

第四章 电力系统稳态运行与控制

(Power System Steady State Operation and Control)

(认识 → 改造)

第一讲 无功功率及电压控制

Reactive Power and Voltage Control

问 题

- 1、**电压偏移**有何影响？允许电压偏移量？
- 2、**电压水平**取决于什么？（与**无功**强相关）
- 3、**无功电源**主要有哪些？
- 4、**大电网的电压控制**有何特点？
- 5、主要的**控制措施**有哪些？

§1 电力系统的电压偏移

一、电压偏移对电能用户的影响？

- 什么是电压偏移？
- 电力设备在额定电压下设计：好技术经济性能
- 用户观点：要求提供V合格的优质电能商品

影响举例：

- 异步电动机：V低，定子 i ↑，温↑，老化快或烧电机；V高，破坏绝缘。
- 电子设备：对V敏感，要求更高，现代投资环境

二、电力系统观点：电压偏移对自身的影响

- V低：电能**损耗**大，且危及系统**稳定性**
- V高：破坏**绝缘**，超高压线路**电晕损耗**

三、电压偏移可以避免吗？

- 负荷随机变化
- 风光发电间歇性
- 电网结构经常变化
- 大电网节点众多

电压时空变化
变化随机性大

- 结论：电压偏移不可避免

四、电压偏移的允许范围？

我国规定的允许偏移

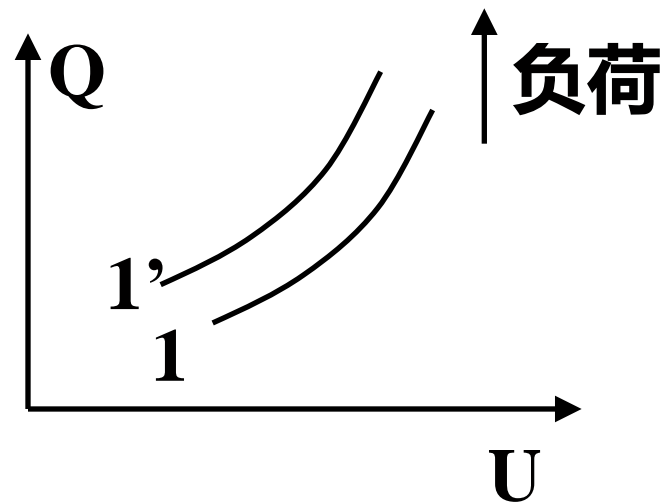
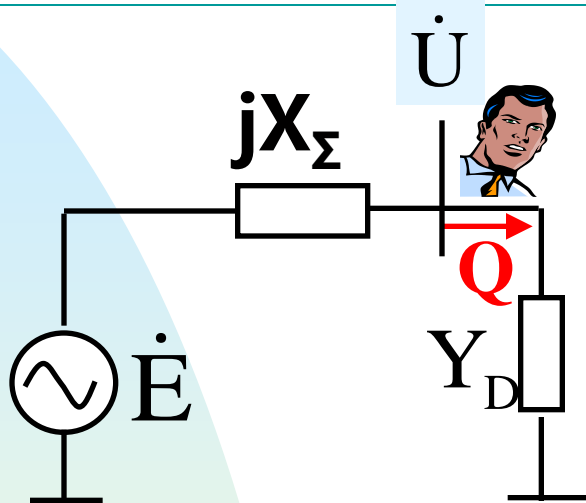
电网额定电压	电压允许偏移
35kV及以上	$\pm 5\%$
10kV及以下	$\pm 7\%$
低压照明	$+5\% \sim -10\%$
农村照明	$+7.5\% \sim -10\%$
事故时	再加5%，正偏移不能超过10%



- 如何将电压**控制**在允许范围内？
- 首先要研究的问题是：
电力系统的电压水平取决于什么？

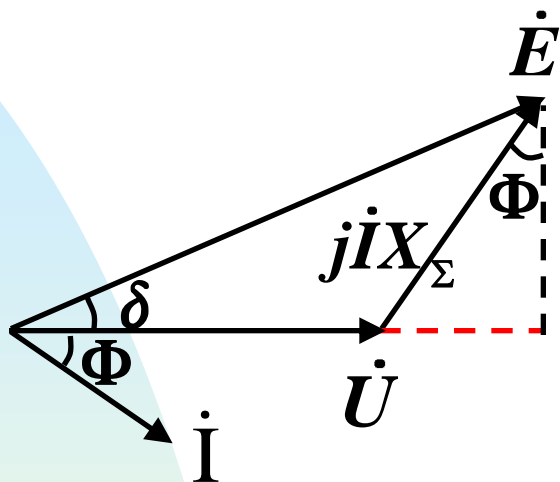
§2 电压水平到底取决于什么？

一、小案例：用无功平衡确定电压水平



- PQ解耦特性：只研究 Q 与 U 的关系
- 负荷无功—电压的静态特性
- 曲线族

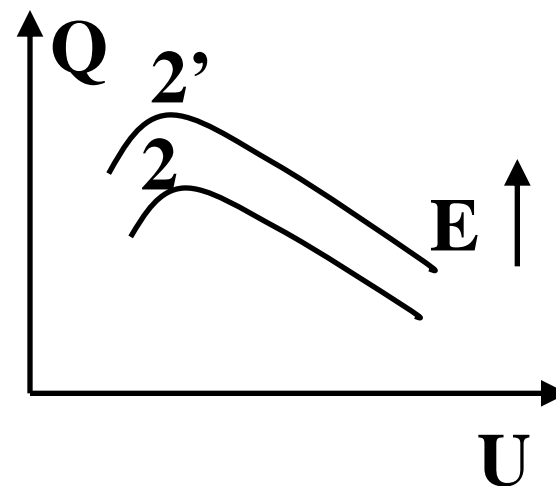
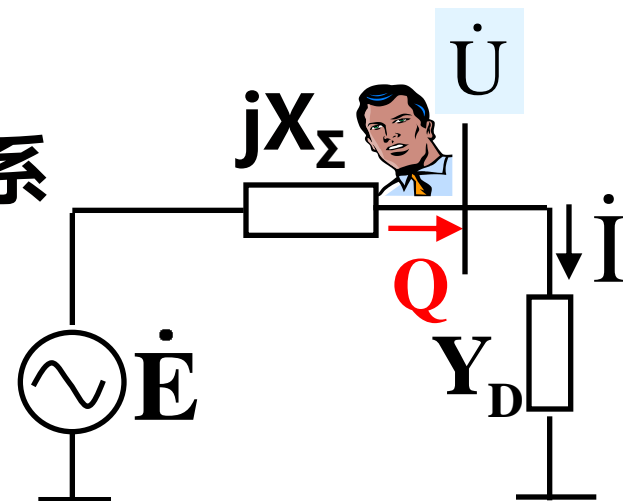
- PQ解耦：只研究**Q**与**U**的关系



$$Q = UI \sin \Phi = U \cdot \frac{IX_{\Sigma} \sin \Phi}{X_{\Sigma}}$$

$$= U \frac{E \cos \delta - U}{X_{\Sigma}}$$

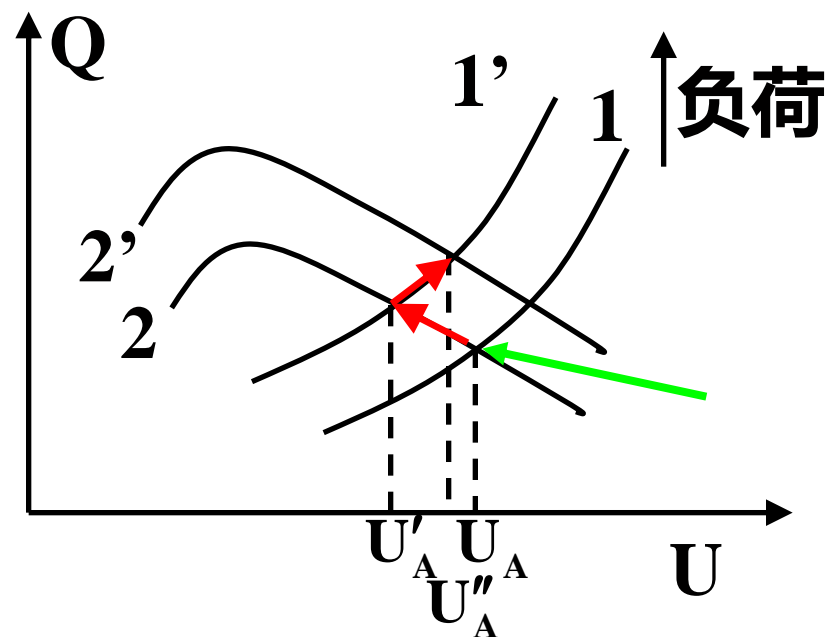
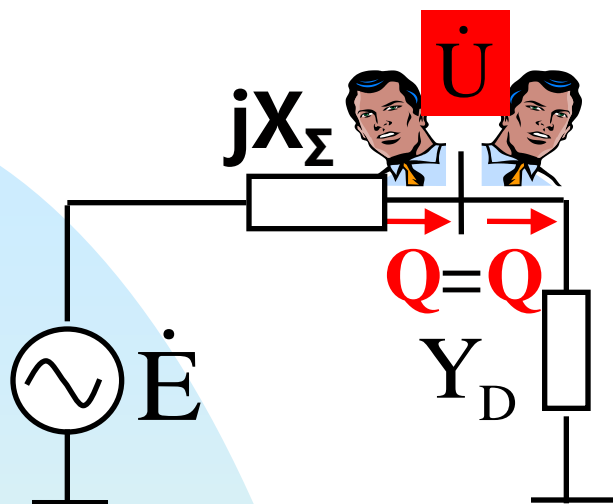
$$= \frac{U}{X_{\Sigma}} (E \cos \delta - U)$$



系统无功电压静特性：


近似二次曲

线



- **无功平衡：几何图解**
- **负荷增加：电压下降，过低**
- **电压控制： $E \uparrow$**
- **结论1：电压水平由无功平衡水平决定**
- **结论2：实现无功功率在额定电压下的平衡是保证电压质量的基本条件。要求：无功电源充足**

二、电力系统中的无功平衡

- **全系统**的无功平衡：
 - **运行中**： $\sum Q_G = \sum Q_D + \sum Q_L$
 - **规划设计**： $\sum Q_N = \sum Q_G + \sum Q_R$
- 问题是：单凭发电机行吗 

电力系统中的无功平衡

实际负荷的**功率因数**低(0.7左右),而发电机的高(0.8~0.9) **(有什么问题?)**

网损: 无功“损耗” > 有功损耗

$$\Delta Q_s = \frac{P_s^2 + Q_s^2}{U_s^2} X$$

线路无功消耗: 约 Q_D 的25%

多级变压器无功消耗: 约 Q_D 的50~75%

系统中**总无功“损耗”** \approx 无功负荷 Q_D

结论: 需要的无功电源=**2***无功负荷

电力系统中的无功平衡

- 更麻烦的是，无功**不能远距离输送**：

功率损耗 $\Delta P_s = \frac{P_s^2 + Q_s^2}{U_s^2} R$

$$\Delta Q_s = \frac{P_s^2 + Q_s^2}{U_s^2} X$$

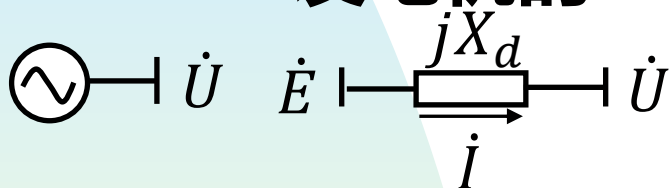
电压损耗 $\Delta U_s \approx \frac{Q_s X}{U_s}$

- 无功平衡要求：
 - 1、**全系统平衡**(运行、规划设计)
 - 2、**局部地区基本平衡**(避免无功远距离输送)
- 结论：除发电机外,需就地设置**其它无功电源**以满足电压要求，称：**无功补偿**（重要！）

§3 电力系统的无功电源

一、发电机

- 发电机：**唯一的有功电源、基本的无功电源**
- 发**无功**的能力：与同时发出的**有功**有关，由发电机的**PQ极限曲线**决定！



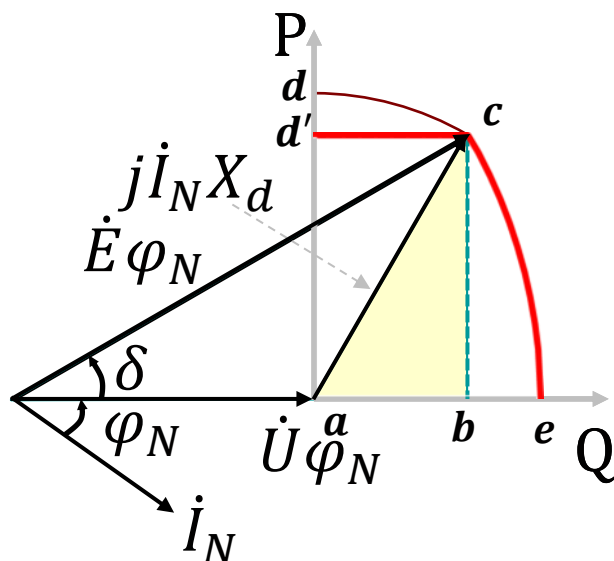
功率三角形

定子电流限制

励磁电流限制

原动机限制

PQ极限区域

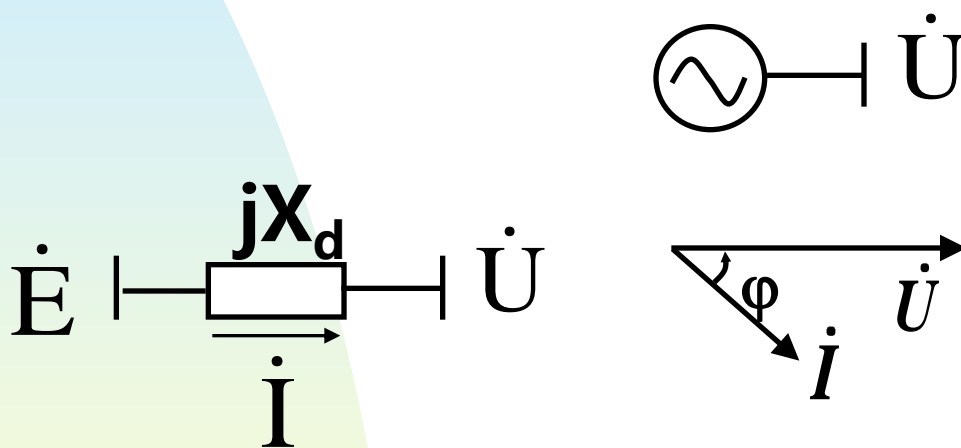


S P
 Q

- 有功备用足够时, 可让负荷中心的发电机少发有功、多发无功, 有利于无功的局部平衡, 提高系统电压水平。

二、同步调相机

- 同步调相机：特殊同步电机，不发 P_G 的同步发电机，或不带 P_D 的同步电动机

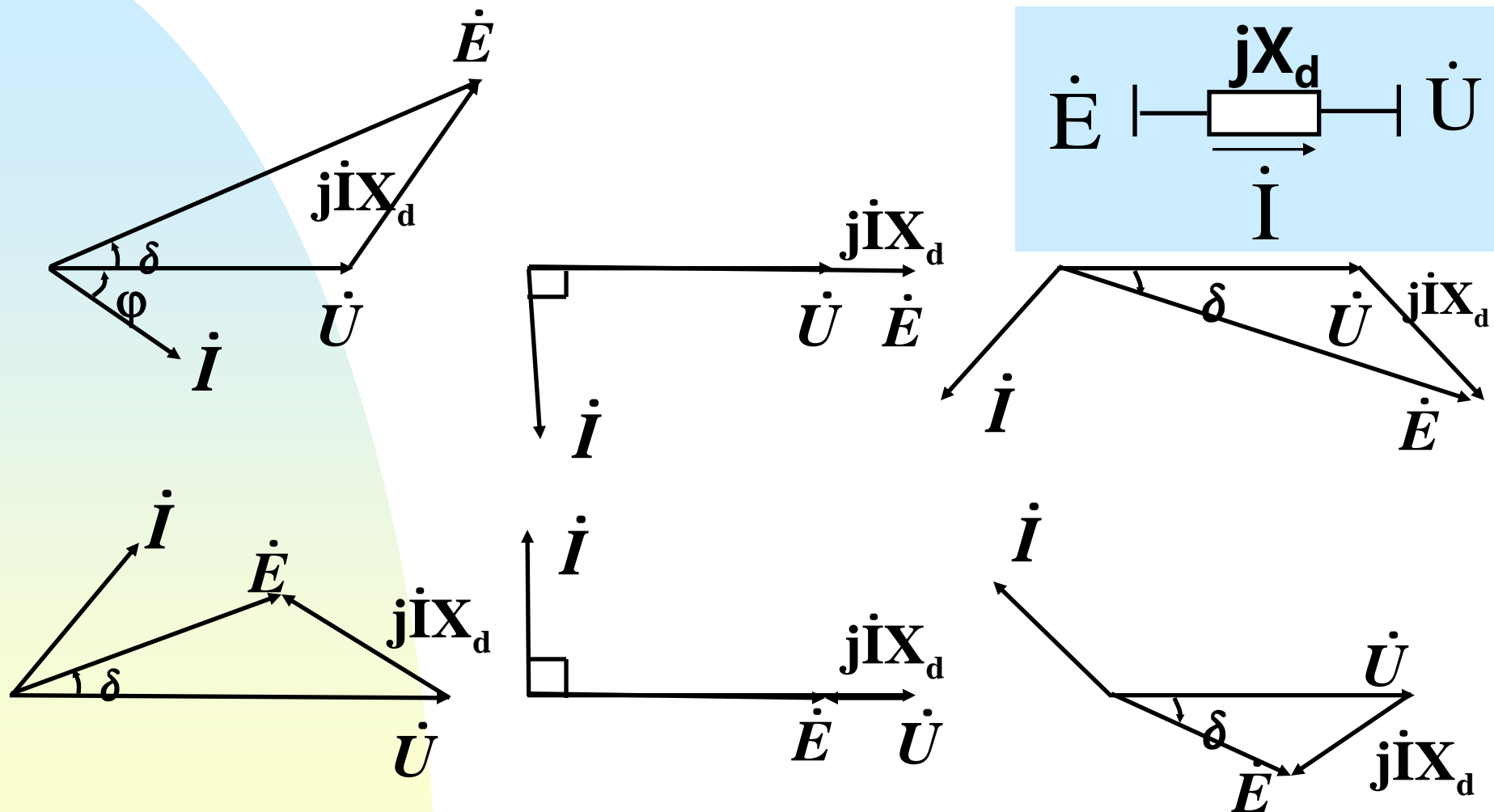


$$Q_G = UI \sin \varphi$$

- 过激（迟相）运行时发出 Q_G （无功电源）（ $0 < \varphi < 180^\circ$ ）
- 欠激（进相）运行时吸收 Q_G （无功负荷）（ $-180^\circ < \varphi < 0$ ）

分析同步电机的6种运行状态? (电机学)

有功: **发电/调相/电动**, 无功: **电源/负荷**



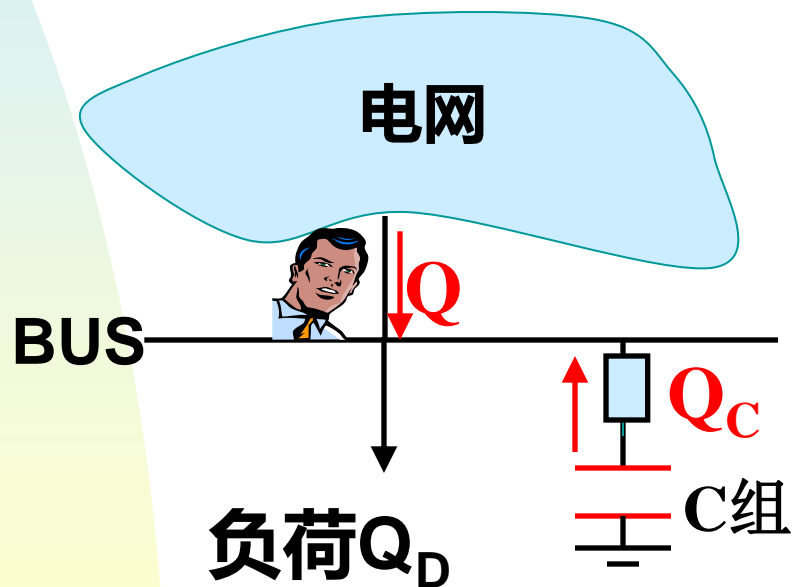
(1) 有功无功定义; (2) 潮流流向特性验证

同步调相机

- 优点：
 - 调节平滑
 - 电源或负荷：升压/降压均可
 - 强励：故障时也能调，有利于稳定性
- 缺点：
 - 旋转机械设备：投资大，维护量大，损耗大（额定容量的1.5~5%）
- 一般安装在枢纽变，平滑调压，提高稳定性
- 近些年在直流换流站、风电基地广泛应用

三、静电电容器

- 重要的无功补偿设备
- 应用得非常普遍



就地补偿!
--功率因数考核

静电电容器

• 优点:

- 可分散、集中补偿，可分相补偿，可根据负荷情况分组投切；
- 投资少、有功损耗少(额定容量的0.3~0.5%)，
- 无旋转部件，维护量小

• 缺点:

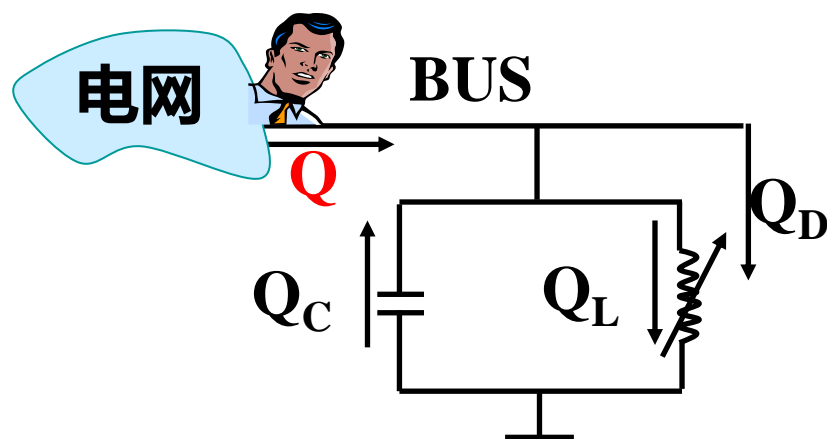
- $Q_C = \frac{U^2}{X_C} = U^2 \omega C$ ，电压下降时急剧下降，不利于电压稳定。
- 不能连续调节，动作次数受限。

四、静止无功补偿器

(SVC: Static VAR Compensator)

一类**先进无功补偿装置**：近年来发展很快，国内外大量使用

很多种类，原理图：



负荷变化时，快速控制，使母线电压维持不变。

静止无功补偿器

从无功补偿角度来看: $Q = Q_D + Q_L - Q_C$

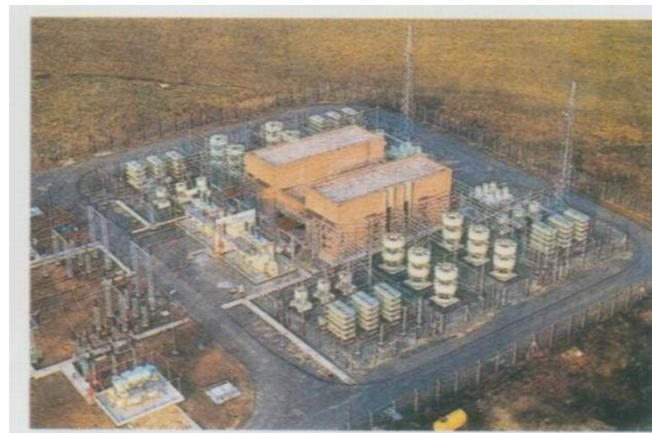
负荷变化时: $\Delta Q = \Delta Q_D + \Delta Q_L - \Delta Q_C$

若电压维持不变: $\Delta Q_C = 0$ $\Delta Q_L = -\Delta Q_D$

可控硅控制电抗器型SVC: 通过控制**可控硅导通角**, 改变SVC吸收的无功功率 (电力电子技术)



118. 安装在500kV变电所中的静止无功补偿装置
(参见条目 静止无功补偿装置)



119. 阿根廷塞坝 (Segba) 的两组静止无功补偿装置

静止无功补偿器

- **优点:**
 - 调节能力强, 特性平滑
 - 反应速度快, 可用于暂态支撑
 - 可分相补偿
 - 损耗小, 维护简单
- **缺点:**
 - 最大补偿量正比于电压平方, 电压低时补偿量小
 - 谐波污染

五、高压输电线的充电电容


$$Q_P = U^2 B_L$$

电压kV	110 单导线	220		500 三分裂	750 四分裂
		单导线	双分裂		
充电无功 (Mvar/100km)	3.4	14	19	105	240

高压线固有, 当无功过剩 (何时?) , **电压偏高**, 要采取措施(如: **并联电抗器**)

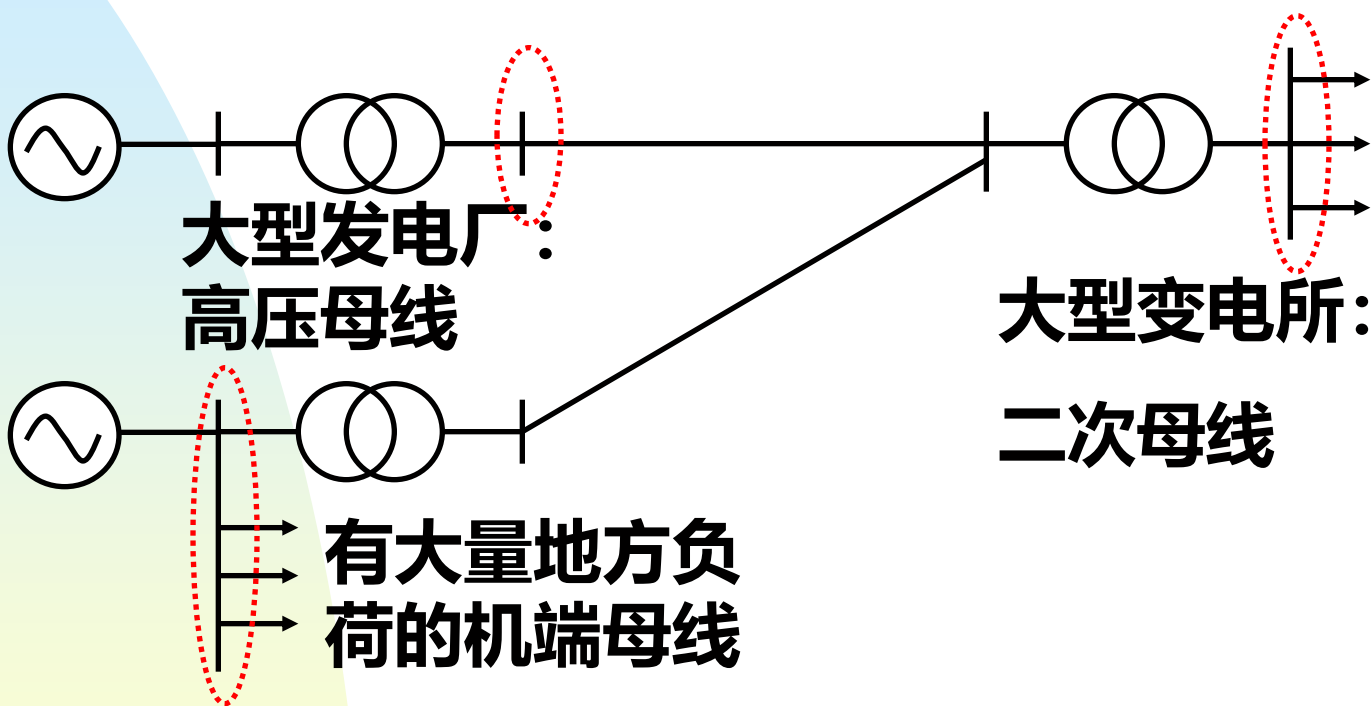


§4 现代**大电网**的电压如何控制？

- 负荷节点：**数量多且分散**，不可能对所有节点的电压进行直接控制。
- 我们该怎么办 
- **降维！** ——Why possible?

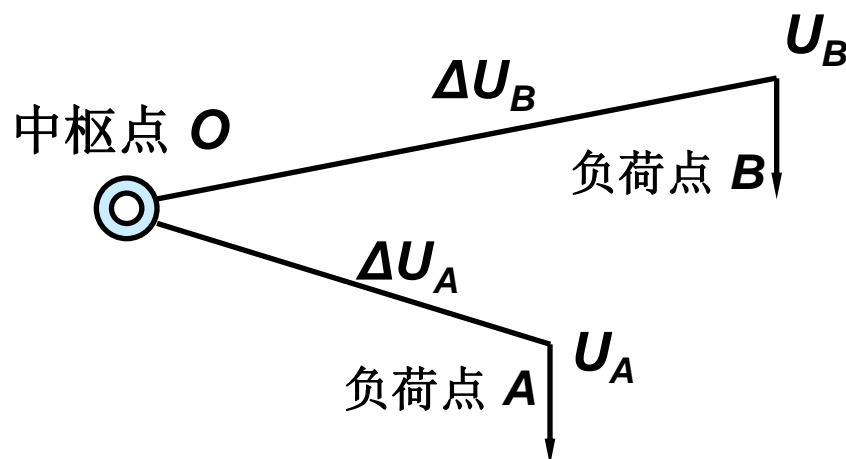
一、中枢点的选择

- **中枢点:电压水平具有代表性的关键母线**



- **认为:** 只要控制好中枢点电压, 其它母线的电压就能满足要求。
- **问题是:** 中枢点是否真正具有代表性?

分析中枢点和所代表的负荷电压间的关系(自学)



结论：由中枢点供电到不同负荷点的电压损耗不能太大

怎么做？基于电气距离的聚类分析

二、中枢点电压控制方式（原则）

(1) 逆调压（难）：

最大负荷，高电压(电网额定电压+5%)

最小负荷，低电压(电网额定电压)

适用：中枢点到各负荷点远、负荷变化较大。

(2) 顺调压（易）：

最大负荷时，低电压(不低于电网额定电压+2.5%)

最小负荷时，高电压(不高于电网额定电压+7.5%)

适用：中枢点到各负荷点近，负荷变动小。

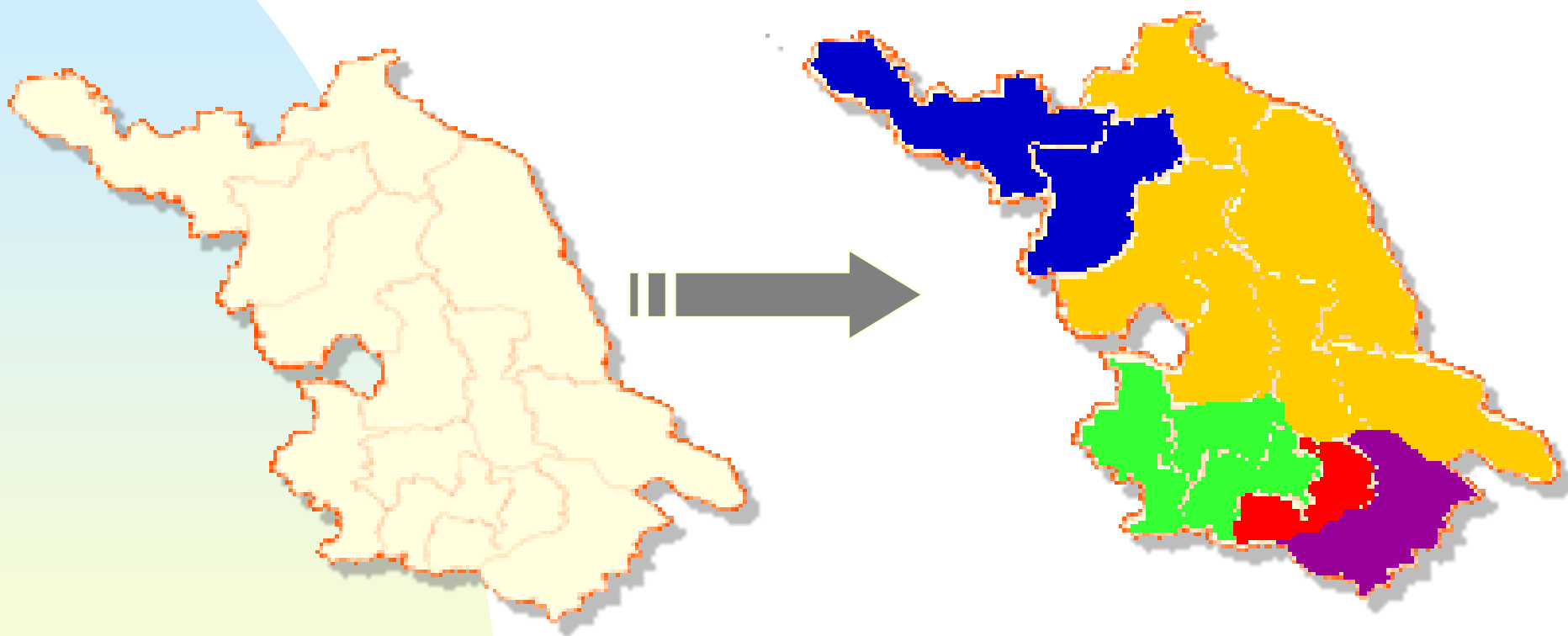
中枢点电压控制方式（原则）

(3)恒调压（中）：

保持在比电网额定电压+2~5%

适用：介于上述两者之间。

江苏省电网自动电压控制系统(AVC)

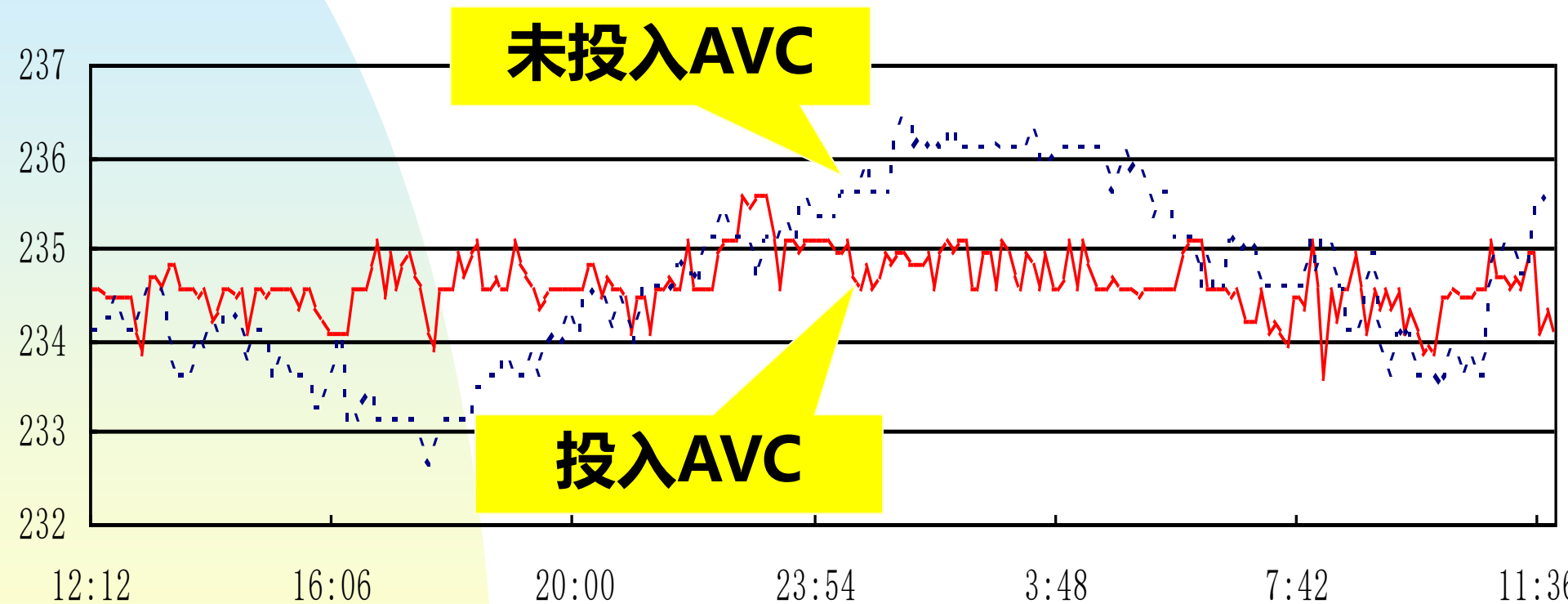


中枢母线

梨园变220kV_BUS I

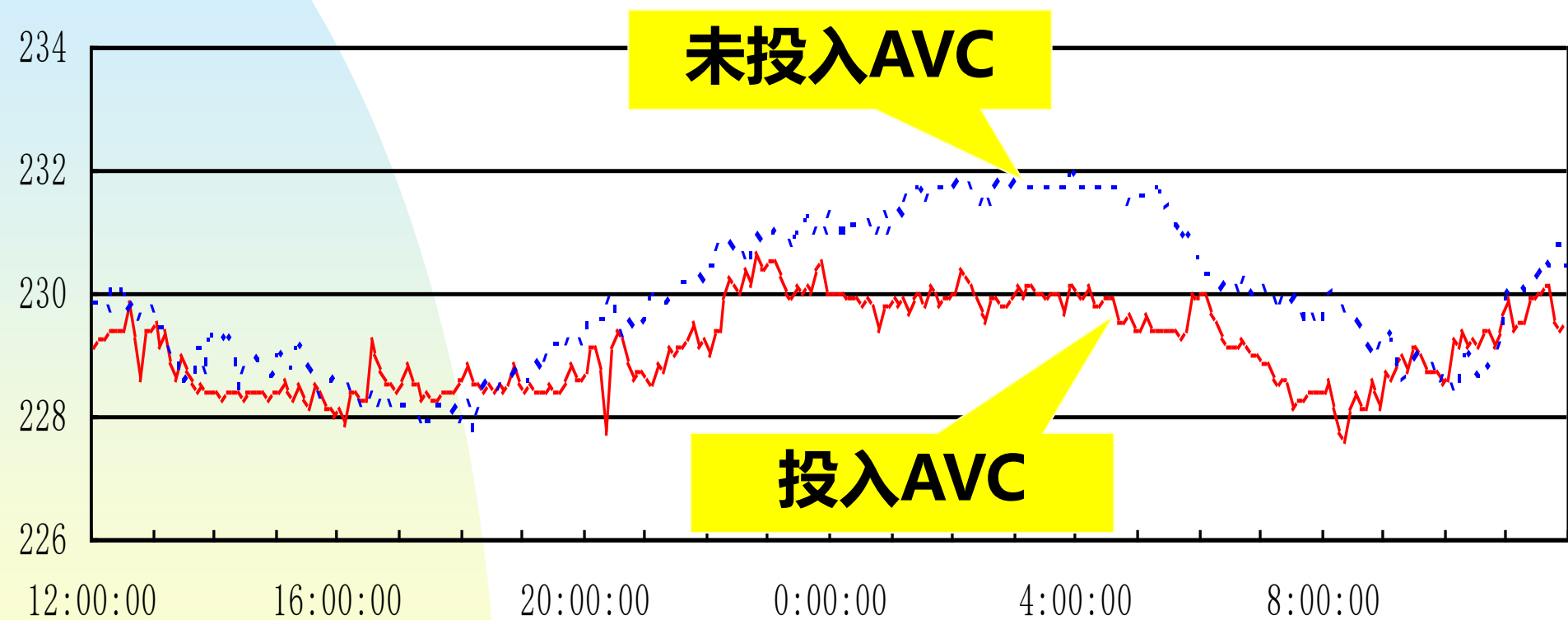
未投入AVC

投入AVC

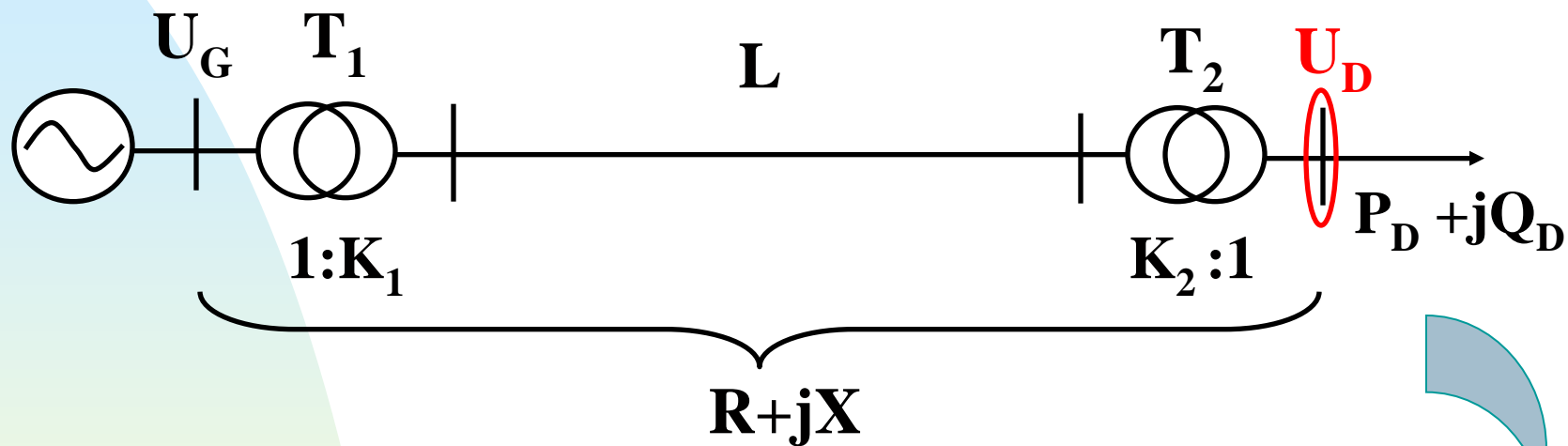


非中枢母线

宿迁变220kV_BUS I



三、电压控制原理



$$U_D = (U_G K_1 - \Delta U) \frac{1}{K_2} \approx \left(U_G K_1 - \frac{Q_D X}{U_N} \right) \frac{1}{K_2}$$

可能有几种控制措施？

电压控制原理

$$U_D = (U_G K_1 - \Delta U) \frac{1}{K_2} = (U_G K_1 - \frac{Q_D X}{U_N}) \frac{1}{K_2}$$

- (1) 调整 U_G
- (2) 调整变比 K_1 、 K_2
- (3) 改变无功功率分布 Q_D
- (4) 改变网络串联电抗 X



怎么做

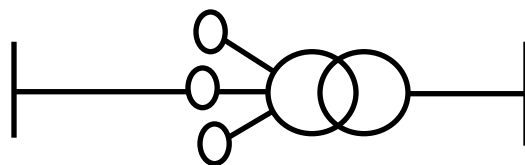
四、电压控制主要措施（简介）

1、利用发电机控制电压

- 调节励磁电压：
 - 易于逆调压, 实质上是调节发电机无功出力
- 两个问题：
 - 难以兼顾机端负荷和远方负荷的要求;
 - 多机系统中, 实际上是改变发电机间无功分配, 与无功备用、无功的经济分配有矛盾。
- 一般通过考虑约束的优化模型计算。而且, 不能完全靠发电机调压

2、改变变压器分接头控制电压

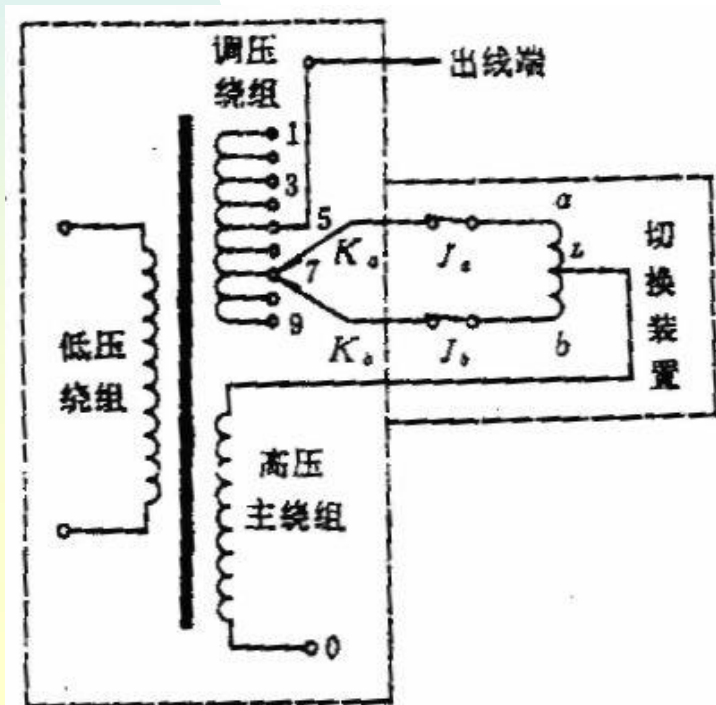
- 改变变压器分接头，改变变比



- 分接头通常设在高压（或高/中压）绕组侧
- 如：110 \pm 2 \times 2.5%/10.5kV,主接头？分接头几个？变比分别是多少？
- 思考：调分头和控制发电机（或无功补偿）的本质区别是什么？

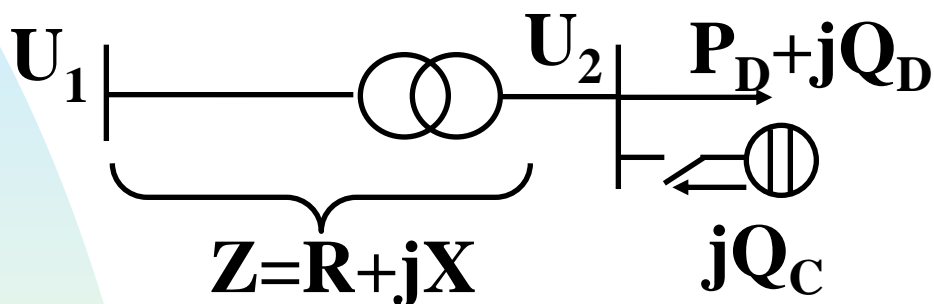
有载调压变压器

- 普通变压器：**停电改变分头**,选定分头要**兼顾各种负荷水平**，计算复杂。
- 目前普遍采用**有载调压变压器**：在不同负荷下，**可不停电**切换分头。



3、利用无功补偿控制电压

- 有调压和经济多目标，分并补和串补



- 并联电容器（并补，补偿 Q_D ）**：最小负荷时，一般全部切除；负荷增加时，投入全部或部分。
- 同步调相机（并补，补偿 Q_D ）**：最大负荷时，作无功电源；最小负荷时，作无功负荷。

串联电容器(串补, 补偿X)



加拿大500kV麦克利斯串补站
串连电容补偿装置



美国卡因塔220kV可控串补站

并补

减少Q流动, 直接减少有功损耗

通过减少无功流动而减少电压损耗, 不如串补明显(无功变化)

$$\Delta P_s = \frac{P_s^2 + Q_s^2}{U_s^2} R$$

串补

通过提高U而减少有功损耗, 等容量下不如并补作用强

由 X_C 上负电压损耗抵偿 X_L 上的电压损耗, 适用于电压波动频繁、功率因数低的场合(极端情况)

$$\Delta U_s \approx \frac{Q_s X}{U_s}$$

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

(Active Power and Frequency Control)

问 题

- 1、**频率偏移**有何影响？允许频率偏移量？
- 2、**频率水平**取决于什么？（**有功平衡水平**）
- 3、电力大系统的频率如何**控制**？
- 4、什么叫**一次调频**、**二次调频**和**三次调频**？

§1 电力系统的频率偏移

一、频率偏移对电能用户的影响？

- 什么是**频率偏移**？
- 电力设备在**额定频率**下设计：好技术经济性能，是电能质量的另一重要指标
- **用户观点**：要求提供f合格的**优质电能商品**

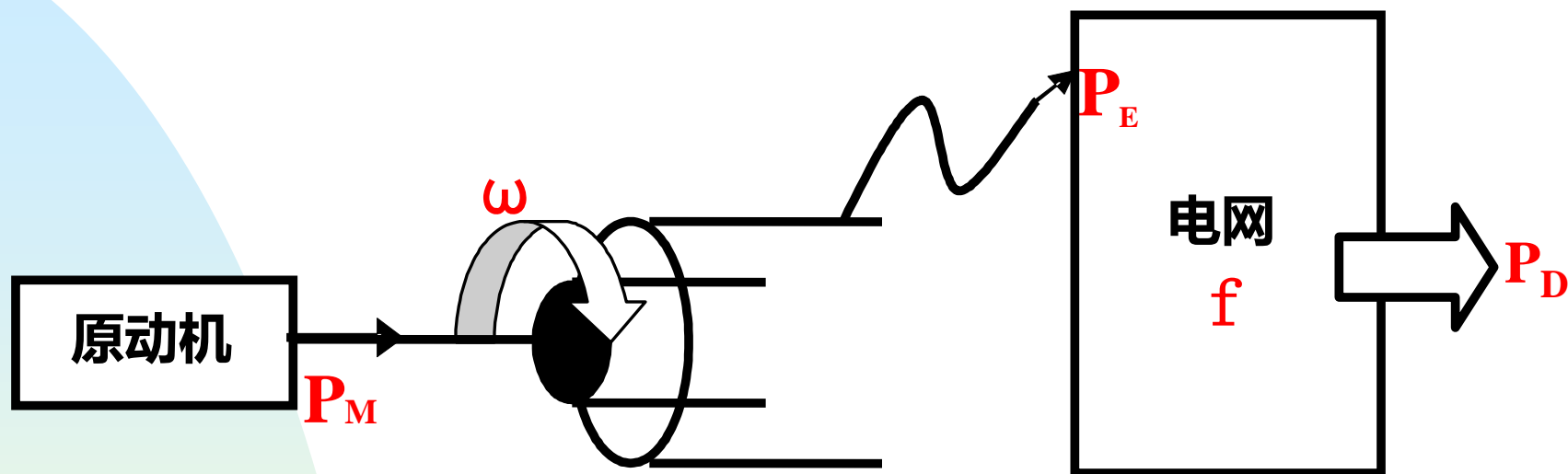
影响举例：

- **异步电动机**：f变化，转速改变，影响产品质量
- **电子设备**：对f敏感，要求更高，现代**投资环境**

二、电力系统观点：频率偏移对自身的影响

- **火电厂主要设备**：水泵、风机、磨煤机都是**异步机**， $f \downarrow$ ，输出 \downarrow ，有功发电 \downarrow ， f 进一步 \downarrow
- **汽轮机叶片**： $f \downarrow$ ，**共振**，缩短寿命，严重时断裂。
- **电机和变压器励磁**： $f \downarrow$ ，消耗**无功** \uparrow ，当无功不足时，电压 \downarrow

三、频率偏移可以避免吗？



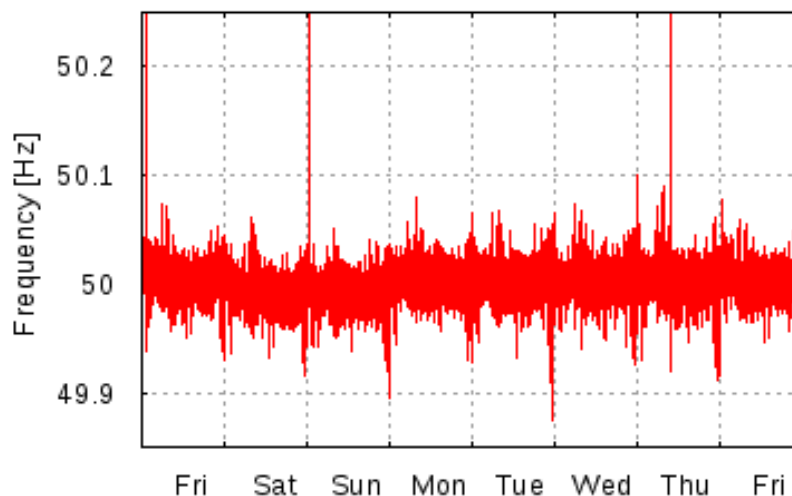
- 电网 f ：发电机转速 ω 的体现
- 当发电机 P_M 与 P_E 平衡时， ω 和 f 不变。
- 负荷 P_D 随机变化 \rightarrow P_E 随机变化, P_M 无法突变 \rightarrow f 随机变化
- 结论：频率偏移**不可避免**

四、频率偏移的允许范围？

目前我国国标规定： $50 \pm 0.2 \text{ Hz}$

发达国家（如澳大利亚）： $50 \pm 0.1 \text{ Hz}$

随着频率自动控制技术进步，华东电网已做到 $50 \pm 0.1 \text{ Hz}$



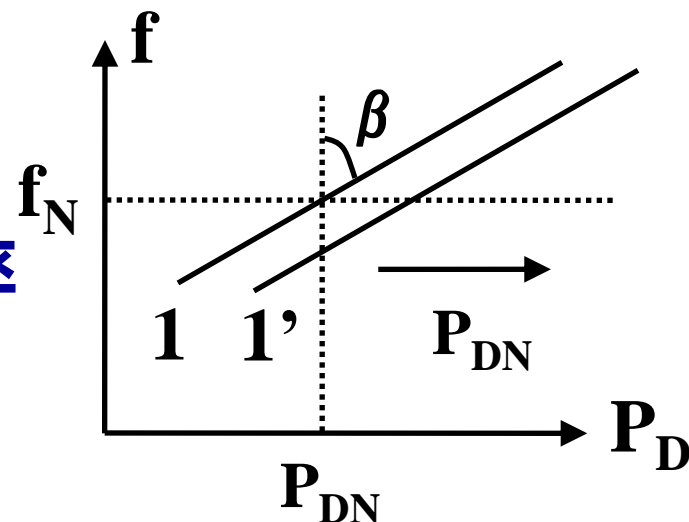
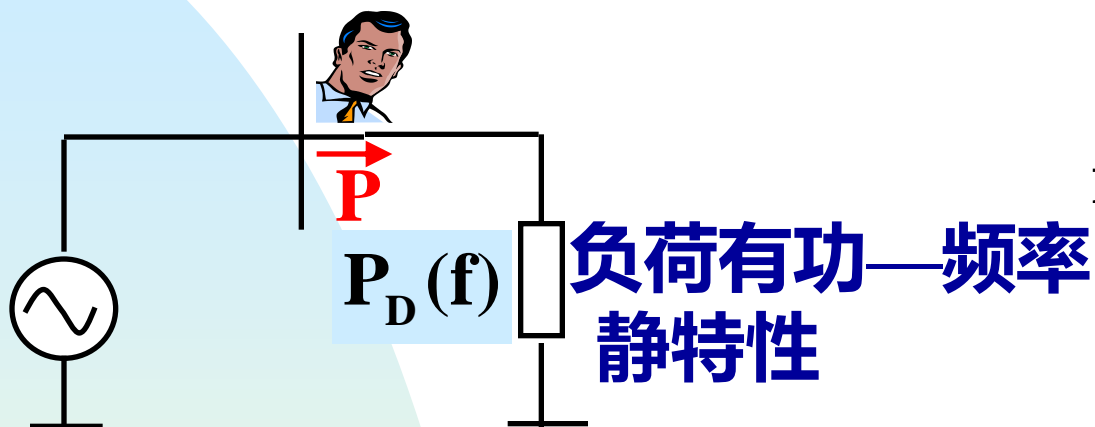
电网频率实时变化示意图



- 如何将频率**控制**在合理的范围内？
- 首先要研究的问题是：
 - **电力系统的频率水平取决于什么？**

§2 频率水平取决于什么？

一、小案例：用有功平衡确定频率水平

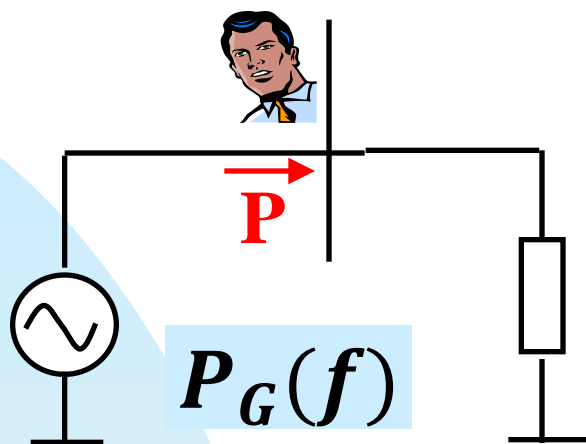


$$P = P_D(f) = a_0 P_{DN} + a_1 P_{DN} \left(\frac{f}{f_N} \right) + a_2 P_{DN} \left(\frac{f}{f_N} \right)^2 + \dots$$

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

主要成份为前2种，在 f_N 附近近似直线

有功负荷频率调节效应系数: $K_D = \operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta P_D}{\Delta f} \text{ MW/HZ}$



与负荷不同，发电机的频率调节特性取决于**调速系统**，可整定

思考：我们希望设计成什么样子呢？比如，系统频率 f 下降时， P_G 应该增加还是减少？

调速系统

调速器（一次调频）

检测部件：离心飞摆

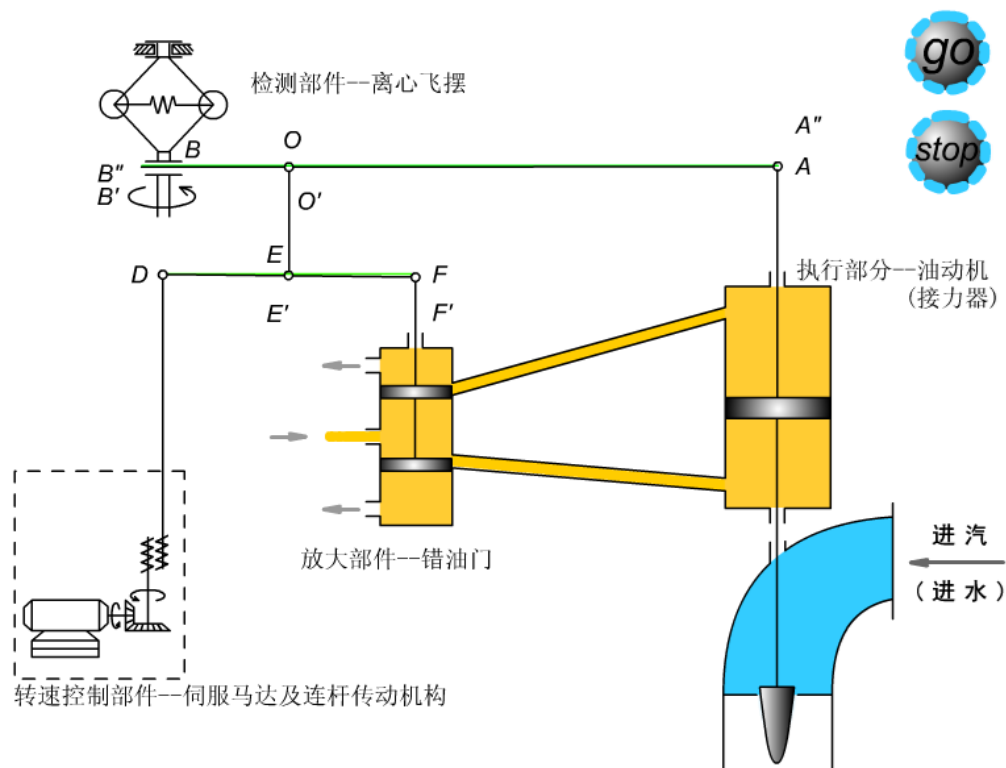
放大部件：错油门

执行部件：油动机

控制对象：汽门/水门

调频器（二次调频）

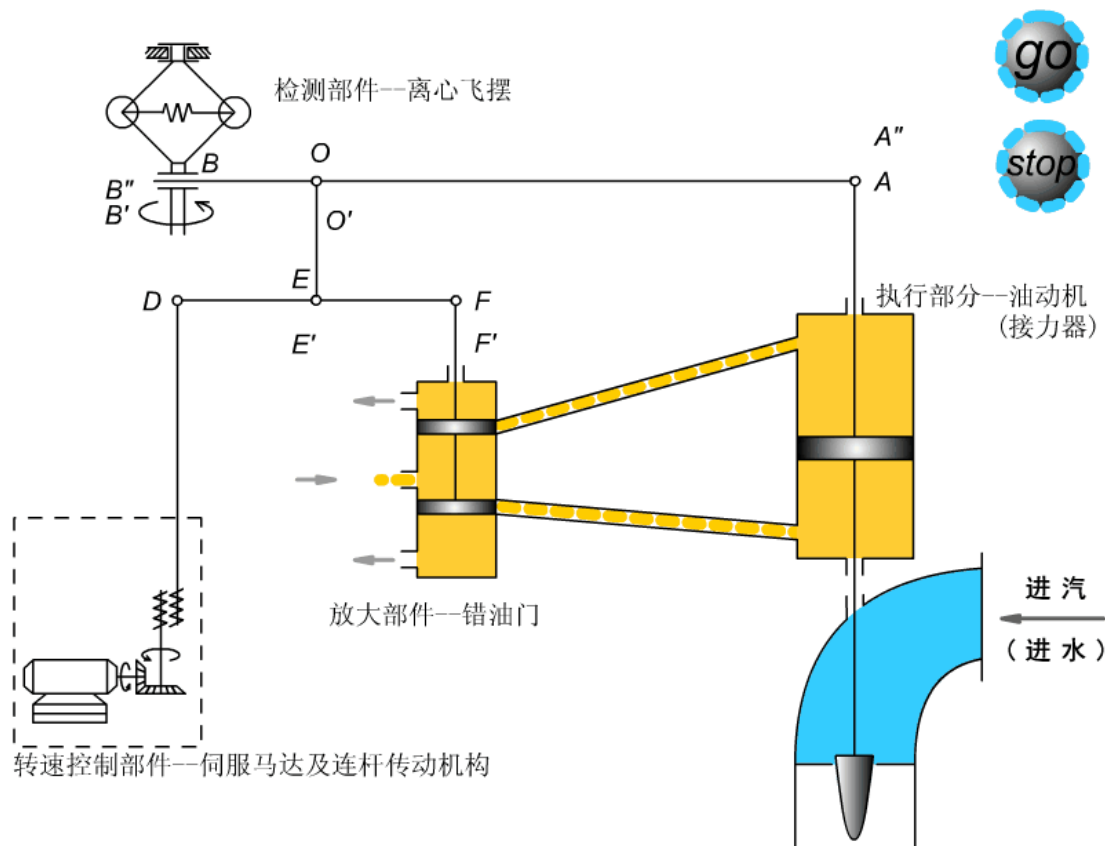
转速控制部件：伺服马达



机械液压式调速系统结构示意图

调速系统

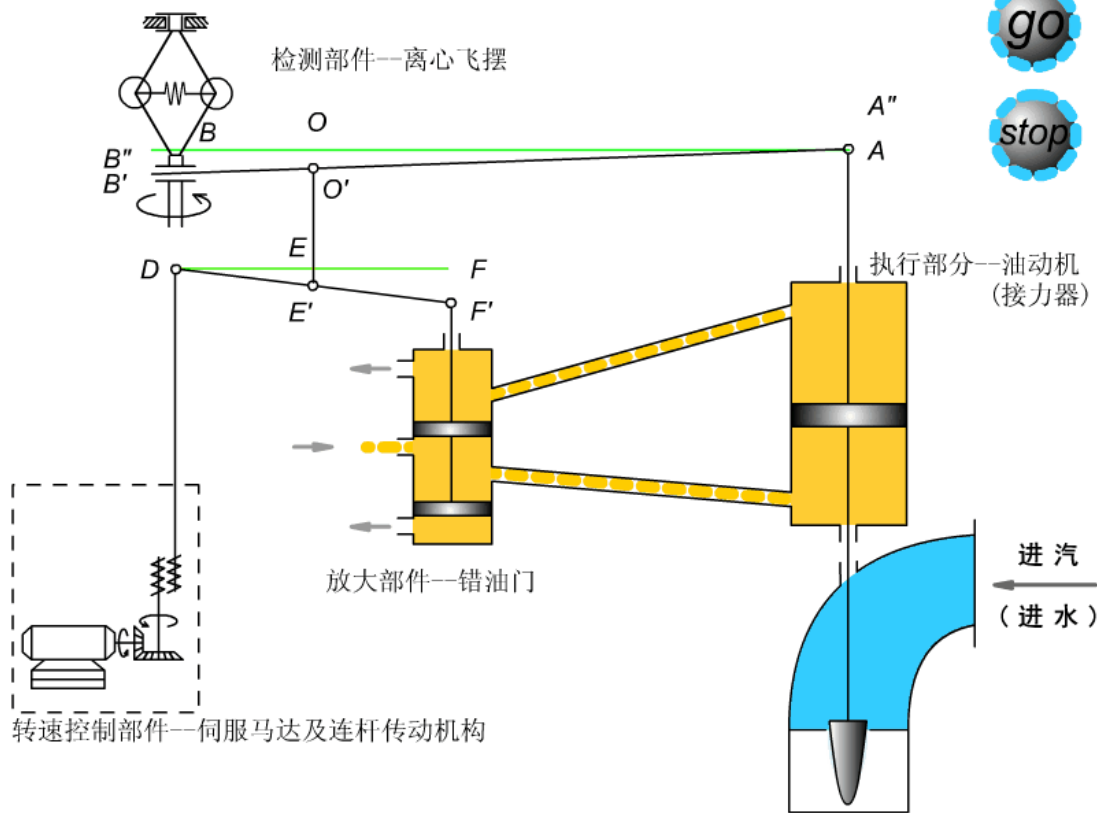
- 假设此时系统频率降低;
- 离心飞摆转速降低, B点下移至B' 点;
- 错油门尚未打开, 活塞不动, 因此A点保持不动, O点下移至O' 点;
- 调频器尚未动作, 因此D点保持不动, E点下移至E' 点, F点下移至F' 点;
- F点下移, 使错油门油路打通 (中口进、上口出), 油动机活塞即将上移;



调速阶段1
频率降低触发一次调频

调速系统

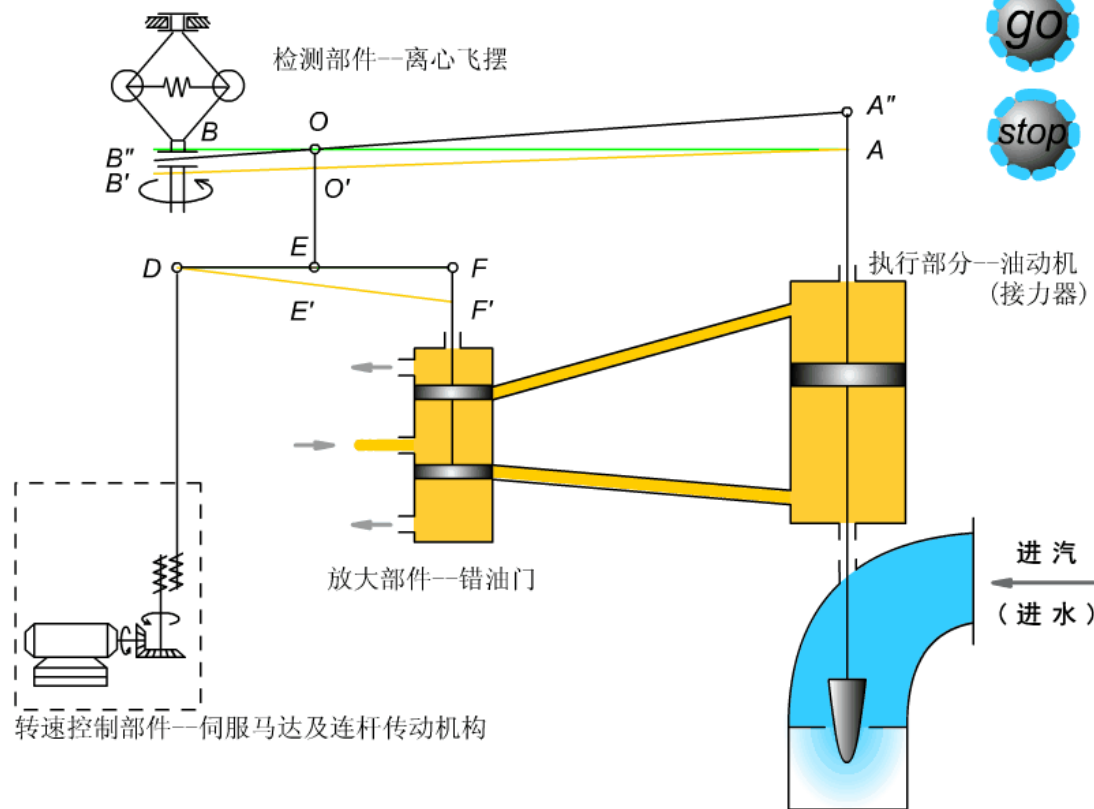
油动机活塞上移，A点随之上移；
A点上移使进气口开度变大，原
动机出力增大，频率开始升高，
飞摆转速增大，B'上移；
由于A，B'均上移至A''，B''，
因此O'，E'，F'点也随之上移；
当F'点回复至F点时，错油门
关闭，此时系统达到新稳态，活
塞静止；
新稳态下O，F，E点均回到原位置，
但B''低于B，A''高于A。说明经
调速器动作（一次调频）达到新
稳态时，系统频率、飞摆转速以
及气门开度均出现了变化。（有
差控制，B→B''）



调速阶段2
一次调频到达稳态

调速系统

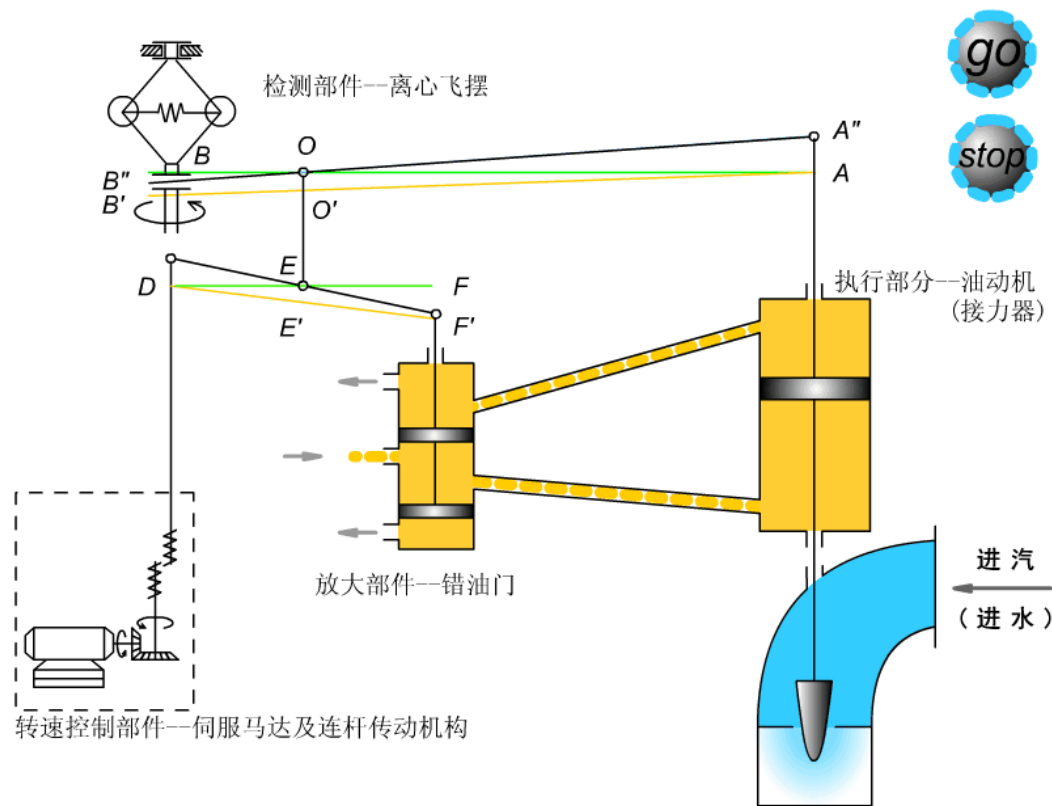
二次调频开始，伺服马达
动作，使D点上移
由于此时错油门未打开，
活塞静止A''不动，系统频
率尚未变化B''不动，因此
E点保持不动，使得F点下
移；
F点下移使错油门油路打通
(中口进、上口出)，油
动机活塞即将上移



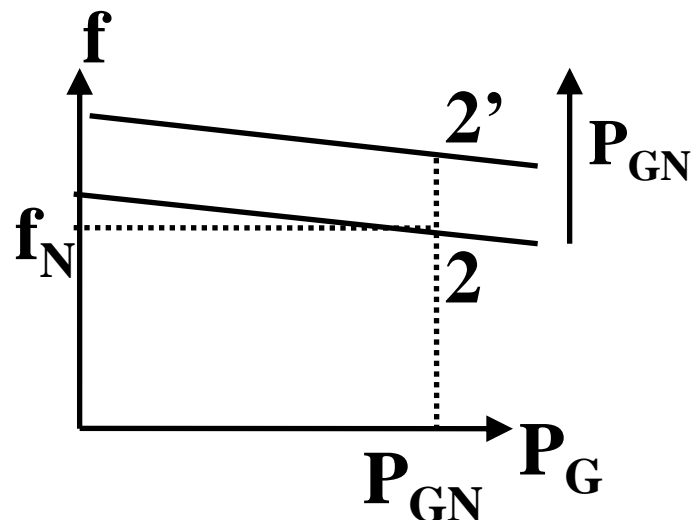
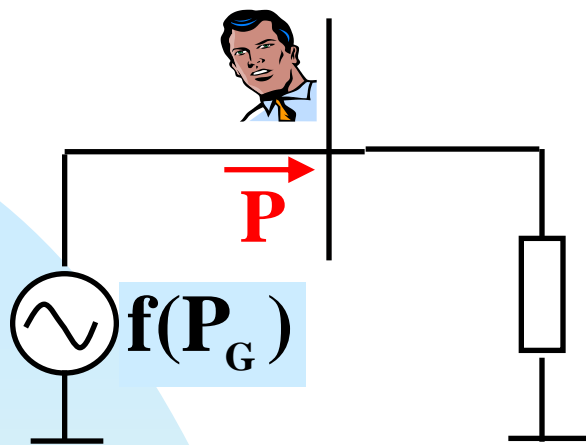
调速阶段3
二次调频动作

调速系统

活塞上移，使A''点继续上移，
同时原动机出力增大；
原动机出力增大，系统频率上升
飞摆加速，B''抬升；
A''与B''抬升，使O'点也抬升；
D点不动，E'和F'点抬升，使
错油门活塞上移；
活塞上移至油路封闭时，油动机
活塞静止，系统达到新稳态；
新稳态下，D，E点上移，F回到
原点（油门封闭），B点回到原
点，对应原频率（二次调频的
目的），此时原动机输出较原来
增加了（A→A''）。



调速阶段4
二次调频到达稳态

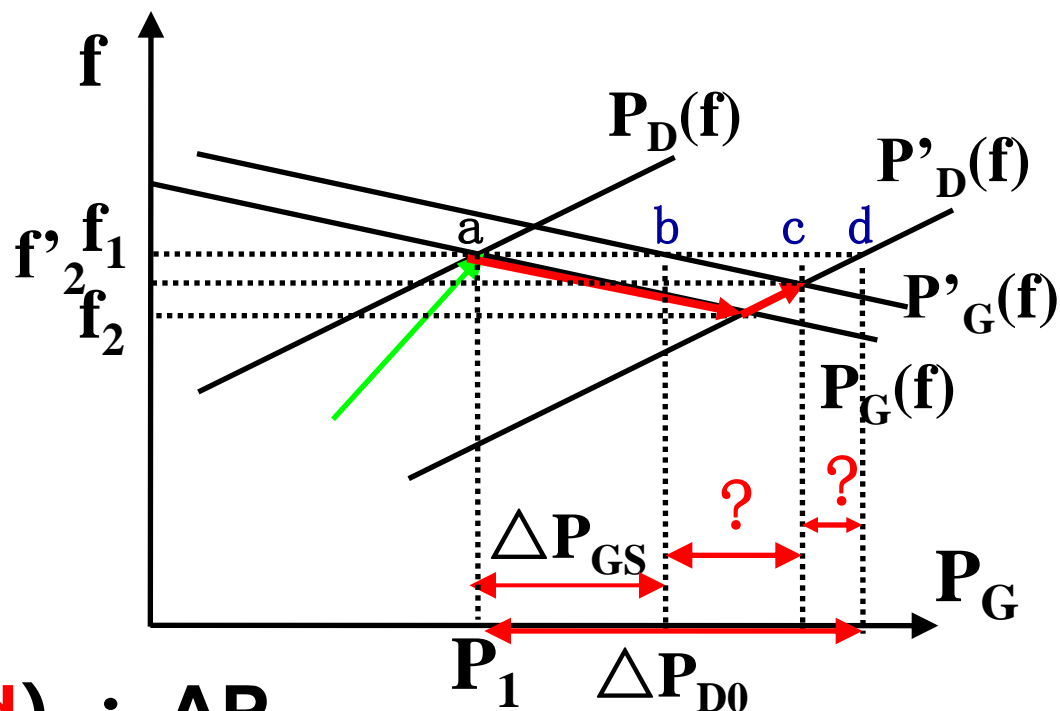


- **发电机有功——频率静特性**
- **一次调频：有差调节，近似直线（下垂控制）**
- **发电机静态调差系数** $\delta = -\frac{\Delta f}{\Delta P_G} \text{ Hz/MW}$, “-” 表示 f 、 P_G 变化方向相反
- **发电机功频特性系数** $K_G = \frac{1}{\delta} = -\frac{\Delta P_G}{\Delta f} \text{ MW/Hz}$
- **二次调频：近似直线族**

- 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: $\Delta P_{Df} = \Delta P_G$
- $\rightarrow \Delta P_{D0} + K_D \Delta f = -K_G \Delta f$
- $\rightarrow \Delta P_{D0} = -(K_G + K_D) \Delta f = -K \Delta f$
- 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？