

第九章

电力系统有功功率与频率的调整

9.1 有功功率和频率调整

1. 电力系统频率变化的影响

- 对用户的影响
 - (1) 异步电机转速
 - (2) 异步电机功率
 - (3) 电子设备
- 对发电厂和电力系统的影响
 - (1) 对发电厂厂用机械设备运行的影响
 - (2) 对汽轮机叶片的影响
 - (3) 对异步电机及变压器励磁的影响

9.1 有功功率和频率调整

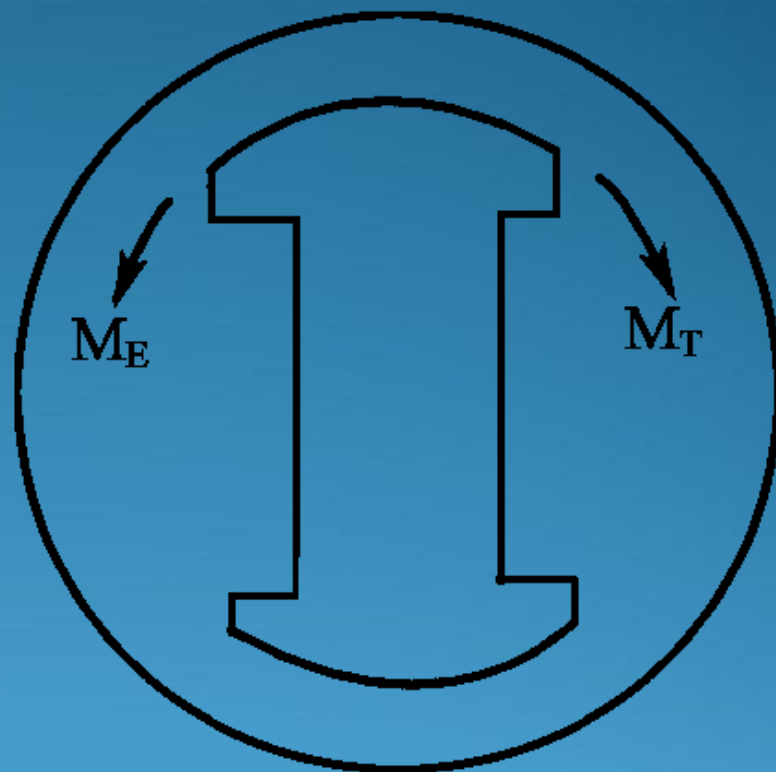
2 频率与有功平衡的关系

- 转矩平衡与功率平衡

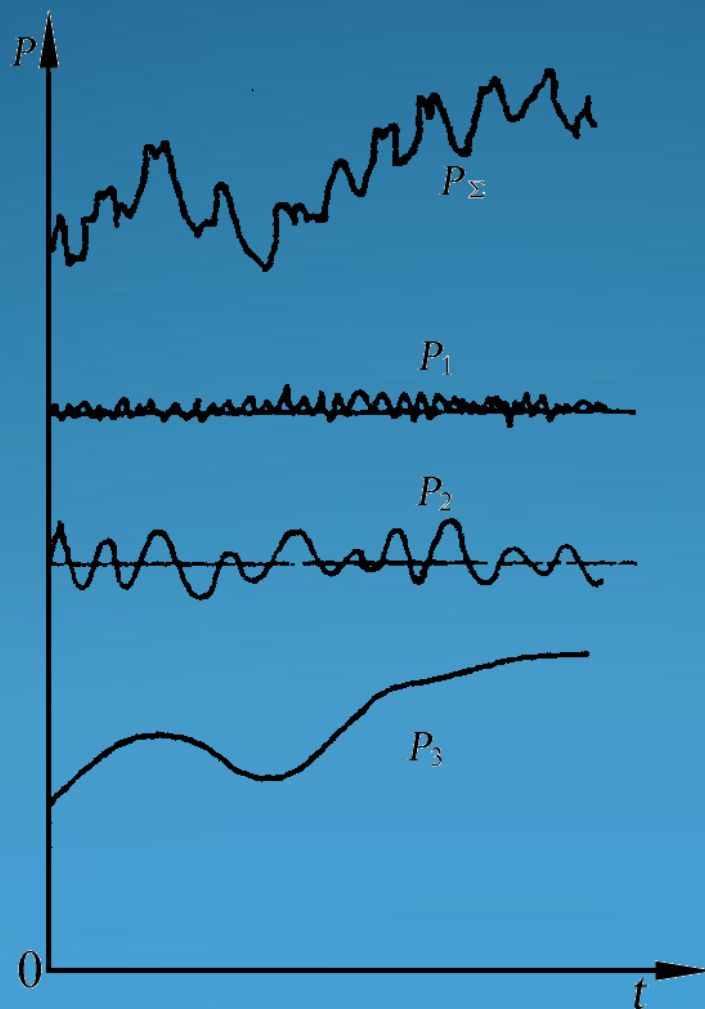
$$M_T = M_E \Rightarrow P_T = P_E$$

- 转矩不平衡时, 转子转速变化, 引起频率变化

$$f = \frac{pn}{60}$$



9.1 有功功率和频率调整



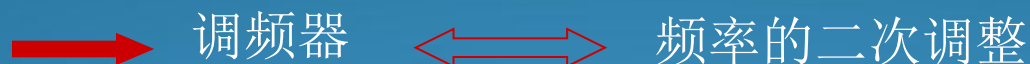
有功功率负荷的
变化及其调整

系统负荷可以看作由以下三种具有不同变化规律的变动负荷组成：

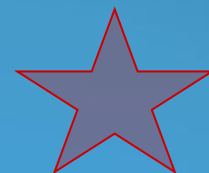
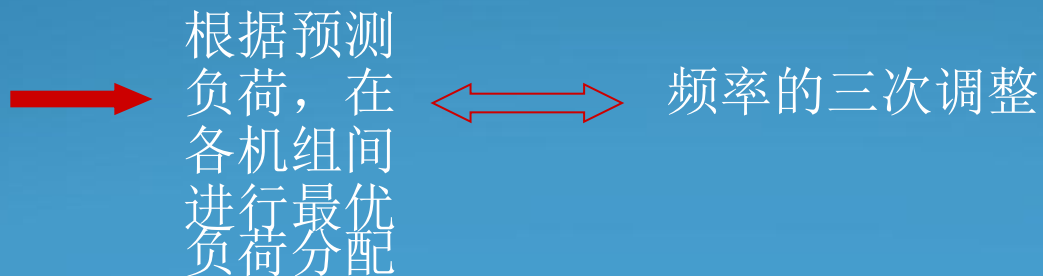
(1) 变动周期小于10s，变化幅度小



(2) 变动周期在 (10s, 180s)，变化幅度较大



(3) 变动周期最大，变化幅度最大：气象、生产、生活规律



4 有功功率平衡与备用容量

有功功率平衡：
$$\sum P_{Gi} = \sum P_{Li} + P_{Loss,\Sigma}$$

备用容量：15%~20%

- ❖ 作用：为了保证供电可靠性及电能质量合格，系统电源容量应大于发电负荷
 - 定义：备用容量 = 系统可用电源容量 - 发电负荷
 - 分类：

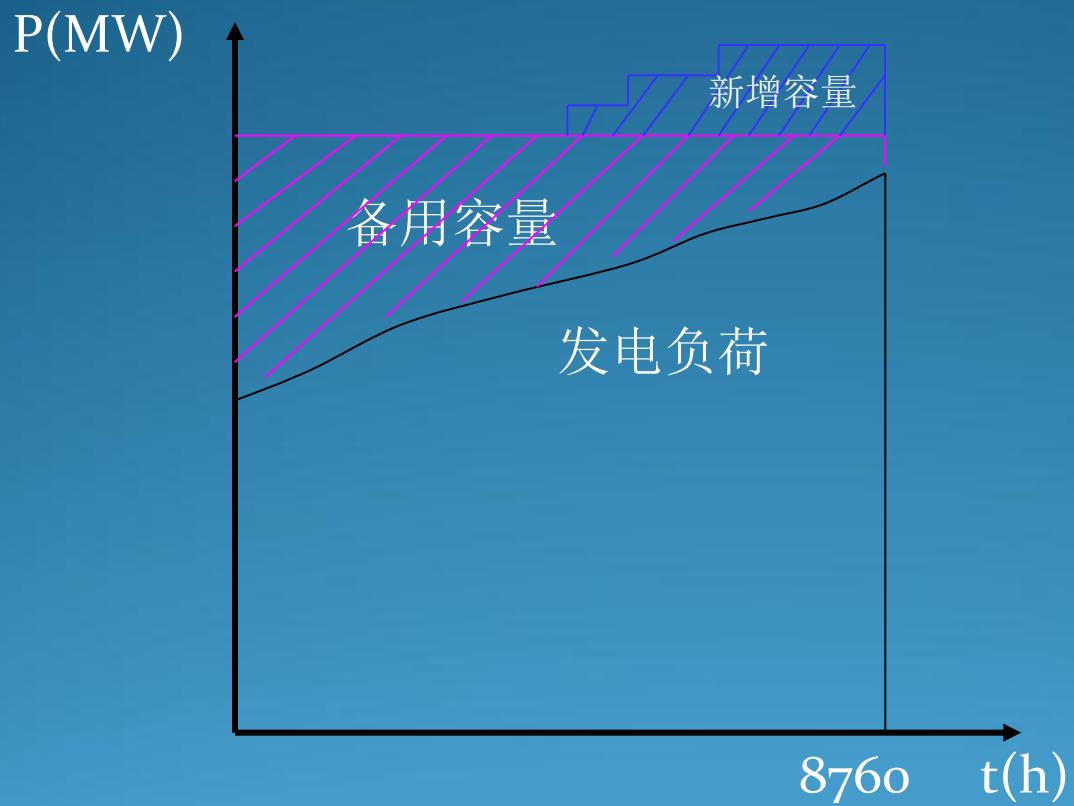
按作用分：

- (1) 负荷备用：满足负荷波动、计划外的负荷增量2%~5%
- (2) 事故备用：发电机因故退出运行能顶上的容量5%~10%
- (3) 检修备用：发电机计划检修4%~5%
- (4) 国民经济备用：满足工农业超计划增长3%~5%

按其存在形式分：

- (1) 热备用
- (2) 冷备用

备用容量



9.2 电力系统的频率特性

1. 负荷的有功功率—频率静态特性

$$P_D = a_0 P_{DN} + a_1 P_{DN} \left(\frac{f}{f_N} \right) + a_2 P_{DN} \left(\frac{f}{f_N} \right)^2 + a_3 P_{DN} \left(\frac{f}{f_N} \right)^3 + \dots$$



$$a_0 + a_1 + a_2 + a_3 + \dots = 1$$

以 f_N 和 P_{DN} 为基准值
的标么值表达式

$$P_{D*} = a_0 + a_1 f_* + a_2 f_*^2 + a_3 f_*^3 + \dots$$

负荷的有功功率－频率静态特性简化表达

当频率偏离额定值不大时，负荷有功－频率静态特性用一条近似直线来表示。

$$K_D = \operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta P_D}{\Delta f}$$

$$K_{D^*} = \frac{\Delta P_D / P_{DN}}{\Delta f / f_N} = \frac{\Delta P_{D^*}}{\Delta f^*}$$



负荷的频率调节效应系数或称为负荷的频率调节效应，表示负荷随频率的变化程度。

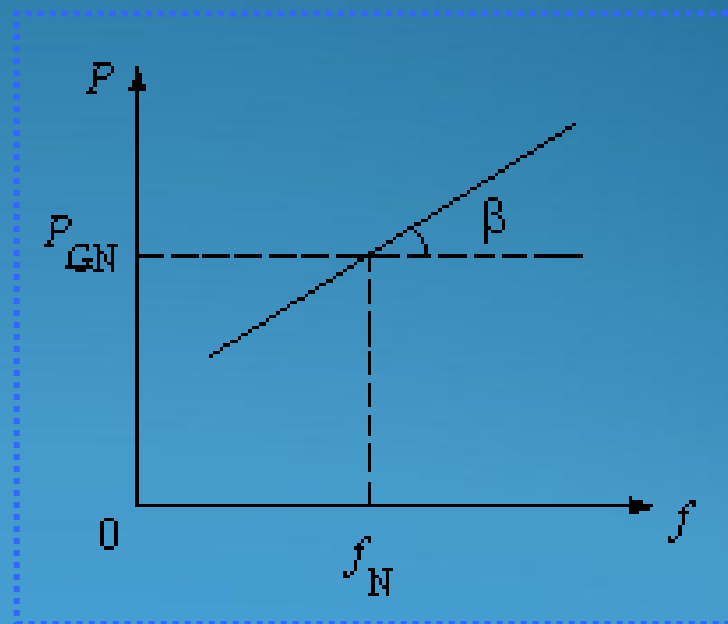


图 4-1

2 发电机组的有功功率—频率静态特性

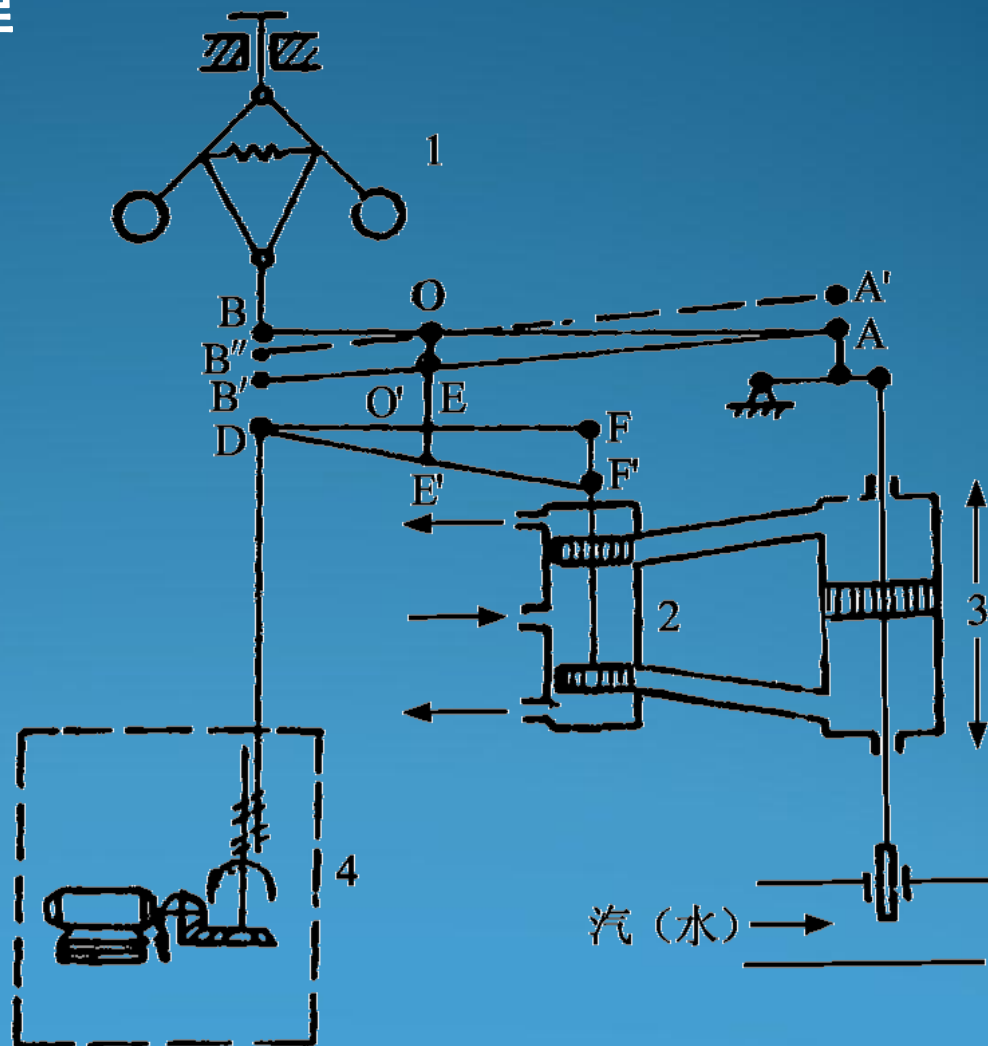
• 调速器的工作原理

1 为转速测量元件—离心飞摆及其附件；

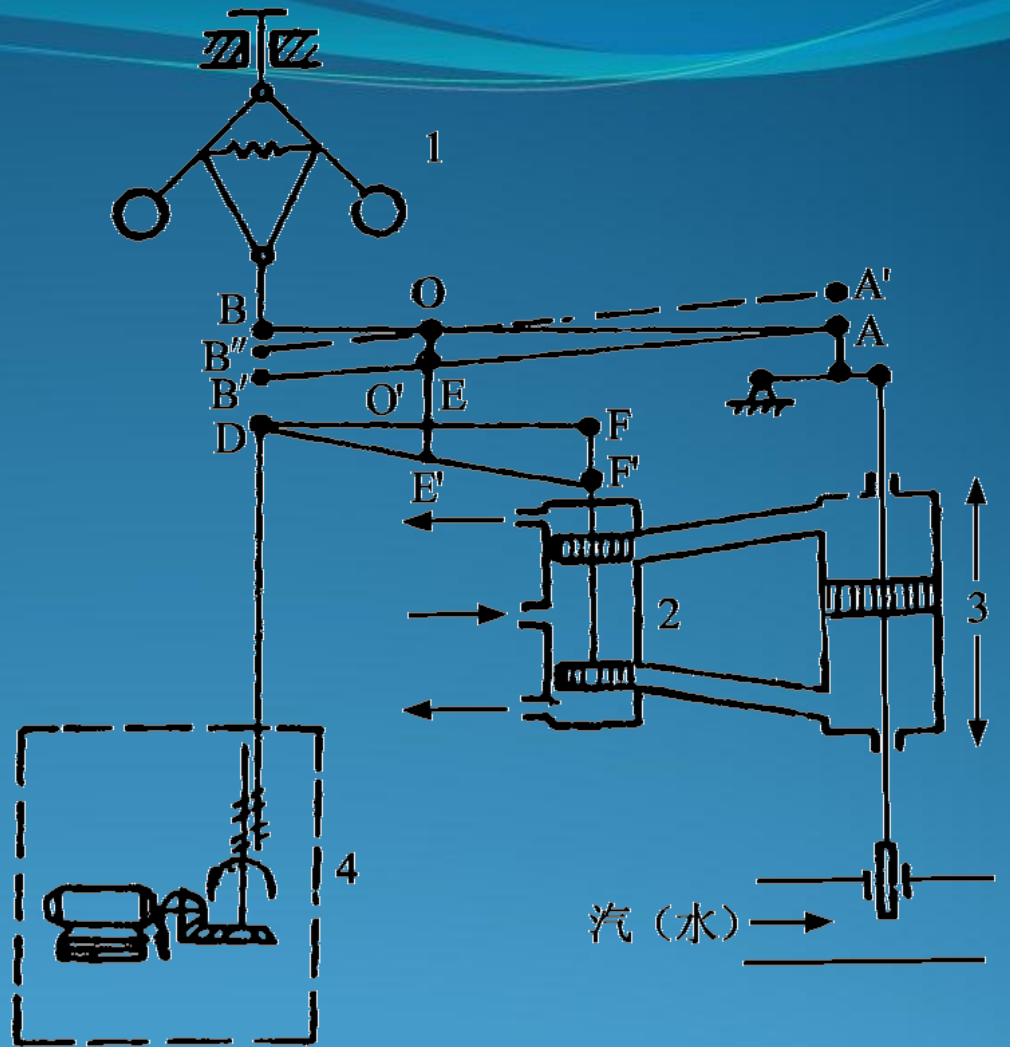
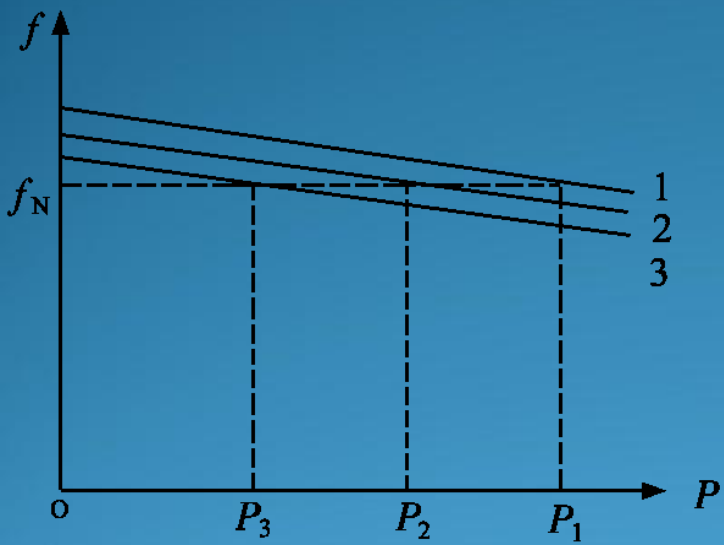
2 为放大元件—错油门(或称配压阀)；

3 为执行机构—油动机(或称接力器)；

4 为转速控制机构或称同步器(调频器)



调频器的工作原理



• 发电机组的有功功率—频率静态特性

(1) 静态调差系数:某台机组负荷改变时相应的频率偏移

$$\delta = -\frac{f_2 - f_1}{P_2 - P_1} = -\frac{\Delta f}{\Delta P} \quad \Rightarrow \quad \delta_* = -\frac{\Delta f / f_N}{\Delta P / P_{GN}} = -\frac{\Delta f_*}{\Delta P_*}$$

若2为额定运行点, 1为空载

运行点:

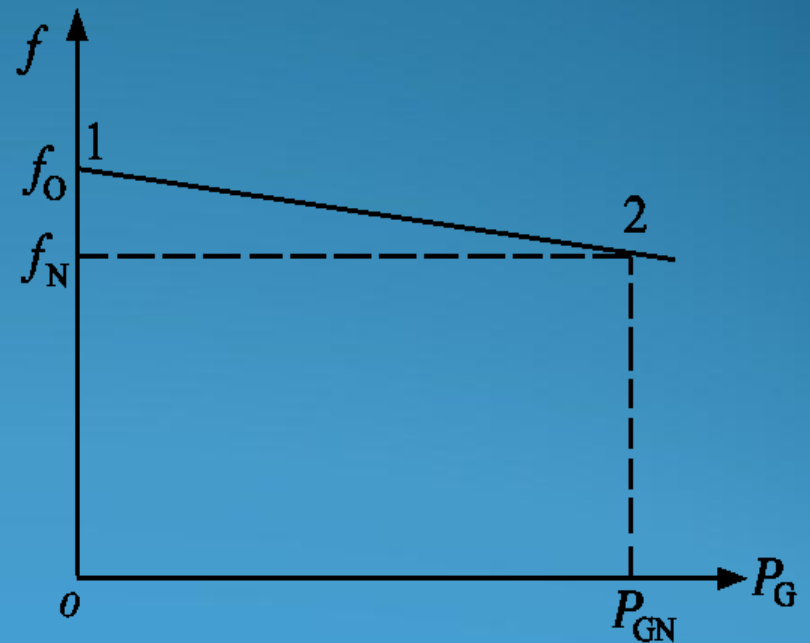
$$P_2 = P_{GN} \quad f_2 = f_N$$

$$P_1 = 0 \quad f_1 = f_0$$

$$\delta = -\frac{f_N - f_0}{P_{GN}}$$

$$\delta_* = -\frac{f_N - f_0}{f_N} = \frac{f_0 - f_N}{f_N}$$

$$\delta(\%) = \frac{f_0 - f_N}{f_N} \times 100$$



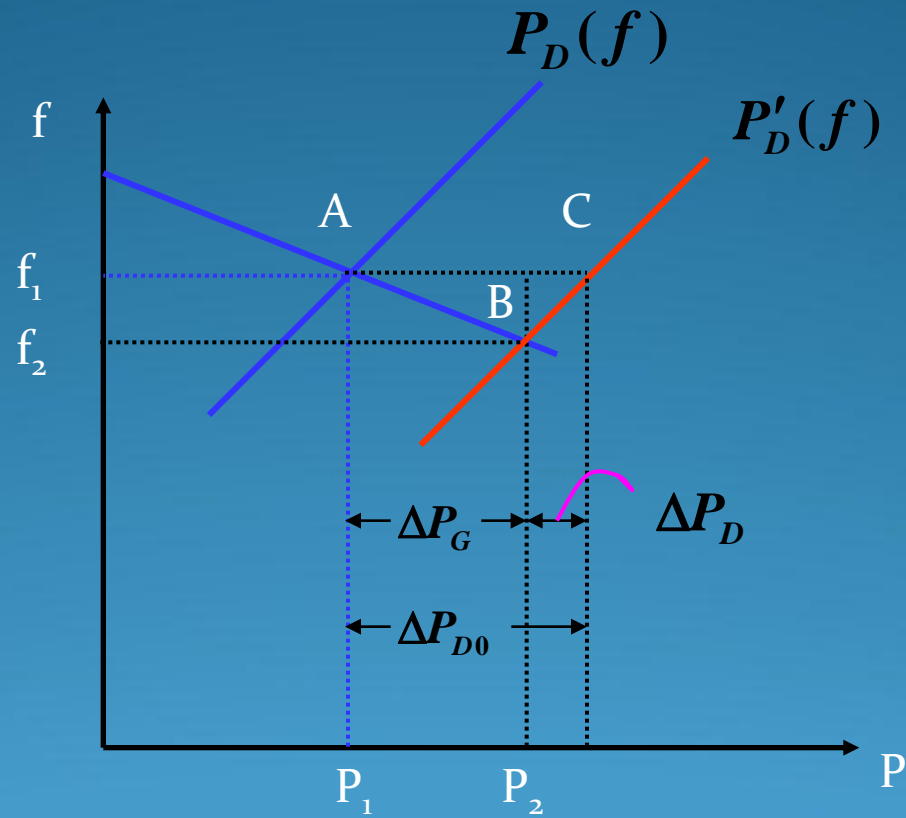
单位调节功率:调差系数的倒数,表示频率变化时发电机组输出功率的变化量。

$$K_G = \frac{1}{\delta} = -\frac{\Delta P_G}{\Delta f} \quad K_{G^*} = \frac{1}{\delta_*} = -\frac{\Delta P_{G^*}}{\Delta f_*}$$

$$K_G = K_{G^*} \frac{P_{GN}}{f_N}$$

调差系数越小,单位调节功率越大,频率偏移越小。

3 电力系统的有功功率-频率静态特性过载能力



$$\Delta f = f_2 - f_1 < 0 \Rightarrow \begin{cases} \Delta P_G = -K_G \Delta f \\ \Delta P_D = K_D \Delta f \end{cases}$$

负荷功率的实际增量： $\Delta P_{D0} + \Delta P_D = \Delta P_{D0} + K_D \Delta f$
它同发电机功率增量平衡：

$$\Delta P_{D0} + \Delta P_D = \Delta P_G$$



$$\Delta P_{D0} = \Delta P_G - \Delta P_D = -(K_G + K_D) \Delta f = -K \Delta f$$

$$K = K_G + K_D = -\frac{\Delta P_{D0}}{\Delta f}$$

系统的单位调节功率：计及发电机和负荷的调节效应时，引起频率单位变化时的负荷变化量。

标么值表示

$$K = K_G + K_D = -\frac{\Delta P_{D0}}{\Delta f} \quad \rightarrow$$

等式两端同除以 P_{DN}/f_N

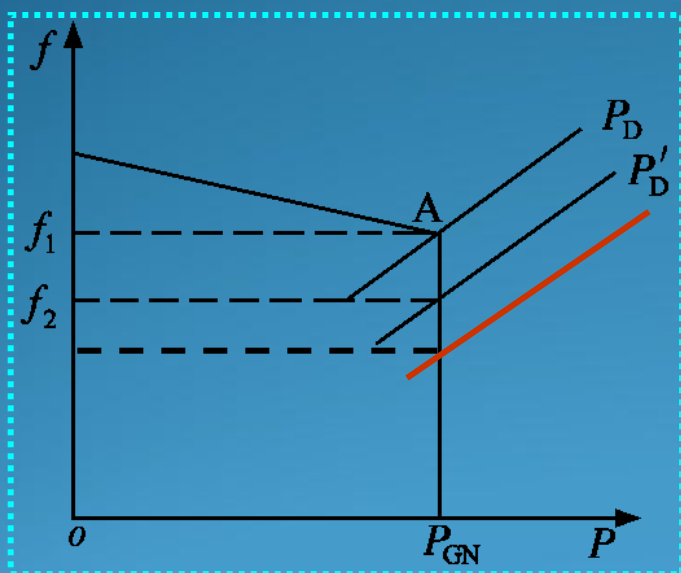
$$K_{G^*} \frac{P_{GN}}{f_N} + K_{D^*} \frac{P_{DN}}{f_N} = -\frac{\Delta P_{D0}}{\Delta f}$$



$$K_{G^*} \frac{P_{GN}}{P_{DN}} + K_{D^*} = -\frac{\Delta P_{D0}/P_{DN}}{\Delta f/f_N} = -\frac{\Delta P_{D0^*}}{\Delta f^*}$$

$$K_* = k_r K_{G^*} + K_{D^*} = -\frac{\Delta P_{D0^*}}{\Delta f^*}$$

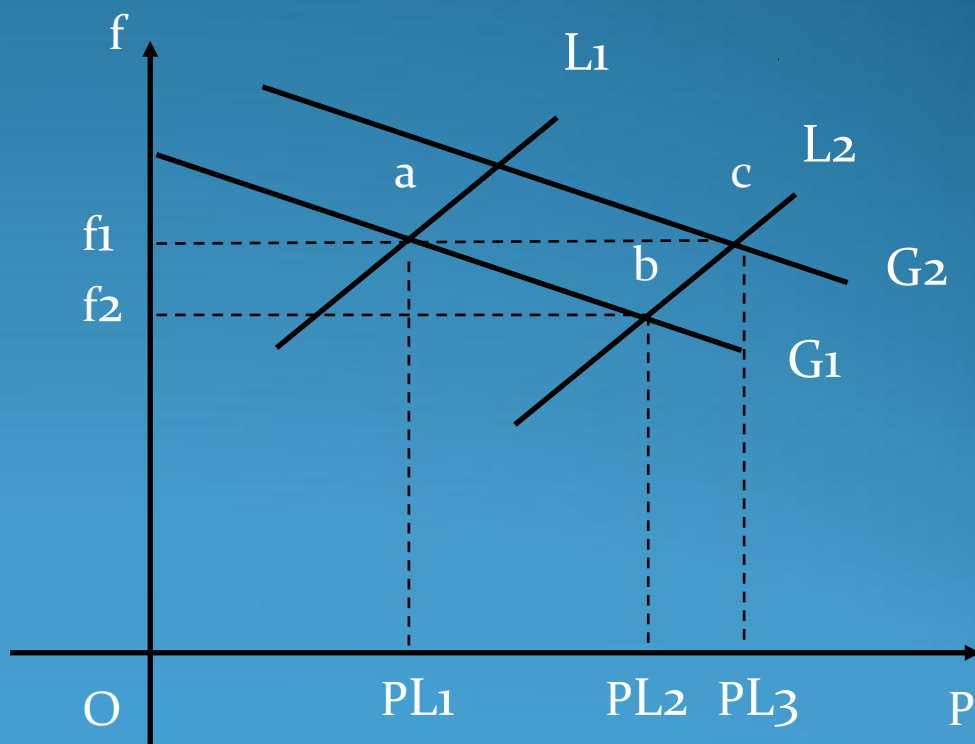
$k_r = P_{GN}/P_{DN}$ 为备用系数



4 电力系统频率调整

1)、电力系统频率的一次调整

当系统负荷增加，综合负荷特性为 L_2 时，发电机调速系统的设定值不变，等效发电机特性仍然为 G_1 ，系统运行在 b 点，系统频率为 f_2 。这种由发电机特性和负荷调节效应共同承担系统负荷变化使系统运行在另一频率的频率调整称为频率的一次调整。

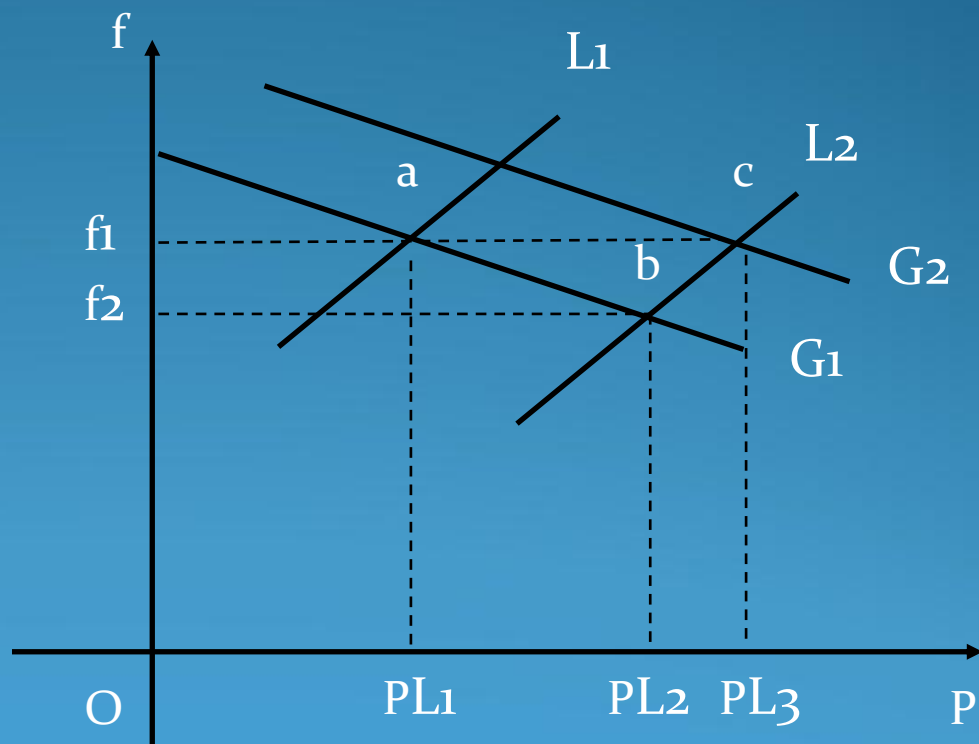


4 电力系统频率调整

1)、电力系统频率一次调整

对于右图，频率一次调整的结果：

发电机有功功率增加了 $P_{L2}-P_{L1}$ ，负荷调节效应是负荷少吸收有功功率为 $P_{L3}-P_{L2}$ ，系统频率降低到 f_2 。



4 电力系统频率调整

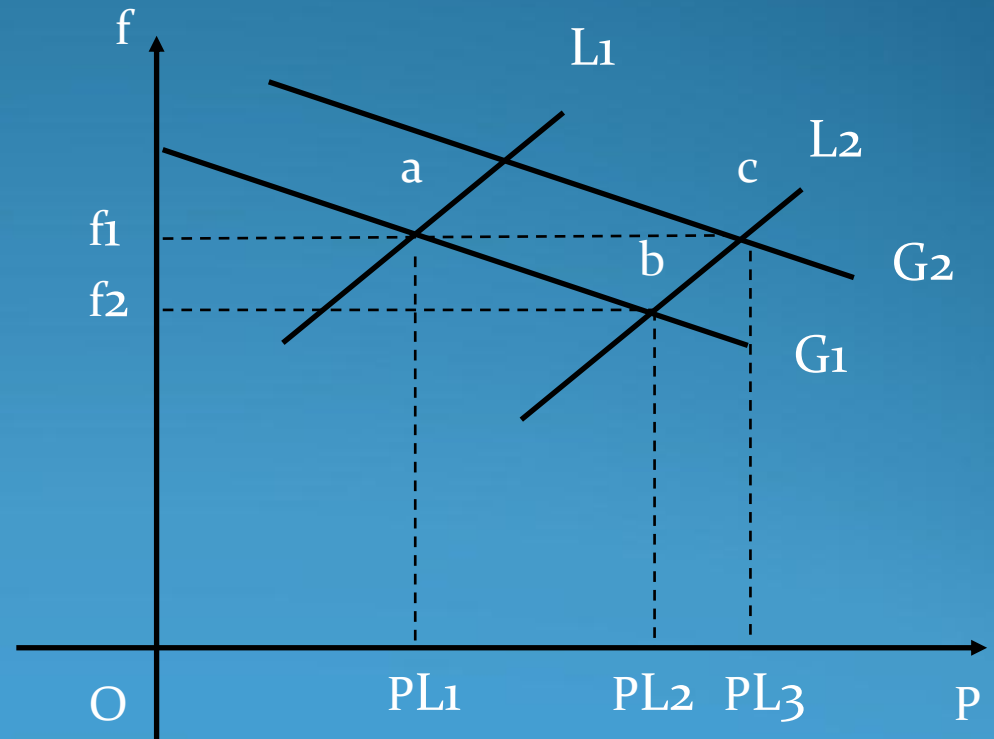
1)、电力系统频率一次调整

当系统负荷减少时，频率的一次调整过程与上述相反。即系统频率升高，发电机有功功率减少，负荷调节效应使负荷吸取的有功功率相对于原频率下的功率有所增加。

4 电力系统频率调整

2)、电力系统频率二次调整

当系统负荷变化较大，频率的一次调整结果，系统频率过高或过低时，需要改变发电机调速系统的设定值，使系统频率恢复到规定范围内。对于右图，等效发电机特性变为 G_2 ，系统频率回到 f_1 。



4 电力系统频率调整

2)、电力系统频率二次调整

当系统负荷变化较大，通过改变发电机调速系统的设定值使系统频率恢复到规定范围内的频率调整称为频率的二次调整。

4 电力系统频率调整

2)、电力系统频率二次调整

电力系统频率的二次调整任务是由调频发电厂中的发电机组承担的。

4 电力系统频率调整

3)、电力系统有功功率调整（频率的三次调整）：有功经济调度

9.3 电力系统经济调度

- 电力系统经济调度：是在满足安全和一定质量要求的条件下尽可能提高运行的经济性，即合理地利用现有的能源和设备，以最少的燃料消耗量（或燃料费用或运行成本），保证对用户可靠而满意地供电。

9.3 电力系统经济调度

- 电力系统是现代社会中最重要、最庞杂的工程系统之一。如何保证正常、稳态运行时的电能质量和经济性问题，是我们考虑的重点问题之一。
- 衡量运行经济性的主要指标为：比耗量和线损率
- 有功功率的最优分布包括：有功功率负荷预计、有功功率电源的最优组合、有功功率负荷在运行机组间的最优分配等。

负荷变化的简要回顾

1. 第一种变动幅度很小，周期又很短，这种负荷变动有很大的偶然性；
2. 第二种变动幅度较大，周期也较长，属于这种负荷的主要有：电炉、压延机械、电气机车等带有冲击性的负荷变动；
3. 第三种变动基本上可以预计，其变动幅度最大，周期也最长，是由于生产、生活、气象等变化引起的负荷变动。

- 根据负荷变化，电力系统的有功功率和频率调整大体上也可分为：
 1. 一次调频：由发电机调速器进行；
 2. 二次调频：由发电机调频器进行；
 3. 三次调频：由调度部门根据负荷曲线进行最优分配。
- 前两种是事后的，第三种是事前的。
- 一次调频是所有运行中的发电机组都可参加的，取决于发电机组是否已经满负荷发电。这类发电厂称为负荷监视厂。
- 二次调频是由平衡节点来承担。

9.3 电力系统中有功功率的最优分配

- 经济调度的第二个问题是有功功率的最优分配，包括有功功率电源的最优组合和有功功率负荷的最优分配。
- 一. 有功功率电源的最优组合
- 有功功率电源的最优组合：是指系统中发电设备或发电厂的合理组合。通常所说的机组的合理开停，大体上包括三个部分：
 - 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

9.3.1 各类发电厂的合理组合

- 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。
- 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。

一、各类发电厂的运行特点

1 火电厂

- (1) 燃料及运输费用
- (2) 有功出力最小限制
- (3) 效率与蒸汽参数有关
- (4) 启停负载且启停费用高
- (5) 热电厂总效率较高，但与热负荷相应的输出功率是不可调节的强迫功率。

一、各类发电厂的运行特点

2 水电厂

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

一、各类发电厂的运行特点

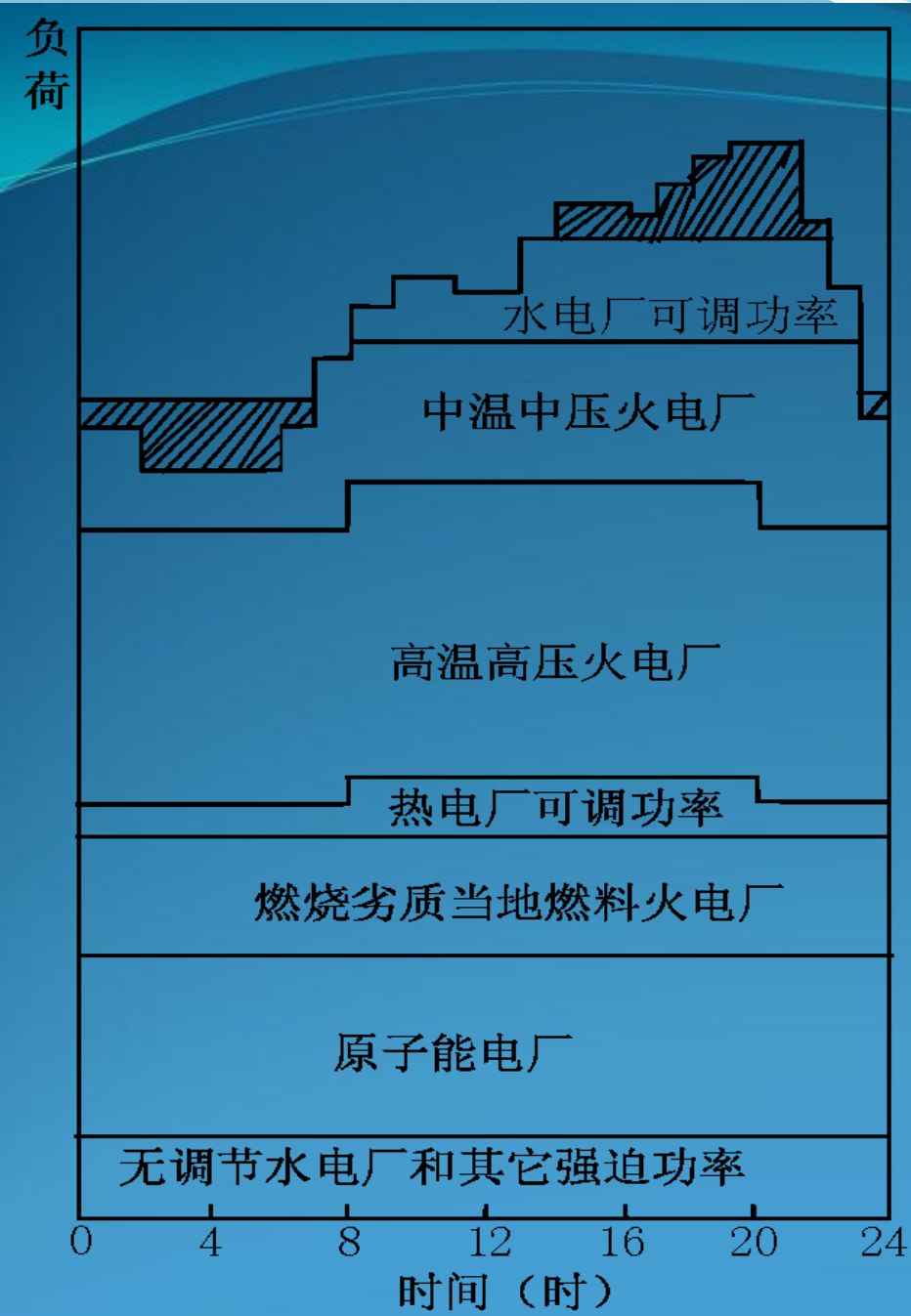
3 核电厂

- (1) 最小技术负荷小，为额定负荷10~15%。
- (2) 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。
- (3) 一次投资大，运行费用小。

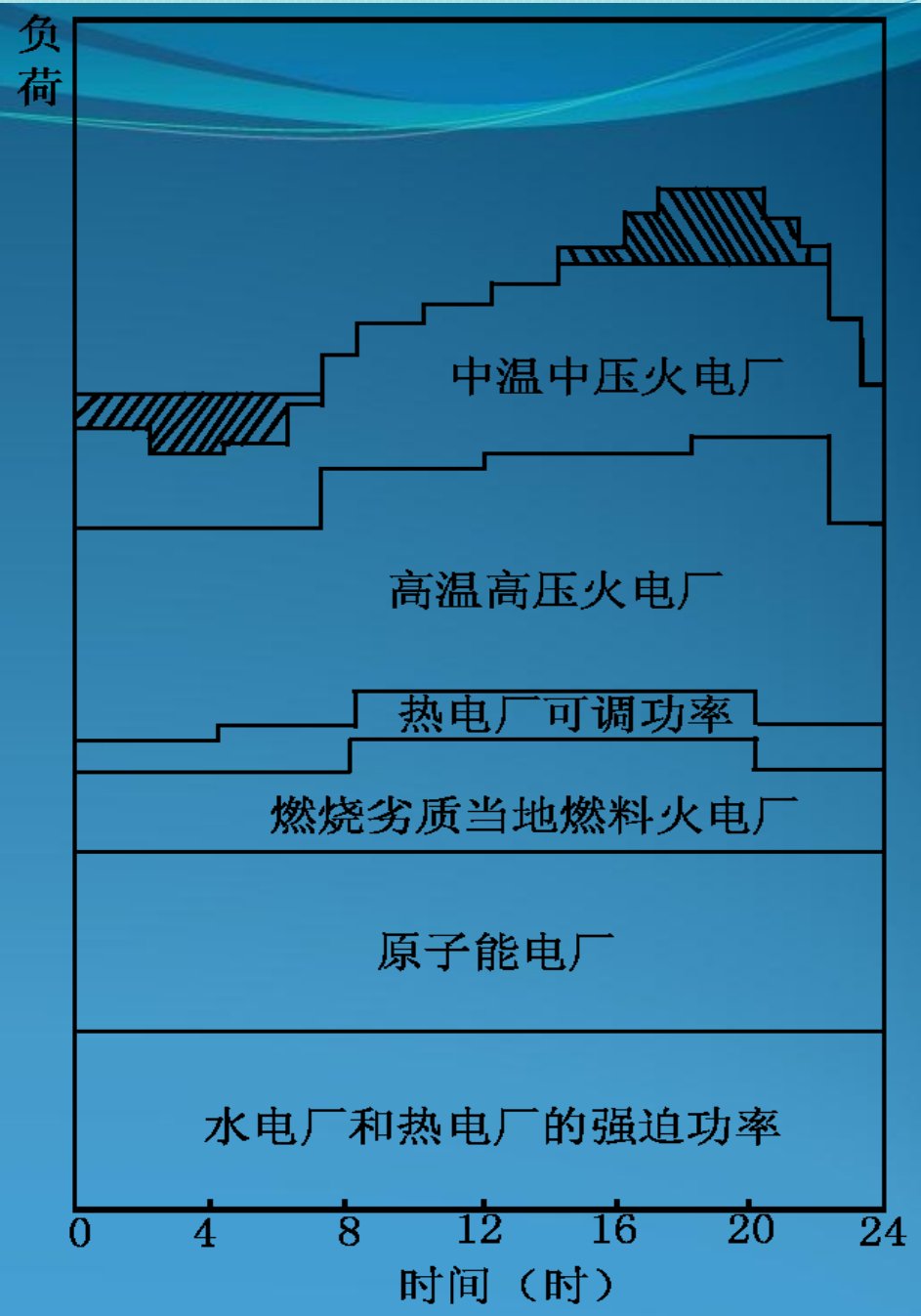
二、各类发电厂的合理组合

- 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。



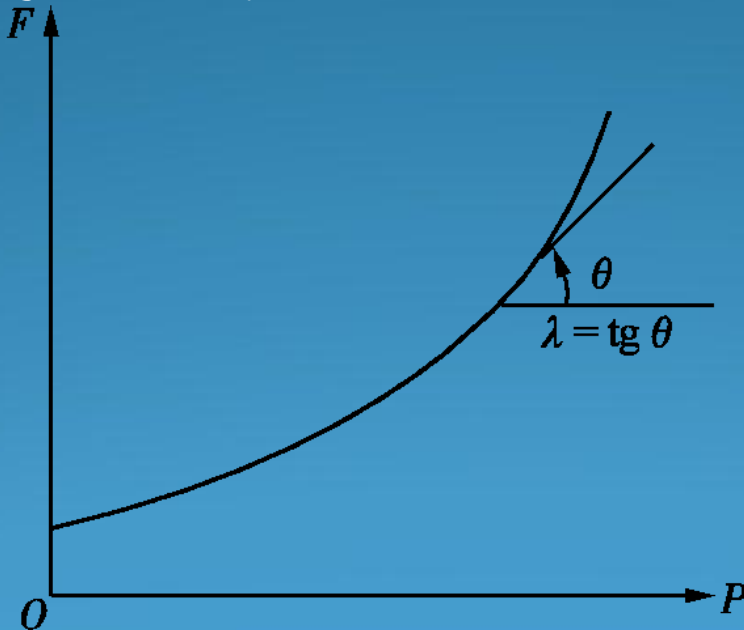
枯水期



丰水期

9.3.2 电力系统有功功率的最优分配

- 1 发电机组的耗量特性：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

9.3.2 电力系统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

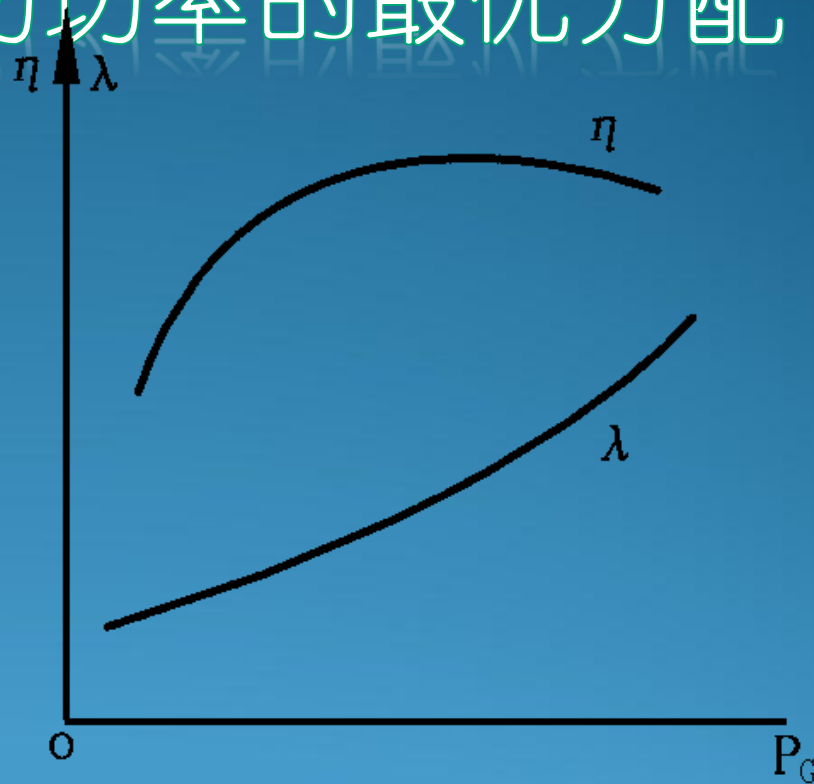
$$\mu = F / P$$

- 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

二、目标函数和约束条件

- 优化问题

- **最优化**：是指人们在生产过程或生活中为某个目的而选择的一个“最好”方案或一组“得力”措施以取得“最佳”效果这样一个宏观过程。
- **有功功率负荷的最优分配**：是指系统的有功功率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。其核心是按等耗量微增率准则进行分配。
- **电力系统最优运行**是电力系统分析的一个重要分支，它所研究的问题主要是在保证用户用电需求（负荷）的前提下，如何优化地调度系统中各发电机组或发电厂的运行工况，从而使系统发电所需的总费用或所消耗的总燃料耗量达到最小这样决策问题。

1. 优化问题的数学模型

一般非线性规划问题可描述为满足非线性约束条件是非线性函数的最小值问题，其标准形式为：

$$\min f(x)$$

$$s.t. \quad h(x) = 0$$

$$g \leq g(x) \leq \bar{g}$$

即在满足 $h(x)=0$ 的等式约束条件下和 $g(x)$ 不等式的条件下，求取目标函数 $f(x)$ 值最小。

2. 电力系统经济调度的数学模型

- 1) 目标函数：系统发电所需的总费用或所消耗的总燃料耗量

对于纯火电系统，发电厂的燃料费用主要与发电机输出的有功功率有关，与输出的无功功率及电压等运行参数关系较小。这种反映单位时间内发电设备的能量消耗与发出的有功功率之间的关系称为耗量特性。其函数关系式为：

$$f_i = f_i(P_{Gi}) \text{ 单位：吨/小时}$$

上述函数可用试验数据通过最小二乘法拟合而成，根据前人经验，阶数为2比较合适，即

$$f_i = a_{2i}P_{Gi}^2 + a_{1i}P_{Gi} + a_{0i}$$

2. 电力系统经济调度的数学模型

总的目标函数为：

$$\min f_i(\bullet) = F_{\text{cost}} = \sum_{i \in S_G} (a_{2i} P_{Gi}^2 + a_{1i} P_{Gi} + a_{0i})$$

2. 电力系统经济调度的数学模型

2) 等式约束条件：有功功率必须保持平衡的条件。

对于每个节点：

$$P_{Gi} - P_{Li} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0$$

对于整个系统：

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} - \sum_{i=1}^n P_{Li} - \Delta P_{\Sigma} = 0$$

若不计网损：

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} - \sum_{i=1}^n P_{Li} = 0$$

2. 电力系统经济调度的数学模型

3) 不等式约束条件：为系统的运行限制。

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

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

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max}$$

4) 变量：各发电设备输出有功功率。

3. 电力系统经济调度问题的求解

一般用拉格朗日乘数法。

现用两个发电厂之间的经济调度来说明，问题略去网络损耗。

1) 建立数学模型。

$$\min f(\bullet) = F_{\text{cost}} = \sum_{i=1}^2 (a_{2i} P_{Gi}^2 + a_{1i} P_{Gi} + a_{0i})$$

$$\sum_{i=1}^2 P_{Gi} - \sum_{i=1}^2 P_{Li} = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{G1\min} \leq P_{G1} \leq P_{G1\max}, P_{G2\min} \leq P_{G2} \leq P_{G2\max} \\ Q_{G1\min} \leq Q_{G1} \leq Q_{G1\max}, Q_{G2\min} \leq Q_{G2} \leq Q_{G2\max} \\ U_{1\min} \leq U_1 \leq U_{1\max}, U_{2\min} \leq U_2 \leq U_{2\max} \end{array} \right.$$

3. 电力系统经济调度问题的求解

- 2) 根据给定的目标函数和等式约束条件建立一个新的、不受约束的目标函数——拉格朗日函数。

$$C^* = F_1(P_{G1}) + F_2(P_{G2}) - \lambda(P_{G1} + P_{G2} - P_{L1} - P_{L2})$$

λ —拉格朗日乘子

- 3) 对拉格朗日函数求导，得到最小值时应有的三个条件：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dF_1(P_{G1})}{dP_{G1}} - \lambda = 0 \\ \frac{dF_2(P_{G2})}{dP_{G2}} - \lambda = 0 \\ f(P_{G1}, P_{G2}) = P_{G1} + P_{G2} - P_{L1} - P_{L2} \end{array} \right. \quad (1)$$

3. 电力系统经济调度问题的求解

4) 求解 (1) 得到:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$$

这就是著名的等耗量微增率准则，表示为使总耗量最小，应按相等的耗量微增率在发电设备或发电厂之间分配负荷。

5) 对不等式约束进行处理

- 对于有功功率限制，当计算完后发现某发电设备越限，则该发电设备取其限制，不参加最优分配计算，而其他发电设备重新进行最优分配计算。
- 无功功率和电压限制和有功功率负荷的分配没有直接关系，可暂时不计，当有功功率负荷的最优分配完成后计算潮流分布在考虑。

4. 用迭代法求解电力系统经济调度问题

- 1) 设耗量微增率的初值 $\lambda^{(0)}$;
- 2) 求与 $\lambda^{(0)}$ 对应的各发电设备应发功率 $P_{Gi}^{(0)}$;
- 3) 校验求得的 $P_{Gi}^{(0)}$ 是否满足等式约束条件:

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi}^{(0)} - \sum_{i=1}^n P_{Li} = 0$$

- 4) 如不能满足, 则如 $\sum P_{Gi} > \sum P_{Li}$, 取 $\lambda^{(1)} < \lambda^{(0)}$;
如 $\sum P_{Gi} < \sum P_{Li}$, 取 $\lambda^{(1)} > \lambda^{(0)}$, 自2) 开始重新计算。
- 5) 直到满足条件。

5. 等耗量微增率准则的推广运用

- 用于解决火力发电厂与水力发电厂之间的最优分配问题。
- 其目标函数不变，不等式约束不变
- 等式约束中加水量的特性方程：

$$\int_0^{\tau} w_j (P_{Gj}) dt = K$$

w_j : 单位时间内水力发电设备的水量消耗。

- 另外还有所不同的是须各时段联立求解。