تحلیل سیستم های انرژی الکتریکی- دو

حمدی عبدی

گروه مهندسی برق- دانشگاه رازی

الف) سرفصل ها

- مقدمه ای بر بررسی سیستم های قدرت
- توزیع اقتصادی بار: بدون تلفات و با تلفات

(Economic Dispatch-ED)

- تحلیل اتصال کوتاه: متقارن و نامتقارن

(Short Circuit SC)

- پایداری در سیستم های قدرت

(Stability)

- کنترل سیستم های قدرت: فرکانس (اولیه و ثانویه)، ولتاژ

ب) مراجع

بررسی سیستم های قدرت–Power System Analysis

- **نظریه سیستم های انرژی الکتریکی، الگرد**
- **بررسی سیستم های مدرن انرژی الکتریکی، نگرس**
- **مبانی سیستم های قدرت الکتریکی، استیونسن**
- **تحلیل سیستم های قدرت، برگن**
- **سیستم های قدرت الکتریکی، احد کاظمی**
- **سیستم های قدرت الکتریکی، هادی سعادت**

ج) ارزشیابی

- حضور مؤثر در کلاس
- تمرین های دوره ای
- میان ترم (ED-SC): حذفی، اختیاری
- پایان ترم:

د) پیش نیازها

بررسی سیستم های قدرت یک

- **پخش بار– Power Flow, Load Flow**
- **حل سیستم قدرت در حالت پایدار، محاسبه توان، جریان ولتاژ و سایر پارامترهای در هر شین از سیستم قدرت**

1. **مقادیر مبنا، پریونیت (ولتاژ و توان)**
2. **دیاگرام تک خطی (نیروگاه، ترانسفورماتور، خط انتقال، بار و ...)**
3. **ماتریس امپدانس**
4. **معادله توان ظاهری (اکتیو، رآکتیو)**
5. **حل مجموعه معادلات (تکرار)- گوس، گوس سیدل، گوس سیدل پیشرفته، نیوتون، نیوتون رافسون، تزویج شده، مستقیم و ...**

پخش بار

$$I_i = \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} V_j \qquad S_i = V_i I_i^* = P_i + jQ_i$$

$$I_i^* = (P_i + jQ_i)/V_i \quad \Rightarrow I_i = (P_i - jQ_i)/V_i^*$$

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} V_j = \sum_{j=1}^{n} Y_{ij} V_j V_i^*$$

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} |Y_{ij}||V_j||V_i| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^{n} |Y_{ij}||V_j||V_i| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)$$

There are 4 variables that are associated with each bus: P, Q, V and δ.

Meanwhile, there are two power flow equations associated with each bus.

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} |Y_{ij}||V_j||V_i|\cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^{n} |Y_{ij}||V_j||V_i|\sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)$$

Load bus (P-Q bus)

V and δ are unknown

Generator bus (P-V bus)

Q and δ are unknown

Slack bus (swing bus)

P and Q are unknown

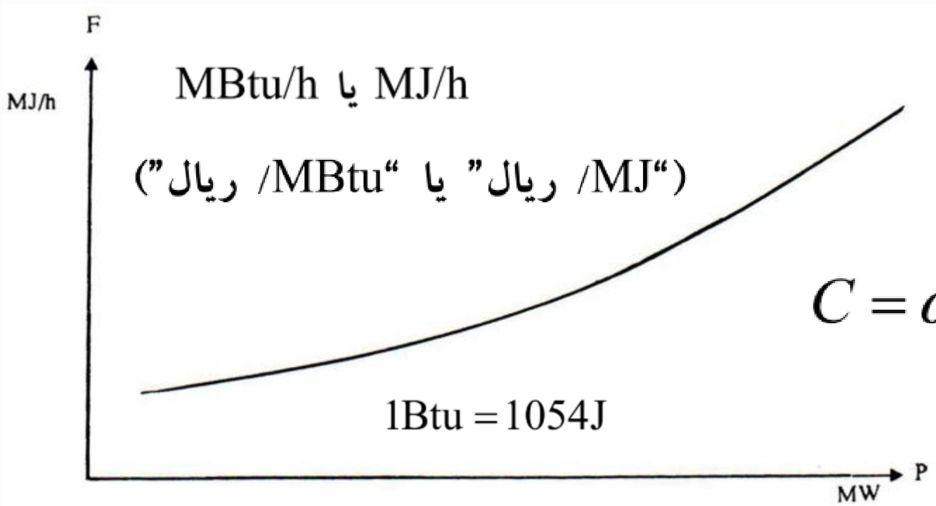
تعیین توان تولیدی ژنراتورهای شبکه به نحوی که حداقل سوخت در شبکه مصرف شود.

تابع هزینه یک ژنراتور

تغییرات هزینه سوخت برحسب توان خروجی یک ژنراتور، تابع هزینه نامیده می شود.

این تابع برای نیروگاه های حرارتی تعریف می شود.

منحنی سوخت نشان دهنده مصرف سوخت به عنوان تابعی از توان خروجی ژنراتور است.



$$C = \alpha + \beta P + \gamma P^2 \quad \text{ریال} / h$$

$$C_i = C_i\left(P_{G_i}\right)$$

$$C = C_1\left(P_{G_1}\right) + C_2\left(P_{G_2}\right) + \cdots + C_m\left(P_{G_m}\right) = \sum_{i=1}^{m} C_i\left(P_{G_i}\right)$$
$$= C\left(P_{G_1}, P_{G_2}, \cdots, P_{G_m}\right)$$

$$dC = 0$$

$$dC = \frac{\partial C}{\partial P_{G_1}} dP_{G_1} + \frac{\partial C}{\partial P_{G_2}} dP_{G_2} + \cdots + \frac{\partial C}{\partial P_{G_m}} dP_{G_m}$$

رابطه توازن توان

$$P_{G_1} + P_{G_2} + \cdots + P_{G_m} = P_D$$

$$dP_{G_1} + dP_{G_2} + \cdots + dP_{G_m} = 0$$

$$dC = 0$$

$$dC = \frac{\partial C}{\partial P_{G_1}} dP_{G_1} + \frac{\partial C}{\partial P_{G_2}} dP_{G_2} + \cdots + \frac{\partial C}{\partial P_{G_m}} dP_{G_m}$$

$$\left(\frac{\partial C_1}{\partial P_{G1}} - \lambda\right) dP_{G1} + \left(\frac{\partial C_2}{\partial P_{G2}} - \lambda\right) dP_{G2} + \cdots + \frac{\partial C_m}{\partial P_{Gm}} dP_{Gm} = 0$$

ضریب لاگرانژ λ

$$\frac{\partial C_1}{\partial P_{G1}} = \lambda \qquad \frac{\partial C_2}{\partial P_{G2}} = \lambda \cdots \frac{\partial C_m}{\partial P_{Gm}} = \lambda$$

$$(IC)_i = \frac{\partial C_i}{\partial P_{Gi}}$$

$(IC)_i$ هزینه نموی تولید (Incremental Cost of Generation) نامیده می‌شود.

1) $(IC)_1 = (IC)_2 = \cdots = (IC)_m = \lambda$

2) $\sum_{i=1}^{m} P_{Gi} - P_D = 0$

3) $P_{Gi_{\min}} \le P_{Gi} \le P_{Gi_{\max}} \qquad i = 1, 2, \cdots, m$

Economic Dispatch

$$\textbf{Min} \quad \sum_{i=1}^{m} C_i\left(P_{G_i}\right)$$

$$\sum_{i=1}^{m} P_{Gi} - P_D = 0$$

$$P_{Gi_{\min}} \le P_{Gi} \le P_{Gi_{\max}} \qquad i = 1, 2, \cdots, m$$

$$\boxed{(IC)_i = \frac{\partial C_i}{\partial P_{Gi}}}$$

$$C_i = \alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2$$

$$(IC)_i = \frac{\partial C_i}{\partial P_{Gi}} = \beta_i + 2\gamma_i P_{Gi}$$

$$\beta_i + 2\gamma_i P_{Gi} = \lambda$$

$$P_{Gi} = \frac{\lambda - \beta_i}{2\gamma_i} \qquad i = 1, 2, \cdots, m$$

$$\sum_{i=1}^{m} \left[\frac{\lambda - \beta_i}{2\gamma_i} \right] = P_D$$

$$\lambda = \frac{2P_D + \sum_{i=1}^{m} \frac{\beta_i}{\gamma_i}}{\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{\gamma_i}}$$

Example

$$C_1 = 500 + 5.3P_1 + 0.004P_1^2$$
$$C_2 = 400 + 5.5P_2 + 0.006P_2^2 \quad [\$/hr]$$
$$C_3 = 200 + 5.8P_3 + 0.009P_3^2$$

$$P_{Demand} = 800MW$$

$$\lambda = \frac{P_{Demand} + \sum_{i=1}^{n_{gen}} \frac{\beta_i}{2\gamma_i}}{\sum_{i=1}^{n_{gen}} \frac{1}{2\gamma_i}}$$

$$= \frac{800 + \frac{5.3}{0.008} + \frac{5.5}{0.012} + \frac{5.8}{0.018}}{\frac{1}{0.008} + \frac{1}{0.012} + \frac{1}{0.018}} = \$8.5/\text{MWhr}$$

$$P_1 = \frac{8.5 - 5.3}{2(0.004)} = 400 \text{ MW}$$
$$P_2 = \frac{8.5 - 5.5_i}{2(0.006)} = 250 \text{ MW}$$
$$P_3 = \frac{8.5 - 5.8}{2(0.009)} = 150 \text{ MW}$$

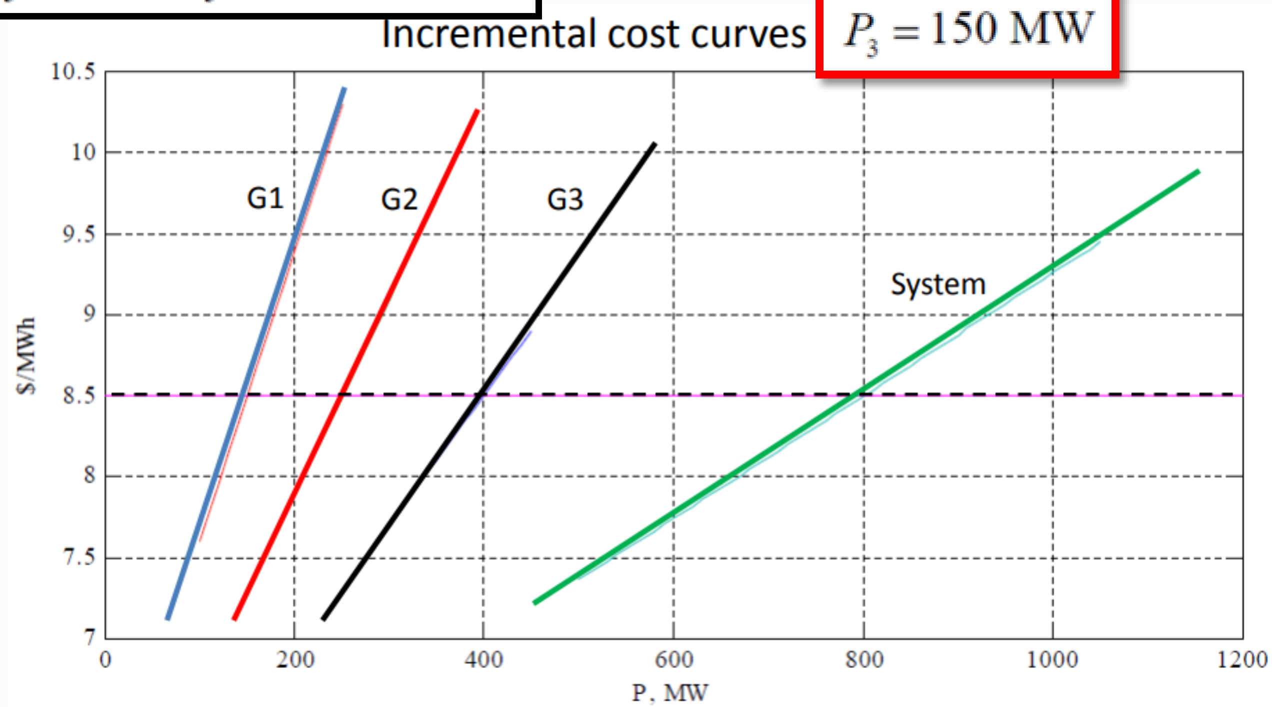
C_1=3260

C_2=2150 $[\$/hr]$

C_3=1272.5

$$C_1 = 500 + 5.3P_1 + 0.004P_1^2$$
$$C_2 = 400 + 5.5P_2 + 0.006P_2^2 \quad [\$/hr]$$
$$C_3 = 200 + 5.8P_3 + 0.009P_3^2$$

$$P_1 = 400 \text{ MW}$$
$$P_2 = 250 \text{ MW}$$
$$P_3 = 150 \text{ MW}$$



$$dC_i/dP_i = \lambda \quad \leftarrow \quad P_{i(\min)} < P_i < P_{i(\max)}$$
$$dC_i/dP_i \le \lambda \quad \leftarrow \quad P_i = P_{i(\max)}$$
$$dC_i/dP_i \ge \lambda \quad \leftarrow \quad P_i = P_{i(\min)}$$

$$C_1 = 500 + 5.3P_1 + 0.004P_1^2$$
$$C_2 = 400 + 5.5P_2 + 0.006P_2^2 \quad [\$/\text{MWhr}]$$
$$C_3 = 200 + 5.8P_3 + 0.009P_3^2$$

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

$$P_{Demand} = 975 \text{ MW}$$

$$\lambda = \frac{P_{Demand} + \sum_{i=1}^{n_{gen}} \frac{\beta_i}{2\gamma_i}}{\sum_{i=1}^{n_{gen}} \frac{1}{2\gamma_i}} = \frac{975 + \frac{5.3}{0.008} + \frac{5.5}{0.012} + \frac{5.8}{0.018}}{\frac{1}{0.008} + \frac{1}{0.012} + \frac{1}{0.018}} = \$9.163/\text{MWh}$$

$$P_i = \frac{\lambda - \beta_i}{2\gamma_i}$$

$$P_1 = \frac{9.16 - 5.3}{2(0.004)} = 483 \text{ MW}$$

$$P_2 = \frac{9.16 - 5.5_i}{2(0.006)} = 305 \text{ MW}$$

$$P_3 = \frac{9.16 - 5.8}{2(0.009)} = 187 \text{ MW}$$

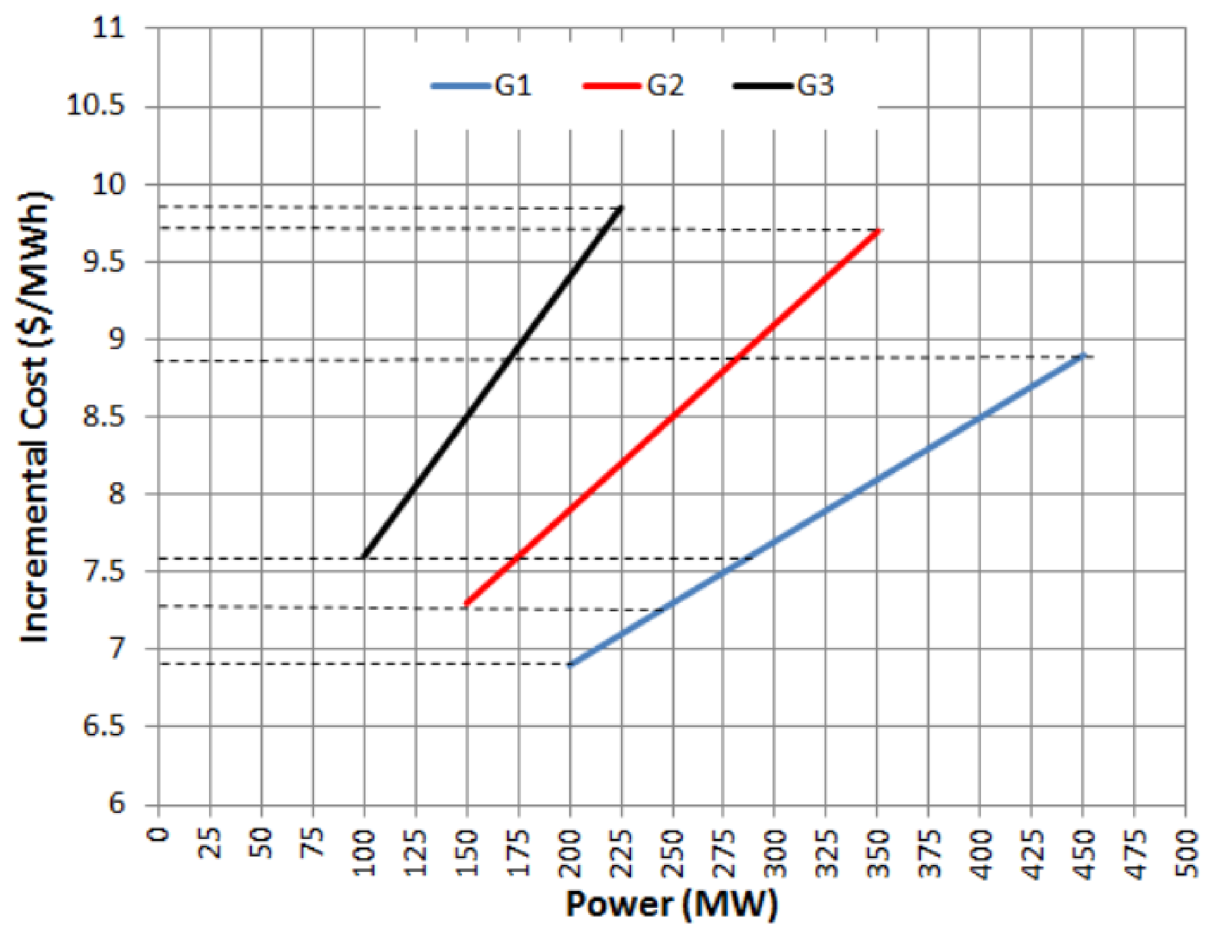
$$P_{Demand} = 975 = 450 + 315 + 210$$

Upper limit violated:
→ P1= 450 MW

→ solve the dispatch problem with two generators:
P2 + P3 = 525 MW

→ λ = $9.4/MWh
→ P2 = 315 MW
→ P3 = 210 MW

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


G1
G2
G3
Incremental Cost ($/MWh)
11
10.5
10
9.5
9
8.5
8
7.5
7
6.5
6
0
25
50
75
100
125
150
175
200
225
250
275
300
325
350
375
400
425
450
475
500
Power (MW)