



東南大學  
SOUTHEAST UNIVERSITY



# 电力系统稳态分析 第五章

东南大学电气工程学院

2022/11/20



## 讨论电力系统正常、稳态运行的电能质量和经济性

### 电能质量指标:

- ◆ 频率偏移
- ◆ 电压偏移
- ◆ 波形畸变率


### 经济性指标:

- ◆ 比耗量: 生产单位电能所需消耗的一次能源(火电厂指煤耗量 $g/(kw.h)$ )
- ◆ 线损率



### 有功功率的最优分配

### 电力系统的频率调整

- 
- ✓ 有功功率负荷预测
  - ✓ 有功功率电源的最优组合
  - ✓ 有功功率负荷在已运行机组间的最优分配

# 第一节 电力系统中有功功率的平衡



- 1.1 有功功率负荷的变动和调整控制
- 1.2 有功功率负荷曲线的预计
- 1.3 有功功率电源和备用容量

# 1.1 有功功率负荷的变动和调整控制

## 负荷变动规律分解

**第一种负荷变动：**变动幅度很小，周期很短、偶然性很大

**第二种负荷变动：**变动幅度较大，周期较长。例如，电炉、压延机械、电气机车等带有冲击性的负荷变动

**第三种负荷变动：**变动幅度最大，周期最长。例如，生产、生活、气象等变化引起的规律性负荷变动

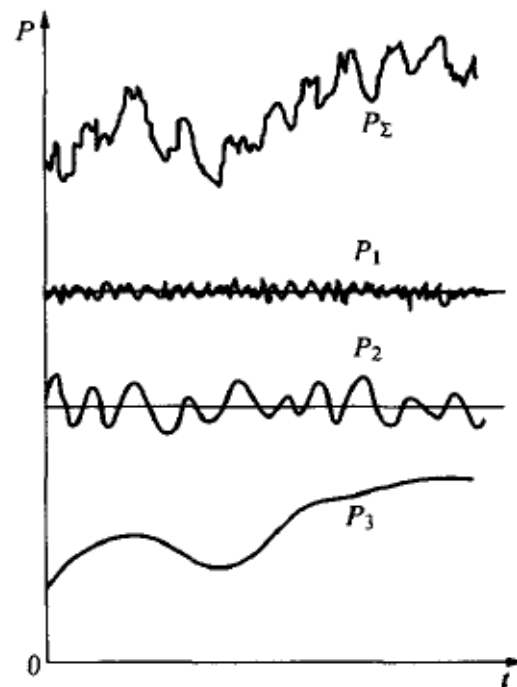


图 5-1 有功功率负荷的变动

$P_1$ —第一种负荷变动； $P_2$ —第二种负荷变动；  
 $P_3$ —第三种负荷变动； $P_\Sigma$ —实际不规则的负荷变动

# 1.1 有功功率负荷的变动和调整控制

## 负荷变动幅度与周期关系

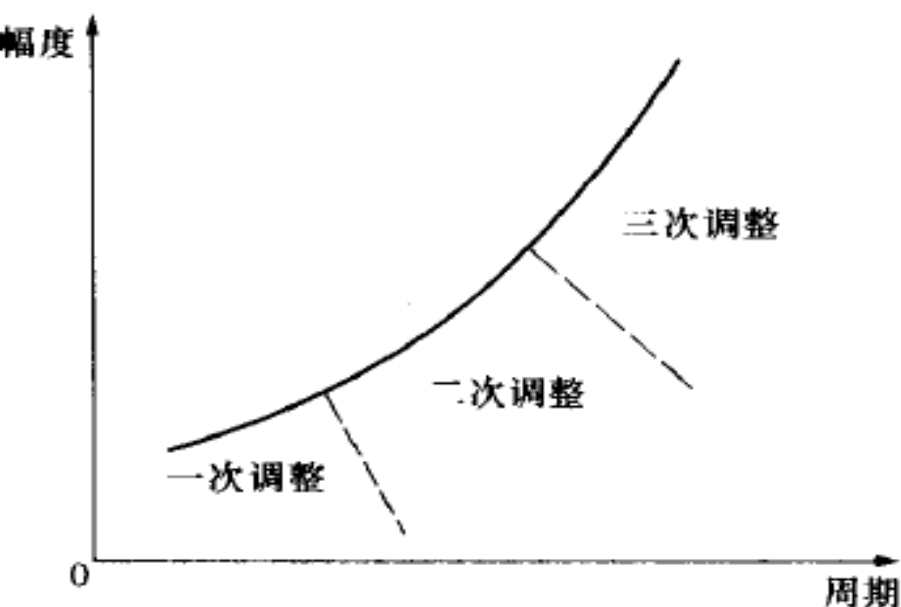


图 5-2 调频任务的分配

**一次调整（一次调频）：**通过发电机调速器对第一种负荷变动引起的频率偏移调整

**二次调整（二次调频）：**通过发电机调频器对第二种负荷变动引起的频率偏移调整

**三次调整（三次调频）：**按最优化准则分配第三种有规律变动的负荷

**负荷控制：**个别负荷大量或长时间超计划用电以致影响系统运行质量时，将其部分或全部切除

## 1.2 有功功率负荷曲线的预计

有功功率和频率的三次调整时，多半依据有功功率负荷曲线。

预计有功功率负荷曲线，需运用累计的运行记录，并对其加工。

**加工原则：**加工前后两种曲线上最大、最小负荷等特征点一致；两种曲线下的面积，即负荷消费的电能一致

**编制有功功率日负荷曲线：**根据各大用电量用户申报的预测负荷，参照长期累积的实测数据，汇总、调整用户的用电，并加以**网络损耗**。此外，还需考虑各**厂用电量**。

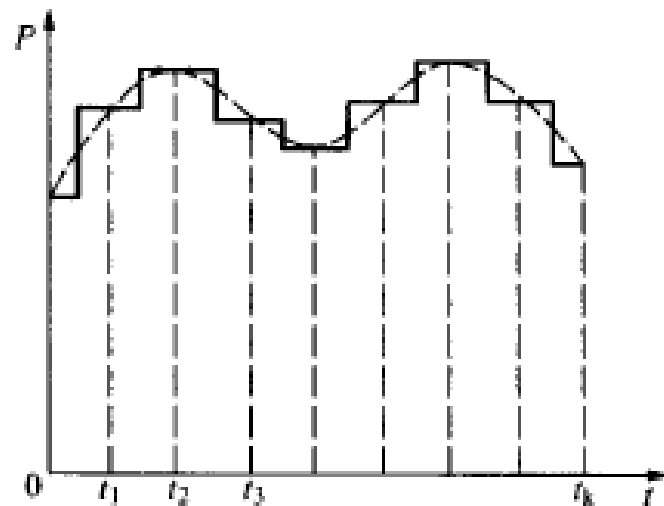


图 5-3 负荷曲线的加工



# 1.2 有功功率负荷曲线的预计

编制曲线时的两个重要指标：**网络损耗、厂用电**

**网络损耗**组成（系统的总损耗一般为总负荷的6%~10%）：

- ✓不变损耗：与负荷无关，主要为变压器的空载损耗；
- ✓可变损耗：与负荷的平方成正比，主要为变压器和线路电阻中的损耗

**厂用电**：水电厂很小，仅为最大负荷的0.1%~1%；  
火电厂为5%~8%；  
原子能电厂为4%~5%

编制负荷曲线时，还需注意气象条件的变化

雨天，农灌负荷下降；阴晦，照明负荷上升；高温，空调负荷增加

**足够的资料和经验，运用上述方法编制，误差不超过2%-3%**

**但是，目前一些科学的统计分析方法以取代上述方法**

如：回归分析、时间序列分析、神经网络、支持向量机等



# 1.3 有功功率电源和备用容量

**备用容量：**系统电源容量大于发电负荷的部分

一种划分形式：

- ◆ **热备用**（运转备用、旋转备用）：运转中的发电设备可能发的最大功率与系统发电负荷之差
- ◆ **冷备用**：未运转的发电设备可能发的最大功率。  
检修中的设备不属于冷备用

从保证可靠供电和良好的电能质量考虑：热备用愈多愈好。

从经济性考虑：热备用不易过多





## 1.3 有功功率电源和备用容量

**备用容量：系统电源容量大于发电负荷的部分**

另一种划分形式：

- **负荷备用**：调整系统中短时的负荷波动并担负计划外的负荷增加而设置的备用。一般为最大负荷的2%-5%
- **事故备用**：电力用户在发电设备发生偶然性事故时不受严重影响，维持系统正常供电所需的备用。一般为最大负荷的5%-10%，但不得小于系统中最大机组的容量
- **检修备用**：系统中发电设备能定期检查而设置的备用。其只有在系统负荷季节性低落期间和节假日安排不下所有设备的大小修时，才需设置专门的检修备用容量。
- **国民经济备用**：负荷超计划增长而设置的备用。



## 1.3 有功功率电源和备用容量

系统发电负荷

负荷备用 (2%~5%) —— 热备用

事故备用 (5%~10%) { 热备用  
冷备用

} 运转中发电设备可能发的最大功率

检修备用 (视需要)

国民经济备用

具备了备用容量, 才可能谈论在系统中各发电设备与发电厂之间的最优分配以及系统的频率调整问题



## 第二节 电力系统中有功功率的最优分配

### 两部分内容:

- **有功功率电源的最优组合**: 系统中发电设备或发电厂的合理组合, 即合理开停。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涉及冷备用容量的合理分布问题  
方法: 启发式方法和优化方法。  
启发式方法: 最优组合顺序法  
优化方法: 动态规划法、混合整数规划法等。诸如遗传算法、粒子群算法等优化的智能算法
- **有功功率负荷的最优分配**: 有功功率在各个正在运行的发电设备或发电厂之间的合理分配  
最常用: 按等微增率准则分配



## 第二节 电力系统中有功功率的最优分配

- 2.1 各类发电厂的运行特点和合理组合
- 2.2 最优分配负荷时的目标函数和约束条件
- 2.3 最优分配负荷时的等耗量微增率准则
- 2.4 等耗量微增率准则的推广运用
- 2.5 网络损耗的修正
- 2.6 电力市场及其电力系统经济运行的影响



## 2.1 各类发电厂的运行特点和合理组合

### 各发电机运行特点

在考虑系统中发电厂的组合时，应注意不同类型发电厂的特点和能源政策。

根据现有的能源政策，电网应**优先调度可再生发电资源**，在保障安全的前提下最大限度地减少能源、资源的消耗和污染物的排放。可再生能源中的风能、太阳能、海洋能、潮汐能等其发电由于受自然气象的约束，这些能源的发电都具有间歇性、随机性和波动性，是一类不可调节的发电资源。可再生能源中生物质能、地热能则是可调节的发电资源。为平缓不可调节资源发电对系统的波动，要充分利用各种资源的互补特性。



## 2.1 各类发电厂的运行特点和合理组合

### 各发电机运行特点

#### 火力发电厂：

- 1) 锅炉和汽轮机均有一技术最小负荷
- 2) 锅炉和汽轮机的退出运行和再度投入不仅消耗能量，且花费时间，又易于损坏设备。
- 3) 承担急剧变动负荷时，锅炉和汽轮机既要额外耗费能量，又花费时间。
- 4) 有高温高压、中温中压、低温低压之分。高温高压设备效率高，但可灵活调节的范围窄；中温中压效率较前者低，但可以灵活调节的范围较前者宽；低温低压设备效率低，技术经济指标最差，实际中不利用他们进行调节。
- 5) 热电厂与一般火电厂的区别在于热电厂的技术最小负荷取决于其热负荷，因而称强迫负荷。而且热电厂抽气供热，效率最高。



## 2.1 各类发电厂的运行特点和合理组合

### 各发电机运行特点

#### 原子能发电厂：

- 1) 反应堆的负荷基本上没有限制，其最小负荷主要取决于汽轮机，约为额外负荷的10%-15%
- 2) 反应堆和汽轮机退出运行和再度投入或承担急剧变动负荷时，锅炉和汽轮机既要额外耗费能量，且花费时间，又易于损坏设备。
- 3) 一次投资大，运行费用小



## 2.1 各类发电厂的运行特点和合理组合

### 各发电机运行特点

#### 水力发电厂：

- 1)为综合利用水能，保证河流下游的灌溉、通航，水电厂必须向下游释放一定水量，在释放这部分水量的同时发出的功率为强迫功率。
- 2)水轮机有技术最小负荷，其值因水电厂的具体条件而异。
- 3)水轮机的退出运行和再度投入不需耗费很多能量，也不需耗费很多时间，操作简单
- 4)水轮机在承担急剧变动负荷时，不需额外耗费能量和花费时间
- 5)水头过分低落时，水轮发电机组可发的功率要降低。换言之，水电厂不一定总能承担其额定容量内的负荷
- 6)按其有无调节水库、调节水库的大小或其功能分为无调节、日调节、季调节、年调节、多年调节和抽水蓄能等几类。





## 2.1 各类发电厂的运行特点和合理组合

### 各发电机运行特点

**无调节水电厂：**任何时刻发出的功率取决于河流的天然流量，由于一昼夜间天然流量基本没有变化，所以此水电厂一昼夜间功率也基本不变；

**有调节水电厂：**运行方式取决于水库调度所给定的水电厂耗水量。洪水季节，给定耗水量大，满负荷运行；枯水季节，给定耗水量小，为尽可能有效利用这部分水量，节约火电厂的燃料消耗，一般承担急剧变动的负荷；

日调节、季调节、年调节、多年调节之分，取决于水库容量。水库容量愈大，调节功能愈强；

**抽水蓄能：**在其上、下方各有一水库，系统负荷出现低谷时，抽水至上水库，储蓄水能；系统负荷出现高峰时，放水至下水库，同时发电。其水源仅需维持泄漏和蒸发所需水量。



## 2.1 各类发电厂的运行特点和合理组合

### 各发电机运行特点

#### 风电发电：

**有功输出波动大：**风力发电和光伏发电受季节、气象因素很大，致使其发电具有较大的间歇性与随机性。风电机组的出力与当前风速关系密切，在日内24小时，相邻几个小时的风电出力可能出现从满发到零或从零到满发的大幅变化。

**调峰问题突出：**当风力和光伏发电渗透率较大时都存在电力系统调峰问题。风电通常呈反调峰特性，即风电出力同负荷变化趋势相反，在夜间负荷水平较低时风电的出力反而较高，这给电力系统调峰带来难度。当系统调峰容量受限时有可能在低负荷时段出现弃风情况。



## 2.1 各类发电厂的运行特点和合理组合

### 各发电机运行特点

#### 光伏发电

**有功输出波动大:**光伏发电受昼夜、阴晴的影响，白天正午时刻附近出力达到最大较大，夜晚几乎为零，并且在很短的时间内有功波动可能很大。

**调峰问题突出:**改变每日最低和高峰负荷出现的时刻并大大增加系统等效负荷的峰谷差。

风电与光伏发电的有功波动的差异在于：

一是风电有功波动存在的时间范围较宽，需要持续跟踪；而光伏发电有功波动仅在很短时间内，太阳光强的迅速变化使其输出功率快速波动，需用快速响应的电源提供调整。

二是风电出力较大时多处于夜间负荷水平较低时，对风电有功波动关注的重点在于风电出力突然增大导致的频率上升，而对光伏有功波动的关注则是光伏出力突然降低导致的频率下降。



## 2.1 各类发电厂的运行特点和合理组合

### 各发电机合理组合

根据各类发电厂的运行特点可见：

**火电厂**以承担基本不变的负荷为宜，可避免频繁开停设备或增减设备。其中高温高压电厂效率最高、可灵活调节范围窄，应优先投入，且在负荷曲线的更基底部分运行更恰当；其次为中温中压电厂；低温低压电厂应及时淘汰，在淘汰之前只能在高峰负荷期间用以发必要功率。

**原子能电厂**可调容量大，但一次投资大、运行费用小，应尽可能利用，负荷基底部分运行

**无调节水电厂和有调节水电厂**的强迫功率不可调，所以应首先投入。

**有调节水电厂的可调功率**：洪水季节，优先投入；枯水季节，应承担高峰负荷。在耗尽日耗水量的前提下，枯水季节其在后面投入，可使火电厂负荷更平稳，减少启停成本，而且水电厂可快速启停、增减负荷。

**抽水蓄能**：负荷低谷时，作为电动机，当做负荷考虑；负荷高峰时，与常规水电厂无异。抽水蓄能机组的效率虽只有70%左右，但因会使火电厂的负荷更平稳，所以合理。此电厂常伴随原子能电厂出现，保证原子能电厂的负荷平稳；但系统严重缺乏调节手段时，也应考虑建设此类电厂。

# 2.1 各类发电厂的运行特点和合理组合

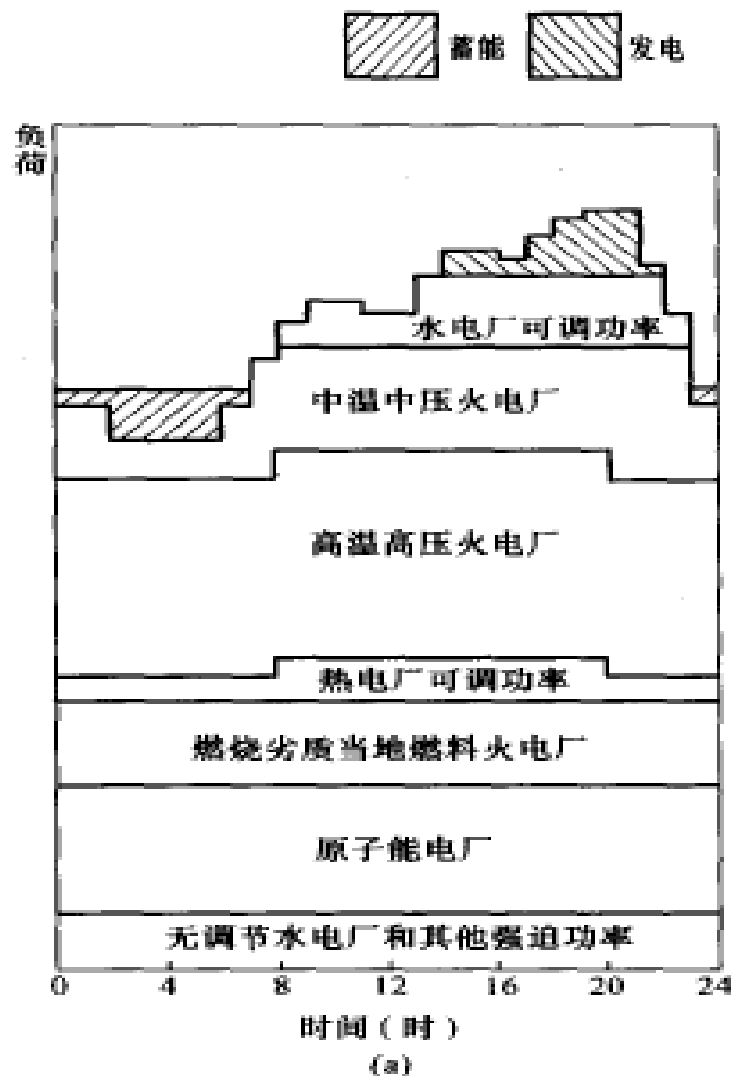


## 各发电机合理组合

各类发电厂承担负荷的顺序：

**枯水季节：**

- 1) 无调节水电厂
- 2) 有调节水电厂的强迫功率
- 3) 热电厂的强迫功率
- 4) 原子能电厂
- 5) 燃烧劣质、当地燃料的火电厂
- 6) 热电厂的可调功率
- 7) 高温高压火电厂
- 8) 中温中压火电厂
- 9) 低温低压火电厂
- 10) 有调节水电厂的可调功率
- 11) 抽水蓄能水电厂



# 2.1 各类发电厂的运行特点和合理组合



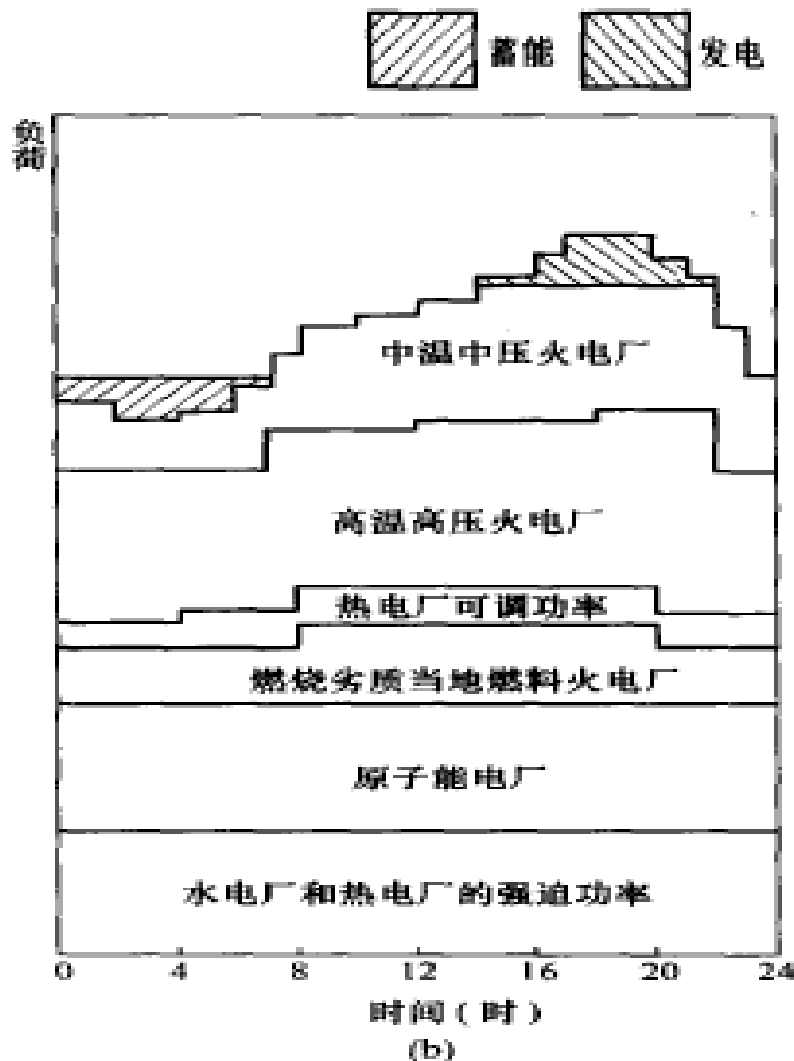
## 各发电机运行特点

### 各类发电厂承担负荷的顺序：

#### 洪水季节：

与枯水季节不同在于有调节水电厂的可调功率往往也归于强迫功率成为不可调功率

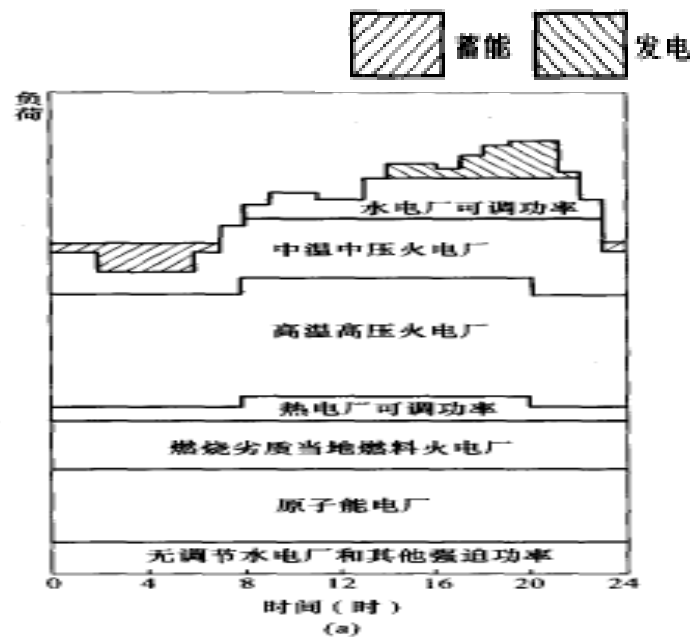
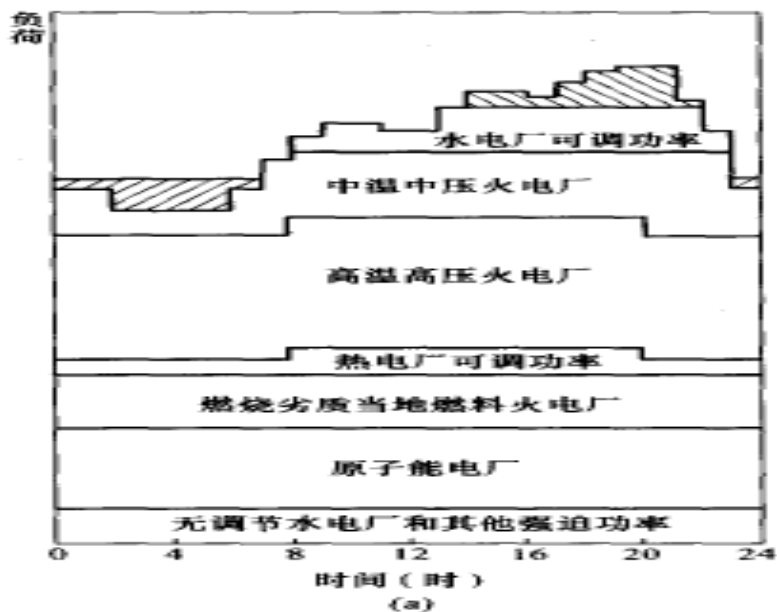
但是，在考虑机组组合时，也不能忽视保证可靠供电、降低网损、维持良好电能质量和稳定性等要求



# 2.1 各类发电厂的运行特点和合理组合



## 各发电机合理组合



负荷曲线的最高部位往往兼负调整系统频率任务的发电厂工作位置，系统负荷备用就设置在这种调频厂中。

枯水季节：大水电厂承担调频任务；

洪水季节：中温中压承担调频任务；

抽水蓄能电厂也可在发电期间参加调频；而低温低压因容量低、设备陈旧，不能调频

## 2.2 最优分配负荷时的目标函数和约束条件

**耗量特性**：发电设备单位时间内消耗的能源与发出有功功率的关系，即发电设备输入与输出的关系。

**比耗量 $\mu$** ：耗量特性曲线上某一点纵坐标和横坐标的比值，即单位时间内输入能量与输出功率之比。

$$\mu = F / P \quad \mu = W / P$$

当耗量特性纵横坐标单位相同时，比耗量倒数为发电设备的效率 $\eta$

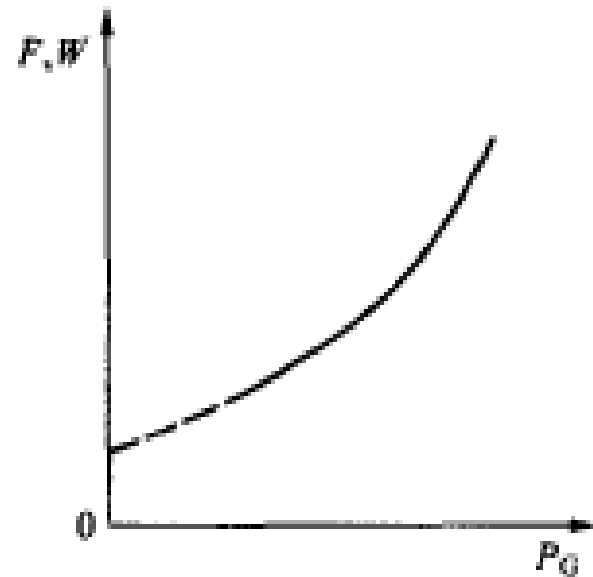


图 5 - 6 耗量特性



## 2.2 最优分配负荷时的目标函数和约束条件

**耗量微增率**：耗量特性曲线上某一点切线的斜率。即单位时间内输入能量微增率与输出功率微增率的比值

$$\lambda = \Delta F / \Delta P = dF / dP$$

$$\lambda = \Delta W / \Delta P = dW / dP$$

比耗量与耗量微增率单位相同，但是两个不同的概念，且数值一般也不相同

特殊点数值才会相同，即从原点作直线与耗量特性曲线相切时的切点，此时比耗量值最小，如右图。

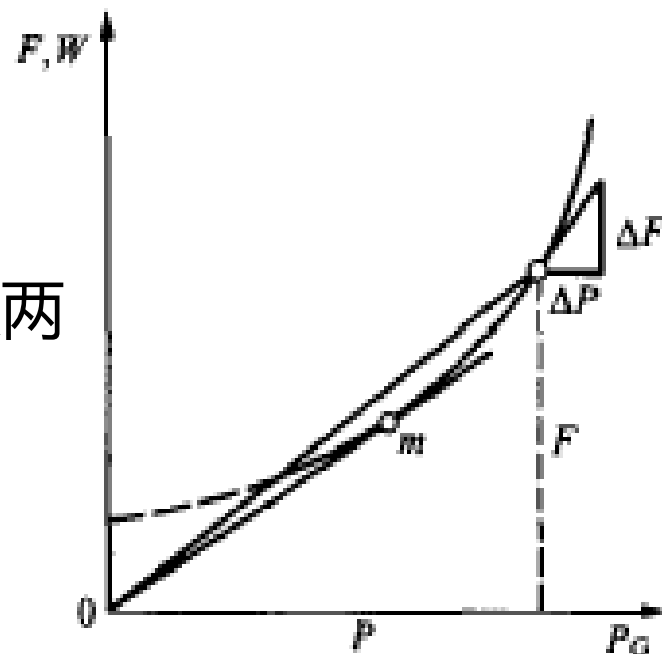


图 5-7 比耗量和耗量微增率

## 2.2 最优分配负荷时的目标函数和约束条件



### 比耗量与耗量微增率的变化如下图

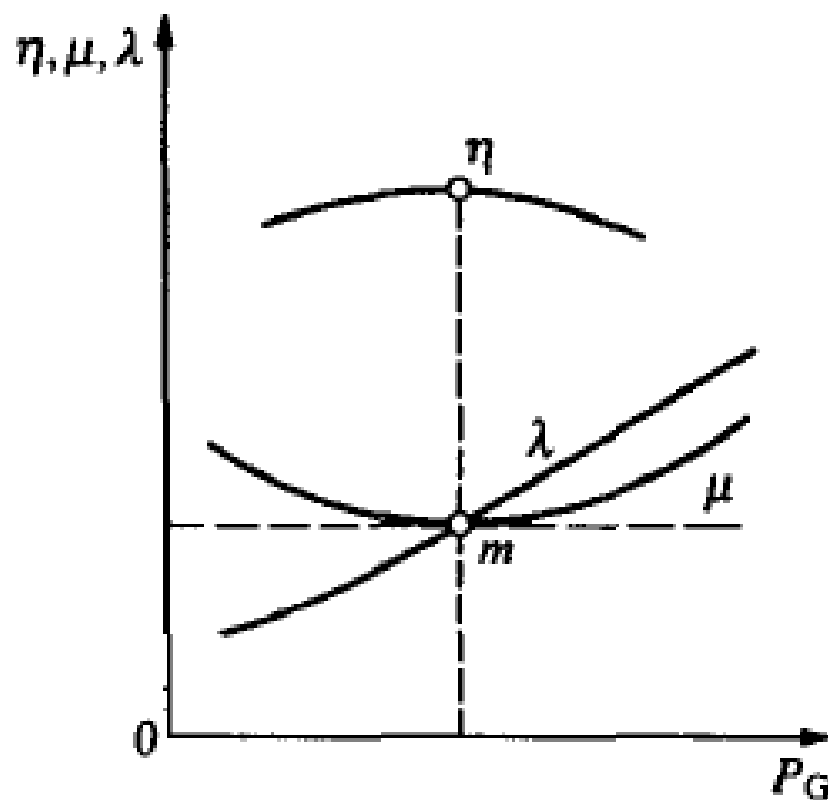


图 5 - 8 比耗量和耗量微增率的变化



## 2.2 最优分配负荷时的目标函数和约束条件

设系统只有火电厂，系统进行有功经济分配时，应保证：全系统每小时的燃料费用最小。

**目标函数：**

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

**等式约束条件：**

整个系统：

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

若不计网损：

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



## 2.2 最优分配负荷时的目标函数和约束条件

### 不等式约束条件:

各节点发电设备有功功率 $P_{Gi}$ 、无功功率 $Q_{Gi}$ 和电压大小不得逾越的限额

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

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

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

式中,  $P_{Gi \max}$ 一般取发电设备的额定有功功率;  $P_{Gi \min}$ 则因发电设备的类型而异。如火力发电设备的不得低于有功功率的25%~70%

$Q_{Gi \max}$ 取决于发电机定子或转子绕组的温升;  $Q_{Gi \min}$ 取决于发电机并列运行的稳定性和定子端部温度等

$U_{i \min}$ 、 $U_{i \max}$ 则由对电能质量的要求决定。



## 2.2 最优分配负荷时的目标函数和约束条件

### 系统中发电设备消耗的能源可能受限制

如：水电厂一昼夜消耗的水量受约束于水库调度。

出现这种情况时，目标函数就不应再是单位时间内消耗的能源，而应是一段时间内消耗的能源，即应是：

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \int_0^{\tau} F_i(P_{Gi}) dt$$

等式约束还应增加：

$$\int_0^{\tau} W_j(P_{Gj}) dt = \text{定值}$$

$F_i$ 为单位时间内火力发电设备的燃料消耗； $W_j$ 为单位时间内水力发电设备的水量消耗； $\tau$ 为时间段长

## 2.2 最优分配负荷时的目标函数和约束条件

**水、火电并列运行系统：**水、火电站并列运行的功率经济分配，就是要在一定周期内（如一天）给定的水电站用水量条件下，使系统中火电站的燃料费用为最小。

目标函数：

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \int_0^{\tau} F_i(P_{Gi}) dt$$

等式约束条件：

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi.k} - \sum_{i=1}^n P_{Li.k} - \Delta P_{\Sigma.k} = 0 \quad k = 1, 2, \dots, \tau$$

$$\int_0^{\tau} W_j(P_{Gj}) dt = W_{k.j} \quad j = m+1, m+2, \dots, n$$

$W_{k.j}$  为第j个水电站在周期内允许消耗的用水总量

$i=1, 2, \dots, m$  为火力发电设备,  $j=(m+1), \dots, n$  为水力发电设备



## 2.2 最优分配负荷时的目标函数和约束条件

### 不等式约束条件:

各节点发电设备有功功率 $P_{Gi}$ 、无功功率 $Q_{Gi}$ 和电压大小不得逾越的限额

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

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

$$U_{i \min} \leq U_{i,k} \leq U_{i \max}$$



## 2.3 最优分配负荷时的等耗量微增率准则

### 不考虑能源消耗限制时有功功率负荷的最优分配问题

为了简化初步分析，将负荷的分配局限在两套发电设备或两个发电厂之间，并略去网络损耗。

使用求条件极值的拉格朗日乘数法

为求满足等约束条件  $f(P_{G1}, P_{G2}) = 0$  时目标函数  $C = C(P_{G1}, P_{G2})$

的最小值，可得拉格朗日函数

$$\begin{aligned} C^* &= C(P_{G1}, P_{G2}) - \lambda f(P_{G1}, P_{G2}) \\ &= F_1(P_{G1}) + F_2(P_{G2}) - \lambda(P_{G1} + P_{G2} - P_{L1} - P_{L2}) \end{aligned}$$

求其极值需满足：

$$\frac{\partial C^*}{\partial P_{G1}} = 0; \quad \frac{\partial C^*}{\partial P_{G2}} = 0; \quad \frac{\partial C^*}{\partial \lambda} = 0;$$



## 2.3 最优分配负荷时的等耗量微增率准则

**求极值满足条件:**

$$\frac{\partial}{\partial P_{G1}} C(P_{G1}, P_{G2}) - \lambda \frac{\partial}{\partial P_{G1}} f(P_{G1}, P_{G2}) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial P_{G2}} C(P_{G1}, P_{G2}) - \lambda \frac{\partial}{\partial P_{G2}} f(P_{G1}, P_{G2}) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} C(P_{G1}, P_{G2}) - f(P_{G1}, P_{G2}) = 0$$

## 2.3 最优分配负荷时的等耗量微增率准则

$$\because \frac{\partial}{\partial P_{G1}} C(P_{G1}, P_{G2}) = \frac{dF_1(P_{G1})}{dP_{G1}}, \frac{\partial}{\partial P_{G2}} C(P_{G1}, P_{G2}) = \frac{dF_2(P_{G1})}{dP_{G2}},$$
$$\frac{\partial}{\partial P_{G1}} f(P_{G1}, P_{G2}) = 1, \frac{\partial}{\partial P_{G2}} f(P_{G1}, P_{G2}) = 1,$$

所以，求极值满足条件可改写为

$$\frac{dF_1(P_{G1})}{dP_{G1}} - \lambda = 0$$


$$\frac{dF_2(P_{G1})}{dP_{G2}} - \lambda = 0$$

$$f(P_{G1}, P_{G2}) = P_{G1} + P_{G2} - P_{L1} - P_{L2} = 0$$

## 2.3 最优分配负荷时的等耗量微增率准则

又由于  $\frac{dF_1(P_{G1})}{dP_{G1}}$ 、 $\frac{dF_2(P_{G1})}{dP_{G2}}$  分别为发电设备1、2各自承担有功功率负荷

$P_{G1}$ 、 $P_{G2}$  时的耗量微增率 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ ，可得


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

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



## 2.3 最优分配负荷时的等耗量微增率准则

上述分析方法和导得的结论可推广运用于更多发电设备或发电厂之间的负荷分配

$$C^* = C(P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{Gn}) - \lambda f(P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{Gn})$$

极值条件为：

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

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

$$\text{即 } \lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = \lambda$$



## 2.3 最优分配负荷时的等耗量微增率准则

当涉及不等式约束条件时，目标函数的最小值也可求解，常用的有库恩-吐克尔乘数法等

此外，介绍一种简化解法：

对于下述不等式：

$$Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max} \quad U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max}$$

其与有功功率负荷分配无直接关系。可先求得有功功率负荷的最优分配，再计算潮流分布来计及它们

## 2.3 最优分配负荷时的等耗量微增率准则

对于此不等式：
$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max}$$

当按等耗量微增率准则确定的某发电设备应发功率低于其下限或高于其上限时，该发电设备的应发功率就取其下限或上限

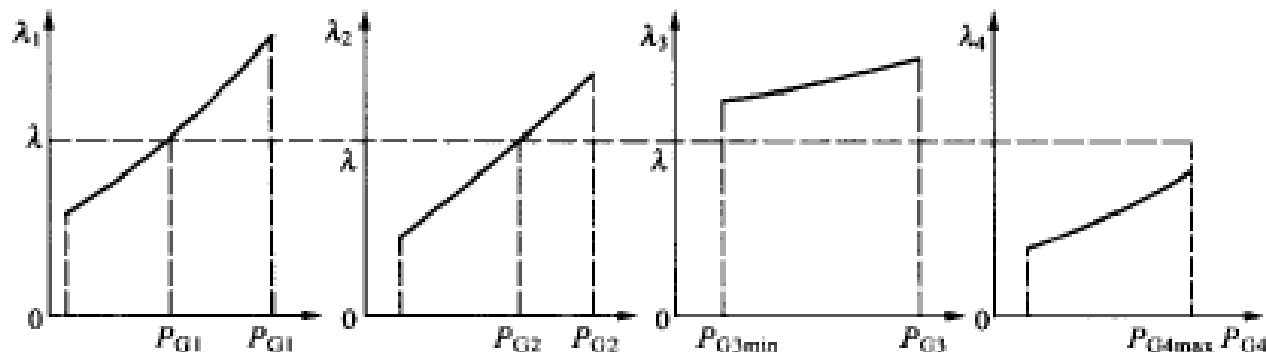


图 5-9 有功功率负荷的最优分配

图中发电设备1、2可按等耗量微增率准则分配负荷，而设备3、4则只能分别按下限或上限分配负荷。



# 等耗量微增率准则计算步骤

**等耗量微增率准则：**为使系统的燃料总耗量最小，应按相等的耗量微增率在发电机组（或发电厂）间分配有功功率负荷。

1. 按等耗量微增率准则计算各发电机设备应发功率 $P_{G(i)}$
2. 校验各发电机设备有功功率不等式约束。当有机组越限时，相应机组功率设定在相应限值。

总负荷减去固定出力的发电设备的有功功率，剩余负荷重新按等耗量微增率准则在其它发电设备中分配，直到满足所有发电机出力约束条件。

3. 求得有功功率负荷的最优分配后，计算潮流分布，校验无功功率和电压约束。如果有无功功率或电压约束越限，则通过相应潮流控制措施，使所有约束满足条件。



## 2.3 最优分配负荷时的等耗量微增率准则

等耗量微增率准则的另一种计算步骤:

1) 设耗量微增率的初值 $\lambda^{(0)}$ 。

2) 求与 $\lambda^{(0)}$ 对应的各发电机设备应发功率 $P_{G(i)}^{(0)}$

3) 校验求得的 $P_{G(i)}^{(0)}$ 是否满足等式约束条件

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

4) 如不能满足,  $\sum P_{Gi} > \sum P_{Li}$  时, 取  $\lambda^{(1)} < \lambda^{(0)}$   
则  $\sum P_{Gi} < \sum P_{Li}$  时, 取  $\lambda^{(1)} > \lambda^{(0)}$

自第二步开始重新计算

5) 继续计算, 直至满足等约束条件而后止



## 2.3 最优分配负荷时的等耗量微增率准则

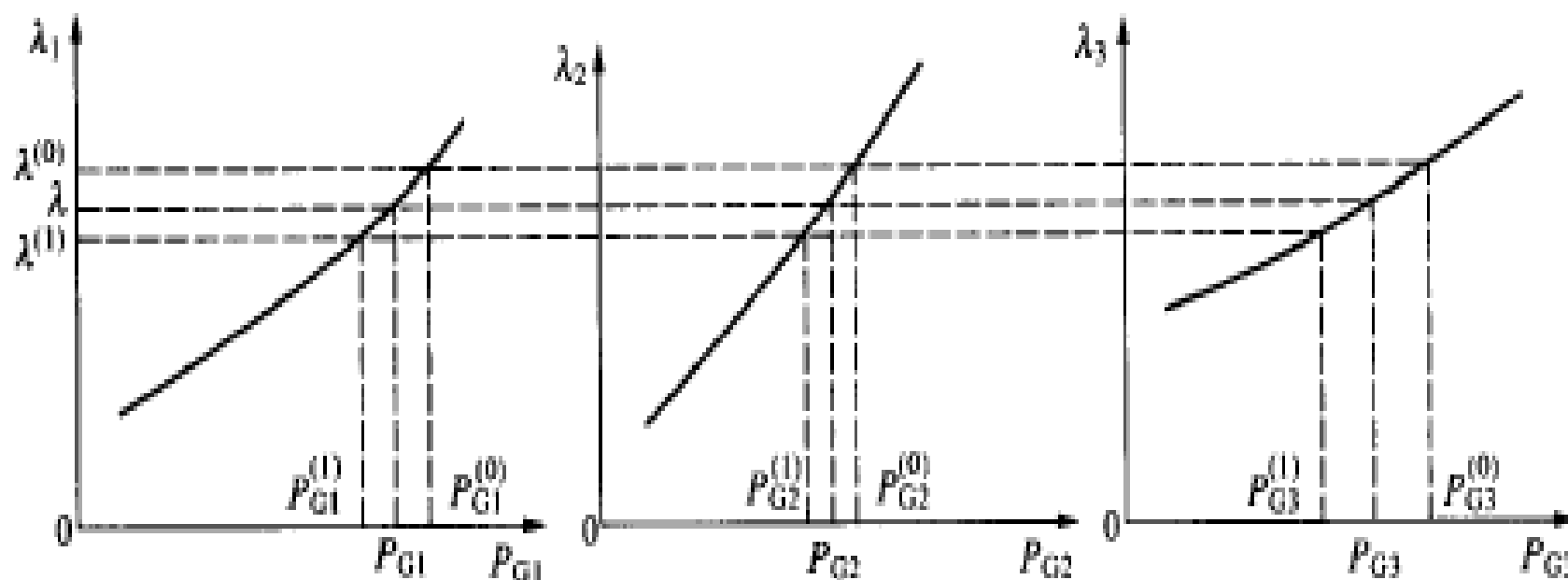


图 5 - 10 负荷最优分配的图解法



# 只含火电厂系统负荷最优分配算例

某电力系统由三个火电厂组成，其耗量特性分别为

$$F_1 = 0.0007P_{G1}^2 + 0.30P_{G1} + 4 \quad \text{T/h}, \quad 80 \leq P_{G1} \leq 150 \text{ MW};$$

$$F_2 = 0.0004P_{G2}^2 + 0.32P_{G2} + 4.5 \quad \text{T/h}, \quad 100 \leq P_{G2} \leq 300 \text{ MW};$$

$$F_3 = 0.00045P_{G3}^2 + 0.3P_{G3} + 3.5 \quad \text{T/h}, \quad 100 \leq P_{G3} \leq 300 \text{ MW};$$

不计网损。1)求当总负荷为700 MW时各个发电厂间有功负荷的最优分配。2)若三个电厂所用燃料价格分别为100、110和90元/吨，按电能成本分配负荷。



# 只含火电厂系统负荷最优分配算例

解：

根据等耗量微增率准则

$$2a_1 P_{G1} + b_1 = 2 \times 0.0007 \times P_{G1} + 0.3 = \lambda$$

$$2a_2 P_{G2} + b_2 = 2 \times 0.0004 \times P_{G2} + 0.32 = \lambda$$

$$2a_3 P_{G3} + b_3 = 2 \times 0.00045 \times P_{G3} + 0.3 = \lambda$$

得

$$P_{G1} = (\lambda - b_1) / 2a_1 = (\lambda - 0.3) / (2 \times 0.0007)$$

$$P_{G2} = (\lambda - b_2) / 2a_2 = (\lambda - 0.32) / (2 \times 0.0004)$$

$$P_{G3} = (\lambda - b_3) / 2a_3 = (\lambda - 0.3) / (2 \times 0.00045)$$

由有功功率平衡等式约束条件

$$P_{G1} + P_{G2} + P_{G3} = P_D$$



# 只含火电厂系统负荷最优分配算例

得

$$\begin{aligned}\lambda &= [2P_D + \Sigma(b_i/a_i)] / \Sigma(1/a_i) \\ &= [1400 + (0.3/0.0007 + 0.32/0.0004 + 0.3/0.00045)] \\ &\quad / (1/0.0007 + 1/0.0004 + 1/0.00045) \\ &= 0.5357\end{aligned}$$

$$P_{G1} = (0.5357 - 0.3) / (2 \times 0.0007) = 168.39 \text{ MW}$$

$$P_{G2} = (0.5357 - 0.32) / (2 \times 0.0004) = 269.68 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = (0.5357 - 0.3) / (2 \times 0.00045) = 261.93 \text{ MW}$$

校验有功功率不等约束  $P_{Gimin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax}$ 。可知  $P_{G1}$  越上限，取  $P_{G1} = 150$  MW，再重新计算  $\lambda$



# 只含火电厂系统负荷最优分配算例

$$P'_D = P_D - P_{GI} = 700 - 150 = 550 \text{ MW}$$

$$\lambda' = [1100 + (0.32/0.0004 + 0.3/0.00045)]$$

$$/(1/0.0004 + 1/0.00045)$$

$$= 0.5435$$

从而

$$P_{G2} = (0.5435 - 0.32)/(2 \times 0.0004) = 279.41 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = (0.5435 - 0.3)/(2 \times 0.00045) = 270.59 \text{ MW}$$



# 只含火电厂系统负荷最优分配算例

2) 燃料价格与耗量特性相乘就得到电能的费用特性, 将 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 分别乘以100、110和90, 得到费用特性为:

$$C_1 = 100 \times F_1 = 0.07 P_{G1}^2 + 30 P_{G1} + 400 \text{ 元/h,}$$

$$80 \leq P_{G1} \leq 150 \text{ MW;}$$

$$C_2 = 110 \times F_2 = 0.044 P_{G2}^2 + 35.2 P_{G2} + 495 \text{ T/h,}$$

$$100 \leq P_{G2} \leq 300 \text{ MW;}$$

$$C_3 = 90 \times F_3 = 0.0405 P_{G3}^2 + 27 P_{G3} + 315 \text{ T/h,}$$

$$100 \leq P_{G3} \leq 300 \text{ MW;}$$

用解析法可求得个电厂承担的负荷为

$$P_{G1} = 150 \text{ MW, } P_{G2} = 250 \text{ MW, } P_{G3} = 300 \text{ MW.}$$

与根据耗煤量计算结果相比, 考虑价格因素后, 电厂2少发了29.41 MW, 电厂3多发了29.41 MW。这是因为电厂3的燃料比电厂2便宜。



## 2.4 等耗量微增率准则的推广运用

### 考虑能源消耗限制时有功功率负荷的最优分配问题

可理解为有功功率负荷在火力发电设备（厂）与水力发电设备（厂）之间的最优分配问题。能源限制主要是水电厂消耗的水量受水库调度的约束。

为了简化初步分析，将负荷的分配局限一个火力发电设备（厂）与一个水力发电设备（厂）之间，并略去网损，且不计水头变化。

目标函数：
$$F_{\Sigma} = \int_0^{\tau} F_1(P_{T1}) dt$$

等式约束：
$$\int_0^{\tau} W_2(P_{H2}) dt = K_2 = \text{定值}$$

不等式约束：
$$P_{T1 \cdot k} + P_{H2 \cdot k} - P_{L1 \cdot k} - P_{L2 \cdot k} = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, t)$$



## 2.4 等耗量微增率准则的推广运用

不等式约束条件:

$$P_{T1\min} \leq P_{T1,k} \leq P_{T1\max}$$

$$Q_{T1\min} \leq Q_{T1,k} \leq Q_{T1\max}$$

$$U_{1\min} \leq U_{1,k} \leq U_{1\max}$$

$$P_{H2\min} \leq P_{H2,k} \leq P_{H2\max}$$

$$Q_{H2\min} \leq Q_{H2,k} \leq Q_{H2\max}$$

$$U_{2\min} \leq U_{2,k} \leq U_{2\max}$$

下标T和H分别表示火电发电和水力发电设备

$K=1,2, \dots, t$ 为周期 $\tau$ 的时段数



## 2.4 等耗量微增率准则的推广运用

### 建立拉格朗日函数：

由于目标函数均是能量的函数，所以等式约束式也应将其改为能量的函数

$$C^* = \sum_{k=1}^t F_{1 \cdot k} (P_{T1 \cdot k}) \Delta t_k - \sum_{k=1}^t \lambda_k (P_{T1 \cdot k} + P_{H2 \cdot k} - P_{L1 \cdot k} - P_{L2 \cdot k}) \Delta t_k \\ + \gamma_2 \left[ \sum_{k=1}^t W_{2 \cdot k} (P_{H2 \cdot k}) \Delta t_k - K_2 \right]$$

求极值需满足：

$$\frac{\partial C^*}{\partial P_{T1 \cdot k}} = 0; \frac{\partial C^*}{\partial P_{H2 \cdot k}} = 0; \frac{\partial C^*}{\partial \lambda_k} = 0; \frac{\partial C^*}{\partial \gamma_2} = 0$$

## 2.4 等耗量微增率准则的推广运用

求极值满足条件可改写为：

$$\frac{dF_{1\cdot k}(P_{T1\cdot k})}{dP_{T1\cdot k}} - \lambda_k = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, t)$$

$$\gamma_2 \frac{dW_{2\cdot k}(P_{H2\cdot k})}{dP_{H2\cdot k}} - \lambda_k = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, t)$$

$$P_{T1\cdot k} + P_{H2\cdot k} - (P_{L1\cdot k} + P_{L2\cdot k}) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, t)$$

$$\sum_{k=1}^t W_{2\cdot k}(P_{H2\cdot k}) \Delta t_k - K_2 = 0$$

## 2.4 等耗量微增率准则的推广运用

$$\frac{dF_{1\cdot k}(P_{T1\cdot k})}{dP_{T1\cdot k}} - \lambda_k = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, t)$$

$$\gamma_2 \frac{dW_{2\cdot k}(P_{H2\cdot k})}{dP_{H2\cdot k}} - \lambda_k = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, t)$$

$$P_{T1\cdot k} + P_{H2\cdot k} - (P_{L1\cdot k} + P_{L2\cdot k}) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, t)$$

$$\sum_{k=1}^t W_{2\cdot k}(P_{H2\cdot k}) \Delta t_k - K_2 = 0$$

第三、四式为原始的等式约束条件；而第一、二式为在第k时间段内最优分配负荷的条件，将此两式合并：



$$\frac{dF_{1\cdot k}(P_{T1\cdot k})}{dP_{T1\cdot k}} = \gamma_2 \frac{dW_{2\cdot k}(P_{H2\cdot k})}{dP_{H2\cdot k}} = \lambda_k \quad (k = 1, 2, \dots, t)$$

上式为某一瞬间的条件，因而可将下标k略去：

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

## 2.4 等耗量微增率准则的推广运用

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

火力发电燃料  
耗量微增率 $\lambda_{T1}$

水力发电水耗  
量微增率 $\lambda_{H2}$



$$\lambda_{T1} = \gamma_2 \lambda_{H2} = \lambda$$

上式可见，只要将水力发电的水耗量微增率乘以某一个待定的拉格朗日乘数 $\gamma_2$ ，就可将指导火电发电设备之间负荷最优分配的等耗量微增率推广运用与火力发电设备与水力发电设备之间负荷的最优分配。为此，需确定拉格朗日乘数 $\gamma_2$

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



## 2.4 等耗量微增率准则的推广运用

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

### $\gamma_2$ : 水煤换算系数

其物理意义为1m<sup>3</sup>的水所相当的煤的吨数，或煤耗微增率与水耗微增率之比。这表示将水电站的耗水等微增率乘一个系数 $\gamma_2$ 后就折算成了系统全为火电厂时的等微增率准则。

$\gamma_2$ 愈小，按等耗量微增率准则水力发电设备应分配的负荷也就愈大。

## 2.4 等耗量微增率准则的推广运用

**换算系数 $\gamma_2$ 可由迭代计算求得：**

- 1) 根据给定的可消耗水量 $K_2$ ，设换算系数的初值 $\gamma_2^{(0)}$
- 2) 求与 $\gamma_2^{(0)}$ 对应的各个不同时刻的有功功率负荷最优分配方案
- 3) 计算与这最优分配方案对应的消耗水量 $K_2^{(0)}$
- 4) 校验求得的 $K_2^{(0)}$ 是否与给定的 $K_2$ 相等
- 5)  $K_2^{(0)} > K_2$ 时，取 $\gamma_2^{(1)} > \gamma_2^{(0)}$ ； $K_2^{(0)} < K_2$ 时，取 $\gamma_2^{(1)} < \gamma_2^{(0)}$ ；自第二步开始重新计算。
- 6) 继续计算，直至求得的 $K_2^{(k)}$ 与给定的 $K_2$ 相等而后止

## 2.4 等耗量微增率准则的推广运用

推广至适用于更多火力发电设备和水力发电设备之间的负荷分配：

$$C^* = \sum_{k=1}^t \sum_{i=1}^m F_{i \cdot k}(P_{Ti \cdot k}) \Delta t_k - \sum_{k=1}^t \lambda_k \left[ \left( \sum_{i=1}^m P_{Ti \cdot k} + \sum_{j=m+1}^n P_{Hj \cdot k} \right) - \left( \sum_{i=1}^m P_{Li \cdot k} - \sum_{j=m+1}^n P_{Lj \cdot k} \right) \right] \Delta t_k$$

$$+ \sum_{j=m+1}^n \gamma_j \left[ \sum_{k=1}^t W_{j \cdot k}(P_{Hj \cdot k}) \Delta t_k - K_j \right]$$

$$\frac{dF_i(P_{Ti})}{dP_{Ti}} = \gamma_j \frac{dW_j(P_{Hj})}{dP_{Hj}} = \lambda$$

上式中,  $i=1,2,\dots, m$ ;  $j=m+1,m+2,\dots, n$

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \dots \lambda_m = \gamma_{m+1} \lambda_{m+1} = \gamma_{m+2} \lambda_{m+2} = \dots = \gamma_n \lambda_n = \lambda$$



# 水、火电并列运行系统负荷最优分配算例

一火电厂和一水电厂并列运行，火电厂的煤耗量特性为  $F=0.00035P_T^2+0.4P_T+3$  T/h,  $200\leq P_T\leq 600$  MW;

水电厂的水耗量特性为  $W=0.0015P_H^2+0.8P_H+2$  m<sup>3</sup>/s,  $100\leq P_H\leq 450$  MW。

水电厂给定的日用水量为  $W_T=1.5\times 10^7$  m<sup>3</sup>。

系统的日负荷为：0~8时，350 MW；8~18时，700 MW；18~24时，500 MW。

试确定火电厂和水电厂间有功负荷的最优分配。

取  $\varepsilon=10^{-5}\times 10^7$  m<sup>3</sup>。





# 水、火电并列运行系统负荷最优分配算例

**解：** 1) 先列出协调方程，即

$$0.0007P_T + 0.4 = \gamma_H (0.003P_H + 0.8)$$

加上有功功率平衡等约束条件  $P_T + P_H = P_D$ ,

可解得

$$P_T = (0.8 \gamma_H - 0.4 + 0.003 \gamma_H P_D) / (0.003 \gamma_H + 0.0007)$$

$$P_H = (0.4 - 0.8 \gamma_H + 0.0007 P_D) / (0.003 \gamma_H + 0.0007)$$



# 水、火电并列运行系统负荷最优分配算例

## • 2) 确定水煤换算系数的初值 $\gamma_H^{(0)}$

### ①求系统平均负荷

$$=(350 \times 8 + 700 \times 10 + 500 \times 6) / 24 = 533.3333 \text{ MW}$$

### ②求水电厂的平均流量

$$W_{av} = W_T / T = 1.5 \times 10^7 / (24 \times 60 \times 60) = 173.6111 \text{ m}^3/\text{s}$$

### ③求水电厂的平均功率, 由 $W_{av} = W(P_{Hav})$ , 即

$$173.6111 = 0.0015 P_{Hav}^2 + 0.8 P_{Hav} + 2$$

求得  $P_{Hav} = 164.0529 \text{ MW}$



# 水、火电并列运行系统负荷最优分配算例

## ④求火电厂的平均功率

$$P_{Tav} = P_{Dav} - P_{Hav} = 369.2814 \text{ MW}$$

## ⑤求火电厂的平均耗量微增率

$$dF/dP_{Tav} = 0.0007 P_{Tav} + 0.4 = 0.6595$$

## ⑥求水电厂的平均耗量微增率

$$dW/dP_{Hav} = 0.003 P_{Hav} + 0.8 = 1.2922$$

$$\text{⑦从而 } \gamma_H^{(0)} = (dF/dP_{Tav}) / (dW/dP_{Hav}) = 0.5096$$



# 水、火电并列运行系统负荷最优分配算例

- 3) 设初值  $\gamma_H^{(0)} = 0.5096$

将  $\gamma_H^{(0)}$  和  $P_D$  代入  $P_T$  和  $P_H$  的表达式即可求出各个时段的负荷分配

0~8时  $P_D = 350 \text{ MW}$ ,  $P_{T1}^{(0)} = 243.5212 \text{ MW}$ ,  
 $P_{H1}^{(0)} = 106.4788 \text{ MW}$ ;

8~18时  $P_D = 700 \text{ MW}$ ,  $P_{T2}^{(0)} = 483.5966 \text{ MW}$ ,  
 $P_{H2}^{(0)} = 216.4034 \text{ MW}$ ;

18~24时  $P_D = 500 \text{ MW}$ ,  $P_{T3}^{(0)} = 346.4106 \text{ MW}$ ,  
 $P_{H3}^{(0)} = 153.5894 \text{ MW}$ ;



# 水、火电并列运行系统负荷最优分配算例

- 计算总耗水量

$$\begin{aligned} W_T^{(0)} &= (0.0015 \times 106.4788^2 + 0.8 \times 106.4788 + 2) \times 8 \times 3600 \\ &+ (0.0015 \times 216.4034^2 + 0.8 \times 216.4034 + 2) \times 10 \times 3600 \\ &+ (0.0015 \times 153.5894^2 + 0.8 \times 153.5894 + 2) \times 6 \times 3600 \\ &= 1.5295454 \times 10^7 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

- $\varepsilon_0 = W_T^{(0)} - W_T > 0$ , 故应增大  $\gamma_H$ 。

- 取  $\gamma_H^{(1)} = 0.52$ , 求得  $P_{H1}^{(1)} = 101.3274 \text{ MW}$ ,  
 $P_{H2}^{(1)} = 209.7345 \text{ MW}$ ,  $P_{H3}^{(1)} = 147.7876 \text{ MW}$ ,

相应总耗水量  $W_T^{(1)} = 1.462809 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。



# 水、火电并列运行系统负荷最优分配算例

- 可见此时,  $\varepsilon_1 = W_T^{(1)} - W_T < 0$ , 故应减小  $\gamma_H$ 。
- 取  $\gamma_H^{(2)} = 0.514$ , 求得  $P_{H1}^{(2)} = 104.2819 \text{ MW}$ ,  $P_{H2}^{(2)} = 213.5593 \text{ MW}$ ,  $P_{H3}^{(2)} = 151.1151 \text{ MW}$ , 相应总耗水量  $W_T^{(2)} = 1.5009708 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。
- 增大  $\gamma_H$ , 当取  $\gamma_H = 0.51415$  时  $W_T = 1.5000051 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 此时  $\varepsilon = 0.51 \times 10^{-5} \times 10^7 \text{ m}^3 < 10^{-5} \times 10^7 \text{ m}^3$ , 满足精度要求。  
负荷分配方案为:

$P_{H1} = 104.2075 \text{ MW}$ ,  $P_{H2} = 213.4630 \text{ MW}$ ,  $P_{H3} = 151.0312 \text{ MW}$ ;

$P_{T1} = 245.7925 \text{ MW}$ ,  $P_{T2} = 486.5370 \text{ MW}$ ,  $P_{T3} = 348.9688 \text{ MW}$ 。

## 2.5 网络损耗的修正

### 网损修正系数

当网络损耗较大，例如系统中有长距离重载线路时，应计及网络损耗对负荷分配的影响。

#### 一、不考虑能源消耗限制时：

原拉格朗日函数

$$C^* = \sum_{i=1}^n \dot{a}_i F_i(P_{Gi}) - \lambda (\sum_{i=1}^n \dot{a}_i P_{Gi} - \sum_{i=1}^n \dot{a}_i P_{Li})$$

计及网损，上式修改为：

$$C^* = \sum_{i=1}^n \dot{a}_i F_i(P_{Gi}) - \lambda (\sum_{i=1}^n \dot{a}_i P_{Gi} - \sum_{i=1}^n P_{Li} - DP_S)$$

## 2.5 网络损耗的修正

极值条件为:  $\frac{\partial C^*}{\partial P_{Gi}} = 0; \frac{\partial C^*}{\partial \lambda} = 0$

计及网损与 $P_{Gi}$ 有关, 可得

$$\frac{dF_i(P_{Gi})}{dP_{Gi}} - \lambda \left(1 - \frac{dDP_S}{dP_{Gi}}\right) = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

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

即 
$$\frac{dF_i(P_{Gi})}{dP_{Gi}} \frac{1}{\left(1 - \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial P_{Gi}}\right)} = \lambda$$

有功网损修正因子: 
$$\frac{1}{\left(1 - \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial P_{Gi}}\right)}$$



## 2.5 网络损耗的修正

### 网损修正系数

#### 二、考虑能源消耗限制时:

原拉格朗日函数

$$C^* = \sum_{k=1}^t \sum_{i=1}^m F_{i \cdot k} (P_{Ti \cdot k}) \Delta t_k - \sum_{k=1}^t \lambda_k [(\sum_{i=1}^m P_{Ti \cdot k} + \sum_{j=m+1}^n P_{Hj \cdot k}) - (\sum_{i=1}^m P_{Li \cdot k} - \sum_{j=m+1}^n P_{Lj \cdot k})] \Delta t_k \\ + \sum_{j=m+1}^n \gamma_j [\sum_{k=1}^t W_{j \cdot k} (P_{Hj \cdot k}) \Delta t_k - K_j]$$

计及网损，上式修改为:

$$C^* = \sum_{k=1}^t \sum_{i=1}^m F_{i \cdot k} (P_{Ti \cdot k}) \Delta t_k - \sum_{k=1}^t \lambda_k [(\sum_{i=1}^m P_{Ti \cdot k} + \sum_{j=m+1}^n P_{Hj \cdot k}) - (\sum_{i=1}^m P_{Li \cdot k} - \sum_{j=m+1}^n P_{Lj \cdot k} + \Delta P_{\Sigma k})] \Delta t_k \\ + \sum_{j=m+1}^n \gamma_j [\sum_{k=1}^t W_{j \cdot k} (P_{Hj \cdot k}) \Delta t_k - K_j]$$

## 2.5 网络损耗的修正

然后, 取  $\frac{\partial C^*}{\partial P_{Ti \cdot k}} = 0; \frac{\partial C^*}{\partial P_{Hj \cdot k}} = 0; \frac{\partial C^*}{\partial \lambda_k} = 0; \frac{\partial C^*}{\partial \gamma_j} = 0$

并计及网损与  $P_{Ti \cdot k}$ 、 $P_{Hj \cdot k}$  都有关, 可得

$$\frac{dF_{i \cdot k}(P_{Ti \cdot k})}{dP_{Ti \cdot k}} - \lambda_k \left(1 - \frac{\partial \Delta P_{\Sigma k}}{\partial P_{Ti \cdot k}}\right) = 0$$

$$\gamma_j \frac{dW_{j \cdot k}(P_{Hj \cdot k})}{dP_{Hj \cdot k}} - \lambda_k \left(1 - \frac{\partial \Delta P_{\Sigma k}}{\partial P_{Hj \cdot k}}\right) = 0$$

$$\sum_{i=1}^m P_{Ti \cdot k} + \sum_{j=m+1}^n P_{Hj \cdot k} - \left( \sum_{i=1}^m P_{Li \cdot k} + \sum_{j=m+1}^n P_{Hj \cdot k} P_{Lj \cdot k} + \Delta P_{\Sigma k} \right) = 0$$

$$\sum_{k=1}^t W_{j \cdot k} (P_{Hj \cdot k}) \Delta t_k - K_j = 0$$

## 2.5 网络损耗的修正

$$\frac{dF_{i \cdot k}(P_{Ti \cdot k})}{dP_{Ti \cdot k}} - \lambda_k \left(1 - \frac{\partial \Delta P_{\Sigma k}}{\partial P_{Ti \cdot k}}\right) = 0$$

$$\gamma_j \frac{dW_{j \cdot k}(P_{Hj \cdot k})}{dP_{Hj \cdot k}} - \lambda_k \left(1 - \frac{\partial \Delta P_{\Sigma k}}{\partial P_{Hj \cdot k}}\right) = 0$$

$$\sum_{i=1}^m P_{Ti \cdot k} + \sum_{j=m+1}^n P_{Hj \cdot k} - \left( \sum_{i=1}^m P_{Li \cdot k} + \sum_{j=m+1}^n P_{Hj \cdot k} P_{Lj \cdot k} + \Delta P_{\Sigma k} \right) = 0$$

$$\sum_{k=1}^t W_{j \cdot k}(P_{Hj \cdot k}) \Delta t_k - K_j = 0$$

第三、四式为原始的等式约束条件；而第一、二式为在第k时间段内最优分配负荷的条件，将此两式合并：



略去下标

$$\underbrace{\frac{dF_i(P_{Ti})}{dP_{Ti}}}_{\text{燃料耗}} \underbrace{\frac{1}{\left(1 - \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial P_{Ti}}\right)}}_{\text{费微增}} = \gamma_2 \underbrace{\frac{dW_j(P_{Hj})}{dP_{Hj}}}_{\text{率}\lambda_i} \underbrace{\frac{1}{\left(1 - \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial P_{Hj}}\right)}}_{\text{网损微}} = \lambda_k$$

水耗量微
增率 $\lambda_j$

网损微
增率 $L_j$

## 2.5 网络损耗的修正

### 网损微增率的计算——转置雅克比矩阵

计算网损微增率的方法有很多，最早出现并广泛使用的是所谓损耗系数或 $B_{mm}$ 系数法。但这种方法引入的假设条件较多，不够精确。以下介绍雅克比矩阵法

由潮流计算已知，各节点注入功率的代数和为网络的总损耗

$$\Delta \tilde{S}_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma} + j \Delta Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (P_i + jQ_i)$$

由此，可列出：

$$\Delta \Delta P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial P_i} \Delta P_i$$

## 2.5 网络损耗的修正

设除节点*i*和平衡节点*s*外，其他节点注入的有功功率都保持不变，则可得

$$\Delta\Delta P_{\Sigma^*} = \frac{\partial\Delta P_{\Sigma}}{\partial P_i} \Delta P_i + \frac{\partial\Delta P_{\Sigma}}{\partial P_s} \Delta P_s$$

此外，*i*节点注入有功功率的增加将使平衡节点注入有功功率减少，并使网络损耗发生变化，即有

$$\Delta P_i = -\Delta P_s + \Delta\Delta P_{\Sigma^*}$$

上两式中消去  $\Delta\Delta P_{\Sigma^*}$ ，可得

$$\frac{\partial P_s}{\partial P_i} = \frac{\Delta P_s}{\Delta P_i} = -\frac{1 - \frac{\partial\Delta P_{\Sigma}}{\partial P_i}}{1 - \frac{\partial\Delta P_{\Sigma}}{\partial P_s}} \quad \Rightarrow \quad (1 - \frac{\partial\Delta P_{\Sigma^*}}{\partial P_i}) = \frac{1 - \frac{\partial\Delta P_{\Sigma}}{\partial P_i}}{1 - \frac{\partial\Delta P_{\Sigma}}{\partial P_s}}$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial P_i} = \frac{\Delta P_s}{\Delta P_i} = -(1 - \frac{\partial\Delta P_{\Sigma^*}}{\partial P_i})$$

## 2.5 网络损耗的修正

为简化分析，设系统中电源全为火力发电设备，由下式

$$\frac{dF_i}{dP_i} \frac{1}{(1 - \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial P_i})} = \frac{dF_s}{dP_s} \frac{1}{(1 - \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial P_s})}$$

从而有

$$\frac{dF_i}{dP_i} \frac{1 - \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial P_s}}{1 - \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial P_i}} = \frac{dF_i}{dP_i} \frac{1}{(1 - \frac{\partial \Delta P_{\Sigma^*}}{\partial P_i})} = \frac{dF_s}{dP_s}$$

$$\frac{dF_i}{dP_i} \frac{1}{(1 - \frac{\partial \Delta P_{\Sigma^*}}{\partial P_i})} = \frac{dF_i}{dP_i} \frac{1}{-\frac{\partial P_s}{\partial P_i}} = L_{i^*} \frac{dF_i}{dP_i} = \frac{dF_s}{dP_s}$$

## 2.5 网络损耗的修正

◆ 可见, 只需求得  $\frac{\partial P_s}{\partial P_i}$ , 就可得相应的网损微增率

$$\frac{\partial \Delta P_{\Sigma^*}}{\partial P_i} = 1 + \frac{\partial P_s}{\partial P_i} \quad \text{和网损修正系数} \quad L_{i^*} = - \frac{1}{\frac{\partial P_s}{\partial P_i}}$$

◆ 并建立另一种形式的协调方程式

$$\frac{dF_i}{dP_i} \frac{1}{(-\frac{\partial P_s}{\partial P_i})} = \frac{dF_s}{dP_s}$$

## 2.5 网络损耗的修正

所以，求取网损微增率的问题已转化为求取偏导数

$$\frac{\partial P_s}{\partial P_i}$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial P_i} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_s}{\partial d_j} \frac{\partial d_j}{\partial P_i} + \sum_{j=1}^n \frac{U_j \partial P_s}{\partial U_j} \frac{\partial U_j}{U_j \partial P_i}$$

或

$$\frac{\partial P_s}{\partial P_i} = \left[ \left( \frac{\partial P_s}{\partial d} \right)^t \left( \frac{U \partial P_s}{\partial U} \right)^t \right] \begin{bmatrix} \frac{\partial d}{\partial P_i} \\ \frac{\partial U}{U \partial P_i} \end{bmatrix}$$



## 2.5 网络损耗的修正

$$\frac{\partial P_s}{\partial P_i} = \left[ \left( \frac{\partial P_s}{\partial d} \right)^t \left( \frac{U \partial P_s}{\partial U} \right)^t \begin{bmatrix} \frac{\partial d}{\partial P_i} \\ \frac{\partial U}{U \partial P_i} \end{bmatrix} \right]$$

式中，列向量  $\frac{\partial P_s}{\partial d}$   $\frac{U \partial P_s}{U \partial P_i}$  的阶数  
分别为 (n-1) 和 (m-1)  
可由下式求取：

$$\frac{\partial P_1}{\partial P_i} = \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{\partial P_1}{\partial d_j} \frac{\partial d_j}{\partial P_i} + \sum_{j=1}^m \frac{U_j \partial P_1}{\partial U_j} \frac{\partial U_j}{U_j \partial P_i} = 0$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial P_i} = \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{\partial P_i}{\partial d_j} \frac{\partial d_j}{\partial P_i} + \sum_{j=1}^m \frac{U_j \partial P_i}{\partial U_j} \frac{\partial U_j}{U_j \partial P_i} = 1$$

$$\frac{\partial P_n}{\partial P_i} = \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{\partial P_n}{\partial d_j} \frac{\partial d_j}{\partial P_i} + \sum_{j=1}^m \frac{U_j \partial P_n}{\partial U_j} \frac{\partial U_j}{U_j \partial P_i} = 0$$

## 2.5 网络损耗的修正

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_1}{\partial P_i} &= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{\partial Q_1}{\partial d_j} \frac{\partial d_j}{\partial P_i} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \frac{U_j \partial Q_1}{\partial U_j} \frac{\partial U_j}{U_j \partial P_i} = 0 \\ \frac{\partial Q_i}{\partial P_i} &= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{\partial Q_i}{\partial d_j} \frac{\partial d_j}{\partial P_i} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \frac{U_j \partial Q_i}{\partial U_j} \frac{\partial U_j}{U_j \partial P_i} = 0 \\ \frac{\partial Q_m}{\partial P_i} &= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{\partial Q_m}{\partial d_j} \frac{\partial d_j}{\partial P_i} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \frac{U_j \partial Q_m}{\partial U_j} \frac{\partial U_j}{U_j \partial P_i} = 0\end{aligned}$$

归纳, 可列出:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial P_i} \\ \frac{\partial Q}{\partial P_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial d} & \frac{U \partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial d} & \frac{U \partial Q}{\partial U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial d}{\partial P_i} \\ \frac{\partial U}{U \partial P_i} \end{bmatrix}$$

式中的系数矩阵为以极坐标表示时牛拉潮流计算修正方程式, 即雅克比矩阵

## 2.5 网络损耗的修正

$$\text{所以 } \frac{\partial P_s}{\partial P_i} = \left[ \left( \frac{\partial P_s}{\partial d} \right)^t \left( \frac{U \partial P_s}{\partial U} \right)^t \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial P_i} \\ \frac{\partial Q}{\partial P_i} \end{bmatrix} \right]$$

$$\text{可得 } \frac{\partial P_s}{\partial P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_s}{\partial d} \\ \frac{U \partial P_s}{\partial U} \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

式中单位矩阵和零矩阵的阶数分别为 $(n-1) \times (n-1)$ 、 $(m-1) \times (m-1)$

至此，就从等式左侧 $(n-1)$ 阶列向量  $\frac{\partial P_s}{\partial P_i}$  中提取有发电设备节点的  $\frac{\partial P_s}{\partial P_i}$  以求取相应的网损微增率和网损修正系数

## 2.5 网络损耗的修正

在推导P-Q分解法修正方程式时，略去雅克比矩阵的两个子阵N、J，所以：

$$\begin{matrix} P_s \\ \hline P \end{matrix} = (H^t)^{-1} \begin{matrix} P_s \\ \hline d \end{matrix}$$

上式适用于与P-Q分解法潮流计算配合使用

## 2.5 网络损耗的修正

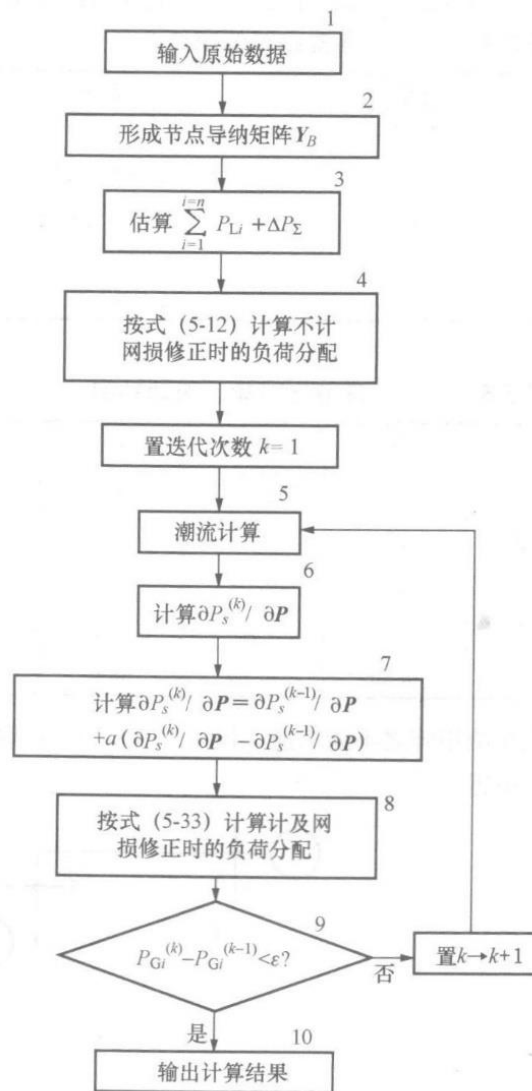
### 图为计及网损修正时有功功率负荷最优分配与潮流分布配合计算的原理框图

框1输入原始数据中除潮流计算所需者外，还应包括各发电设备的耗量特性和有功、无功功率限额

框2主要在形成节点导纳矩阵 $Y_B$ ，而如以P-Q分解法计算潮流，则需形成 $B'$ 、 $B''$ 阵

框3只是估算所有发电设备应发的总功率

框4运用2.3中所述步骤求最优分配负荷的迭代过程



## 2.5 网络损耗的修正

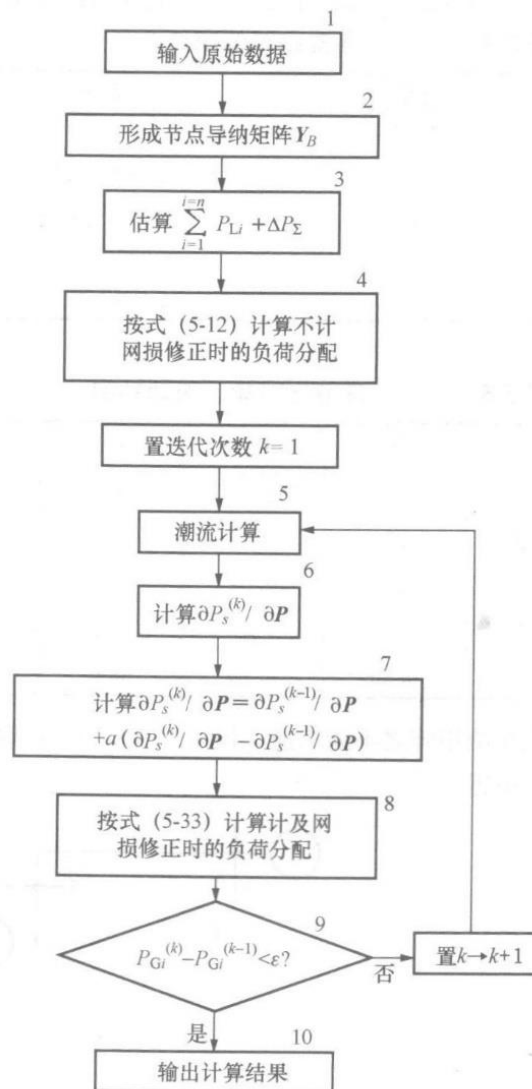
框5是以牛顿-拉夫逊或P-Q分解法计算潮流的迭代过程

框6计算  $\frac{\partial P_s}{\partial P}$

框7为加速收敛而设置的，其中加速因子约为0.6~0.7

框8按协调方程式求计及网损修正时最优分配负荷的迭代过程

框9用以判别是否结束负荷分配—潮流计算—负荷分配的循环，即迭代是否收敛





## 2.6 电力市场及其电力系统经济运行影响

市场化运行是当今电力工业发展的必然趋势。电力工业的改革目标在于打破垄断，引入竞争机制，提高电力生产效率，使电价形成机制和理化，提高高质量、更安全的电力产品，促进电力工业本身的良性发展。

1998年，我国确定“厂网分开、竞价上网”改革；2002年正式电力市场改革

### 世界各国的市场交易模式分为：

- **电力联营体 (pool) 模式** (英国、智利、阿根廷以及美国PJM、澳大利亚的Victoria电力市场)  
总量市场化模型。将电网看作电能交易的中心，发电商必须向pool买电，而用户必须从pool卖电。  
电力交易中心操作员每隔半小时或一小时从发电商接受各发电机的发电报价与可用容量。按照报价从低到高的顺序对发电机组进行排序直至此时间段内系统负荷均被满足为止。ISO控制全系统发电机组的调度运行，维护系统运行的可靠性和安全性  
优点：采用中心控制的手段使得市场成员都能享有同等机会参与市场竞争



## 2.6 电力市场及其电力系统经济运行的影响

### ● 双边交易 (Bilateral/Multilateral) 模式

直接签订合同进行彼此电量及价格的交易

ISO收到合同所规定的电量信息后，确保全网存在足够的输电容量使该合同得意实施。

若电能交易不满足网路安全约束，则ISO将信息反馈给合同双方，要求修改合同。

若满足网路安全约束，ISO负责进行调度运行

优点：按照交易双方的意愿，满足交易双方对于价格以及电量稳定性的要求





## 2.6 电力市场及其电力系统经济运行影响

### ● 存在双边合同的联营体模式 (Pool/Bilateral)

用户与发电商可自由选择是通过电力交易中心进行电能交易，或直接签订双边合同进行交易

步骤：

1) 系统在不考虑双边合同影响，特别是双边合同对于阻塞和网损的影响下，得到全网的运行调度计划

2) 考虑双边合同的影响，有ISO判断全网安全可靠是否满足，若不满足，ISO则要求电力交易中心或合同双方对交易进行修改



## 2.6 电力市场及其电力系统经济运行影响

### 电力市场的电能交易

- 中期合约市场：中长期实物交货合同，可竞价产生，也可签订合同
- 期货与期权交易市场：权力的买卖
- 日前市场：落实中长期合同电量，组织日前竞价，制定开停机计划
- 实时平衡市场：组织实时不平衡市场
- 辅助服务市场：将调频市场和各种备用市场从提前市场中分离出来，建立单独的辅助服务市场



## 2.6 电力市场及其电力系统经济运行的影响

### 日前市场的交易模型

Pool模式:

- ◆ 在全面开放的条件下，电能交易的目标函数为社会效益最高；
- ◆ 而在仅开放发电市场条件下，目标函数为购电费用最低。  
按购电费用结算方式不同，目标函数可分为两种：
  - 1) 按电网统一边际成本结算的购电费用 $F_M$ 最低
  - 2) 按各发电机组实际报价结算的购电费用 $F_B$ 最低



## 2.6 电力市场及其电力系统经济运行的影响

### 日前市场的交易模型

为促进发电公司间的竞争，一般按电网统一边际成本结算的，即按竞价过程中竞价成功机组的最高报价结算

$$C_{OM} = \max[C_{01}(P_1), C_{02}(P_2), \dots, C_{0i}(P_i), ]$$

竞价单位为发电厂或发电公司时，则购电费用为：

$$F_M = \min \sum_{i=1}^N C_{OM} P_i$$

约束：功率平衡约束、旋转备用约束、发电机组输出功率的上下限约束、发电机组输出功率速度约束、发电机组旋转备用速度约束、发电机组周期内发电量约束等机组特性以及支路潮流功率约束和节点电压约束等电网安全约束。



## 2.6 电力市场及其电力系统经济运行的影响

### 日前市场的交易模型

竞价单位为机组时，则购电费用为：

$$F_M = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (C_{OM,t} u_{i,t} P_{it} + u_{i,t} (1 - u_{i,t-1}) F_{si}(\tau_{i,t-1}))$$

此时，还需考虑机组的最小开机时间和最小停机时间

电力市场电能竞价模型为一个多约束的非线性规划问题。由于按边际成本结算，目标函数是非解析函数，同时电厂报价曲线复杂，并随时间和供需关系变化

求解方法：排队法、等报价法、动态规划法、线性规划法、网络流规划法



# 第三节 电力系统的频率调整

- 3.1 调整频率的必要性
- 3.2 自动调速系统及其调节特性
- 3.3 频率的一次调整
- 3.4 频率的二次调整
- 3.5 频率调整厂的选择
- 3.6 关于自动负荷 ——频率控制



# 3.1 调整频率的必要性

系统频率变动对用户、发电厂和系统本身都会产生不利影响，所以必须保持在**额定值50Hz**上下，且不超过一定范围。

## 电力系统频率变动时，对用户的影响有：

- 用户使用的电动机与系统频率相关。频率变动将引起电动机转速的变化，从而影响产品质量（纺织工业、造纸工业应频率变化而出现残次品）
- 近代工业、国防和科学技术都已广泛使用电子设备，系统频率的不稳定将会影响电子设备的工作。（雷达、电子计算机等因频率过低而无法运行）

# 3.1 调整频率的必要性

## 电力系统频率变动对发电厂和系统本身的影响有：

- 火力发电厂的主要厂用机械—风机和泵，在频率降低时，所能供应的风量和水量将迅速减少，影响锅炉的正常运行。
- 低频率运行还将增加汽轮机叶片所受的应力，引起叶片的共振，缩短叶片的寿命，甚至使叶片断裂。
- 低频运行时，发电机通风量将减少，而为了维持正常电压，又要增加励磁电流，以致使发电机定子和转子的温升都将增加。为了不超温升限额，不得不降低发电机所发功率。
- 低频运行时，由于磁通密度的增大，变压器的铁芯损耗和励磁电流都将增大。为了不超越温升限额，不得不降低变压器的负荷。
- 频率降低时，系统中无功功率将增大，从而使系统电压水平降低





# 3.1 调整频率的必要性

由于所有设备都是按系统额定频率设计的，系统频率质量的下降将影响各行各业。而频率过低时，甚至会使整个系统瓦解，造成大面积停电。

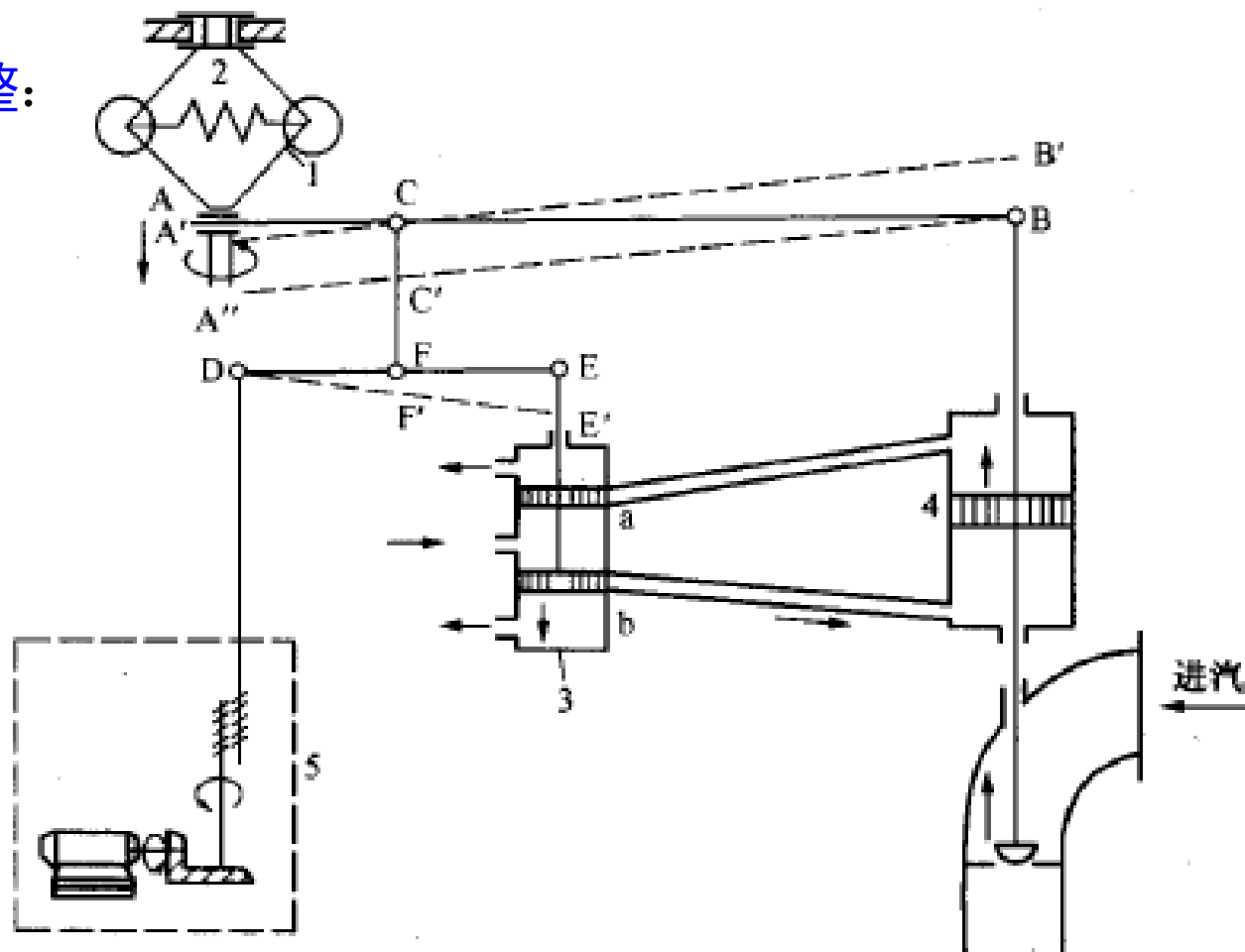
调整系统频率的主要手段是**发电机组原动机的自动调节转速系统**，或简称**自动调速系统**，特别是其中的**调速器**和**调频器**（同步器）。

## 3.2 自动调速系统及其调节特性

### 自动调速系统

一次调整：  
调速器

二次调整：  
调频器

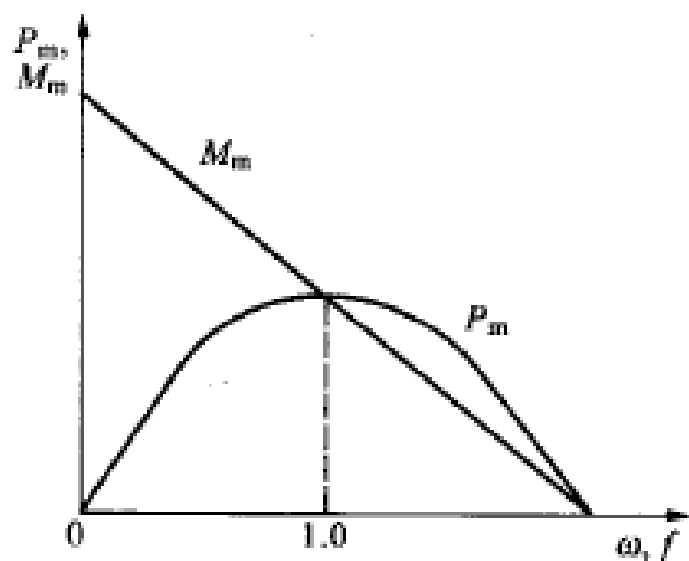


- 1—飞摆
- 2—弹簧
- 3—错油门
- 4—油动机
- 5—调频器

## 3.2 自动调速系统及其调节特性

电源有功功率静态频率特性

未配置自动调速器



机械功率与角速度或频率之间的关系：

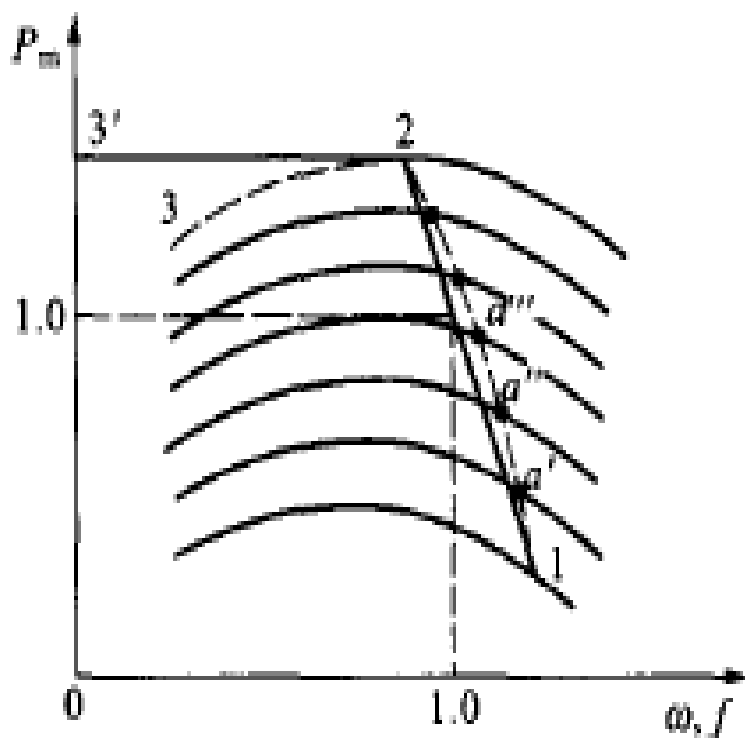
$$P_m = C_1 \omega - C_2 \omega^2 = C_1 f - C_2 f^2$$

图 5 - 23 未配置自动调速系统  
时原动机的静态频率特性

## 3.2 自动调速系统及其调节特性

### 电源有功功率静态频率特性

### 配置自动调速器



曲线组对应不同进汽或进水量的  
静态频率特性

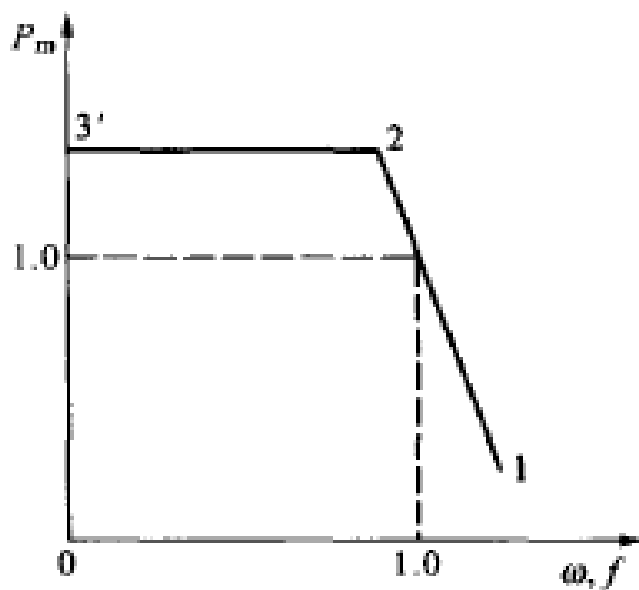
连接不同曲线的虚线1-2-3：  
有调速器调节，或有频率的一次调整  
时的静态频率特性

虚线2-3下降：  
因为运行点转移到点2时，进汽或进水量  
已达最大值，调速器不再发挥作用，  
以致转速或频率下降时，运行点只能沿  
对应最大进汽或进水量频率特性转移

## 3.2 自动调速系统及其调节特性

电源有功功率静态频率特性

配置自动调速器



(b)

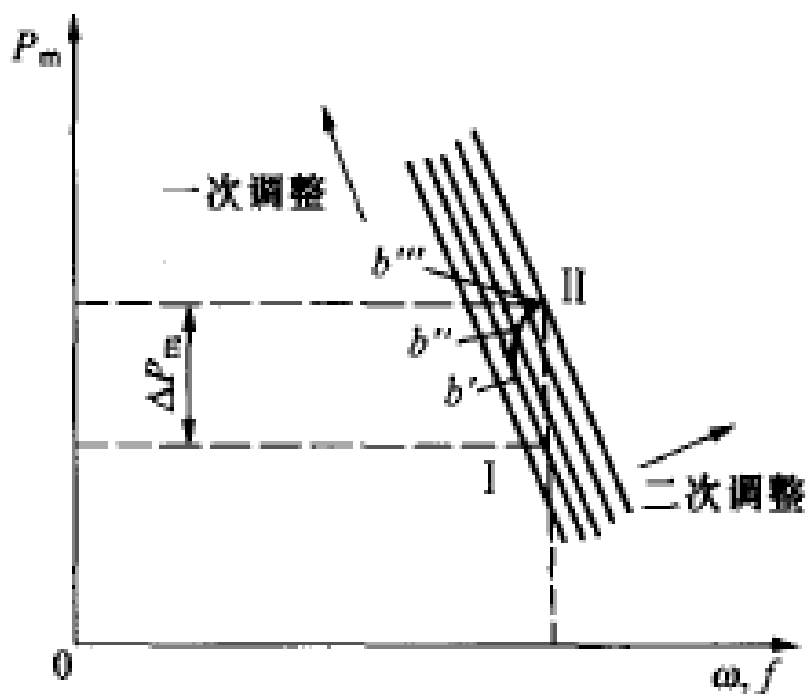
为简化分析，常以直线1-2替代曲线1-2；以直线2-3'替代曲线2-3

进汽或进水量达到最大值后，原动机的机械功率可保持不变

## 3.2 自动调速系统及其调节特性

电源有功功率静态频率特性

调速系统中调频器的二次调整



图中二次调整后，原动机的运行点就不断从一根仅有一次调整的静态频率特性曲线过渡到另一根曲线，如图中 $b' - b'' - b''' - \dots$ 所示。

所以有调频器的二次调整后，原动机的静态频率特性：  
曲线 I - II 或近似直线 I - II

平行直线：  
一组只有一次调整时的静态特性

## 3.3 频率的一次调整

设系统中仅有一台发电机组和一个综合负荷。  
其静态频率特性为：

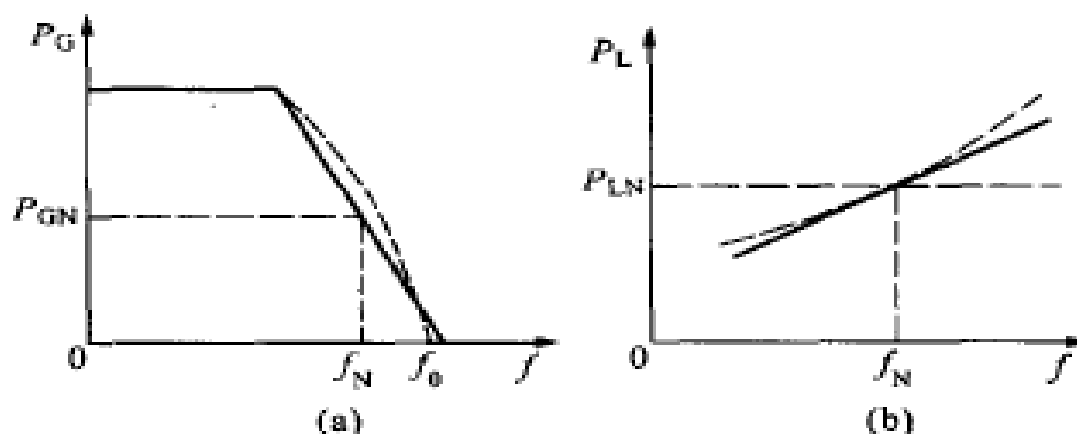


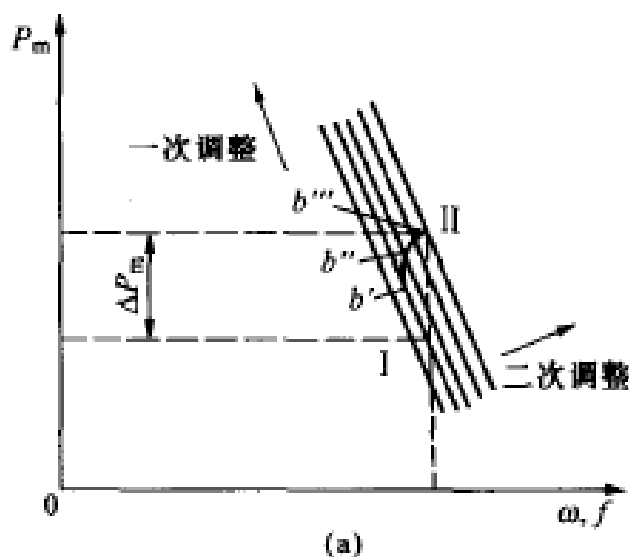
图 5 - 26 静态频率特性

(a) 发电机组原动机；(b) 综合负荷

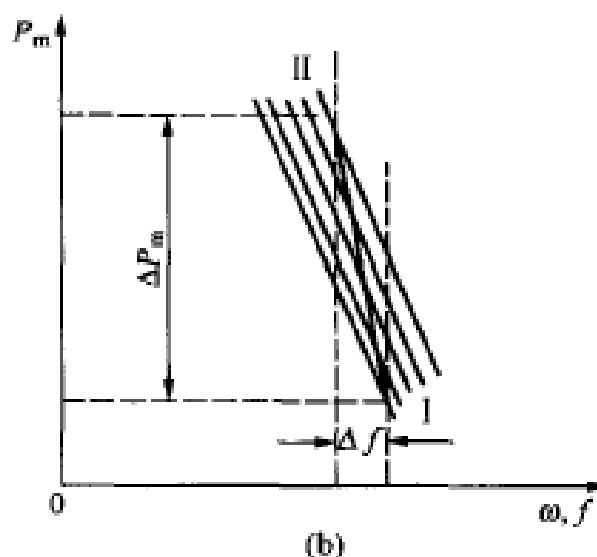
曲线都已近似以直线替代。这些代表频率特性的直线有各自的斜率

## 3.2 自动调速系统及其调节特性

### 电源有功功率静态频率特性



### 调速系统中调频器的二次调整



静态频率特性分为两类：

**无差调节**：负荷变动时，原动机转速或频率保持不变，如图 (a)

**有差调节**：负荷变动时，原动机转速或频率有所改变——随负荷增大而减小，如图 (b)





## 3.3 频率的一次调整

发电机组或电源频率特性的斜率为：

$$K_G = -\frac{\Delta P_G}{\Delta f}$$

此式为发电机的单位调节功率，以MW/Hz或MW/(0.1Hz)为单位

其标么值为：

$$K_{G*} = -\frac{\frac{\Delta P_G}{P_{GN}}}{\frac{\Delta f}{f_N}} = -\frac{\Delta P_N f_N}{\Delta f P_{GN}}$$

发电机的单位调节功率标识了随频率的升降发电机组发出功率减少或增加的多寡。

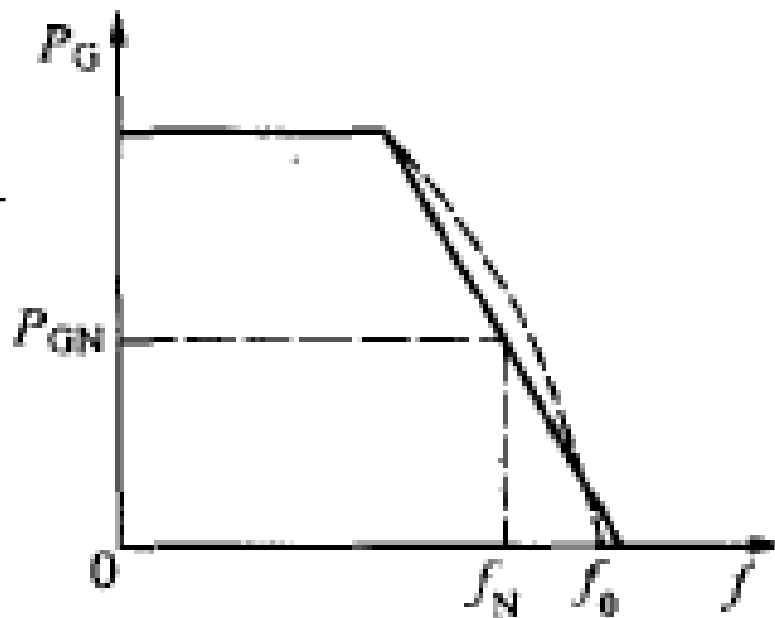
## 3.3 频率的一次调整

机组的调差系数 $\sigma$ 与单位调节功率有互为倒数的关系。  
其调差系数为：

$$\sigma = -\frac{\Delta f}{\Delta P_G} = \frac{f_N - f_0}{P_{GN} - 0} = \frac{f_N - f_0}{P_{GN}}$$

以百分数表示为：

$$\sigma\% = -\frac{\Delta f P_{GN}}{f_N \Delta P_G} \times 100 = \frac{f_0 - f_N}{f_N} \times 100$$



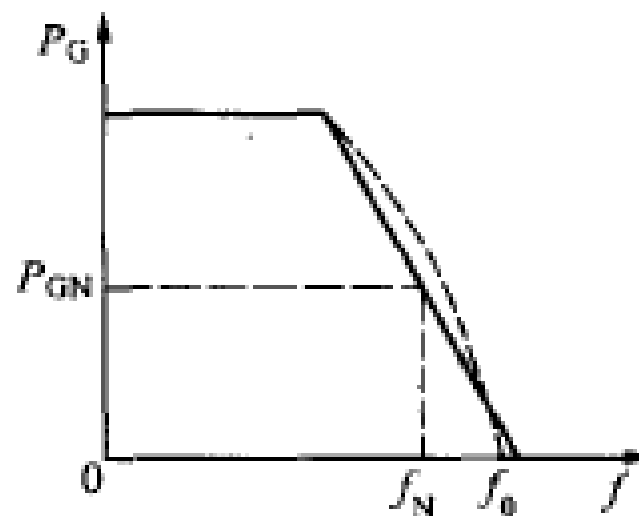
# 3.3 频率的一次调整

$$K_G = -\frac{\Delta P_G}{\Delta f} = -\frac{P_{GN} - 0}{f_N - f_0} = \frac{P_{GN}}{f_0 - f_N}$$



$$K_G = \frac{1}{S} = \frac{P_{GN}}{f_N S\%} \cdot 100$$

$$K_{G^*} = \frac{1}{S\%} \cdot 100$$



调差系数或与之对应的发电机的单位调节功率是可以整定的，一般整定为如下值：

汽轮发电机： $\sigma\% = 3 \sim 5$  或  $K_{G^*} = 33.3 \sim 20$

水轮发电机： $\sigma\% = 2 \sim 4$  或  $K_{G^*} = 50 \sim 25$

## 3.3 频率的一次调整

综合负荷的静态频率特性的斜率为： $K_L = \frac{\Delta P_L}{\Delta f}$

其标么值为  $K_{L*} = \frac{\Delta P_L f_N}{P_{LN} \Delta f} = K_L f_N / P_{LN}$

**负荷的单位调节功率**标志了随频率升降负荷消耗功率增加或减少的多寡。其标么值等于额定条件下负荷的频率调节效应。

其调节效应指一定频率下负荷随频率变化的变化率：

$$\frac{dP_{L*}}{df_*} = \frac{\Delta P_{L*}}{\Delta f_*} = K_{L*}$$

负荷的单位调节功率或频率调节效应不能整定

电力系统综合负荷的单位调节功率大致为1.5

## 3.3 频率的一次调整

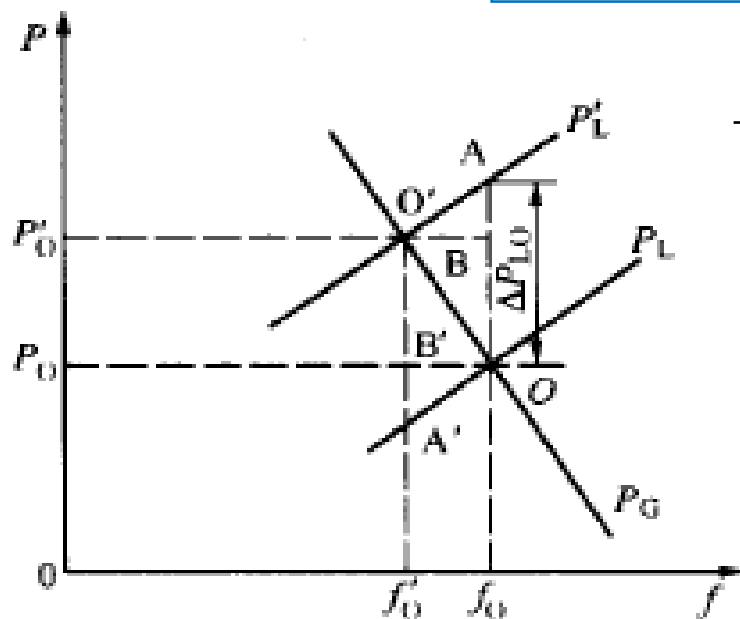
- **发电机组的一次调频:**
- 当电力系统频率偏离目标频率时，电源通过控制系统的自动反应，调整有功出力减少频率偏差的控制功能。
- 通过所有未满载发电机组调速器的自动控制，和负荷本身的频率调节效应共同作用下完成的频率调整，只能实现频率的有差调节

# 3.3 频率的一次调整

初始运行点O  
负荷突然增加 $\Delta P_{LO}$

负荷突增，发电机  
不能及时随之变动

机组减速，系  
统频率下降



发电机功率一次调整作用而增大；  
负荷功率本身效应而减小

$$OA = OB + BA = B'O' - B'A'$$

$$\therefore B'O' = \Delta P_G = -K_G \Delta f$$

$$B'A' = \Delta P_L = K_L \Delta f$$

$$OA = \Delta P_{LO}$$

$$\therefore \Delta P_{LO} = -(K_G + K_L) \Delta f$$

$$-\frac{\Delta P_{LO}}{\Delta f} = K_G + K_L = K_S$$

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_{LO}}{K_S}$$

$K_S$ 为系统的单位调节功率

图 5 - 27 频率的一次调整



## 3.3 频率的一次调整

系统的单位调节功率 $K_S$ ：

标志系统负荷增加或减少时，在原动机调速器和负荷本身的调节效应共同作用下系统频率下降或上升的多寡

$$K_S = K_G + K_L$$

$K_S$ 取决于两个方面：发电机的单位调节功率和负荷的单位调节功率

因负荷的单位调节不可调，所以系统的单位调节功率只有从控制、调节发电机的单位调节功率或调速器的调差系统入手



## 3.3 频率的一次调整

发电机的调差系数整定得小些或单位调节功率整定得大些对保证频率质量有利。

但为保证调速系统运行的稳定性，不能采用过小的调差系数或过大的单位调节功率。

已满负荷运行的机组，它们的调速器受负荷限制器的限制不能再参加调整，即计算系统单位调节功率 $K_s$ 时不考虑已满负荷运行的机组。





## 3.4 频率的二次调整

### 发电机组的二次调频:

手动或自动操作**调频器**，其作用是使发电机的功频静特性平行移动，从而使负荷变动引起的频率偏移可保持在允许范围内，**可以实现无差调节**。

## 3.4 频率的二次调整

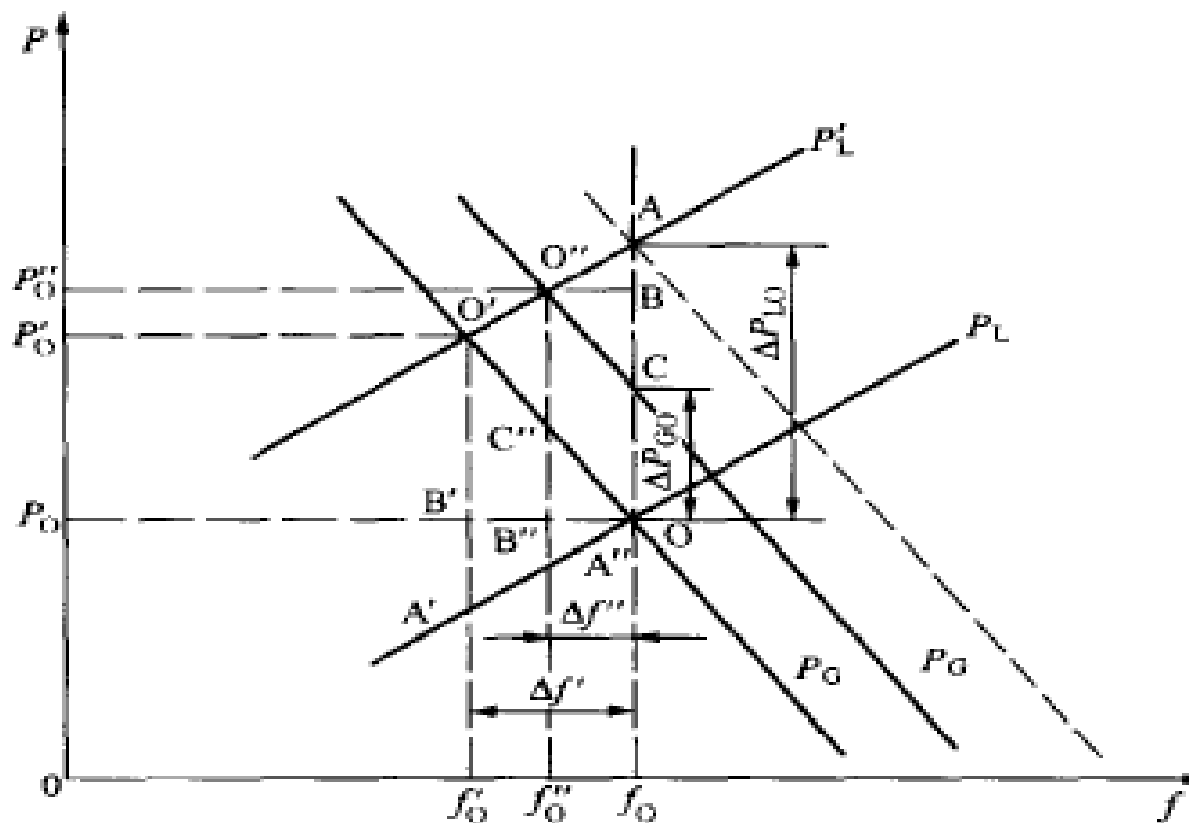


图 5 - 28 频率的二次调整

初始运行点  $O$   $\xrightarrow{\text{一次调频}}$  运行点  $O'$   $\xrightarrow{\text{二次调频}}$  运行点  $O''$

## 3.4 频率的二次调整

二次调频后，负荷的变化量由三部分组成：

- 二次调整后，调频发电机组在调频器控制下增发的功率  $\Delta P_{G0}$ （图中线段OC）。
- 调速器动作，发电机增发的功率：图中线段BC

$$-K_G \Delta f'' = -K_G (f_0'' - f_0)$$

- 负荷本身因调节效应而减少的功率：图中线段AB。

$$K_L \Delta f'' = K_L (f_0'' - f_0)$$

## 3.4 频率的二次调整

所以, 可得

$$\Delta P_{L0} - \Delta P_{G0} = -(K_G + K_L)\Delta f$$

$$-\frac{\Delta P_{L0} - \Delta P_{G0}}{\Delta f} = K_G + K_L = K_S$$

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_{L0} - \Delta P_{G0}}{K_S}$$

如  $\Delta P_{L0} = \Delta P_{G0}$ , 即发电机组如数增加了负荷功率的原始增量  $\Delta P_{L0}$   
则  $\Delta f = 0$ , 亦即实现了无差调节



## 3.4 频率的二次调整

推广运用于有n台机组，且有第n台机组担负二次调整任务的情况：

相当于有一台机组进行二次调整、n台机组进行一次调整

$$-\frac{\Delta P_{L0} - \Delta P_{Gn0}}{\Delta f} = K_{GN} + K_L = K_S$$

可见，由于n台机组的单位调节功率远大于一台机组，在同样的功率盈亏下，系统的频率变化要比仅有一台机组时小得多

所以，进行二次调整时，系统中负荷的增减基本上要由调频机组或调频厂承担。

## 3.4 频率的二次调整

若调频厂不位于负荷中心，则可能使调频厂与系统其他部分联系的联络线上连通的功率超出允许值。

这样，就出现了在调整系统频率的同时控制联络线上流通功率的问题。为讨论此问题，将系统分为两部分或看做是两个系统的联合

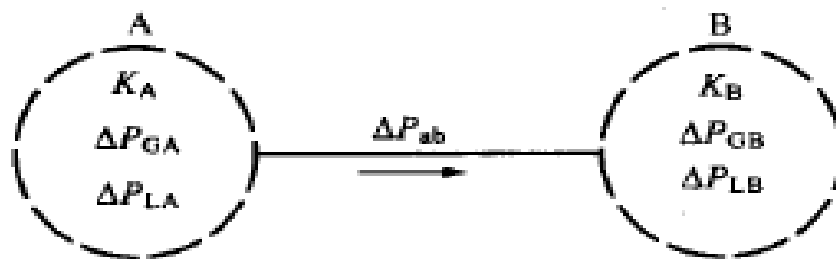


图 5 - 29 两个系统的联合

## 3.4 频率的二次调整

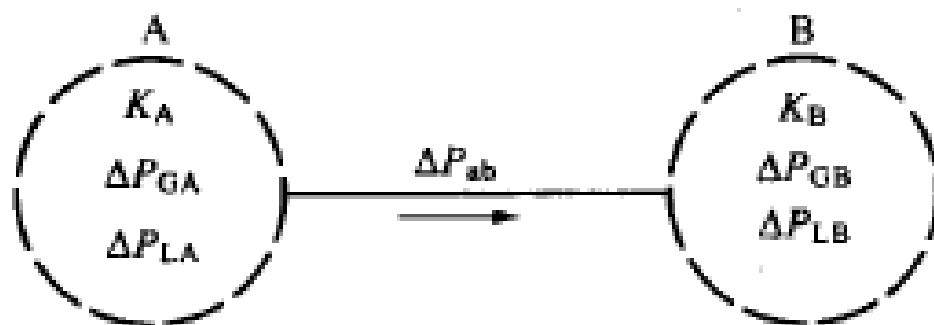


图 5 - 29 两个系统的联合

图中 $K_A$ 、 $K_B$ 分别为联合前A、B两系统的单位调节功率；  
 设A、B两系统中都设有进行二次调整的电厂，其功率变量分别为 $\Delta P_{GA}$ 、 $\Delta P_{GB}$ ；

A、B两系统的负荷变量分别为变量分别为 $\Delta P_{LA}$ 、 $\Delta P_{LB}$ ；

设联络线的交换功率 $P_{ab}$ 有A向B流动时为正值

## 3.4 频率的二次调整

在联合前：

对A系统

$$\Delta P_{LA} - \Delta P_{GA} = -K_A \Delta f_A$$

对B系统

$$\Delta P_{LB} - \Delta P_{GB} = -K_B \Delta f_B$$

联合后：

**联合运行系统频率变化处处相同**

$$\Delta P_{LA} + \Delta P_{ab} - \Delta P_{GA} = -K_A \Delta f_A$$

$$\Delta P_{LB} - \Delta P_{ab} - \Delta P_{GB} = -K_B \Delta f_B$$



## 3.4 频率的二次调整

联合后，两系统的频率应相等，可得：

$$(\Delta P_{LA} - \Delta P_{GA}) + (\Delta P_{LB} - \Delta P_{GB}) = -(K_A + K_B)\Delta f$$

$$\Delta f = -\frac{(\Delta P_{LA} - \Delta P_{GA}) + (\Delta P_{LB} - \Delta P_{GB})}{K_A + K_B}$$

联合后的公式联合求解可得

$$\Delta P_{ab} = \frac{K_A(\Delta P_{LB} - \Delta P_{GB}) - K_B(\Delta P_{LA} - \Delta P_{GA})}{K_A + K_B}$$

## 3.4 频率的二次调整

$$\text{令 } \Delta P_{LA} - \Delta P_{GA} = \Delta P_A; \quad \Delta P_{LB} - \Delta P_{GB} = \Delta P_B$$

$\Delta P_A$ 、 $\Delta P_B$ : A、B系统的功率缺额。

联合后的公式，可改写为：

$$\Delta P_A + \Delta P_{ab} = -K_A \Delta f$$

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_A + \Delta P_B}{K_A + K_B}$$

$$\Delta P_B - \Delta P_{ab} = -K_B \Delta f$$

$$\Delta P_{AB} = \frac{K_A \Delta P_B - K_B \Delta P_A}{K_A + K_B}$$

## 3.4 频率的二次调整

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_A + \Delta P_B}{K_A + K_B}$$

左式可知，联合系统频率的变化取决于系统总的功率缺额和总的系统单位调节功率

$$\Delta P_{AB} = \frac{K_A \Delta P_B - K_B \Delta P_A}{K_A + K_B}$$

上式可知：

如A系统没有功率缺额，联络线上由A流向B的功率要增大

如B系统没有功率缺额，联络线上由A流向B的功率要减少

如B系统的功率缺额完全由A系统增发的功率补偿，则

$\Delta f = 0$ ， $\Delta P_{ab} = \Delta P_B = -\Delta P_A$ 。虽可保持系统频率不变，但B系统缺额需A系统如数通过联络线传给系统B。此为调频厂设在远离负荷中心而且需实现无差调节的情况



## 3.5 频率调整厂的选择

手动或自动二次调频，均需发电厂来担任此任务，即为调频厂。  
调频厂需调整容量、调整速度快、调整范围内经济性能好、调整时不至引起系统内部或联络线间的困难等

调整容量：

$$\Delta P_{Gno} = \Delta P_{Lo} + K_s \Delta f$$

允许的频率偏移取决于对电能质量的要求，通常已知  
系统的单位调节功率取决于各发电机组调速器调差系数的整定值和负荷的频率调节效应，通常也可求

只有负荷变动的幅度有其随机性质，较难确定

但统计资料表明，负荷在预测值附近随机变动的概率分布属正态分布。因此，如要求频率偏移保持在允许范围内的概率能达0.95，负荷变动的幅度应按 $\pm 2\sigma$ 考虑。此处的 $\sigma$ 为负荷变动的标准差，此标准差的百分值大体与系统容量的平方根成反比

## 3.5 频率调整厂的选择

$$\Delta P_{Gno} = \Delta P_{Lo} + K_s \Delta f$$

上述调整容量并非为调频厂的容量。

火电厂的锅炉和汽轮机都有其技术最小负荷，其可调容量仅为其额定容量的30%（高温高压）至75%（中温中压）

水电厂的可调容量既受向下游释放水量的限制又受水轮机技术最小负荷的限制。一般水电厂的可调容量大于水电厂，水电厂的可调容量约为其额定容量的50%

## 3.5 频率调整厂的选择

除调整容量外，调整速度也是一重要问题。

- 高温高压锅炉从70%~80%额定负荷上升至满负荷约需1~5min;
- 中温中压锅炉从50%额定负荷上升至满负荷仅需1min，比较快
- 汽轮机在50%~100%额定负荷范围内，每分钟仅达2%~5%，很慢；
- 水电厂水轮机负荷变动的速度高得多，每分钟可达50%~400%
- 原子能电厂虽可调容量较大，调整速度也不低于火电厂，但由于原子能电厂的运行费用低，通常以满负荷运行

## 3.5 频率调整厂的选择

一般，从调整容量和调整速度这两基本要求来选取。联络线的传输能力虽是考虑的一因素，但因必要时可采取其他措施来克服，所以不是决定因素。

### 调整原则：

- 一般选择水电厂为调频厂
- 无水电厂或水电厂不宜承担调频任务时，选择中温中压火电厂为调频厂，抽水蓄能放水发电时也可参与调频

当调整容量不够大时，需通过上述原则确定几个调频厂，并规定调整范围和顺序

当调整速度不够快时，需几台机组同时调整时，手动操作容易在调整过程中产生混乱，现代电力系统几乎无不例外采用自动调频方式。



## 3.6 关于自动负荷 —— 频率控制

广义的自动调频往往又称为**自动负荷-频率控制**（ALFC）或**自动发电控制**（AGC）。但后二者有时还有经济调度控制（EDC）的内涵

**自动负荷-频率控制的功能：**

- 1 保持系统频率等于或十分接近额定值
- 2 保持系统内各区域间或联络系统内各子系统间的交换功率为给定值
- 3 保持各发电设备以最经济的方式运行



# 3.6 关于自动负荷 —— 频率控制

## 调频器的调整方式

## 比例调节、积分调节、微分调节

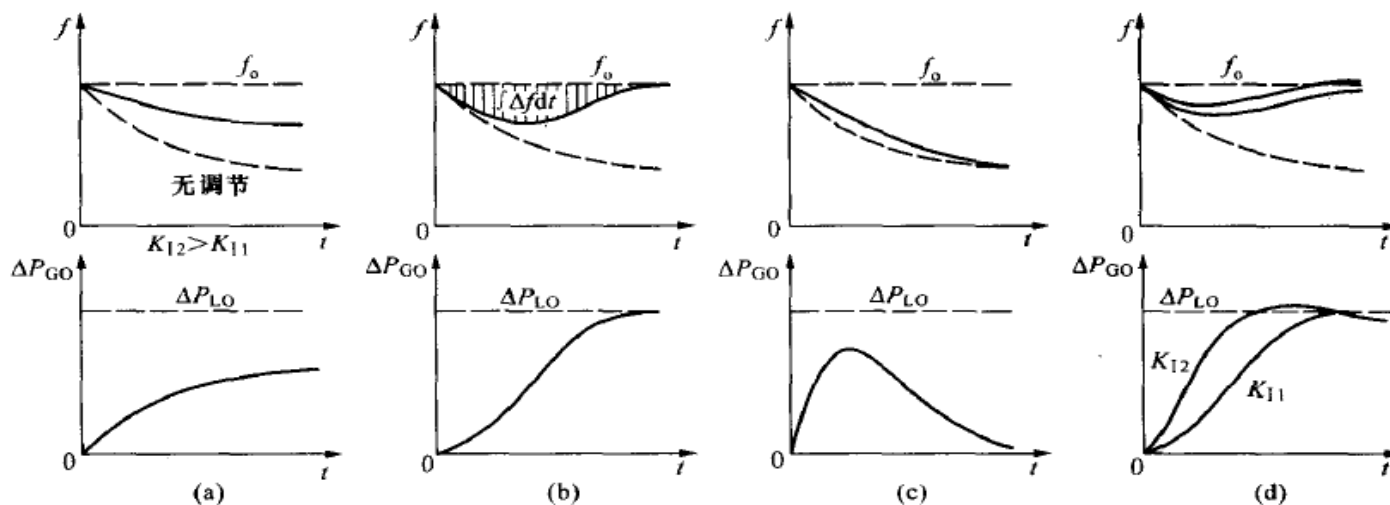


图 5-31 不同调整方式的响应

(a) 比例调节；(b) 积分调节；(c) 微分调节；(d) 比例积分调节

为满足频率误差的要求，往往采用比例积分调节的方式

按频率偏移比例地增大调频功率时，不可能做到频率无差

按频率偏移的微分增大时，只能在频率下降的初始阶段减缓频率的下降，而最终与无调节无异

按频率偏移的积分增大时，才可以做到频率无差



## 3.6 关于自动负荷 —— 频率控制

### 区域或子系统的调整准则——区域控制偏差

可分为：

按频率偏差调整

按交换功率偏差调整

按频率和交换功率偏差调整

区域控制偏差与该区域中调频厂应发功率之间在采用比例积分调整方式时为

$$\Delta P_{GS} = -K_I \int (\text{ACE}) dt$$

## 3.6 关于自动负荷 ——频率控制

- 按频率偏差调整时，只能保证系统频率不变，不能控制联络线上流通的功率——适用于系统结构紧凑、电厂间有密切联系的场合
- 按交换功率调整时，只能保证联络线上的功率不变。，不能控制系统频率——仅适用于联合系统中各子系统间或同一系统中各联络线上流通的交换功率受技术、经济等条件的约束而不能任意变化的场合
- 按频率和交换功率偏差调整时的区域控制偏差为：

$$ACE_s = K_s \Delta f + \Delta P_{ex}$$

此调整准则为近代联合电力系统或大电力系统普遍采用的准则，  
为各子系统或区域保证其控制范围内功率就地平衡的准则

## 3.6 关于自动负荷 —— 频率控制

设图5-29中系统A、B两系统负荷分别增长 $\Delta P_{LA}$ 、 $\Delta P_{LB}$ ，但仅由A系统中调频厂按不同准则调频，即 $\Delta P_{GB} = 0$ 。结果如下表所示：

表 5 - 13

不同调整准则的调整效果

$ACE_A$	$\Delta f$	$\Delta P_{ab}$	$K_A \Delta f + \Delta P_{ab}$
$\Delta f$	0	$-\Delta P_{LB}/K_B$	$-\Delta P_{LB}/(K_A + K_B)$
$\Delta P_{ab}$	$\Delta P_{LB}$	0	$\Delta P_{LB} K_A / (K_A + K_B)$
$\Delta P_{GA}$	$\Delta P_{LA} + \Delta P_{LB}$	$\Delta P_{LA} - \Delta P_{LB} K_A / K_B$	$\Delta P_{LA}$

## 3.6 关于自动负荷——频率控制

### 自动负荷——频率控制的实现

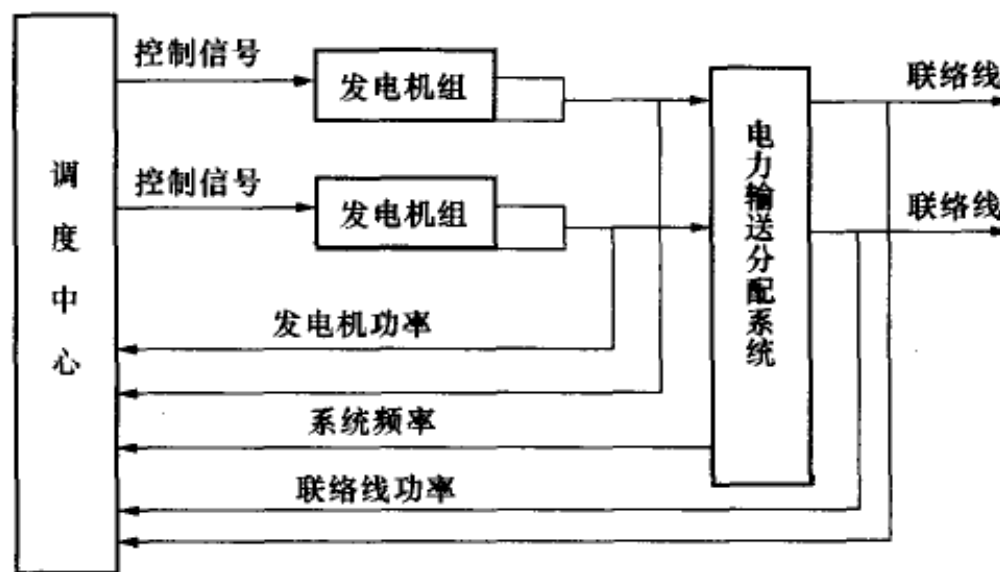


图 5-32 调度通信系统示意图

此系统获取各发电机发出功率、各联络线传输功率以及系统频率的信息，并向各发电机乃至发电机发布相应的控制信号。

# 3.6 关于自动负荷——频率控制

## 自动负荷——频率控制系统的工作原理

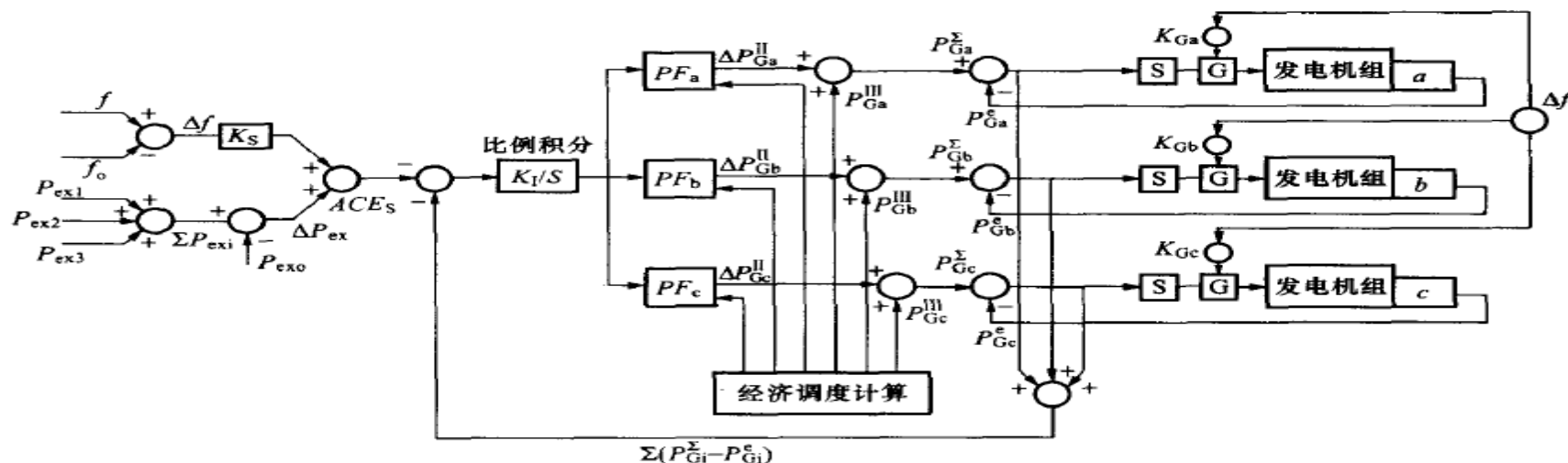


图 5 - 33 自动负荷——频率控制工作原理示意图

G—调速器；S—调频器；PF—参与因子

## 3.6 关于自动负荷 —— 频率控制

### 按参与因子分配的说明：

设区域或子系统中调频机组a、b、c按等微增率准则或协调方程式分担的功率分别为 $P_{Ga}^{III}$ 、 $P_{Gb}^{III}$ 、 $P_{Gc}^{III}$

设出现功率缺额后如仍按等微增率准则分担功率，它们应增发的功率分别为 $\Delta P_{Ga}^{II}$ 、 $\Delta P_{Gb}^{II}$ 、 $\Delta P_{Gc}^{II}$

由下图可见， $\frac{d\lambda_i}{dP_i}$  或  $\frac{d^2F_i}{dP_i^2}$  越小的机组分担的功率越多。

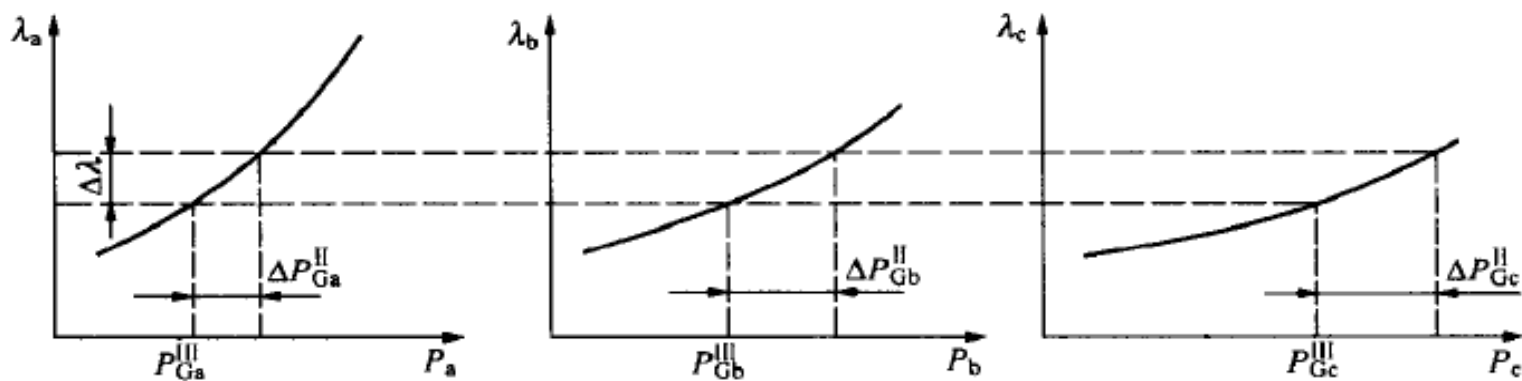


图 5 - 34 参与因子的确定

## 3.6 关于自动负荷 —— 频率控制

因此可令各机组按 $d\lambda_i/dP_i$ 的反比分担功率，即可定义参与因子：

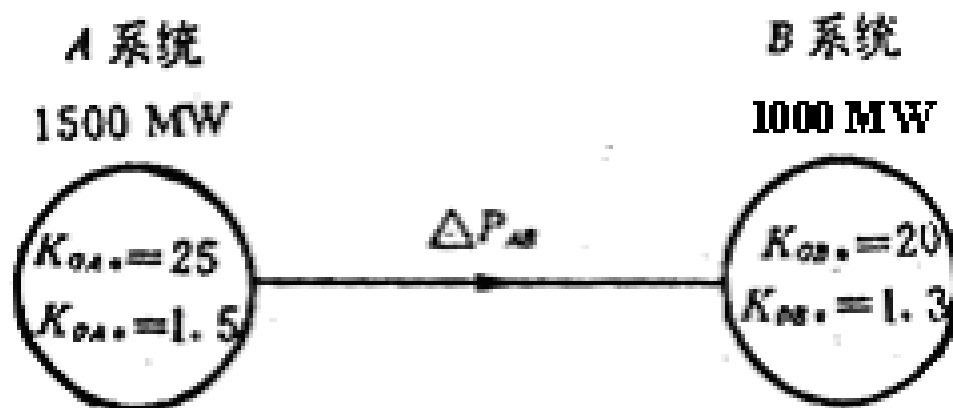
$$PF_i = \frac{1/(d\lambda_i/dP_i)}{\sum_{i=1}^m [1/(d\lambda_i/dP_i)]} = \frac{1/(d^2 F_i/dP_i^2)}{\sum_{i=1}^m [1/(d^2 F_i/dP_i^2)]}$$

并另令各机组按参与因子分担功率。参与因子即为对应于区域或子系统中出现功率盈亏而需进行调整时，各调频机组应分担的份额。

由于系统中负荷时刻变动，各发电机的应发功率 $P_{Ga}^{\Pi}$ 和其参与因子 $PF_i$ 也需不断修改，这就是经济调度计算

由于一、二三次调频的响应时间不同，为保证控制系统的稳定，各机组应发功率与实发功率的偏差反馈是不可或缺的。一般，调速器完成的一次调频响应时间为2~20s，按ACE进行的二次调频响应时间为1min，三次调频或经济调度计算时间的周期长达5min以上





- 各系统以其自身容量为基准的单位调节功率和调节效应系数示于图中。A系统负荷增加200MW。试计算下列情况下的频率偏差和联络线交换功率的增量：1) 两系统既无一次调频，也无二次调频；2) 两系统均无二次调频；3) 两系统依靠二次调频各增发50MW；4) A系统无二次调频，B系统二次调频增发功率200MW；5) B系统无二次调频，A系统二次调频增发功率200MW。

解： 先求出两个系统的单位调节功率和调节效应系数

$$K_{GA} = K_{GA^*} P_{GAN} / f_N = 25 \times 1500 / 50 = 750 \text{ MW} / \text{Hz}$$

$$K_{GB} = K_{GB^*} P_{GBN} / f_N = 20 \times 1000 / 50 = 400 \text{ MW} / \text{Hz}$$

$$K_{DA} = K_{DA^*} P_{DAN} / f_N = 1.5 \times 1500 / 50 = 45 \text{ MW} / \text{Hz}$$

$$K_{DB} = K_{DB^*} P_{DBN} / f_N = 1.3 \times 1000 / 50 = 26 \text{ MW} / \text{Hz}$$

无一次调频时，

$$K_A = K_{DA} = 45 \text{ MW} / \text{Hz}, K_B = K_{DB} = 26 \text{ MW} / \text{Hz}$$

有一次调频时，

$$K_A = K_{GA} + K_{DA} = 795 \text{ MW} / \text{Hz}$$

$$K_B = K_{GB} + K_{DB} = 426 \text{ MW} / \text{Hz}$$

- 1) 两系统既无一次调频又无二次调频时

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_A + \Delta P_B}{K_A + K_B} = -\frac{200}{25 + 26} = -2.8169 \text{ Hz}$$

$$\Delta P_{AB} = -K_A \Delta f - \Delta P_{DA} + \Delta P_{GA} = -45 \times (-2.8169) - 200$$

$$= 126.7606 - 200 = -73.2394 \text{ MW}$$

- 由以上结果可见，由于两系统既无一次调频又无二次调频，即无任何调频措施，故频率偏差很大，远远超出了允许范围。此时A系统增加的负荷功率200MW，一方面靠自身的调节效应少取用126.7606MW，另一方面由B系统送来功率73.2394MW，所以形成低频率水平上的有功平衡，这种情况应避免。

- 2) 两系统参与一次调频但无二次调频时

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_A + \Delta P_B}{K_A + K_B} = -\frac{200}{795 + 426} = -0.1638 \text{ Hz}$$

$$\Delta P_{AB} = \frac{K_A \Delta P_B - K_B \Delta P_A}{K_A + K_B} = \frac{0 - 426 \times 200}{795 + 426} = -69.7789 \text{ MW}$$

- 3) 两系统依靠二次调频各增发50MW时

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_A + \Delta P_B}{K_A + K_B} = -\frac{(200 - 50) + (0 - 50)}{795 + 426} = -0.0819 \text{ Hz}$$

$$\Delta P_{AB} = -K_A \Delta f - \Delta P_{DA} + \Delta P_{GA} = -795 \times (-0.0819) - 200 + 50 = -84.8894 \text{ MW}$$

- 4) A系统无二次调频, B系统二次调频增发功率200MW时

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_A + \Delta P_B}{K_A + K_B} = -\frac{(200-0) + (0-200)}{795 + 426} = 0\text{Hz}$$

$$\Delta P_{AB} = -K_A \Delta f - \Delta P_{DA} + \Delta P_{GA} = -200\text{MW}$$

- 5) B系统无二次调频, A系统二次调频增发功率200MW时,

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_A + \Delta P_B}{K_A + K_B} = -\frac{(200-200) + (0-0)}{795 + 426} = 0\text{Hz}$$

$$\Delta P_{AB} = -K_A \Delta f - \Delta P_{DA} + \Delta P_{GA} = 0\text{MW}$$

是分区调整就地平衡的情况, 最理想



谢谢!