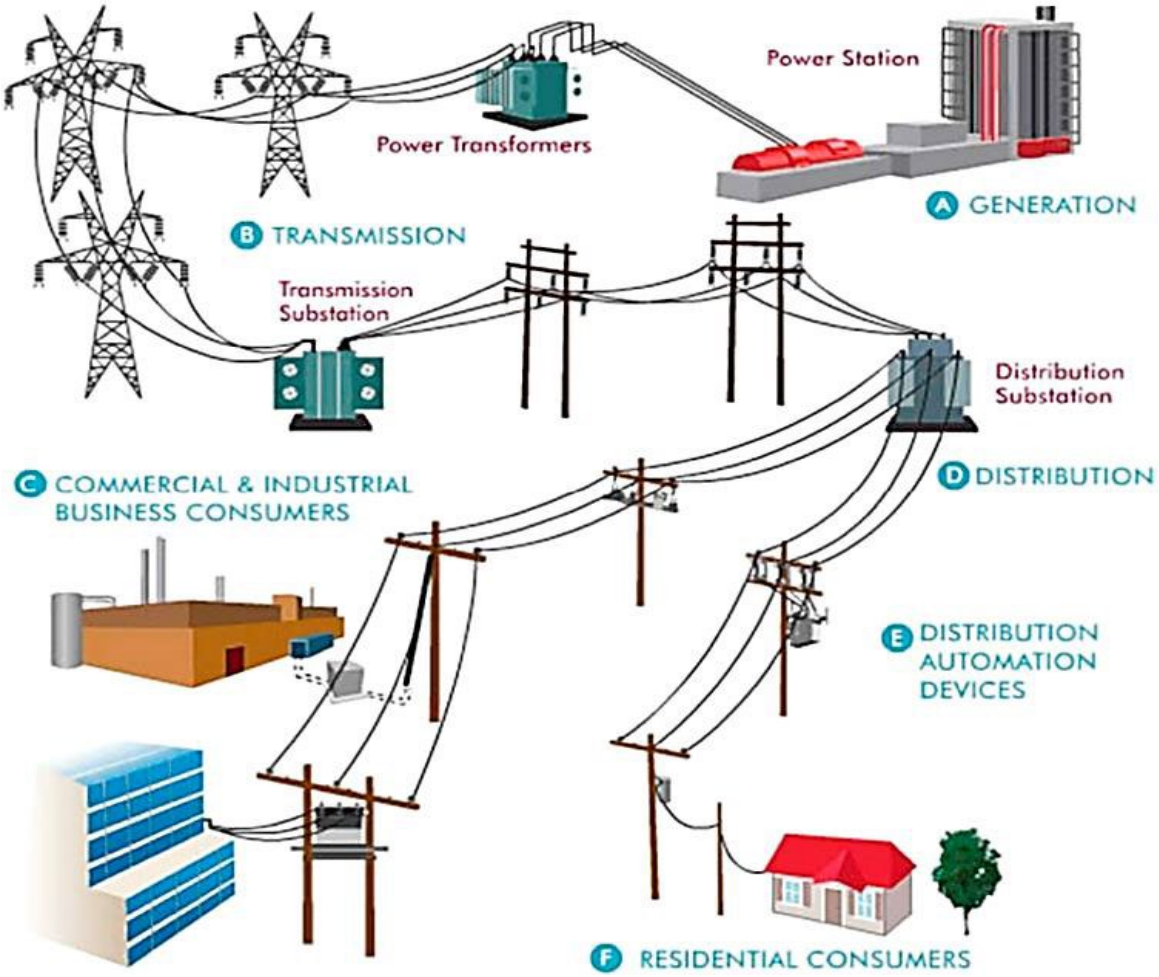
بسمه‌تعالی

بررسی سیستم‌های قدرت ۲

(تحلیل سیستم‌های انرژی ۲)



تهیه‌کننده: دکتر سعید حسن‌وند

فصل اول

پخش بار اقتصادی

مقدمه

یکی از مهم‌ترین موضوع‌های سیستم‌های مدرن امروزی، تولید انرژی الکتریکی برای سیستم‌های قدرت با حداقل هزینه تولیدی برای نیروگاه‌ها است. پخش بار اقتصادی برنامه‌ریزی مناسب برای واحدهای تولیدی است که محدودیت‌های غیرخطی شبکهٔ قدرت و واحدهای تولیدی را در نظر می‌گیرد. در مسئله پخش بار اقتصادی مقدار توان نیروگاه‌ها مجهول مسئله است و بگونه‌ای تعیین می‌شود که هزینه کل مینیمم شود. مسئله به یک مسئله بهینه‌سازی تبدیل می‌شود و در ادامه روش حل آن گفته خواهد شد.

مدل‌سازی تابع هزینه نیروگاه‌های حرارتی

یک نیروگاه دارای هزینه‌های مختلفی است که به‌صورت کلی به هزینه‌های ثابت مانند هزینه پرسنل، تعمیرات و نگهداری و .... و هزینه‌های متغیر مانند هزینه خرید سوخت دسته‌بندی می‌شود. تغییرات هزینه برحسب قدرت خروجی نیروگاه به‌صورت یک تابع درجه دوم بیان می‌شود، که برای نیروگاه بخار، گازی و هسته‌ای صادق است. این معادله درجه دوم به‌صورت کلی زیر تعریف می‌شود که برای هر نیروگاه دارای ضرایب متفاوتی است. همچنین نمودار این تابع درجه دوم به شکل زیر است.

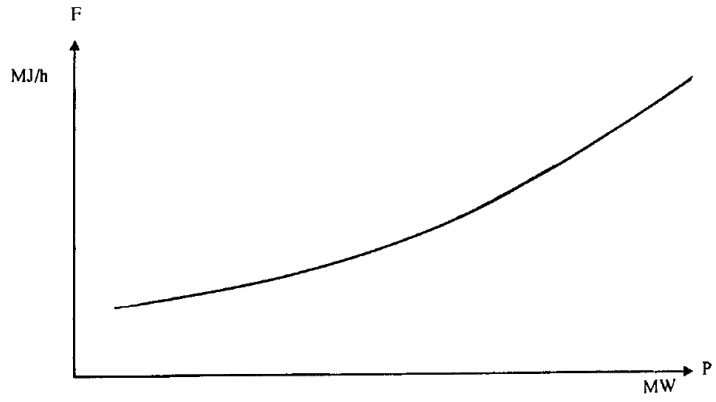
$$C = \text{cost} = \alpha + \beta * \text{P} + \gamma * P^2$$

C یا cost: هزینه

P: توان خروجی نیروگاه

α,β,γ: ضرایب ثابت وابسته به نوع نیروگاه

ضرایب ثابت مربوط به هزینه با استفاده از داده‌های میدانی و روش‌های عددی دست آمده و تابع هزینه را مشخص می‌کنند.



تابع هزینه یک واحد حرارتی

حل مسئله پخش بار اقتصادی

در حالت کلی حل مسئله پخش بار اقتصادی حل یک مسئله بهینه‌سازی است. به این معنی که در این مسئله متغییرها را به‌گونه‌ای باید به دست آورد که تابع هزینه مینیمم شود یعنی کمترین هزینه بهره‌برداری را داشته باشیم. مانند همه مسائل بهینه‌سازی یک سری قید هم وجود دارد که در حین حل مسئله باید برآورده شوند.

تابع هدف یا همان تابعی که قرار است مینیمم شود، مجموع هزینه بهره‌برداری از همه نیروگاه‌ها است:

$$\min\{F\} = \min\left\{C_{tot} = \sum_{i=1}^{ng} C_i = \sum \alpha_i + \beta_i \mathrm{P} + \Upsilon_i \mathrm{P}^2\right\}$$

قید اساسی مسئله شرط برابری تولید و بار بعلاوه تلفات است:

$$\sum P_i = P_D + Ploss$$

برای لحاظ کردن قید در حل مسئله بهینه‌سازی می‌توان آن را به‌صورت زیر نوشت

$$g = \sum P_i - P_D - Ploss$$

با این کار تابع g باید صفر باشد لذا آن را به تابع هدف اضافه می‌کنیم. یعنی در روند مینیمم سازی تابع هدف این تابع نیز باید برآورده شده و برابر صفر شود. روش لاگرانژ برای حل این مسئله به‌صورت زیر اجرا می‌شود:

تابع جدید L از جمع تابع هزینه و قید با اضافه کردن یک ضریب λ به قید حاصل می‌شود:

$$L = F + \lambda(g) = \sum \alpha_i + \beta_i \mathrm{P}_i + \Upsilon_i \mathrm{P}_i{}^2 + \lambda(P_D - \sum P_i - Ploss)$$

کمترین مقدار تابع L زمانی به دست می‌آید که مشتق آن نسبت به سایر متغیرهایش صفر باشد:

۱) مشتق نسبت به ضریب λ

$$\frac{\partial l}{\partial \lambda} = 0 \quad \rightarrow \quad \sum P_i = P_D + Ploss$$

۲) مشتق نسبت به ضریب توان تولیدی هر ژنراتور Pi

$$\frac{\partial l}{\partial p_i} = 0 \quad \rightarrow \quad 2\Upsilon_i p_i + \beta_i + \lambda(-1) = 0 \quad \rightarrow \quad \lambda = 2\Upsilon_i p_i + \beta_i$$

اگر تعداد ژنراتورها را n فرض کنیم از معادله دوم n مجهول که همان Pi ها هستند به دست می‌آید. و از معادله اول هم یک مجهول λ خواهیم داشت. بنابراین یک دستگاه **n+1 معادله n+1 مجهول** خواهیم داشت که با حل کردن آن توان تولیدی ژنراتورها بدست می‌آید.

فرمول‌های زیر برای راحتی و حل نکردن یک دستگاه n+1 معادله n+1 مجهول مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$p_i = \frac{\lambda - \beta_i}{2\Upsilon_i}$$

$$\sum_{i=1}^{ng} \frac{\lambda - \beta_i}{2\Upsilon_i} = P_D + Ploss$$

$$\lambda = \frac{P_D + Ploss + \sum \beta_i}{\sum \frac{2\Upsilon_i}{1}} = \frac{p_D + \sum_{n=1}^{ng} \frac{\beta_i}{2\Upsilon_i}}{\sum_{i=1}^{ng} \frac{1}{2\Upsilon_i}}$$

مشاهده می‌شود که مشتق تابع هزینه نسبت به توان برابر با λ خواهد بود.

$$\frac{\partial C}{\partial p_i} = \lambda = 2\Upsilon_i p_i + \beta_i$$

به λ هزینه افزایشی تولید (IC=Incremental Cost) نیز گفته می‌شود که برابر است تغییر در هزینه به ازای تغییر در توان.

نکته اینکه اگر مسئله را حل نماییم و همه محدودیت های موجود در مسئله برآورده شوند، مقدار λ برای همه نیروگاه ها یکسان است و هزینه در حالت بهینه قرار دارد. اما اگر قیدی برآورده نشود مقدار λ برای همه نیروگاه ها یکسان نیست که نشان دهنده اینست که در بهینه ترین حالت ممکن از لحاظ هزینه نیستیم.

۱- توزیع اقتصادی بار با صرف‌نظر از تلفات و محدودیت ژنراتورها

ساده‌ترین حالت برای حل مسئله پخش بار اقتصادی این است که از تلفات کل شبکه صرف‌نظر شود و همچنین برای تولید نیروگاه‌ها محدودیتی در نظر گرفته نشود.

برای خط بدون تلفات داریم که همه تولیدات با بار شبکه برابر است، که به‌صورت ریاضی به شکل زیر خواهد بود:

$$\sum_{i=1}^{ng} Pi = P_D$$

Pi: توان تولیدی هر نیروگاه

P_D: توان کل مصرفی (دیماند)

ng: تعداد ژنراتورها

روابط روش لاگرانژ برای این حالت صادق است و تنها $P_{loss}=0$ خواهد بود. که مسئله ساده‌تر خواهد شد.

مثال ۱: توابع هزینه سوخت سه نیروگاه حرارتی برحسب دلار در ساعت طبق زیر است. اگر بار کل ۸۰۰ مگاوات باشد و از تلفات و محدودیت‌های ژنراتورها صرف‌نظر کنیم، تولید بهینه برای هر ژنراتور چقدر است؟

$$C_1 = 500 + 5.3P_1 + 0.004P_1^2$$
$$C_2 = 400 + 5.5P_2 + 0.006P_2^2$$
$$C_3 = 200 + 5.8P_3 + 0.009P_3^2$$
$$P_D = 800$$

$$\lambda = \frac{800 + \frac{5.3}{0.008} + \frac{5.5}{4.2} + \frac{5.8}{0.18}}{\frac{1}{0.008 + 0.12 + 0.18}} = 8.5$$

$$p_1 = \frac{8.5 - 5.3}{0.008} = 400$$
$$p_2 = 250$$
$$p_3 = 150$$

۲- توزیع اقتصادی بار با صرف نظر از تلفات و در نظر گرفتن محدودیت ژنراتورها

در حالت دوم بررسی پخش بار اقتصادی، مسئله به واقعیت نزدیکتر می‌شود. به این صورت که در یک شبکه عملی ژنراتورها نمی‌توانند به هر مقدار توان که موردنیاز باشد تولید داشته باشند، یعنی یک مقدار حداکثر تولید برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. از طرفی یک نیروگاه با ظرفیت بالا اگر تولید به مقدار خیلی کم داشته باشد صرفه اقتصادی ندارد. به‌عبارت‌دیگر یک نیروگاه یا باید خاموش باشد یا اگر در مدار باشد باید یک حداقل توانی تولید کند تا توجیه اقتصادی برای در مدار بودن آن وجود داشته باشد. یعنی یک مقدار حداقل برای آن در نظر گرفته می‌شود. به طور کلی برای هر نیروگاه داریم

$$P_{i\min} \le P_i \le P_{i\max}$$

با در نظر گرفتن این قید دیگر به‌صورت روش روتین ریاضی مانند حالت قبل نمی‌توان مسئله را حل کرد. بلکه برای در نظر گرفتن این قید باید از روش‌های عددی و تکرار استفاده نمود. به این صورت که یک λ به‌عنوان حدس اولیه انتخاب کرده و مقدار کل توان تولیدی را حساب می‌کنیم، اگر از توان بار کمتر بود λ را افزایش می‌دهیم و اگر از توان بار بیشتر بود λ را کاهش می‌دهیم، این کار تا زمانی که $\sum p_i = p_D$ شود تکرار می‌کنیم.

در روند حل مسئله که توان تولیدی ژنراتورها دارای محدودیت هستند،

۱- اگر توان ژنراتوری از مقدار ماکزیمم آن بیشتر بدست آمد، همان مقدار ماکزیمم را برای آن در نظر می‌گیریم و این مقدار را از بار کل کم می‌کنیم (چون تولید این ژنراتور دیگر نمی‌تواند از مقدار ماکزیممش بیشتر باشد و ثابت است) سپس مسئله را برای بار جدید و ژنراتورهای باقی‌مانده ادامه می‌دهیم. در این حالت مقدار هزینه افزایشی λ برای آن واحدی که بر روی مقدار ماکزیمم set شده است کمتر از بقیه ژنراتورها می‌شود.

$$if \quad P_i > P_{i\max} \rightarrow P_i = P_{i\max} \rightarrow \lambda_i \le \lambda^*$$

۲- اگر توان ژنراتوری از مقدار مینیمم آن کمتر بدست آمد، همان مقدار مینیمم را برای آن در نظر می‌گیریم و این مقدار را از بار کل کم می‌کنیم (چون تولید این ژنراتور دیگر نمی‌تواند از مقدار مینیممش کمتر باشد و ثابت است) سپس مسئله را برای بار جدید و ژنراتورهای باقی‌مانده ادامه می‌دهیم. در این حالت مقدار هزینه افزایشی λ برای آن واحدی که بر روی مقدار مینیمم set شده است بیشتر از بقیه ژنراتورها می‌شود.

$$if \quad P_j < P_{j\min} \rightarrow P_j = P_{j\min} \rightarrow \lambda_j \ge \lambda^*$$

نکته: برای سریع‌تر به جواب رسیدن می‌توان تغییرات λ را با استفاده از روش گرادیان به‌صورت زیر بدست آورد و به جای تکرار های مکرر مقدار حدس بعدی λ با مستقیم بدست آورد:

$$\Delta P = P_D - \sum P_i$$

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta P}{\sum \frac{1}{2\gamma_i}}$$

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \Delta\lambda$$

مثال۲: مثال قبل را با فرض P_D=975 MW و محدودیت‌های زیر حل کنید.

$$200 \le P_1 \le 450 \qquad 150 \le P_2 \le 350 \qquad 100 \le P_3 \le 225$$

$\lambda = 6$

$$P_1 = \frac{\lambda - \beta_1}{2\gamma_1} = \frac{6-5.3}{2\times 0.004} = 87.5MW$$

$$P_2 = \frac{\lambda - \beta_2}{2\gamma_2} = \frac{6-5.5}{2\times 0.006} = 41.66MW$$

$$P_3 = \frac{\lambda - \beta_3}{2\gamma_3} = \frac{6-5.8}{2\times 0.009} = 11.11MW$$

$$\sum P_i = 87.5 + 41.66 + 11.11 = 140.27MW$$

$$\Delta P = P_D - \sum P_i = 975 - 140.27 = 834.73MW$$

چون مقدار توان تولیدی کل از P_D کمتر است باید λ افزایش یابد یک راه‌حل این است که با گام‌های ۰.۱ افزایش دهید تا جایی که به جواب برسیم یعنی $p_D = \sum p_i$.

راه‌حل بهتر استفاده از روش گرادیان می‌باشد.

$$\Delta\lambda = \frac{834.73}{\frac{1}{2\times 0.004}+\frac{1}{2\times 0.006}+\frac{1}{2\times 0.009}} = 3.1632$$

$$\lambda^{(2)} = \lambda^{(1)} + \Delta\lambda = 6 + 3.1632 = 9.1632$$

$$P_1 = \frac{9.1632 - 5.3}{2\times 0.004} = 482.19MW \ > P_{1\max} \rightarrow P_1 = 450MW$$

$$P_2 = \frac{9.1632 - 5.5}{2\times 0.006} = 305.26MW$$

$$P_3 = \frac{9.1632 - 5.8}{2\times 0.009} = 186.84MW$$

ملاحظه می‌شود که ژنراتور اول بیشتر از مقدار حداکثر خود توان تولید کند برای ادامه حل مسئله مقدار تولید آن را بر روی مقدار max آن فیکس کرده که ۴۵۰ است. سپس مقدار ۴۵۰ را از بار کل کم می‌کنیم و مسئله را برای دو نیروگاه دیگر ادامه می‌دهیم.

$$\Delta P = (975 - 450) - (305.26 + 186.84) = 32.19MW$$

$$\Delta\lambda = \frac{32.19}{\frac{1}{2\times 0.006}+\frac{1}{2\times 0.009}} = 0.2368$$

$$\lambda^{(3)} = 9.1632 + 0.2368 = 9.4$$

$$P_1 = 450MW$$

$$P_2 = \frac{9.4 - 5.5}{2\times 0.006} = 325MW$$

$$P_3 = \frac{9.4 - 5.8}{2\times 0.009} = 200MW$$

۳- توزیع اقتصادی بار با در نظرگرفتن تلفات

برای حل مسئله پخش بار اقتصادی اثبات می‌شود که تلفات سیستم بصورت یک تابع درجه دوم برحسب **توان** خروجی ژنراتورها بیان می‌شود. (معمولاً تلفات بر حسب جریان خطوط بیان می‌شود اما در اینجا چون متغیرهای اصلی توان ژنراتورها هستند تلفات نیز بر حسب آن‌ها باید بیان شده باشد.)

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{ng}\sum_{j=1}^{ng} P_i \beta_{ij} P_j + \sum \beta_{oi} P_i + \beta_{oo}$$

به علت کوچک بودن ضرایب دو جمله آخر از این دو جمله صرف نظر می‌شود:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{ng}\sum_{j=1}^{ng} P_i \beta_{ij} P_j$$

برای لحاظ کردن تلفات در رابطه‌ی پخش بار اقتصادی قید برآورده شدن بار بصورت زیر خواهد بود:

$$\sum_{i=1}^{ng} P_i = P_D + P_{Loss}$$

$$L = C_{tot} + \lambda\left[P_D + P_{Loss} - \sum_{i=1}^{ng} P_i\right]$$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial L}{\partial P_i} = 0 \rightarrow \dfrac{\partial C_{tot}}{\partial P_i} + \lambda\left[\dfrac{\partial P_{Loss}}{\partial P_i} - 1\right] = 0 \otimes \\ \dfrac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^{ng} P_i = P_D + P_{Loss} \end{cases}$$

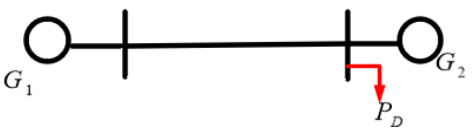
$$\otimes \frac{\partial C_{tot}}{\partial P_i} + \lambda \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_i} = \lambda \rightarrow \lambda = \frac{1}{1 - \dfrac{\partial P_{Loss}}{\partial P_i}} \frac{\partial C_{tot}}{\partial P_i}$$

$$L_i = \frac{1}{1 - \dfrac{\partial P_{Loss}}{\partial P_i}}$$

$$\lambda = L_i \frac{\partial C_{tot}}{\partial P_i}$$

ضریب جریمه L_i به علت در نظرگرفتن تلفات به مسئله اضافه شد. روند حل همان روش تکرار λ با شروع از یک حدس اولیه است.

مثال۳: درشبکه‌ای مطابق شکل زیر رابطه‌ی تلفات و هزینه‌ی افزایشی هر نیروگاه بصورت زیر داده شده است. پخش بار اقتصادی را برای این شبکه بدست آورید.



$$P_{loss} = 0.0002p_1^2$$
$$IC_1 = 800 + p_1$$
$$IC_2 = 900 + 1.5p_2$$
$$P_D = 1200MW$$

$$\lambda = \frac{1}{1-\frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_i}}\frac{\partial C}{\partial P_i}$$

$$\begin{cases} \lambda = \frac{1}{1-0.004P_1}(800+P_1) = \frac{800+P_1}{1-0.004P_1} \\ \lambda = \frac{1}{1-0}(900+1.5P_2) = 900+1.5P_2 \end{cases}$$

یک روش وقتی نمی‌دانیم حدس اولیه از چند شروع کنیم این است که فرض کنیم بار دقیقاً بین دو ژنراتور تقسیم شده است:

$$P_1+P_2=P_D \rightarrow P_1=P_2=\frac{1200}{2}=600 \rightarrow \lambda=1800$$ حدس اولیه

$$\lambda=1800 \rightarrow \begin{cases} 1800=\frac{8000+P_1}{1-0.004P_1} \rightarrow P_1=581.4MW \\ 1800=900+1.5P_2 \rightarrow P_2=600MW \\ P_1+P_2-0.002P_1^2=((581.4)+(600))-(0.002\times 581.4^2)=1113.8<1200 \end{cases}$$

چون بار برآورده نشده است $\boldsymbol{\lambda}$ را افزایش می‌دهیم به۱۹۰۰:

$$\lambda^{(1)}=1900 \rightarrow \begin{cases} 1900=\frac{800+P_1}{1-0.004P_1} \rightarrow P_1=625MW \\ 1900=900+1.5P_2 \rightarrow P_2=666.7MW \\ P_1+P_2-0.00P_1^2=1200 \end{cases}$$

$$625+66.7-0.002(625)^2=1213.5>1200$$

$\boldsymbol{\lambda}$ باید کمتر از ۱۹۰۰ باشد:

$$\begin{matrix} 1800 & 1113.8 \\ \lambda & 1200 \\ 1900 & 1213.5 \end{matrix} \rightarrow \frac{\lambda-1800}{1200-1113.8}=\frac{1900-1800}{1213.5-1113.8} \rightarrow \lambda=1886.42$$

تمرین‌های فصل پخش بار اقتصادی

- هدف از پخش بار اقتصادی چیست؟
- مسئله پخش بار اقتصادی چه نوع مسئله‌ای است؟
- متغیرها در مسئله پخش بار اقتصادی را نام ببرید.
- تابع هدف چیست؟
- قیود مسئله را نام ببرید.
- λ چیست و چه موقع از روش تکرار λ استفاده می‌کنیم؟
- اگر توان یک ژنراتور در روند حل مسئله از محدوده خارج شد چه‌کاری انجام می‌دهیم؟

1.

The fuel-cost functions in \$/h for two 800 MW thermal plants are given by

$$C_1 = 400 + 6.0P_1 + 0.004P_1^2$$
$$C_2 = 500 + \beta P_2 + \gamma P_2^2$$

where P_1 and P_2 are in MW.

(a) The incremental cost of power λ is \$8/MWh when the total power demand is 550 MW. Neglecting losses, determine the optimal generation of each plant.
(b) The incremental cost of power λ is \$10/MWh when the total power demand is 1300 MW. Neglecting losses, determine the optimal generation of each plant.
(c) From the results of (a) and (b) find the fuel-cost coefficients β and γ of the second plant.

2.

The fuel-cost functions in \$/h for three thermal plants are given by

$$C_1 = 350 + 7.20P_1 + 0.0040P_1^2$$
$$C_2 = 500 + 7.30P_2 + 0.0025P_2^2$$
$$C_3 = 600 + 6.74P_3 + 0.0030P_3^2$$

where P_1, P_2, and P_3 are in MW. The governors are set such that generators share the load equally. Neglecting line losses and generator limits, find the total cost in \$/h when the total load is

(i) $P_D =$ 450 MW
(ii) $P_D =$ 745 MW
(iii) $P_D =$ 1335 MW

3.

Neglecting line losses and generator limits, determine the optimal scheduling of generation for each loading condition in Problem 2
(a) by analytical technique,
(b) using Iterative method. Start with an initial estimate of $\lambda = 7.5$ \$/MWh.
(c) find the savings in \$/h for each case compared to the costs in Problem 7.8 when the generators shared load equally.
Use the **dispatch** program to check your results.

4.

Repeat Problem 3 (a) and (b), but this time consider the following generator limits (in MW)

$$122 \leq P_1 \leq 400$$
$$260 \leq P_2 \leq 600$$
$$50 \leq P_3 \leq 445$$

Use the **dispatch** program to check your results.

5.

The fuel-cost function in \$/h of two thermal plants are

$$C_1 = 320 + 6.2P_1 + 0.004P_1^2$$
$$C_2 = 200 + 6.0P_2 + 0.003P_2^2$$

where P_1 and P_2 are in MW. Plant outputs are subject to the following limits (in MW)

$$50 \leq P_1 \leq 250$$
$$50 \leq P_2 \leq 350$$

The per-unit system real power loss with generation expressed in per unit on a 100-MVA base is given by

$$P_{L(pu)} = 0.0125P_{1(pu)}^2 + 0.00625P_{2(pu)}^2$$

The total load is 412.35 MW. Determine the optimal dispatch of generation. Start with an initial estimate of $\lambda = 7$ \$/MWh. Use the **dispatch** program to check your results.

فصل دوم

اتصال کوتاه متقارن

جریان اتصال کوتاه در اکثر موارد از جریان نامی بزرگ‌تر است. این جریان بالا سبب تنش‌های مختلف مانند تنش‌های حرارتی و تنش‌های دینامیکی می‌شود و ممکن است به تجهیزات الکتریکی خسارات جبران‌ناپذیری وارد کند. بنابراین حفاظت سیستم قدرت در مقابل این جریان‌های بالا و لزوم اندازه‌گیری جریان اتصال کوتاه امری ضروری به نظر می‌رسد.

از علل ایجاد خطا می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱-شرایط جوی: باد، صاعقه

۲-برخورد پرندگان با هادی‌های خطوط یا وسایل نقلیه با دکل‌ها

۳-اتفاقات غیرقابل پیش‌بینی مانند سقوط درختان و...

خطاهایی که موجب اتصال کوتاه می‌شوند به دو دسته تقسیم می‌گردند:

متقارن: هرسه فاز به یکدیگر و یا به زمین وصل شوند.

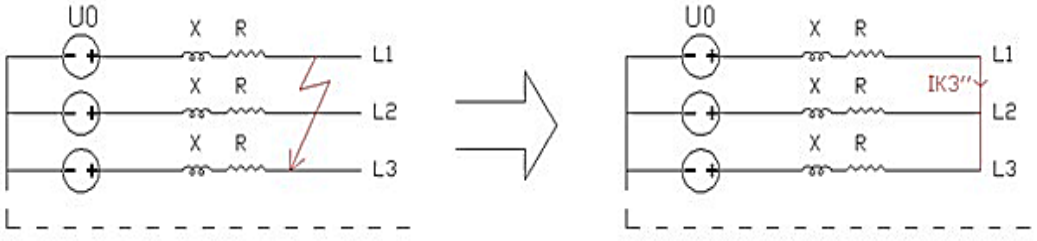
نامتقارن: شامل اتصال کوتاه تکفاز به زمین، دو فاز به یکدیگر و دوفاز به زمین است.

بیش‌از ۷۵ درصد از خطاها اتصال تکفاز به زمین هستند، اما به علت این‌که شدیدترین حالت ممکن اتصال کوتاه سه فاز است، در محاسبات سیستم‌های قدرت مانند: سایزینگ کلیدهای قدرت (مدارشکن یا دژنکتور)، پایداری و محاسبات رله و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نکته: بعد از وقوع اتصال کوتاه، مدارشکن خط را قطع می‌کند اما بسیاری از خطاها موقتی هستند و خود به خود برطرف می‌شود، به همین دلیل از کلیدهای وصل مجدد یا ریکلوزر استفاده می‌شود و تا چند بار این عمل انجام می‌شود.

اتصال کوتاه متقارن

در شبکه‌های قدرت، اتصال کوتاه سه فاز در اکثر موارد شدیدترین نوع اتصال کوتاه می‌باشد، از این رو محاسبه این نوع اتصال کوتاه به منظور تعیین قدرت اتصال کوتاه و نیروی الکترودینامیکی قابل تحمل تجهیزات ضروری می‌باشد. برای مدل‌سازی این نوع خطا ، شبکه سه فاز زیر را در نظر می‌گیریم، که R مجموع مقاومت هادی فاز شبکه تا نقطه اتصال کوتاه و X مجموع راکتانس هادی فاز شبکه تا نقطه اتصال کوتاه باشد، مدار معادل شبکه در شرایط اتصال کوتاه سه فاز به‌صورت زیر می باشد:



چون اتصال کوتاه متقارن است، می‌توان آن را به‌صورت مدار معادل تک‌خطی بررسی کرد. مدار معادل تک‌خطی این اتصالی به‌صورت زیر است:

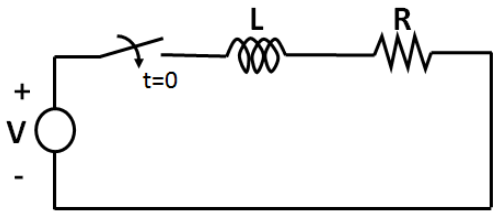
$$V = v_m \sin(\omega t + \alpha) = Ri + L\frac{di}{dt}$$

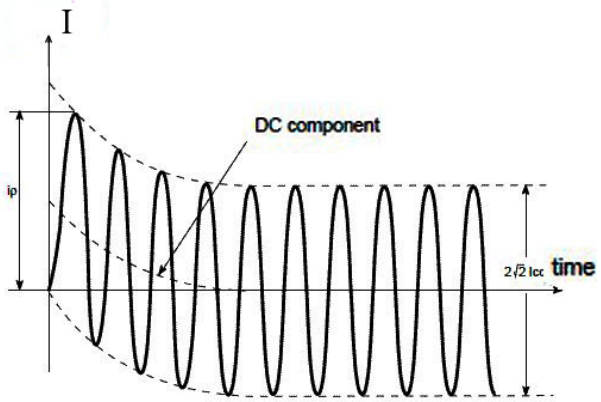
$$I = \frac{v_m}{Z}\left(\sin(\omega t + \alpha - \theta)\right) + e^{-\frac{R}{L}t}\sin(\alpha - \theta)$$

$$z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\theta = tg^{-1}\,x/R$$

$$x/R >> 1$$



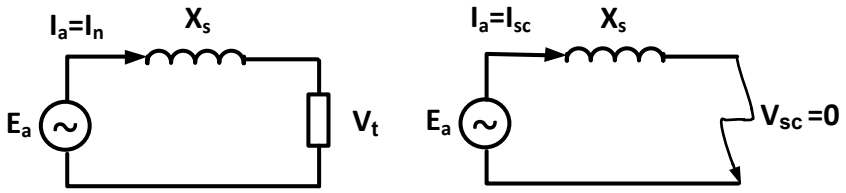


در شکل بالا ملاحظه می‌شود که جریان در ابتدا یک مقدار میرا شونده دارد که به علت جمله $e^{-R/L}$ است و باگذشت زمان صفر می‌شود. اما مقدار جریان خطا که دارای دامنه $Ip=Vm/z$ است باقی می‌ماند که همان جریان خطا است و مقدار آن به‌مراتب از جریان نامی (جریان بار) بیشتر است.

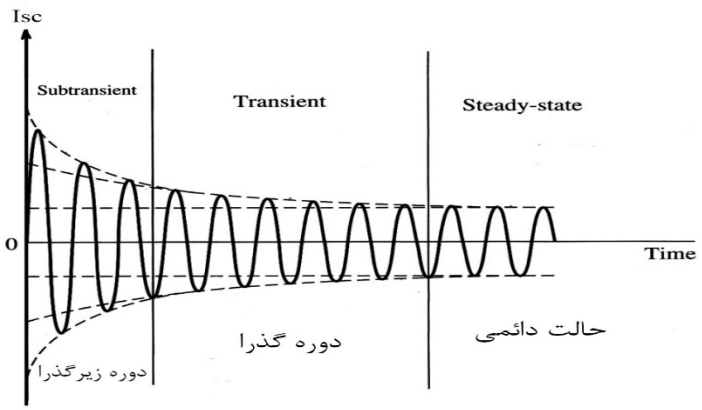
اتصال کوتاه متقارن در سیستم قدرت:

در زمان اتصال کوتاه در سیستم قدرت اتفاقی شبیه مدار RL بالا می‌افتد با این تفاوت که در سیستم قدرت از مقاومت در برابر راکتانس صرف نظر می‌شود($R\sim0$)، بنابراین مؤلفه DC وجود نخواهد داشت. اما به علت رفتار ژنراتور در لحظات اولیه جریان اتصال کوتاه زیاد است و باگذشت زمان کمتر می‌شود یعنی شبیه مدار RL ولی با علتی متفاوت از آن.

اگر از مقاومت مدار آرمیچر ماشین سنکرون صرف‌نظر شود و مدار معادل آن به‌صورت زیر تنها یک سلف داشته باشد، انتظار داریم در زمان اتصال کوتاه جریان اتصالی که به‌مراتب از جریان حالت کار دائمی ماشین بزرگ‌تر است از آن عبور کند. یعنی جریان اتصال کوتاه I_{sc} یک جریان سینوسی با دامنه‌ای بسیار بیشتر از جریان حالت دائمی I_n است.



اما در ماشین سنکرون مقدار جریان خطا در لحظات اولیه اتصالی حتی از جریان اتصال کوتاه I_{sc} نیز بزرگ‌تر است که علت آن رفتار سیم‌پیچ‌های این نوع ماشین است. شکل زیر جریان اتصال کوتاه را نشان می‌دهد که شامل سه دوره زیر گذرا، گذرا و حالت دائمی است که علت هر کدام در ادامه تشریح می‌شود.



دوره زیر گذرا: در زمان اتصال کوتاه شار موجود در فاصله هوایی زیاد است و با توجه به اینکه شار به صورت آنی تغییر نمیکند تا زمانی که شار عکس العمل آرمیچر ایجاد نشده است شار موجود از مسیر های دیگر نیز عبود میکند. در دوره زیرگذار اتصال کوتاه باعث می‌شود سرعت روتور تغییر کرده و درنتیجه در سیم‌پیچ‌های دمپر (سیم‌پیچ‌های اضافی برای پایداری ماشین نصب می‌شود) جریان القا شود که این جریان مانند تحریک عمل کرده و ولتاژ داخلی Ea را افزایش می‌دهد که نتیجه آن افزایش جریان اتصال کوتاه است. مدت زمان این دوره به ثابت زمانی مدار دمپر یعنی مقدار اندوکتانس و مقاومت آن $T''=L_d/R_d$ وابسته است و معمولاً کوچک بوده و ۲-۳ سیکل طول می‌کشد. در دوره زیر گذار بیشترین جریان اتصال کوتاه را خواهیم داشت که حدود ۱۰ برابر جریان اتصال کوتاه حالت دائمی خواهد بود و با I_{sc}'' نشان داده می‌شود.

دوره گذرا: در این دوره شار موجود در فاصله هوایی که هنوز به مقدار ماندگار نرسیده است باعث می‌شود در سیم‌پیچ‌های تحریک جریان القا شود که این جریان ولتاژ داخلی Ea را افزایش می‌دهد که نتیجه آن افزایش جریان اتصال کوتاه است. مدت زمان این دوره به ثابت زمانی مدار تحریک $T' =L_f/R_f$ وابسته است و معمولاً ۱۵-۱۰ سیکل طول می‌کشد. در دوره گذرا جریان اتصال کوتاه از حالت زیر گذرا کمتر است که حدود ۵ برابر جریان اتصال کوتاه حالت دائمی خواهد بود و با I_{sc}' نشان داده می‌شود.

حالت دائمی اتصال کوتاه: در این حالت افزایش جریان به‌واسطه افزایش تحریک در مدار دمپر و تحریک بر طرف شده و تنها جریان اتصال کوتاه حالت ماندگار تا زمان رفع خطا باقی می‌ماند و با I_{sc} نشان داده می‌شود.

همان‌طور که گفته شد علت کاهش ۲ مرحله‌ای جریان اتصال کوتاه تا قبل از رسیدن به مقدار ماندگار افزایش تحریک و ولتاژ القایی است. می‌توان این افزایش ولتاژ القایی را با کاهش راکتانس عکس‌العمل آرمیچر و یا راکتانس سنکرون مدل کرد. به‌عبارت‌دیگر ولتاژ القایی در هر دوره ثابت فرض می‌شود و در دوره زیر گذار راکتانس معادل آن یعنی X_s'' کمترین مقدار را دارد. بعد از آن X_s' را خواهیم داشت که کمتر خواهد بود و درنهایت X_s که همان مقدار واقعی راکتانس سنکرون است.

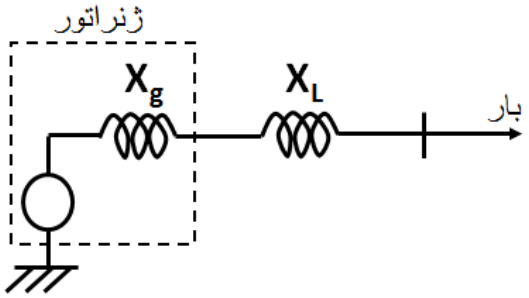
$$X_s'' = \frac{E_a}{I_{sc}''}$$

$$X_s' = \frac{E_a}{I_{sc}'} \qquad X_s'' < X_s' < X_s \qquad I_{sc}'' > I_{sc}' > I_{sc}$$

$$X_s = \frac{E_a}{I_{sc}}$$

بنابراین در هر دوره برای محاسبات از راکتانس معادل آن استفاده می‌شود. X_s'' راکتانس زیر گذرا، X_s' راکتانس گذرا و X_s راکتانس حالت دائمی است. مقدار جریان‌های زیر گذرا و گذرا برای تنظیم رله‌های حفاظتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. و مقدار جریان اتصال کوتاه برای سایزینگ مدارشکن استفاده می‌شود.

در بعضی از کتب اندیس جریان اتصال کوتاه را با f یعنی اول کلمه fault نشان می‌دهند. برای مثال زیر اگر خطا در نزدیک بار رخ دهد جریان‌های خطا به‌صورت زیر هستند.



$$I_f'' = \frac{E_g}{X_g'' + X_L}$$

$$I_f' = \frac{E_g}{X_g' + X_L}$$

$$I_f = \frac{E_g}{X_g + X_L}$$

نکته: می‌توان ولتاژهای داخلی گذرا و زیر گذرا را با داشتن جریان بار و ولتاژ ترمینال ژنراتور محاسبه کرد و از این مقادیر جهت محاسبه جریان اتصال کوتاه استفاده نمود.

$$E_g = V - jIX_d$$

$$E_g' = V - jIX_d'$$

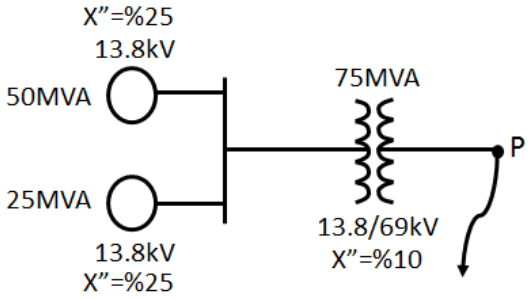
$$E_g'' = V - jIX_d''$$

محاسبه جریان اتصال کوتاه:

۱- با استفاده از ولتاژ داخلی ژنراتورها و موتورها و امپدانسها، جریان خطا را با استفاده از تقسیم جریان حساب کنیم. (ولتاژ قبل از اتصال کوتاه یا داده میشود و یا باید محاسبه شود)

۲- مدار معادل تونن را از دو سر اتصال کوتاه رسم کرده و مقدار جریان را حساب می‌کنیم.

مثال۱: در شبکه‌ی شکل زیر، ولتاژ سمت ثانویه ترانس قبل از اتصال کوتاه ۶۶ کیلو ولت است.



الف) اگر اتصال کوتاه در نقطه p اتفاق بیافتد، جریان خطای زیر گذرا را حساب کنید؟ **ب)** سهم هرکدام از ژنراتورها از جریان اتصال کوتاه چقدر است؟ **ج)** مقدار جریان‌ها را برحسب آمپر بدست‌آورید.

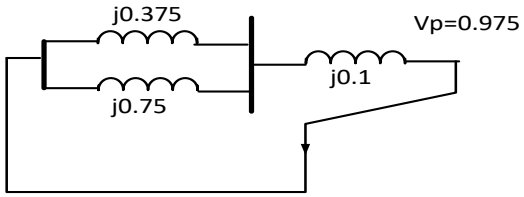
حل: الف) ابتدا راکتانسها را هم مبنا می کنیم.

$$X''_{d_1} = 0.25 \times \frac{75}{50} = j\,0.375 pu$$

$$X''_{d_2} = 0.25 \times \frac{75}{25} = j\,0.75 pu$$

$$V_F = V_P = \frac{66}{69} = 0.957 pu$$

مدار معادل شبکه به‌صورت زیر است که امپدانس تونن از دید دو سر خطا به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.



$$Z_{TH} = \frac{0.375 \times 0.75}{0.375 + 0.75} + 0.1 = j\,0.35 pu$$

$$I''_F = \frac{V_F}{Z_{TH}} = -j\,2.735 pu$$

ب) با استفاده از تقسیم جریان داریم:

$$I_{FG_1} = -j\,2.735 \times \frac{0.75}{0.75 + 0.375} = -j\,1.823 pu$$

$$I_{FG\,2} = -j\,2.735 \times \frac{0.375}{0.75 + 0.375} = -j\,0.912 pu$$

ج)

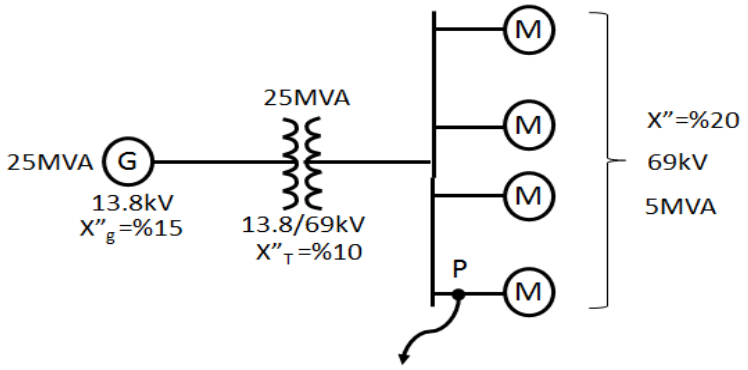
$$I''_F = \left|-j\,2.735\right| \times I_b = 2.735 \times \frac{75 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 69 \times 10^3} = 2.735 \times 628.3 = 1718.4 A$$

$$I''_{G_1} = 1.823 \times \frac{75 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 13.8 \times 10^3} = 5726.94 A$$

$$I''_{G_2} = 0.912 \times \frac{75 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 13.8 \times 10^3} = 2861.64 A$$

نکته: اگر در سیستم قدرت موتور سنکرون داشته باشیم در لحظه اتصال کوتاه به علت اینرسی روتور تولید کننده توان یعنی تبدیل به ژنراتور سنکرون می‌شود.

مثال۲: اگر در شبکه شکل زیر در نقطه P اتصال کوتاه سه فاز رخ دهد جریان خطای زیر گذرا را محاسبه کنید.

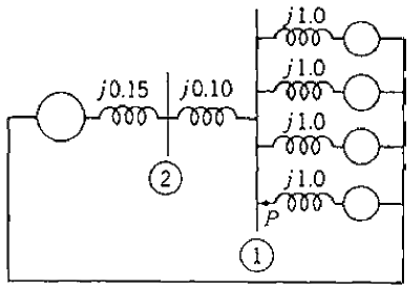


مقدار راکتانس موتورها در مبنای ۲۵ مگا ولت آمپر محاسبه می‌شود و ولتاژ قبل از خطا که چون گفته نشده است ۱ پریونیت در نظر گرفته می‌شود.

$$X''_{d_M} = 0.2 \times \frac{25}{5} = 1pu$$

$$V_F = 1pu$$

مدار معادل شبکه به‌صورت زیر است. حال مقدار راکتانس تونن از دید نقطه p را بدست می‌آوریم. ۰.۱ و ۰.۱۵ سری هستند و ۴ راکتانس موتورها با یکدیگر موازی خواهند بود. و راکتانس تونن نهایی موازی این دو است.



$$Z_{th} = (0.15 + 0.1) \parallel (1 \parallel 1 \parallel 1 \parallel 1) = j0.125$$

$$I''_F = \frac{1}{0.125} = -j8pu$$

$$I''_F = 8 \times \frac{25 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 69 \times 10^3} = 16720A$$

انتخاب مدار شکن یا کلید قدرت یا دژنکتور:

پس از اتصال کوتاه و تشخیص آن توسط رله در مدارشکن باید ظرف مدت چند سیکل جریان خطا را برای جلوگیری از صدمه دیدن عناصر سیستم قطع نماید. از محاسبات اتصال کوتاه برای تعیین سایز کلید قدرت استفاده می‌گردد. مدارشکن باید جریان خطا و ماکزیمم جریان لحظه‌ای را تحمل کند. جریان قطعی نامی یک کلید به مقدار جریانی گفته می‌شود که آن کلید بتواند آن را قطع کند. انواع مدارشکن مانند روغنی، خلاء، sf_6 و ..... هستند.

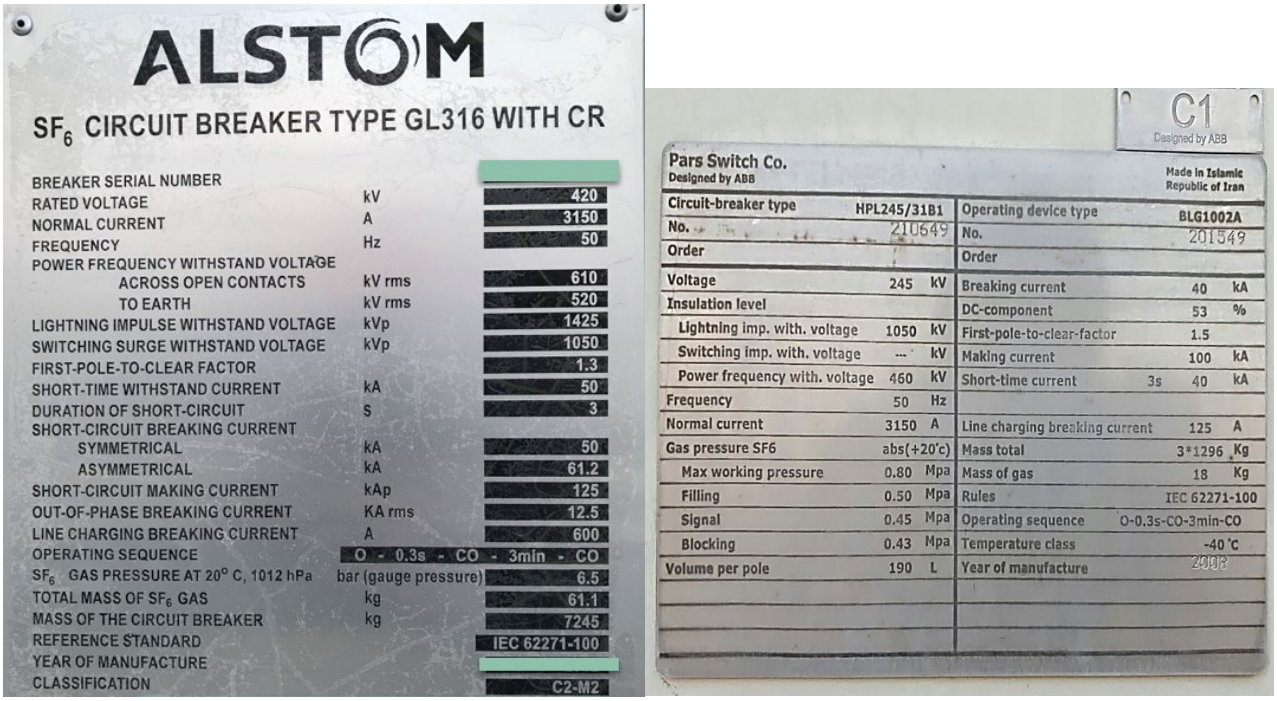
قدرت نامی مدار شکن: با استفاده از فرمول زیر محاسبه شده و برای انتخاب نوع مدارشکن استفاده می‌شود:

$$S_n = \sqrt{3} \times V_n \times I_F$$

نکته: اگر مدارشکن در ولتاژی کمتر از ولتاژ نامی کار کند می‌تواند جریان بالاتری را قطع کند به طوری که قدرت قطع ثابت بماند.

پلاک مدار شکن

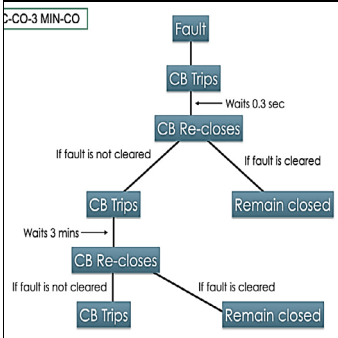
در شکل زیر پلاک دو مدار شکن آورده شده و در جدول موارد ذکر شده در پلاک به صورت مختصر توضیح داده شده است.



شکل : پلاک دو نمونه مدار شکن قدرت

جدول توضیحات پلاک مدار شکن

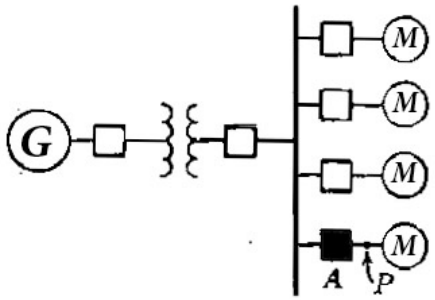
آیتم	توضیح
Rated Voltage	ولتاژ نامی برای مثال ۲۴۵ کیلو ولت که در سیستم ۲۳۰ کیلو ولت نصب میشود
Normal current	جریان نامی است. یعنی تا ۳۱۵۰ آمپر بدون مشکل بصورت مداوم از بریکر این جریان میتواند عبور کند و هر زمان نیاز باشه بدون مشکل بریکر میتواند عملکرد داشته باشد.
Frequency	فرکانس نامی که در اینجا ۵۰ هرتز است. (اگر در سیستم ۶۰ هرتز استفاده شود مقادیر مربوط به قدرت قطع اتصال کوتاه، مولفه dc و قطع جریان شارژر خازنی تغییر خواهد کرد.)
Lightning impulse withstand voltage	مقدار ولتاژی که اگر در یک لحظه کوتاه (بر اثر صاعقه) به بریکر اعمال شود و بریکر دچار مشکل نشود. این مقدار برای فاز به زمین است.
Switching impulse withstand voltage	اضافه ولتاژ ایجاد شده حین کلید زنی. این پارامتر برای بریکر با ولتاژ بیش از ۳۰۰ کیلوولت بیان میشود.
Power frequency	نشان دهنده این است که این بریکر میتواند به مدت ۶۰ ثانیه این ولتاژ رو تحمل کند بدون اینکه معیوب شود.
Breaking current	این بالاترین مقدار rms جریان اتصال کوتاه است که مدار شکن قادر به قطع آن است. گاهی اوقات جریان قطع متقارن نیز نامیده می شود.
Making current	بالاترین جریان وصل. این جریان حدود ۲.۵ تا ۲.۷ جریان قطع اتصال کوتاه است.
DC component	یعنی بریکر میتواند اتصال کوتاهی که مولفه DC آن ۵۳ درصد مقدار جریان نامی قطع کلید است را قطع کند.
First pole to clear factor	در زمان قطع بریکر وقتی کنتاکتها از هم جدا میشوند همچنان جریان سینوسی برقرار است و بصورت آرک عبور جریان ادامه دارد. این جریان وقتی به صفر منحنی سینوسی میرسد قطع میشود. در یک سیستم سه فاز جریان یکی از فازها زودتر به نقطه صفر سینوسی میرسد و جریان قطع شده بنابراین آن پل زودتر قطع شده و روی پل زودتر قطع شده اضافه ولتاژ گذرا ایجاد میشود. این بریکر میتواند تا ۱.۵ برابر ولتاژ نامی را در آن بازه زمانی کوتاه تحمل کند.
Short time current	بریکر میتواند حداکثر جریان اتصال کوتاه قابل قطع (۴۰ کیلوآمپر) را برای ۳ ثانیه تحمل کند. اگر در این سه ثانیه از رله فرمان قطع ارسال نشود یا بریکر بنا به هر دلیل قطع نشود دچار آسیب خواهد شد.
line charging	حداکثر جریان قطع خازنی، اگر خط بی بار باشد بریکر فقط میتواند جریان خازنی که ۱۲۵ آمپر هست رو قطع کند
Operating sequence	توالی قطع و وصل بریکر را بیان میکند. CO : CLOSE - OPEN ،O:OPEN O-0.3s-CO-3min-CO یعنی بریکر وصل بوده و قطع (OPEN) میشود. باید رله اتوریکلوزر طوری طراحی شود که حداقل ۰.۳ ثانیه تاخیر داشته و اگر شرایط محیا بود بریکر وصل شود (CLOSE) حال که وصل شد اگه در همان لحظه مجددا قطع شد(فالت برقرار باشد) حالا برای وصل بعدی باید سه دقیقه تاخیر داشته باشد. این سه دقیقه برای شارژ فنر و بازیابی خاصیت خفه کنندگی آرک، گاز یا روغن موجود در پل‌های بریکر نیاز است.



مثال۳: در مثال قبل مقدار مقادیر زیر را بدست آورید.

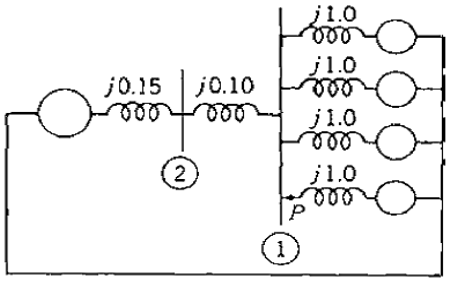
الف) جریان زیر گذرای مدارشکن A

ب) جریان نامی قطع اتصال کوتاه در مدار شکن A را بدست آورید. (برای موتورها $X_d = 1.5X_{d''}$ است چون حالت گذرای آن‌ها سریعتر است و لازم نیست راکتانس زیر گذرا لحاظ شود)



حل:

الف) با استفاده از راکتانسهای زیرگذرا داریم



سهم جریان خطای ژنراتور = $-j8\times\frac{0.25}{0.5}=-j4pu$

سهم جریان خطای موتورها = $\frac{3}{4}\left(-j8-\left(-j4\right)\right)=-j3pu$

جریان زیرگذرای عبوری از مدارشکن A = $\left|-j4-j3\right|I_b=14630A$

ب) باید راکتانس موتورها را در ضریب داده شده یعنی ۱.۵ ضرب کنیم

$X_{d-m}=1\times1.5=j1.5$

$X_{eq-d-m}=j\frac{1.5}{4}=j0.375$

$X_{th}=j0.25\,\|\,j0.375=j0.15$

$I_F=\frac{V}{X_{th}}=\frac{1}{j0.15}=-j6.67pu$

جریان ژنراتور = $I_{g_F} = -j\,6.67 \times \frac{j\,0.375}{j\,0.375 + j\,0.25} = -j\,4pu$

جریان هر موتور = $\frac{1}{4} \times (-j\,6.67) \times \frac{j\,0.25}{j\,0.375 + j\,0.25} = -j\,0.67pu$

جریان سه موتور = $3 \times (-j\,0.67) = -j\,2pu$

جریان قطع مدارشکن = جریان ژنراتور + جریان سه موتور = $-j\,4 + (-j\,2) = -j\,6pu$

جریان نامی قطع مدارشکن $I_F^{(A)} = 6 \times I_b = 6 \times 2090 = 12560A$

- **کاربرد $\mathbf{Z_{bus}}$ در محاسبات پخش بار:**

برای انجام محاسبات در سیستم‌های بزرگ توسط رایانه از Z_{bus} سیستم استفاده می‌شود. برای بدست‌آوردن مقدار ولتاژها قبل از اتصال کوتاه با استفاده از پخش بار مقادیر اولیه بدست خواهد آمد. از آن‌جا که درایه‌های قطر اصلی ماتریس Z_{bus}، امپدانس تونن دیده شده از باس‌های مختلف را نشان می‌دهند. جریان اتصال کوتاه بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$z_{bus} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nn} \end{bmatrix} \quad , \qquad V^0 = \begin{bmatrix} V_1^0 \\ V_2^0 \\ \vdots \\ V_n^0 \end{bmatrix} \qquad \rightarrow \quad I_{F-i} = \frac{V_i^0}{Z_{ii}}$$

نکته: بسته به نوع مطالعه در ماتریس Y_{bus} ، Z_{bus} راکتانس گذرا و یا زیرگذرای ماشین سنکرون را تأثیر دارد.

نکته: راه ساده تر برای بدست آوردن Z_{bus} این است که Y_{bus} محاسبه شود سپس معکوس شود.

مقدار ولتاژ سایر شین‌ها در حین اتصال کوتاه درشین P:

با استفاده از روابط زیر مقدار ولتاژ در شین‌های مختلف اگر اتصالی در شین p رخ دهد بدست می‌آید.

$$V_{sc} = \begin{bmatrix} v_{sc1} \\ v_{sc2} \\ \vdots \\ v_{scn} \end{bmatrix} \qquad , \qquad I_F = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_p \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \qquad \rightarrow \qquad V_{sci} = V_i^0 - Z_{ip} I_{FP} = V_i^0 - \frac{Z_{ip}}{Z_{ii}} V_p$$

V_{sci}: ولتاژ اتصال کوتاه شین i

V_i^0: ولتاژ قبل از اتصال کوتاه در شین i

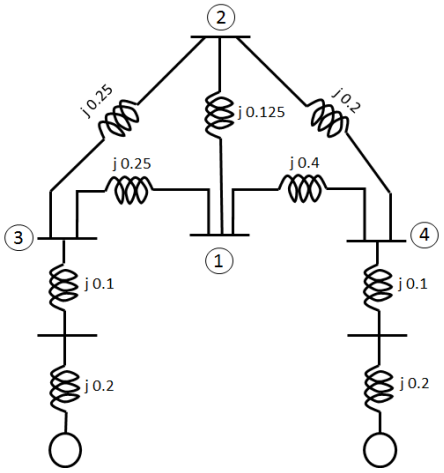
Z_{ip}: درایه ماتریس Z باس i و p ام

I_{fp}: جریان اتصال کوتاه در شین p

Z_{ii}: درایه ماتریس Z باس i و i ام

V_p: ولتاژ قبل از اتصال کوتاه در شین p

مثال۴: در شبکه زیر، در صورتیکه اتصالی در شین ۲ رخ دهد جریان خطا، ولتاژ شین‌ها و جریان شین ۳ به ۱ را محاسبه کنید.



$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} \frac{1}{j\,0.4}+\frac{1}{j\,0.25}+\frac{1}{j\,0.125} & -\frac{1}{j\,0.125} & -\frac{1}{j\,0.25} & \frac{-1}{j\,0.4} \\ \frac{-1}{j\,0.125} & \frac{1}{j\,0.2}+\frac{1}{j\,0.125}+\frac{1}{j\,0.25} & \frac{-1}{j\,0.25} & -\frac{1}{j\,0.2} \\ . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ . & . & . & . \end{bmatrix}$$

$$Z_{bus} = \begin{array}{c} \\ ① \\ ② \\ ③ \\ ④ \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} ① & ② & ③ & ④ \end{array} \\ \begin{bmatrix} j0.2436 & j0.1938 & j0.1544 & j0.1456 \\ j0.1938 & j0.2295 & j0.1494 & j0.1506 \\ j0.1544 & j0.1494 & j0.1954 & j0.1046 \\ j0.1456 & j0.1506 & j0.1046 & j0.1954 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$I_{F2} = \frac{1}{j\,0.22} = -j\,4.35$$
$$V_1 = 1 - Z_{12} I_{F2} = 1 - \left(j\,0.19 \times \left(-j\,4.35\right)\right) = 0.15pu$$
$$V_2 = 0$$
$$V_3 = 0.34pu$$
$$V_4 = 0.34pu$$
$$I_{31} = \frac{V_3 - V_1}{Z_{31}} = \frac{0.34 - 0.15}{j\,0.25} = -j\,0.77pu$$

مطالب تکمیلی:

- قدرت اتصال کوتاه در یک شین نشان می‌دهد که اگر در آن شین یک خطا رخ دهد چه جریانی و متناسب با ولتاژ آن چه توانی باید تحمل کند که در برخی از محاسبات سیستمهای قدرت موردنیاز است و به‌صورت زیر بدست می‌آید.

قدرت اتصال کوتاه شین P برحسب MVA : $S_{SC} = \sqrt{3} \times V_{SC} \times I_F$

- تأثیر مؤلفه DC در جریان اتصال کوتاه: اگر از مقاومت خطوط صرف نظر نکنیم مقدار جریان اولیه اتصال کوتاه حتی از جریان زیرگذرا هم بیشتر است. مقدار جریان مؤثر در نیم سیکل اول که باید کلید تحمل کند و به جریان آنی موسوم است از ضرب جریان زیر گذار در ۱.۶ بدست می‌آید. جریان نامی کلید از جریان آنی کمتر است و به سرعت قطع کلید بستگی دارد. با استفاده از جدول زیر و سرعت قطع کلید که بر حسب تعداد سیکل داده می‌شود می‌توان جریان نامی قطع آن را با استفاده از ضرایب داده شده بدست آورد. برای مثال اگر سرعت قطع کلید ۳ سیکل باشد باید قدرت قطع نامی در ضریب ۱.۲ به واسطه از بین نرفتن مؤلفه DC ضرب شود.

سرعت قطع کلید برحسب تعداد سیکل	ضریب مؤلفه DC
۸	۱
۵	۱/۱
۳	۱/۲
۲	۱/۴

تمرین‌های فصل اتصال کوتاه متقارن

- انواع خطاها در سیستم قدرت و علت آن‌ها را بیان کنید.
- اتصال کوتاه یعنی چه؟
- منظور از اتصال کوتاه متقارن چیست؟
- چرا محاسبات اتصال کوتاه انجام می‌دهیم؟
- در زمان اتصال کوتاه موتورهای سنکرون چگونه عمل می‌کنند؟
- راکتانس زیر گذرا و گذرا به چه مفهوم هستند؟
- امپدانس خطا چیست و به چه علت لحاظ می‌شود؟ آیا در نظر گرفتن آن ضروری است؟
- Z_{bus} چگونه بدست می‌آید؟ و درایه‌های آن چه چیزی را نشان می‌دهند؟

۱- یک ژنراتور ۲۵۰MVA، ۲۰KV با راکتانس $X''_d = ۰/۲$ PU به ترانسفوماتور ۲۵۰MVA ، ۲۰KV/۲۳۰ با راکتانس $X = ۰/۱$ PU متصل است. اگر اتصال کوتاه سه‌فازی در طرف فشار قوی ترانسفورماتور اتفاق بیفتد، جریان زیرگذرای اتصال کوتاه را برحسب PU و آمپر و همچنین ولتاژ ترمینالهای ژنراتور را برحسب کیلوولت بدست آورید. سیستم قدرت قبل از اتصال کوتاه بدون بار و ولتاژ طرف فشار قوی ۲۲۳/۱ کیلوولت بوده است.

۲- یک ژنراتور سنکرون از طریق یک ترانسفورماتور به موتور سنکرونی متصل است. راکتانس زیرگذرای ژنراتور و موتور در مبنای یکسان بترتیب ۰/۲PU و ۰/۳PU بوده و راکتانس پراکندگی ترانسفورماتور در همان مبنا ۰/۱PU می‌باشد. هنگامی که ولتاژ ترمینالهای ژنراتور $۱/۰۲۷^{\circ}$ و جریان آن ۱PU با ضریب قدرت ۰/۸۵ پس‌فاز است، اتصال کوتاه متقارنی در ترمینالهای موتور اتفاق می‌افتد. جریان‌های زیرگذرای اتصال کوتاه در محل وقوع، ژنراتور و موتور را بدست آورید.

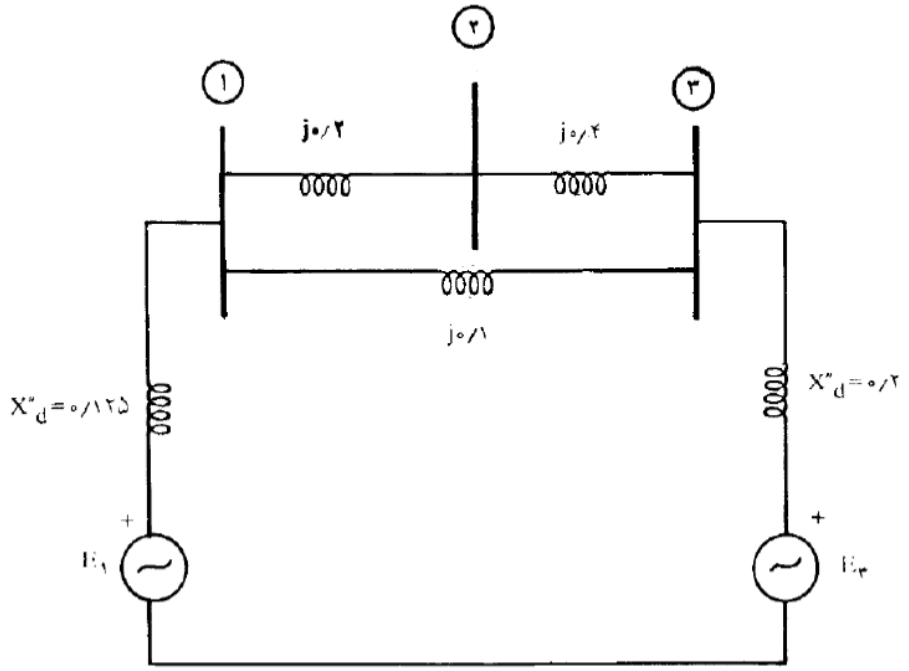
۳- دو موتور سنکرون بترتیب دارای راکتانس‌های زیرگذرای ۰/۸ و ۰/۲۵ پریونیت در مبنای ۴۸۰V و ۲MVA به یک شین متصل هستند. این موتورها از طریق خط انتقالی با راکتانس ۰/۰۲۳Ω به یک سیستم قدرت متصل می‌باشند. قدرت اتصال کوتاه سیستم قدرت ۹/۶MVA و ولتاژ نامی آن ۴۸۰V می‌باشد. سیستم را قبل از اتصال کوتاه بدون بار فرض کنید و براثر اتصال کوتاه سه‌فاز متقارن در شین موتورها، جریان اتصال کوتاه در محل وقوع را محاسبه کنید. ولتاژ ترمینالهای موتورها قبل از اتصال کوتاه ۴۴۰V بوده است.

۴- در شکل (۱) امپدانس‌ها در مبنای ۱۰۰MVA برحسب PU مشخص شده‌اند. این سیستم قبل از اتصال کوتاه بدون بار و ولتاژ شین ۱ معادل ۱PU بوده‌است.

الف) ماتریس Z_{bus} را برای این سیستم تشکیل دهید.

ب) جریان اتصال کوتاه متقارن و قدرت اتصال کوتاه (MVA) در شین ۱ را محاسبه کنید.

ج) ولتاژ شین‌های ۲ و ۳ و جریان عبوری از خط ۳-۲ را براثر اتصال کوتاه در شین ۱ بدست آورید.



شکل (۱)

۵- می‌خواهیم قدرت اتصال کوتاه شین ۱، در مسأله (۴) را به $\frac{۲}{۳}$ مقدار بدست آمده برسانیم. برای اینکار راکتوری با ژنراتور متصله به شین ۱ سری می‌کنیم. راکتانس این راکتور را بدست آورید.

فصل سوم

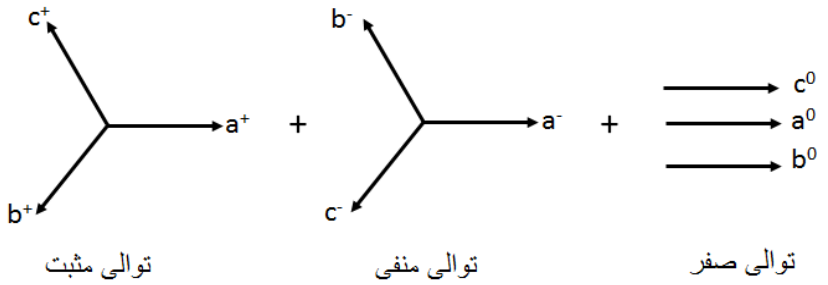
اتصال کوتاه نامتقارن

اگر ولتاژ و یا جریان در سیستم قدرت متقارن نباشد (یعنی دامنه نابرابر و اختلاف فاز ۱۲۰ درجه نباشد) با استفاده از مدار معادل تک فاز برای کل سیستم سه فاز نمی‌توان تحلیل‌ها را انجام داد. زمانی که اتصال کوتاه تکفاز و یا دو فاز اتفاق بیافتد دیگر سیستم سه فاز متقارن نخواهد بود و نمی‌توان شبیه آنچه برای خطای سه فاز داشتیم جریان خطا را بدست آورد. به این منظور از روش مؤلفه‌های متقارن یا تبدیل فورتسکیو برای تبدیل بردارهای یک سیستم سه فاز نامتقارن به **سه سیستم** سه فاز متقارن (توالی مثبت، منفی و صفر) استفاده می‌شود.

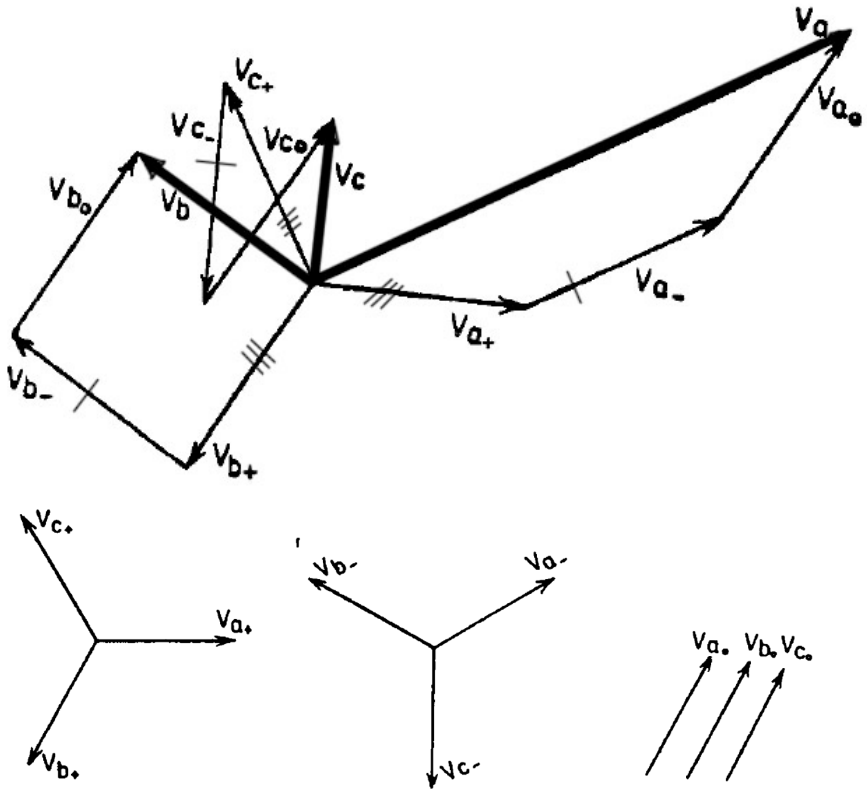
توالی مثبت: سه بردار با اندازه برابر با اختلاف فاز ۱۲۰ درجه که توالی آن‌ها در جهت توالی سیستم اصلی است.

توالی منفی: سه بردار با اندازه برابر با اختلاف فاز ۱۲۰ درجه که توالی آن‌ها در خلاف جهت توالی سیستم اصلی است.

توالی صفر: سه بردار با اندازه برابر و اختلاف فاز صفراست.



فورتسکیو اثبات کرد که هر سه بردار نامتقارن را می‌توان به‌صورت جمع سه دسته بردار توالی مثبت، منفی و صفر نوشت. این قضیه به‌صورت فرمول و برداری در زیر نشان داده شده است:



توالی مثبت توالی منفی توالی صفر

در شکل بالا بردارهای Va,Vb,Vc سه بردار نامتقارن هستند که با استفاده از جمع برداری سه دسته بردار متقارن توالی مثبت Va^{+},Vb^{+},Vc^{+} و توالی منفی Va^{-},Vb^{-},Vc^{-} و توالی صفر Va^{0},Vb^{0},Vc^{0} نوشته شده اند.

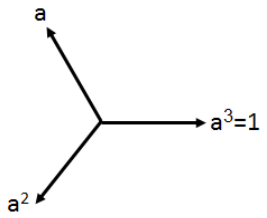
به‌صورت ریاضی داریم:

$$\begin{cases} v_a = v_a^{+} + v_a^{-} + v_a^{0} \\ v_b = v_b^{+} + v_b^{-} + v_b^{0} \\ v_c = v_c^{+} + v_c^{-} + v_c^{0} \end{cases} \quad (۱)$$

با تعریف عدد a به‌صورت 1<120 داریم:

$$\begin{cases} a = 1\angle 120 \\ a^2 = 1\angle 240 = 1\angle -120 \\ a^3 = 1\angle 0 = 1 \end{cases}$$

$$a^* = a^2$$



با استفاده از عدد a ولتاژها در توالی‌های مختلف و فازهای دیگر را بر حسب ولتاژهای یک فاز مثلاً Va به‌صورت زیر می‌نویسیم:

$$\begin{cases} v_b^+ = a^2 v_a^+ \\ v_b^- = a v_a^- \\ v_b^0 = v_a^0 \end{cases} \qquad \begin{cases} v_c^+ = a v_a^+ \\ v_c^- = a^2 v_a^- \\ v_c^0 = v_a^0 \end{cases} \qquad (۲)$$

اگر دسته روابط (۱) و (۲) را به‌صورت ماتریسی بنویسیم خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a^0 \\ v_a^+ \\ v_a^- \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix},\ V = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix},\ Vs = \begin{bmatrix} v_a^0 \\ v_a^+ \\ v_a^- \end{bmatrix} \qquad A^{-1} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{matrix} V = A V_S \\ V_S = A^{-1} V \end{matrix}$$

به طور مشابه برای جریان‌ها نیز داریم:

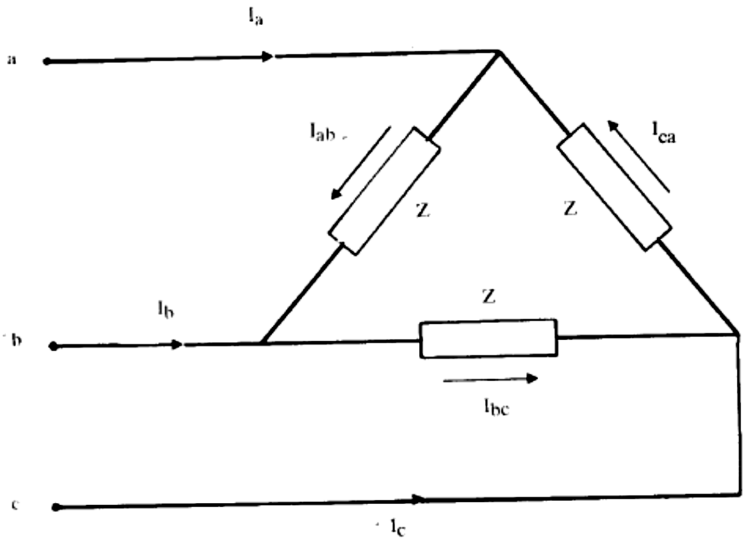
$$I = A I_S$$
$$I_S = A^{-1} I$$

تمرین: ثابت کنید در سیستم نامتقارن توان کل برابر توان هر یک از توالی‌ها است.

$$S = 3V^{0}I^{0*} + 3V^{+}I^{+*} + 3V^{-}I^{-*}$$

مثال۱: در بار سه فاز نامتقارن با اتصال مثلث مانند شکل زیر جریان‌ها داده شده است،

$$I_a = 100\angle 45^o\, A$$
$$I_b = 150\angle -60^o\, A$$



مطلوب است: الف) مولفه‌های متقارن جریان خطی و فازی. ب) جریان‌های فازی عبوری از هرکدام از امپدانس‌ها

الف) مولفه‌های متقارن جریان خطی و فازی

$$I_a + I_b + I_c = 0 \rightarrow I_c = -I_a - I_b = -100\angle 45^o - 150\angle 60^o = 157.27\angle 157.9^o$$

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^+ \\ I_a^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 100\angle 45^o \\ 150\angle 60^o \\ 157.27\angle 157.9^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 133.81\angle 47.77^o \\ 34.26\angle -124.12^o \end{bmatrix}$$

$$I_{a_0} = I_{b_0} = I_{c_0} = 0 \qquad \begin{cases} I_{a+} = 133.81\angle 47.77^o \\ I_{b+} = 133.81\angle -72.23^o \\ I_{c+} = 133.81\angle 167.77^o \end{cases} \qquad \begin{cases} I_{a-} = 34.26\angle -124.12^o \\ I_{b-} = 34.26\angle -4.12^o \\ I_{c-} = 34.26\angle +115.87^o \end{cases}$$

محاسبه جریان فازها

$$\begin{cases} I_{ab+} = \dfrac{I_{a+}}{\sqrt{3}}\angle 30^o = \dfrac{133.81}{\sqrt{3}}(47.77+30) = 77.25\angle 77.7^o \\ I_{bc+} = \dfrac{I_{b+}}{\sqrt{3}}\angle 30^o = I_{ab+}\angle 120^o = 77.25\angle -42.22^o \\ I_{ca+} = \dfrac{I_{c+}}{\sqrt{3}}\angle 30^o = I_{ab+}\angle 240^o = 77.25\angle -162.23^o \end{cases}$$

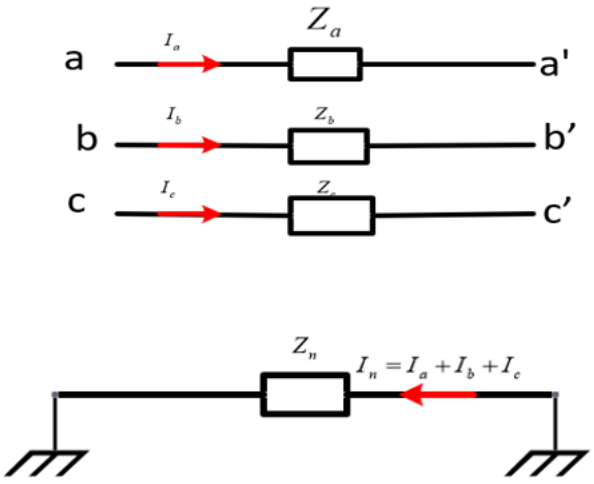
$$\begin{cases} I_{ab-} = \dfrac{34.26}{\sqrt{3}}\angle(-124.13-30) = 19.78\angle -154.13^o \\ I_{bc-} = 19.78\angle -34.13^o \\ I_{ca-} = 19.78\angle +85.87^o \end{cases}$$

ب) جریان‌های فازی عبوری از هرکدام از امپدانس‌ها

$$\begin{bmatrix} I_{ab} \\ I_{bc} \\ I_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 77.25\angle 77.77^o \\ 19.78\angle -154.13^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 66.9\angle 91.13^o \\ 96.87\angle 40.6^o \\ 72.24\angle -176.95^o \end{bmatrix}$$

- **مدل‌سازی قسمت های مختلف شبکه در توالی‌های مختلف:**

یک خط انتقال به‌صورت زیر در نظر بگیرید:



با استفاده از رابطه KVL داریم:

$$\begin{cases} V_{aa'} = Z_a I_a + Z_n\left(I_a + I_b + I_C\right) \\ V_{bb'} = Z_b I_b + Z_n\left(I_a + I_b + I_C\right) \\ V_{cc'} = Z_c I_c + Z_n\left(I_a + I_b + I_C\right) \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_a + z_n & z_n & z_n \\ z_n & z_b + z_n & z_n \\ z_n & z_n & z_c + z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

$$V = AV_S$$
$$I = AI_s$$
$$V = ZI$$

$$AV_S = ZAI_s \Rightarrow V_S = A^{-1}ZAI_s \quad (1)$$

$$V_S = Z_S I_S \quad (2)$$
$$(1),(2) \Rightarrow Z_S = A^{-1}ZA$$

$$Z_s = \frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a & a^2\\ 1 & a^2 & a\end{bmatrix}\begin{bmatrix}z_a+z_n & z_n & z_n\\ z_n & z_b+z_n & z_n\\ z_n & z_n & z_c+z_n\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & a & a^2\\ 1 & a^2 & a\end{bmatrix}$$

$$Z_s = \frac{1}{3}\begin{bmatrix}z_a+z_b+z_c+9z_n & z_a+a^2z_b+az_c & z_a+z_b+a^2z_c\\ z_a+az_b+a^2z_c & z_a+z_b+z_c & z_a+a^2z_b+az_c\\ z_a+a^2z_b+az_c & z_a+az_b+a^2z_c & z_a+z_b+z_c\end{bmatrix}$$

بنابراین اگر امپدانس‌ها برابر باشند

$$Z_s = \begin{bmatrix}z+3z_n & 0 & 0\\ 0 & z & 0\\ 0 & 0 & z\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}V_0\\ V^+\\ V^-\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}z+3z_n & 0 & 0\\ 0 & z & 0\\ 0 & 0 & z\end{bmatrix}\begin{bmatrix}I_0\\ I^+\\ I^-\end{bmatrix}$$

از روابط بالا نتیجه می‌شود که ولتاژ هر توالی فقط به جریان همان توالی وابسته است. یعنی **می‌توانیم برای تحلیل یک شبکه نامتقارن از سه شبکه مجزا با مدار معادل تکفاز آن استفاده می‌کنیم**. بنابراین باید مدار معادل هر سه توالی را برای هرکدام از المان‌های سیستم قدرت بدست آوریم. برای ژنراتور، ترانس و خط انتقال مدار معادل هر توالی را بدست می‌آوریم:

۱- مدار معادل توالی‌های مختلف برای ژنراتور سنکرون

$$V = E - ZI$$

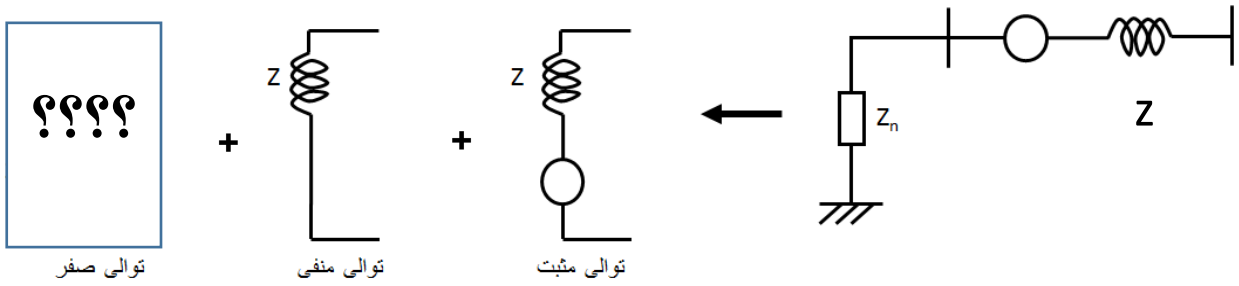
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - [Z] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

$$AV_S = E - ZAI_S \rightarrow V_S = A^{-1}E - A^{-1}ZAI_S \rightarrow V_S = E_S - Z_S I_S$$

$$E_S = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E^0 \\ E^+ \\ E^- \end{bmatrix}$$

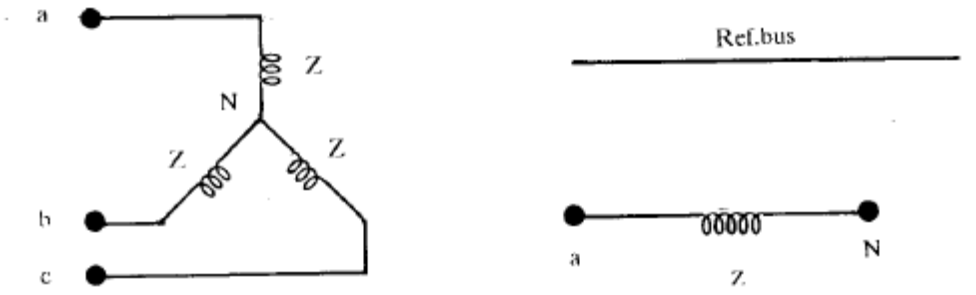
نشان می‌دهد فقط درتوالی مثبت نیرو محرکه ژنراتور وجود دارد.

مدار معادل ژنراتور در هرکدام از توالی‌ها:

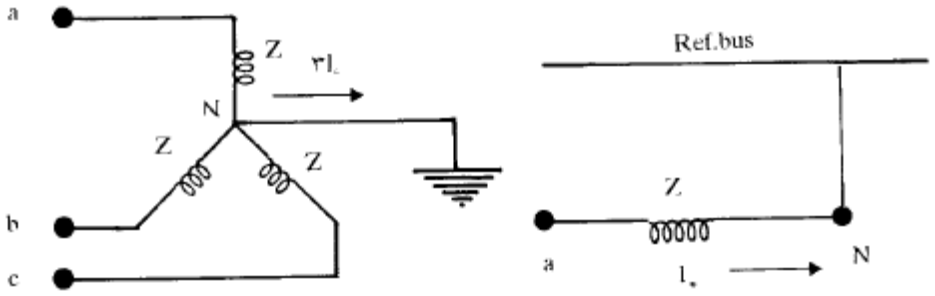


بسته به نوع سیم پیچی ژنراتور مدار معادل تکفاز **توالی صفر** آن با یکدیگر تفاوت خواهند داشت که **چهار** حالت به‌صورت زیر بوجود می‌آید:

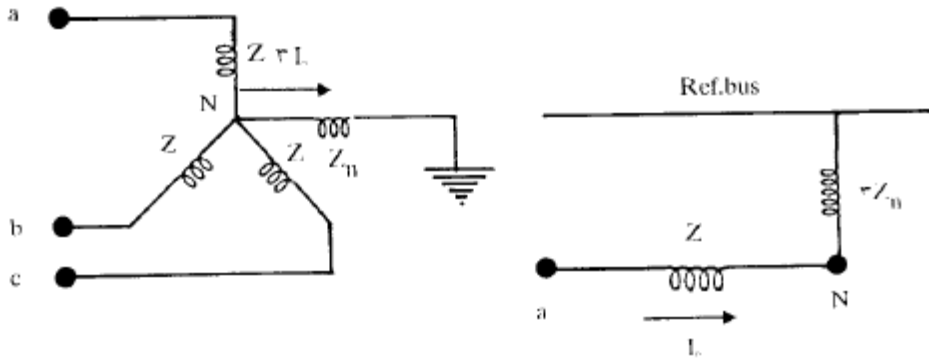
ستاره



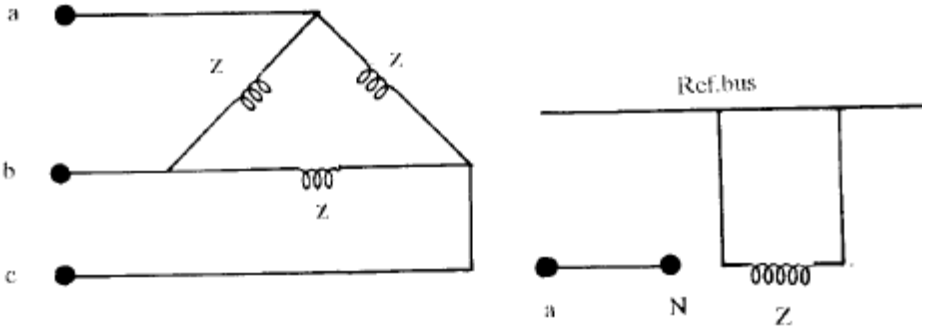
ستاره زمین شده



ستاره زمین شده
با امپدانس



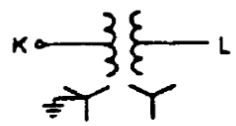
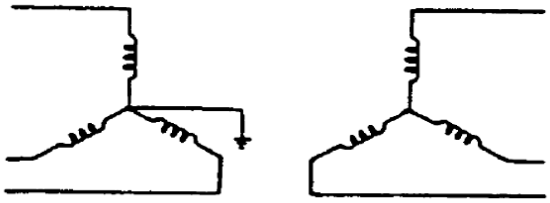
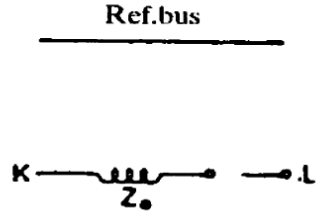
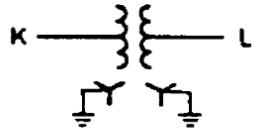
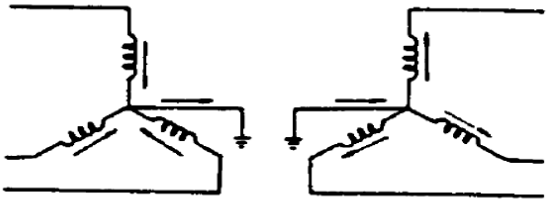
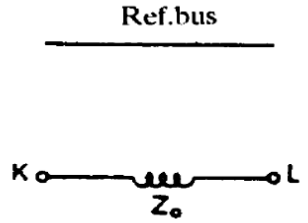
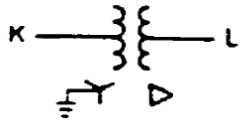
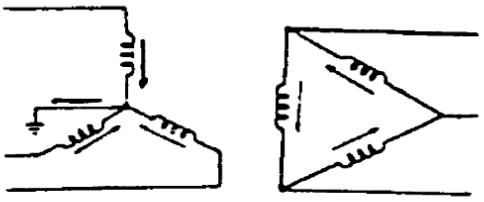
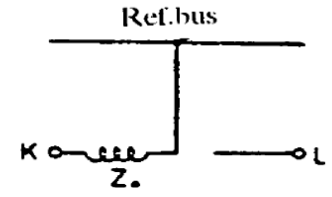
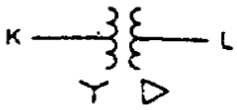
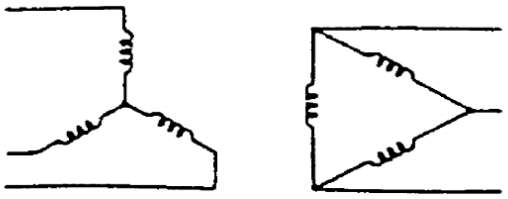
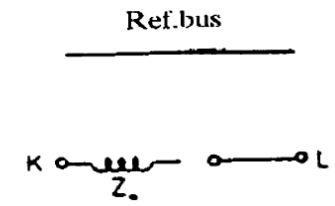
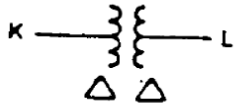
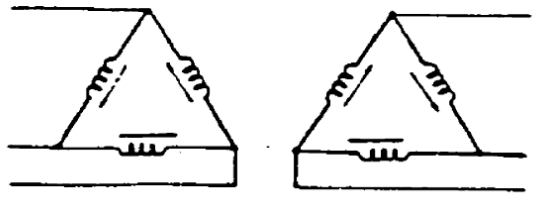
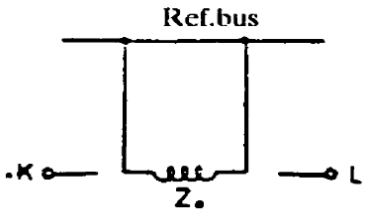
مثلث



۲- مدار معادل توالی‌های مختلف برای ترانسفورماتور

توالی مثبت و منفی با استفاده از یک امپدانس مدل می‌شود. $Z_{tr}^{+} = Z_{tr}^{-} = Z_{tr}$

اما توالی صفر ۵ حالت دارد که به‌صورت زیر است:

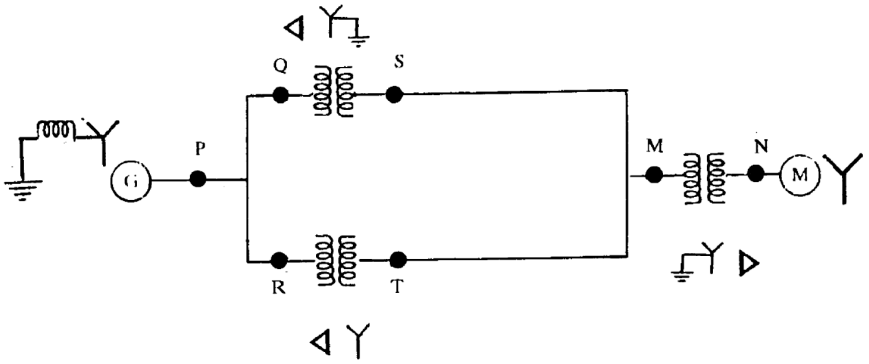
نوع اتصال	دیاگرام اتصال	شبکه توالی صفر
		
		
		
		
		

۳- مدل‌سازی برای خطوط انتقال:

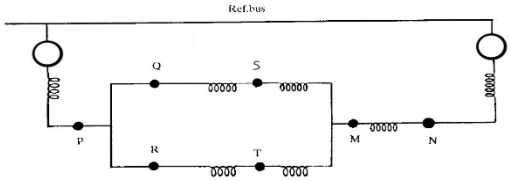
برای خطوط انتقال همه توالی‌ها با یک امپدانس مدل می‌شود اما مقدار امپدانس در توالی صفر بیشتر است.

$$Z_L^o = (2-3.5)Z_L^+$$
$$Z_L^+ = Z_L^-$$

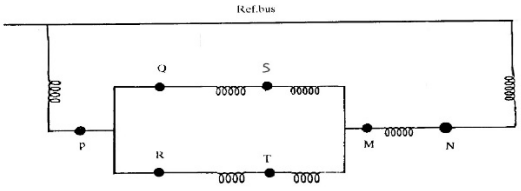
مثال۲: توالی مثبت و منفی و صفر سیستم زیر را رسم کنید.



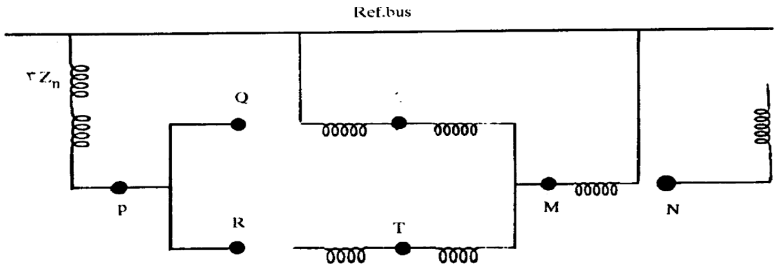
توالی مثبت:



توالی منفی:

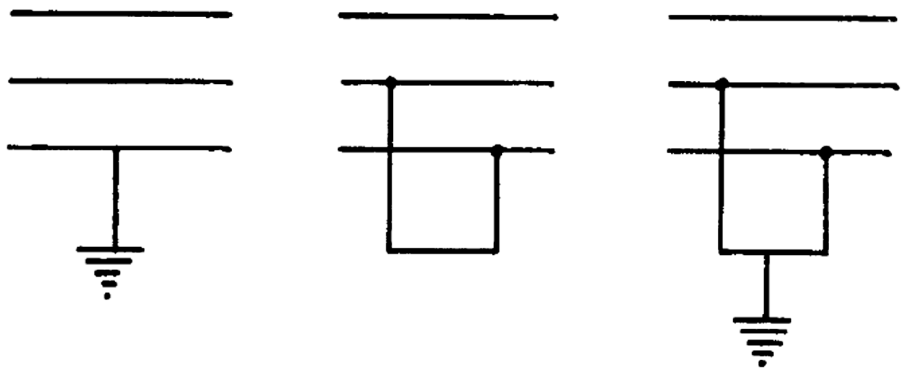


توالی صفر:



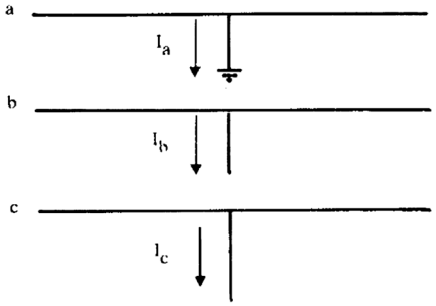
- **کاربرد مؤلفه‌های متقارن در محاسبات اتصال کوتاه نامتقارن:**

حال که نحوه تحلیل شبکه‌های نامقارن را به روش توالی‌ها آموختیم در ادامه اتصال کوتاه های نامقارن بررسی می‌شوند. که طبق شکل زیر به ترتیب شامل اتصال کوتاه تک فاز، اتصال کوتاه دوفاز به یکدیگر و اتصال کوتاه دوفاز به زمین است.



۱- اتصال کوتاه یک فاز به زمین SLG

در این حالت فرض شده است که فاز a توسط اتصالی به زمین متصل شده است. جریان گذرنده از این فاز همان جریان خطا است و از جریان دو فاز دیگر به علت کم بودن نسبت به جریان اتصال کوتاه صرف نظر می‌شود. ولتاژ فاز a چون به زمین وصل شده صفر می‌شود.

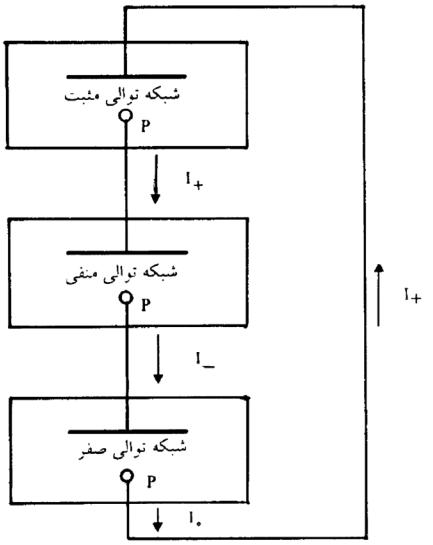


$$\begin{cases} i_a = i_f \\ i_b = 0 \\ i_c = 0 \end{cases} \qquad \begin{cases} v_a = 0 \\ v_b \neq 0 \\ v_c \neq 0 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I^+ \\ I^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow I_0 = I^+ = I^- = \frac{1}{3} i_f$$

از برابر بودن جریان هر سه توالی با یکدیگر و برابر بودن آن‌ها با یک‌سوم جریان خطا نتیجه می‌شود که در اتصال کوتاه تکفاز به زمین شبکه‌های توالی با هم سری می‌شوند و جریان اتصال کوتاه سه فاز سه برابر جریان توالی‌های مثبت و منفی و صفر است.

جریان همه توالی‌ها در این اتصالی برابر است، بنابراین برای تحلیل این خطا باید شبکه‌های توالی را رسم کرده و با هم سری کنیم تا جریان خطا بدست آید.



نکته مهم ۱: اگر نقطه خنثی ژنراتور زمین نشده باشد باشد در اتصال کوتاه تکفاز جریان‌های مثبت و منفی و صفر است.

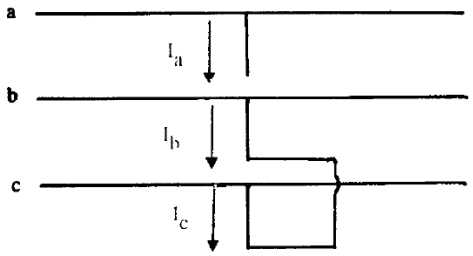
نکته مهم ۲: در این اتصالی اگر امپدانس زمین ژنراتور وجود نداشته باشد ولتاژ روی فازهای b,c $\sqrt{3}$ برابر می‌شود. برای رفع این مشکل نقطه‌ی صفر ژنراتور را به زمین متصل می‌کنیم تا جریان‌های توالی مثبت، منفی و صفر برقرار شوند. اما برای محدود کردن جریان اتصال کوتاه یک امپدانس استفاده می‌شود.

$$I^0=0\Rightarrow\begin{cases}V^+=E-ZI^0=E^a\\V^-=0-ZI^0=0\\V^0=-V^+-V^-=-E^a\end{cases}$$

$$\begin{bmatrix}v_a\\v_b\\v_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&1&1\\1&a^2&a\\1&a&a^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-E^a\\E^a\\0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\\sqrt{3}Ea\angle-150\\\sqrt{3}Ea\angle150\end{bmatrix}$$

۲- اتصال‌کوتاه دوفاز به یکدیگر LL:

در این حالت فرض شده است که فاز b,c به یکدیگر اتصال پیدا کرده اند. جریان گذرنده از این فازها همان جریان خطا است و با هم از لحاظ اندازه برابر است و از جریان فاز دیگر به علت کم بودن نسبت به جریان اتصال کوتاه صرف نظر می‌شود.

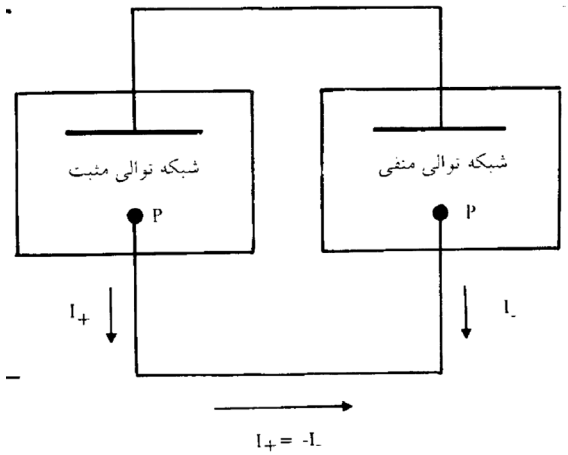


$$\begin{cases} V_b = V_c \\ I_c = -I_b \\ I_a = 0 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} v^o \\ v^+ \\ v^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_b \end{bmatrix} \Rightarrow v^+ = v^-$$

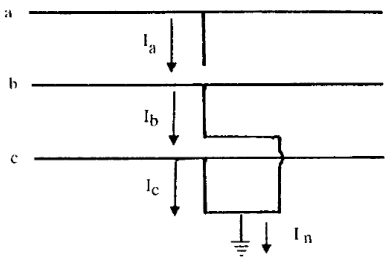
$$\begin{bmatrix} I^o \\ I^+ \\ I^- \end{bmatrix} = A^{-1}\begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} \Rightarrow I^+ = -I^-, I^o = 0$$

تساوی V^+ و V^- نشان می‌دهد که شبکه‌های این دو توالی موازی هستند و چون جریان توالی صفر در این اتصالی صفر است، توالی صفر نقشی ندارد.



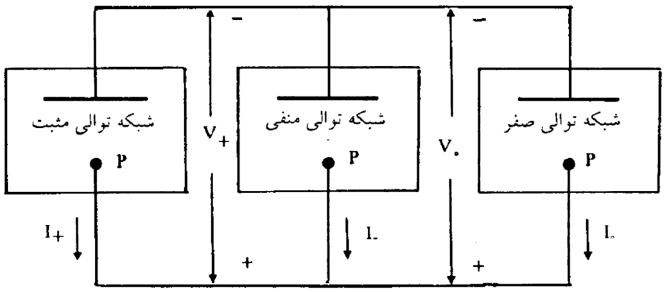
۳- اتصال‌کوتاه دوفاز به‌زمین DLG

در این حالت فرض شده است که فاز b,c به یکدیگر و زمین اتصال پیدا کرده اند. جریان گذرنده از این فازها همان جریان خطا است و با هم از لحاظ اندازه برابر است و از جریان فاز دیگر به علت کم بودن نسبت به جریان اتصال کوتاه صرف نظر می‌شود. ضمنا ولتاژ دو فازی که به زمین متصل شده اند صفر می‌شود.

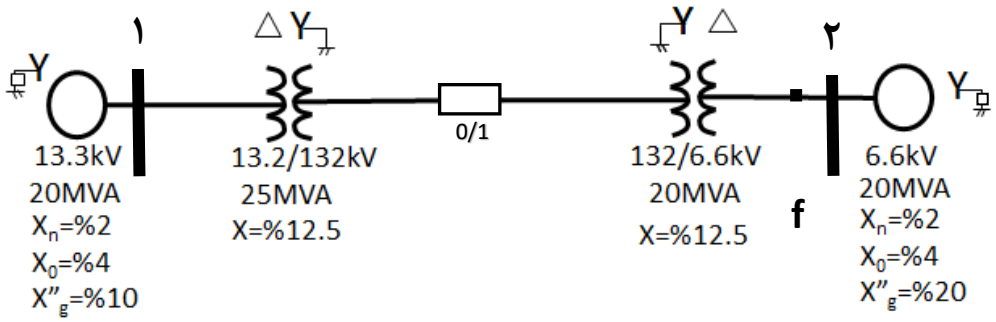


$$v_b = v_c = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} v^o \\ v^+ \\ v^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow v_0 = v^+ = v^- = \frac{1}{3}v_a$$

تساوی V^+ و V^- و V^0 نشان می‌دهد که شبکه‌های این سه توالی موازی.

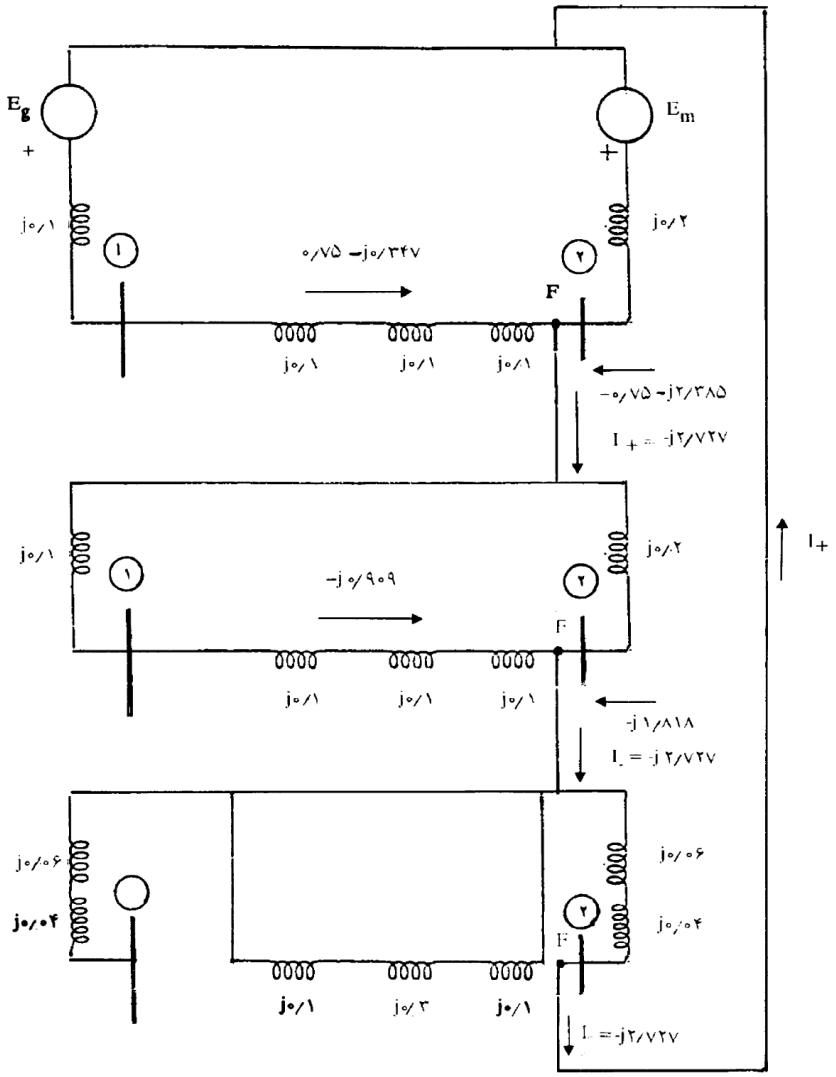


مثال۳: در سیستم قدرت زیر اتصال‌کوتاه تکفاز به زمین در نقطه f اتفاق می‌افتد جریان‌های اتصالی را بدست‌آورید.



حل: ابتدا راکتانس ترانس را به مبنای جدید میبریم. و شبکه‌های توالی را رسم کرده و با یکدیگر سری می‌کنیم:

$$X_{TR}=\frac{20}{25}\times 0.125=0.1\ \text{pu}$$



$$Z_{th}^{+}=j\,0.4\,||\,j\,0.2=j\,0.133$$

$$Z_{th}^{-}=j\,0.4\,||\,j\,0.2=j\,0.133$$

$$Z_{th}^{o}=j\,0.04+j\,0.06=j\,0.1$$

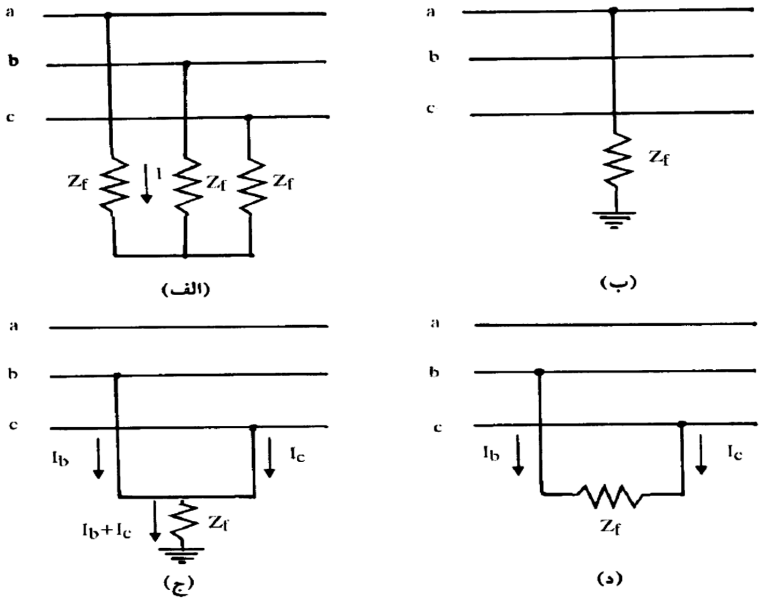
$$I^{+}=I^{-}=I^{o}=\frac{V_f}{Z_{th}^{+}+Z_{th}^{-}+Z_{th}^{0}}=-j\,2.727$$

$$I_f=3I^{+}=-j\,8.18$$

$$I_f^{(A)}=|I_f|\times I_b=|I_f|\times\frac{S_b}{\sqrt{3}V_b}=8.18\times\frac{20\times10^6}{\sqrt{3}\times6.6\times10^3}=14313A$$

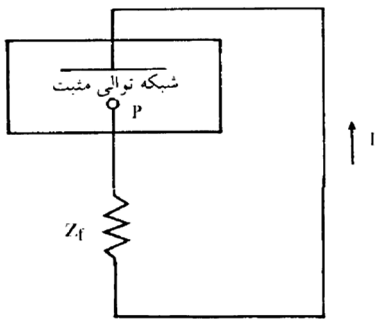
- **اتصال کوتاه از طریق امپدانس خطا:**

در بخش های گذشته فرض بر این بود که فازها به‌صورت مستقیم و بدون هیچ امپدانسی به یکدیگر اتصالی شده اند. در صورتی که معمولا چنین نیست و یک امپدانس بیت نقاط اتصالی وجود دارد. این امپدانس می‌تواند مقاومت مقعره ها، مقاومت دکل و یا مقاومت زمین باشد و یا .... باشد که آن را Z_f در نظر می‌گیریم. هر چند در محاسبات کلاسیک معمولا این امپدانس در نظر گرفته نمیشود چون شدید ترین جریان اتصال کوتاه مه موردنیاز است در صورت صفر بودت آن حاصل می‌شود. در شکل زیر مدار معادل این امپدانس برای ۴ نوع خطا نشان داده شده است.



الف-اتصال کوتاه متقارن با امپدانس

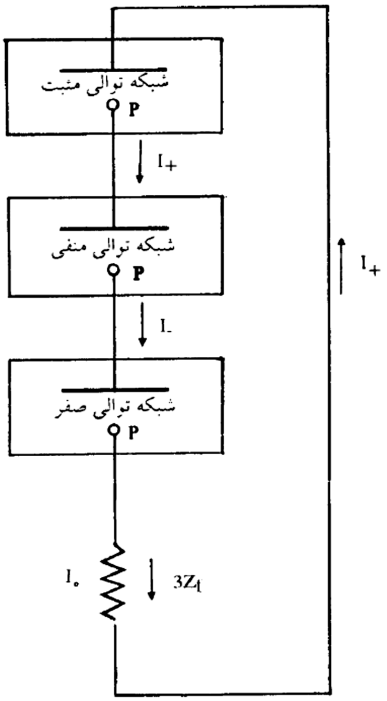
در این حالت برای محاسبه از مدار معادل زیر استفاده کرده و جریان خطا نیز از رابطه داده شده بدست می‌آید.



$$I_f = \frac{V_f}{Z_{th} + Z_f}$$

ب-اتصال کوتاه تکفاز به زمین با امپدانس

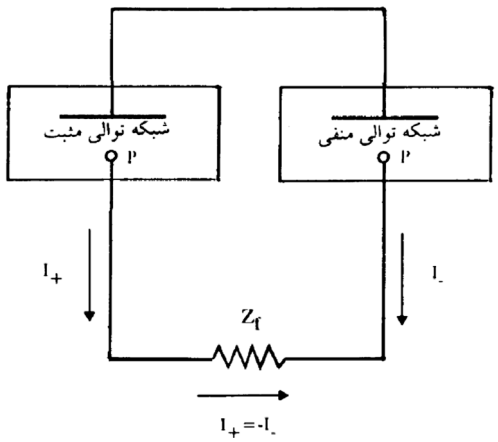
در این نوع خطا چون Z_f در مسیر زمین قرار دارد جریان $3I_0$ از آن عبور می‌کند. بنابراین مانند این است که جریان را همان I_0 در نظر بگیریم و امپدانس را $3Z_f$ لحاظ کنیم.



$$I_f = \frac{V_f}{Z^+ + Z^- + Z^o + 3Z_f}$$

ج-اتصال کوتاه دوفاز به یکدیگر از طریق امپدانس

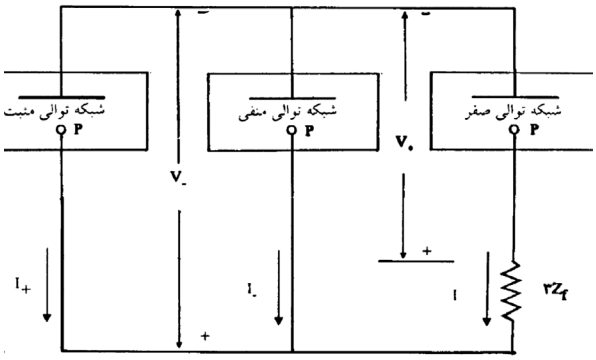
در این حالت امپدانس خطا با دو توالی مثبت و منفی سری می‌شود.



$$I_f = \frac{V_f}{Z^+ + Z^- + Z_f}$$

د– اتصال کوتاه دو فاز به زمین از طریق امپدانس

در این حالت چون Z_f در مسیر زمین قرار دارد جریان $3I_0$ از آن عبور می‌کند. بنابراین مانند این است که جریان را همان I_0 در نظر بگیریم و امپدانس را $3Z_f$ لحاظ کنیم.



$$I_f = \frac{V_f}{Z^+ + \dfrac{Z^-(Z^o + 3Z_f)}{Z^- + (Z^o + 3Z_f)}}$$

- **کاربرد Z_{bus} در محاسبات اتصال کوتاه نامتقارن:**

شبیه اتصال کوتاه متقارن درایه **i,i** ماتریس Z_{bus} نشان‌دهنده‌ی امپدانس شبکه از دید شین **i** است. با این تفاوت که ماتریس Z_{bus} باید برای هر سه توالی + ، – و ۰ محاسبه شود ودرایه **i,i** آن در محاسبات اتصال کوتاه نقش خواهد داشت.

الف–اتصال کوتاه یک فاز به زمین در شین **i**

$$I^+ = \frac{V_F}{Z_{ii}^+ + Z_{ii}^- + Z_{ii}^0}$$

ب– اتصال کوتاه دوفاز به یکدیگر

$$I_{|}^0 = \frac{V_F}{Z_{ii}^+ + Z_{ii}^-}$$

ج– اتصال کوتاه دوفاز به زمین

$$I^+ = \frac{V_F}{Z_{ii}^+ + \dfrac{Z_{ii}^- \times Z_{ii}^0}{Z_{ii}^- + Z_{ii}^0}}$$

مثال۴: در مثال قبل با استفاده از Z_{bus} جریان خطا اتصال کوتاه را بدست آورید.

حل: نقطه f در باس ۲ است. بنابر این بابد ماتریس های Z_{bus} توالی‌های مختلف را بدست آوریم و درایه ۲و۲ آن‌ها را در فرمول جای گذاری کنیم.

ابتدا Y_{bus} را بدست می‌آوریم و عکس می‌کنیم. که برای توالی مثبت و منفی یکسان است.

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

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

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

$$Y_{BUS}^{+} = Y_{BUS}^{-} = j\begin{bmatrix} -13.33 & 3.33 \\ 3.33 & -8.33 \end{bmatrix}$$

$$Z_{BUS} = Y_{BUS}^{-1} \Rightarrow Z_{BUS}^{+} = Z_{BUS}^{-} = j\begin{bmatrix} 0.083 & 0.033 \\ 0.033 & 0.133 \end{bmatrix}$$

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

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

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

$$Y_{BUS}^{0} = j\begin{bmatrix} -10 & 0 \\ 0 & -10 \end{bmatrix} \Rightarrow Z_{BUS}^{0} = j\begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$I^{+} = \frac{1}{Z^{+} + Z^{-} + Z^{0}} = \frac{1}{Z_{BUS}^{+}(2,2) + Z_{BUS}^{-}(2,2) + Z_{BUS}^{0}(2,2)} = \frac{1}{j\,0.133 + j\,0.133 + j\,0.1} = -j\,2.727$$

$$I_a = I_f = 3I^{+} = 3 \times -j\,2.727 = -j\,8.181 PU$$

$$I_f^{(A)} = |I_f| \times I_{base} = |I_f| \times \frac{S_b}{\sqrt{3}V_b} = 8.18 \times \frac{20 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 6.6 \times 10^3} = 14313 A$$

تمرین‌های فصل اتصال کوتاه نامتقارن

- اتصال کوتاه نامتقارن یعنی چه؟
- چرا برای محاسبات اتصال کوتاه نامتقارن باید از روش مؤلفه‌های متقارن استفاده شود؟
- توالی مثبت، منفی و صفر چه تفاوتی با یکدیگر دارند؟
- چرا باید نقطه خنثی ژنراتور به زمین وصل شود؟ چرا باید با امپدانس به زمین وصل شود؟
- در هر کدام از اتصال کوتاه تک فاز یا دوفاز شبکه‌های توالی چطور به یکدیگر اتصال می‌دهیم؟

۱- یک ژنراتور ۲۵۰MVA، ۵۰HZ و ۲۰KV که نقطه صفر آن مستقیماً زمین شده‌است، در شرایط بی‌باری با ولتاژ نامی کار می‌کند. راکتانس‌های آن $X_+ = X_- = X''_d = ۰/۱۲$ PU و $X_۰ = ۰/۰۶$PU هستند.

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

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

۲- سیستم قدرت شکل زیر را در نظر بگیرید. مشخصات عناصر بقرار زیر است:

ژنراتور $G_۱$: ۱۲۵MVA، ۱۳/۲KV، $X''_d = X_- =$ ٪۱۰

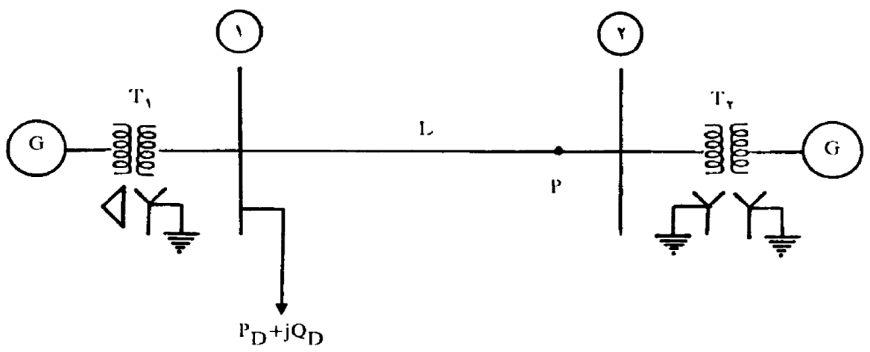
ژنراتور $G_۲$: ۱۰۰MVA، ۶/۶KV، $X''_d = X_- =$ ٪۲۰

ترانسفوماتور $T_۱$: ۱۲۵MVA، ۱۳۲/۱۳/۲KV، X= ٪۱۰

ترانسفوماتور $T_۲$: ۱۰۰MVA، ۱۳۲/۶/۶KV، X= ٪۱۰

خط انتقال L : $X_+ =$ ۰/۰۴ PU و $X_۰ =$ ۰/۱۲ PU در مبنای ۱۳۲KV و ۱۰۰MVA

راکتانس توالی صفر هریک از ژنراتورها ۶٪ است. نقطه صفر هریک از ژنراتورها نیز از طریق راکتانس ٪۳ = Z_n زمین شده‌است.



الف) سیستم را قبل از اتصال کوتاه بی‌بار فرض کنید. ولتاژ شین ۲ قبل از اتصال کوتاه در شرایط بی‌باری ۱PU بوده‌است. براثر اتصال کوتاه یک فاز به زمین در نقطه P ، جریان اتصال کوتاه در محل وقوع، جریانهائی که از دو طرف به نقطه P جاری می‌شوند، و همچنین ولتاژهای فازی و خطی را در محل وقوع اتصال کوتاه محاسبه نمائید.

۳- امپدانس‌های توالی یک ژنراتور سنکرون عبارتند از:

$$X_+ = X''_d = ۰/۲ \text{ PU}$$
$$X_- = X_+$$
$$X_۰ = ۰/۱ \text{ PU}$$

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

۴- ماتریس‌های ادمیتانس شین برای شبکه‌های توالی مثبت، منفی و صفر یک سیستم قدرت مطابق زیر معلوم هستند. همه ژنراتورهای موجود در سیستم از طریق ترانسفورماتورهائی با راکتانس القائی پراکندگی ۰/۰۲PU به شین‌های مربوط متصل می‌باشند. نقطه صفر هریک از ژنراتورها بطور مستقیم و با امپدانس صفر به زمین وصل شده‌است.

$$Y_{bus+} = Y_{bus-} = j \begin{bmatrix} -۲۰ & ۵ & ۰ & ۵ \\ ۵ & -۱۵ & ۱۰ & ۰ \\ ۰ & ۱۰ & -۴۰ & ۱۰ \\ ۵ & ۰ & ۱۰ & -۱۴/۵ \end{bmatrix} \text{ PU}$$

$$Y_{bus۰} = j \begin{bmatrix} -۵۴ & ۲ & ۰ & ۲ \\ ۲ & -۷ & ۵ & ۰ \\ ۰ & ۵ & -۳۵ & ۵ \\ ۲ & ۰ & ۵ & -۶/۵ \end{bmatrix} \text{ PU}$$

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

فصل چهارم

پایداری

پایداری سیستم قدرت طبق تعریف توانایی آن در باقی ماندن در حالت تعادل و شرایط عملکرد عادی سیستم و بدست آوردن نقطه کار جدید پس از رفع اغتشاش آن می باشد.

اغتشاش تغییر ناگهانی در یک یا چند پارامتر سیستم نسبت به نقطه کار آن است که به دو نوع اختلال کوچک و بزرگ تقسیم می‌گردد. **اغتشاش کوچک:** تغییرات کم باشد می‌توان سیستم را خطی فرض کرد مانند تغییرات بار. **اغتشاش بزرگ:** تغییرات زیاد باشد مانند اتصال کوتاه و تغییرات بزرگ.

در حالت کلی در ادبیات سیستم قدرت با چهار نوع پایداری استاتیکی (حالت ماندگار)، دینامیکی، گذرا و ولتاژ مواجه هستیم:

پایداری ماندگار: اشاره دارد به پایداری سیستم قدرت در اثر ایجاد تغییرات کوچک و پیوسته در بار و شرایط اولیه شبکه و باقی ماندن پارامترهای سیستم (ولتاژ و بارگذاری خطوط و ...) در محدوده مجاز.

پایداری دینامیکی: یکی از موارد پایداری زاویه‌ای است چون به زاویه روتور مربوط می‌شود پایداری سیستم قدرت در برابر اغتشاشات ناگهانی ولی کوچک به طوریکه سیستم با معادلات دیفرانسیلی خطی توصیف می‌شود و سیستم می‌تواند به کمک کنترلرهای پایدارساز شبکه (pss)پایداری خود را حفظ کند. مثال‌های نوعی عبارت‌اند از نوسانات فرکانس پایین شبکه ناشی از به هم پیوستن سیستم قدرت پیوسته، و یا نوسانات پیچشی نیروگاه‌های حرارتی به خاطر رزونانس زیر سنکرون ناشی از نصب خازن‌های سری جبرانساز در خطوط انتقال.

پایداری گذرا: یکی از موارد پایداری زاویه‌ای است چون به زاویه روتور مربوط می‌شود. پایداری در برابر حادث شدن یک اغتشاش ناگهانی بزرگ که ماورای توانایی یک کنترلر خطی و پیوسته پایدارساز شبکه (pss) برای حفظ پایداری شبکه می باشد و ممکن است سیستم پایداری خود را در همان نوسانات اول از دست بدهد.

پایداری ولتاژ: سیستم زمانی دچار ناپایداری ولتاژ می‌شود که تقاضای بار به طور ناگهانی افزایش یابد ویا اینکه شرایطی در سیستم به وجود آید که ولتاژ باس ها به طور تصاعدی و غیر قابل کنترلی شروع به افت کنند. یکی

از عواملی مهمی که در ناپایداری ولتاژ نقش بسزایی ایفا می‌کند، ناتوانی سیستم در تأمین توان راکتیو مورد نیاز است. ناپایداری ولتاژ سبب فروپاشی ولتاژ (voltage collapse) می‌شود، به طوریکه آنقدر ولتاژ افت می‌کند که سیستم دیگر قادر به بازیابی آن نیست.

برخی روش‌های بهبود پایداری:

۱-رفع سریع خطا با به کارگیری سیستم‌های حفاظتی و دژنکتورهای سریع.

۲-بکارگیری رله‌های وصل مجدد

۳- بکارگیری مدارشکن های تکفاز که فقط فاز معیوب را قطع کند.

۴-استفاده از ژنراتورها با اینرسی بالا و راکتانس کم

۵- سیستم تحریک با پاسخ سریع

۶-بکارگیری روش‌های جبران سازی

مهم: از آنجا که معیار پایداری حفظ سرعت در ژنراتور سنکرون است یعنی میدان روتور و استاتور با یک سرعت ثابت در حال چرخش باشند، بنابراین اختلاف زاویه بین این دو میدان δ معیار اصلی پایداری سیستم قدرت است. پایداری زاویه به دو دسته گذرا و دینامیکی تقسیم می‌شود. در این فصل پایداری گذرا بررسی میشود که در ابتدا باید رابطه کمیتهای سیستم قدرت بر حسب δ باید بدست آید.

- **رابطه توان اتصالی بر حسب** δ :

یک ژنراتور که با خط انتقال به باس بینهایت وصل شده در نظر بگیرید، توان تولیدی ژنراتور بر حسب زاویه روتور به‌صورت زیر بدست می‌آید.

$$I = \frac{E\angle\delta - V\angle 0}{j\left(X_S + X_L\right)}$$

$$S = EI^* = \frac{E\angle\delta\left(E\angle -\delta - V\angle 0\right)}{-j\left(X_S + X_L\right)} \qquad X = X_S + X_L$$

$$S = \frac{EV}{X}\sin\delta + j\left(\frac{E^2}{X} - \frac{Ev}{X}\cos\delta\right) = P + jQ$$

$$P_e = \frac{EV}{X}\sin\delta$$

- **معادله نوسان و معیار سطوح برابر**

همانطور که گفته شد معیار اصلی پایداری در سیستم قدرت زاویه روتور است. زمانی می‌توانیم بگوییم که سیستم پایدار است که زاویه روتور δ مقدار کاملا ثابت داشته باشد یعنی مشتق آن صفر باشد. بنابراین رابطه زاویه روتور را بدست آورده و از آن مشتق می گیریم.

Ta: گشتاور شتاب دهنده ناشی از اغتشاش

$$J\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e$$

$$J\omega_m\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e$$

M: مومنتوم زاویه‌ای

$$M\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e$$

$$H = \frac{\text{stored kinetic energy in megajoules at synchronous speed}}{\text{machine rating in MVA}}$$

H: ثابت اینرسی

$$H = \frac{\frac{1}{2}J\omega_{sm}^2}{S_{\text{mach}}} = \frac{\frac{1}{2}M\omega_{sm}}{S_{\text{mach}}} \text{ MJ/MVA}$$

$$M = \frac{2H}{\omega_{sm}}S_{\text{mach}} \text{ MJ/mech rad}$$

$$\frac{2H}{\omega_{sm}}\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \frac{P_a}{S_{\text{mach}}} = \frac{P_m - P_e}{S_{\text{mach}}}$$

$$\frac{2H}{\omega_s}\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ per unit}$$

$$\frac{H}{\pi f}\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ per unit}$$

$$d\delta^2/dt^2 = \frac{\pi f}{H}(p_m - p_e)$$

$$2\,d\delta/dt \cdot d\delta^2/dt^2 = \frac{2\pi f}{H}(p_m - p_e)\,d\delta/dt$$

$$\left(d\delta/dt\right)^2 = \frac{2\pi f}{H}\int_{\delta_0}^{\delta_{\max}}(p_m - p_e)d\delta$$

$$d\delta/dt = \sqrt{\frac{2\pi f}{H}\int_{\delta_0}^{\delta_{\max}}(p_m - p_e)d\delta}$$

شرط پایداری این است که در حالت ماندگار $\frac{d\delta}{dt} = 0$.

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{\max}}(p_m - p_e)d\delta = 0$$

این رابطه نشان می‌دهد که سطح زیر منحنی $P_m - P_e$ بین δ_0 و δ_m باید صفر شود. پس اگر یک اغتشاش اتفاق بیفتد و نقطه تعادل جدید دارای زاویه‌ای برابر δ_1باشد انتگرال به دو قسمت تبدیل می‌شود که برای برقرار بودن پایداری باید این دو انتگرال با هم برابر باشد که به آن معیار سطوح برابر می‌گویند.

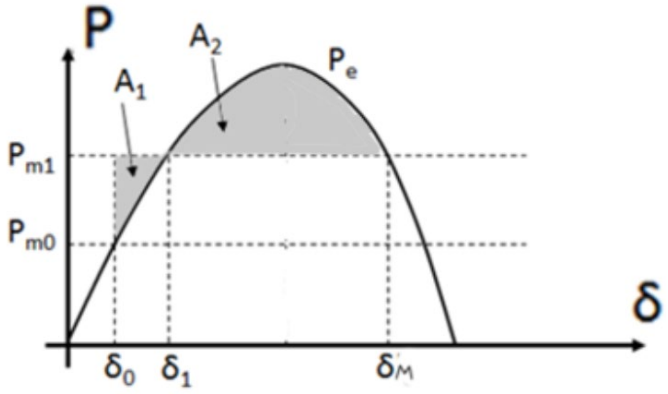
$$\int_{\delta_0}^{\delta_1}(p_m - p_e)d\delta - \int_{\delta_1}^{\delta^m}(p_e - p_m)d\delta = 0$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1}(p_m - p_e)d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta^m}(p_e - p_m)d\delta$$

$$A_1 \quad = \quad A_2$$

نکته مهم: جمله اول که شامل عبارت $P_m - P_e$ به معنی حالتی است که روتور شتاب می‌گیرد زیرا مقدار توان مکانیکی ورودی از توان الکتریکی خروجی بیشتر است و باعث می‌شود سرعت روتور بیشتر شود، جمله‌ی دوم نشان‌دهنده‌ی این است که رتور شتاب خود را از دست می‌دهد و سرعتش کمتر می‌شود، زیرا با توجه به رابطه $P_e - P_m$ توان الکتریکی خروجی بیشتر از توان مکانیکی ورودی است. بنابراین شرط پایداری آن است همان مقدار که روتور به واسطه اغتشاش شتاب گرفته در همان سیکل شتاب خود را از دست دهد یعنی مساحت انتگرال دوم مساوی یا بزرگ‌تر از انتگرال اول باشد.

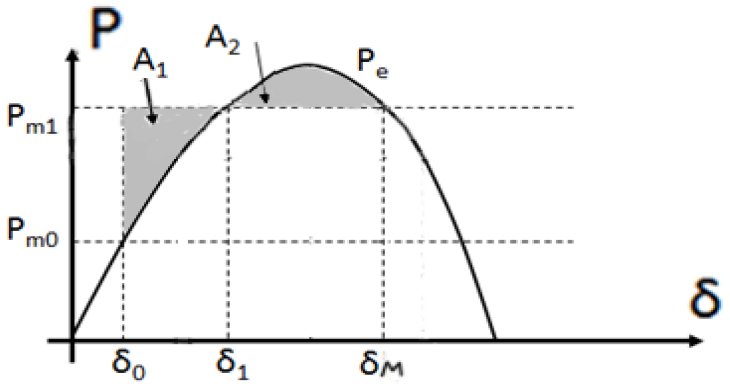
در شکل زیر توان مکانیکی در ابتدا P_{m0} است که ناگهان به P_{m1} می‌رسد حال اگر دو سطح A_1 و A_2 با هم برابر باشند و یا $A_2 > A_1$ باشد سیستم تحت این اغتشاش در توان مکانیکی پایدار خواهد ماند.



- **بررسی چند حالت مختلف**

۱- اگر تغییرات توان مکانیکی ورودی زیاد باشد

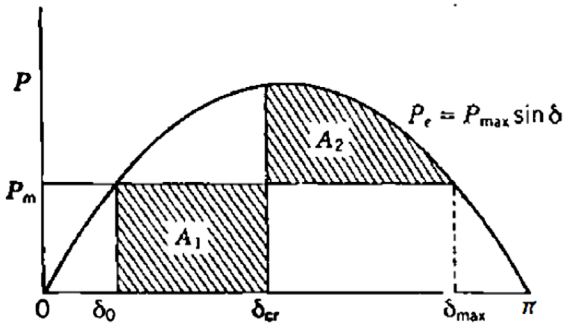
سیستم ناپایدار می‌شود $A_1 > A_2$



۲- قطع ناگهانی قدرت انتقالی(قطعی خط):

اگر به ناگهان قدرت الکتریکی خروجی P_e صفر شود یعنی خط قطع شود، در صورت ادامه دار بودن این قضیه چون توان مکانیکی وجود دارد روتور دائما شتاب گرفته و ناپایدار می‌شود.

راه حل این است که یا توان مکانیکی هم قطع شود و یا اینکه خط توسط رله وصل مجدد وصل شود. ماکزیمم زمانی که می‌توان خط را وصل کرد که سیستم پایدار بماند t_{cr} است که با روابط زیر محاسبه شده است در این زمان زاویه رتور به مقدار بحرانی یعنی δ_{cr} رسیده یعنی دقیقا $A_1 = A_2$ که در شکل زیر مشخص است.



$$p_m(\delta_1 - \delta_0) = \int_{\delta_1}^{\delta_m} (p_m \sin\delta)d\delta = p_{\min}(c\cos\delta_1 - \delta\cos\delta_m) - p_{m0}(\delta_m - \delta_1)$$

$$p_{m0}(\delta_m - \delta_1) = p_{\min}(c\cos\delta_1 - \delta\cos\delta_m) - p_m(\delta_1 - \delta_0)$$

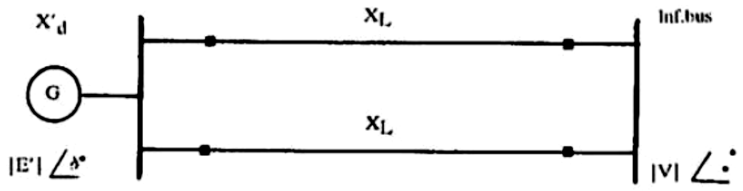
$$\delta_m = \pi - \delta_0$$

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{2H}{\pi f P_o}(\delta_{cr} - \delta_0)}$$

یعنی اگر مدار شکن کمتر از این زمان خط را برگرداند سیستم پایدار می‌ماند.

۳- خروج ناگهانی یک خط، در خط انتقال دو مداره:

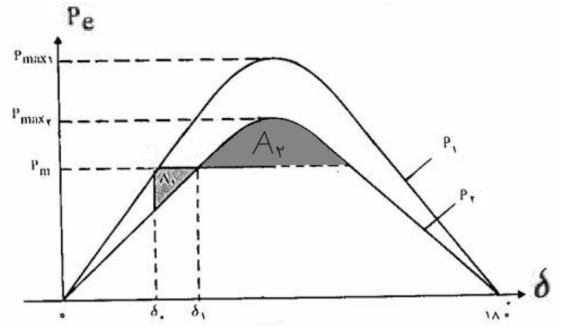
خط دو مداره مانند شکل زیر در نظر بگیرید، هر کدام از خطوط دارای راکتانس X_L هستند. قبل از اینکه یک خط خارج شود مقدار توان انتقالی P_1 است و بعد از خروج یک خط راکتانس معادل از $X_L/2$ به X_L تغییر کرده و توان انتقالی P_2 می‌شود. بدیهی است که توان P_2 از P_1 کمتر است.



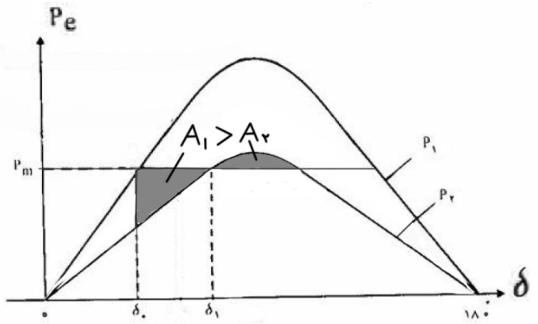
$$P_1 = \frac{EV}{X_d + \frac{X_L}{2}} \sin\delta$$

$$P_2 = \frac{EV}{X_d + X_L} \sin\delta$$

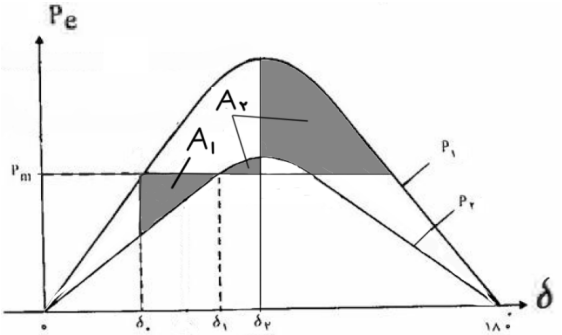
نمودار توان بر حسب زاویه برای دو حالت یعنی قبل از خارج شدن یک خط P_1 و بعد از خارج شده یک خط P_2 در شکل زیر نشان داده شده است. در صورتی که $A_2>A_1$ باشد سیستم **پایدار** خواهد ماند. (مانند شکل زیر)



اگر حالتی رخ دهد که $A_2<A_1$ شود، در این حالت با خروج یک خط سیستم **ناپایدار** می‌شود. (شکل زیر)



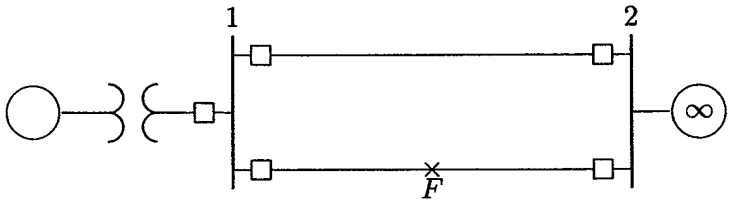
برای جلوگیری از ناپایداری در این حالت باید مدار شکن خط خارج شده آن خط را در زمان مناسب (δ_2) به شبکه باز گرداند تا سطح A_2 طبق شکل زیر افزایش یابد و سیستم **پایدار** بماند.



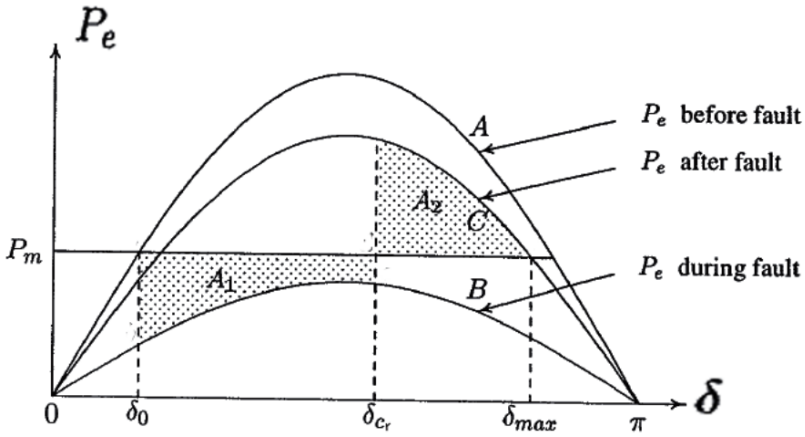
۴- اتصال کوتاه در یکی از دو خط موازی:

اتصال کوتاه باعث کاهش ولتاژ ژنراتورها و کاهش سریع توان خروجی آن‌ها می‌شود ولی گاورنر توان مکانیکی ورودی به ژنراتور را کاهش نداده است. بنابراین ژنراتورها تحت گشتاور شتاب دهنده واقع می‌شوند که در صورت تداوم، سبب نوسانات مکانیکی روتور ماشین سنکرون ناپایداری می‌شود که در ادامه بررسی خواهد شد.

یک ژنراتور توسط دو خط موازی به شین بینهایت شبیه شکل زیر وصل شده است.



در لحظه اتصال کوتاه ولتاژ افت می‌کند و توان انتقالی تا حد زیادی کاهش می‌یابد (B). مقدار P_m در این حالت از منحنی B بزرگ‌تر بوده و باعث سرعت گرفتن روتور می‌شود و اگر رفع نشود سیستم ناپایدار می‌شود. حال اگر خطی که دچار اتصال کوتاه شده است در لحظه δ_{cr} توسط مدار شکن قطع شود. منحنی C را خواهیم داشت و مقدار δ_{cr} با حل کردن انتگرال و معیار سطوح برابر بدست می‌آید.



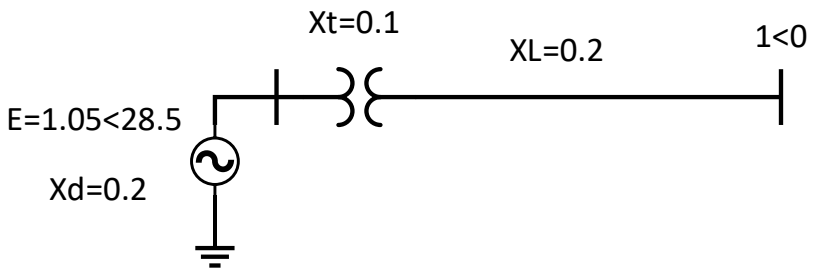
$$\int_{\delta_o}^{\delta_{cr}} \left(P_m - P_{e(B)}\right) d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_m} \left(P_{e(C)} - P_m\right) d\delta$$

$$\Rightarrow \delta_{cr} = ?$$

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{2H}{\pi f P_o}\left(\delta_{cr} - \delta_0\right)}$$

مثال۱: در سیستم قدرت شکل زیر داده های مسئله بر روی شکل مشخص شده است. ژنراتور توان ۱ پریونیت را تولید میکند. زمان بحرانی رفع خطا را برای پایدار ماندن ژنراتور در صورت اتصال کوتاه در ابتدای خط باشد را بدست آورید.

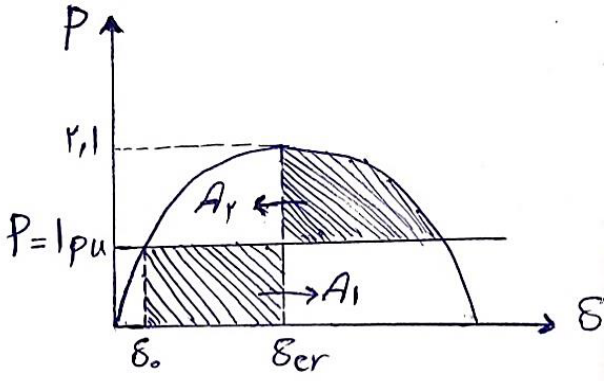
$X_d^{'} = 0.2,\ X_T = 0.1,\ X_L = 0.2,\ P_o = P_m = 1pu\ ,f = 50Hz,\ H = 3s$



حل:

$\delta_0 = 28.44^o$

$P_e = \frac{EV_\infty}{X_{eq}}\sin\delta = \frac{1.05\times 1}{0.1+0.2+0.2}\sin\delta \Rightarrow P_e = 2.1\sin\delta$



$\int_{28.44\times\frac{\pi}{180}}^{\delta_{cr}} 1d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{\pi-\delta_o}\left(2.1\sin\delta - 1\right)d\delta \rightarrow \left(28.44\times\frac{\pi}{180} = 0.496rad, \pi-\delta_o = 2.645rad\right)$

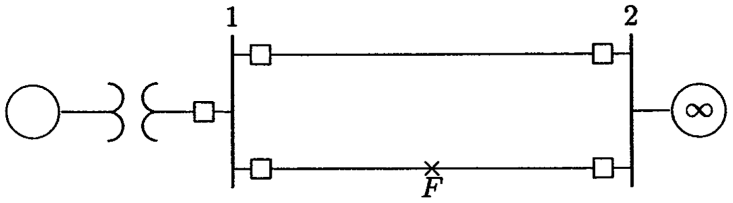
$\delta_{cr} - 0.496 = -2.1\cos\left(2.645\right) - 2.645 - \left[-2.1\cos\left(\delta_{cr}\right) - \delta_{cr}\right]$

$\delta_{cr} = 1.42^{rad} = 81.72^o$

$T_{cr} = \sqrt{\frac{2H}{\pi f P_o}\left(\delta_{cr} - \delta_o\right)} = 188ms$

مثال۲: در سیستم قدرت شکل زیر اگر خط L_2 باز شود بررسی کنید سیستم پایدار می‌ماند یا خیر؟

$$\left|E_g^{'}\right|=1.05,\ \ X_d=0.2,\ \ X_T=0.1,\ \ X_{L1}=X_{L2}=0.4,$$



قبل از خطا:

$$P_e=\frac{E_g^{'}V}{X_{eq}}\sin\delta_o=P_m=P_o=1pu\rightarrow\frac{1.05\times1}{0.2+0.1+\left(0.4\,||\,0.4\right)}\sin\delta_o=1$$

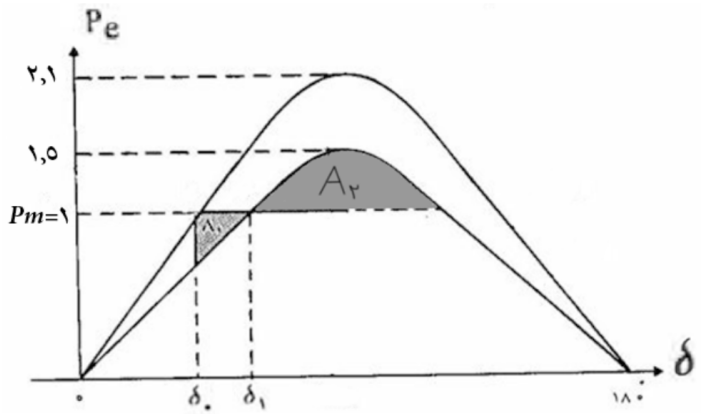
$$2.1\sin\delta_o=1$$

$$\delta_o=\sin^{-1}\frac{1}{2.1}=0.496^{rad}=28.44^{o}$$

بعد از خطا:

$$P_e=\frac{E_g^{'}V}{X_{eq}}\sin\delta=\frac{1.05\times1}{0.2+0.1+0.4}\sin\delta=1.5\sin\delta$$

$$1.5\sin\delta_1=1\Rightarrow\delta_1=0.73$$



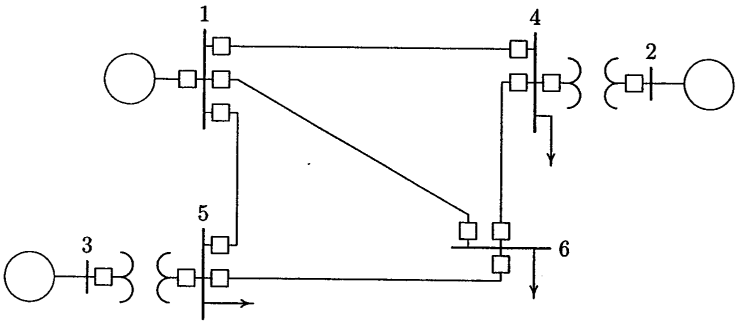
$$A_1=\int_{0.496}^{0.73}\left(1-1.5\sin\delta\right)d\delta=0.32$$

$$A_2=\int_{0.73}^{\delta_m=\pi-0.73}\left(1.5\sin\delta-1\right)d\delta=0.554$$

سیستم پایدار می‌ماند چون $A_2>A_1$ می‌باشد.

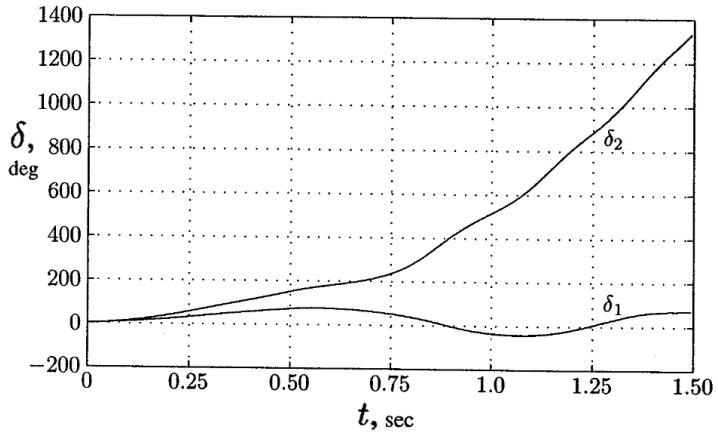
- **بررسی پایداری سیستم‌های قدرت بزرگ**

معیار سطوح برابر نمی‌توانند برای بررسی پایداری گذرای سیستم‌های قدرت واقعی که تعداد شین‌ها و ژنراتورها زیاد است (مثلاً شکل زیر) استفاده شود. برای سیستم قدرتی با n شین و m ژنراتور باید معادلات نوسان برای m ژنراتور نوشته شود و این معادلات دیفرانسیل با استفاده از کامپیوتر (مثلاً نرم‌افزار Digsilent) حل شود. مقدار δ برای هر ژنراتور بدست می‌آید.



$$\begin{cases} \dfrac{d\omega_i}{dt} = \dfrac{d^2\delta_i}{dt^2} = \dfrac{\pi f}{H_i}\left(P_{m_i} - P_{e_i}\right) \\ \dfrac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - 2\pi f \end{cases}$$

اگر رابطه δ بر حسب زمان میرا شونده باشد آن ژنراتور پایدار است. اگر میرا شونده نباشد ناپایدار خواهد بود. شکل زیر نمودار δ بر حسب زمان برای دو ژنراتور را نشان می‌دهد. ژنراتور ۱ پایدار و ۲ ناپایدار شده است.



نکته) نزدیک‌ترین ژنراتور به خطا دارای بیشترین نوسان می‌باشد.

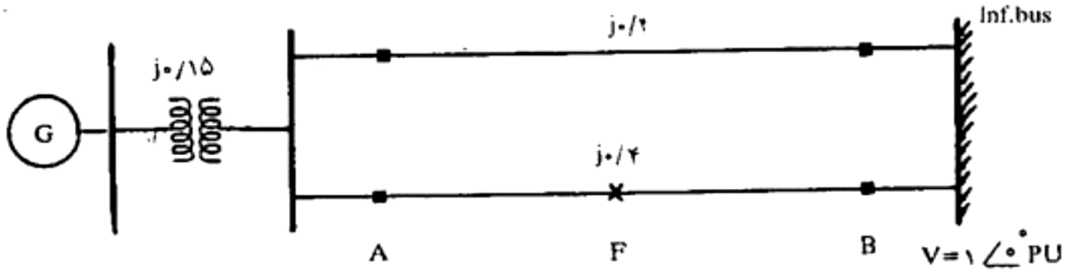
اگر ژنراتوری بعد از خطا ناپایدار شود معمولا نزدیک‌ترین ژنراتور به خطا است که ناپایدار می‌شود.

تمرین‌های فصل پایداری

- پایداری در سیستم قدرت به چه معناست؟ بحث پایداری مربوط به کدام عنصر از شبکه است؟
- انواع پایداری را توضیح دهید و پایداری زاویه‌ای یعنی چه؟
- چه زمانی سرعت روتور زیاد می‌شود و به چه علت؟
- ثابت بودن کدام پارامتر از سیستم قدرت به معنای پایداری است؟
- معیار سطوح برابر را توضیح دهید.
- زاویه بحرانی رفع خطا و زمان رفع خطا را توضیح دهید و چطور محاسبه می‌شوند.
- پایداری سیستمهای قدرت بزرگ چگونه تحلیل می‌شود؟

۱- یک ژنراتور سنکرون ۲۰۰MVA، با راکتانس سنکرون $X_s = 1$ PU توسط یک ترانسفورماتور ۲۰۰MVA و $X = 10\%$ و خط انتقال با راکتانس $X = 0/05$ PU در مبنای ۱۰۰MVA، به شین بی‌نهایت متصل است. قدرت‌های انتقالی به شین بی‌نهایت ۱۴۰MVA و ۱۰۰MVAr هستند و ولتاژ شین بی‌نهایت $V = 1 \angle 0^\circ$ PU می‌باشد. حد پایداری ماندگار این ژنراتور را برحسب مگاوات محاسبه کنید.

۲- شکل زیر دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت را نشان می‌دهد. راکتانس گذرای محور مستقیم ماشین $X'_d = 0/35$ PU است و راکتانس‌های بقیه عناصر سیستم در شکل مذکور برحسب PU در قدرت مبنای یکسان مشخص شده‌اند.



در شرایط کار عادی قدرت $1 + j0/2$ PU به شین بی‌نهایت تحویل داده می‌شود.

الف) نیروی محرکه ژنراتور E' را محاسبه کنید.

ب) اگر خط انتقال در نقطه F باز شود و در همان حالت باز باقی بماند، آیا سیستم قدرت پایداری گذرای خود را حفظ خواهد کرد؟ اگر سیستم پایدار می‌ماند، حداکثر زاویه قدرت نوسان δ_{max} را محاسبه کنید.

ج) اگر در نقطه F (وسط خط انتقال) اتصال کوتاه سه فاز (متقارن) رخ دهد بطوریکه این اتصال کوتاه توسط کلیدهای مربوطه برطرف نشود، آیا سیستم پایدار خواهد ماند؟ چرا؟ اگر پایدار می‌ماند حداکثر زاویه قدرت نوسان δmax را بدست آورید و اگر سیستم پایدار نمی‌ماند زاویه بحرانی رفع اتصال کوتاه (δ_{cr}) را محاسبه کنید.

۳- یک ژنراتور سنکرون نصف قدرت ماکزیمم خود را توسط یک خط انتقال به شین بی‌نهایت می‌دهد. براثر وقوع اتصال کوتاه در سیستم، راکتانس بین ژنراتور و شین بی‌نهایت به سه برابر مقدار آن قبل از اتصال کوتاه می‌رسد. پس از برطرف شدن اتصال کوتاه، قدرت انتقالی ماکزیمم به ۸۰ درصد قدرت ماکزیمم اولیه می‌رسد. زاویه بحرانی رفع اتصال کوتاه (δ_{cr}) را محاسبه کنید.

4-

A 60-Hz synchronous generator having inertia constant $H = 5$ MJ/MVA and a direct axis transient reactance $X'_d = 0.3$ per unit is connected to an infinite bus through a purely reactive circuit as shown in Figure 11.21. Reactances are marked on the diagram on a common system base. The generator is delivering real power $P_e = 0.8$ per unit and $Q = 0.074$ per unit to the infinite bus at a voltage of $V = 1$ per unit.

(a) A temporary three-phase fault occurs at the sending end of the line at point F. When the fault is cleared, both lines are intact. Determine the critical clearing angle and the critical fault clearing time.

(b) A three-phase fault occurs at the middle of one of the lines, the fault is cleared, and the faulted line is isolated. Determine the critical clearing angle.

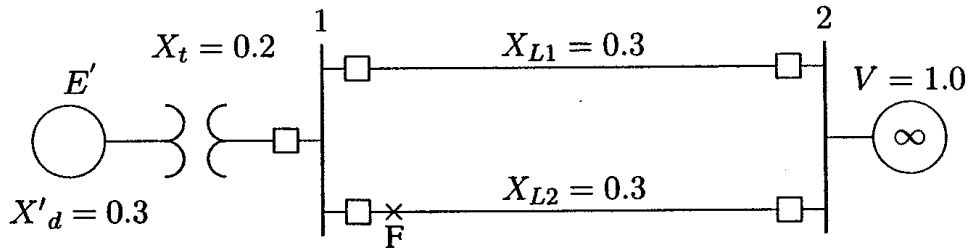


FIGURE 11.21

فصل پنجم

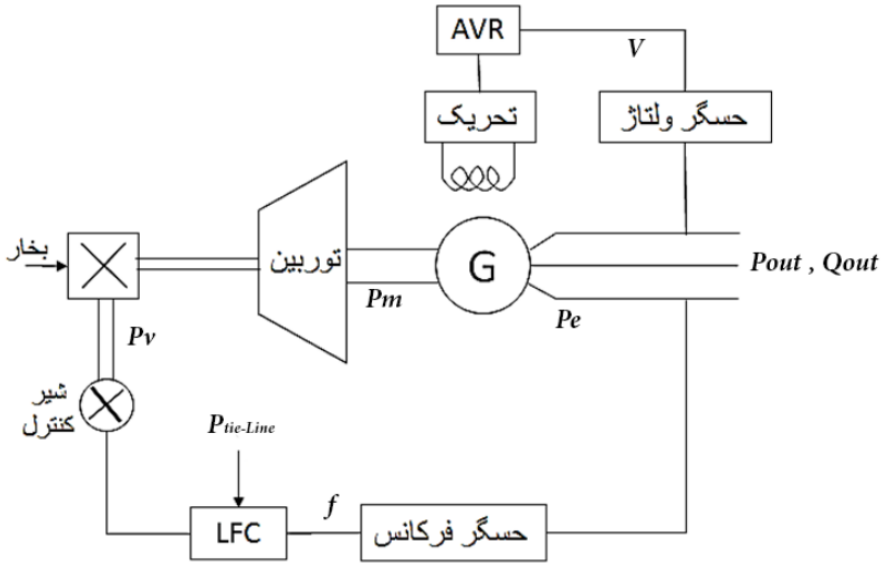
کنترل توان اکتیو و فرکانس

تغییر در توان اکتیو بصورت عمده بر روی فرکانس تأثیر می‌گذارد. همچنین توان راکتیو بصورت عمده به تغییرات ولتاژ بستگی دارد و با تقریب خوبی می‌توان گفت توان اکتیو بر روی ولتاژ و توان راکتیو بر روی فرکانس تأثیر ندارد. ثابت زمانی سیستم تحریک (AVR) خیلی کمتر از ثابت زمانی محرک اولیه است چون تنظیم فرکانس سیستم مکانیکی است و ثابت زمانی بالایی دارد، بنابراین اثر متقابل حلقه LFC و AVR قابل چشم پوشی است و تجزیه‌وتحلیل کنترل بار فرکانس و کنترل ولتاژ تحریک به‌طور مستقل انجام می‌شود.

حلقه‌ی کنترل بار فرکانس(LFC) توان حقیقی خروجی ژنراتور و فرکانس را تولید می‌کند و حلقه‌ی تنظیم‌کننده‌ی خودکار ولتاژ(AVR) توان راکتیو و اندازه ولتاژ را کنترل می‌کند.

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 اندازه‌گیری می‌شود و به سیگنال فرمان توان حقیقی ΔP_V تبدیل می‌شود و به توربین برای تغییر گشتاور ورودی ارسال شده و باعث افزایش یا کاهش توان خروجی ژنراتور و تغییر در فرکانس و توان خط ارتباطی درحد دقت از پیش تعیین شده می‌شود.

برای مدل‌سازی سیستم کنترل فرکانس تابع تبدیل را برای هر یک از عناصر بدست می‌آوریم:

۱-مدل ژنراتور

از معادله نوسان داشتیم:

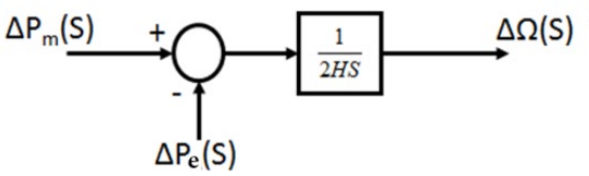
$$\frac{2H}{\omega_s}.\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2}=\Delta p_m-\Delta p_e$$

$$\frac{d\,\frac{\Delta\omega}{\omega_s}}{dt}=\frac{1}{2H}\left(\Delta p_m-\Delta p_e\right)$$

$$\frac{d\,\Delta\omega}{dt}=\frac{1}{2H}\left(\Delta p_m-\Delta p_e\right)$$

$$Laplace\rightarrow\Omega(S)=\frac{1}{2HS}\left(\Delta p_m(S)-\Delta p_e(S)\right)$$

اگر معادلات بدست آمده را به‌صورت بلوک دیاگرام کنترلی بنویسیم خواهیم داشت:



۲-مدل بار:

بار کل سیستم متشکل از بارهای غیر وابسته به فرکانس مانند روشنایی و حرارتی و بارهای وابسته به فرکانس مانند بارهای موتوری است بنابراین:

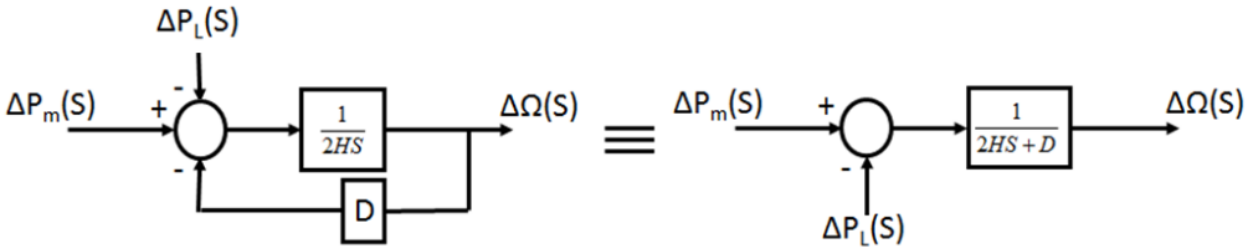
$$\Delta P_e=\Delta P_l-D\Delta\omega$$

ΔP_L: بار غیر وابسته به فرکانس

$D\Delta\omega$: بار وابسته به فرکانس

D : نسبت درصد تغییر بار به تغییر فرکانس (دروپ)

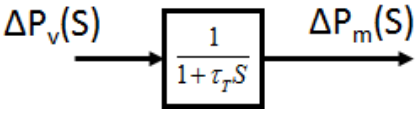
برای مثال اگر با 1 درصد تغییر در فرکانس، بار 1.5 درصد تغییر بکند، D=1.5 می‌شود.



۳-مدل محرک اولیه(توربین):

توربین بصورت یک تابع تبدیل مرتبه اول و ثابت زمانی T_T مدل می‌شود که ثابت زمانی آن بین ۰.۲ تا ۲ ثانیه است که ورودی تابع تبدیل تغییرات شیر بخار و خروجی آن تغییرات توان مکانیکی است.

$$G_{T(S)} = \frac{\Delta P_m}{\Delta P_v} = \frac{1}{1+T_T S}$$



۴-مدل تنظیم‌کننده سرعت(گاورنر):

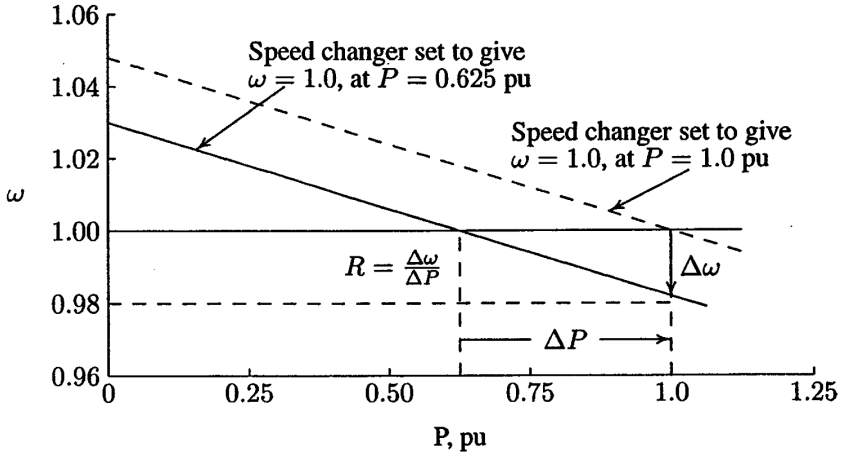
هر واحد نیروگاهی برای کنترل سرعت و قدرت خروجی به گاورنر برای تنظیم بخار، گاز و یا جریان آب ورودی به توربین، مجهز شده است. گاورنرها به ۳ دسته: مکانیکی، الکترومکانیکی و الکترونیکی تقسیم می‌شوند که در حال حاضر فقط از گاورنر الکترونیکی در نیروگاه‌های جدید استفاده می‌شود. گاورنرهای جدید دارای دو قسمت الکترونیکی و هیدرولیکی می‌باشند.

قسمت الکترونیکی گاورنر یک کنترل‌کننده الکترونیکی (معمولاً PID) حلقه بسته است که سیگنال‌های ورودی این کنترل‌کننده توان خروجی ژنراتور و موقعیت گیت‌های توربین است.

بر اساس سیگنال‌های ورودی فوق و پردازش آن‌ها در کنترل‌کننده PLC، سیگنال خروجی گاورنر الکترونیکی به شیر راهنما (Pilot valve) اعمال شده و با عملکرد این شیر، فشار و دبی لازم روغن برای حرکت سروو موتور و دریچه‌های توربین از طریق شیر کنترل اصلی گاورنر فراهم می‌گردد. در صورت بروز اشکال در گاورنر اصلی، کنترل سیستم به‌صورت خودکار، به گاورنر پشتیبان منتقل می‌شود.

با افزایش بار سیستم توان الکتریکی از توان مکانیکی بیشتر شده و این کمبود توان بصورت لحظه‌ای توسط انرژی جنبشی ژنراتور تأمین می‌شود که باعث افت سرعت ژنراتور درنتیجه افت فرکانس می‌شود. این تغییر توسط گاورنر حس شده و شیر ورودی توربین را برای افزایش توان مکانیکی تنظیم می‌کند. برای عملکرد پایداری گاورنر طوری طراحی شده است که اجازه می‌دهد با افزایش بار، سرعت کاهش یابد.

مشخصه‌های حالت ماندگار گاورنر در شکل زیر نشان داده شده است.

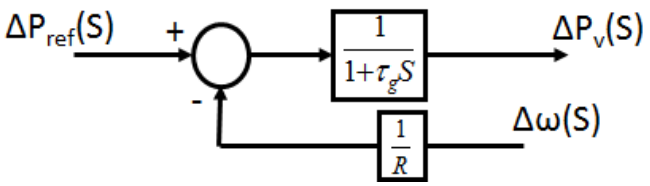


شیب این منحنی نشان‌دهنده ضریب تنظیم‌کننده سرعت $\left(R=\frac{\Delta\omega}{\Delta P}\right)$ است. سازوکار تنظیم‌کننده سرعت به این صورت است به عنوان یک مقایسه کننده عمل می‌کند و خروجی آن ΔP_G است که اختلاف توان تنظیم‌شده مرجع (ΔP_{ref}) و توان $\frac{1}{R}\times\Delta\omega$ باید برابر ΔP_G باشد.

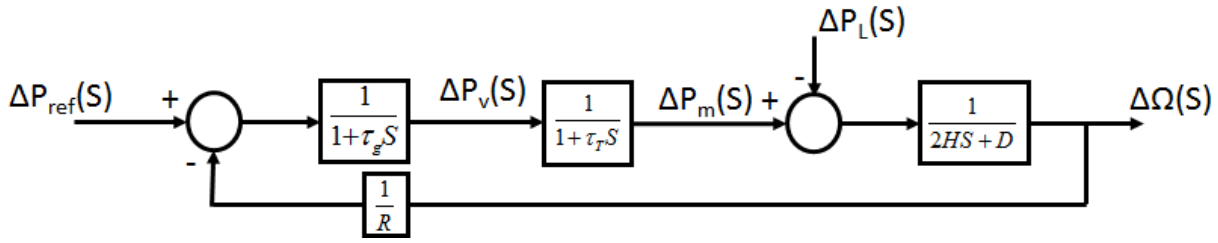
$$\Delta P_G = \Delta P_{ref} - \frac{1}{R}\Delta\omega$$

ΔP_G از طریق تقویت‌کننده هیدرولیکی به تغییرات موقعیت شیر بخار ΔP_V با استفاده از یک تابع تبدیل مرتبه اول، تبدیل می‌شود.

$$\Delta P_V = \frac{1}{1+T_g S}\Delta P_g$$



با ترکیب اجزا مختلف تابع تبدیل‌های بدست آمده دیاگرام کامل کنترلی LFC بدست می‌آید.



به‌صورت ساده تابع تبدیل زیر را با استفاده از بلوک دیاگرام بالا داریم:

$$T=\frac{\Delta\Omega}{-\Delta P_L}=\frac{\left(1+T_gS\right)\left(1+T_TS\right)}{\left(2HS+D\right)\left(1+T_gS\right)\left(1+T_tS\right)+\frac{1}{R}}$$

اگر فرض کنیم یک تغییر پله در ورودی یعنی ΔP_L صورت بگیرد مقدار خطای حالت ماندگار بصورت زیر خواهد بود:

$$\Delta P_L\left(S\right)=\frac{\Delta P_L}{S}$$

$$\Delta\omega_{SS}=Lim_{s\to0}\ \ s.R\left(S\right).G\left(S\right).H\left(S\right)=\left(-\Delta P_L\right)\frac{1}{D+\frac{1}{R}}$$

به‌صورت مشابه در یک سیستم قدرت که چندین ژنراتور با ضرایب تنظیم R_1 تا R_n وجود داشته باشد:

$$\Delta\omega_{SS}=\left(-\Delta P_L\right)\frac{1}{D+\frac{1}{R_1}+\ldots+\frac{1}{R_n}}$$

نکته مهم) مشاهده می‌شود این سیستم دارای خطای حالت ماندگار غیر صفر است که مطلوب نیست.

مثال۱: برای یک سیستم دو واحد تولیدی با مشخصات زیر که بار مشترک ۹۰۰مگاوات را در فرکانس نامی تغذیه می‌کنند. به‌صورتی که واحد اول ۵۰۰ مگاوات و واحد دوم ۴۰۰ مگاوات در فرکانس ۶۰ هرتز را تأمین می‌کند اگر بار به اندازه ۹۰ مگاوات افزایش یابد مطلوب است:

G1	S_b=600	R=0.06
G2	S_b=500	R=0.04

الف) با فرض وابسته نبودن بار فرکانس انحراف فرکانس و تولید جدید چقدر است؟

$$S_b = 1000MW \rightarrow R_1^{new} = \frac{1000}{600} \times 0.06 = 0.1pu$$

$$R_2^{new} = \frac{1000}{500} \times 0.04 = 0.08pu$$

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

$$\Delta\omega_{ss} = \frac{-\Delta P_L}{D + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{-0.09}{\frac{1}{0.1} + \frac{1}{0.08}} = -0.004pu$$

$$\Delta f = -0.004 \times 60 = -0.24Hz \rightarrow f^{new} = 60 - 0.24 = 59.76Hz$$

$$R = \frac{-\Delta\omega}{\Delta P} \rightarrow = \Delta P_1 = \frac{-\Delta\omega}{R_1} = \frac{0.004}{0.1} = 0.04pu$$

$$\Delta P_1 = 0.04 \times 1000 = 40MW$$

$$\Delta P_2 = \frac{-\Delta\omega}{R_2} = \frac{0.004}{0.08} = 0.05pu$$

$$\Delta P_2 = 0.05 \times 1000 = 50MW$$

ب) چنانچه بار برای هر یک درصد تغییر در فرکانس ۱.۵درصد تغییر کند. انحراف فرکانس و تولید جدید چقدر است؟

$$\Delta\omega_{ss} = \frac{-\Delta P_L}{D + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{-0.09}{1.5 + \frac{1}{0.1} + \frac{1}{0.08}} = -0.00375pu$$

$$\Delta f = -0.00375 \times 60 = -0.225Hz \rightarrow f^{new} = -0.225 + 60 = 59.775Hz$$

$$\Delta P_1 = \frac{-\Delta\omega}{R_1} = -\frac{-0.00375}{0.1} = 0.0375MW$$

$$\Delta P_1 = 0.0375 \times 1000 = 37.5MW$$

$$\Delta P_2 = 0.046875 \rightarrow \Delta P_2 = 46.875MW$$

مثال۲: در یک سیستم قدرت ثابت زمانی توربین $0.5S$، گاورنر $0.2S$، ثابت اینرسی ژنراتور $5S$، ضریب دروپ 0.8 است:

الف) محدوده تغییرات R را برای پایدار بودن سیستم را مشخص کنید.

$$\Delta = \left(2\times 5S + 0.8\right)\left(1+0.2S\right)\left(1+0.5S\right)+\frac{1}{R}$$

$$= S^3 + 7.08S^2 + 10.56S + 0.8 + \frac{1}{R} = 0$$

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

s^3	1	10.56
s^2	7.08	$0.8+K$
s^1	$\frac{73.965-K}{7.08}$	0
s^0	$0.8+K$	0

$$\left(7.08\right)\left(10.56\right)-\left(0.8+K\right)>0 \rightarrow K < 73.9$$

$$\rightarrow \frac{1}{R} < 73.9 \rightarrow R > \frac{1}{73.9} \rightarrow R > 0.0135$$

$$0.8+K > 0 \rightarrow K > -0.8 \rightarrow \frac{1}{R} > -0.8 \rightarrow R < \frac{-1}{0.8} \rightarrow R < -1.25 \otimes R > 0$$

ب) اگر ضریب سرعت گاورنر $R = 0.05$ باشد در فرکانس $60Hz$و توان نامی $250MW$ یک تغییر ناگهانی بار به اندازه $50MW$چقدر انحراف فرکانس ایجاد می‌کند؟

$$P_L^{pu} = \frac{P_L}{P_n} = \frac{50}{250} = 0.2$$

$$\Delta\omega_{ss} = \left(-0.2\right)\frac{1}{0.8+\frac{1}{0.05}} = \left(-0.2\right)\frac{1}{20.8} = -0.0096pu$$

$$\Delta\omega_{ss}^{Hz} = -0.0096\times 60 = -0.576Hz$$

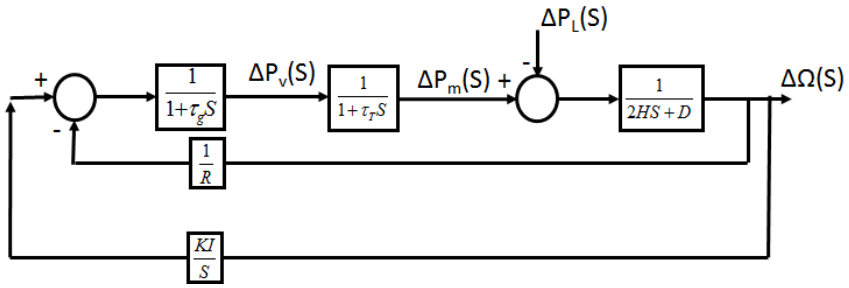
$$f_{ss} = 59.424Hz$$

کنترل ثانویه کنترل خودکار تولید (AGC):

مشاهده شد که یک تغییر در بار سیستم باعث ایجاد خطای حالت ماندگار در فرکانس می‌شود، مقدار انحراف فرکانس به ضریب تنظیم سرعت گاورنر بستگی دارد.

در سیستم با یک ژنراتور

برای کاهش این انحراف فرکانس در واقع برای صفر کردن مقدار خطا یک انتگرال‌گیر برای تغییر مقدار مرجع به سیستم اضافه می‌شود. اما در سیستم با چند ژنراتور از سیستم AGC سراسری استفاده میشود.



بهره K_I برای داشتن پاسخ مطلوب تنظیم می‌شود و علت اینکه بصورت فیدبک منفی اعمال می‌شود این است که پایداری سیستم حفظ شود.

تعیین گین AGC به این صورت است که تابع تبدیل نهایی با استفاده از یک تابع مرتبه دوم تقریب زده میشود و با استفاده از مفهوم پاسخ گذرا بهتره تعیین میشود.

$$K_P = \frac{1}{D}$$

$$T_P = \frac{2H}{D}$$

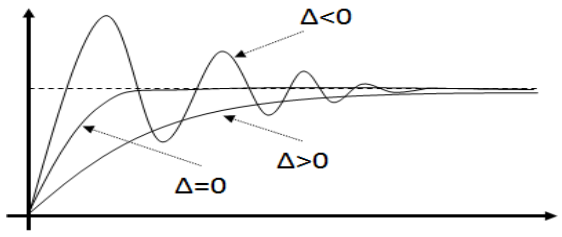
$$\frac{1}{2HS+D} = \frac{K_P}{1+STD}$$

$$\Omega = \frac{K_P}{T_P}\frac{\Delta P_L}{S^2 + \frac{1}{T_P}\left(1+\frac{K_P}{R}\right)S + \frac{K_P K_1}{T_P}}$$

$$\Delta = \frac{1}{T_P{}^2}\left(1+\frac{K_P}{R}\right)^2 - \frac{4K_P K_I}{T_P} = 0$$

$$K_I = \frac{1}{4K_P T_P}\left(1+\frac{K_P}{R}\right)^2 = K_{CR}$$

$$\begin{cases} K_I = K_{CR} & \Delta = 0 \quad critical-state \\ K_I < K_{CR} & \Delta < 0 \quad underdamp-state \\ K_I > K_{CR} & \Delta > 0 \quad overdamp-state \end{cases}$$



سلسله مراتب کنترل فرکانس

۱- کنترل فرکانس اولیه

اقدامات اصلاحی کنترل فرکانس اولیه عبارتند از کارکرد گاورنر و استفاده از ذخیره گردان شبکه.

۲- کنترل فرکانس ثانویه

بر اساس دستورالعمل ثابت بهره‌برداری، تمامی واحدهای نیروگاهی موجود و جدیدالاحداث با ظرفیت تولید نصب شده ۵۰ مگاوات و بیشتر، ملزم هستند امکان مشارکت در کنترل فرکانس اولیه بوسیله گاورنر و قابلیت کنترل خودکار از راه دور (AGC) را داشته باشند. کنترل فرکانس ثانویه تداخلی با عملکرد کنترل فرکانس اولیه ندارد، بلکه این اقدامات در پاسخ به انحرافات جزئی ناشی از عملکرد طبیعی مولد و یا در پاسخ به اختلاف عمده بین تولید و مصرف (به عنوان مثال خروج واحد تولیدی یا قطع اتصال شبکه)، انجام می گیرد.

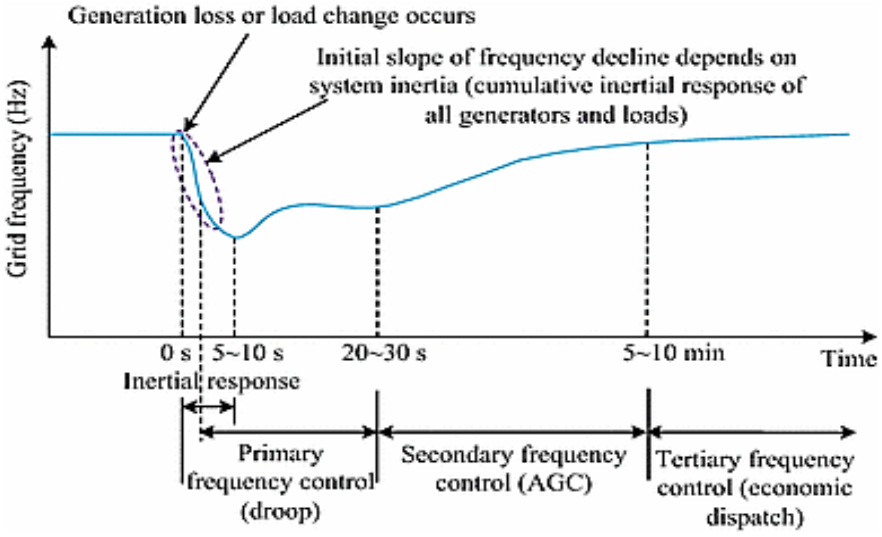
واحدهایی مانند واحدهای آبی و گازی که قادرند طی چند دقیقه وارد شبکه بشوند در جبران توان تولیدی شبکه در حالتی که ذخیره گردان کافی نباشد، موثر هستند.

کنترل ثانویه به دو روش زیر انجام می شود:

۱. سیستم کنترل خودکار و از راه دور (AGC)
۲. کنترل Manual (محلی و در زمان واقعی)

۳- کنترل فرکانس ثالثیه

اقدامات اصلاحی کنترل فرکانس ثالثیه عبارتند از حذف مقداری از بار شبکه به دلیل افت شدید فرکانس و انجام پخش بار اقتصادی.



تمرین‌های کنترل توان اکتیو و فرکانس

- گاورنر چیست؟ ورودی و خروجی آن را ذکر کنید.
- سرعت چه ارتباطی با فرکانس دارد؟
- اجزای LFC را نام ببرید.
- برای صفر کردن خطای حالت ماندگار LFC چه کاری باید انجام داد؟
- ضریب دروپ D به چه مفهوم است؟

۱- سه ژنراتور با قدرت‌های نامی ۱۰۰ و ۲۵۰ و ۳۰۰ مگاولت آمپر بارهای شبکه بزرگی را تغذیه می‌کنند. ضریب تنظیم ژنراتورها ۲ و ۴ و ۵ درصد نسبت به مقادیر نامی آنها است. براثر افزایش بار سیستم، فرکانس آن ۰/۳ هرتز کاهش می‌یابد. سهم هر یک از ژنراتورها را برای افزایش تولید برحسب مگاوات بدست آورید.

۲- یک سیستم قدرت تک منطقه‌ای شامل دو ژنراتور با مشخصات زیر است:

$S_1 = ۱۰۰$ MVA $\quad H_1 = ۲S \quad R_1 = ۲$ HZ/PU MW

$S_2 = ۱۵۰$ MVA $\quad H_2 = ۴S \quad R_2 = ۳$ HZ/PU MW

الف) اگر بار سیستم بمیزان ۵۰MW افزایش یابد، فرکانس منطقه در حالت ماندگار جدید چقدر کاهش خواهد یافت. همچنین هر یک از ژنراتورها چه سهمی در تولید و تأمین این افزایش بار خواهند داشت. از D صرفنظر کنید.

ب) چنانچه از ثابت زمانی‌های گاورنر و توربین صرفنظر شود و $D = ۰/۰۱$ PU MW/HZ منظور گردد، معادله تغییرات خطای فرکانس $\Delta f(t)$ را براثر تغییر بار فوق‌الذکر بدست آورید.

3.

A 250-MW, 60-Hz turbine generator set has a speed regulation of 5 percent based on its own rating. The generator frequency decreases from 60 Hz to a steady state value of 59.7Hz. Determine the increase in the turbine power output.

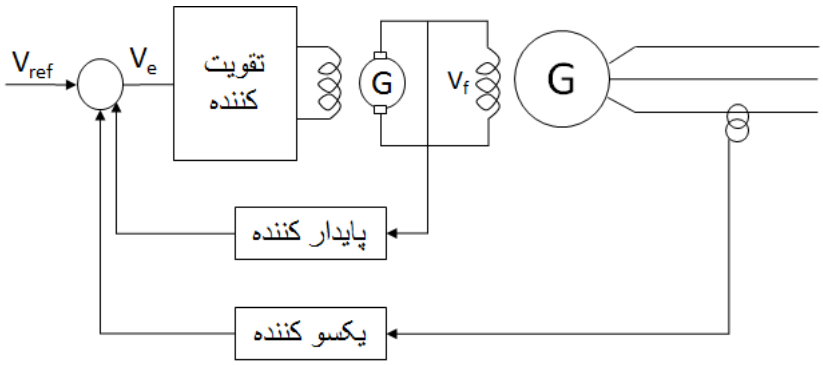
فصل ششم

کنترل توان راکتیو و ولتاژ

تغییر در توان حقیقی (اکتیو) بر روی فرکانس اثر می‌گذارد در حالی که تغییر در توان راکتیو بصورت عمده بر روی اندازه ولتاژ تأثیر دارد به همین دلیل تنظیم فرکانس، از طریق گاورنر تنظیم توان اکتیو صورت می‌گیرد و تنظیم ولتاژ از طریق توان راکتیو و سیستمی به نام تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ (AVR)صورت می‌گیرد. توان راکتیو ژنراتورها توسط میدان تحریک آن‌ها کنترل می‌شود. کنترل تحریک توسط تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ انجام می‌گردد. بنابر این نقش AVRحفظ اندازه ولتاژ در یک مقدار ثابت در ترمینال ژنراتور است.
البته سایر منابع تولید توان راکتیو بجز ژنراتورها، کندانسور سنکرون (موتور سنکرون) و خازن‌ها نیز هستند.

بررسی سیستم تحریک و تنظیم توان راکتیو ژنراتورها

جریان‌های تحریک در سیستم‌های قدیمی‌تر توسط ژنراتور DC و در سیستم‌های تحریک پیشرفته‌تر توسط ژنراتور ac و یکسوکننده‌های تریستوری تأمین می‌شود. شکل زیر سیستم تنظیم ولتاژ برای یک ژنراتور را نشان می‌دهد.



با افزایش توان راکتیو بار، ولتاژ پایانه ژنراتور افت می‌کند. این مقدار با یک مقدار مرجع مقایسه می‌شود. پس از تقویت این مقدار تفاضل ولتاژ تقویت شده میدان تحریک ژنراتور اصلی را کنترل کرده و همانطور که در درس ماشین‌های الکتریکی ۳ گفته شده با تنظیم تحریک ژنراتور سنکرون ولتاژ پایانه کنترل می‌شود.

عناصر تشکیل دهنده AVR :

۱-مدل تقویت‌کننده: اختلاف ولتاژ اندازه‌گیری شده با مقدار مرجع توسط تقویت‌کننده به یک عدد بزرگ‌تر تبدیل می‌شود. این قسمت با یک تابع تبدیل مرتبه اول مدل می‌شود و ممکن است مغناطیسی (گردان) یا الکترونیکی باشد.

$$G_A = \frac{V_R}{V_C} = \frac{K_A}{1+T_A S}$$
$$K_A = [10-400]$$
$$T_A = [0.02-0.1]\text{Sec}$$

۲-مدل تحریک: با یک تابع تبدیل مرتبه اول مدل می‌شود و بسته به اینکه سیستم تحریک قدیمی یا پیشرفته باشد فقط بر روی ثابت زمانی آن تأثیر دارد.

$$G_E = \frac{V_F}{V_R} = \frac{K_E}{1+T_E S}$$
$$T_E <<$$

۳-مدل ژنراتور: با یک تابع تبدیل مرتبه اول مدل می‌شود.

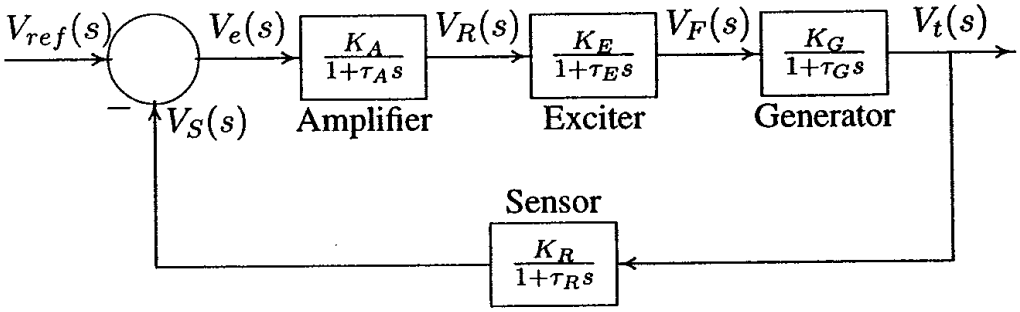
$$G_G = \frac{V_t}{V_f} = \frac{K_G}{1+T_G S}$$
$$K_G = [0.7-1]$$
$$T_G = [1-2]\text{sec}$$

ژنراتور در نمونه‌های کامل‌تر با تابع تبدیل مرتبه ۷ یا ۳ مدل می‌شود، اما در ساده‌ترین حالت ممکن با استفاده از یک تابع تبدیل مرتبه اول مدل می‌شود که البته در این مدل ژنراتور خطی فرض می‌شود.

۴-مدل نمونه‌گیر PT **(حسگر) و یکسوساز:** ولتاژ نمونه‌گیری شده توسط یک پل یکسوساز یکسو می‌شود و کل مجموعه با استفاده از یک تابع تبدیل مرتبه اول مدل می‌شود.

$$G_R = \frac{V_S}{V_t} = \frac{K_R}{1+T_R S}$$
$$T_R = [0.01-0.06]$$

با ترکیب قسمت‌های مختلف سیستم تنظیم ولتاژ بلوک دیاگرام زیر بدست می‌آید.



تابع تبدیل حلقه بسته AVR :

$$T(S)=\frac{V_t}{V_{ref}}=\frac{K_A K_E K_G K_R (1+T_R S)}{(1+T_A S)(1+T_E S)(1+T_G S)(1+T_R S)+K_A K_E K_G K_R}$$

مثال۱) در یک سیستم AVR پارامترهای آن به‌صورت زیر است. مقدار گین تقویت‌کننده را برای داشتن یک سیستم پایدار بدست آورید.

	Gain	Time constant
Amplifier	K_A	$\tau_A = 0.1$
Exciter	$K_E = 1$	$\tau_E = 0.4$
Generator	$K_G = 1$	$\tau_G = 1.0$
Sensor	$K_R = 1$	$\tau_R = 0.05$

حل:

با جای گذاری مقادیر داده شده در تابع تبدیل معادله مشخصه یعنی ریشه مخرج به‌صورت زیر است:

$$s^4 + 33.5s^3 + 307.5s^2 + 775s + 500 + 500K_A = 0$$

با اعمال معیار راث هرویتز

s^4	1	307.5	$500 + 500K_A$
s^3	33.5	775	0
s^2	284.365	$500 + 500K_A$	0
s^1	$58.9K_A - 716.1$	0	0
s^0	$500 + 500K_A$		

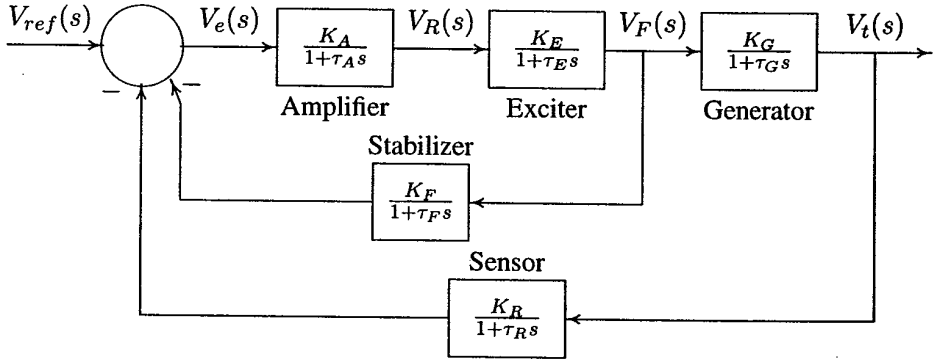
$K_A>-1$, $K_A<12.6$

پایدارساز:

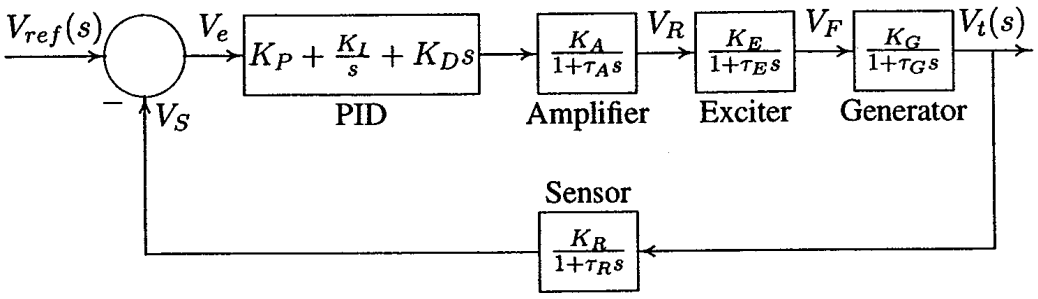
تابع تبدیل AVR دارای ۴ ثابت زمانی است و چون ثابت زمانی ژنراتور T_G زیاد است می‌تواند سیستم را ناپایدار کند، بدین معنی که اگر گین تقویت‌کننده برای تقویت بیشتر عدد بزرگتری انتخاب شود سیستم ناپایدار می‌شود بنابراین برای افزایش پایداری سیستم دو روش وجود دارد:

۱- **استفاده از یک پایدارساز فیدبک:** بصورت زیر که روش بدست آوردن K_F و T_F از تحلیل پایداری سیستم است.

$$G_F(S)=\frac{SK_F}{1+T_FS}$$



۲- **استفاده از کنترل‌کننده PID:** این کنترل‌کننده که در صنعت بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد هم پاسخ گذرا را بهبود می‌دهد و هم خطای حالت ماندگار را کاهش می‌دهد و البته سیستم را پایدارتر نیز می‌کند.



روش‌های کنترل توان راکتیو و ولتاژ :

۱-سیستم کنترل AVR ژنراتورها (در قسمت قبل بررسی شد)

۲-تزریق توان راکتیو به کمک جبران‌کننده‌های موازی (کندانسور سنکرون - خازن- SVCها)

۳-تنظیم توان راکتیو با استفاده از ترانسفورماتور *Tap Changer* دار

۴-کم کردن راکتانس خط با استفاده از خازن سری.

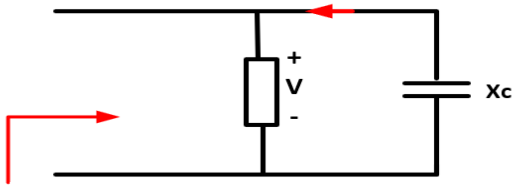
تزریق توان راکتیو توسط جبران‌کننده موازی :

با توجه به اینکه توان راکتیو را می‌توان بصورت محلی در نزدیک بار تولید کرد و فقط هزینه نصب آن انجام می‌شود و تولید کم یا زیاد توان راکتیو هزینه‌ای ندارد، بهتر است از جبران‌کننده‌های موازی در محل بار استفاده شود که انتقال توان راکتیو از ژنراتور به بار نیز نخواهیم داشت. با این کار تلفات راکتیو نیز کاهش می‌یابد و نیز ظرفیت خط نیز آزاد می‌شود چون توان راکتیو دیگر از خط انتقال عبور نمی‌کند.

وسایلی که برای جبران توان راکتیو استفاده می‌شوند باید مصرف‌کننده توان اکتیو نباشند، هارمونیک به سیستم اضافه نکنند و به تغییرات پاسخ سریع بدهند. این وسایل با دو هدف در سیستم قدرت نصب می‌شوند :

۱-اصلاح ضریب قدرت

برای اصلاح ضریب قدرت یک خازن با بار **موازی** می‌شود و مقدار آن برای رساندن زاویه بار از فی۱ به فی۲ از رابطه زیر بدست می‌آید.



$$X_C = \frac{P\left(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2\right)}{V^2}$$

$$X_C = \omega C$$

$$C = \frac{X_C}{2\pi f}$$

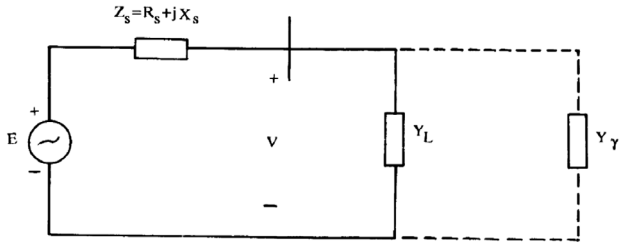
P: توان مصرفی بار

φ_1: زاویه‌ی توان اولیه بار

φ_2: زاویه‌ی توان مطلوب

۲-تنظیم ولتاژ

برای تنظیم ولتاژ نیز یک خازن با بار موازی می‌شود و به‌گونه‌ای مقدار آن انتخاب می‌شود که ضریب تنظیم ولتاژ VR کمترین عدد ممکن و در حالت ایده آن صفر شود.



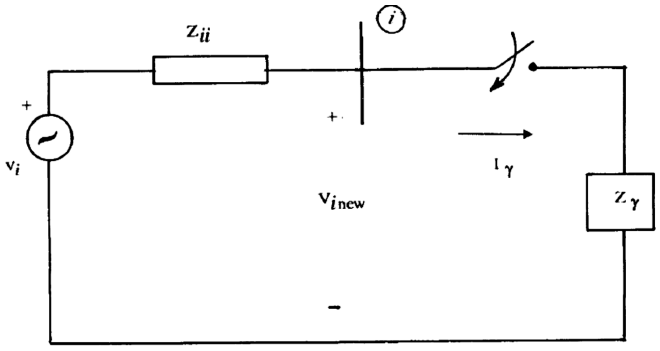
$$VR = \frac{E - V}{V} \times 100$$

نکته) یک جبران‌کننده باید طوری طراحی شود که یکی از دو حالت قبل را عملی نماید. یعنی یا ضریب قدرت را به یک برساند یا ولتاژ را ثابت نگه دارد چون مقدار توان راکتیو این دو حالت متفاوت است. هم‌زمان قابل انجام نیستند. در سیستم قدرت با هدف دوم این کار انجام می‌شود.

انواع جبران‌کننده‌های موازی

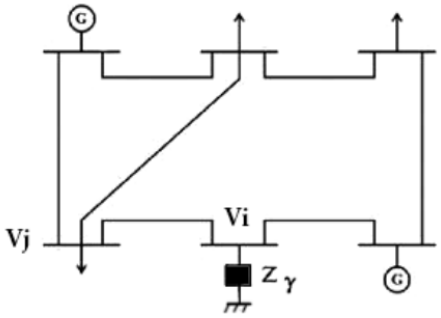
۱- جبران‌کننده ثابت موازی

خازن و راکتورهای موازی جبران‌کننده‌های ثابتی هستند که برای تولید و یا مصرف توان راکتیو به‌طور موازی در شین مناسب نصب می‌شوند. (این شین می‌تواند با استفاده از بهینه‌سازی بدست آید) مدار معادل تونن شبکه از دید باسی که قرار است جبران‌کننده درآن نصب شود مشاهده می‌شود با توجه به اینکه امپدانس قطر اصلی Z_{ii} برابر Z_{th}از دید باس i است و ولتاژ تونن V_i از پخش بار بدست می‌آید خواهیم داشت:



$$I_\gamma = \frac{V_i}{Z_{ii} + Z_\gamma}$$
$$V_i^{new} = V_i - Z_{ii} I_\gamma = Z_\gamma I_\gamma$$
$$Z_\gamma = \pm jX\,\gamma$$
$$+ : \mathrm{Re}actor$$
$$- : Capacitor$$
$$Q_\gamma = \frac{V_\gamma^{\,2}}{X_\gamma}$$

در یک شبکه قدرت مانند شکل زیر با قرار دادن جبران‌کننده در یک شین ولتاژ سایر شین‌ها نیز تغییر می‌کند که از رابطه زیر بدست می‌آید:



$$V_j^{new} = V_j - Z_{ij} I_\gamma$$

V_j: ولتاژ شین j غیر از i

Z_{ij}: عنصر سطر i و ستون j در Z_{bus}

محاسبه مقدار دقیق جبران‌کننده موازی در سیستم قدرت :

برای محاسبات دقیق جبران ساز می‌توان Q_γ را در توان راکتیو بار Q_L در پخش بار تأثیر داد و توان راکتیو جدید در شین موردنظر برای نصب جبران‌کننده به‌صورت زیر خواهد شد:

$$Q_L^{new} = Q_L + Q_\gamma$$

بدیهی است با نصب راکتور Q_L^{new} افزایش و با نصب خازن Q_L^{new} کاهش می‌یابد.

روش دوم برای مدل‌سازی جبران‌کننده در سیستم قدرت به این صورت است که می‌توان X_γ را در ماتریس Y_{bus} تأثیر دارد و پخش بار را با Y_{bus} جدید انجام داد.

$$Y_{ii}^{new} = Y_{ii} + Y_\gamma$$

مثال۲: نتیجه پخش بار و ماتریس Z_{bus} یک سیستم قدرت به شرح زیر است. اگر خازنی با راکتانس $X_L = 3.4pu$ در شین ۴ وصل شود. ولتاژ شین ۴ چقدر خواهد شد؟ ولتاژ کدام شین به غیر از شین ۴ بیشترین تأثیر را با نصب خازن در شین ۴ خواهد داشت؟

$$Z_{bus} = \begin{bmatrix} 0.20 & 0.15 & 0.25 & 0.34 \\ 0.15 & 0.30 & 0.13 & 0.14 \\ 0.25 & 0.13 & 0.50 & 0.25 \\ 0.24 & 0.14 & 0.25 & 0.40 \end{bmatrix}$$

شین	1	2	3	4
$V\ (pu)$	$1.02<0$	$0.98<-15$	$1.05<10$	$0.9<0$

حل:

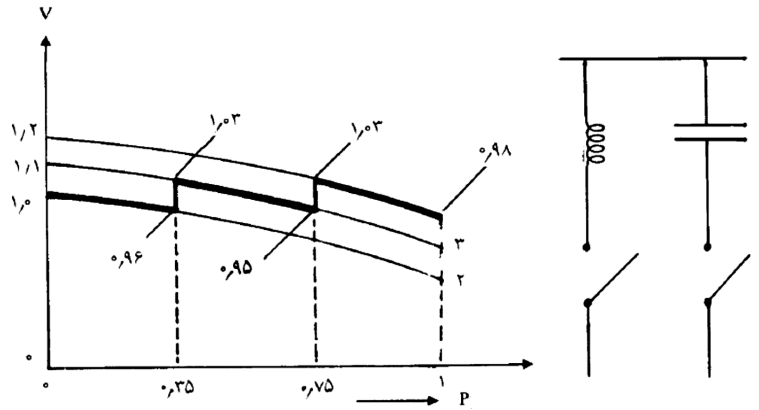
$$V_4^{new} = V_4 + Z_{44} \times \frac{-V_4}{Z_{44}+X_C} = 0.9 + 0.4 \times \frac{-0.9}{0.4-3.4} = 1.02pu$$

با توجه به اینکه Z_{34} از Z_{24} و Z_{14} بزرگ‌تر است تأثیر ولتاژ باس سوم با نصب خازن در باس ۴ نسبت به مقدار قبل آن بیشترین خواهد بود.

$$V_3^{new} = V_3 + Z_{34} \times \frac{-V_4}{Z_{44}+X_C}$$

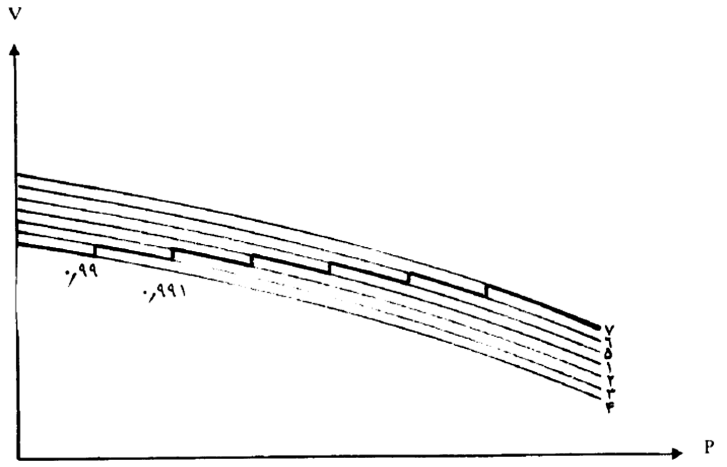
چگونگی کنترل ولتاژ با استفاده از جبران‌کنندگی ثابت موازی :

کنترل ولتاژ با استفاده از جبران‌کنندگی ثابت موازی در یک پله به‌صورت زیر انجام می‌شود که کلیدهای نشان داده شده به حلقه‌های کنترلی مربوطه متصل هستند و در زمان مناسب قطع و وصل می‌شوند.



همانطور که در شکل مشاهده می‌شود از بی‌باری تا ۳۵٪ بار نامی راکتور متصل است. هنگامی که بار به ۳۵٪ می‌رسد ولتاژ تا 0.95pu کاهش یافته است. در اینجا راکتور (سلف) قطع شده و ولتاژ به‌صورت پله‌ای به 1.03pu می‌رسد.از ۳۵٪ تا ۷۵٪ بار نامی سیستم بدون جبران کار می‌کند در ۷۵٪ که ولتاژ به 0.95pu رسید خازن وصل می‌شود و ولتاژ از 0.95 به 1.03pu افزایش می‌یابد و تا رسیدن بار نامی ولتاژ هم تا حدود 0.98pu کاهش می‌یابد. به این ترتیب ولتاژ بین 1.03-0.95 کنترل می‌شود.

برای کنترل دقیق‌تر ولتاژ در محدوده‌ی کوچکتر باید از چندین سلف و خازن موازی کوچکتر استفاده کرد که به‌صورت چندین مرحله‌ای از مدار خارج می‌شوند با این کار می‌توان مثلاً ولتاژ را با دقت ۱ درصد کنترل کرد.



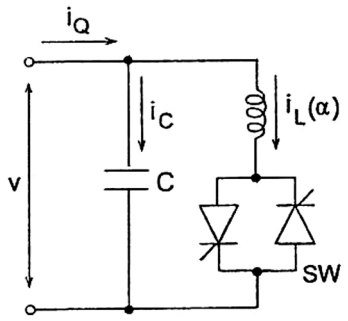
۲- جبران‌کننده‌های متغیر موازی :

کنترل ایده آل ولتاژ آن است که مشخصه‌ی ولتاژ-توان، خط مستقیم بدون شیب و جهش باشد برای این کار از لحاظ تئوری باید بی‌نهایت خازن و راکتور به‌صورت موازی در شین مورد کنترل نصب شده باشند.

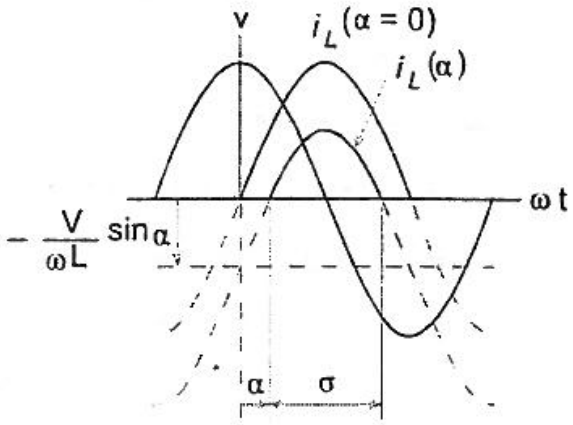
راه‌حل عملی برای کنترل پیوسته ولتاژ به‌صورت لحظه‌ای استفاده از کندانسور سنکرون و یا جبران‌کننده‌هایی است که بتوانند به‌صورت پیوسته توان راکتیو تزریق و یا ضرب کنند نه به‌صورت پله‌ای.

جبران‌کننده‌های استاتیک وار (SVC):

برای تزریق توان راکتیو به‌صورت پیوسته می‌توان از یک خازن ثابت استفاده کرد که با یک سلف متغیر موازی شده است. برای ساختن یک سلف متغیر از دو سوئیچ (تریستور) به‌صورت back to back استفاده می‌شود. با تغییر زاویه‌ی آتش این تریستورها جریان مؤثر گذرنده از سلف تغییر می‌کنند و مانند یک سلف متغیر عمل می‌کند و مقدار آن از L تا∞ تغییر خواهد کرد. زاویه‌ی آتش نسبت به پیک ولتاژ بین 90-0 درجه است.



ساختار SVC متشکل از یک خازن و سک سلف متغیر



جریان سلف که با تغییر زاویه آتش مقدار مؤثر آن تغییر می‌کند

شکل اول ساختار کلی یک SVC و شکل دوم جریان گذرنده از سلف را نشان می‌دهد. همانطور که از کل دوم مشخص است با افزایش زاویه اتش مقدار جریان $I_L(\alpha)$ کاهش پیدا کرده و مقدار مؤثر آن نیز کم می‌شود و مانند این است که به جای اینکه بگوییم جریان سلف کم شده مقدار اندوکتاس (راکتانس) آن افزایش می‌یابد. مقدار جریان سلف بر حسب زاویه آتش و در نهایت مقدار راکتانس سلفی متغیر به زاویه آتش به‌صورت زیر است.

$$I_L = \frac{1}{L}\int_{\alpha}^{\omega t} V_L(t)dt = \frac{V}{L}(\sin\omega t - \sin\alpha)$$

$$I_L(\alpha) = \frac{V_{rms}}{\omega L}\left(1 - \frac{2}{t}\alpha - \frac{1}{t}\sin 2\alpha\right)$$

$$B_L(\alpha) = \frac{I}{V} = \frac{1}{\omega L}\left(1 - \frac{2}{t}\alpha - \frac{1}{t}\sin 2\alpha\right)$$

$$X_L(\alpha) = \frac{1}{B_L(\alpha)} = \frac{1}{\frac{1}{\omega L}\left(1 - \frac{2}{t}\alpha - \frac{1}{t}\sin 2\alpha\right)}$$

تمرین‌های فصل کنترل توان راکتیو و ولتاژ

- انواع سیستم تحریک ژنراتور را نام ببرید.
- چرا کنترل فرکانس و ولتاژ به‌صورت جداگانه انجام می‌شود؟ اجزا سیستم کنترل ولتاژ را نام ببرید
- سایر روشهای کنترل ولتاژ و توان راکتیو را توضیح دهید

۱- در یک سیستم قدرت، ماتریس Z_{bus} و ولتاژ شین‌ها (از محاسبه پخش بار) داده شده‌اند. اگر در شین ۳ خازنی قرار دهیم تا دامنه ولتاژ این شین را از ۰/۹PU به ۱PU برساند، قدرت این خازن را بدست آورید. همچنین ولتاژ شین‌های ۱ و ۲ را پس از نصب خازن محاسبه نمائید.

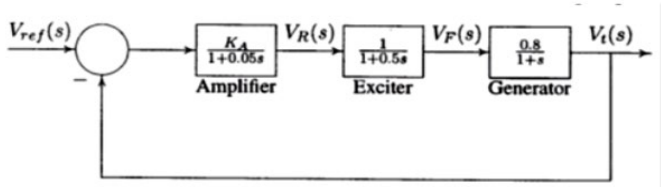
شماره شین	۱	۲	۳
ولتاژ	$۱/۰۴۷\angle ۰^\circ$	$۹۶۷\angle -۶$	$۰/۹۷\angle -۱۰^\circ$

$$Z_{bus} = j\begin{bmatrix} ۰/۱۵ & ۰/۱۲ & ۰/۱ \\ ۰/۱۲ & ۰/۲ & ۰/۱۴ \\ ۰/۱ & ۰/۱۴ & ۰/۲۵ \end{bmatrix} \text{ PU}$$

2.

A generating unit has a simplified linearized AVR system as shown in Figure 1

(a) Use the Routh-Hurwitz array to find the range of K_A for control system stability.



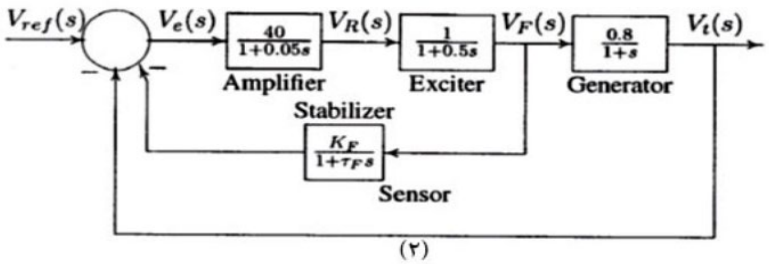
(۱)

3.

A rate feedback stabilizer is added to the AVR system of Problem 2. as shown in Figure 2. The stabilizer time constant is $\tau_F = 0.04$ second,

(a) Find the system closed-loop transfer function,

(b) Use the Routh-Hurwitz array to find the range of K_F for control system stability.



(۲)

مراجع: کتابهای **بررسی سیستمهای قدرت** احد کاظمی، هادی سعادت و استیونسون و کتاب **ادوات FACTS** هینگورانی