



石家莊鐵道大學
SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY

在线开放课程

电力系统的功率调整和频率调整

电力系统中有功功率的
最优分配

主讲：田行军

5.2 电力系统中有功功率的最优分配

- ▶ 系统中有备用容量时，可考虑有功功率的最优分配问题，包括有功电源的最优组合及有功负荷的最优分配。
- ▶ 有功电源的最优组合：系统中发电设备和发电厂的合理组合。包括：机组的最优组合顺序，机组的最优组合数量，机组的最优开停时间。
- ▶ 有功负荷的最优分配：系统中的有功负荷在各个正在运行的发电设备或发电厂之间的合理分配。

5.2 电力系统中有功功率的最优分配

一、各类发电厂的运行特点

1 火电厂

火电厂

支付燃料费用

技术最小负荷

锅炉 25%~70%
汽机 10%~15%

承担急剧变化负荷时与投、退相似，额外耗能、费时

效率与蒸汽
参数有关

高温高压：效率高、调节范围小
中温中压：较前者低、但调节范围大
低温低压：指标最差、不用于调节

热电厂：抽气供热，效率最高，有不可调节的强迫功率

5.2 电力系统中有功功率的最优分配

2 水电厂

- 不需燃料费，但一次投资大
- 出力调节范围比火电机组大
- 启停费用低，且操作简单
- 出力受水头影响
- 抽水蓄能
- 必须释放水量——强迫功率

5.2 电力系统中有功功率的最优分配

3 核电厂

- ▶ 最小技术负荷小，为额定负荷10~15%。
- ▶ 启停费用高；负荷急剧变化时，调节费用高；启停及急剧调节时，易于损坏设备。
- ▶ 一次投资大，运行费用小。

5.2 电力系统中有功功率的最优分配



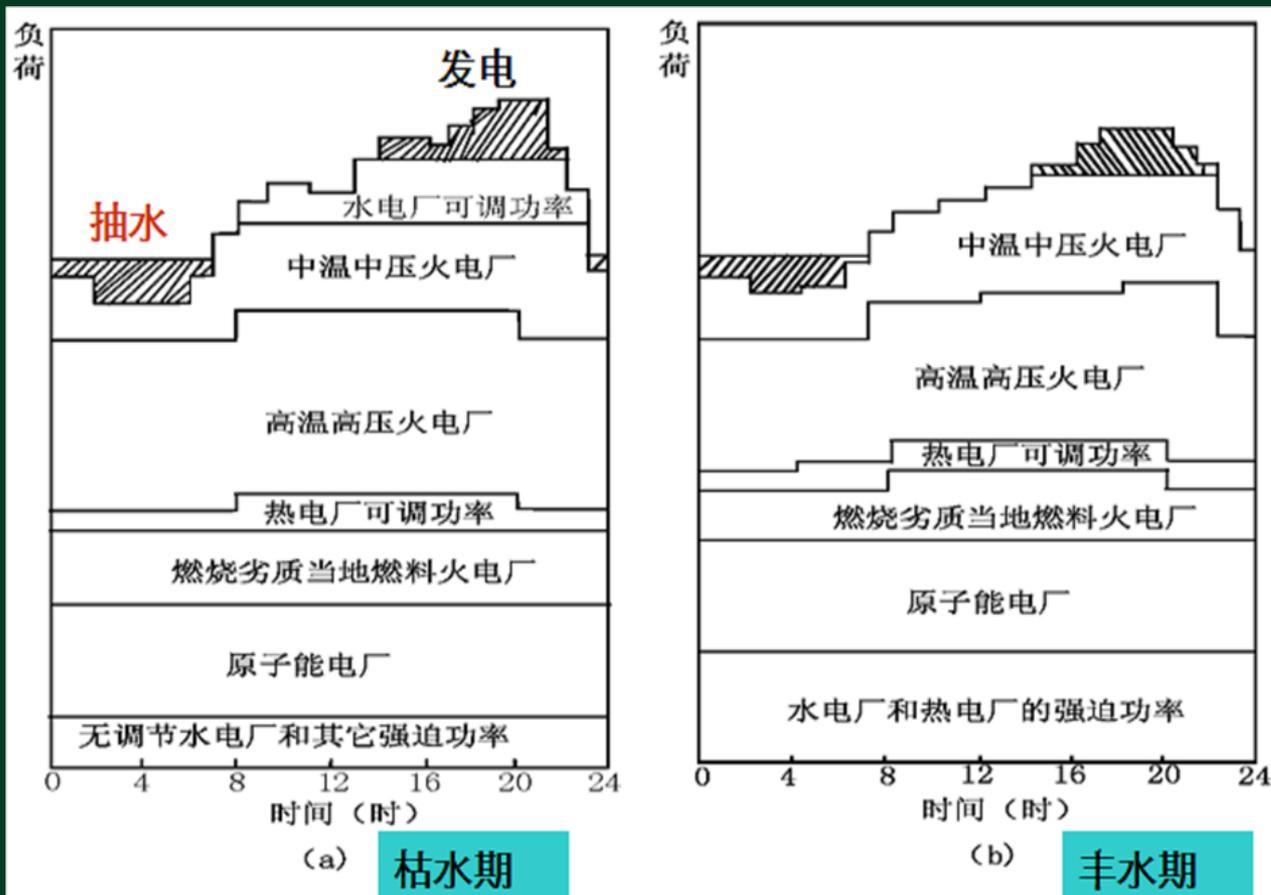
在线开放课程

二、各类发电厂的合理组合

原则：

- 1、充分利用水源。
- 2、降低火电机组的单位煤耗，发挥高效机组的作用。
- 3、尽量降低火力发电成本，增加燃用劣质煤、当地煤。

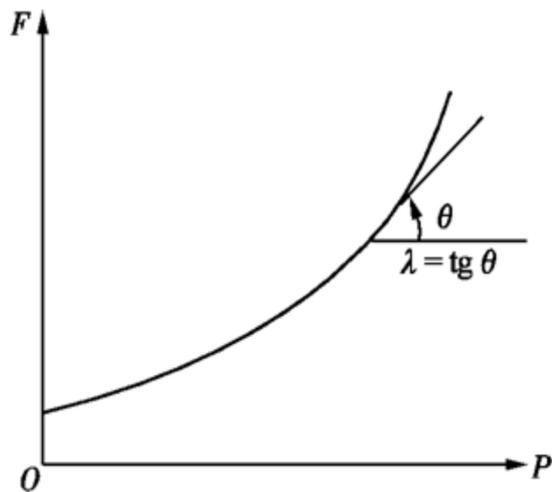
5.2 电力系统中有功功率的最优分配



5.2 电力系统中有功功率的最优分配

三、电力系统有功功率的最优分配

- 1、发电机的耗量特性：反映发电机组单位时间内能量输入和输出关系的曲线。



耗量特性

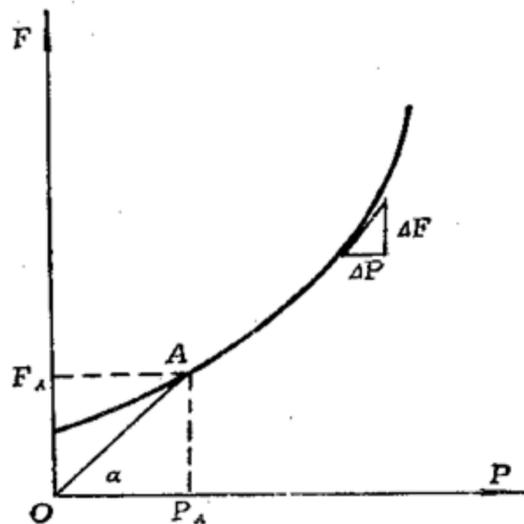


图 6-3 比耗量和耗量微增率

5.2 电力系统中有功功率的最优分配

- **比耗量**：耗量特性曲线上某点的纵坐标和横坐标之比，即输入和输出之比

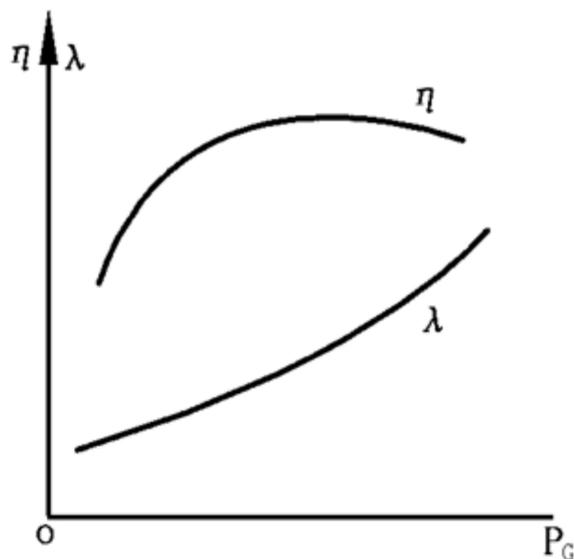
$$\mu = F/P$$

- **效率**：比耗量倒数

$$\eta = P/F$$

- **耗量微增率**：耗量特性曲线上某点切线的斜率，表示在该点的输入增量与输出增量之比。

$$\lambda = dF/dP$$



效率曲线和微增率曲线

5.2 电力系统中有功功率的最优分配

2、目标函数和约束条件

- 有功负荷最优分配的目的：在满足对一定量负荷持续供电的前提下，使发电设备在生产电能的过程中单位时间内所消耗的能源最少。
- 满足条件：

等式约束 $f(x, u, d)=0$

不等式约束 $g(x, u, d)\leq 0$

使

目标函数 $F=F(x, u, d)$ 最优

5.2 电力系统中有功功率的最优分配

(1) 目标函数

- 系统单位时间内消耗的燃料（火电机组）

$$F_{\Sigma} = F_1(P_{G1}) + F_2(P_{G2}) + \cdots + F_n(P_{Gn}) = \sum_{i=1}^n F_i(P_{Gi})$$

该目标函数是各发电设备发出有功功率的函数，描述的是单位时间内能源的消耗量。

5.2 电力系统中有功功率的最优分配

(2) 约束条件

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} = \sum_{j=1}^m P_{LDj} + \Delta P_L \xrightarrow{\text{忽略有功网损}} \sum_{i=1}^n P_{Gi} = \sum_{j=1}^m P_{LDj}$$

$$\left. \begin{aligned} P_{Gi \min} &\leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \\ Q_{Gi \min} &\leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max} \\ U_{i \min} &\leq U_i \leq U_{i \max} \end{aligned} \right\}$$

5.2 电力系统中有功功率的最优分配

3、多个发电厂间的负荷经济分配 (等耗量微增率准则)

(1) 不计网损的有功最优分配

- 目标函数最小：
$$F = \sum_{i=1}^n F_i(P_{Gi})$$

- 等式约束条件：
$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} - P_{LD} = 0$$

- 这是多元函数求条件极值问题，可以利用拉格朗日

- 乘数法求解。

- 构造拉格朗日函数
$$L = F - \lambda \left(\sum_{i=1}^n P_{Gi} - P_{LD} \right)$$

5.2 电力系统中有功功率的最优分配

- 求拉格朗日函数的无条件极值

$$L = F - \lambda \left(\sum_{i=1}^n P_{Gi} - P_{LD} \right)$$



$$\frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = \frac{\partial F}{\partial P_{Gi}} - \lambda = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$



$$\frac{\partial F}{\partial P_{Gi}} = \lambda \quad \longrightarrow \quad \frac{dF_i}{dP_{Gi}} = \lambda \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$F = \sum_{i=1}^n F_i(P_{Gi})$$

5.2 电力系统中有功功率的最优分配

不等式约束的处理

- 功率上下限约束

$$P_{Gi\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi\max}$$

- 先不考虑该约束条件进行经济分配计算，若发现越限，越限的发电厂按极限分配负荷，其余发电厂再按经济分配。
- 节点电压及无功功率约束

$$\begin{cases} U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \\ Q_{Gi\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi\max} \end{cases}$$

在经济功率分配后的潮流计算中处理。

5.2 电力系统中有功功率的最优分配

(2) 考虑网损的有功最优分配

- 等式约束变为
$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} - \Delta P_L - P_{LD} = 0$$

- 目标函数不变

- 拉格朗日函数为
$$L = \sum_{i=1}^n F_i - \lambda \left(\sum_{i=1}^n P_{Gi} - \Delta P_L - P_{LD} \right)$$



$$\frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = \frac{dF_i}{dP_{Gi}} - \lambda \left(1 - \frac{\partial \Delta P_L}{\partial P_{Gi}} \right) = 0$$

5.2 电力系统中有功功率的最优分配

经过网损修正后的等微增率准则

$$\rightarrow \frac{dF_i}{dP_{Gi}} \times \frac{1}{\left(1 - \frac{\partial \Delta P_L}{\partial P_{Gi}}\right)} = \frac{dF_i}{dP_{Gi}} L_i = \lambda \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

网损修正系数

网损微增率

网损微增率的物理意义:

某发电厂所发功率的变化引起的网路总损耗的变化
—阻抗矩阵法

5.2 电力系统中有功功率的最优分配

4、水、火发电厂间的负荷经济分配

- 变分法求解，分段处理
- 等式约束：

$$P_{H2}(t) + P_{T1}(t) - P_{LD}(t) = 0$$

$$\int_0^{\tau} W_2[P_{H2}(t)] dt - K_2 = 0$$

- 目标函数：

$$F_{\Sigma} = \int_0^{\tau} F_1[P_{T1}(t)] dt$$

这是一个求泛函极值问题，一般应用变分法求解。

5.2 电力系统中有功功率的最优分配

拉格朗日函数

$$L^* = \sum_{k=1}^{k=t} F_{1.k}(P_{T1.k})\Delta t_k - \sum_{k=1}^{k=t} \lambda_k [P_{H2.k} + P_{T1.k} - P_{LD.k}] \Delta t_k \\ + \gamma_2 \left[\sum_{k=1}^{k=t} W_{2.k}(P_{H2.k})\Delta t_k - K_2 \right]$$

$$\frac{\partial L^*}{\partial P_{T1.k}} = \frac{dF_{1.k}(P_{T1.k})}{dP_{T1.k}} - \lambda_k = 0$$

$$\frac{\partial L^*}{\partial P_{H2.k}} = \gamma_2 \frac{dW_{2.k}(P_{H2.k})}{dP_{H2.k}} - \lambda_k = 0$$

5.2 电力系统中有功功率的最优分配

$$\frac{dF_{1.k}(P_{T1.k})}{dP_{T1.k}} = \gamma_2 \frac{dW_{2.k}(P_{H2.k})}{dP_{H2.k}} = \lambda_k$$

任一瞬间:

$$\frac{dF_1(P_{T1})}{dP_{T1}} = \gamma_2 \frac{dW_2(P_{H2})}{dP_{H2}} = \lambda$$

其中:

$$\gamma_2 = \frac{dF_1(P_{T1})/dP_{T1}}{dW_2(P_{H2})/dP_{H2}} = \frac{dF_1(P_{T1})}{dW_2(P_{H2})}$$

水煤换算系数

↓
1m³水量相当于γ₂吨煤的消耗
丰水期小，枯水期大

小结

- 👉介绍了各类发电厂的运行特点;
- 👉介绍了各类发电厂的合理组合;
- 👉电力系统有功功率的最优分配。