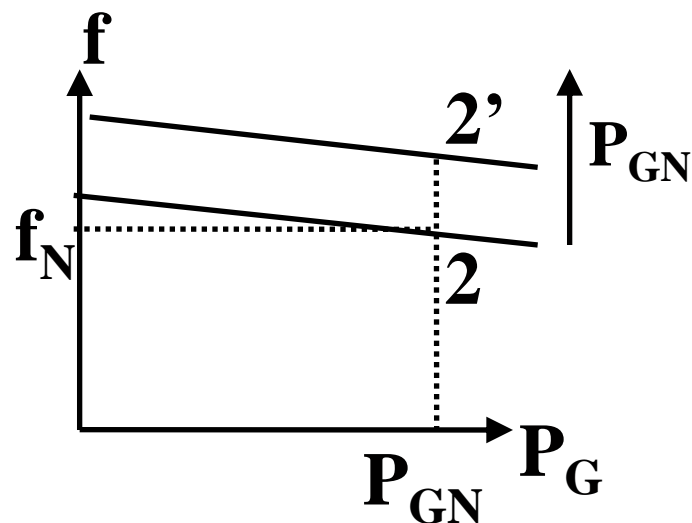
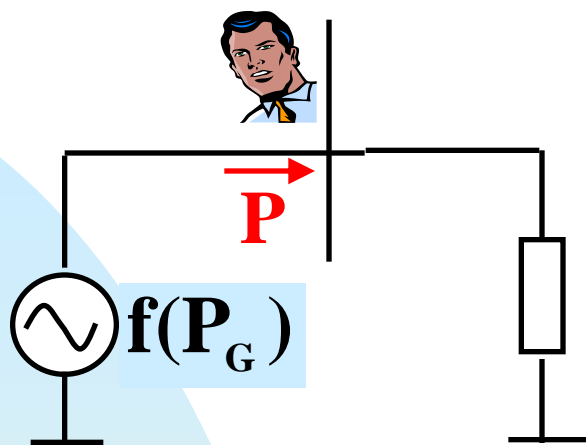


第四章 电力系统稳态运行与控制

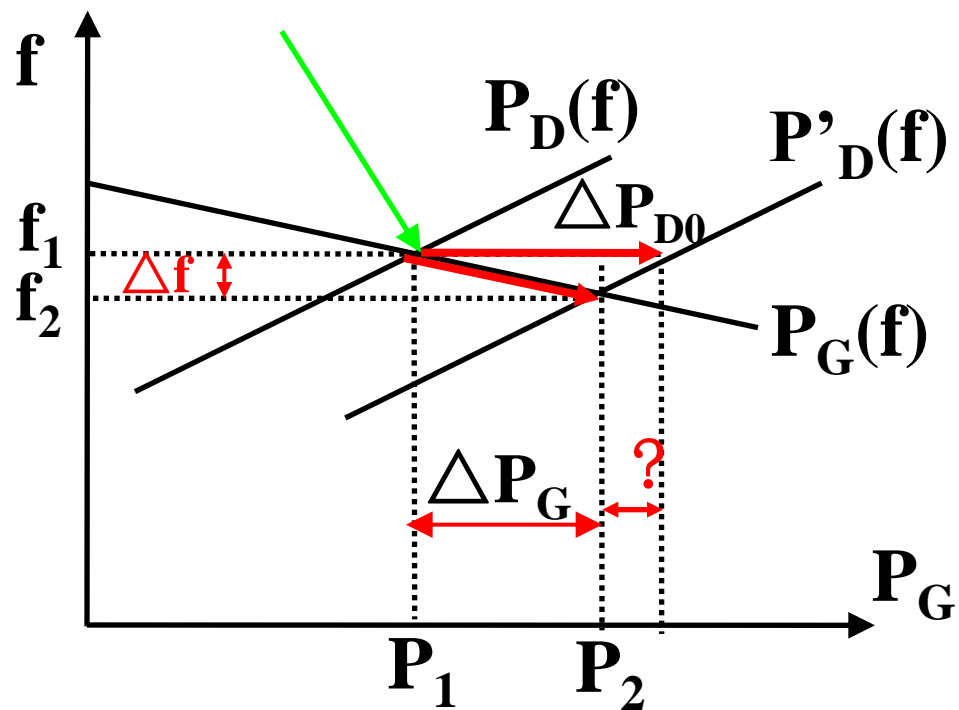
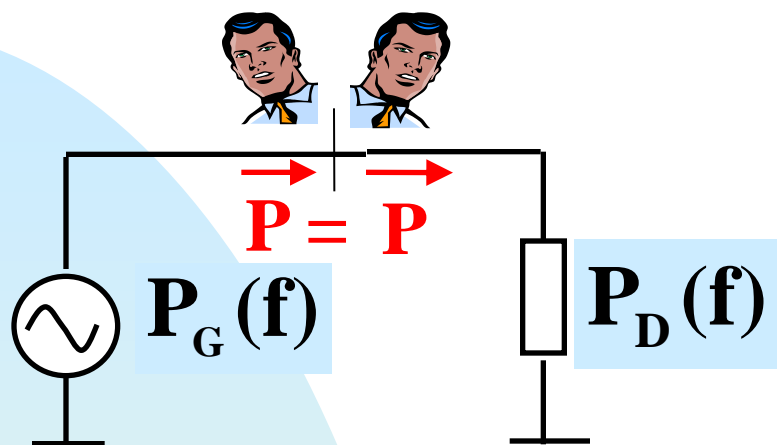
(Power System Steady State Operation and Control)

第二讲 有功功率与频率控制 (续)

(Active Power and Frequency Control)



- **发电机有功——频率静特性**
- **一次调频：有差调节，近似直线（下垂控制）**
- **发电机静态调差系数** $\delta = -\frac{\Delta f}{\Delta P_G} \text{ Hz/MW}$, “-”
表示 f 、 P_G 变化方向相反
- **发电机功频特性系数** $K_G = \frac{1}{\delta} = -\frac{\Delta P_G}{\Delta f} \text{ MW/Hz}$
- **二次调频：近似直线族**

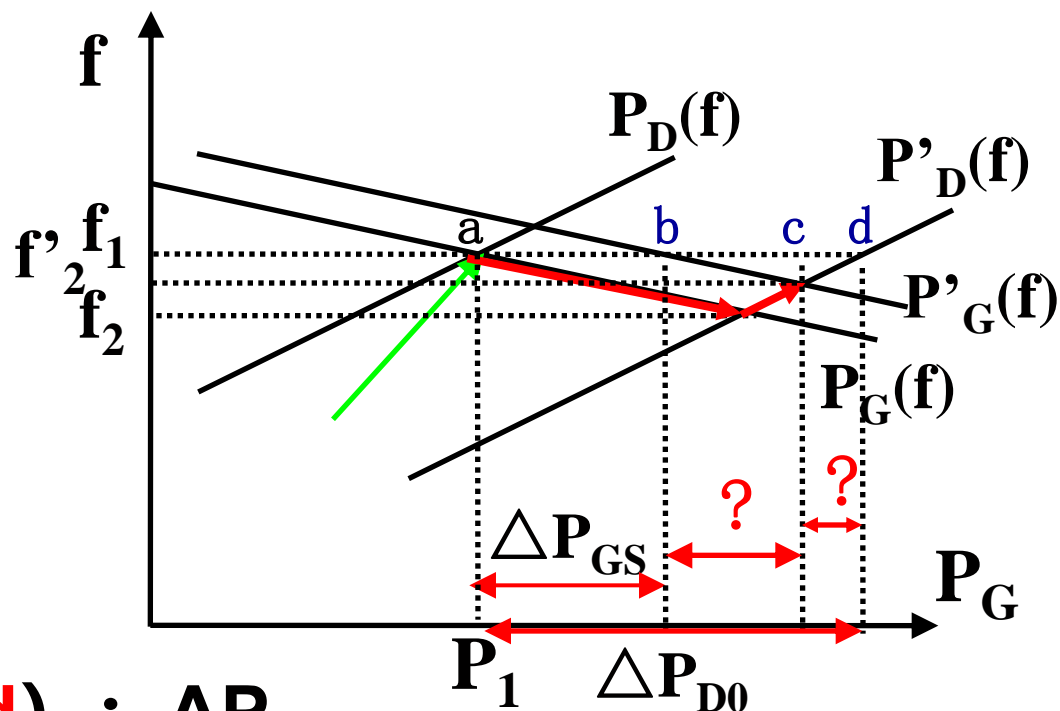


- 有功平衡：几何图解
- 负荷增加：初始增量 ΔP_{D0}
- 频率变化： $\Delta f = f_2 - f_1 < 0$ ，频率下降
- 负荷调节效应： $\Delta P_D = K_D \Delta f < 0$
- 有功出力增量： $\Delta P_G = P_2 - P_1 = -K_G \Delta f > 0$

- 负荷实际增量: $\Delta P_{Df} = \Delta P_{D0} + \Delta P_D = \Delta P_{D0} + K_D \Delta f$
- 由有功平衡: $\Delta P_{Df} = \Delta P_G$
 - ➡ $\Delta P_{D0} + K_D \Delta f = -K_G \Delta f$
 - ➡ $\Delta P_{D0} = -(K_G + K_D) \Delta f = -K \Delta f$
- 电力系统功频静特性系数: $K = K_G + K_D = -\frac{\Delta P_{D0}}{\Delta f}$
- 系统负荷 \uparrow , $f\downarrow$, 发电机出力自动 \uparrow , 负荷由其本身调节效应, 减少功率消耗, 达到新平衡态 P_2 、 f_2 ,
 $P_2 \neq P_1 + \Delta P_{D0}$
- 一次调频: 有差调节, 当 ΔP_{D0} 太大时, 无法使 Δf 在一定范围内。

- **二次调频**

- 频率变化 $\Delta f = f'_2 - f_1 < 0$



- 负荷初始增量 (线段ad) : ΔP_{D0}
- 负荷调节效应 (线段dc) : $\Delta P_D = K_D \Delta f < 0$
- 发电机一次调频功率增量 (线段bc) : $\Delta P_G = -K_G \Delta f$
- 发电机二次调频功率增量 (线段ab) : ΔP_{GS}
- 负荷实际增量: $\Delta P_{Df} = \Delta P_{D0} + K_D \Delta f$

由有功平衡： $\Delta P_{GS} + \Delta P_G = \Delta P_{Df}$

$$\rightarrow \Delta P_{GS} - K_G \Delta f = \Delta P_{D0} + K_D \Delta f$$

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

$$\rightarrow \Delta f = - (\Delta P_{D0} - \Delta P_{GS}) / K$$

若 $\Delta P_{GS} = \Delta P_{D0}$ ， f 如何变化？

若 $\Delta P_{GS} > \Delta P_{D0}$ ， f 如何变化？

二、电力系统中的有功平衡

- 全系统的有功平衡：

运行中：
$$\sum P_G = \sum P_D + \sum P_L$$

规划设计：
$$\sum P_N = \sum P_G + \sum P_R$$

- 备用容量分类：

(1) 按投入时间分（思考：谁能参与一/二次调频）

热备用：旋转备用，运转中的发电设备可能发的最大功率与实际发电功率之差；

冷备用：未运转的、但能随时启动的发电设备可以发的最大功率(不含检修中的设备)；

冷热备用须有**合理比例**。

电力系统中的有功平衡

(2) 按用途分：

负荷备用：适应负荷短时波动、一日内计划外的负荷增加，一般最大负荷的0~5%。

事故备用：适应发电设备发生偶然事故时备用，一般最大负荷的5~10%，分冷、热备用。

检修备用：满足检修需要而设的备用。

国民经济备用：计及负荷超计划增长而设，一般最大负荷3~5%

§3 现代电力大系统的频率如何控制？

一、电力负荷变化与频率控制原则

电力负荷变化的3个分量：

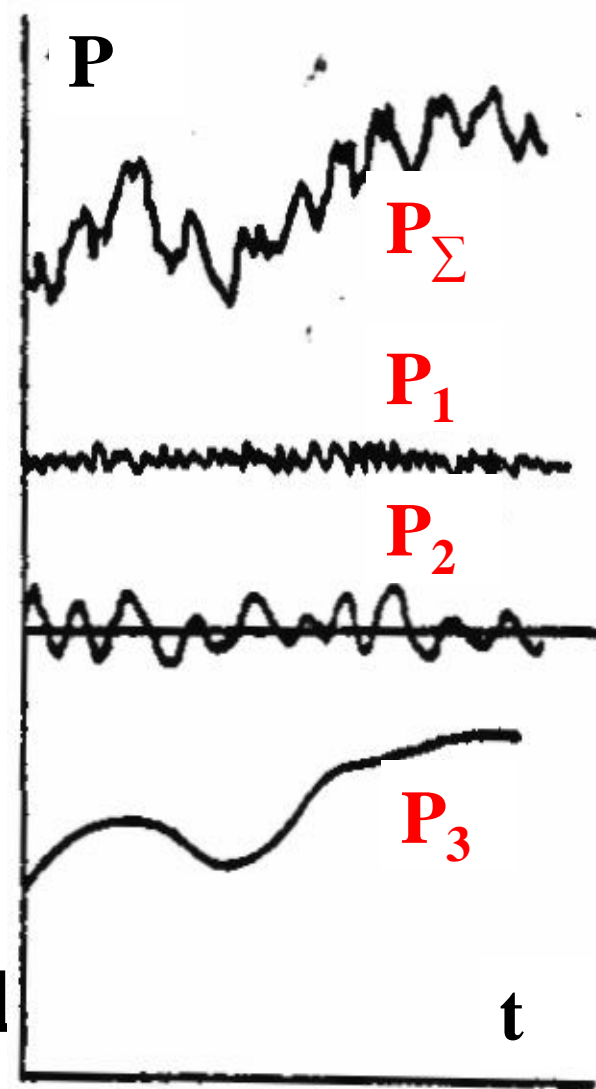
- 1、周期短($< 10''$)/幅度小/随机性大
- 2、周期较长($10'' \sim 3'$)/幅度较大
- 3、周期长($> 3'$)/幅度大/由负荷曲线反映

3种控制方式：

一次调频：调速器

二次调频：调频器

三次调频：依负荷曲线，在厂、机组间经济合理地分配



二、系统负荷：功频静特性

系统负荷有功频率调节效应系数

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

标么值： $K_{D*} = \frac{\Delta P_D / P_{DN}}{\Delta f / f_N} = \frac{\Delta P_{D*}}{\Delta f_*}$

实际系统 $K_{D*} = 1 \sim 3$ ，取决于**负荷组成**

不同系统、不同时刻的数值不同，**实验获得**

三、单台发电机：功频静特性

发电机功频静特性系数

有名值： $K_G = -\frac{\Delta P_G}{\Delta f}$

标么值： $K_{G*} = -\frac{\Delta P_G / P_{GN}}{\Delta f / f_N} = -\frac{\Delta P_{G*}}{\Delta f_*}$

K_{G*} 由调速器整定,与负荷不同

越大，频率偏移越小，但受限于调速机构

汽轮机： $K_{G*}=25\sim16.7$

水轮机： $K_{G*}=50\sim25$

四、N台机：等值功频静特性

频率变化 Δf ，第*i*台发电机功率增量（满载怎么办？）

$$\Delta P_{Gi} = -K_{Gi} \Delta f$$

N台机组总功率增量为：

$$\Delta P_G = \sum \Delta P_{Gi} = -\sum K_{Gi} \Delta f = -K_G \Delta f$$

定义N台机**等值功频静特性**： $K_G = \sum K_{Gi}$

$$K_{G^*} = \frac{\Delta P_G / \sum P_{GiN}}{\Delta f / f_N} = \frac{\sum \Delta P_{Gi^*} P_{GiN}}{\Delta f_*} \frac{1}{\sum P_{GiN}} = \frac{\sum K_{Gi^*} P_{GiN}}{\sum P_{GiN}}$$

系统越大，机组越多， K_G 越大，系统频率越稳定

五、电力系统：功频静特性

电力系统的功频静特性系数：

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

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

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

$\Rightarrow K_* = K_{G*} \rho + K_{D*}$

备用系数： ρ

K_* 大, ΔP_{D0*} 引起的 f_* 变化小

增大 K_* 的措施及其限制？（不能全靠一次调频）

六、现代电力大系统的频率控制

原则一：带调速器的机组，只要有可调容量，都参加**一次调频**。（本地控制）

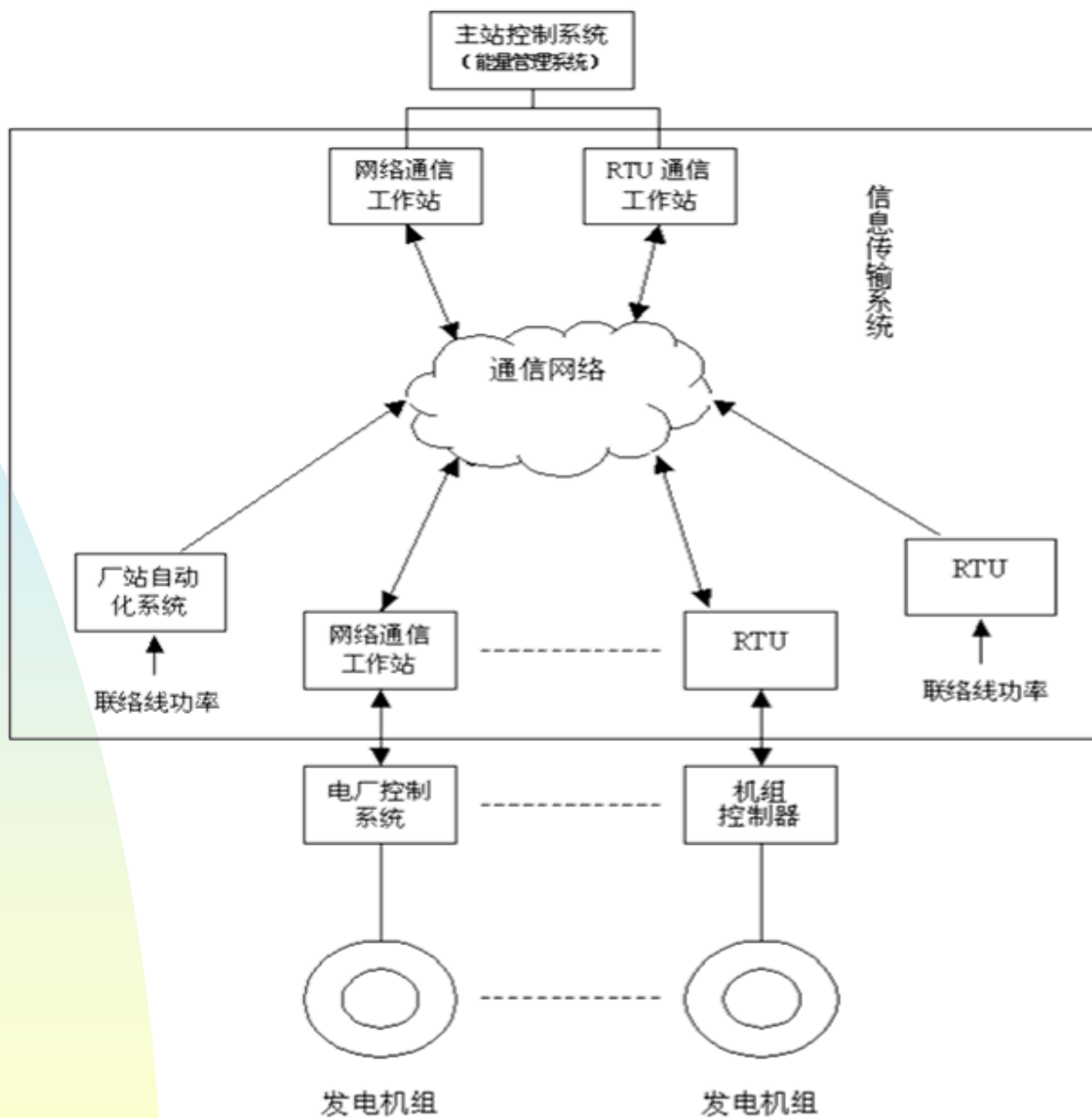
原则二：**二次调频**由部分电厂承担——**主调频机组(厂)**，负荷增量主要由它们承担（AGC, Automatic Generation Control）（系统控制）

主调频机组要求：

有足够**可调**容量；

有一定调整**速度**；

调整时能符合**安全、经济**的要求。



自动发电控制系统构成图

进一步的思考

- 1、一次调频能做成无差调节么？为什么？
- 2、参与二次调频的机组“吃亏”了么？怎么补偿？
- 3、传统意义上的电力系统频率控制，本质上就是通过控制发电机去追随负荷变化的过程，所谓“**源随负荷动**”，保证频率波动在可接受范围之内。能“**负荷随源动**”么？今天为什么要这么做？怎么做？
- 4、你如何看待“地球一小时”？

第四章 电力系统稳态运行与控制

(Power System Steady State Operation and Control)

第三讲 经济运行与控制

(Economic Operation and Control)

(经济学的观点)

问题

- 1、经济运行是怎么回事？
- 2、如何实现经济运行？
 - ◆ 发电厂技术特性及负荷分配原则（宏观）
 - ◆ 数学建模求解（微观）
- 3、电力市场环境下经济运行有何变化？（自学）

§1 电力系统经济运行是怎么回事？

- 什么是经济运行？
- 以最小化成本为目标，在满足系统运行约束的前提下，决定系统负荷（及损耗）在发电机之间的分配
 - ◆ 供不应求：则无经济性可言，“电老虎”
 - ◆ 供大于求：通常发电容量 $>$ 系统负荷，多种可行发电组合，则有经济优化空间
- 经济运行的目的是降低成本，提高竞争力。随着市场化改革的进行，经济运行日益重要！

重要术语：经济调度

经济调度 (Economic Dispatch: ED)

- 前提：满足负荷需求
- 前提：保证电力安全 and 质量
- 目标：使电力系统运行经济性达到最优

分为：

- 有功经济调度
- 无功经济调度（课上不研究）

难度大，挑战性强！

§2 如何实现经济运行？（宏观）

一、各类电厂的技术经济特点

(1) 火电厂

- **成本**：高！燃料及其运输，不可再生
- **效率**：与蒸汽参数有关，温压越高，效率越高
- **调节范围**：较窄，受炉/机最小技术负荷限制，温压越高越窄（高温压30%，中温压75%）（最近：火电机组灵活性改造，深度调峰）
- **调节速度**：投退和增减出力慢，耗能多，易损
- **热电厂**：抽汽供热，效率高；但最小技术负荷取决于热负荷，为强迫功率（思考：为何北方地区冬天弃风更严重？）

一、各类电厂的技术经济特点

(2) 水电厂

- **成本**：低！无须燃料费，梯级开发，可再生
- **调节范围**：大（50%以上）
- **调节速度**：增减负荷快，操作易。
- **出力约束**：
 - ◆ 取决于**水量**和**水位差**，受**来水**影响大
 - ◆ **水利枢纽**兼顾发电、航运、防洪、灌溉、渔业、旅游
 - ◆ 不一定适应电力负荷，须与**火电**配合

一、各类电厂的技术经济特点

(3) 核电厂

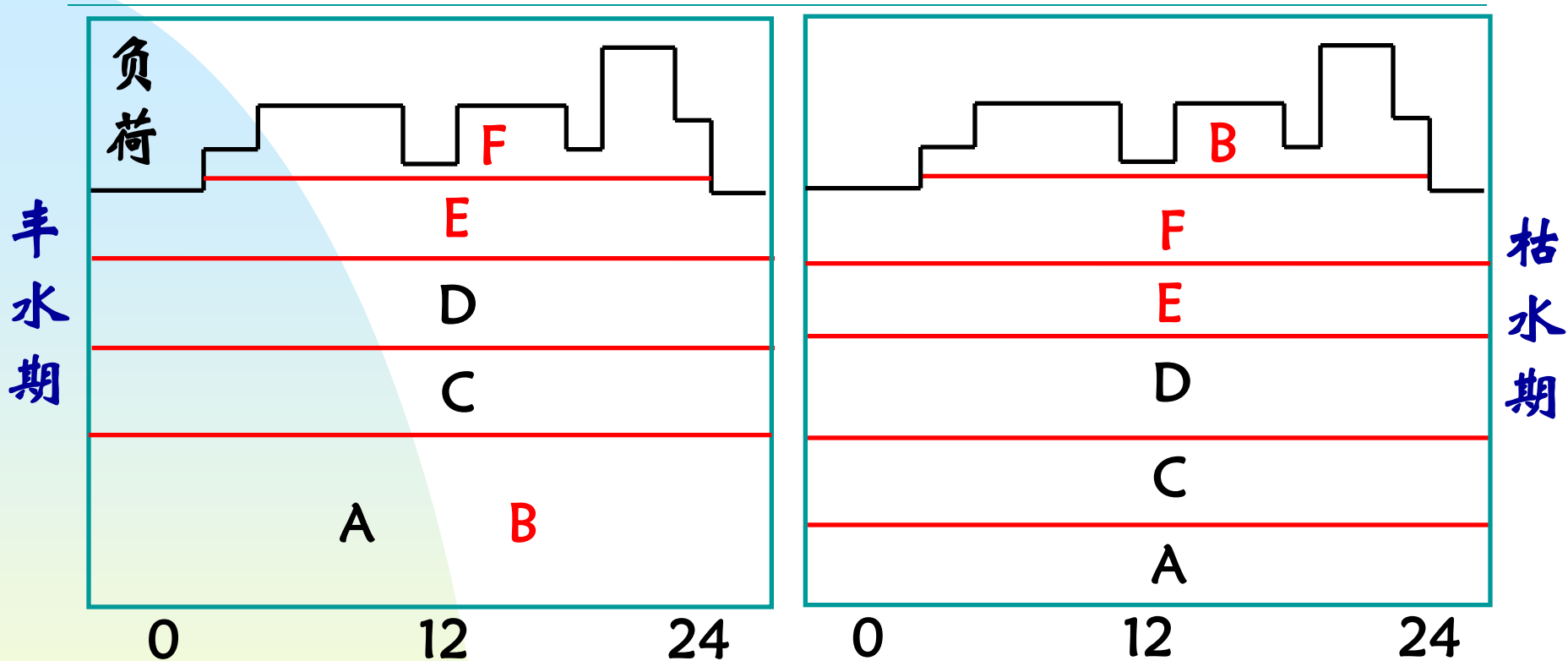
- **成本**：一次投资大，运行费低
- **调节范围**：大
- **调节速度**：投退和增减出力慢，耗能多，易损

二、负荷在各类电厂中的分配原则

经济性原则：

- 充分利用水力资源：避免弃水
- 尽最大可能消纳风电、光伏：减少弃风、弃光，满足双碳发展目标（新型电力系统的核心问题之一，研究仍待深入）
- 降低火电成本：发挥大容量高效率机组作用

二、负荷在各类电厂中的分配原则



A: 水(不可调); B: 水(可调); C: 热电

D: 核电; E: 高温压火; F: 中温压火

问题: E、F、B不同成本, 如何微观经济分配?

三、数学建模（微观）

(1) 发电成本特性

- **电力系统运行成本**：燃料、劳动力、维护等。
简化分析后仅考虑**可变成本**，主要是**燃料**
- **发电成本特性曲线 $C(P_G)$** ：单位时间内，发电机燃料成本 C (¥/h)与发电出力 P_G (MW)之间关系
- **$C(P_G)$ 取决于机组出力、标准煤耗量，煤单价**

机组耗量特性 $F(P_G)$ (t标准煤/h)

标准煤单价 K (¥/t标准煤):

$$C(P_G) = K * F(P_G)$$

(2) 发电成本特性

- 一般 $C(P_G)$ 近似为二次曲线

$$C(P_G)=a+bP_G+cP_G^2$$

- 其中 a, b, c 三系数均为正值(分析物理意义)

- ◆ $c > 0$: 曲线有极小值, 无极大值

- ◆ $b > 0$: 极小值落在 $P_G < 0$ 区间内

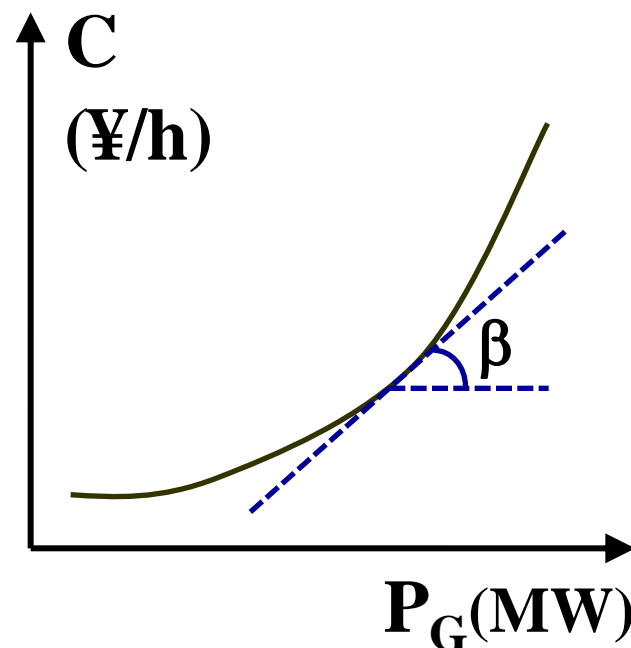
- ◆ $a > 0$: $P_G = 0$ 时, $C(P_G) > 0$

- 例: 一台300MW容量机组

$$C=9000+450P_G+0.1P_G^2 \quad (\text{¥/h})$$

$$150 \leq P_G \leq 300 \quad (\text{MW})$$

(2) 发电成本特性



$$IC = \frac{dC(P_G)}{dP_G}$$

简化分析：假定曲线**连续可导**

成本微增率IC (¥/MWh)：增加单位出力，单位时间内增加的发电成本


经济调度 (ED, Economic Dispatch)

- 意义

在满足负荷需求、保证电力安全和质量的前提下，确定**机组的出力计划**，使电力系统运行经济性达到最优

- 在**多个时间尺度**上滚动进行

负荷、新能源出力的**预测精度随时间分辨率升高而升高**，需据此制定出愈加精细的调度计划



日前调度

周期：24小时
粒度：1小时

日内调度

周期：1小时
粒度：15分钟

实时调度

周期：15分钟
粒度：5min

机组组合 (UC, Unit Commitment)

- 意义

在调度周期内合理安排**机组开停机计划**，满足系统负荷需求，使系统运行费用最少，是电网调度的重要决策过程

- 和经济调度的关系

目标函数相近：最小化经济成本

决策变量稍有不同：UC相比ED多出反映机组启停的0-1变量

UC的时间尺度大于ED：先通过UC得到机组开停机计划，再进行日前、日内和实时经济调度

三、数学建模（微观）

(2) ED模型

- **数学问题：**已知各节点有功负荷，求各机组有功出力，使发电总成本最小
- **目标函数：** $\min_{P_G} C_T = \sum_{i=1}^m C_i(P_{Gi})$
 - ◆ $C_i(P_{Gi})$ 为机组 G_i 的“成本-出力特性曲线”
- **约束条件：**
 - ◆ 等式约束：有功潮流方程（所有节点）
 - ◆ 不等式约束：

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (\text{所有发电机})$$

$$|P_{ij}| \leq P_{ij}^{\max} \quad (\text{所有支路})$$

含高维约束的大规模非线性规划问题！

四、ED问题的实用解法

(1) 传统ED (最简单情形)

- 问题简化:

- ◆ 忽略线路潮流不等式约束
- ◆ 忽略网损
- ◆ 忽略发电机出力不等式约束

- 数学模型简化:
$$\min_{P_G} C_T = \sum_{i=1}^m C_i(P_{Gi})$$

等式约束:
$$\sum_{i=1}^m P_{Gi} = P_D$$

- 潮流方程等式约束还需要吗? (考虑其作用)

(2) 传统ED的等微增率(IC)准则

- **等微增率准则（重要）**：如果存在最优解，则在最优解中，所有机组的发电成本微增率IC相等。
- **证明：用拉格朗日乘子法求解等式约束极值问题**
 - ◆ 首先构造L函数，转化为无约束极值问题：

$$\min_{(P_G, \lambda)} L = C_T - \lambda \left(\sum_{i=1}^m P_{Gi} - P_D \right) \quad \lambda: L \text{乘子}$$

- ◆ L函数取极值必要条件：（优化理论）

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = \frac{dC_T}{dP_{Gi}} - \lambda = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^m P_{Gi} - P_D = 0 \end{cases} \quad (i=1, \dots, m)$$

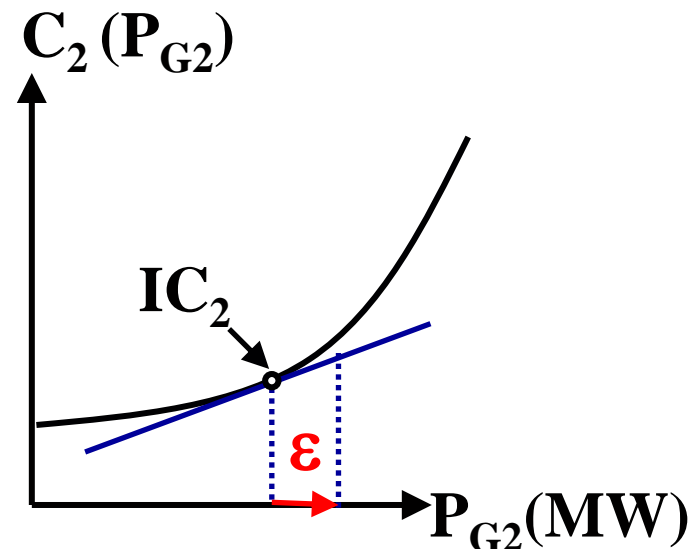
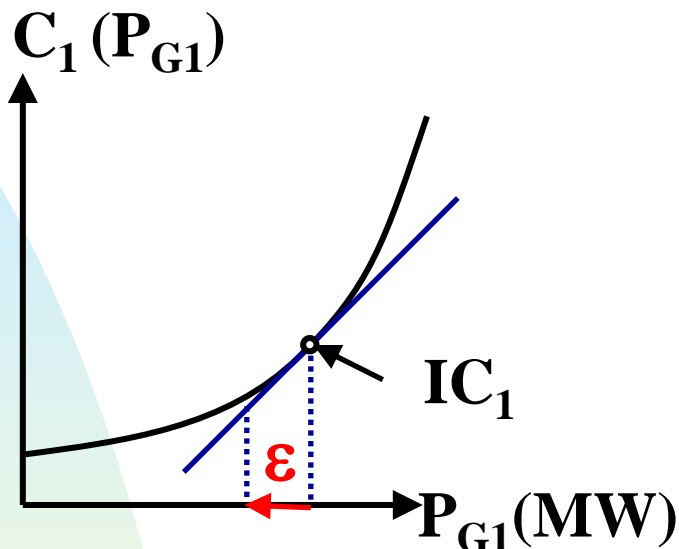
(2) 传统ED的等微增率准则

- 即：
$$\begin{cases} \frac{dC_i}{dP_{Gi}} = \lambda \\ \sum_{i=1}^m P_{Gi} - P_D = 0 \end{cases} \quad (i=1, \dots, m)$$
- 线性代数方程组： **$m+1$ 个方程**， **$m+1$ 个待求量**
- λ 为公共成本微增率**，又称**系统成本微增率**。经济学上称 λ 为**边际成本**。

思考：已知 P_D 时有 λ ，问：当 P_D 微增 ε 时，ED总成本增加多少？

(3) 如何理解等IC准则?

以双机系统为例



- 反证法：假设2机运行点的 $IC_1 \neq IC_2$ ，且 $IC_1 > IC_2$
- 将 P_{G1} 减少 ϵ ，成本减少 $\epsilon * IC_1$
- 将 P_{G2} 增加 ϵ ，成本增加 $\epsilon * IC_2$
- 总发电不变，总成本减少量 $= \epsilon * (IC_1 - IC_2) > 0$ ，因此原运行点不是最优解！

(4) 算例

例题：2机系统

$$C_1(P_{G1})=9000+450P_{G1}+0.1P_{G1}^2 \quad (\text{¥/h})$$

$$C_2(P_{G2})=25000+430P_{G2}+0.03P_{G2}^2 \quad (\text{¥/h})$$

总负荷 $P_D=700\text{MW}$ ，用等IC准则找ED的最优解

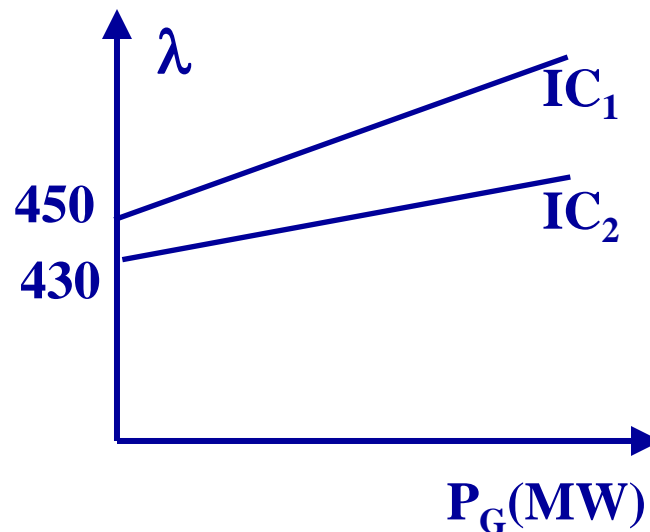
• 解：2机的IC：

$$\begin{cases} IC_1 = \frac{dC_1}{dP_{G1}} = 450 + 0.2P_{G1} \\ IC_2 = \frac{dC_2}{dP_{G2}} = 430 + 0.06P_{G2} \end{cases}$$

• IC_2 比 IC_1 低，2号机应比1号机多发电

$$\begin{cases} 450+0.2P_{G1}=430+0.06P_{G2} \\ P_{G1}+P_{G2}=700 \end{cases}$$

得 $P_{G1}=84.6\text{MW}$ ， $P_{G2}=615.4\text{MW}$ ， $IC_1=IC_2=466.9\text{¥/MWh}$



ED的解超出发电出力上下限怎么办？

(5) 如何考虑发电出力限制? (更现实)

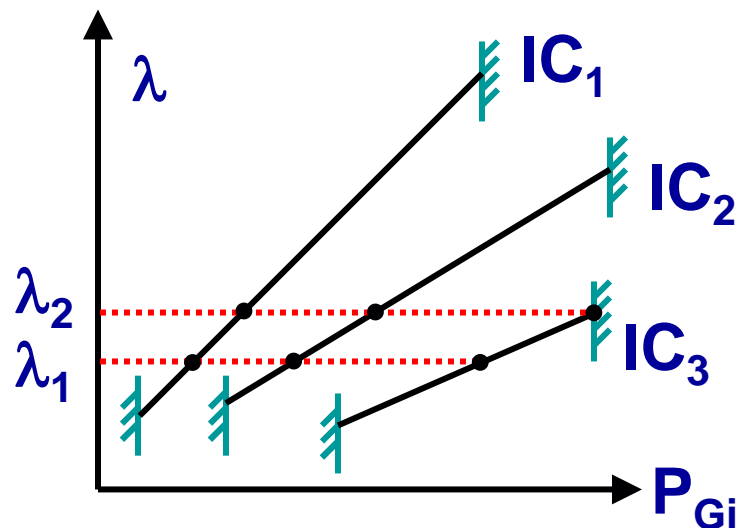
- 在传统ED模型上增加发电出力约束:

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad i=1, \dots, 3$$

- 此时如何求解ED?

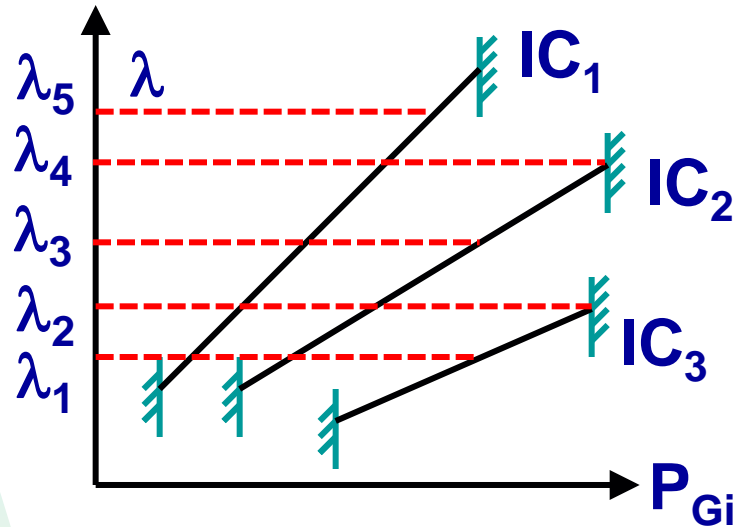
- 以3机系统为例, 找几种负荷水平加以分析:

- ◆ 若给定PD时, 系统 $\lambda = \lambda_1$, 3机都在界内, ok!
- ◆ 若PD \uparrow , 则 λ 要 \uparrow , 当 $\lambda = \lambda_2$ 时, PG3搭界, 此时将PG3固定在上限上。



发电出力约束体现在
IC曲线上

(5) 考虑发电出力限制



- ◆ 若 P_D 继续 \uparrow ,则增加的负荷由 P_{G1} 和 P_{G2} 来承担,这2台机IC须相等,即 $\lambda=\lambda_3$
- ◆ 若 P_D 继续 \uparrow ,直到 $\lambda=\lambda_4$, P_{G2} 固定在上限上。
- ◆ 若 P_D 继续 \uparrow ,只有 P_{G1} 承担增加的负荷了。

(5) 考虑发电出力限制

- 因此，有更一般ED准则：
 - (1) 找到一个 λ 初值：使所有机组IC相等，且满足出力上下限约束；
 - (2) 若 λ 不能满足负荷要求，则调整 λ ：
发电不足时， $\lambda \uparrow$
发电过剩时， $\lambda \downarrow$
 - (3) 若某机组出力搭界，则将之固定在界上；在剩余机组中继续用等IC准则调整 λ ；直到满足负荷要求。
- 思考：试用反证法来证明上述算法的正确性

(5) 考虑发电出力限制

- 扩展阅读：

上述方法**适用范围有限**——系统最大的单机组最低耗量比最小的单机组最高耗量更大，并且最优解时具有最高的最低耗量的机组和具有最低的最高耗量的机组没有同时固定在出力下限或上限时，将导致**算法偏离最优解或找不到最优解**

依照严格的理论推导，分图解和解析两种思路，提出了考虑机组上下界约束的最优负荷分配方法

参考文献（见网络学堂）

[1]丁涛,黄雨涵,张洪基等.基于等微增率并计及机组功率约束的火电机组最优负荷分配精确解[J/OL].中国电机工程学报:1-19[2023-11-14].<https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222537>.

(6) 如何考虑网损? (自学)

- 如所有发电机位于同一厂内或地理上很接近, 则忽略网损是合理的。
- 但现代电力系统中, 电厂广域分布, 网损必须考虑, 前述的ED准则必须修正。
- 考虑最简单情形: 如果系统中m台机组完全相同, 就是位置不同, 若考虑网损, 则离负荷中心越近的发电机多发电一定更经济。
- 更一般的: 若 P_D 已知, 假定网损为 P_L , 则 $P_L(P_G)$
- 这时, 功率平衡约束变为:

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

(6) 如何考虑网损? (自学)

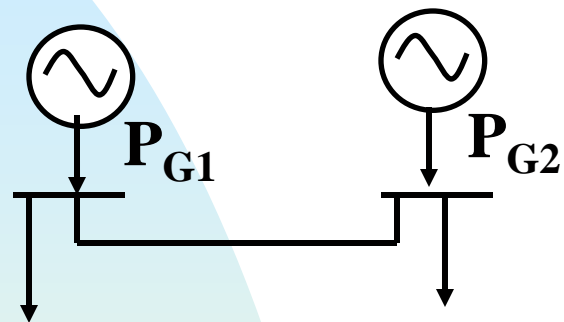
$$L = \sum_{i=1}^m C_i(P_{Gi}) - \lambda(\sum_{i=1}^m P_{Gi} - P_L(P_G) - P_D)$$

L取极值必要条件:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = \frac{dC_i}{dP_{Gi}} - \lambda(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{Gi}}) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \frac{dC_i}{dP_{Gi}} \frac{1}{(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{Gi}})} = \frac{dC_i}{dP_{Gi}} \alpha_i = \lambda \\ \sum_{i=1}^m P_{Gi} - P_L(P_G) - P_D = 0 \end{cases}$$

- 这是网损修正后的等微增率准则, α_i 称为网损修正系数, $\frac{\partial P_L}{\partial P_{Gi}}$ 称网损微增率。
- 不同发电机在电网中位置不同, 网损微增率也不同, 当 $\frac{\partial P_L}{\partial P_{Gi}} > 0$ 时, 则 P_{Gi} 增加会引起 P_L 增加, 这时 $\alpha_i > 1$, 发电机成本微增率宜取较小的数值, 反之亦然。
- 注意:** $P_L(P_G)$ 是潮流方程的隐函数, 网损微增率的实际求解(不做要求)比较复杂。

(6) 考虑网损的实例 (自学)



$$P_{D1} = 300 \text{ MW}$$

$$P_{D2} = 50 \text{ MW}$$

已知：发电机出力无限制

$$IC_1 = 0.07P_{G1} + 41 \quad \text{¥/MWh}$$

$$IC_2 = 0.07P_{G2} + 41 \quad \text{¥/MWh}$$

$$P_L = 0.001(P_{G2} - 50)^2 \quad \text{MW}$$

求：ED最优发电及网损？

解：(1) 求网损微增率

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_{G2}} = 0.002(P_{G2} - 50) = 0.002P_{G2} - 0.1$$

(2) 网损修正系数

$$\alpha_1 = 1.0$$

$$\alpha_2 = 1 / (1.1 - 0.002P_{G2})$$

(6) 考虑网损的实例 (自学)

(3) 网损修正等微增率准则:

$$\begin{cases} \alpha_1 \frac{dC_1}{dP_{G1}} = 0.07P_{G1} + 41 = \lambda \\ \alpha_2 \frac{dC_2}{dP_{G2}} = \frac{1}{1.1 - 0.002P_{G2}} (0.07P_{G2} + 41) = \lambda \end{cases}$$

(4) 初值 $\lambda_0=50$, 算出

$$P_{G1}=128.6\text{MW}, P_{G2}=82.4\text{MW}, P_L=1.0\text{MW}$$

$$\text{因为: } P_{G1}+P_{G2}-P_L=210 < P_D=350\text{MW}$$

所以: 增大 λ , 取 $\lambda=60$ 时, 出力太大, 减小 λ ,

几步迭代后, 得: $\lambda^*=56.94$

$$P_{G1}=227.72, P_{G2}=117.65, P_L=4.58$$

$$P_{G1}+P_{G2}-P_L=349.9 \approx 350, \text{ 收敛精度足够!}$$

(发电机相同, 但ED最优出力不同)



市场环境下的经济运行

- 电力市场环境下，**厂网分开**，电网公司从不同电厂购电，卖给用户
- **电网老板还会追求发电成本最小化？**
- **如果不是，那会追求什么？**

我国的电力市场化改革

三次改革

- 投资体制改革 (1985年，集资办电)

核心思想是引进外国资本、鼓励民间资本**投资建设电源**。成功解决了电源投资资金来源问题，极大地促进了电力特别是电源的发展。

- 厂网分离 (2002年，国务院出台5号文件)

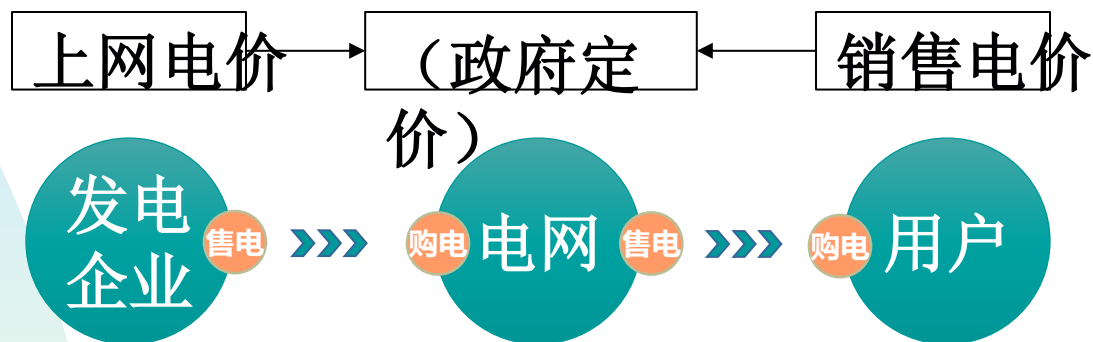
明确按照“**厂网分开、竞价上网**”的原则，将原国家电力公司一分为七，成立国家电网、南方电网两家电网公司和华能、大唐、国电、华电、中电投五家发电集团。

- 配售分开 (2015年，国务院出台9号文件)

打破电网企业的售电专营权，向社会**放开配售电业务**，推进建立相对独立规范运行的交易机构，最终形成“**管住中间、放开两头**”的体制架构。

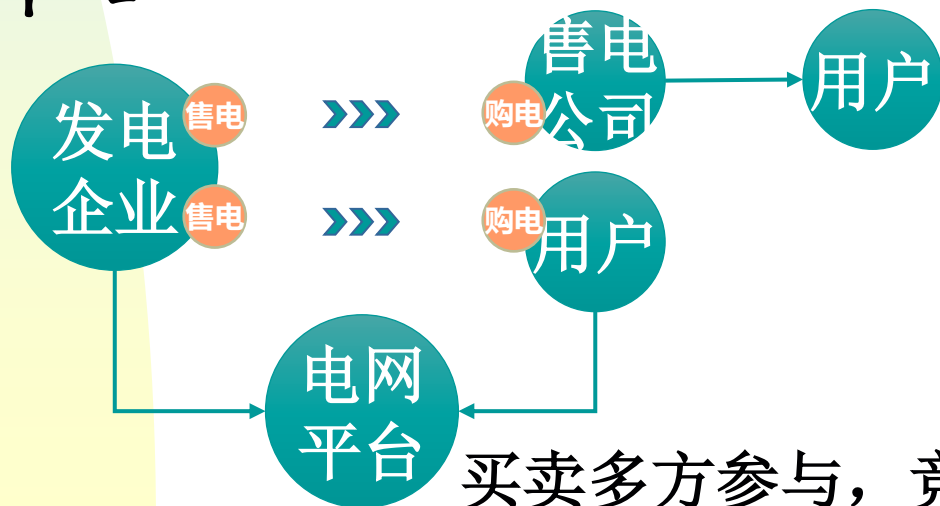
我国的电力市场化改革

市场化改革前



电网作为中间商，收购售差价

市场化改革后



买卖多方参与，竞价形成电价

§3 电力市场环境下的经济运行

一、经济调度模型（市场出清）

	传统ED	市场环境下的ED
主体关系	电厂为电网 下属公司	电厂与电网为 买卖关系
优化目标	机组 发电成本 最小 (取决于发电成本曲线)	电网 购电成本 最小 (取决于机组报价曲线)
优化结果	机组调度计划	机组中标出力曲线 及 节点电价

- 将传统ED转化为市场环境下ED的简单做法
- 用**机组报价曲线**取代**发电成本曲线**，其他约束条件和解法不变。此时目标函数变为：

$$\min_{P_G} \sum_i [P_{Gi} * PR_i(P_{Gi})]$$

一、经济调度模型（市场出清）

- **数学问题：** 已知各节点有功负荷及发电机报价曲线，求各机组有功出力，使购电总成本最小

- **目标函数：**

- ◆ $C_i(P_{Gi})$ 为机组 G_i 的“报价曲线”

- **约束条件：**

- ◆ 等式约束： $\sum P_{Gi} = \sum D_i$

- ◆ 不等式约束：

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (\text{所有发电机})$$

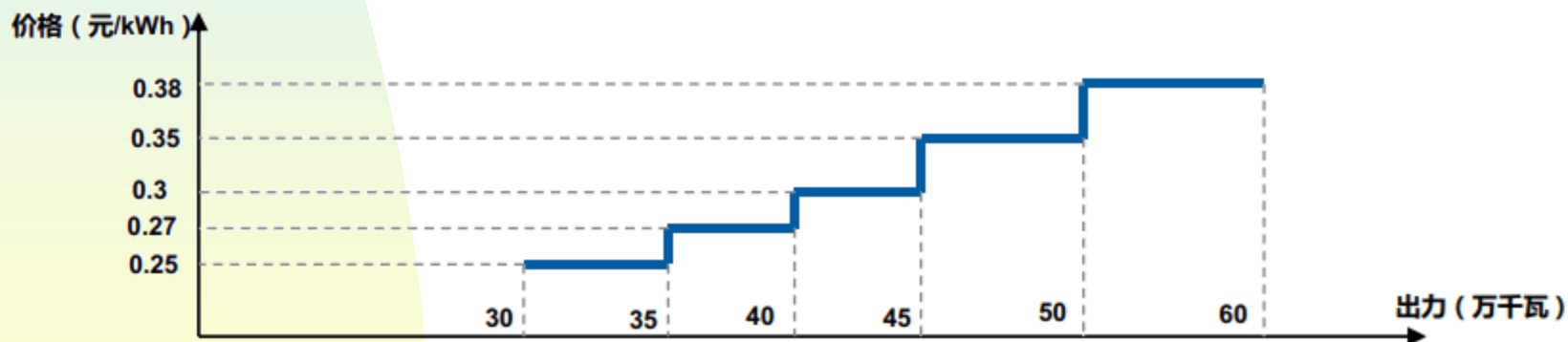
$$|P_{ij}| \leq P_{ij}^{\max} \quad (\text{所有支路})$$

一般简化为线性约束优化问题！

二、发电侧报价曲线

发电机组
电能量报价
申报表单

电厂名称	机组编号	第一段报价			第N段报价		
		起始出力 $P1_b$ (MW)	结束出力 $P1_e$ (MW)	电能量报价 $C1$ (元/MWh)		起始出力 PN_b (MW)	结束出力 PN_e (MW)	电能量报价 CN (元/MWh)
XX电厂	#1机组							
XX电厂	#2机组							
XX电厂							
XX电厂	#N机组							



- 思考其与传统ED机组发电成本曲线的区别？

实例：广东电力日前市场出清过程

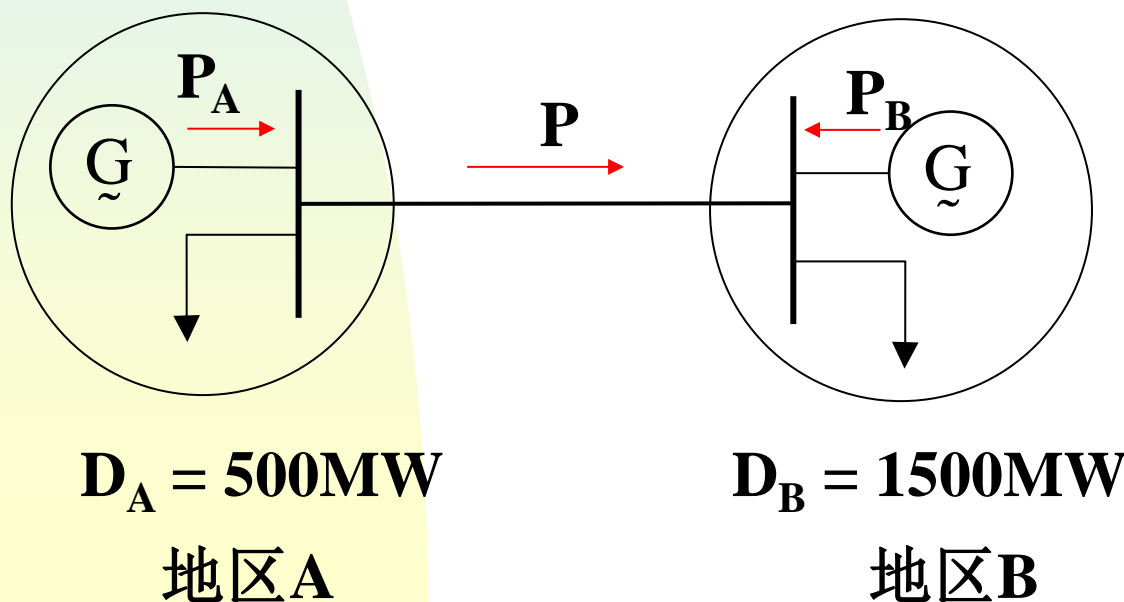


三、节点电价

- 节点电价(Locational Marginal Price, LMP)

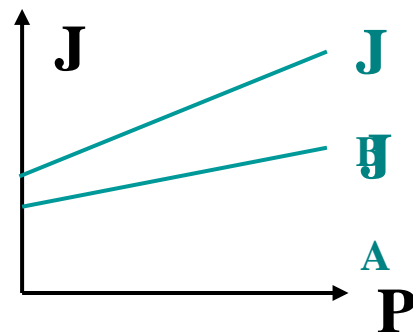
LMP是在满足ED约束条件下, 在某一节点增加单位负荷需求时, 全系统增加的最小成本(即边际成本)。

- 以两节点系统为例



地区A, B电力报价函数

$$J_A = 80 + 0.1P_A$$
$$J_B = 100 + 0.2P_B$$

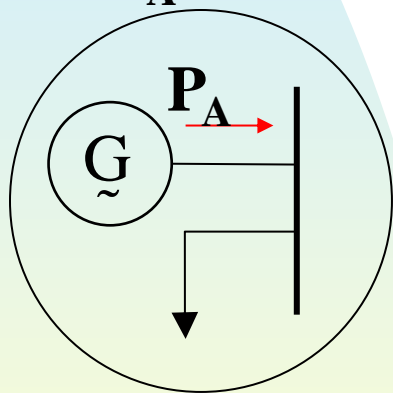


(A地机组报价更低)

三、节点电价示例

- 情形1:两地无线路互联, 独立运行。此时各地电力负荷完全由各自机组供应

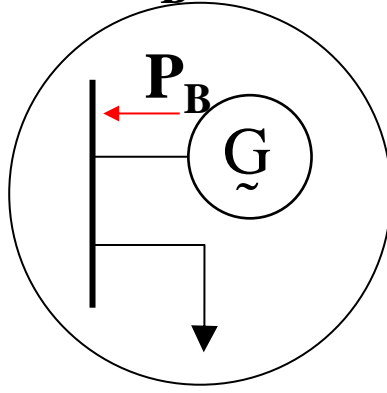
$$J_A = 130$$



$$D_A = 500\text{MW}$$

地区A

$$J_B = 400$$



$$D_B = 1500\text{MW}$$

地区B

即

$$P_A = D_A = 500\text{MW}$$

$$P_B = D_B = 1500\text{MW}$$

因此

A地电价:

$$J_A = 80 + 0.1 * 500 = 130$$

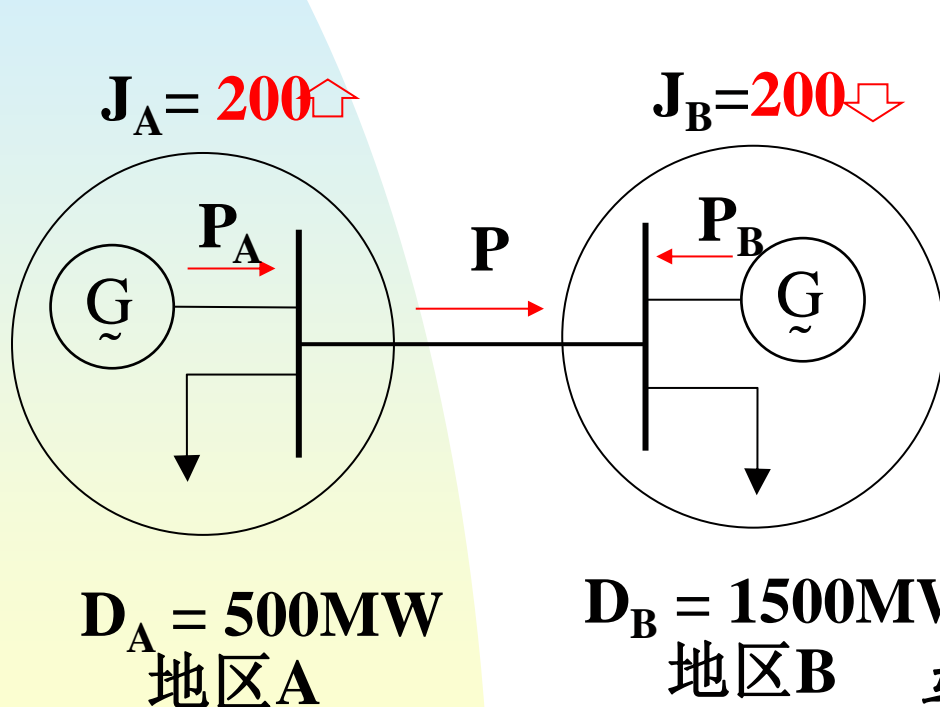
B地电价:

$$J_B = 100 + 0.2 * 1500 = 400$$

此时两地电价不相等

三、节点电价示例

- 情形2: 两地有线路互联, 不考虑互联线路的输电容量限值。此时按照等微增率原则确定机组出力



即

$$J_A = J_B$$
$$P_A + P_B = 2000\text{MW}$$

解得

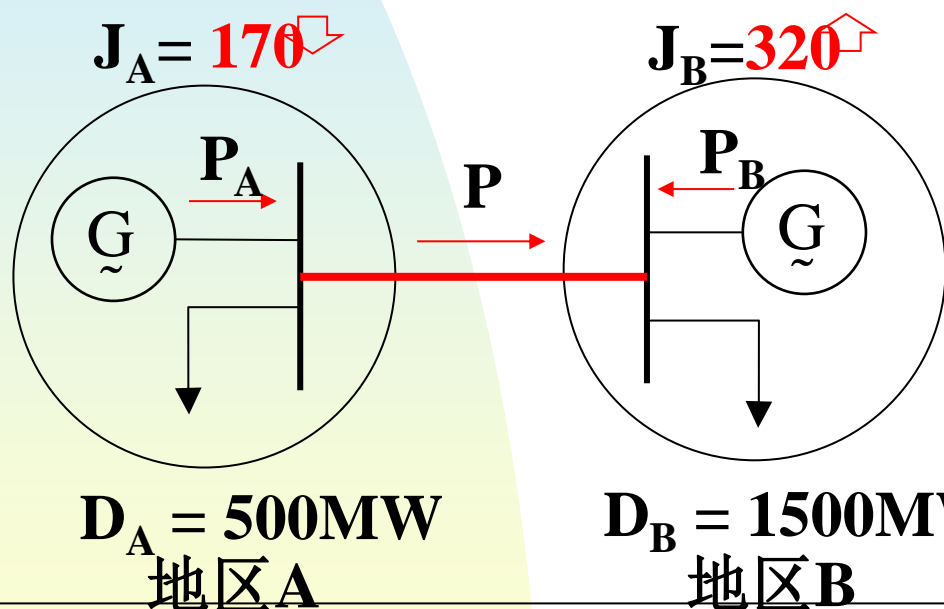
A地: $J_A = 200$
 $P_A = 1400\text{MW}$

B地: $J_B = 200$
 $P_B = 600\text{MW}$
互联功率: $P = 900\text{MW}$

此时两地电价相等

三、节点电价示例

- 情形3: 两地有线路互联, 考虑互联线路的输电容量限值为400MW。此时互联传输功率P只好由900MW降为400MW



由于互联功率相较情形2减少500MW。因此A地发电机需少发500MW, 而B地发电机需多发500MW

A地: $J_A = 170$
 $P_A = 900\text{MW}$

B地: $J_B = 320$
 $P_B = 1100\text{MW}$

互联功率: $P = 400\text{MW}$

此时两地电价不相等, 送电侧电价降低, 受电侧电价升高

*由于输电约束的存在, 导致A、B两地出现了150元/兆瓦时的价格差。这种现象称为“阻塞”。

四、节点电价特性

	情形1 (不互联)	情形2 (互联无容量限值)	情形3 (互联有容量限值)
A地电价	130	200	170
B地电价	400	200	320

- 当电网任意线路都**没有阻塞**时，全网各**节点电价相同**(如情形2)；当两地之间输电线路**出现阻塞**，将会导致各节点的**电价出现差异**(如情形3)；
- 线路阻塞将本来完整的市场分割成多个规模更小的区块，造成各个区块内新增电力需求时，都只能由本地发电机组承担，从而导致各地的边际成本存在差异(如情形3可视为情形2向情形1退化的中间过程)；

专题研讨-5（可选）

为什么会出现负电价？以实例解释背后的原理

要求：

- 1-3分钟视频
- 软件拍摄，或PPT+配音后生成视频
- 通过网络学堂上传