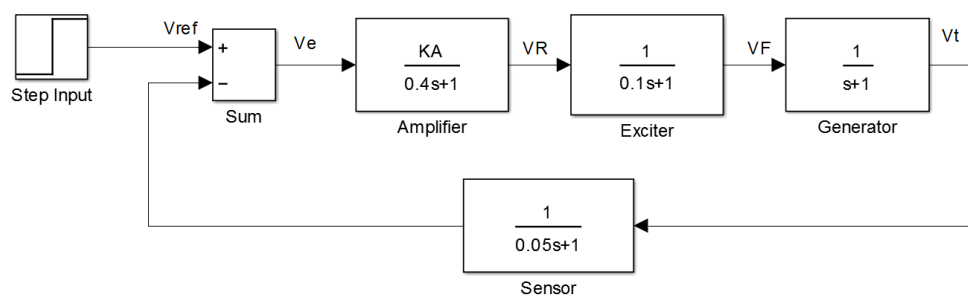
#### تمرین ۴

یک ژنراتور 50HZ, 400MVA, 10KV با  $X_d''=0.2pu$  یک بار مقاومتی 300MW را در ولتاژ 10KV تغذیه می‌کند. بار مستقیماً به ترمینال‌های ژنراتور وصل است. اگر سه فاز به طور همزمان قطع شود، جریان قبل از وقوع خطا و جریان زیرگذرای حین خطا را محاسبه کنید.



#### تمرین ۵

در سیستم کنترل ولتاژ زیر مقدار نهایی پاسخ (ولتاژ ترمینال  $V_t$ ) و مقدار خطای ماندگار به ازای ولتاژ مرجع 1pu و  $K_A=10$  چقدر است؟



ارسال پاسخ به:

[m.heshmati.znu@gmail.com](mailto:m.heshmati.znu@gmail.com)

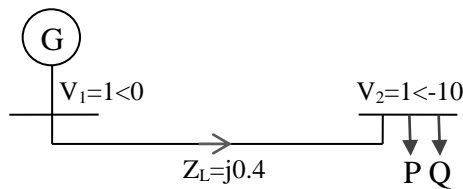


# اداره کل آموزش - اداره امتحانات

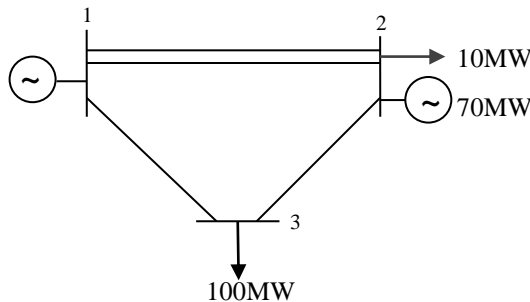
فرم مخصوص طرح سؤالات امتحانی نیمسال دوم ۹۸

نام و نام خانوادگی دانشجو: ..... استاد مربوطه: مینا حشمتی رشته: ..... شماره دانشجویی: .....  
عنوان درس: ..... مدت امتحان: ..... تاریخ امتحان: ...../...../..... ساعت شروع: ..... نوع سؤالات: تستی ☐ تشریحی ☐  
وسایل مجاز در جلسه امتحان: ..... پاسخنامه نیاز می باشد ☐ نمی باشد ☐

۱- در شکل زیر مقادیر  $P$  و  $Q$  بر حسب پریونیت چقدر است؟



۲- در شبکه‌ی زیر پخش بار DC (محاسبه‌ی توان عبوری از خطوط، زاویه‌ی ولتاژها، توان اکتیو تولیدی باس مرجع) انجام دهید. باس ۱ به عنوان باس مرجع انتخاب شود. راکتانس تمامی خطوط برابر  $X_{P.U} = 0.25$  است. دقت کنید که خط بین باس ۱ و باس ۲، دومداره است.



۳- اگر در شبکه‌ی فوق بار موجود در باس ۲ به  $10MW + 10MVAR$  و بار باس ۳ به  $100MW + 20MVAR$  تغییر یابد، در شبکه‌ی حاصل پخش بار AC به روش گوس سایدل تا دو تکرار انجام دهید.

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[ \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} V_j \right]$$

۴- یک سیستم دارای دو واحد نیروگاهی به شرح زیر است:

$$\begin{cases} C_1(P_1) = 0.00128P_1^2 + 6.48P_1 + 459 \\ C_2(P_2) = 0.00194P_2^2 + 7.85P_2 + 310 \end{cases}$$

الف- به ازای بار  $P_D = 850MW$  پخش بار اقتصادی (ELD) انجام دهید.  $(P_1, P_2, \lambda)$



ب- اگر بار 50MW افزایش یابد ( $P_D=900MW$ )، بدون حل مجدد ELD تولید جدید نیروگاه‌ها چقدر می‌شود؟  
ج- به ازای بار 850MW و حدود بالا و پایین تولید زیر مجددا ELD را حل کنید.

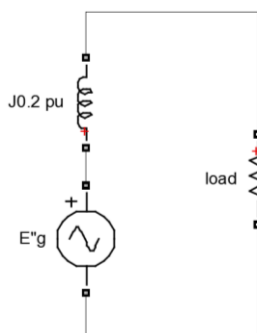
$$150MW \leq P_1 \leq 600MW$$

$$100MW \leq P_2 \leq 400MW$$

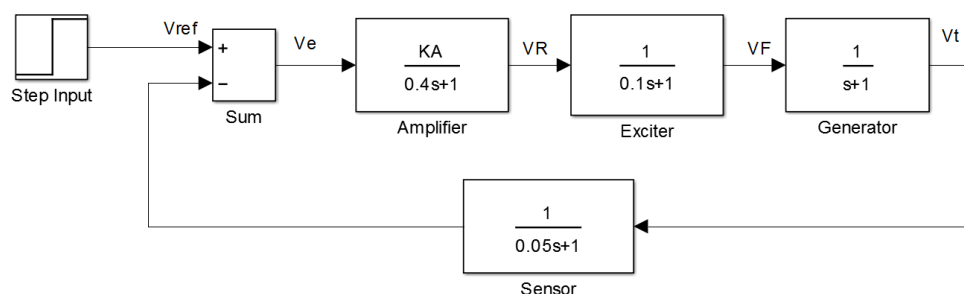
د- به ازای بار 850MW، بدون در نظر گرفتن حدود و با لحاظ کردن تابع تلفات زیر مجددا ELD را حل کنید.

$$P_{LOSS} = 0.00009P_1 + 0.00003P_2$$

۵- یک ژنراتور 50HZ, 400MVA, 10KV با  $X_d''=0.2pu$  یک بار مقاومتی 300MW را در ولتاژ 10KV تغذیه می‌کند. بار مستقیماً به ترمینال‌های ژنراتور وصل است. اگر سه فاز به طور همزمان قطع شود، جریان قبل از وقوع خطا و جریان زیرگذرای حین خطا را محاسبه کنید.



۶- در سیستم کنترل ولتاژ زیر مقدار نهایی پاسخ (ولتاژ ترمینال  $V_t$ ) و مقدار خطای ماندگار به ازای ولتاژ مرجع 1pu و  $K_A=10$  چقدر است؟



موفق باشید