

有功功率与频率控制

#电力系统分析

#郭庆来

✍ 要点

1. 频率偏移有何影响？允许的频率偏移量？
2. 频率水平取决于什么？
3. 大型电力系统的频率如何控制？
4. 一次调频、二次调频和三次调频
5. 电力系统经济调度基本要求

电力系统的频率偏移

什么是频率偏移

- 实际频率对额定频率（在中国是50Hz）的偏差。
- 电力设备参数都是在额定频率下设计的，因此在额定频率下采用好的技术经济性能。

用户的观点：

- 电能是用户购买的商品，而频率合格是对这一商品**质量**的要求
- 频率偏移可能带来一系列问题
 - 异步电动机：频率变化→转速变化→影响产品质量
 - 电子设备：对频率敏感，要求很高

系统的观点：频率偏移事关系统稳定

- 火电厂内的主要设备（如水泵、风机、磨煤机）都是异步机， $f \downarrow$ ，功率输出 \downarrow ，有功发电 \downarrow ，从而导致 f 进一步 \downarrow ，继续恶化，影响稳定性
- 汽轮机：有一个固有频率（一般可能在45Hz作用）会产生共振，需要避开这个频率。如果频率下降进入到这个频率，会损害寿命，甚至导致叶片断裂
- 电机和变压器的励磁： $f \downarrow$ ，消耗的无功 \uparrow ，如果系统无功不足，会导致电压 \downarrow

频率偏移为何不可避免？

频率本质上是发电机转速 ω 的体现。发电机输入一个机械功率 P_M （原动机提供），输出一个电磁功率 P_E ，当二者平衡时， ω 和 f 都保持边。否则，就会有加速和减速， f 就会跟着发生变化。从电磁功率的视角看， P_E 总是和最终的负荷功率 P_E 平衡的（加上传输中的损耗），所以当 P_D 随机变化的时候， P_E 也会随着随机变化，而且瞬时完成（电功率的平衡）但是机械功率 P_M 不能突变，需要有一个调节过程，所以 P_M 和 P_E 一定会有一个偏差，导致 f 总是在随机变化中，因此频率偏移不可避免

允许多大的频率偏移？

国标要求： $50 \pm 0.2Hz$ ，如果AGC投运，则减小到 $\pm 0.1Hz$
这个频率偏移的相对大小，体现了一个电网自动化控制水平。

频率水平与有功平衡

负荷侧

从负荷侧看，近似为额定频率 f_N 附近的直线，定义有功负荷频率调节效应系数

$$K_D = \tan \beta = \frac{\Delta P_D}{\Delta f} MW/Hz \quad (1)$$

公式（1）表达的物理意义是频率每变化1Hz，对应的负荷功率变化多少。这种变化是由于负荷自身特性决定的，比如频率高了，负荷消耗的功率自动跟着变大。

发电侧

与负荷的不同支出在于，发电机的频率调节特性取决于调速系统，是人为设计的，我们可以整定。需要思考的是，我们希望将其设计成什么样子，比如频率下降，发电机的功率输出应该增加还是减少？（频率下降，说明发电机转速慢了，此时应该增加输入功率）

调速系统的具体原理（重要，但此处略，需要结合PPT中的动画理解）

一次调频

近似直线的有差调节（下垂控制），对应参数：

发电机静态调差系数

$$\delta = -\frac{\Delta f}{\Delta P_G} Hz/MW \quad (2)$$

此处的符号表示 f 和 P_G 的变化方向相反。 δ 是一个控制系统参数，通常可以有额定运行点和空载运行点来定出，可以整定。

$$K_G = \frac{1}{\delta} = -\frac{\Delta P_G}{\Delta f} \text{ MW/Hz} \quad (3)$$

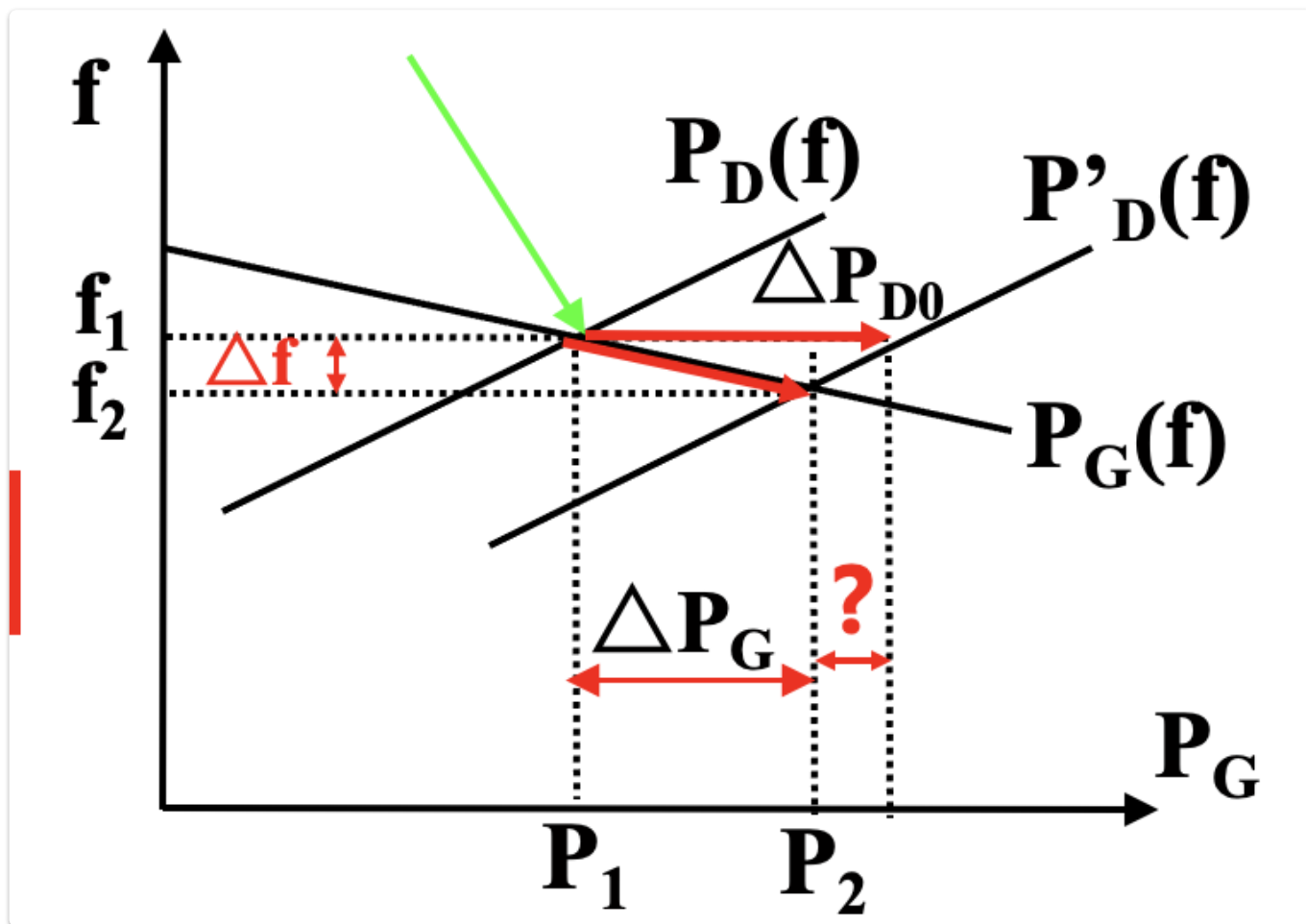
(3)和(1)是对应的，当系统频率变化时，发电机功率会自动（被控制）调整，比如频率高了，发电机的有功输出就会自动降低。

二次调频

相当于抬高了 $f - P_G$ 曲线，形成了一系列曲线族。

频率调节过程

一次调频



从这个图中，理解一次调频的过程。

- 首先是负荷发生了变化，初始的负荷增量是 ΔP_{D0} ，对应的负荷-频率曲线由 $P_D(f)$ 变为 $P'_D(f)$ ，与发电-频率曲线 $P_G(f)$ 的交点下移。

- 在新的平衡点，频率有一个下降， $\Delta f < 0$ 。这个平衡是两方面共同贡献的
 - 从负荷侧来看，随着频率下降了 Δf ，负荷原有的增量相当于缩水了一部分

$$\Delta P_D = K_D \Delta f < 0$$

- 从发电侧来看，随着频率下降了 Δf ，一次调频会自动动作，发电机出力会增加一部分

$$\Delta P_G = P_2 - P_1 = -K_G \Delta f > 0$$

- 最终实际上负荷增量是 $\Delta P_{Df} = \Delta P_{D0} + \Delta P_D = \Delta P_{D0} + K_D \Delta f$

所以在新的平衡点，根据有功平衡 $\Delta P_{Df} = \Delta P_G$ （负荷增量与发电增量相当，系统仍然平衡）

所以有：

$$\Delta P_{D0} + K_D \Delta f = -K_G \Delta f \quad (4)$$

因此：

$$\Delta P_{D0} = -(K_D + K_G) \Delta f = -K \Delta f \quad (5)$$

此处的 K 定义为整个系统的功频静特性系数： $K = K_G + K_D = -\frac{\Delta P_{D0}}{\Delta f}$

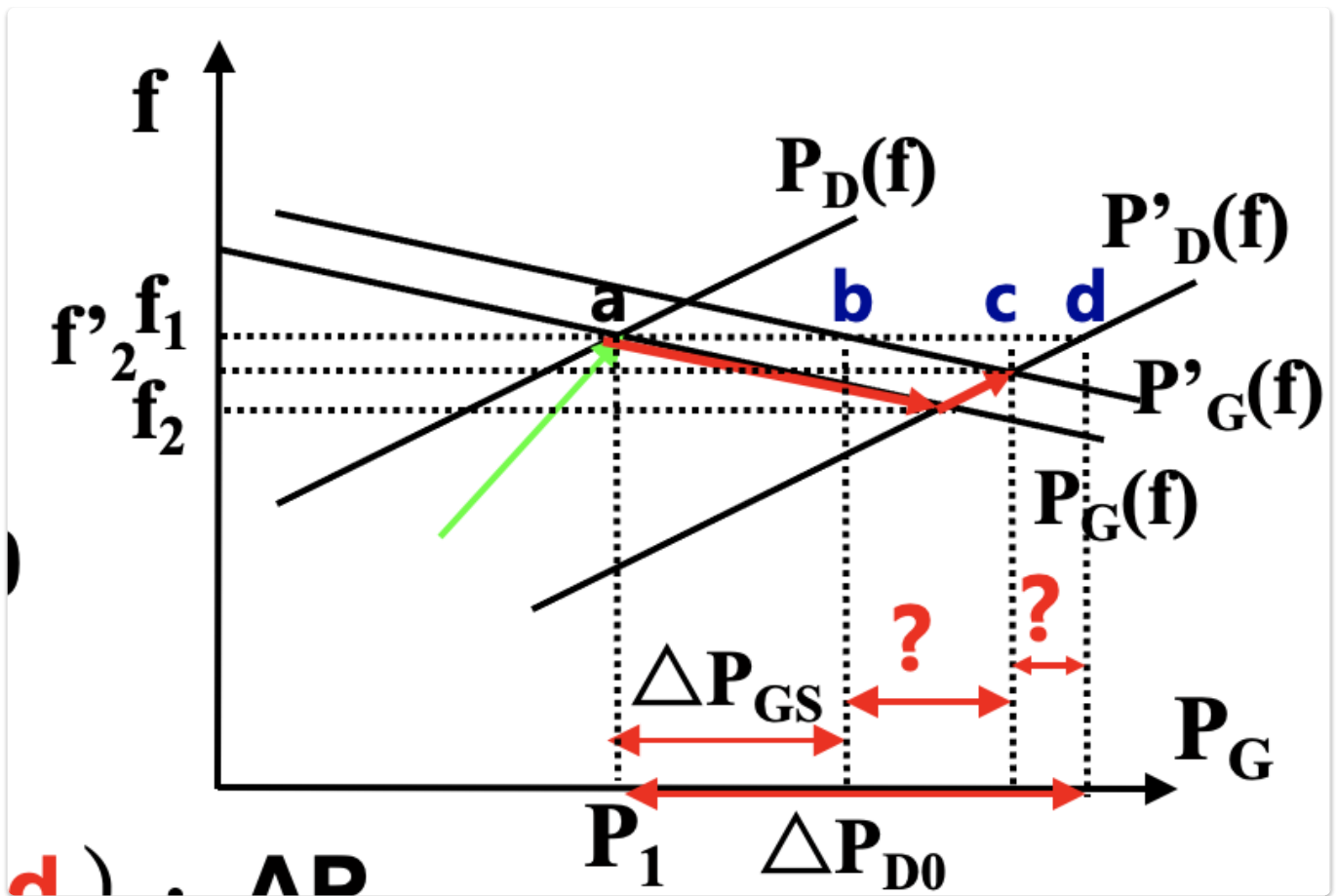
理解这一过程的物理意义：当系统中出现一个不平衡功率 ΔP_{D0} 的扰动，发电侧和负荷侧是一个“协作”的方式在应对，负荷侧由于其自身的调节效应，会自动的减少一部分功率，发电侧由于一次调频的作用，会自动的增加一部分功率，最终达到一个新的平衡态 P_2 ，但此时对应的频率是 $f_2 = f_1 + \Delta f$ ，系统平衡于一个新的频率。

如上，一次调频过程是一个有差调节过程，如果扰动 ΔP_{D0} 太大，那么没办法保证 Δf 在一定范围之内，所以需要二次调频。

为什么一次调频要设计成有差调节？

这里面涉及到一个多控制器的竞争控制问题。如果每个机组都在做无差调节，那么调节速度快的机组就会更多的承担频率调节任务，而慢的机组可能不调，这可能对于机组之间就存在不公平的问题。同时，如果每个机组都在试图将所有偏差消除掉，可能会导致振荡，导致控制系统自身的稳定性问题。因此我们将一次调频设计成有差，通过不同机组之间的调差系数设置，就可以实现将频率调节任务分解到每台机组，在保证公平性的同时也避免控制器之间产生竞争，确保稳定性。

二次调频



二次调频过程中，将 $P_G(f)$ 曲线提高至 $P'_G(f)$ 曲线，此时 f_2 变为 f'_2 ，频率提高了一些，对应初始频率的变化 $\Delta f = f'_2 - f_1 < 0$ ，比上一节对应的要小。

这里面几个部分的贡献：

- 线段c-d，体现的是负荷调节效应： $\Delta P_D = K_D \Delta f < 0$ ，自动缩水了一部分
- 线段b-c，体现的是发电机一次调频贡献： $\Delta P_G = -K_G \Delta f$ ，自动增加了一部分
- 线段a-b，体现的是发电机二次调频贡献： ΔP_{GS}

实际负荷增量： $\Delta P_{Df} = \Delta P_{D0} + \Delta P_D = \Delta P_{D0} + K_D \Delta f$

所以，有功率平衡：

$$\Delta P_{GS} + \Delta P_G = \Delta P_{Df}$$

所以：

$$\Delta P_{D0} - \Delta P_{GS} = -(K_D + K_G) \Delta f = -K \Delta f \quad (6)$$

即：

$$\Delta f = -(\Delta P_{D0} - \Delta P_{GS}) / K \quad (7)$$

如果希望频率无差，那么需要让 $\Delta P_{GS} = \Delta P_{D0}$ ，即通过二次调频，将所有初始的负荷扰动平衡掉，系统可以回到初始点。

电力系统中的有功平衡

同样分为运行中的平衡和规划设计中的平衡，在规划设计中，就必须要考虑有功备用。
备用容量的分类：

1. 按照投入时间分

- 热备用：旋转备用。实际中运行，但是留有上调或者下调的空间，备用数值上等于可能发电的最大功率和实际功率之差
- 冷备用：实际中未运行，但随时可以启动（不能处在故障或者检修），备用数值等于其可以发的最大功率。
- 冷热备用需要保持合理比例，热备用能够随时调节，但是一直保持运行状态，成本高，冷备用需要考虑启动的成本和时间。
- 必须注意：热备用机组能够提供一次调频和二次调频能力，但冷备用机组不能。

2. 按照用途分

- 负荷备用
- 事故备用
- 检修备用
- 国民经济备用

现代大电力系统如何实现频率控制

将电力负荷变化分解为三个分量

- 周期短（ $<10''$ ），幅度小，随机性大
- 周期较长（ $10'' - 3'$ ），幅度较大
- 周期长（ $>3'$ ），幅度大，表现为负荷曲线（有很强规律性）

与之对应的，三种控制方式：

- 一次调频：调速器
- 二次调频：调频器
- 三次调频：经济调度

负荷功频静特性

由公式（1）取标么值

$$K_{D*} = \frac{\Delta P_D / P_{DN}}{\Delta f / f_N} = \frac{\Delta P_{D*}}{\Delta f_*} \quad (8)$$

K_{D*} 体现了一种百分比的概念，也就是频率变化一个百分比，对应的负荷变化多少，实际系统一般取值为1~3，不同时刻、不同系统负荷组成都会变化，所以一般通过实验获得。

单台发电机的功频静特性

对 (3) 求标么值：

$$K_{G*} = \frac{\Delta P_G / P_{GN}}{\Delta f / f_N} = \frac{\Delta P_{G*}}{\Delta f_*} \quad (9)$$

K_{G*} 有调速器整定（和负荷不同），越大，其频率偏移越小，但是受限与调速机构，一般汽轮机取值25~16.7，水轮机取值50~25

多台发电机的等值功频静特性

如果频率变化 Δf ，那么第*i*台发电机功率增量： $\Delta P_{Gi} = -K_{Gi}\Delta f$

因此，N台发电机，总的功率增量：

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

由此，可以定义N台发电机的等值功频静特性 $K_G = \sum K_{Gi}$

标么值表达式：

$$K_{G*} = \frac{\Delta P_G / \sum P_{GiN}}{\Delta f / f_N} = \frac{\sum \Delta P_{Gi*} P_{GiN}}{\Delta f_*} \frac{1}{\sum P_{GiN}} = \frac{\sum K_{Gi*} P_{GiN}}{\sum P_{GiN}} \quad (10)$$

(10)式表明， K_{G*} 是每台机组功频静特性 K_{Gi*} 的加权平均，加权系数就是机组容量占全部容量的占比。

几点注意：

- 发电机越多， K_G 越大，系统频率越稳定，相当于一个扰动，由很多个发电机来共同承担
- 如果发电机已经满载，那么就不能够再增加功率了，相当于此时 $K_{Gi} = 0$

系统的功频静特性

有名值表达：

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

换成标么值代入

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

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

定义：

$$K_* = K_{G*} \frac{P_{GN}}{P_{DN}} + K_{D*} = \rho K_{G*} + K_{D*}$$

其中 $\rho = \frac{P_{GN}}{P_{DN}}$ 表示备用系数。 K_* 越大，那么同样比例的负荷扰动 ΔP_{D0*} 引起的频率变化就越小。如何增加 K_* ？

- 增加 K_{G*} ，需要改进调速器，有上限
- 提高备用系数 ρ ，多开机（成本需要考虑）
- 改变 K_{D*} ，以前负荷侧动不了，智能电网时代可以通过负荷侧的控制，提供调频支撑，但不过如何努力，最终还是有差调节，所以不能只依赖于一次调频，还必须引入二次调频。

现代大系统频率控制的基本原则

- 带调速器的机组，只要有可调容量，都参加一次调频
- 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）
- 要求参与调频的机组：有足够可调容量、调整速度，调整时能满足安全与经济的要求
- AGC系统是一种集中控制，从控制中心给出控制指令，下发给每个电厂执行

经济运行与控制

#电力系统分析

#郭庆来

✍ 要点

什么是电力系统经济运行？

如何实现经济运行

电力市场下经济运行有何变化？

什么是电力系统经济运行？

不同发电机特性各不相同，成本也不一样，因此存在多种可能的组合满足系统运行要求，如何在这其中找到整体成本最小（最为经济）的运行方式？

电力系统的经济运行是指：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。

经济运行的前提是：供大于求。即发电容量>系统负荷，这才有多种的发电组合，可以有经济优化空间。

术语：经济调度 (Economic Dispatch: ED)

约束条件：满足负荷需求；保证电力安全和质量；

目标函数：经济性最优

包括有功经济调度和无功经济调度。本课程重点讨论有功经济调度。

宏观视角下的经济运行

各类电厂的技术经济特点

火电厂

- 成本：高，需要购买和运输燃料，而且不可再生
- 效率：依赖于蒸汽参数，温压越高，效率越高
- 调节范围：有最小技术负荷限制，即为了保证正常运行，其出力不能低于某一个数值，温压越高，可调范围越窄。也就是说，其出力范围一般不是 $[0, P_{max}]$ ，而是 $[P_{min}, P_{max}]$ ， P_{min} 一般是额定出力的一个百分比（比如：60%），因此一台火电机组一旦运行，就必须承担一个最小的出力值。在新能源电力系统的运行场景下，为了消纳更多风电，经常需要火电机组的调节下限尽可能低，因此要做灵活性改造，主要是提高深度调峰能力（比如，最小出力达到30%以下）。
- 调节速度：投退慢，增减出力也慢，还有各种辅机，所以调节过程中耗能也多
- 特殊：热电厂，利用抽汽供热，效率更高。但其最小技术负荷取决于热负荷，属于强迫功率（为了保证城市供热，就必须保持一个特定的电功率输出水平），因此在北方冬季，往往弃风更为严重，因为必须优先保证热电机组的出力。

水电厂

- 成本：很低，无须燃料费，而且可以梯级利用开发，属于可再生能源
- 调节范围：大（超过50%）
- 调节速度：快，操作容易
- 出力约束主要取决于水量和水位差，受来水影响大（联想：2022年四川高温缺水导致的限电），此外，还收航运、防洪、灌溉等其他因素影响。因此不一定适应电力负荷，需要和火电配合

核电厂

- 成本：一次投资大，但运行费低
- 调节范围：大。但实际中，往往不让调节，国内主要让核电厂带基荷。
- 调节速度：投退和增减出力都比较慢，耗能多

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
- 最大化消纳风电、光伏
- 降低火电成本：发挥大容量、高效率机组的作用

微观视角下的经济运行——数学建模

发电成本特性

发电机成本特性曲线： $C(P_G)$ ，表明发电机燃料成本和发电出力之间的关系，取决于机组出力、标准煤耗量、煤单价，一般都归算为标准煤（不同类型煤差别太大）

$$C(P_G) = K \times F(P_G)$$

- $F(P_G)$ ：机组耗量特性（换算成标准煤 t/h）
- K ：标准煤单价（¥/t，换算为标准煤）

典型曲线近似二次曲线，假设曲线连续可导，定义成本微增率IC（¥/MWh）：增加单位出力，单位时间内增加的发电成本

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

一般来说， $C(P_G)$ 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：

- $c > 0$ ：曲线有极小值，无极大值（如果有极大值，说明可能出现发电越多，成本越小...）
- $b > 0$ ：说明极小值是在 $P_G < 0$ 的区间内，也就是说只要出力大于0，费用就是增加的
- $a > 0$ ：说明不出力的时候，成本也是大于0的。

经典ED模型

数学问题：已知各个节点的有功负荷，求各机组的有功出力，最终使发电的总成本最小。

目标函数：

$$\min_{P_G} C_T = \sum_{i=1}^m C_i(P_{Gi})$$

约束条件：

- 等式约束：有功潮流方程
- 不等式约束：发电机出力上下限约束；支路潮流约束

总体上看，是一个含高维约束的大规模非线性规划问题，求解难度很大。

简化形式

将经典ED问题简化为一个最简单的形式：

- 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

问题可以简化为：

$$\begin{aligned} \min_{P_G} C_T &= \sum_{i=1}^m C_i(P_{Gi}) \\ s. t. \quad &\sum_{i=1}^m P_{Gi} = P_D \end{aligned} \quad (11)$$

由于忽略了各个支路的潮流不等式约束和网损，因此不需要在列写潮流方程等式约束，而是将其简化为总发电与总负荷平衡约束。

上述问题(11)如果存在最优解，那么在最优解处，所有机组的发电成本微增率IC相等。这一准则即**等微增率准则**

数学证明思路：

通过构造拉格朗日函数，将（1）转化为无约束极值问题：

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

根据优化理论，该函数取极值的必要条件：

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = \frac{dC_T}{P_{Gi}} - \lambda & = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^m P_{Gi} - P_D & = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式 (12) 实际上是一组线性代数方程组， $m+1$ 个方程， $m+1$ 个待求量，可以直接求解。此处的 λ 称之为公共成本微增率（系统成本微增率），在经济学上是边际成本的概念。可以通过反证法理解为何等微增率下是最优解。

在实际中，要考虑发电机出力限制。因此对于低成本的机组，一旦搭界，就保留在其限值上。

进一步考虑网损

功率平衡约束变为：

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

此时对应的等微增率要做修正，需要考虑 $\frac{\partial P_L}{\partial P_{Gi}}$ 的影响，从物理概念上将，如果 P_{Gi} 增加会导致网损 P_L 增加，那么此时发电机成本修正后的微增率要适当减小（减少其可能出力）。